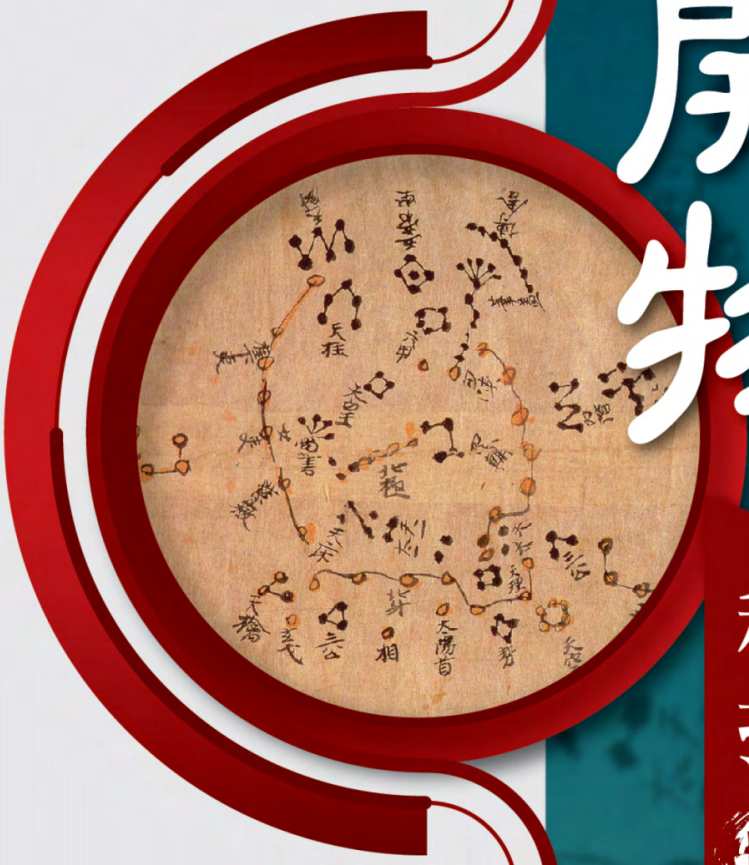
KAIWU

Science, Technology and Culture

開物

科技與文化

1 • 2023 創刊號

開物

編輯委員會

韓孝榮（主任）
馮錦榮
徐啟軒
潘律
李鵬
宗喀・漾正岡布
李建深
方小平

編輯組

張贇（組長）
潘亦迎
李萌
胡光明
林稚暉

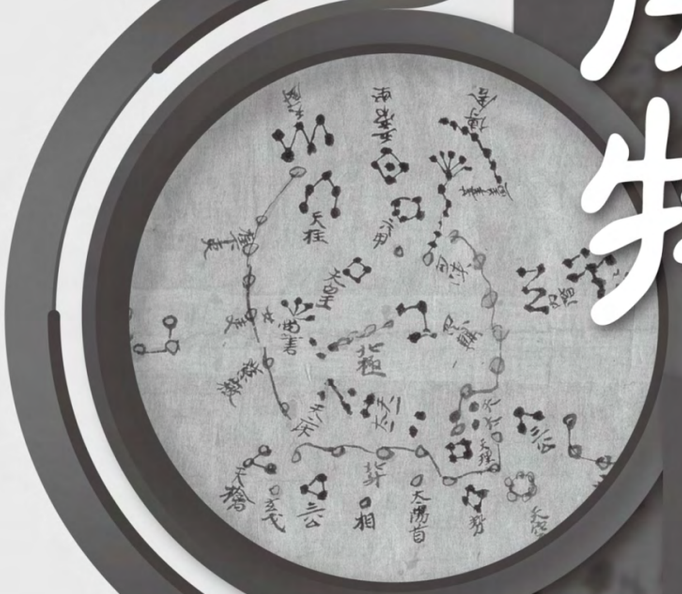
助理編輯

胡楠

科技與文化

KAIWU

Science, Technology and Culture



開物

科技與文化

1・2023 創刊號

開物：科技與文化
香港理工大學中國文化學系
中國歷史與文化研究中心 編

版權所有　不得翻印©2023 香港理工大學
出版日期：2023年3月

出版：
香港理工大學出版社
香港　九龍　紅磡
ISBN: 978-962-367-873-5

封面圖片：敦煌星圖，大英圖書館 (The British Library) 藏品，公共領域圖片。
封底圖片：東周青銅紐鐘，大都會藝術博物館 (The Metropolitan Museum of Art) 藏品，公共領域圖片。

掃瞄二維碼閱讀電子版

目　錄

《開物：科技與文化》創刊寄語 | 滕錦光 香港理工大學校長 2

《開物：科技與文化》發刊辭 4

清代疫病防治中的「靈丹妙藥」 | 劉小朦 6

「目盲」的發明：二十世紀初的沙眼防治與視力測量技術的日常實踐 | 王超 14

「用顯微鏡發現問題」：李順誠教授談秦始皇陵兵馬俑博物館及周邊大氣質量研究 | 李順誠 口述 李萌 訪問及整理 28

專輯：技術與社會 | 特邀編輯：李建深 香港浸會大學歷史系副教授 34

前言——技術與社會：藝術史、考古、現代科技的結合與未來展望 | 李建深 36

金屬文物價值認知關鍵技術研究進展 | 潛偉 39

成像技術與商周青銅器製作技術的研究 | 丹羽崇史 58

藝術史、考古、3D技術 | 李建深 75

3D技術與藝術考古：先秦全同青銅器之探索及相關議題評述 | 彭鵬 88

中國史前玉器技術淺說 | 鄧聰 104

結合高科技的中國古代玉器研究 | 廖雅婷 116

餘論——歷史研究需要科技，科技研發需要歷史 | 李建深 144

《開物：科技與文化》創刊寄語

香港理工大學校長　滕錦光教授

2018年7月1日至2019年6月30日，我在南方科技大學（南科大）擔任了整整一年主管科研的副校長和研究生院院長。我去南科大任職的引薦人，是中國科學院院士、著名計算數學家湯濤教授。當時，他向我介紹了他創辦的一本通俗類雜誌，叫《數學文化》。我覺得這本雜誌非常好，可以把數學和文化聯繫在一起，把數學家的故事和社會發展聯繫在一起，拉近數學和大眾的距離，將數學融入日常生活中。

在南科大工作了一年之後，我回到香港理工大學（理大）擔任校長。正是因為《數學文化》帶給我的啟發，使我想到了理大作為一所以理工學科為主的大學，或可以辦一本連接科技與文化的雜誌。於是，我把這個想法告訴了理大人文學院院長李平教授和理大中國文化學系系主任韓孝榮教授，他們對創辦雜誌的建議都很支持。此後，他們就着手籌備，這便有了現在已基本就緒的《開物：科技與文化》第一期的內容。在新雜誌即將和讀者見面之際，他們讓我寫幾句話，我就順便把這件事情的由來記錄在此。

辦一本這樣的雜誌，是非常不容易的。因為對於科研工作者而言，他們主要的工作是科研，或者是教學與科研並重。寫一些和科學技術相關的通俗性文章，並不是他們的主要工作內容，而只能是一種業餘愛好。《開物：科技與文化》希望發表的文章不僅僅是純粹的科普性文章，大部分的文章還應該採用通俗易懂、生動活潑的語言，把最新的科技進展和社會文化的關係揭示出來，把科研工作者的故事和大眾的生活聯繫起來。這是既有意義又很有挑戰性的工作。作者不僅要對所討論的科學技術問題有深刻的認識，還要對其帶給社會文化的長遠影響有足夠的洞察力和判斷力，並且要具備深厚的文字功力。中國文化學系和香港孔子學院的同事們敢於接受挑戰，創辦《開物：科技與文化》雜誌，令我欽佩。我代表理大感謝他們的努力付出。對於在百忙之中抽空給一本新雜誌準備高品質文章的各位作者，我也在此表達敬意和感謝。

辦一本新的雜誌，需要經費支援。冼為堅基金會的捐助為我們解決了這個問題。在此，我代表理大向冼為堅博士和冼太太兩位前輩表示衷心的感謝。不久之前，我邀請兩位前輩在理大教學酒店唯港薈聚餐，並向他們請教人生道理。他們波瀾壯闊的人生經歷、對教育文化事業的無私奉獻，都令我十分敬佩。

科學和技術推動社會進步，也促使文化蛻變。我希望這本雜誌能夠站立在科技巨浪的浪尖，回望過去，遠眺未來，做一個勇敢的弄潮兒。儘管時代變遷，滄海桑田，人類對美好生活的嚮往、對高尚品德的追求是恆久不變的。我希望人類社會這些最美好的精神，能夠使這本雜誌作為科技和文化之間的橋樑，歷久彌新。

最後，我祝《開物：科技與文化》前程似錦！

《開物：科技與文化》發刊辭

在2019年的泰晤士世界大學學科領域排名中，佔據藝術人文領域第二名高位的是理工名校美國麻省理工學院 (Massachusetts Institute of Technology)。雖然大學排名的精確度可能值得商討，但麻省理工學院對於人文學科的重視以及在人文領域，特別是科技與人文交叉研究方面的優異表現，卻是毋庸置疑。改革開放以來，中國內地許多在1952年院系調整之後改建而成的理工類和工科院校也開始大力發展人文學科，以圖恢復先前綜合性大學的建制。

這些理工類院校青睞人文學科的一個根本原因，是理工和人文本來就不應該也不可能截然分開，而人文學科也並不像一些人想像的那麼可有可無。無論是古希臘教育體制中的「七藝」，還是中國古代教育體制中的「六藝」，都崇尚文理兼備的教育理念。在全人教育和博雅教育日益風行的今天，自然科學、社會科學和人文科學都已成為高等教育中必不可少的要素。在現代社會中，正如人文專業的學生需要瞭解基本的科學知識，理工專業的同學也需要具備基本的人文知識。科學家和工程師們也並非生活在真空的象牙塔中，作為現實社會的成員，他們需要對人類社會、特別是自身所處社會的歷史和文化有所瞭解。在生活層面，文學、藝術、歷史和哲學等人文學科可以為社會各界人士，包括理工界人士，提供陶冶情操、修養精神和豐富業餘生活的有效途徑；在學術層面，跨學科研究的興起，已使學科之間的界線日漸模糊。跨學科研究，特別是科學與人文的結合之所以必要，首先是因為科學家們必然會關注的一些基本問題，如科學技術發展的歷史、科學技術對社會和文化的影響，以及科學研究的倫理等等，都不可避免地涉及到人文領域。更重要的是，人類所面臨的許多嚴峻挑戰，如公共衛生、環境、貧困和戰爭等問題，都只有通過包括理工和人文在內的各領域的密切合作，才有望尋覓到解決方案。

香港理工大學雖然是一所以理工科為主並且強調應用研究的院校，但自創設以來便一直重視人文領域的教學、研究以及不同學科之間的協作。早在1973年，成立不久的香港理工學院就已開設語言類課程，後來更由語言系發展為傳播學院。2006年，為了進一步在校園內外促進對中國文化的教學和研究，香港理工大學創設了中國境內的第一所孔子學院。兩年之後，又以中文及雙語學系、英文及傳意學系、新成立的中國文化學系以及香港孔子學院和兩個語言中心為基礎組建了人文學院。香港理工大學人文學院的主要特色之一，便是理工與人文的跨學科研究。

延續和發揚理大跨學科研究的傳統，是我們創辦《開物：科技與文化》的動機之一。取名「開物」，一是為了突顯這是一份以香港理工大學為依託的刊物，因理大校訓的第一句即為「開物成務」；二是為了紀念《天工開物》這部偉大的科技史著作；三是因為「開物」一詞的原意，「通曉萬物的道理」，恰好符合我們刊物的宗旨，即探索與科技、文化以及兩者之間關係相關的道理。

我們很高興能在創刊號中推出一組有關考古的文章，以一種特殊方式慶祝香港故宮文化博物館建成開館，而在經歷了由新冠病毒造成的幾年非正常生活狀態之後，相信同期刊出的有關醫療史的文章也能引起讀者的興趣。本刊將重點關注科學與技術研究對社會和文化的影響、科學倫理、醫療人文、數字人文、環境史、歷史地理，以及考古等交叉學科與新興前沿領域。

相信這份兼具學術性和可讀性的新刊物，將為不同學科學者的跨學科合作提供又一個便利的平台，並將有助於向社會大眾傳播有關科技與文化的資訊和知識。

清代疫病防治中的「靈丹妙藥」

劉小朦
復旦大學歷史學系
青年副研究員

一、「疫」與「藥」

自新冠疫情以來，「疾病改變歷史」成為大眾閱讀中廣受關注的話題，各種講述瘟疫歷史的書籍與文章成為了出版社、新媒體等領域的新寵兒。「隔離」、「口罩」、「疫苗」等疫情期間的熱門話題，也吸引了學術界的諸多討論。然而很多講述抗疫歷史的作品，往往會把視角集中在歷史上的「公共衛生」行為、慈善救助活動，乃至疫情期間的宗教救贖，卻很少有人會關注歷史上防治疫病的藥物。這也是我們現代理性的偏見，畢竟歷史上每場新瘟疫襲來，醫生通常缺乏有效的治療藥物，傳統治療方法的效果較差，感染疫病者往往只能聽天由命。歷史上疫病最終的結局要麼是自然消亡，要麼變成一種低死亡率的地方病，要麼是政府採取隔離檢疫等強制公共衛生手段控制疫情，要麼便是依靠接種疫苗逐步建立免疫屏障。藥物似乎從來都不是抗疫中的主角；而且以現代醫學的觀點來看，傳統醫學中的藥物很多都是不可靠的，甚至曾經流行一時的「神藥」，其效力的真實性也頗值得懷疑。

不過，人生病時總是會第一時間想到服藥，藥物治療在疫病史上從未缺席。從傳統時代的材料來看，有多種藥物曾在疫病流行的年代被廣泛使用。歐洲歷史上的底野迦 (Theriac) 便是一例，這種源自公元一世紀古希臘的萬靈藥用料豐富，製作工藝複雜，其中最主要的成分是毒蛇肉與鴉片。在歐洲黑死病流行的年代，它曾被當作是最為有效的藥物。[1] 然而底野迦價格不菲，並非一般平民可負擔得起。因而當時還有一種「鄉下人的底野迦」，那便是大蒜。當時的歐洲人認為黑死病源自瘴氣，而大蒜正是良好的避瘴藥物。從古代的用藥中，不僅可以看到古人對於疾病和治療的文化觀念，也可從中體察醫學的演進和轉型。接下來我們把目光轉向距我們不遠的19世紀：隨着西方殖民帝國的擴張，各種新型傳染病也在世界各地流行，身處東方的大清王朝也未能獨善其身。在一次次疫情的衝擊下，當時的人們是用甚麼藥物防治傳染病呢？我們就從兩位19世紀中期來到中國的法國傳教士的經歷談起。

1 Christiane Nockels Fabbri, "Treating Medieval Plague: The Wonderful Virtues of Theriac," *Early Science and Medicine* 12, no. 3(2007): 247-283.

二、 傳教士的病

1844年，法國傳教士古伯察 (Évariste Régis Huc,1813-1860) 與秦噶嘩 (Joseph Gabet,1808-1853) 由蒙古取道甘肅、青海前往西藏。[2] 當時清政府嚴禁外國人進入西藏，他們不得不喬裝成喇嘛，經過一年有餘的長途跋涉，終於在1846年1月到達拉薩。他們原計劃在拉薩傳教和考察後便前往印度；然而清朝的駐藏大臣琦善 (1786-1854) 卻懷疑這兩位不速之客來藏的目的，很快便決定將兩人驅逐出藏，解往廣州。幾個月後，他們到達了一座位於湖北省的小縣城。在面見當地的地方官員時，兩位傳教士突然腹痛難忍，並伴隨着劇烈的嘔吐。疾病來勢洶洶，地方官隨即派人去請當地最好的醫生前來診治。在等待醫生的過程中，地方官與隨行解送的官員開始探討病情。時值夏日，他們認為是暑熱導致了病人體內的津液不足，需要用性涼的藥物或食物來救治，最簡單的方法就是喝綠豆湯了。綠豆性涼，應當可以驅除暑熱。不過有人卻對此提出異議，認為喝太多綠豆湯過於寒涼，反而對健康不利。另一人覺得這種看法是多慮了，因為西洋人體質原本就要比中國人熱，所以喝綠豆湯並無大礙。此外，還有人推薦服用黃瓜和西瓜湯。

大家剛剛對這一問題達成一致，醫生便趕到了。來者身材略顯臃腫，戴着一副製作考究的眼鏡。他的頭髮和鬍子都已花白，應該是一位經驗豐富的老醫生了。他來到病人的床邊，先講了一通中國人和西方人體質差異的道理，便開始為兩位傳教士把脈。經過一番仔細斟酌，醫生斷定他們是被寒氣所侵，寒氣與體內的陽氣衝突，因而引起了嘔吐和抽搐，應選用性溫的藥物。醫生開好藥方，囑咐病人臥床休息，每小時服用一劑。醫生的診斷和此前官員探討病情的觀點互相矛盾，這讓兩位傳教士心生疑竇，但畢竟他們沒有更好的辦法，便遵循醫生的吩咐服下了湯藥。

第二天早晨，兩人的病情不僅沒有好轉，反而愈加危重。兩位傳教士開始發燒、頭痛、皮膚灼熱、腹部劇烈疼痛，病痛已經讓他們開始有些意識不清了。到了晚上，他們頭腦稍微清醒一些，聽到醫生想要用針灸為他們治療，頓時緊握雙拳，怒目圓睜。古伯察事後覺得這些反應有些失禮，但他們當時內心極度抗拒針灸治療，這也是自然的反應。醫生並沒有繼續堅持，只是對先前的藥方略加修改，便起身離去。

2 兩位法國傳教士的經歷參見 Évariste Régis Huc, L'Empire Chinois : faisant suite à l'ouvrage intitulé "Souvenirs d'un voyage dans la Tartarie et le Thibet" Tome 2 (Paris: L'Imprimerie Impériale, 1854).

第三天醫生又來了，這次他顯得信心滿滿。他帶來了一小瓶「靈丹」，據說療效顯著、起效迅速。醫生吩咐下人準備半杯熱茶，在茶中投入了十幾粒紅色的小藥丸。傳教士們雖心中不免疑慮，但仍服下了這半杯泡有藥丸的茶水。經過一個白天的休息，他們確實感覺有所好轉。當天傍晚，他們又分別服用了六粒小藥丸。第四天醒來，所有症狀都神奇地消失了，只是兩人大病初癒，身體仍有些虛弱。兩位傳教士得知這種紅色小藥丸有一個神奇的名字：「靈寶如意丹」。

三、何謂「靈寶如意丹」？

靈寶如意丹？如今的中成藥裏極少見到這樣的名字了，我們所熟悉的中成藥名稱或者帶有主要成分的名字，或者帶有主要療效的描述，或者二者兼而有之，使人一目了然。譬如在新冠疫情中名聲大噪的「連花清瘟膠囊」，從藥名中我們便可得知其主要成分有連翹與金銀花，主要功效是「清瘟」。然而「靈寶如意丹」這種玄妙的藥名卻讓我們現代人摸不到頭腦，還會懷疑這是哪個江湖郎中販賣的假藥。然而古伯察卻說這種藥物他們曾經聽說過，在中國各地都有着極大的名聲。在當時這是一種「萬靈藥」，可以用來治療多種疾病，具有神奇的功效，只是藥量和藥引需要根據具體情況進行配置。古伯察聽說這種藥是北京一個醫學世家根據獨家秘方精心配置，在中國各地的藥鋪都能買到。在北京的藥鋪，這種藥的售價為同等重量的銀子。

這種藥物在清代確實存在，並非古伯察或醫生的杜撰。靈寶如意丹是清代北京延齡堂藥鋪最出名的產品。《清稗類鈔》有載：

> 東安門內有賣靈寶如意丹者，定價不二，先與銀，乃付丹。每以紋銀之重量若干，易丹如其數，錢則每百易丹一錢。治病神效，故人爭市之。屋僅一廛，懸額為「青囊一卷」，其人以此起家，傳數代矣。[3]

古伯察對靈寶如意丹來源和價格的記載確實有據可證。據說此丹最早為皮贊公所創，並以此發家。後來附近有多家藥鋪仿製此藥，但藥效卻大打折扣了，只有延齡堂一家生意興隆。除了用料與製作工藝之外，配方的差異也可能是導致藥效不同的因素之一。當時的資料記載了多種藥物配方，各家藥鋪都略有不同。

3 徐珂：《清稗類鈔》第十七冊，(上海：商務印書館，1917)，頁56-57。

這類藥治甚麼病呢？據醫書記載，它主治「一切感冒風寒暑瘴、九種氣疼、痰迷心竅、各種痧氣、小兒急驚，並一切疑難雜症。」[4] 大致看去，這個小藥丸似乎無病不治，但往往列在首位的病症都是「風寒暑瘴」，大約可對應如今中醫所謂的「外感熱病」。清代對於疫病——也就是流行性傳染病——的解釋有兩種體系，一為傷寒派，二為溫病派。雖然兩派的理論複雜，但在一般人的理解中，大抵被簡化為兩種病因，那便是「風寒」和「暑濕」。因此靈寶如意丹也是清代治疫時常常選用的救命藥。

嘉慶、道光時期一本流行的溫病書籍《松峰說疫》中便推薦使用靈寶如意丹來治療「疫厥」，也就是感染時疫後病情嚴重、呈昏死狀態的病人。具體方法是把丹藥碾成粉末，吹入病人鼻中。[5] 這種治療方法也出現在法國傳教士古伯察的記載中。延齡堂印製的一本藥品價目單也保留了下來，列於首位的就是它的「旗艦產品」靈寶如意丹，在它一連串的主治病症中，位於前列的包括「霍亂轉筋」、「瘧疾」、「紅白痢疾」、「小兒痘疹」、「咽喉腫痛」，這些全部可歸入才現代傳染病的範疇。[6] 排第一位的「霍亂轉筋」則是19世紀初開始中國乃至全世界面臨的一種全新的疫情。

四、霍亂時代的方藥

讓我們再回到古伯察的故事。他經歷一場大病，也開始關注中國疾病的流行情況。在遊記中他特別提到了一場1820年發生在山東的疫情。據說當時黃河水莫名升起了紅色的霧氣，越積越厚，完全將水面籠罩在內。沿河居民見狀恐懼異常，開始焚燒紙符，丟進水中，並舉辦了一場大型的祈福禳災儀式，以期驅除邪氣。一日突然狂風大作，將紅霧吹上陸地，散入山谷、城鎮與村莊。紅霧所到之處，無論男女、老幼、貧富，紛紛病倒，死人無數。醫生面對這場瘟疫束手無策，以往的醫學理論和治療手段都完全失效了。

古伯察於1839年才首次到中國，他並未親身經歷這場疫情，而是聽中國人的轉述，其中頗具戲劇化和神秘色彩。不過從中我們還是可以得到一個關於疫情的重要信息：這場瘟疫是順着河道而來。根據中國人對病症的描述，古伯察得

4 吳師機：《理瀹駢文》卷七，同治四年 (1865) 刻本。

5 劉奎：《松峰說疫》卷三，清乾隆刻本。

6 《京都延齡堂皮贊公老藥鋪丸散膏丹價目》，民國鉛印本。

出結論，這場病無疑就是Cholera。Cholera現在一般翻譯成「霍亂」，是一種由霍亂弧菌引起的烈性傳染病，主要通過被細菌污染的水源傳播。「霍亂」一詞早在《黃帝內經》中已經出現，但古典醫籍中的霍亂指的是一類以吐瀉症狀為主的疾病，和現代的Cholera並不能畫等號。把Cholera與霍亂等同起來，是近代以後的事情。

不過醫史界一般認為，1820年開始的、在中國東南沿海地區廣泛流行的傳染病便是中國史上首次真性霍亂爆發，也就是由霍亂弧菌引起的疫情。致病菌很可能經由海路從印度傳來；疫情首先在嶺南地區出現，之後沿着海岸線一路北上，陸續波及江南、山東、河北、北京等地。當時的醫生也將這種疾病稱為「霍亂轉筋」，不過它還有更廣為人知的俗名：「吊腳痧」或「絞腸痧」。前者表現的是病人肌肉痙攣、抽搐的症狀，而後者則強調了腹痛如絞的感覺。[7]

此後，霍亂在江南地區頻繁出現，直至清末導致了十餘次較大範圍的疫情。王士雄是當時研究霍亂最著名的醫生之一。他在道光十八年 (1838) 出版的《霍亂論》最後記載了一個「屢試屢驗」的藥方：將一定比例的猺桂心、母丁香、倭硫磺、生香附、當門子等數味藥研末塗於肚臍之上，並用膏藥封貼。[8] 有證據表明，這種藥粉在霍亂流行的年代已經逐漸流傳開去了。

咸豐、同治年間，剛剛經歷過太平天國戰火的江南地區瘟疫又起，其中霍亂最引人注目。清代浙江名醫陸以湉 (1802-1865) 也親身經歷了這場疫情。他在杭州遇到了一名患絞腸痧的危急患者，幸而附近有一戶人家常備了這種貼肚臍的藥粉。但此藥造價不菲，陸以湉便紀錄下了藥方，期待有財力之人可以按方製藥、施藥救人。他自己治療絞腸痧的方法則簡單地多，外治法用針刺委中穴放血，內治法取陳年馬糞焙乾服用。這兩種方法都是他從《溫病條辨》中學來的。[9]

《溫病條辨》是清代名醫吳瑭 (1758-1836) 在乾隆五十四年 (1789) 出版的醫學作品，是「溫病學派」最具代表性的著作之一。乾隆年間真性霍亂 (Cholera) 尚未傳入中國，陸以湉何以參照吳氏的方法治病呢？實際上，19世紀的中國醫生在面對Cholera這種新型傳染病時，大多仍在中國古典霍亂的範疇中探討病因和治法。吳瑭稱這種馬糞做成的藥為「獨勝散」，可以治療危重的絞腸痧，他曾

7 關於嘉道大疫，詳見余新忠，〈嘉道之際江南大疫的前前後後：基於近世社會變遷的考察〉，《清史研究》，期2 (2001年5月)，頁1-18。

8 王士雄：《霍亂論》卷下，道光十八年 (1838) 刻本。

9 陸以湉：《冷廬醫話》卷三，光緒二十三年 (1897) 刻本。

用此法救過一名危急的女性患者。不過，吳瑭最為推薦的治療藥物卻是另一種更為正統的成藥：局方至寶丹。所謂「局方」，就是北宋《太平惠民和劑局方》。這部大型方書由北宋官方主持編纂，雖然金元四大家對其中的方藥多有批評，但它仍然在中國醫學史上佔有極重要的地位，後世很多名方皆出於此。吳瑭在《溫病條辨》中最推崇的三種藥物便是安宮牛黃丸、紫雪丹和至寶丹。其中後兩者直接出自《太平惠民和劑局方》，安宮牛黃丸則是由其中的牛黃清心丸化裁而來。這三種藥也被稱為「溫病三寶」。

既然《溫病條辨》裏有更好的藥物推薦，為何陸以湉會選用馬糞和放血療法呢？至寶丹不僅因為效果顯著被稱為「至寶」，它的配方裏也全都是「寶貝」：犀角、硃砂、琥珀、玳瑁、牛黃、麝香等等，幾乎全都是名貴稀罕的藥材，當時的普通人定是用不起的。因而不值錢的馬糞和簡便的放血便成了民間最實用的治病手段。那麼在這兩者之間就沒有折衷的方案嗎？湯藥可以嗎？當然可以！但是湯藥有一個比較大的缺點：不能救急。試想醫生開方後，病人需到藥房抓藥、煎藥，十分耗時。在病情危重的情況下湯藥並不實用。在治療霍亂時，吳瑭也推薦根據不同情況用理中湯、桂枝湯等經方來醫治，但遇到急症，就要先服至寶丹，再用湯藥。而19世紀以後，中國被捲入了全球化的世界中，在政治經濟遭受前所未有衝擊的同時，也面臨着新的烈性傳染病的輸入。在此情形下，一類防治時疫的日常用藥逐步流行起來。

五、「痧」與治「痧」靈藥

1901年，也就是《辛丑條約》簽訂的那一年，翰林編修華學瀾 (1860-1906) 由北京輾轉至貴陽主持鄉試。行程中，一日傍晚忽覺不適，他害怕自己將要發痧，便馬上取來隨身攜帶的紅靈丹放在鼻下嗅聞，並服用了一些痧藥。後來經過醫生診治，才發覺是虛驚一場。華學瀾的經歷或許會讓我們現代人倍感熟悉，大家在旅途中不都會帶一些常備藥嗎？從這段經歷中，我們可以看出「痧」似乎是一種常見的疾病，不然華學瀾何必隨身攜帶治「痧」的藥呢？那「痧」是甚麼？「紅靈丹」和「痧藥」又是甚麼？

上文說到霍亂的俗名是「吊腳痧」或「絞腸痧」，其中也有「痧」字。我們知道了每個名字前兩個字的意思，那最後一字「痧」又是何意？明清時代也出現

過被稱為「大頭瘟」、「羊毛瘟」的疫情，前兩字描述症狀，最後一字「瘟」也明確地顯示出流行病的性質。那「痧」又與「瘟」有何不同呢？「痧」與我們平時所說的刮痧有關係嗎？

「痧」在中醫古籍中很早就出現了，其意義多有變化。直至清代初年，「痧」被賦予了全新的含義。清代第一部專論「痧」的醫學著作《痧脹玉衡》就把「痧」和瘟疫聯繫了起來。不過「痧」最重要的特徵還不是其傳染性，而是發病急促、症狀強烈，如不及時救治，病人往往會在短時間內死亡。正因如此，「痧」的治療方法也多以刮挑針刺等外治法來救急，以清除體內的「痧毒」。現在我們熟悉的「刮痧」，就是源自這一時期。清代講解痧症的醫書多是偏重實用性的手冊，對疾病辨證的理論探討尚不完備，爭議頗多。儘管如此，「痧」的概念和治療方法在清代社會中流傳日廣，成為了多種流行病、急性病的總稱。[10]

上文提到陸以湉治療絞腸痧便用到針刺放血法，吳瑭也提到這種方法在乾隆年間已在民間流傳。不過當時大部分的正統儒醫對這種侵入性的療法頗為不齒。對於痧症，他們也多以方藥來治療。除了一些常用的經方、時方之外，王士雄在《霍亂論》中建議針對嚴重的「痧證」患者需要用臥龍丹吹鼻，並服用八寶紅靈丹，如果沒有這兩種藥，那麼紫金錠和塘棲痧藥也可以，這就是所謂的「急則治其標」。這裏紅靈丹、痧藥之名又出現了。這些藥是當時人在日常生活中經常使用的成藥，這些藥方也在各種各樣的驗方書籍中流傳。而各地藥鋪則看準商機，把這些治「痧」之靈藥做成「旗艦產品」，頗受時人歡迎。上海等地還有專門售賣痧藥的藥店。

塘棲痧藥大概是當時最有名的一種「痧藥」了，由浙江塘棲鎮的致和堂首創，遠銷北京、杭州、武漢等地。八寶紅靈丹是廣東保滋堂的產品，其他地區的藥鋪也有仿製，有的藥鋪將其製成散劑，稱為「諸葛（武侯）行軍散」。另有兩種類似的藥物叫作「臥龍丹」、「人馬平安散」。據傳這些配方是諸葛亮 (181-234) 為防治軍隊疫病流行而發明的，這當然是無稽之談，只不過是藥鋪的廣告策略而已。

雖然每個藥鋪都會說自己的配方是不傳之秘，但實際上這些打着諸葛名號的治疫藥物所含成分大同小異。這些都是當時人們日常常備的應付流行病的藥物。北京延齡堂的靈寶如意丹當然也可以歸入此類，算作廣義上的「痧藥」。此外還有「痧氣丹」、「痧藥丸」、「避瘟丹」、「萬應錠」等名目繁多的藥品，針對的都是時疫、暑氣等所引起的「痧症」。

那麼這些藥物有甚麼特點呢？首先在形制上它們都是小粒的丹丸或藥粉，其中「萬應錠」是細小的紡錘形，因為形似，還被戲稱為「老鼠屎」。這些小藥丸一般儲存在小瓷瓶中，方便隨身攜帶。這類藥的主要賣點之一就是方便，可以在旅途中攜帶，在缺醫少藥的地方可以大派用場。其次，這些藥物配方往往含有多種礦物藥、動物藥或香藥，比如硃砂、雄黃、牛黃、蟾酥、麝香、冰片等等。這些藥物因價格昂貴、藥效峻烈，在日常診療中較少使用，但當時的醫生認為，在身患痧症、病情危急時，這些藥料頗有奇效，既可驅除體內邪氣，又可涼血通竅。

六、結 語

到了民國時期，隨着西方現代醫學的傳入，「痧」的概念逐漸式微，取而代之的則是細菌理論和傳染病的概念。不過，這類治痧靈藥依然在社會中流行，直到20世紀50年代之後方才被其他更為「現代」的中藥製劑取代。時至今日，大部分中國人對這些藥名都已經相當陌生了。這背後的因素並不全然是醫學理論的變遷，社會經濟與政策性的因素亦不容忽視。這些治痧靈藥中所含的礦物藥與動物藥成分，在現代社會中飽受爭議。現代醫學認為硃砂、雄黃一類的礦物藥含有重金屬元素，長期或過量服用對人體有潛在的危害。而動物藥則涉及到野生動物保護與倫理問題，由於犀角、麝香的需求，犀牛和麝鹿都面臨着滅頂之災。出於這兩方面的考慮，國家醫藥法律法規對礦物藥和動物藥的管理日趨嚴格，這一類曾經流行的「痧藥」已經不適合大規模生產，因而淡出了中國人的生活。雖然個別藥物仍在生產流通（比如「溫病三寶」中的安宮牛黃丸），但已大量使用人工牛黃、人工麝香以及水牛角濃縮粉作為替代品。

現代社會大多把中醫當作一種調理慢性病的選擇；對於中國醫學歷史上救急藥物，除了中醫和中醫歷史的研究者仍然關注之外，其他人幾乎已完全忘卻，或鮮有耳聞。不過此次新冠疫情讓世人看到了中醫藥在救治患者中的潛能，中國醫學歷史上的「傷寒」與「溫病」傳統又被發掘出來應用於當代的抗疫實踐中。當然，本文回顧這些歷史上的治疫「靈丹」，目的並不是為這些歷史中逝去的藥物招魂，而是為了介紹清代社會在面對傳染病挑戰時產生的一種藥物文化。古人的藥物或許不如我們現代化學與生物製劑那樣具備穩定而可靠的療效，但他們在面對傳染病時並非束手無策，仍然有其獨特的防疫、治疫策略。

10 關於清代的痧症，詳見祝平一，〈清代的痧症：一個疾病範疇的誕生〉，《漢學研究》，卷31期3 (2013年9月)，頁193-228。

「目盲」的發明：二十世紀初的沙眼防治與視力測量技術的日常實踐

王超
香港中文大學（深圳）

摘　要

「沙眼」(Trachoma) 作為一種通過接觸傳染的慢性致盲性眼病，在我國經歷了超過半個世紀的大規模蔓延，其傳播之廣曾達到「十人九沙」的程度。在1957年我國微生物學家湯飛凡 (1897-1958) 成功分離出沙眼衣原體之前，中外眼科學界始終未實現針對沙眼病毒的臨床治癒。這意味着在公共衛生系統尚未成熟的20世紀初，沙眼在社會的大規模流行加重了患者的致盲率，從而直接影響了國民政府以城市為中心的現代公民建設。本文以1920年代開始的「防盲運動」為背景，探討現代眼科學界、中外公共衛生專家及國民政府如何展開針對大眾的眼病預防知識的普及，並以視力損傷對國民生產力的威脅入手，分析生物醫學知識如何建構現代公民身份。在此過程中，防盲專家通過引入沙眼臨床分期法，並結合現代醫學對視力測量的標準，達到對沙眼患者的工作能力與教育資格的劃分，從而建立了醫學對身體損傷及致殘標準的解釋力。筆者希望從20世紀初圍繞沙眼防治的大眾防盲運動出發，揭示由疾病帶來的身體損傷如何影響社會對個體身份的認知。本文通過強調眼科傳染病診斷技術與視力功能測量方法的結合，力圖呈現臨床知識在社會空間的延展。

一、引 言

自上世紀80年代起，全球的沙眼患者已從3.6億人銳減至今天的近8,000萬人。中國自加入世界衛生組織 (WHO) 的SAFE行動後，已成功走上了消滅傳染性眼病的道路。[1] 據1987和2006年的兩次全國殘疾人抽樣調查統計結果表明，我國的沙眼患者中致盲的人數已被成功控制在10萬人中僅有不到50人。[2] 對致盲率的有效遏制，使得沙眼逐漸淡出了公共衛生的視野。然而，超過半個世紀以來的沙眼防治史對中國社會的影響是深遠的。據美國眼科醫生郝爾德 (Harvey J. Howard, 1880-1956) 在1925年根據北平（今北京）協和醫院眼病患者的統計，中國至少有2,500萬人因患眼疾導致目盲，而沙眼佔了其中半數以上。[3] 這一在20世紀上半葉最具傳染性的眼病曾極大地影響了國人對於視力損傷的認知，伴隨着始於1920年代的「防盲運動」，現代眼科學界、中外公共衛生專家及國民政府三方積極開展針對大眾的眼病預防知識的普及，並以沙眼致盲對國民生產力的威脅，推動生物醫學知識在建構現代公民身份方面的合法性。

本文試圖通過追溯沙眼防治在20世紀公共衛生制度建立初期的發展，探討「防盲」這一衍生概念，如何影響醫學對視力損傷的認知，並進而參與到社會對公民能力的識別與劃定過程中。近年來，西方學者在重新檢視民族國家形成的歷史時指出，現代公民身份往往以種族、智力及身心健康等生物屬性的評估為前提，並以此作為國家對生理損傷的群體實現法律與社會保障的基礎。[4] 例如，人類學家佩特里納 (Adriana Petryna) 率先將現代公民身份的構建置於後災難情境中討論。通過研究「切爾諾貝利事件」後佔烏克蘭人口百分之七的核輻射受害者所發起的爭取社會福利的新型運動，她發現這場運動反映了基於公民生命與身體損傷提出的社會權利訴求。[5] 這一建立在災難敍事的公民身份表達自下而上地檢視了國家在面對損傷群體時的被動，突出政府對受害者訴求回應的滯後性。筆者基於這一思考模式提出新的設想，即從突發性災難事件轉向慢性傷病作用於個體的持久影響，以實現拓展現代公民權的生理邏輯在日常衛生實踐的可能性。沙眼作為一種典型的慢性致盲眼病，其廣泛地接觸性傳播與清末民初公共衛生防疫制度的發展密切相關。在這一歷史背景下，沙眼患者所面臨的視力損傷與失明的臨床症狀，伴隨着現代眼科學測量技術的引入，實現了更為精準的表達。本文以沙眼的診斷技術在公共衛生領域的應用為切入點，分析個體疾病及致殘經驗與統計學知識在傳染病防治實操過程之間的互動。其間，沙眼分期法的視覺化圖譜在臨床診斷的應用，以及視力測量表在工廠、學校和社區的普及，反映了醫學知識在公共空間的延展。

1 自從1990年代中期，世界衛生組織 (WHO) 提出了有效的控制沙眼傳播的四個要素即"SAFE"戰略。該戰略代表的是眼瞼手術 (Surgery)、治療感染的抗生素 (Antibiotics)、面部清潔 (Facewash) 以及環境變化 (Environmental change)。

2 T. Liu, et. al, "Elimination of Blinding Trachoma in China," *Journal Français d'Ophtalmologie*, 39, 10 (2016) , pp. 836-842.

3 Harvey J. Howard, "Trachoma in China", in *The Prevention of Blindness: Report Published by the League of Red Cross Societies* (Paris, 1929), p. 35.

4 Nikolas Rose and Carlos Novas, "Biological Citizenship," in Aihwa Ong and Stephen J. Collier eds., *Global Assemblages: Technology, Politics, and Ethics as Anthropological Problems* (Hoboken: Blackwell Publishing Ltd, 2005), pp. 439-441.

5 Adriana Petryna, "Biological Citizenship: The Science and Politics of Chernobyl-Exposed Populations," *Osiris*, 2nd Series:Vol. 19 (2004), pp. 250-265.

下文分三節討論20世紀初的沙眼防治在眼科醫生、公共衛生專家及國民政府三方面的展開，並藉此分析「防盲」這一衍生觀念，如何塑造生物公民權在日常實踐中的表達。第一節通過追溯沙眼的傳染性被現代生物醫學知識定義的過程，將目盲作為可預防的健康風險置於清末民初中西醫遭遇的情境下討論。與此同時，在佔據主導解釋力的生物醫學干預下，沙眼的臨床診斷與新的身體測量技術結合。這一圍繞視力測量表在量化沙眼對視力造成的損傷及大眾防盲知識普及方面的推廣，將在第二節展開，並集中分析第一批受西方訓練的眼科醫生參與製造「目盲」的標準。[6] 直至1930年代，現代眼科學對致盲性眼病的防治才正式納入國民政府以城市為中心的公共衛生運動中。眼科專家在社區、學校、工廠及城市救濟機構展開對沙眼的調查，並建立流動式沙眼診所免費為市民診療。這一自上而下的防盲運動，不僅反映了醫學知識從臨床向社會空間的延展，也同時深化了生物公民身份在日常的實踐。

本文通過描述生活在20世紀初期的城市居民所面對的日益深化的公共衛生危機，反思慢性疾病對個體身份的規範。筆者指出，致盲致殘帶來的健康風險使個體的生理經驗與面向社會的疾病防禦緊密相連。其中，醫療數據對沙眼的臨床診斷、統計與社會宣傳為公共衛生干預提供了實證基礎，從而拓寬了現代公民權的內涵。

二、沙眼致盲的醫學知識論演變：1910-1930

沙眼在當今醫學界被定義為傳染性結膜炎的一種，其致病原理自1957年我國微生物學家湯飛凡 (1897-1958) 成功發現並培育出沙眼衣原體後，開始被普遍認知並引入抗生素治療。感染沙眼的患者往往會經歷從初期的眼瞼紅腫，出現形似沙粒的瘢痕到中後期的眼瞼內翻，導致角膜損傷、視力模糊直至失明。在沙眼病毒被發現的一個世紀以前，國人對沙眼的病症已有較為細緻的描述。與白內障造成的白色渾濁物相似，沙眼導致的紅腫瞼與顆粒狀分泌物出現在19世紀末的醫學文獻中。但此種病症被中醫籠統地解釋為邪氣入侵，而非針對其致盲原因與傳染性進行探討。沙眼的療法也多摻雜了民間信仰的成分，如患者及其家屬往往會前往當地的眼光娘娘廟求藥。[7] 由此可見，國人對致盲眼病的危害主要來源於描述性的個體經驗，尚未形成系統的認知。

鴉片戰爭後，基督教新教傳教士大量湧入口岸城市，在條約所劃之地開辦西醫診所收治中國患者。最早一批在中國行醫的傳教士所擅長的專業即為眼科，尤為知名的有伯駕 (Peter Parker,1804-1888) 於1835年在廣州設立的博濟醫院，以及他通過外科手術治癒失明患者的案例。然而，在微生物學創立現代醫學之前，早期來華的醫療傳教士對治療傳染性眼病方面並無明顯優勢，他們的興趣也僅限於挑戰傳統醫學在應對致殘疾病時的保守態度，並借手術刀對病體的療癒效果實現其宣教功能。[8] 直到辛亥革命爆發後，帝制的解體為激進派領袖主導的社會改革創造了條件，但事實上盤踞於中國的列強與其在租界享有的治外法權也使到關鍵的現代化舉措，如對公共衛生的實踐，帶有明顯的殖民主義色彩。這一特徵明顯地表現在中國沿海的早期工業化城市在管理傳染病帶來的健康威脅上。正如常駐上海的醫療傳教士協會秘書長麥克斯韋 (James L. Maxwell,1836-1921) 所稱，沙眼在中國的傳播極廣且對視力損傷極大，這主要歸咎於中國人對手眼接觸傳播的疾病缺乏認識。他在與時任上海同仁醫院的外科醫師傑弗瑞 (W. Hamilton Jefferys) 合著的《中國的疾病：包括台灣和朝鮮》(*The Diseases of China : Including Formosa and Korea*) 一書中指出，沙眼導致的慢性病變，往往使患者掉以輕心，更有甚者病急亂投醫，如請剃頭匠用刮刀擠出眼瞼上的膿腫以減輕痛苦。這些毫無衛生觀念的愚昧做法無疑加劇了細菌的傳播，使目盲變得不可避免。[9] 有別於早期醫療傳教士對中國病人信仰上的衝擊，20世紀初來華傳教士開始以細菌理論為依據，證明西醫對傳染病防治的優勢，並透過中國人「不衛生」的習慣與因病致殘的後果強化落後的種族形象。

值得一提的是，為傳染病貼種族標籤的做法並不僅限於西方殖民者。例如清末民初的學者徐珂 (1868-1928) 在《清稗類鈔》中即提出「眼病與種族至有關係」，並稱沙眼在東亞出現最多。在日本，此病已被翻譯為「顆粒性結膜炎」，

6 因沙眼致盲的患者又稱「經濟盲」，即裸眼視力低於1/60，等同喪失勞動能力。

7 Ruth Rogaski曾以天津為例，指出民間信仰對中醫的「衛生」觀提供了豐富的實踐基礎。見Ruth Rogaski, *Hygienic Modernity: Meanings of Health and Disease in Treaty-Port China* (Berkeley: University of California Press, 2004), p.68&73. 魯迅在其雜文中也曾提到，在家鄉紹興，患眼病的人會用布或綢做一對眼睛掛在眼光娘娘的神龕上祈求治癒，可見該信仰在南北的普遍流行。見魯迅，〈論照相之類〉，《魯迅全集》https://www.marxists.org/chinese/reference-books/luxun/01/020.htm.

8 關於早期傳教士通過外科手術改變因病致殘患者的醫療敘事，見王超，〈從差異到融合：殘障的醫療與社會模式在近代中國的演變〉，《裝飾》，卷4期336 (2021年4月)，頁27-28。

9 W. Hamilton Jefferys and James L. Maxwell, *The Diseases of China, Including Formosa and Korea* (London: Bale and Danielson, 1910), p. 636.

而在中國，沙眼實為中醫對「椒瘡、粟瘡」這類因脾胃血熱導致的眼病的俗稱。許多患者因不自知，導致全家皆被傳染，病重者更至失明。[10] 徐氏以沙眼類比種族的落後，反映了殖民醫學對本土的文化衝擊。正如雷祥麟在其研究1910-11年在奉天爆發的滿洲鼠疫一文中指出，顯微鏡下呈現的事實在指導大規模防疫上具有中醫所不可比擬的效果，從而建立了殖民知識對傳染病的解釋權。[11]

另一方面，新的醫療衛生觀念在日常生活領域的傳播也依靠本土精英的參與，而這在慢性傳染病頻發的日常生活領域顯得尤為突出。在民國初年的上海，中醫群體便展開了對沙眼的傳染與致盲性的討論。其中，陳滋是最早提倡中西醫結合治療眼病的先驅。陳氏早年曾在同仁醫院任翻譯，後赴日求學，於民國初年返回上海創辦眼科診所。開辦一年內，診所接待的眼病患者中被診斷為沙眼的高達65%。陳隨後將其報告刊登在《中西醫學報》上，並為此病的發病過程提供了仔細的描述：

> 椒瘡粟瘡之病象，先在胞瞼內密生細蕾，從此多脂多淚，時發赤眼，繼則烏睛生花，赤膜下垂，視力昏矇，赤眼長不退，終則胞瞼內捲，睫毛倒衝，烏睛被刺，障珠繼起，從此名題盲籍，人生幸福，被消盡矣。[12]

陳氏對沙眼病徵的總結非但沒有摒棄中醫術語，反而利用了傳統眼科中豐富的詞彙為該病在臨床的形態變化進行了準確的描述。除此之外，他還將西醫對傳染性眼病的診斷和預防知識轉譯為方便大眾理解的「貼士」，如發現「睫毛擦眼、流淚多脂」應速醫治，以及「手巾面盆為傳染之媒，不可通用」等。由此可見，民初中醫眼科的改革派在結合西醫對沙眼傳染性的認知，以及向公眾普及預防法等方面作出了努力。但沙眼的防治並未在當時被視為公共衛生首要威脅，因其所需的對民眾日常衛生習慣的規範需要更多專業人士的協助。下文將着重分析1920年代新的一批受西醫眼科教育的中國醫生對導致沙眼的社會因素進行考察與分析，並通過普及「防盲」知識，完善公共衛生機制在城市空間的拓展。

10 徐珂，〈眼病〉，《清稗類鈔》(上海：商務印書館，1917)，卷26，頁317。

11 Sean Hsiang-Lin Lei, "Sovereignty and the Microscope: Constituting Notifiable Infectious Disease and Containing the Manchurian Plague (1910-11)," in Angela Ki-Che Leung and Charlotte Furth eds., *Health and Hygiene in Chinese East Asia: Policies and Publics in the Long Twentieth Century* (Durham, NC:Duke University Press, 2010), pp. 73-108.

12 陳滋，〈東方最多之眼病〉，《中西醫學報》，卷4期5 (1913)，頁1-2。

20年代初，在華西醫經過對各地眼科醫院的統計報告加以匯總，形成了對沙眼在全國範圍傳播的大致估計。哈斯頓醫生 (G. Montagu Harston,1872-?) 在香港東華醫院的報告中指出，由沙眼致盲的人口在華南地區佔六成之多，其主要靠接觸患者眼部分泌物進行傳播，而共用濕毛巾這一生活習慣使其傳染在中國尤為普遍。[13] 1921年，前文提到的美國眼科醫生郝爾德離開生活了五年的粵港地區，前往北平協和醫院任眼科主任，並根據當時在直隸與山東省的調查對比，得出北方較南方罹患沙眼人數高出8.3%的結論。次年，郝氏在一項流行病學調查中，發現沙眼在學生與體力勞動者群體中傳染率較高。例如在協和醫院的建築工人中有35.3%患沙眼，在北平西山孤兒院和周邊的幾個鄉村，沙眼的發病率則高達60%-80%。[14] 可見，沙眼的預防已被醫學專家視為現代教育與工業領域不可忽視的問題。

與此同時，郝爾德在協和醫院建立沙眼專科門診，並指導醫學院的學生與青年醫師參與針對沙眼的常規及整形手術。不過，手術並不能保證沙眼不復發，且會對病人造成極大的痛苦。因此郝氏提倡以保守治療為主，如將硼酸擦塗在眼瞼內抑制細菌的再生，將沙眼的傳染性降至最低。這一方法操作簡便，適合通過沙眼診所推廣至社區，並對教師、職員及工廠職工進行訓練，以彌補專業醫護人員的缺乏。[15] 在細菌學家成功分離出沙眼病毒之前，眼科專家普遍認為需要在社區建立有效的預防機制。這首先需要確定統一的臨床診斷標準，並通過在中國的醫院及診所向民眾進行眼部健康檢查，排查出傳染性眼病患者進行治療。其次，對民眾防盲知識的普及需要眼科醫生與政府合作，尤其是培養中國本土的公共衛生專家。在這方面，協和醫院通過洛克菲勒基金會 (Rockefeller Foundation) 於1923年聘請蘭安生 (John B. Grant,1890-1962) 擔任公共衛生學教授。兩年後，蘭氏得到京師員警廳的批准，在東城內一區建立了第一個公共衛生示範所，用於開展預防醫學的教學與實驗活動。[16] 在以下兩節中，本文將分別論述這種結合臨床研究與實地考察的社區醫療保健模式在實現沙眼的大範圍統計，以及指導民眾參與防盲運動等方面所產生的深刻影響。

13 G. Montagu Harston, M.D., "The Blind Sorrow of China," *The Archives of Diagnosis*, 14 (1920), pp. 19-20.

14 Harvey J. Howard, "The Eradication of Trachoma among School Children in China," *The China Medical Journal*, 38:4 (1924), pp. 258-259.

15 Harvey J. Howard, "Community Control of Trachoma in China," *The China Medical Journal*, 41 (September 1927), pp. 768-769.

16 Liping Bu, "Beijing First Health Station," in Liping Bu, Darwin Stapleton and Ka-Che Yip eds, *Science, Public Health, and the State in Modern Asia* (New York: Routledge, 2012), pp. 129-143.

三、沙眼致盲與視力測量技術的臨床實踐

1928年，郝爾德任職期結束後返回美國聖路易士華盛頓大學 (Washington University in St. Louis) 任教。離開中國前，他通過與維也納眼科界的關係聘請奧地利籍醫生裴樂德 (Arnold Pillat,1891-1975) 接替他成為第二任眼科主任。隨後的十年中，繼承了歐美傳統的協和眼科教育成功地培養了新一代中國眼科專家，並為致盲眼病在公共衛生領域的防治上奠定了基礎。裴氏於1929年上任後，首先提出建立統一的眼病測量與記錄標準，使臨床診斷與社區衛生考察中得出的數據更好地服務於預防病學的實踐。在其所製的「沙眼問卷」(Trachoma Questionnaire) 中，裴氏首次將英國眼科學家麥卡倫氏 (Arthur MacCallan,1872-1955) 於1908年發明的沙眼四分期法作為臨床診斷標準，並加入對疾病的社會因素的記錄，如患者的性別、年齡、職業以及居住環境等，以便從全國各地的醫院收集數據進行比較。該問卷有兩個重要特點，其一體現為臨床診斷經驗的在地性。裴氏強調觀察眼瞼由結膜變厚、出現濾泡 (follicle)、發展為血管翳 (pannus) 與瘢痕 (cicatrization) 的形成。然而，在現實中對以上四個階段進行區分並非易事，如濾泡會在瘢痕出現後持續，而瘢痕作為診斷沙眼最明顯的特徵，在中國往往由人為導致。對此，裴氏特別提醒眼科醫生注意分辨由庸醫的鉤割炮烙之法對病人造成的傷害。[17] 另一重要特點是，問卷將沙眼的分期與視力測量技術相結合，通過引入「視覺敏銳度」(visual acuity) 這一概念，實現對處於不同階段的沙眼病人的視力損傷程度進行量化。基於人眼分辨物體細微結構的能力，眼科學家設定了以視角（物體上兩點光線射入眼球形成的夾角）與觀看距離（以米為單位）的比例作為測定視力的標準。所得出的數值由高到低劃分為優 (6/6)、良 (6/6-6/18)、差 (6/18-6/60) 與盲 (不足6/60) 四等。[18] 視力表作為一種新的身體測量技術（見下文詳述），其在醫學領域的率先應用不僅為致盲眼病的診斷提供了實證參考，也使診斷結果在統計學意義上的重要性更為突出。從問卷列出的考察對象來看，針對學生、工人、士兵等職業群體的視力檢查，是大眾防盲知識普及的關鍵。

隨着科學的視力檢測標準在臨床的確立，視力損傷的認知開始被重新定義為區分個體社會經濟能力的重要指標。如協和眼科的林文秉 (1893-1969) 醫師指出，視力低於6/60的人等同於喪失勞動能力，不能獨立生活，因此也被稱為「經濟盲」。[19] 1932年上海眼科學會成立，會長周成湋進一步將「視力不足6/60，不能配眼鏡糾正者」定義為「工業盲」。相比之下，正常視力範圍由良 (6/6-6/15) 為標準，損傷程度依次遞減為平 (6/20-6/30) 與差 (6/30-6/60)。[20] 在一項沙眼致盲的報告中，周與在上海醫學院的同事通過研究上海紅十字會第一醫院眼科門診四年 (1931-1934) 中的病例，發現沙眼患者為4,525人，佔總數的57.4%。該病多發於15至40歲的平民群體，且多受僱於洋人所辦的工廠。[21] 由此可見，城市勞工因視力損傷導致失業者對社會經濟的威脅逐漸成為眼科學家關注的問題。此項報告還將沙眼的併發症，尤其是第二階段出現的角膜血管翳與濾泡，與視力損傷程度進行對比，並發現在因沙眼導致視力受損的1,337人 (佔沙眼患者總數29.5%) 中，致盲率隨着血管翳的擴散顯著提高。這一發現建立在裴氏問卷所設計的方法上，有效地利用了視力測量技術，分析較為複雜的沙眼病變所帶來的視力損傷，以及對患者目盲程度的區分。

基於沙眼致盲的臨床統計如何影響大眾對視力標準的認知？回答這個問題需要瞭解視力表在民國時期的普及，以及該項技術怎樣作為防盲運動的一部分，在公共衛生專家的倡導下應用在大眾的生活與工作空間。視力表的發明源於19世紀歐洲中產階級因近視所導致的閱讀障礙，後由眼科醫生通過設計以筆畫粗細相似的字母與視距的比值為測量標準的表格，用以衡量視覺敏銳度（見上文）以及對近視的矯正。荷蘭眼科學家斯內倫 (Herman Snellen,1834-1908) 於1862年首次將以大寫的 "E" 字母為標準建立了大小不等、上下左右四個方向排列的圖表，並使測量者與視力表的距離保持20英尺 (6.1米) 進行測試。如被測者只能在此看到最上方的字母，即正常人在距離200尺的地方，則此人接近目盲，其視力標記為低於20/200。因此，斯氏視力表 (又稱「E視力表」) 也為視力障礙提供了實證標準。[22] 隨後產生的視力表進一步被應用於考察被測者的職業資格，如1888年出現的蘭氏環形視力表 (又稱「C視力表」) 主要為飛行員及對視力有較高要求的人士設計。視力表字體還根據所在國家的語言進行修改，如日本在「C視力表」上加入了片假名。在中國，由於大眾識字率偏低，漢字視力表的應用非常有限。

17 A. Pillat, "Trachoma in China: Proposals for a Uniform Recording and For Uniform Statistics," *National Medical Journal of China* , 17 (1931), pp. 758-760.

18 A. Pillat, "Trachoma in China: Proposals for a Uniform Recording and For Uniform Statistics," p. 757.

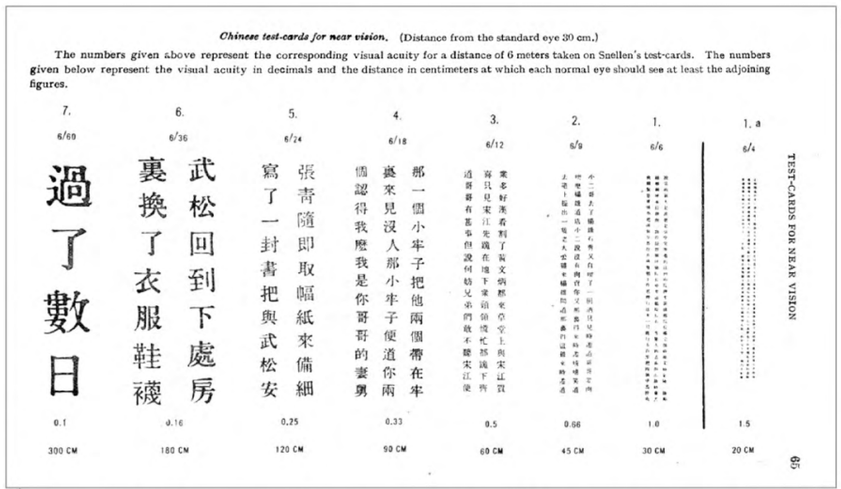
19 Lin Wenbing, "Causes of Blindness Among the Chinese," *Chinese Medical Journal*, 9 (1931).

20 周成湋、張文山，〈論上海之沙眼〉，《中華醫學雜誌》卷20期6 (1934)，頁789。

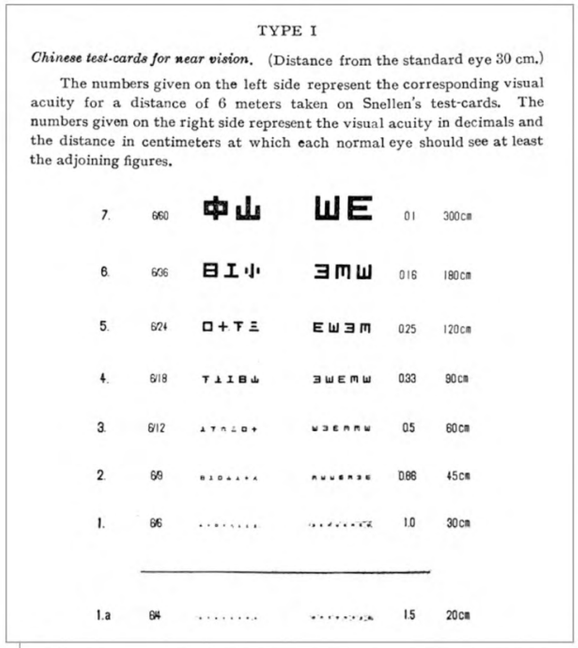
21 周成湋、張文山，〈論上海之沙眼〉，頁784。

22 August Colenbrander, "The Historical Evolution of Visual Acuity Measurement," *Visual Impairment Research* , 8:10 (2009), pp. 57-66.

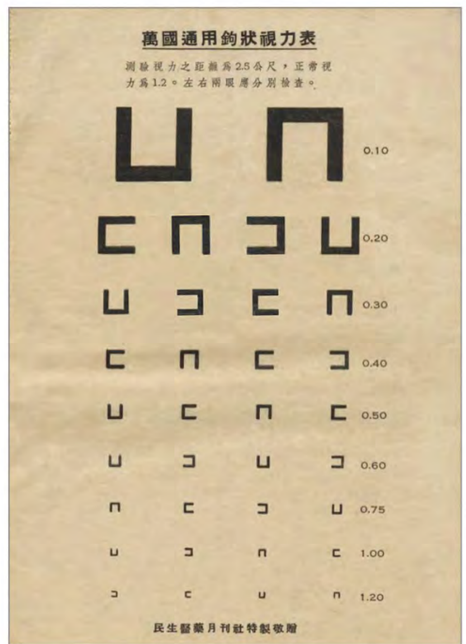
例如協和眼科系曾在1931年設計一版宋體漢字視力表，文字節選自《水滸傳》（圖一），但其僅在受教育者的近視眼檢查中使用。更為普遍的是E字母表及其對應的簡單漢字（圖二）。[23] 還有一種被簡化的E字母表，又被稱為〈萬國通用鉤狀視力表〉（圖三）在當時頗為流行，曾刊印於報紙上以便讀者進行視力自測，進而形成科學的「自我認知」。[24] 另外值得一提的是，在沙眼防治進入公眾視野的過程中，醫學家對「防盲」知識的普及與當時教育家所倡導的「掃盲運動」不謀而合，因為不識字，即「文盲」，被認為是傳染病知識普及的一大障礙。[25] 由此可見，現代醫學定義的「目盲」與視力測量技術在1930年代的臨床應用為公民能力（如識字能力、勞動能力等）在社會層面的識別與劃定提供了科學的實證基礎。



圖一　I. John, "Chinese Test-Cards for Near Vision," *National Medical Journal of China* 17, (1931): 64-5.



圖二　I. John, "Chinese Test-Cards for Near Vision," *National Medical Journal of China* 17, (1931): 64-5.



圖三　〈特載：敬贈視力表〉，《民生醫藥》期133-5 (1936)，頁8a。

23 I. John, "Chinese Test-cards for Near Vision," *National Medical Journal of China*, 17 (1931), pp. 64-65.

24〈特載：敬贈視力表〉，《民生醫藥》期113-5 (1936)，頁8a。

25「文盲」的定義產生於20年代初開始的平民教育運動，其主要領導者晏陽初 (1890-1990) 就將識字能力作為發展以「生計、文藝、衛生和公民」這四大教育的基礎。30年代起，「文盲」的標準也通過問卷測驗的形式向大眾普及，如徐錫齡，〈文盲標準與文盲測驗〉，《教育雜誌》卷20期8 (1928)，頁1-3。

美國眼科學家馬索夫 (Robert Massof) 曾指出，現代的視力測量技術催生了一種名為「視力經濟學」(vision economics) 的理論，主張將身體功能的完整性作為衡量一個人收入潛力大小的主要標準，因為相比於技能的習得，傷殘所帶來經濟損失是不可恢復的。自1925年「斯內倫視力表」被作為國際標準後，視力經濟學家進一步製造了收入能力與視力損傷形成的同比例遞減的曲線，例如20/40的視力等同於喪失了一半的工作能力，而視力僅有20/200的人其經濟能力不足10%。[26] 這種對身體缺陷持有的偏見也造成了如「經濟盲」與「工業盲」的社會化認知。本節分析了沙眼的致盲性在臨床的觀察，以及眼科醫生利用視力測量技術確立對視力損傷的標準化認知。下文將從公共衛生專家對目盲與國民經濟的討論出發，以南京國民政府時期防盲運動為背景，探討目盲作為健康與經濟風險如何指導公共衛生專家參與對沙眼的防治運動。

四、作為社會試驗場的衛生防盲運動

目盲作為大眾健康與國民經濟的威脅，在民國時期開始受到廣泛的社會關注。早在1924年2月南京召開的中華醫學大會上，協和眼科的林文秉醫師便發表了「為中國保護視力的一個倡議」的演講。他指出在農民與勞工佔絕大多數人口的中國社會，視力損傷意味着民眾生計的喪失，而沙眼是致盲的首要威脅。根據協和醫院的統計，北平65%的居民罹患沙眼，以此推算全國患沙眼者不少於30%。如果不立即採取防治措施，將會有成千上萬的盲人在街頭乞討，其帶來的經濟損失不可估量。林氏還首次將學生群體作為第一批沙眼防治的對象，通過教育培養具有衛生常識的現代公民。[27] 這一將防盲納入公共衛生政策的倡議直至1928年北伐結束，民國政府在南京成立後才開始納入議事日程。同年，國民政府衛生部成立，任命協和醫院院長劉瑞恆 (1891-1961) 為部長，聘請公共衛生專家蘭安生為顧問。蘭氏在推廣預防醫學的社區模式中，特別強調了樹立個人衛生習慣的重要性，這與眼科學家對實踐沙眼防治所持的觀點不謀而合，如郝爾德就曾率先呼籲在全國範圍內廢除公用手巾。[28]

26 Robert W. Massof, "The Measurement of Vision Disability," *Optometry and Vision Science*, 79:8 (August, 2002), p. 517.

27 Lin Wenbing, "A Plea for the Conservation of Vision in China," *The National Medical Journal of China*, 10:1 (1924), p. 21.

28 Howard, "Community Control of Trachoma in China," p. 768.

1930年，同在協和任職的眼科醫師張式溥在一篇分析中國人目盲原因的報告中，發現眼科診所一年內 (1928-1929) 接待的3,279個病例中目盲者佔10%以上。作者還指出盲與職業有很大關係，如士兵因營養不良導致角膜軟化症，而農夫、苦力及家庭婦女則多患沙眼，佔目盲比例的1/3。因受家庭的影響，學生與幼兒患沙眼的概率也有20%左右。[29] 沙眼在家庭成員與勞工群體中較高的致盲率隨後引起了公共衛生專家的重視，並通過北平一所學校的醫務處對該校1,542名學生進行檢查。對比入校時患沙眼的學生與一年半後被感染的學生，發現人數增加了22.9%。該報告還特別指出日常生活習慣，如共用面盆、面巾、手帕，以及參與游泳等肢體接觸頻發的公共活動是導致沙眼傳播的主要原因。[30] 在對上海市中小學校學生的調查中，周成湒醫師也強調了這種從家庭向社會延伸的不良生活習慣對沙眼傳播的危害。相比於北平學校22.9%的感染率，上海達到30%至40%之多，而臨近的蘇州與南京市也有25.4%與11.5%。周氏提出將患沙眼的學生進行隔離，並為所有在校學生提供僅供個人使用的面巾並避免手眼接觸。這些日常的衛生習慣應通過教師進行示範和監督。[31]

個人衛生習慣的養成在30年代的防盲運動中起到了關鍵的作用。雷祥麟對民國時期肺結核防治的研究中提出「習慣成個人」(habituating individuality) 這一觀念與衛生的物質性相結合。例如，旋轉餐檯與個人飲水杯的發明使得杜絕肺結核傳染的觀念在家庭與學校中逐漸被接受，從而建立個體的衛生習慣。[32] 自1934年起，圍繞沙眼的防盲教育作為新生活運動的一部分，開始通過各市衛生局在學校開展。上海市衛生局學校衛生督導組在一所小學的視察報告中，提到該校患沙眼的學生被要求佩戴紅色三角袖章以示區分，其名單也被張貼在教室黑板旁邊。在衛生專家的指導下，該校教師學習對學生患沙眼的程度與其治癒後的改善進行觀察記錄。[33] 由於專業醫療人員的匱乏，防盲專家還通過在學校開辦衛生活動訓練高年級學生識別沙眼的技巧，方便為低年級學生進行日常性的沙眼排查，並講解清潔眼部的正確方法（圖四）。同時期，蘭安生創立的北平第一衛生站為防盲知識在學校的普及提供了示範作用。肺結核與沙眼的預防在公共空間被展示。通過飲水杯的分用、區分「患沙眼者用盆」及清潔手巾，學生的衛生習慣得到了直

29 張式溥，〈我國人目盲之原因〉，《中華醫學雜誌》，卷16期23 (1930)，頁119。

30 潘泰階，〈學生沙眼缺點之局部調查與研究〉，《公共衛生月刊》，卷1期3 (1935)，頁22、26。

31 周成湒，〈上海市各小學校學生中之沙眼與其消弭法〉，《中華醫學雜誌》卷18 (1933)，頁187。

32 Sean Hsiang-Lin Lei, "Habituating Individuality: The Framing of Tuberculosis and Its Material Solutions in Republican China." *Bulletin of History of Medicine*, 84 (2010), pp. 248-279.

33 朱章庚，〈沙眼之療治及預防〉，收入《上海市衛生局學校衛生史》(上海： 1934)，頁8-9。

觀的表達。[34] 這些衛生器具的使用在空間上界定了健康與疾病的身體邊界，塑造了具備衛生常識的現代公民意識。

視力表也扮演了醫療知識建構生物公民身份的工具。眼科與公共衛生專家陳任 (1907-1993) 在其撰寫的防盲政策中提出，學校防治沙眼設施中最重要的就是對患沙眼學生進行週期性視力檢查，並針對處於不同感染程度的學生所受視力損傷進行治療。如初期的沙眼患者以硫酸銅滴眼液治療，並准許其在校上課，而中後期要接受手術的患者需暫時隔離，待痊癒或無傳染性後方可入校。[35] 學校

圖四　「砂珠巷小學衛生活動（沙眼矯治）」，《衛生半月刊》卷2期6 (1935)，頁3。

的沙眼防治為面向大眾的衛生實踐起到了示範性作用，使學生群體成為了具備防盲知識與衛生習慣的現代公民。相比之下，針對工廠開展的防盲運動僅限於為工人提供免費的診療服務。如圖五所示，在候診室列坐的工人患者集體地面向眼科醫生。除了觀察正在被治療的工友，他們還需接受視力檢查。相比於懸掛在牆上的衛生常識，視力表對身體損傷與工作能力的評估，更能體現防盲知識對職業身份的影響。

34 Lei, "Habituating Individuality," p. 277.

35 陳任，〈沙眼之預防及撲滅政策〉，《同濟醫學季刊》卷7期1 (1937)，頁109-110。

圖五　「工廠衛生沙眼診療」，《衛生月刊》期5 (1929)，頁4。

五、結 論

1930年代面向大眾的防盲運動，標誌着現代醫學及其主導的視力測量技術對公民能力的界定。其中，以教育與工業所代表的現代領域首先作為公共衛生的試驗場，對疾病帶來的身體損傷進行科學的普及與防治。這源於20世紀初中西醫圍繞沙眼致盲的理論探索，更體現了臨床醫學通過身體測量技術的發展建立向社會空間延展。目盲作為健康與經濟風險逐漸成為社會化認知，並通過塑造日常衛生習慣實現醫學標準對個體社會身份的區分。然而，預防醫學所製造的「目盲」與實存的盲人究竟是何種關係？視力損傷者是否被排除在生物公民權之外，抑或揭示了其局限性？這些問題還有待進一步探討。

「用顯微鏡發現問題」：李順誠教授談秦始皇陵兵馬俑博物館及周邊大氣質量研究

李順誠 口述
李萌 訪問及整理

在香港理工大學刊物《開物：科技與文化》創刊之際，我們有幸邀請到本校建設及環境學院的李順誠教授分享他及其團隊在秦始皇陵兵馬俑博物館以及周邊大氣質量研究方面的多年成果。這些成就可以說是科技與文化有機結合的成功案例。李順誠教授早年負笈美國加利福尼亞大學伯克利分校，1994年獲得環境科學博士學位，其後入職香港理工大學。多年來，李教授一直圍繞室內外空氣環境品質與控制開展研究，在有毒有害污染物演化特徵、源排放清單和室外污染控制及其關鍵技術等方面，取得了一系列重要研究成果。李教授建立了亞洲第一個碳氣溶膠實驗室，為中國制訂PM2.5大氣品質標準和污染治理提供科技支撐。李教授在*ACP*、*ES&T*、*JGR*、*GRL*、*QSR*、*AE*等國際高影響力學術刊物上發表了一系列卓有成效的研究論文並被廣泛引用。截至目前為止，已在國際刊物共發表329篇SCI論文，文章被SCI共引用21,026次 (H-index:82)，單篇SCI總引用超過100次的論文65篇。李教授被列入環境生態學領域近十年總被引頻次高的華人傑出科學家前20名和全球前2%科學家，並在2018、2019、2020及2021年連續被列入科睿唯安交叉學科領域的高被引研究者。以下為是次訪談的內容：

李萌博士：西安秦陵兵馬俑已出土多年，文物出現了褪色、表皮剝落等狀況，令人堪憂，目前查到的對該博物館的室內空氣檢測最早可追溯到1989年，您能否談一下您和您的團隊得以加入這個項目的機緣是甚麼？在您加入這個項目之後，您和您的團隊採取了甚麼新的監測技術或者新的研究思路？

李順誠教授：能夠加入這個項目是機緣巧合。2005年3月，中國秦始皇兵馬俑博物館和中國科學院地球環境研究所牽頭，香港理工大學和美國沙漠研究所獲邀，開啟了秦始皇兵馬俑博物館室內大氣污染特徵聯合研究項目。早在2004年8月，我已經參與前期項目的環境監測和採樣工作，能夠作為香港理工大學該項目的負責人，參與到如此重要的文物保護相關的工作當中，我感到萬分榮幸。在我們加入之前，秦俑館內已經開展的大氣污染調查的主要研究方向是室內微環境、氣態和顆粒態污染物濃度的測量，比較少關注空氣顆粒物化學轉化對文物的影響這一關鍵問題。我們在場館內外不同區域設立監測點，利用單顆粒微分析技術系統研究了秦俑館室內大氣懸浮顆粒物和揚塵顆粒的質量濃度水準、微觀形貌、粒徑分佈、顆粒物組分等物化性質，及其對文物的潛在威脅；探討了室內不同類型大氣懸浮顆粒的來源和時空分佈特點，及其與室內微氣候、建築物通風條件和遊客數量的關係；並基於秦俑館內觀測到的二次生成的顆粒物特徵和文物腐蝕風化證據，採用微環境模擬實驗艙技術研究了秦俑館室內氣態污染物的化學反應機制及其對秦磚、陶俑文物材料的腐蝕風化機理。

我們在實驗初期，博物館內外就觀測到了高濃度的PM下相關化學組分的變化特徵。隨着太陽輻射的增加，特別是在高溫高濕條件下，高濃度的酸性氣溶膠會侵蝕兵馬俑的表面。此外，我們還發現了室外的臭氧滲透進入室內（很有可能是遊客帶進來的），與室內的氨氣形成氧化反應，生成硝酸，這似乎比任何一種污染物本身具有更大的潛在危害。這些氧化反應機制可能是兵馬俑自1974年出土以來，出現褪色，脫皮及裂痕等一系列問題的原因。這讓我們意識到了問題的嚴重性，繼而加大了實驗的監測力度和範圍。

圖一　中美秦始皇兵馬俑博物館室內大氣污染特徵聯合研究項目簽字儀式

李萌博士：2005年中國首篇分析博物館室內氣溶膠組成的文章 “Composition of Indoor Aerosols at Emperor Qin’s Terra-Cotta Museum, Xi’An, China, During Summer, 2004”（〈秦始皇兵馬俑博物館2004年夏季室內氣溶膠的組成〉）在*China Particuology*發佈，該文章是基於2004年8月的空氣採集資料完成的。文中提到了多個歐洲國家早已開展對博物館室內空氣進行研究，而中國在此領域卻是一片空白。您認為我們在此領域的發展相對滯後，是與甚麼有關呢？兵馬俑這個項目的開展在整個中國環境大氣學研究領域的意義是甚麼呢？

李順誠教授：歐美國家在博物館的室內空氣研究方面開展時間是比較早的，大概1990初期就已經有多學科研究項目在歐洲各國博物館進行，如威尼斯的Correr博物館（意大利）、維也納的Kunsthistorisches博物館（奧地利）、安特衛普的皇家藝術博物館（比利時）和諾維奇的Sainsbury視覺藝術中心（英國）等等。我國首次對博物館進行全面的室內環境研究是在2005年初，也就是上面提到的秦始皇兵馬俑博物館的項目。我認為滯後的原因還是因為它是一門新興的跨學科科學，或者說綜合了多門傳統科學的學科。它需要龐大的知識儲備與創新的科學訓練。兵馬俑項目是國內外四家科研機構首次聯合開展博物館室內大氣污染的連續觀測，深入研究腐蝕性氣體、大氣氣溶膠和揚塵的變化規律及其化學反應機制，全面評估污染物對文物的腐蝕機理，它不僅是為了科學有效地保護秦俑文物，與此同時，還在秦俑博物館培養起一支專門從事文物環境研究的專業隊伍，建立起能獨立運行的文物環境實驗室，並建設室內微氣候、腐蝕性氣體、大氣氣溶膠以及揚塵等綜合資料庫，獲得秦俑博物館室內大氣污染的綜合特徵及其變化規律，從而為搶救性保護修復提供理論依據，也為預防性保護提供基礎資料。

圖二　在秦俑遺址一號坑、二號坑和館外建立大氣環境觀測系統，獲得了室內微環境和關鍵大氣污染物的變化特徵及其化學反應機制，提出保護措施和污染控制對策

李萌博士：這個研究開中國博物館大氣污染防治之先河，也可以為將來推出的中國博物館大氣污染控制法規提供科學諮詢與借鑒。

李順誠教授：希望能盡一份綿薄之力吧。

李萌博士：依據多年在秦始皇兵馬俑室內外及冬夏季的檢測，在2009發表的 “Characterization of Winter Airborne Particles at Emperor Qin’s Terra-cotta Museum, China”（〈中國秦始皇兵馬俑博物館冬季空氣中顆粒物的特徵分析〉）當中，您及您的團隊首次提出了四項建議。即：

1. 採用機械通風及過濾系統，減少室外污染物滲入展廳;
2. 提高周邊地區的綠化率，管理植被，降低室外顆粒物濃度;
3. 採取小氣候控制措施，減少溫度和濕度的波動;
4. 調整展品展示策略，以減少土壤灰塵進入建築和由於遊客移動對地板的磨損。

請問針對這些建議，博物館與當地政府採取了甚麼措施？您認為是否足夠？陝西漢陽陵開發較晚，其帝陵展示廳地下採用中空鍍膜電加熱玻璃對遺址進行全覆蓋，保證內部恆溫恆濕並實施即時監測；遺跡上方設置有全玻璃式的參觀步道，這些保護措施有甚麼好處？

李順誠教授：我們通過2004-2007年的連續監測，分析資料及模組實驗，發現秦俑館的展廳內存在較高濃度的顆粒污染物，但一號坑、二號坑及展廳有着不同的情況，也有不同的應對措施：在自然通風良好的一號坑，應加裝機械通風系統，減少室外顆粒物的輸入；而在銅車馬陳列廳，應加強通風系統的利用率並適當控制遊客數量，以減少室內揚塵的再懸浮；此外，各展廳均應配備顆粒物過濾系統，控制室內顆粒物尤其是細粒子的濃度，減小顆粒物的污染和物理、化學風化威脅。另外，秦俑館室內的顆粒物或文物材料與大氣中的二氧化硫發生了累進的化學反應，生成的硫酸鈣對文物表面有潛在的鹽蝕威脅；降塵顆粒不但是硫酸鹽化反應的前體物，還承擔了含硫顆粒載體的角色。最後，基於單顆粒微分析結果和在彩繪漆層的表面所發現的腐蝕和風化證據，結合秦俑館近年大氣污染監測資料和館內微氣候記錄，設計並實施了仿製秦磚和陶片的環境模擬暴露實驗。污染氣體吹掃後的試樣分析顯示，秦俑館室內的主要酸性、鹼性和氧化性氣體發生了均相或非均相的化學轉化，並侵蝕了文物的表面。鑒於腐蝕風化過程中氣態

和顆粒污染物與環境因素之間存在協同效應，要改善館內的文物保存環境，不但需要配備通風和過濾等系統，降低室內氣態和顆粒污染物的濃度水準；還應有效控制室內的微環境，避免文物在頻繁溫、濕度波動和極端環境條件下的物理和化學風化。所以，陝西漢陽陵密閉及恆溫恆濕監控的做法是進步的，可以有效地保護文物、減緩侵蝕與風化。

李萌博士：即使漢陽陵的保護措施已經很周密，出土文物的氧化褪色、開裂仍不可避免嗎？如是，除了物理上的隔離措施，是否有催化劑可以減緩這種氧化反應的發生？

李順誠教授：出土後的環境與深埋地下的環境不可能相同，這些氧化、風化就不可避免。即使陝西漢陽陵在形式上是讓文物「回到地下」，但我們目前還無法做到完全還原到「出土前的地下環境」。我們剛才說的「微環境」可大可小，不可控因素也有很多。室內空氣污染源有人為因素，比如遊客的雨衣雨傘、噴的香水和髮膠、場館保潔人員使用的清潔劑等等，另外也有自然因素，比如隨着季風氣候來自千里之外的懸浮顆粒物。的確是有催化劑可以減緩這些化學反應，但還都在研究當中，我們目前的努力都放在源頭管控上：一是淨化，二是密閉。

李萌博士：您剛才提到兵馬俑不同的展廳有不同的保護措施，需要保護的文物還有紙張、織物及壁畫彩繪等等，文物材質的多樣性決定了保護措施上的多樣性，您是否關注過對甘肅敦煌壁畫的保護？此外，不僅陝西，中國很多地區的空氣質量都不盡如人意，對於暴露在大氣中的室外文物，如四川的樂山大佛、山西雲崗石窟、河南龍門石窟，應該如何保護，與博物館這種室內的保護措施有何不同?

李順誠教授：所有的保護措施都要經過嚴格的科學監測，具體案例具體分析，沒有一個放之四海而皆準的方式。敦煌壁畫的研究我也有所關注，據我所知，畢業於香港理工大學的青年學者黃宇研究員正在進行這個項目，可以在將來由他向讀者介紹。至於室外文物遺跡的保護，遊客流量的影響因素相對會變小，酸雨與風化的腐蝕影響會更加嚴重，保護難度也會更大。比如山西要考慮到它是煤炭大省，四川要考慮到空氣濕度大，空氣流通能力差等因素，可能四川樂山大佛要解決空氣中的酸雨腐蝕，重點在解決排水問題上。這個我沒有一手的調查資料，不能在這裏下結論。

李萌博士：從事保護文物古跡的科學研究是否需要對歷史和考古有一定的瞭解？您和您的團隊在與秦陵兵馬俑博物館工作人員合作與交流的過程中，您對人文的哪些領域產生了興趣？

李順誠教授：我的研究領域在大氣學，這本身就是一門跨學科科學，內容涉及化學、物理、地理、氣象等等，但仍都屬於理工科範疇。秦兵馬俑軍陣與彩繪銅車馬都是非常珍貴的文物，有着極高的歷史和藝術價值。有機會近距離地與千年文物接觸，內心的震撼，是前所未有的。與博物館工作人員的共事經歷也很特別，瞭解到博物館佈展的一些知識。但我的工作還是在顯微鏡之下，不管我們觀測的研究對象是不是文物，科學嚴謹的態度是始終如一的。室內微環境的研究發掘了遊客與文物之間的關係，不光要保護千年以前的文物，還要保護當下參觀這些文物的我們。多年前，我們和香港的《明報》有一個合作項目，即對本地知名的五大商場、百貨公司的室內空氣開展調查研究，結果發現不少問題。我們的研究報告一經見報，在社會引發了不小的轟動，因為在此之前，民眾從未意識到這些看不見摸不到的室內空氣會對人體健康有甚麼影響。我們作為科研人員，身上肩負的責任就是把顯微鏡下觀測到的結果告訴公眾：室內環境的污染源來自哪裏，長期處於污濁的室內空氣之中對人體有甚麼危害，應該怎樣防範和處理……我想這是作為一名科研人員應該具有的人文關懷，科技應以人為本。

圖三　李順誠教授（右二）與高贊明教授（左五）、Judith C. Chow教授、John G. Watson教授和來自陝西省文物局等單位的專家們合影

技術與社會
Technology and Society

1 前言——技術與社會：藝術史、考古、現代科技的結合與未來展望
Preface – Technology and Society: Integration of Art History, Archaeology, and Modern Technologies, and Future Prospects

2-1 金屬文物價值認知關鍵技術研究進展
Advances on the Key Technologies for Value Recognition of Metal Cultural Relics

2-2 認知金屬文物的方法
Methods to Understand Metal Artifacts

3-1 成像技術與商周青銅器製作技術的研究
Imaging Technology and a Research on Manufacturing Technology of Shang-Zhou Bronzes

3-2 看穿青銅器的內部
Looking into the Inside of Bronzes

4 藝術史、考古、3D技術
Art History, Archaeology, and 3D Technology

5-1 3D技術與藝術考古：先秦全同青銅器之探索及相關議題評述
3D Archaeology and Art History: In Search of Identical Bronzes in Early China

5-2 先秦全同青銅器的求索
In Search of Identical Bronzes of the Pre-Qin Period

6-1 中國史前玉器技術淺說
Prehistoric Jade Technology in China

6-2 玉器技術研究的背景
Background of Studies of Jade-processing Technologies

7-1 結合高科技的中國古代玉器研究
Review of Scientific Study on Ancient Chinese Jades

7-2 玉器研究中的高科技與人文探索
High-tech and Humanities Exploration in the Studies of Jades

8 餘論——歷史研究需要科技，科技研發需要歷史
Coda – Historical Research Needs Technology, Technological Innovation Needs History

作者名單（依姓氏英文拼音字母順序排列）
Contributors (in alphabetical order)

李建深 LI Kin Sum (Sammy)
香港浸會大學歷史系副教授
Associate Professor, Department of History, Hong Kong Baptist University

廖雅婷 LIAO Yating
香港浸會大學歷史系碩士研究生
M.Phil. Student, Department of History, Hong Kong Baptist University

丹羽崇史 NIWA Takafumi
奈良文化財研究所主任研究員
Senior Researcher, Nara National Research Institute for Cultural Properties

彭鵬 PENG Peng
香港中文大學文學院助理教授
Assistant Professor, Faculty of Arts, The Chinese University of Hong Kong

潛偉 QIAN Wei
北京科技大學科技史與文化遺產研究院教授
Professor, Institute for Cultural Heritage and History of Science and Technology, University of Science and Technology Beijing

鄧聰 TANG Chung
山東大學文化遺產研究院特聘教授
Distinguished Professor of Institute of Cultural Heritage, Shandong University

編輯：李建深
Editor: LI Kin Sum (Sammy)

前言——技術與社會：藝術史、考古、現代科技的結合與未來展望

李建深

藝術史、考古是研究社會與個人的物質與空間創造的學科。物質創造包括了獲取原材料，合成、改造或加工原材料，注入設計的元素，將其轉化為青銅器、玉器、絲織品等產品。空間創造包含了人工建築、人力改造的空間如洞窟、礦區等。在物質與空間創造的過程中，技術是必不可少的元素，不管這些技術的起源有多古老，或是技術怎麼與時並進。技術知識、理論、經驗、手藝、接觸物質空間的熟練程度（如人類怎樣利用其五感去感知其意欲改變的物質空間），理應是藝術史、考古學家的一大重要研究方向。不論是世界上的哪個地方，歷史上的哪個時代，這些都是不應也不會過時的問題。因為這些都是人類的大問題，牽涉到人類怎樣認識世界，如何為世界中的物品與空間分類，分類後又如何控制物品與資源，怎樣利用物品與空間去控制身邊或遠方的人……這些問題構成了技術與社會研究的大框架。

但是，對於古代世界的技術研究，由於各種原因的限制，現階段是基礎不足、理論欠奉的。對於古代世界的諸多技術，不但我們的基礎認識不足，研究者也對很多技術不瞭解、不清楚。在這基礎認識還遠遠不足的時候，研究者很多時候被盲目要求從一開始便要將技術與當時的人文社會情況結合起來，這就有點揠苗助長了。舉個例子，正如登月科技的研發者，一開始便被要求結合登月後的社會規劃一併研究，但月還未登，又怎麼一併結合研究？技術與社會可以結合來研究，但在對技術還未認識太多的時候，對技術的基礎認識、全面掌握尤為必要。研究古代技術，即是研究當時社會的生產面貌，二者是密不可分的，但研究社會生產面貌卻是先需要有堅實的基礎認識。

古代技術研究，是「上窮碧落下黃泉」，茫茫物海找證據。在考古發掘中，物品在一固定的空間環境下出土，相對較集中，研究較便利，但它們未必能反映當時的技術全貌。比較理想的情況是結合當時某行業創造的產品，全面地去研究它們。但是，這些產品會在不同地方出土，出土後又有可能散落在世界各地，如何把它們找出來？找出來之後又怎樣去接觸、觀察它們，從而歸納出當時此行業的生產規律？尤有甚者，古代的技術人員，大多沒有留下文字紀錄，因此對於古代技術的研究術語只能由今天的研究者定名，這樣術語便不統一，不容易被普遍理解。上述這些因素，大大限制了古代技術研究的進路。

現代科技的進步，為解決這些問題提供了不少便利手段，尤其是觀察手段的進步，方便了研究者觀察到純靠肉眼觀察不到的世界，也方便了研究者統一認知。X射線的研發，讓研究者可以看到很多器物隱藏千年的內部結構。按照傳統思路，不打破其器物，這些內部結構是看不到的，但是為研究其內部結構而打破器物是殺雞取卵的做法，放在今天是行不通的。這又激發今天的技術人員研發更多高尖科技去觀察器物。3D掃描、3D展示、互聯網的出現，為找出古代各行業的產品全貌提供了更多便利。研究者可以將各地出土的同類產品的3D模型放上互聯網，讓所有人去觀察、比對其異同。這對了解古代不同行業的生產面貌有極大幫助。在出版界，現在仍然是以靜態的圖片加文字為主流，對了解三維的物質空間仍然是不足夠的。現代科技的進步卻可補充其不足。

更重要的是，依賴現代科技觀察、檢測到的「東西」，具有統一標準。譬如，A君看到一件青銅器上從來沒有被研究者觀察到、命名的痕跡，可能會用A君自己的語言去命名、去描述其觀察過程。假如沒有圖片、3D模型的協助，這種命名與描述是沒有人能明白的，除非其他人能將那件青銅器放在眼前，或是以前看過相似銅器，再結合A君的文字來理解。這就是觀察、描述沒有統一標準的時代。在現代科技進步的情況下，越來越多具統一標準的觀察、檢測角度呈現在讀者眼前，使得古代技術研究具有了統一的討論框架，這對促進研究發展有很大作用。沒有共同問題、統一標準的研究，人言人殊，是很難發展下去的。

本專輯的系列文章，圍繞上述問題，揭示了「技術與社會」研究層面的多種探索方向。潛偉的文章〈金屬文物價值認知關鍵技術研究進展〉，針對中國的金屬文物，展示了如何構建具統一標準的研究大框架。他展示了如何從金屬文物上用現代科技手段去提取信息，建立統一的分析標準，進而建構統一的標本庫與資料庫，再提出統一的分析理論。丹羽崇史的文章〈成像技術與商周青銅器製作技術的研究〉，主要展示如何運用成像技術如X射線CT掃描等去研究青銅器的製作技術。他提出了青銅器製作技術研究中的重要問題，這些問題由來已久，但是新的觀察分析手段仍然會為這些問題提供更多新穎資料，幫助研究者了解中國商周時期的青銅器製作技術。李建深的文章〈藝術史、考古、3D技術〉，着重另一成像技術——3D掃描與展示。他以新石器時代遺址、青銅器大規模生產等幾個案例，討論了在這些研究中可以怎樣應用3D技術，提出新問題。而更重要的是，3D技術如何可以讓公眾參與研究者的觀察、推論進程。彭鵬的文章〈3D技術與藝術考古：先秦全同青銅器之探索及相關議題評述〉，可以視作對李建深文章的評論，但其討論深度又可使其獨立成一文章。他首先總結了中國青銅器製作技術研究的大背景，集中回顧了「以模作器」還是「以範作器」的論述，然後討

論以3D技術如何結合中國先秦時期形狀相同、大小相同、紋飾相同的「全同」青銅器的研究。

上述文章較為偏重青銅器，鄧聰的文章〈中國史前玉器技術淺說〉則是對其過往研究中國史前時代玉器的研究總述。結合了實驗模擬與在玉器上觀察到的製作痕跡，鄧聰推論出了砂繩切割、鋸片切割、管鑽技術的過程。鄧文也一併列出這些技術出現的時間順序。廖雅婷的文章〈結合高科技的中國古代玉器研究〉列舉了許多現代科技應用在玉器研究的案例。相較鄧文的三大製玉技術，廖文着重玉料質地、來源分析、玉器加熱加工等方面，她也列舉了諸如高清攝影、掃描電子顯微鏡等觀察手段，如何有助玉器製作痕跡方面的研究。每篇研究文章都有其側重，而每篇研究文章之後都有一篇短文作簡短評述、導讀，或背景補充。這樣的安排希望能在使專業讀者理解各篇研究之餘，也方便普通讀者了解各項研究課題的更廣濶背景。

探索古代的技術是研究方向，應用現代的技術是研究手段。研究古代技術有時可以靠肉眼觀察，但今時今日卻不能忽視依靠現代新科技的觀察。對古代世界的技術研究雖有諸多限制，但也大有可為之處。夯實了基礎研究之後，我們就可以把技術與社會研究串連起來，探尋人類歷史的多元發展模式。本期刊的系列文章集中於金屬史、玉器史等，既有對歷史、社會的探討，又有對結合現代科技的展望，希望能拋磚引玉，為探索世界技術與社會的發展歷史覓一研究方向。

編者按：此特輯之編寫，源自我們於2021年8月在網上舉辦之「文化遺產與智能科技工作坊（“Smart Heritage Workshop”）。工作坊由香港浸會大學（以下簡稱「浸大」）歷史系近代史研究中心主辦，並承蒙浸大社會科學院院長黎永亮教授、歷史系系主任劉詠聰教授、近代史研究中心主任鍾寶賢教授支持及鼓勵，得以順利舉辦。工作坊得到一眾講者的響應及支持，在此亦一併致謝。當中尤其感謝（以發言順序排列）潛偉教授、丹羽崇史研究員、美國弗利爾美術館和賽克勒美術館策展館員Keith Wilson、鄧聰教授、彭鵬博士的精彩演講與評論，此特輯亦收錄了大部分他們的論文。及後，我們決定由此工作坊題目再作延伸討論，組成此期特輯內容。編輯過程中我亦得益於我的研究生廖雅婷的協助。我們衷心感謝期刊主編、香港理工大學中國文化學系系主任韓孝榮教授、張贇博士、一眾匿名評審專家、相關工作人員，讓我們的特輯能在此期刊創刊號上發表，我們不勝榮幸。我們期望更多讀者能了解現在世界上的文化遺產研究如何能與高新技術相結合，開創更多新穎研究路徑。值此香港理工大學出版社新成立之際，向出版社、《開物：科技與文化》期刊的創辦者致以熱烈的祝賀！

金屬文物價值認知關鍵技術研究進展

潛偉

摘　要

金屬文物是人類文明的重要載體，對其價值認知具有重要意義。金屬文物價值認知包括資訊提取和綜合闡釋兩個方面，前者重在文物的成分、結構、功能、工藝等關鍵資訊的系統獲取與科學表徵，後者則強調自然科學與人文社會科學的交叉融合，深入挖掘文物的多元內在價值。本文研究者開展了鉛錫青銅文物成分分析標準參考物質研製、夾雜物輔助鐵質文物工藝判別方法等研究，並綜合前人研究成果，建立了金屬文物多元資訊提取方法體系；通過構建開放共用的金屬文物標本庫和資料庫，實現多元資訊提取和整理，建立成分-結構-功能-工藝模型，為下一步開展資料採擷和智慧認知奠定基礎。

關鍵詞：金屬文物、價值認知、標準物質、夾雜物、資訊提取

文物是歷史上不同地域的人類在社會、經濟、文化和科學技術等各方面演進發展的實物見證，蘊含珍貴價值和豐厚內涵。對文物價值的科學認知和評估是文化遺產保護的關鍵步驟，為文物的合理利用和傳承發展提供基礎支撐，在文化遺產保護利用中處於核心位置。

金屬文物是人類文明重要載體，蘊含着豐富的歷史、科學和藝術價值，採用科技手段認識其價值是當前研究發展趨勢。金屬文物價值認知既是做好文物保護的前提，也是充分利用文物資源開展經濟文化建設的基礎。金屬文物價值認知包括資訊提取和綜合闡釋兩個方面。前者重在文物的成分、結構、功能、工藝等關鍵資訊的系統獲取與科學表徵；後者則強調自然科學與人文社會科學的交叉融合，深入挖掘金屬文物的多元內在價值。近年來，我國金屬文物價值認知研究取得了長足進步，以現代科學技術為支撐、多學科交叉研究的範式已初步形成，有力地支撐了文物事業的發展。本文擬結合國家重點研發計劃課題「金屬文物價值認知及關鍵技術研究」，介紹此領域的最新研究進展，以期拋磚引玉，引發更多思考。

一、研究背景

21世紀以來，以材料表徵技術為代表的現代科技手段在金屬文物價值認知研究中的應用已趨於常態化。然而，金屬文物價值的多元屬性決定了其關鍵資訊/資料的複雜性和多樣性，簡單移植其他領域的技術方法已難以滿足研究需要。針對這樣的問題，國際頂尖研究機構在嘗試新的分析檢測技術的同時，更加關注各類技術在文物分析中的適用性研究，通過分析過程品質控制、優化分析檢測流程和設備聯用等方式，在保證資料可靠性的基礎上，獲取具統計意義的代表性資料。如美國蓋蒂保護研究所 (Getty Conservation Institute) 與其他多家機構聯合研製了文化遺產銅合金系列標準物質 (CHARM set)，基本涵蓋了地中海沿岸古代銅器主量元素的分佈範圍，可用於X射線螢光分析儀 (XRF) 的校準。[1] 無損/微損的檢測手段是國際上文物科技領域長期關注的熱點方向，相關研究開展較多，如蘇黎世理工大學 (ETH Zurich) 開發的便攜鐳射剝蝕取樣結合常規ICP-MC-MS分析，用於金屬文物微量元素與鉛同位素比值分析。[2] 但上述標樣涵蓋的範圍還非常有限，加之金屬文物種類多樣、保存狀況各異，使得無損/微損表面分析手段的代表性面臨諸多挑戰。針對不同類型金屬文物，如何構建以保護為前提的文物多特徵資訊提取技術方法體系，是國際學術界都在面對的難題。

金屬文物多元內在價值的挖掘與闡釋是價值認知研究的核心部分。目前國際上的主流研究模式是在大量獲取金屬文物分析檢測資料的基礎上，甄選並構建精確反映其原料、生產、流通與使用過程的特徵指標體系，揭示其製作技術起源、發展、演變規律及其與社會其他方面的相互關係。英國倫敦大學學院 (University College London)、德國海德堡大學 (Heidelberg University)、美國亞利桑那大學 (University of Arizona)、比利時魯汶大學 (Université catholique de Louvain) 運用多種同位素示蹤金屬礦料與珍稀礦物，代表了該領域的世界先進水準。Rehren探討了金屬文物認知的方法體系，[3] Hauptman建立了爐渣冶金考古的系列方法，[4] Dilmann等研究者從鐵器夾雜物分析產地來源。[5] 國內的北京科技大學、北京大學、中國科學技術大學等單位在古代青銅冶鑄生產及產地來源、生鐵及生鐵煉鋼技術等方面也取得了較為重要的研究成果。梅建軍對中國冶金考古進行了綜述，[6] 金正耀進行了商周青銅器鉛同位素比值法研究的綜述。[7]

文物是不可再生的珍貴資源，考古背景明確可靠的金屬文物標本及由其產生的科學資料是開展相關研究的基礎支撐。隨着資訊技術的發展，大體量、多特徵的金屬文物資料庫在文物價值認知及保護研究中的作用逐漸凸顯，文物異構多元數據的集成、融合與分析成為研究的熱點和難點。由牛津大學 (University of Oxford) 承擔的歐盟研究理事會FLAME項目雖然基本未產生新的分析資料，但是該項目通過搜集、整合已有資料，基於GIS技術構建了歐亞大陸古代冶金研究資料庫。

有鑒於此，中華人民共和國科學和技術部於2020年啟動了國家重點研發計劃「可移動文物價值認知及其關鍵技術（無機質類）」。該計劃由北京科技大學牽頭，中國科學院上海硅酸鹽研究所、中國科學院上海光學精密機械研究所、故宮博物院、北京大學等多家單位參與。該計劃下設「金屬文物價值認知及關鍵技術」課題，由北京科技大學、北京大學、陝西省考古研究院共同承擔。該課題的具體任務包括基礎層面和應用層面的內容。其中，基礎性工作包括金屬文物標樣的研製與規範建設，開發一種基於夾雜物分析的鐵質文物加工工藝判別方法的關鍵技術，建立金屬文物科學認知方法體系，保證資訊提取的完整性與可靠性。隨後，研究者利用該方法體系對金屬文物進行科學認知研究，並利用認知結果，建設多元資訊資料庫，建立異地存儲的金屬文物科技標本庫，實現標本與資訊的服務共用。該課題組力求通過綜合科學認知結果與文物共用資料，研究金屬文物資源、技術與文明發展間的關係，建立實證文明發展的金屬文物價值闡釋體系。本文主要介紹了該課題組近期的一些研究進展。

1 A. Heginbotham, et al, "The Copper Charm Set: A New Set of Certified Reference Materials for the Standardization of Qantitative X-ray Fluorescence Analysis of Heritage Copper Alloys" *Archaeometry*, 57:5 (September, 2015), pp. 856-868.

2 Reto Glaus, et al, "Portable Laser Ablation Sampling Device for Elemental Fingerprinting of Objects Outside the Laboratory with Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry" *Analytical Chemistry*, 84 (May, 2012), pp. 5358-5364.

3 Thilo Rehren and Ernst Pernicka, "Coins, Artefacts and Isotopes-Archaeometallurgy and Archaeometry," *Archaeometry*, 50:2 (April, 2008), pp. 232-248.

4 Andreas Hauptmann, "The Investigation of Archaeometallurgical Slag," in Benjamin W. Roberts and Christopher P. Thornton eds., *Archaeometallurgy* in Global Perspective (New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer, 2014), pp. 91-105.

5 Philippe Dillmann and Maxime L'héritier, "Slag Inclusion Analyses for Studying Ferrous Alloys Employed in French Medieval Buildings: Supply of Materials and Diffusion of Smelting Processes," *Journal of Archaeological Science*, 34:11 (November, 2007), pp. 1810-1823; Alexandre Disser et al., "Iron Reinforcements in Beauvais and Metz Cathedrals: from Bloomery or Finery? The Use of Logistic Regression for Differentiating Smelting Processes," *Journal of Archaeological Science*, 42:1 (February, 2014), pp. 315-333.

6 Mei Jianjun et al., "Archaeometallurgical Studies in China: Some Recent Developments and Challenging Issues," *Journal of Archaeological Science*, 56 (April, 2015), pp. 221-232.

7 Jin Zhengyao et al., "Revisiting Lead Isotope Data in Shang and Western Zhou Bronzes," *Antiquity*, 91 (December, 2017), pp. 1574-1587.

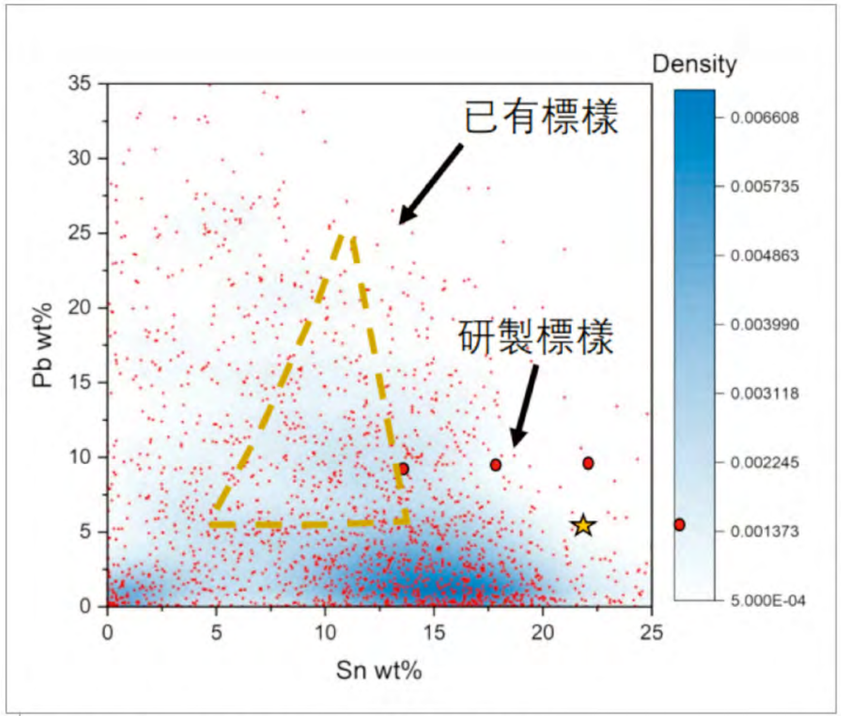
二、金屬文物成分分析標準參考物質研製與應用

化學成分是金屬文物科技資訊的重要組成部分，對其進行分析是認知金屬文物製作工藝與物料來源的重要手段，可為討論金屬技術的演變傳播、跨文化交流與物料流通提供關鍵證據，有助於開展金屬文物實證資源、技術與中華文明發展關係研究。過往的文物科技研究已對大量金屬文物開展了以儀器分析為主的成分分析，但文物行業尚未對這些分析結果的準確性以及不同實驗室資料的再現性進行討論，嚴重制約了金屬文物成分資料的利用與關鍵價值的提取。由於儀器分析結果與被分析物的物理狀態和化學組成直接相關，在使用這類分析方法時需要保證其可溯源性。若研究者可通過一條具有規定不確定度的連續比較鏈，將儀器的測量結果與測量基準聯繫起來，則可推進有關準確性與再現性的分析。因此，只有建立起適當的金屬文物成分測量基準，才能有效評估測量資料品質，推進金屬文物成分分析的標準化進程。

金屬文物的成分結構與現代工業產品間存在明顯差異，無法簡單利用現代材料成分分析標準參考物質作為其成分測量基準。因此，研發適用於文物分析的標準參考物質迫在眉睫。課題組針對青銅文物的成分分析需求，製備了與我國文物成分匹配、可用分析設備校準與資料品質監控的標準參考物質，並分別在多家單位開展了標準參考物質的應用。這些研究成果有望解決長期以來困擾文物科技研究領域的資料品質問題，為基於大資料的文物關鍵價值挖掘奠定基礎。下文將對青銅文物標準參考物質的研製、評價和應用成果進行簡要介紹。

(1) 青銅文物成分分析標準參考物質製備

通過文獻梳理，課題組收集了1,900餘條青銅文物成分分析資料，選擇中國古代青銅文物常見的元素Cu、Sn、Pb作為標準參考物質，並通過核密度估計法將其分為低錫低鉛、高錫低鉛、高鉛低錫和高錫高鉛四組。通過文獻查閱，課題組收集了現有英、美、澳、中和歐盟生產的鉛錫青銅標準參考物質55種，將其鉛、錫含量與青銅文物成分對比後，發現目前尚未有標準參考物質成分可與高錫組青銅文物對應。課題組還設計了特定的元素濃度，以便儘可能全面覆蓋青銅文物成分分析中存在的各種元素濃度範圍。青銅標準參考物質成分設計如圖一所示。



圖一　商周青銅器成分分佈域及鉛錫青銅標準參考物質成分分佈

課題組最終設計完成了85Cu-10Sn-5Pb、80Cu-15Sn-5Pb、75Cu-25Sn、75Cu-20Sn-5Pb 四種成分點的標準參考物質，分別編號為#1、#2、#3、#4。主量元素錫含量分別為10%~25%，鉛含量0~5%，具有合理濃度梯度；次量元素包含Fe、Ni、Sb、Bi、Ag等，可用於建立校準曲線。

目前，課題組已成功製備四種標準參考物質各3公斤，每塊標準參考物質為直徑33mm，高15mm的圓柱體。本系列標準參考物質具有與文物近似的基體組成，可作為文物成分分析的測量基準，用於校準分析設備，監控分析資料品質，保證分析結果的可溯源性，增強不同實驗室分析資料的可通約性。

按照中華人民共和國國家計量技術規範《一級標準參考物質 (JJG 1006-94)》和《標準物質定值的通用原則及統計學原理 (JJF 1343-2012)》的相關規定和要求，課題組分別對製備完成的標準參考物質的均勻性、穩定性開展測試，並完成標準參考物質的定值工作。

(2) 青銅文物成分分析標準參考物質的應用

目前，課題組已將製備完成的青銅標準參考物質提交給中國社會科學院考古研究所、中國國家博物館、陝西省考古研究院、北京大學、中國科學院大學等五家機構的相關實驗室，在不同的實驗室採用不同的分析方法進行測試。課題組已匯總所有分析資料，並與標準參考物質的參考值進行比較，驗證了各實驗室分析儀器及分析方法的精密度和準確度，分析了實驗室間的再現性。

應用結果顯示，各實驗室設備對主量元素Cu、Sn的分析準確度較高，且再現性較好。Pb元素在各實驗室間資料的再現性較好，但準確度略有不足，多家實驗室的Pb分析相對誤差在10%以上。對於Sb、Bi、Fe、Ni、Ag等次量元素，各實驗室設備的分析準確度以及各單位間資料的再現性均存在一定問題。考慮到這些元素常被用於討論生產青銅文物所用礦料的種類及來源，提升其分析的準確性應是今後研究工作的重點。

總體來講，各實驗室認為此系列標準參考物質在青銅器成分分析中得到了很好的應用，滿足金屬文物材料科學分析對標準參考物質的需求，能夠使研究者的分析資料更加具有公開性和可對比性，促進資料共用。本套標準參考物質的推廣應用，可提升實驗室間資料的再現性，為青銅成分分析資料的有效積累與大資料研究奠定基礎。

三、基於夾雜物分析的鐵質文物加工工藝判別方法

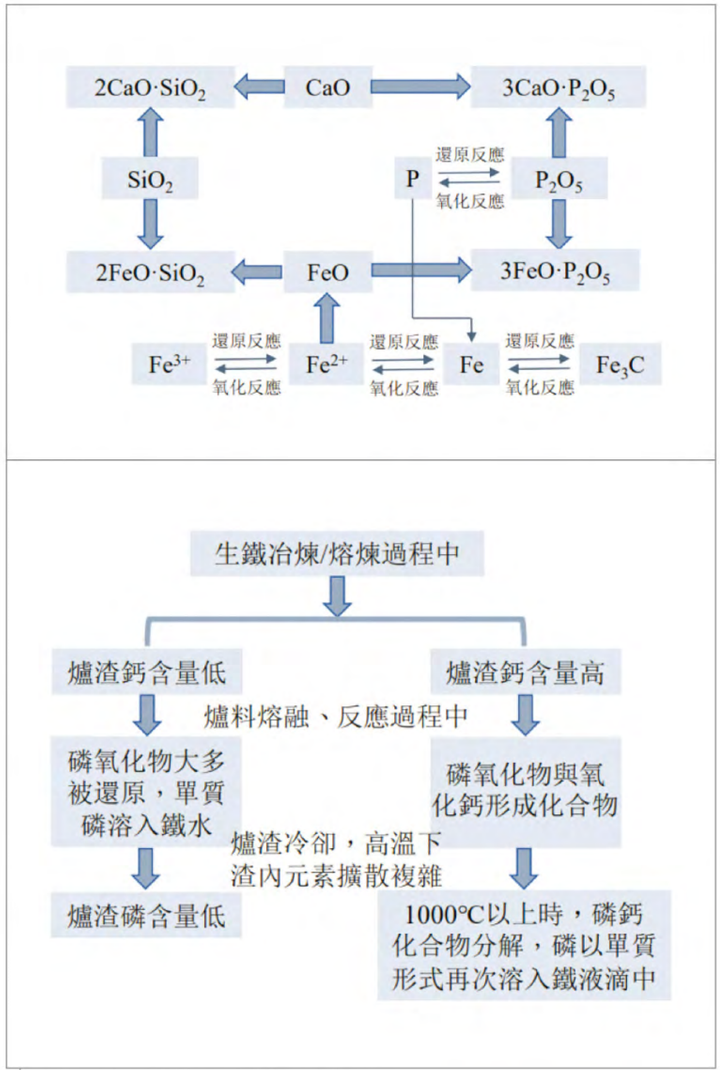
鐵器製作中的物理化學過程會產生不同類型夾雜物。通過夾雜物的形貌、成分、組織和分佈等特徵，可推測鐵質文物的加工工藝，這成為鐵器文物科學價值認知的關鍵技術。在梳理現代鋼鐵冶金中夾雜物生長理論與古代鐵質文物夾雜物的研究資料的基礎上，課題組開展了鐵質文物科學表徵、夾雜物形成與生長機理研究、模擬試驗以及夾雜物輔助工藝判別方法等研究工作。

首先，基於中國古代鋼鐵技術體系特徵，課題組開展了鑄鐵、塊煉鐵、炒鋼、灌鋼等四大類鐵質文物的夾雜物特徵研究，已對不同遺址出土的379件鐵器進行檢測分析。這些樣本年代跨度從西漢至宋元時期，涉及器類豐富，有鋤、钁、犁鏵冠、板材、鎧甲片、鐵鋌、刀、劍、矛、釘、鍋、條材等；樣本所涵蓋的鋼鐵材質類別多樣，已知有白口鐵、灰口鐵、麻口鐵、韌性鑄鐵、鑄鐵脫碳熟鐵、鑄鐵脫碳鋼、炒鋼、塊煉鐵等。

其次，課題組有針對性地於陝西周原、湖南桂陽、浙江龍泉、泰國等地分別進行了包括生鐵熔煉、生鐵炒鋼、灌鋼與折疊鍛打、塊煉鐵冶煉等不同工藝的鋼鐵冶煉加工模擬實驗，涉及爐型結構有高爐、開放式地爐、鍛爐、小型豎爐等，相關檢測分析工作也在逐步開展中，旨在為不同鋼鐵技術夾雜物形成機理提供參考。

課題組還利用鐳射高溫共聚焦掃描顯微技術 (HT-CLSM) 對一種灌鋼工藝的夾雜物行為進行了原位分析，發現模擬試驗生鐵層中的夾雜物存在明顯的向邊界遷移現象，熟鐵層中則不存在此現象，最終樣品呈現生鐵層內基體純淨、擴散邊界大量夾雜物聚集、熟鐵層中夾雜物形貌基本無變化的現象。

基於文物表徵和模擬實驗結果，課題組初步建立了古代鋼鐵冶金過程中夾雜物的產生與生長理論，主要關注了磷與鈣元素的轉移機制。磷元素幾乎貫穿古代鋼鐵製品冶煉加工的不同環節，且不同技術類型、工藝環節差異會影響磷元素的形態與轉移，而鈣則是影響磷元素轉移的重要元素之一。課題組對多處遺址的遺址積鐵、爐渣、鐵器進行金相學、掃描電鏡能譜分析，解釋了磷元素在古代冶鐵過程中的轉移與變形。生鐵冶煉中，倘若爐料中能與磷形成高溫複雜化合物的元素（如鈣元素等）含量高，磷主要以高溫複雜化合物的形式進入爐渣中，並伴隨爐渣排出爐外；倘若爐料中能與磷形成高溫複雜化合物的元素含量低，磷主要被還原為單質，並進入鐵水中，隨澆鑄在鐵器內部偏聚形成磷共晶，並伴隨鐵製品的後期加工一直存在，磷的主要轉移途徑見圖二。塊煉鐵冶煉過程中，大部分磷形成氣態單質磷、氣態P_2O_5而揮發流失，少量隨着鐵的還原與α-Fe聚合進入海綿鐵中，並在鐵料的後期成型與加工中被保留。炒鋼過程中，爐料中含磷化合物熔融，若加入含鈣助熔劑，則含磷化合物與之反應生成高溫穩定化合物，會在爐渣玻璃相較少的區域形成被隔離的磷酸鈣$3CaO·P_2O_5$而不發生分解。此外，古代亦有使用骨灰為炒鋼助熔劑的生產方式，羥基磷灰石是骨灰主要成分之一，經高溫燒熔後也會在爐渣局部形成隔離的磷酸鈣相，而裹挾進入鐵料中的磷酸鈣以夾雜物的形式存在。因此，高磷鈣相夾雜可作為區別炒鋼產物的重要指標之一。

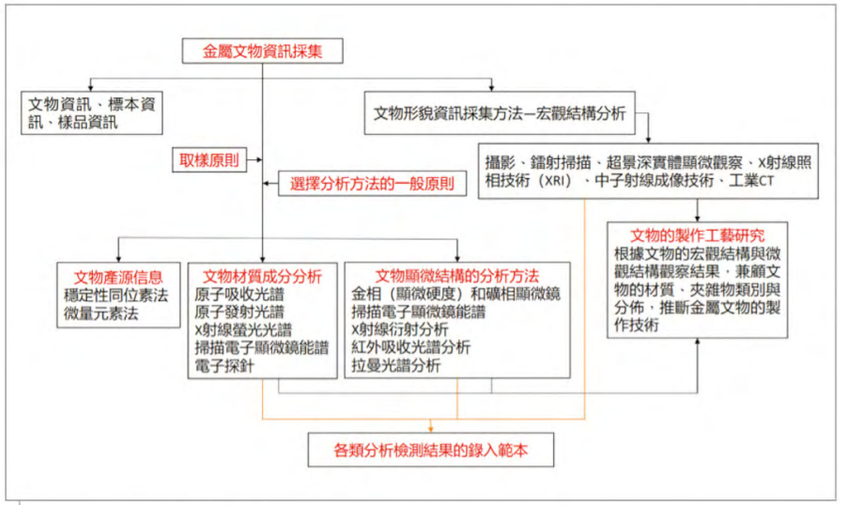


圖二　磷元素在古代冶鐵中的轉移與變化

綜合上述研究成果，課題組對我國古代鑄鐵、韌性鑄鐵、鑄鐵固態退火碳鋼、鑄鐵固態退火脫碳熟鐵等鋼鐵製品中的夾雜物形貌、成分、類別、尺寸、分佈、數量等特徵進行了歸納總結，成功獲得國家發明專利「一種古代鑄鐵與塊煉鐵製品的判別方法」(批准號：CN112986302A)。

四、金屬文物多元資訊提取方法體系

對金屬文物的分類、保存狀況及宏觀結構資訊採集、材質分析與工藝判斷，可充分揭示其歷史價值和科學價值。所以，金屬文物的全面資訊採集至關重要。為了做到資訊採集的規範化、標準化，為後期的深入研究提供可靠的、可比較的資料，課題組初步建立了金屬文物多元資訊提取方法體系（如圖三）。



圖三　金屬文物多元資訊方法體系圖

金屬文物多元資訊提取方法體系共包括八個部分，分別為概述、表面形貌資訊採集、宏觀結構分析資訊採集、分析樣品的取樣原則、樣品的材質分析方法、微觀結構分析、器物製作工藝的重建原則以及金屬材料的產源探討等。

概述部分介紹了如何選擇金屬文物的分類、資訊採集和分析方法。金屬文物的功用、材質、及製作技術包括不同類別。根據金屬文物使用用途，可以將其分為禮器、兵器、工具、農具、食器、酒器、水器、樂器、車馬器、度量衡、印章、錢幣、飾品、生活用具（鏡、熏爐、鐎斗）、建築構件、法器、雜器等，另外還有作為原料的各種板坯、條材、錠子。不同功用的金屬文物採用的材質與製作工藝存在差異。金屬文物製作材料可以粗分為銅及銅合金、錫鉛及鉛錫合金、金銀及金銀合金、鋼鐵材料四大類型。材質不同的金屬文物，其組織不同；同類材質的金屬文物因製作技術不同，其組織也存在差異。不同材質的金屬文物在製

作技術上各有自己的特點，並且與各個時期技術的發展密切相關。金屬文物製作技術有六種，包括鑄造技術、鍛造技術、熱處理技術、鑲嵌技術、表面裝飾技術、焊接技術。一件金屬文物的製成有可能採用了多種技術，而製作技術的水準與類型、多種技術搭配使用，均是影響金屬文物在使用、埋藏時保存及銹蝕狀態的重要原因。

金屬文物自身資訊的採集包含兩部分，一部分是採集與考古背景相關資訊，另一部分是採集與金屬文物製作技術關聯的相關工藝痕跡資訊。金屬文物考古背景資訊的採集要依據《文物藏品檔案規範 (WW/T 0020-2008)》、《館藏文物登錄規範 (WW/T 0017-2013)》的要求，將金屬文物的名稱、年代、地域、登記號、質地、尺寸、數量、形態特徵、發掘者、發掘單位，出土時間、保存現狀等資訊採集齊全。

通過對金屬文物表面形貌及宏觀結構進行分析，課題組梳理了與金屬文物製作技術關聯的工藝痕跡資訊的採集方法，包括攝影、鐳射掃描、超景深實體顯微觀察、X射線照相技術(XRI)、中子射線成像技術、工業CT等。研究者可以根據金屬文物整體情況（如材質種類、器物結構特點、器物尺寸大小、器物壁厚變化、器物有無表面裝飾、器物銹蝕狀況等因素）選擇採集金屬文物結構資訊的數位化記錄技術或者確定各種方法的使用順序。各項方法具體條件參數的設定與注意事項可參照相應的國家標準、行業標準、儀器說明書。通過實際觀察與採集的各種圖片、影像，研究者可以瞭解金屬文物的銹蝕狀況、內部缺陷、殘斷情況、有無修補、紋飾與銘文、鑲嵌、複合材料、芯撐、墊片、連接部位與連接方法等各類技術的痕跡，為後期的檢測工作和工藝復建，提供翔實的資訊和線索。

分析樣品的取樣原則規定了獲取金屬文物樣品的基本操作流程與要點，如金屬器採樣時應選擇具有代表性典型性的樣品，考察其所屬考古堆積單位的年代和文化屬性，確保金屬器能夠代表所研究時代和考古學文化的冶金技術，所採樣品需仍具有金屬內核。

金屬文物材質分析和微觀結構分析方法是資訊提取的核心內容。金屬文物材質分析方法的選擇有以下三個步驟：一是根據金屬文物的完整狀態，確定能否允許採集樣品，並選擇有損分析方法或微損、無損的檢測方法；二是在可以取樣的前提下，根據研究目的、研究的問題來選擇檢測方法；三是根據取得樣品量的多少與性狀，來選擇檢測方法。金屬文物的檢測技術包括用於顯微組織觀察、主要組成元素的分析、夾雜物分析、微量元素分析、銹蝕產物分析等各種分析技術。

成分分析方法包括掃描電子顯微鏡能譜分析法 (SEM-E)、X射線螢光光譜 (XRF)、電子探針分析與波長色散譜儀聯用 (EMPA-WDS)、電感耦合等離子體發射光譜 (ICP-AES)、電感耦合等離子體質譜 (ICP-MS) 等。微觀結構分析方法包括光學金相顯微鏡、偏光顯微鏡、掃描電子顯微鏡 (SEM)、X射線衍射分析 (XRD)、拉曼光譜法、紅外光譜法等。各項分析方法具體條件參數的設定與注意事項可參照相應的國家標準、行業標準、儀器說明書，需要特別注意分析樣品的製作要求與注意事項。檢測內容及結果參照金相分析、微量元素成分、非金屬夾雜物分析等資訊錄入範本。

金屬文物製作工藝資訊的獲取，需將數位化記錄的金屬文物資訊與檢測分析的結果相結合。例如，通過文物的表面特徵、夾雜物形貌等檢測資訊與成型、裝飾等工藝的關聯，可以判定金屬文物的製作技術。

金屬文物產源資訊的獲取，主要集中在青銅器的礦料來源研究上，其溯源的方法有微量元素示蹤法、鉛同位素比值法、錫同位素法、銅同位素法等。前兩者為主要且較為成熟的示蹤方法，其它方法處於摸索與探究階段。產源分析需要結合古代文獻、現代地質普查、礦冶遺址挖掘及田野調查等資料，需要與歷史學、礦冶考古、冶金學、地質學等多學科相結合進行。

五、金屬文物科技標本庫與資料庫建設

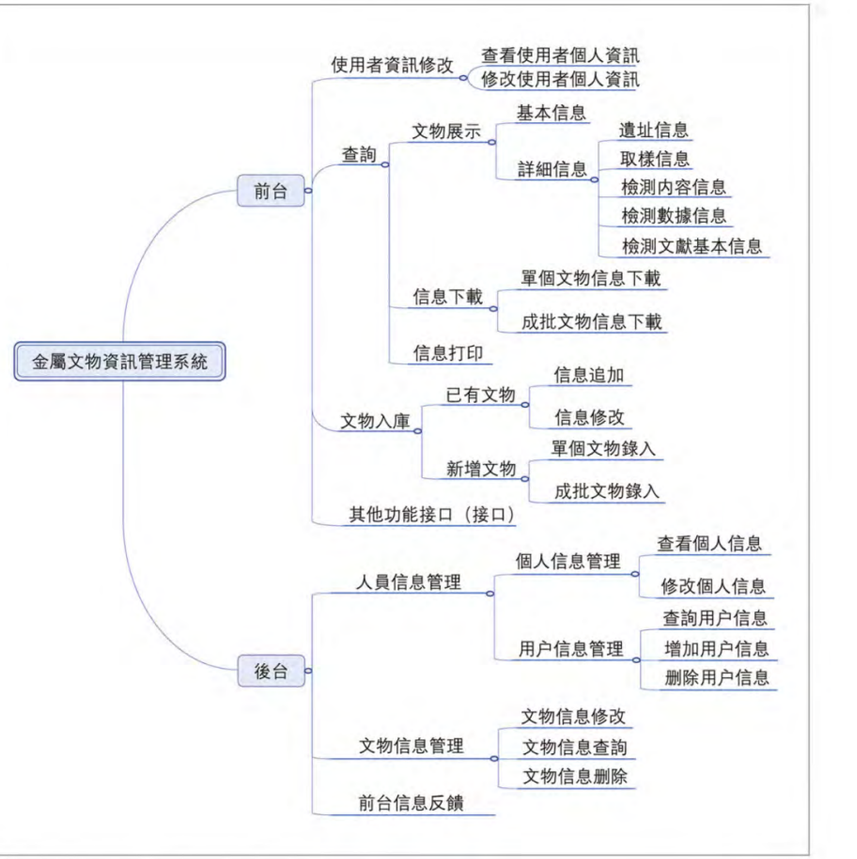
金屬文物科技標本庫和資料庫建設是實現文物資訊化的的基礎性工作。依託北京科技大學已有的金屬標本庫，課題組選擇增加考古背景清晰、具有技術代表性的文物標本入庫。通過標本庫資訊管理系統，可實現北京、上海、西安的異地存儲、統一管理，並與資料庫形成關聯。同時，課題組進行資料庫結構設計和應用系統開發，將金屬文物科學認知的多元資訊輸入，通過雲存儲、備份，建立多元資訊資料庫。目前課題組已開展金屬文物科技標本庫與資料庫建設，並歸納形成標本庫與資料庫建設及共用系列標準規範，為標本統一管理、科技資料保存與利用、資訊共用提供重要技術依據，同時也為金屬文物的技術研究及價值認知提供支撐，形成文物多元資訊存儲共用服務平台，成為國家文物科技資源平台的一部分。

(1) 金屬文物科技標本庫建設

目前，課題組初步完成了《金屬文物科技標本庫建庫與共用規範》，規範了我國金屬文物標本建設、標本庫管理和標本共用方式，以保證文物標本的合理、安全存放與科學管理。同時，統一的資料資訊及管理方式，將有助於全國範圍內標本的共用、研究成果的互鑒。《共用規範》的內容主要包括：術語定義，定義了金屬標本、標本庫等術語；標本庫建設，包含了標本庫建設的場地、硬體、資訊系統、人員、制度；標本庫管理，規範了標本的接收、拒收、借出、保存，標本的編碼方式，採集量與前處理，以及標本的共性、個性化描述資訊條目；標本共用，制定了標本共用方式、許可權分級、共用制度等內容。

第一，規範標本庫建設。通過調研行業內外標本庫建設模式，課題組結合金屬文物標本的屬性及保存、使用時的特殊要求，從硬體設施、管理制度等方面制定了較為科學的標本庫建設規範，展開了文物實體標本庫建設。對需新建實體標本庫的單位，需規劃場地空間，合理佈局標本櫃架，配備庫房工作小型設備；對已建有基本標本庫的單位，需完善庫房照明、通風等設施，配備尺寸合理、提取方便的標本存放櫃架，並配備易於展示、防塵防潮的高彈膜標本存放盒。金屬文物科技標本庫需廣泛收集從新石器時代到明清時期具代表性的各類金屬文物標本。金屬文物標本覆蓋金、銀、銅、鐵、錫、鉛等多類材質，標本庫將篩選具有代表性的三類標本入庫，為技術發展譜系研究提供支撐。

第二，實現標本統一管理。課題組已梳理標本庫管理流程，重點從標本編碼方式制定和標本庫資訊化管理建設兩方面細化研究，形成科學合理、可行性高的規範草稿。還需梳理並篩選金屬文物標本的關鍵資訊，列出標本類別、年代、出土地、存放單位、序號、材質資訊，作為標本編碼資訊。在保留標本原編碼、實驗編碼的基礎上，制定標本編碼為：材質代碼+年代代碼+出土地代碼-單位代碼+流水號。按照標本庫管理流程的要求，結合各單位需求及標本庫建設規劃，實現標本入庫、標本借入/借出、資訊增刪改查、標本資訊共用及系統管理等規範化操作功能模組（如圖四）。標本的資料包括標本基本資訊及圖像資料，資料格式為具有一致的強類型欄位，且異地分佈的標本庫在操作過程中需嚴格保證事務的原子性、一致性與隔離性。課題組選擇了SpringBoot+Vue前後端分離技術、MySQL關係型數據庫作為系統搭建框架，構建標本資料表，實現了規範管理主要功能模組，並針對異常情況設計全域異類處理，保證系統安全性。



圖四　金屬標本科技資料庫系統功能模組

第三，構建標本共用基礎。課題組通過共用標本，逐步完善研究內容，嘗試系統性梳理與認知金屬文物價值。規範草稿將標本庫許可權分為個人、單位、共建單位、公眾四級。按照共用規章制度，單位可選擇開放標本共用，其他單位或個人按照申請審批的借出流程，完成標本共用。

(2) 金屬文物科技資料庫建設

金屬文物多元內在價值的挖掘與闡釋是價值認知研究的核心部分。目前國際上的主流研究模式是在大量獲取文物分析檢測資料的基礎上，甄選並構建精確反映其原料、生產、流通與使用過程的特徵指標體系，揭示其製作技術起源、發展、演變規律及其與社會其他方面的相互關係。隨着資訊技術的發展，大體量、

多特徵的金屬文物科技資料庫在文物價值認知及保護研究中的作用逐漸凸顯，異構多元數據的挖掘分析成為研究的熱點和難點之一。

本研究完成了《金屬文物科技資料庫建庫規範》和《金屬文物科技資料庫共用規範》草稿，包含資料庫建庫目的與意義、國內外相關標準以及發展情況、適用範圍、資料庫建庫規範相關技術內容以及資料庫所涉及的產品清單。兩份草稿規範了金屬文物科技資料庫建設總體要求、資料庫內容要求、資料庫系統基本功能和安全保障與運行維護。資料庫建設總體要求規範包括了建設原則、資料品質要求和安全與保密；資料庫內容要求規範包括了資料庫構成和欄位描述；安全保障與運行維護規範包括了系統運行管理、資料庫備份和機房環境管理等。《金屬文物科技資料庫共用規範》確定了規範使用範圍、規範性引用檔、各類術語和定義、金屬文物科技資料的輸入輸出規範以及資料庫人員許可權規範。輸入輸出規範包含單個文物科技資料以及成批文物科技資料的輸入輸出。金屬文物所涉及資訊包括文物基本資訊、遺址資訊、檢測文獻資訊、取樣資訊、檢測內容資訊以及檢測資料資訊。文物資料庫人員許可權規範確定了各類人員的操作許可權，所涉及人員類型包括超級管理員、管理員以及普通用戶。

第一，完成資料庫設計與建設。在金屬文物科技資料庫的需求分析的基礎上，課題組對金屬文物科技資料庫的資料庫結構、系統功能等進行設計。根據建庫規範中的資料集合可知，金屬文物科技資料項目個數不固定且長度可變，關係型數據庫無法滿足資料的存儲需求，且操作人員對文物資料的讀操作相較於寫操作更頻繁。根據金屬文物標本科學資料特性，課題組設計了系統技術框架。根據金屬文物資料的持久性以及非結構化的特性，資料庫採用了MySQL+mongoDB，分別存儲基本資訊與科學資料；後台採用了java+springboot的技術棧，前端則使用了bootstrap以及vue框架。

第二，實現資料共用與視覺化。基於金屬文物資料庫提供的API介面，課題組建立資料共用平台，按照使用者級別顯示可查看的資料項目。使用者在系統允許的範圍內可以批量選取文物資料，可以對文物標本基本資訊進行檢索、文物詳細資料線上查看、文物資料單個及批量匯出為加密格式、加密格式文物資訊批量導入。使用者可以根據需要傳遞加密後的資料檔案，在不同使用者、不同單位之間實現可控的資料共用機制。資料共用系統採用SSM框架設計，文物資料採用MongoDB文檔行資料庫進行存儲，實現了web應用中鍵值對訪問非結構化資料的要求。採用Apache Echarts實現各個文物的大量資料視覺化展示。結合文物資訊的實際需求，系統採用圓形圖模組對文物資訊進行展現。

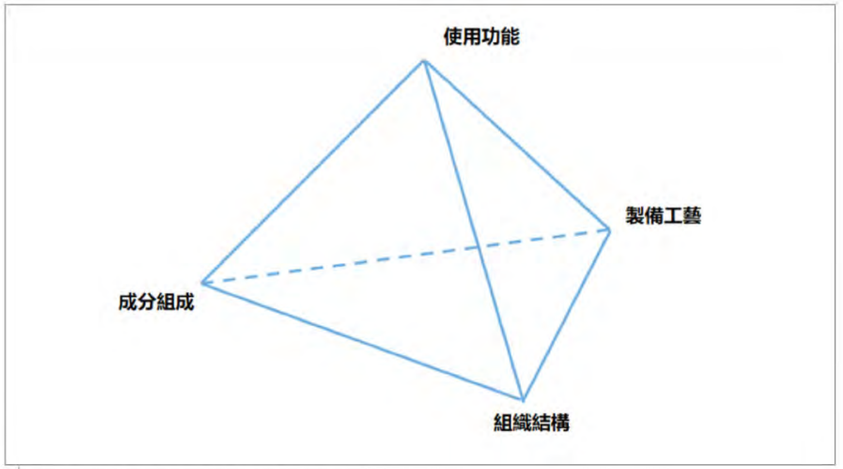
第三，實現面向材料科學資料的多元統計分析軟體平台的設計與開發。課題組以python語言搭建了科學計算軟體平台，可針對金屬文物樣本的科技資料進行聚類分析、最小支撐樹分析、對應分析、判別分析、Bayes準則多類逐步判別分析、時序分析、主成分分析、支持向量機和線下回歸分析。課題組實現多種資料篩選與視覺化方法，通過軟體交互介面獲取的行列編號，從資料中選擇資料區域進行分析，實現資料篩選，對指定資料進行分析，並以視覺化方式呈現資料處理結果。

六、金屬文物成分-結構-工藝-功能關係模型

材料的不同的功能取決於其成分與組織結構。為了使材料形成某種特定的組織結構，人類就要確定對材料進行製備和處理加工的程式和手段，這就是工藝。古代材料也是如此，金屬文物的材料成分、結構、工藝與功能之間的關係是密不可分的，成分和工藝可以極大的影響材料的功能。古人對成分與功能的關係早已有所關注。例如，《周禮・考工記》有「六齊」之說：「金有六齊，六分其金而錫居一，謂之鐘鼎之齊；五分其金而錫居一，謂之斧斤之齊；四分其金而錫居一，謂之戈戟之齊；三分其金而錫居一，謂之大刃之齊；五分其金而錫居二，謂之削殺矢之齊；金錫半，謂之鑒燧之齊。」[8] 這段記載中的金屬合金成分配比雖不完全與古代金屬材料對應，但是反映了古人如何認知金屬合金成分配比與器物功能之間的關係。

簡言之，功能是目的，成分是基礎，結構是形態，工藝是手段。課題組建立了金屬文物的成分-結構-功能-工藝關係模型，為進一步深入研究金屬文物價值認知提供了一個工具。圖五為金屬文物的成分-結構-工藝-功能關係模型，可說明理解古代金屬文物的科學內涵。這四個要素反映了材料研究中的共性問題，其中製備工藝、使用功能是兩個普遍的關鍵要素。正是在這四個要素上，各種材料相互補充、相互滲透。研究者只要掌握了這四個要素，就掌握了金屬文物製作的本質。如果通過這些方面去認識金屬文物，許多長期困擾科技工作者的問題都將迎刃而解。研究者可以依據這四個基本要素評估金屬文物研究中的技術問題，填補現代材料科學與工程資料的空白，以新的或更有效的方式闡釋金屬文物的材料科學問題。

8 崔高維點校，《周禮》(沈陽：遼寧教育出版社，1997)，頁96。



圖五　金屬文物的成分-結構-功能-工藝關係圖

研究者因而可以根據上述四種要素，形成對金屬文物的不同分類。從成分組成上來看，金屬文物主要有銅、鐵、金、銀、錫、鉛、鋅、汞八種金屬元素的單質，及各類二元、三元乃至多元的合金。以銅及銅合金來看，金屬文物含有紅銅（保含少量雜質成分元素）、青銅（可細分為錫青銅、鉛青銅、鉛錫青銅，甚至有砷元素加入形成的砷青銅）、黃銅（可分為鋅黃銅、鉛鋅黃銅等）、白銅（可分為鎳白銅、砷白銅等）。除此之外，金屬文物的鐵系合金主要是鐵-碳合金組織，含有少量矽/硅、硫、磷、錳元素，碳含量小於0.02%的是純鐵，0.02-2%的是鋼（按碳含量還可細分低碳鋼、中碳鋼和高碳鋼），大於2%的是生鐵。從組織結構來看，有樹枝狀晶體組織、等軸晶（包括孿晶組織），鐵碳合金有萊氏體、珠光體、奧氏體、魏氏體、馬氏體組織等特殊的組織型態。金屬文物的製備工藝包括採礦、選礦、冶煉、成型加工等，其中成型加工包括鑄造、鍛造和焊接等。金屬文物可通過其使用功能可分為禮器、食具、飲具、農具、兵器、工具等各類。

本研究將採用多元回歸模型，用多項式表示金屬文物功能如式 (1) 所示：

$$Y=\sum_{k=0}^{n}\binom{n}{k}x^{k}a^{n-k} \qquad (1)$$

Y為文物某功能估計值，x為某因數，又稱「控制變數」，可為成分、結構或工藝變數，a為回歸常數項，n為因數個數。在實際應用中，往往保持某些因數不變，建立變數因數應變曲線，回歸計算各常數項。

下一步，課題組將已測金屬文物分析檢測及採集資料登錄，進行反覆運算處理，建立變數因數應變曲線，回歸計算各常數項，可定量描述金屬文物的成分-結構-工藝-功能的關係。

在搜集國內外關於中國古代青銅器科技研究文獻基礎上，課題組已初步梳理出中國古代青銅器材質、成形、表面裝飾各種技術類別。研究顯示，中國古代青銅器材質主要有紅銅、鉛錫青銅、砷銅等類別；青銅器主體製作或成形工藝主要包括鍛造、塊範法渾鑄、分鑄法、熔模鑄造、焊接等；表面裝飾工藝包括鑲嵌、鎏鍍、髹漆、彩繪、金銀平脫、包金銀等，鑲嵌材質包括寶玉石、金、銀、銅合金等，鎏鍍材質包括錫、金、銀等。對於銅器製作技術與成分、結構和功能的關係，可建立青銅文物成分-結構-工藝-功能關係模型。

七、結 語

中國是歷史悠久的文明古國，金屬文物資源豐富。金屬文物價值認知是一項長期的系統工作。本課題組的研究目前主要集中於基礎層面，包括建立標準參考物質、工藝判別方法、多元資訊提取方法體系、標本庫和資料庫。本課題組也在理論層面有所探索，提出了成分-結構-功能-工藝模型。相信在這些基礎上進一步開展研究，可促進金屬文物多元資訊提取更深層次的進步，達到科學認知和價值闡釋的新境界。金屬文物關鍵科學資訊的提取、分析闡釋的開展將顯著提升中國文化遺產保護和利用的科技支撐能力，研究者們將充分挖掘、傳承、利用珍貴文物資源的多元價值，讓文物真正「活起來」。

致謝：本研究獲得國家重點研發計劃「可移動文物價值挖掘及其關鍵技術（無機質類）」(2019YFC1520200) 的資助。感謝課題組的北京科技大學劉思然、李秀輝、張周瑜、喬尚孝、盧欣彤、周倍加，北京大學陳建立、張吉，陝西省考古研究院李建西，故宮博物院史寧昌、劉建宇、黃婧等人士提供資料和支援。

認知金屬文物的方法

李建深

人們怎樣從一件「不會說話」的文物提取信息呢？潛偉的文章為我們提供了多種角度，他提倡以標準統一的方法從一件文物上盡量提取信息。

學者對文物有不同的分類方法。根據時代，文物可以被劃分為石器時代、青銅時代、鐵器時代等。根據地區，文物可以被劃分為亞洲、歐洲，或非洲等地的文物，由此還可再將其細分為亞洲內中國、日本、韓國等地的文物。而通過文物的製作材質，可以將文物細分為以金屬製成的、以絲綢製成的、以陶瓷製成的等等。潛文則是專注於金屬文物的討論。

文物的不同分類方法，背後都隱藏深刻的含意，也反映學者為文物進行分類時的研究宗旨與路向。不同的分類方法，帶來的研究問題、方法也不同。以時代劃分文物的研究者，可能是想歸納出大批文物如何隨時代變遷而變化的規律，這必然要依靠有清晰時代標記的文物作參照物，方可精細劃分文物的時間變化。以地區劃分文物的研究者則可能是想總結出各個地區如何發展出其地區獨有的器物，這也必然要依靠有清晰出土信息的文物作參照物。至於以製作材質分類的學者，其研究問題可以多種多樣，其一可能是想探究人類如何控制世界上不同物料以進行生產活動，這必然要依靠翔實清楚的材質分析信息。如何獲取清楚的材質分析信息，如何在快速、有效、盡量不損害文物的前提下分析文物，是世界文物研究的大潮流。中國在這方面亦獲取了不少重要成果，潛偉提倡的統一標準方法將引領這方面的研究走上新台階。潛偉在文中詳細地闡述了他的理念與行動。

在古代，不同的作坊、工廠冶煉金屬器物時未必有統一的標準。金屬文物由於經歷長時期的歲月洗煉，受自然環境或人為因素的干擾，後人要分析其材質比分析現代製造的金屬器物難度更大。在現代，要分析金屬文物時，操作方法、分析機器、實驗室標準等因素的不同，也會導致分析結果的差異。分析結果的差異，自然會影響研究數據的不統一。目前，有關人類如何運用不同物料以進行生產活動的數據較為有限，缺乏統一標準數據的支撐。沒有統一的標準數據，研究者便不能進行廣泛的科學分析。因此，建立統一標準的檢測方法是開展廣泛科學分析的大前提。此文中列舉了大量金屬文物成分分析的方法，如「攝影、鐳射掃描、超景深實體顯微觀察、X射線照相技術 (XRI)、中子射線成像技術、工業CT等」，這些方法都可以帶來大量分析數據與信息。有了這些數據與信息，研究者便可以進一步分析文物的設計與製作技術。

新時代技術帶來的分析方法，為學者提供了更多新穎的角度，讓學者得以去探究人類如何運用世界上的物料。如果我們的關注點只停留於某地某時期某些工匠的設計與製作技術，只要懂得運用分析工具，獲取可靠信息就行了。潛偉的構想則明顯不是局限於某地某時期某個工匠，而是設計一個大框架去了解人類控制物料的規律。因此，他在文中提倡人們以統一標準的方法構建「資訊提取方法體系、標本庫、數據庫、金屬文物成分-結構-工藝-功能關係模型」等，以期通過統一標準去獲取、分析數據與信息，在這大框架下構建共通的知識，探究人類生產活動的大規律。

通過這樣一個大框架，學者們當有更廣闊的天地去探究更深刻的問題。與此同時，大框架還有利於金屬文物的全方位展示，促進資料庫的共同構建、共同享有，推動金屬文物知識與公眾分享等重要議題。雖然此文只聚焦於中國的金屬文物，它也為認知全世界金屬文物帶來了啟示。此方向、框架也為未來的絲綢文物、陶瓷文物等統一標準的分析方法以及其大框架的構建提供了基礎。

成像技術與商周青銅器製作技術的研究

丹羽崇史 著
陳彥如 譯
京都大學大學院
博士研究生

摘　要

近年來利用成像技術進行的文化財 (cultural properties) 研究日漸增多，該方法對於青銅器製作技術的探討也行之有效。筆者將整理關於青銅器製作技術的先行研究成果，考察X射線、CT解析等成像技術的成果對上述研究產生的影響。本文擬對器物組成部分的結合方式、鑄型結構（「消失模」）、鑄造時的排氣、泥範技術等四個問題進行介紹，並對今後的課題予以探討。

關鍵詞：X射線CT解析、結合方式、鑄型結構、消失模、鑄造時的排氣、泥範技術

一、文化財與成像技術

成像技術是將指定對象測量後，圖像化、可視化的一種技術。近年來，成像技術已被廣泛應用於日本的文化財[1] (cultural properties) 研究中。高妻洋成曾指出文化財研究中成像技術所發揮的四個作用：[2]

1. 紀錄形狀
   三維重建 (SfM-MVS)、掃描（二維・三維）等。
2. 可視化不可見的內部結構
   γ 射線攝影、X 射線攝影、X 射線CT解析、紅外攝影、探地雷達、地磁探測、電法探測等。
3. 查明細微結構
   數碼顯微鏡、激光顯微鏡、電子顯微鏡等。
4. 可視化形狀之外的物理信息
   X 射線螢光光譜法測定元素分佈、傅立葉變換紅外光譜法 (FTIR) 成像、紅外熱成像等。

至今為止，日本學界已利用成像技術對多種對象進行了調查，包括金屬器、陶瓷、玻璃器、石器、木器、漆器、塑像、古文字（木簡、墨書陶器）、壁畫、繪畫和遺址等。

商周青銅器製作技術有着悠久的研究歷史。在傳統考古學研究不斷發展的同時，基於科技分析對材質和構造的研究也取得了重要成果。近年來，利用成像技術（特別是X射線CT解析）分析商周青銅器製作技術的研究取得了顯著進展。筆者在2015年的論文中[3]，從結合方式、澆口（堰）、墊片和鑄型結構等幾個方面對青銅器的製作技術進行了梳理，指出了X射線CT解析在解決這些課題上的意義，並提出隨着CT圖像解析和復原實驗數量的積累，製作痕跡和製作方式間的關係將愈見明朗。本文中，筆者將以自己和其他日本學者的研究為例，介紹自上一篇論文以來利用X射線CT解析研究商周青銅器製作技術的新實例，並探討今後所面臨的課題[4]。

二、青銅器製作過程與技術的研究

在介紹具體的研究之前，這裏先對商周青銅器的製作過程進行一下整理。[5]圖一以商周青銅器為例，展示了鑄造的基本過程。[6]首先用泥製成模，進而翻製出外範。之後將外範和內芯組合為鑄型，把高溫融化的青銅澆鑄其中。最後，去除合範時產生的範線，並將整個器物打磨整修。

1 文化財是日本為保護文化以及自然遺產所建立的標準，依《文化財保護法》訂立。包含有形文化財、無形文化財、民俗文化財、紀念物、文化景觀和傳統建築物群六個分類，涵蓋了工藝美術、史蹟、民俗、動植物和傳統技術傳承人等多個方面。（譯者註）

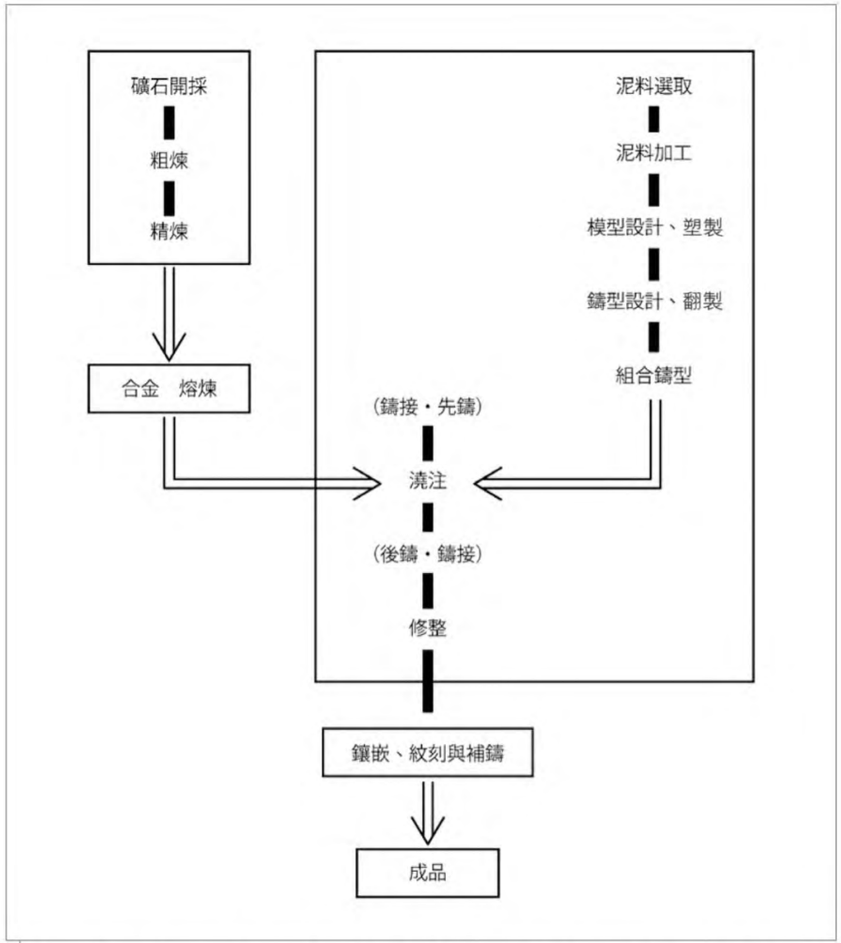
2 高妻洋成，〈文化財調查におけるイメージング技術の現狀と課題〉，《埋蔵文化財ニュース》，第167號 (2017年3月)，頁3-6。

3 丹羽崇史，〈CT解析與中國青銅器制作技術的研究〉，《泉屋透賞：泉屋博古館藏青銅器透射掃描解析》(北京：科學出版社，2015)，頁452-459。

4 第三節中關於「器身與附屬部件的結合方式的問題」、「鑄型的結構問題（關於消失模）」的部分，因在上一篇論文中已有探討而略顯重複，不過本文將在舊文的基礎上介紹最新的研究成果。

5 奈良文化財研究所飛鳥資料館，《鑄造技術の考古學—東アジアにひろがる鑄物師のわざ—》(明日香：奈良文化財研究所飛鳥資料館，2011)，頁1。

6 蘇榮譽等，《中國上古金屬技術》(濟南：山東科技出版社，1995)，頁87。



圖一　青銅冶鑄技術的一般工序流程 (本圖據蘇榮譽等，《中國上古金屬技術》，頁87改繪)

以上便是基本的製作過程。但在實際生產中，根據產品種類或生產者的不同，具體步驟和材料等方面存在多種不同情況。比如，在製作範時，除了製模後將黏土等柔軟的材料按壓在其上形成範的方法之外，也有在範上直接雕琢紋樣的情況。除此之外還有失蠟法，即先用蠟製作模，再用範料將其包裹後加熱，使蠟融化從而形成範。[7]

7　關於商周青銅器的製作工藝，蘇榮譽有更為詳細的解說。蘇榮譽，〈商周青銅鑄造模範的七個問題〉，丹羽崇史編，《対照実験を主軸とした東アジア鋳造技術史解明のための実験考古學的研究》(奈良：奈良文化財研究所，2020年3月)，頁40-59。[編者按：讀者可參詳丹羽崇史文章與特輯中彭鵬文章所引其專書對失蠟法的討論。]

三、成像技術與商周青銅器製作技術的研究

（一）器身與附屬部件的結合方式的問題

筆者根據張昌平整理的術語，將商周青銅器的器身和耳部等附屬部件的結合方式大致分為以下四類。[8]

渾鑄：一次性鑄成器身和附屬部件。

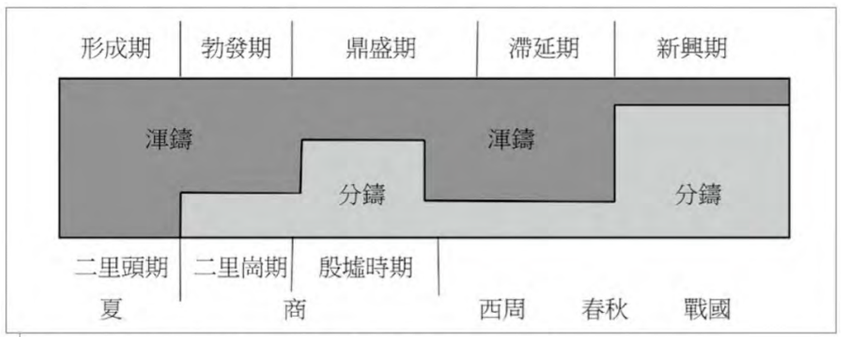
先鑄：先鑄造附屬部件，將其嵌入器身的鑄型中，在鑄造器身時完成結合。

後鑄：先鑄造器身，再將附屬部件的鑄型裝在器身上，對附屬部件進行澆鑄從而完成結合。

焊接：先分別鑄造器身和附屬部件，然後用熔融金屬（焊料）將它們連接起來。

此外，先鑄、後鑄和焊接被統稱為「分鑄」。也有分類將先鑄和後鑄統稱為「鑄接」，用以區別焊接。

如2015年的舊稿所述，至今為止的研究已證明青銅器部件的結合方式隨時間推移而不斷變化（圖二）。[9]



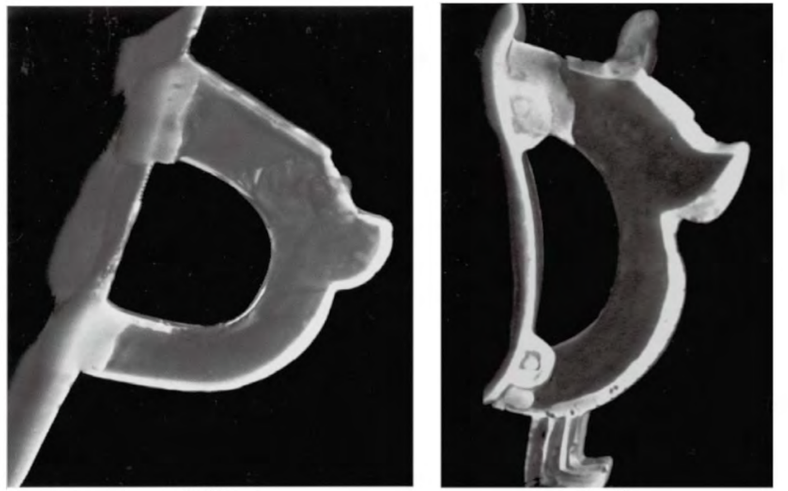
圖二　結合方式的變遷 (本圖據蘇榮譽等，《中國上古金屬技術》，頁180改繪)

8　張昌平，《曾國青銅器研究》(北京：文物出版社，2009)，頁31-33。丹羽崇史等，〈天理參考館蔵「鑄客」爐の研究 (2)—器身・足部・鎮の製作技法に關する調査—〉，*FUSUS*，第8號 (2016年2月)，頁31-42。

9　丹羽崇史，〈CT解析與中國青銅器製作技術的研究〉，頁452-459。

在二里頭時期出現了真正意義上的青銅器。之後，出土於二里崗時期盤龍城遺址的青銅簋 (李M1:5) 使用了後鑄耳部的技術，[10] 鄭州商城遺址出土的幾件方鼎也被認為是先鑄器底，後鑄側壁和足部。[11]

雖然只見於部分青銅器，但上述案例說明在二里崗時期已經出現了先鑄和後鑄的技術。[12] 從殷墟到西周時期，雖然一部分青銅器採用了先鑄和後鑄的分鑄法，[13] 但主流仍是渾鑄法。至春秋時代中期，鑄造方法演變為以分鑄法為主，並出現了使用鉛錫合金的焊接技術。[14]



圖三　分鑄耳部的青銅器物 (引自泉屋博古館、九州國立博物館編，《泉屋透賞：泉屋博古館藏青銅器透射掃描解析》，頁268、295)

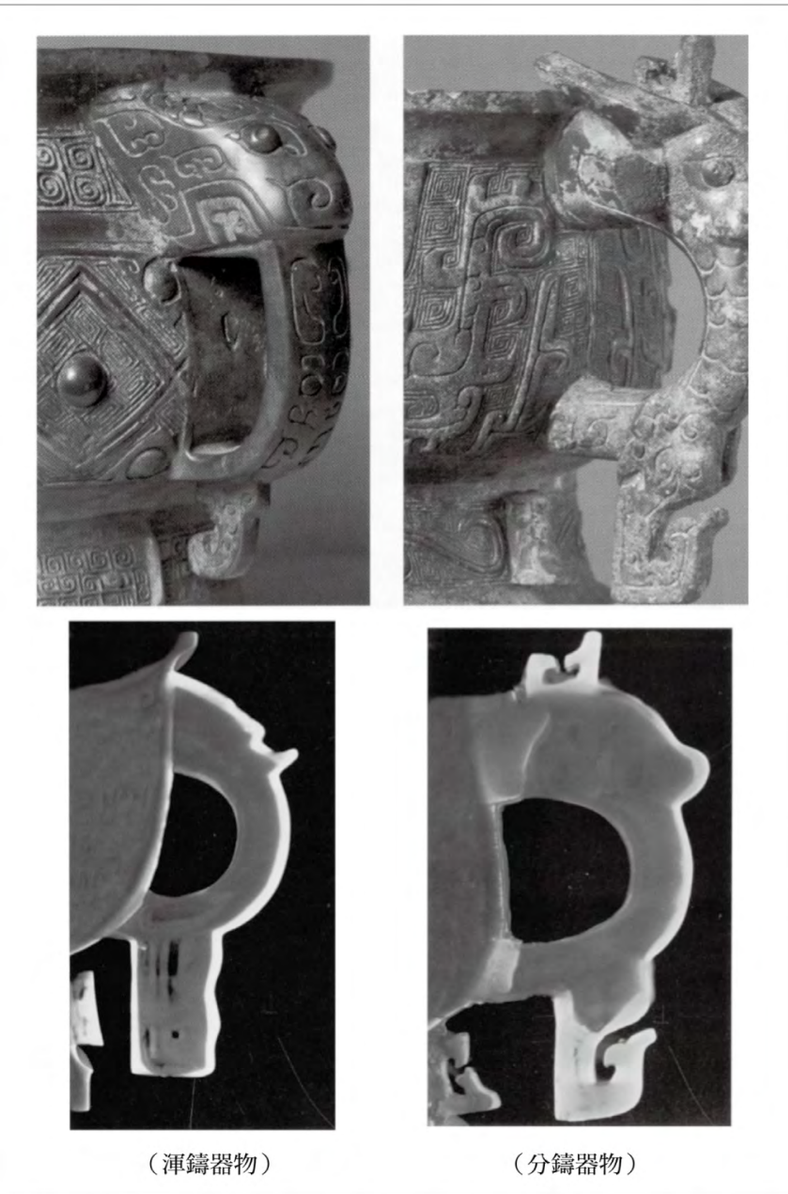
10 蘇榮譽等，《中國上古金屬技術》，頁110。

11 蘇榮譽等，《中國上古金屬技術》，頁108。

12 在二里崗時期的青銅器中，也有用後鑄形式對鑄造缺陷進行補鑄的事例。

13 蘇榮譽指出在陝西省強國墓地中出土的青銅器中，已有「鉚式焊接」的事例。張昌平發現，在被稱為「曾國青銅器」的器物群中已有以銅為焊料的焊接技術，比如隸屬西周中晚期的郭家廟M8出土的匜以及周家崗出土的銅盉等。但是這些被作為「焊接」的事例，所用的焊料都是銅，其鑄融溫度等工藝要求都與春秋時期之後的鉛錫合金焊接技術有很大不同。對這些技法的評價以及如何命名，還需要進一步的討論。蘇榮譽等，《中國上古金屬技術》，頁321-322。張昌平，《曾國青銅器研究》(北京：文物出版社，2009)，頁168-176。

14 郭寶鈞 (1893-1971)，《商周銅器群綜合研究》(北京：文物出版社，1981)，頁126-127。蘇榮譽等，《中國上古金屬技術》，頁157-179。



圖四　渾鑄和分鑄耳部的青銅簋 (引自泉屋博古館、九州國立博物館編，《泉屋透賞：泉屋博古館藏青銅器透射掃描解析》，頁73、79、448)

如上所述，結合方式的變化如實地反映了商周青銅器製作技術的歷史性變遷。因此可以預見，通過對此類數據的不斷積累，最終將對如何評價各時期和地區的生產技術產生重大影響。

在判斷結合方式上肉眼觀察固然重要，但也有許多器物，僅憑肉眼觀察難以界定。這類情況下，如果利用X射線CT解析就能夠清晰地確定其內部結構，從而根據部件的「先後關係」推測出鑄造工序，也給製作技術的進一步細分帶來可能。

例如，泉屋博古館和九州國立博物館通過X射線CT解析找出了鑄接所用的凸榫種類，從而證實在西周青銅器中除渾鑄外，即使是凸榫的鑄接也有先鑄和後鑄兩種方式（圖三）。[15] 張昌平引用上述結論，推定自西周至戰國時期簋耳的結合方式大致經過了渾鑄→先鑄→後鑄→焊接的演變過程。[16]

又如，廣川守通過觀察發現，渾鑄時器物側壁的紋樣會被錾（耳）截斷，錾（耳）所投影正下方的側壁表面有和錾（耳）寬度近乎相同的兩條垂直範線，兩條範線內無紋樣裝飾；而分鑄時器物側壁的紋樣則延續至錾（耳）投影正下方，並在錾（耳）對應的中線上有一條垂直方向的範線（圖四）。[17]

由此可見，X射線CT解析不僅能分析青銅器上殘留的製作痕跡，還能分析青銅器的內部結構及其與結合技術之間的關係。不過需要注意的是，即使搞清了內部結構，其形成原因仍可能有多種解釋，應進行慎重討論。

（二）鑄型的結構問題（關於「消失模」）

通過加熱融化包裹在範料中的蠟質模型以形成鑄型的技法被稱為「失蠟法」。失蠟法又被叫作「蠟型法」或「蠟模法」，是一種利用消失模[18] 的鑄造技術。近年來關於中國青銅器時代是否存在失蠟法爭論不斷，對個別青銅器製作工藝的研究案例也在增加。[19] 另外，學界也持續關注是否曾存在蠟之外材質的消失模的可能性。[20]

15 今津節生等，〈X線CTを利用した殷周青銅器の構造解析(I)—館蔵爵・盉の調査—〉，《泉屋博古館紀要》，第26號 (2010年3月)，頁25-69；今津節生等，〈X線CTを利用した殷周青銅器の構造解析（II.）—館蔵鼎・簋の調査—〉，《泉屋博古館紀要》，卷27號 (2011年4月)，頁41-79；廣川守等，〈X線CTスキャナを利用した殷代青銅兕觥の内部構造解析〉，《中國考古學》，第10號 (2010年11月)，頁149-165；泉屋博古館、九州國立博物館編，《泉屋透賞：泉屋博古館藏青銅器透射掃描解析》(北京：科學出版社，2015)。

16 張昌平等，〈論商周時期青銅簋的鑄型技術〉，《考古》，2012年第10期 (2012年10月)，頁60-70。

17 廣川守，〈商晚期至西周時期大耳（錾）的結合方式〉，《泉屋透賞：泉屋博古館藏青銅器透射掃描解析》(北京：科學出版社，2015)，頁446-451。

18 消失模是指在製作鑄型的過程中通過加熱或燃燒等方式會使其消失不見的一類模。比如失蠟法的蠟模，以及焚失法中用可燃材料製成的模都屬於消失模。

近年來，不少研究者開始通過分析成品的脫模角度和內部結構推定鑄型結構和製作技法。譚德睿和華覺明與河南省葉縣文物局的李元芝等人一起對葉縣出土的「許公寧」鏤空青銅裝飾（春秋時期）進行了研究。通過肉眼觀察、CT掃描及X射線成分分析得出了該器物是用失蠟法一體澆鑄而成的結論（圖五）。[21]

圖五　河南葉縣出土「許公寧」鏤空青銅裝飾的CT圖像 (引自李元芝等，〈許公寧透空蟠虺紋青銅飾件——先秦失蠟法之器例〉，頁100)

廣川守和三船溫尚則針對帶有可動式提梁的青銅卣的鑄造方法進行了研究。他們先選定泉屋博古館收藏的16件青銅卣，通過肉眼觀察範線的位置和方向，分析根據現有範線的位置和角度，塊範是否可從模上取下等問題。在此基礎上，他們通過X射線CT法檢查內部結構上有無分鑄痕跡，從而將卣的提梁分為五種類型，並對每種類型的鑄造方法進行了探討。他們最終得出結論，在提梁頂端圓環嵌入器身半環的結構中，3-5式都使用了常溫下是固體油脂的燃燒型消失模，並按3式→4式→5式的順序發生變化（圖六、七、八）。[22]

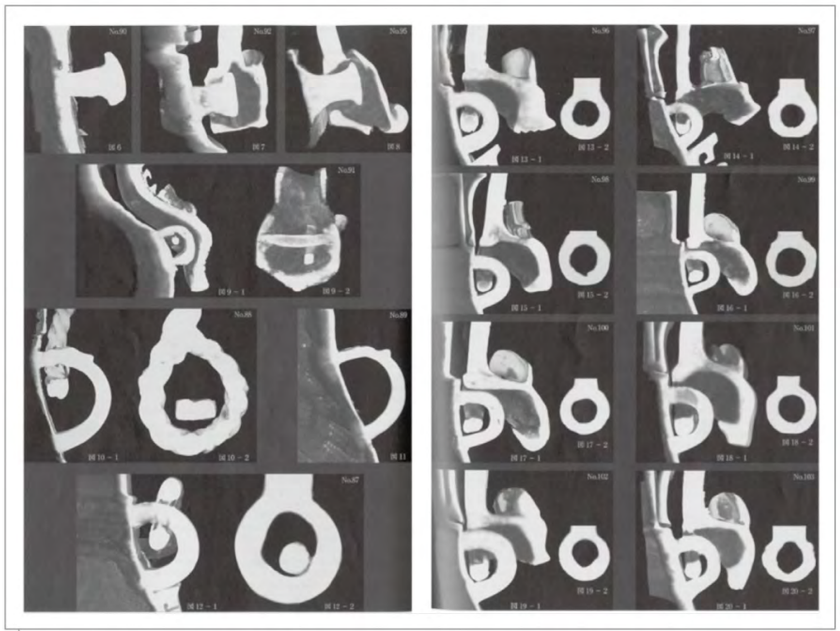
19 丹羽崇史著，陳洪譯，〈關於中國失蠟法出現之學史討論——關於東亞地區失蠟法出現與發展之研究 序論 (1)——〉，《三代考古》，第7號 (2017年10月)，頁281-296。(日文原文：丹羽崇史，〈中國における失蝋法の出現をめぐる學史的検討—東アジアにおける失蝋法の出現と展開に關する研究序説(1)—〉，*FUSUS*，第1號(2008年9月)，頁33-44。)。

20 丹羽崇史著，黃盼譯，〈中國周邊地區早期「失蠟法」的比較研究——關於東亞地區失蠟法出現與發展之研究序論 (2)——〉，《三代考古》，第8號，(2019年10月)，頁396-418。(日文原文：丹羽崇史 〈中國周邊地域における出現期「失蝋法」の比較検討—東アジアにおける失蝋法の出現と展開に關する研究序説—東アジアにおける失蝋法の出現と展開に關する研究序説 (2)〉，*FUSUS*，第6號 (2013年11月)，頁61-76)。

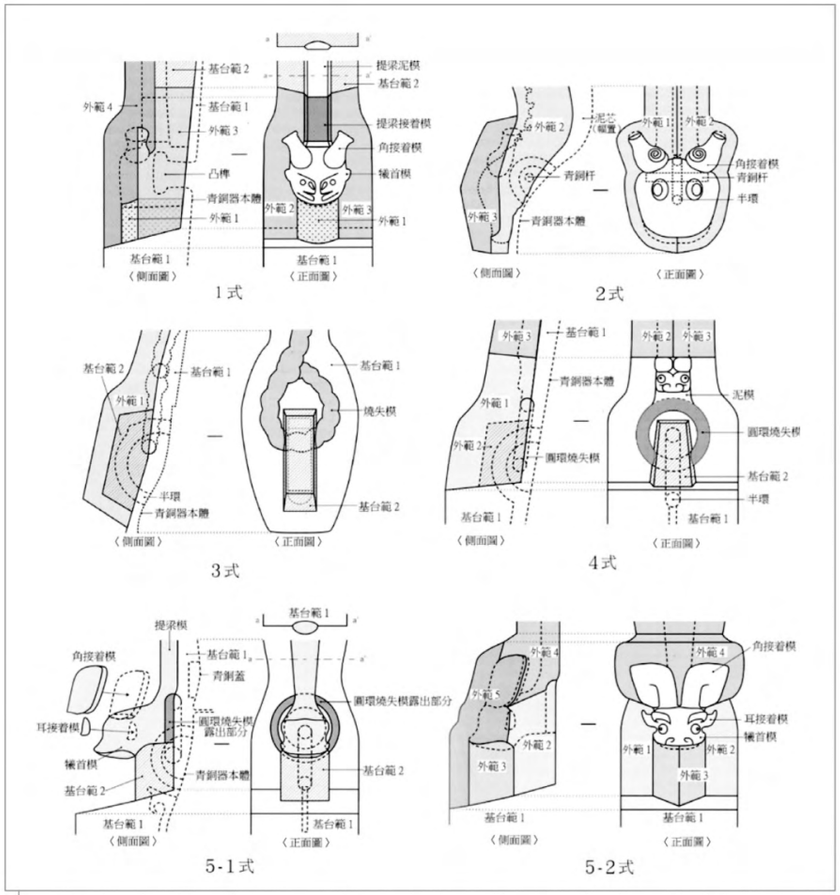
21 李元芝等，〈許公寧透空蟠虺紋青銅飾件——先秦失蠟法之器例〉，《中原文物》2007年第1期 (2007年1月)，頁96-103。

22 廣川守、三船溫尚，〈X線CTスキャンと范線調査から検討する卣釣手鋳造技法の変遷—泉屋博古館所蔵青銅器について—〉，*FUSUS*，第6號 (2013年11月)，頁36-59。

圖六　泉屋博古館藏青銅卣 (引自廣川守、三船溫尚，〈X線CTスキャンと笵線調査から検討する卣釣手鋳造技法の変遷—泉屋博古館所蔵青銅器について—〉，頁36)



圖七　泉屋博古館藏青銅卣的CT圖像 (引自廣川守、三船溫尚，〈X線CTスキャンと笵線調査から検討する卣釣手鋳造技法の変遷—泉屋博古館所蔵青銅器について—〉，頁38、39)



圖八　廣川守和三船溫尚推定的青銅卣提梁工程復原圖 (本圖據廣川守、三船溫尚，〈X線CTスキャンと笵線調査から検討する卣釣手鋳造技法の変遷—泉屋博古館所蔵青銅器について—〉，頁54、55改繪)

迄今為止關於消失模的研究中，主流觀點認為失蠟法在中國始於春秋時期。[23] 也有觀點認為焚失法（即用可燃材料製作模，並通過燃燒製作範的技法）可追溯到西周時期以前。[24] 廣川和三船針對殷墟至西周時期是否存在消失模的觀點來源於肉眼觀察和成像技術的兩相結合，建立在實物資料分析的基礎上，具有重要意義。

23 丹羽崇史著，陳洪譯，〈關於中國失蠟法出現之學史討論——關於東亞地區失蠟法出現與發展之研究序論 (1)〉。

24 譚德睿，〈中國古代失蠟法鑄造起源問題的思考〉，《文物保護與考古科學》，1994年第2期 (1994年12月)，頁43-48；譚德睿，〈中國青銅時代陶範鑄造技術研究〉，《考古學報》，1999年第2號 (1999年5月)，頁211-250。

（三）鑄造時的排氣問題 [25]

在西周時期前後生產的青銅器中，可以在一些鼎和簋的底部發現規則的條狀突起。這些人為造就的線條有很多種形式，比如網狀、Y字形、十字形等。蘇榮譽等學者提出這些痕跡的存在除了起加強筋和裝飾的作用之外，可能也有改善澆鑄時鑄型內排氣環境並防止形成氣孔等鑄造瑕疵的效果。[26] 如果範上的這種人工刻線有提高鑄造效率的作用，那麼它與如何評價商周時期的鑄造技術和製作者便息息相關。然而這一假設之前並未在實驗中得到檢驗，因此人工刻線的作用並不明瞭。

為揭示上述人工刻線的意義，筆者等人對青銅器文物進行了調查，並進行了鑄造的對比實驗。實驗用同一個坩堝一次性澆鑄兩件鑄型，兩件鑄型除有無人工刻線外完全相同。共計澆鑄兩次，鑄造四件成品。第一次先澆鑄有人工刻線的鑄型，後澆鑄沒有人工刻線的。第二次先澆鑄沒有人工刻線的鑄型，後澆鑄有人工刻線的。兩次的澆鑄結果，皆是有人工刻線的鑄型得到的瑕疵較少。雖然只經過兩次實驗，但說明人工刻線的確有可能發揮了提高鑄造效率的作用。

實驗之後，我們在九州國立博物館對鑄造實驗中製作的四件青銅器進行了X射線CT解析。在比較了樣本底部的內部結構後發現，無人工刻線的樣本具有更明顯的孔隙，但是並沒有發現底部以外的部分與刻線間有明確的關聯性（圖九）。

之前小節中提到的都是針對青銅器等文物進行的X射線CT解析。但像本小節展示的，用X射線CT法對已知製作過程的實驗樣品進行分析，可以更容易的掌握製作過程和內部結構之間關係，期待今後此類研究逐漸增多。

圖九　未經打磨修整的實驗成品和CT圖像 (引自奈良文化財研究所提供（實驗成品畫像）和九州國立博物館提供 (CT圖像))

25 此處實驗及調查的詳細內容請參照以下報告書。丹羽崇史編，《対照実験を主軸とした東アジア鋳造技術史解明のための実験考古學的研究》(奈良：奈良文化財研究所，2020年3月)。

26 蘇榮譽等，〈寶雞強國墓地青銅器鑄造工藝考察及金屬文物檢測〉，《寶雞強國墓地》(北京：文物出版社，1988年10月)，頁530-638。

（四）泥範的技術問題

在中國，有許多新石器時代以後的泥範出土例子。隨着商周青銅器的鑄型實驗及科技分析等綜合研究的展開，泥範特徵的的研究也變得越來越清晰。然而，這些研究大多局限於研究個案，從通史和廣域角度來探討泥範製作技術的時代變遷和地區差異的研究還比較少。

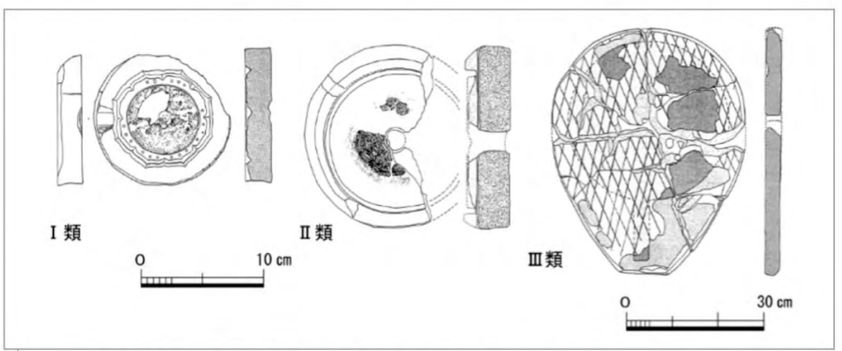
在日本的泥範演變研究中，其中一個案例是久保智康對銅鏡鑄型的研究。久保根據銅鏡鑄型的結構變化，將其分類如下（圖十）。[27]

Ⅰ類：單層鑄型（包括用真土[28] 作為化妝土薄塗表面的），出現在7世紀。

Ⅱ類：雙層鑄型。將粗模燒製後，在其上塗抹一定厚度的真土，出現在10世紀。

Ⅲ類：雙層結構，粗模上刻有線條，出現在14世紀之後。

筆者參考久保的研究，對二里頭時期至漢代的泥範鑄型的基本結構演變進行了研究。筆者發現，單層結構的鑄型從二里頭到東周時期很常見，同時也有一定數量的雙層鑄型。筆者還注意到，在漢代出土的錢範中，有在含砂的鑄型表面塗抹細黏土的事例，其結構與日本奈良時代的錢範具有共同特徵。[29]



圖十　久保智康的銅鏡鑄型分類 (本圖據久保智康，《中世・近世の鏡》，頁53改繪)

27 久保智康，《中世・近世の鏡》(東京：至文堂，1999年3月)，頁52-62。

28 真土，日本鑄造材料的一種。在細沙和黏土的混合物中，添加木糠、紙張等材質加水搓揉而成，具有良好的透氣性。（譯者註）

29 丹羽崇史，〈二里頭時代から漢代における土製鋳型の基体構造の變遷〉，《アジア鋳造技術史學會研究発表概要集》，第15號 (2022年7月)，頁24-26。

除了肉眼觀察外，X射線CT法也有助於探討泥範的構造。在對日本福岡縣須玖Takauta遺址出土的彌生時期泥範進行了考古、材質、X射線CT結構解析和復原實驗後，發現其具有內外雙層結構（圖十一）。[30] 另外，雖不是與鑄造相關的研究案例，但對川原寺裏山遺址出土的塑像進行X射線CT解析後，其結構特徵也開始被廣泛關注和分析。[31] 隨着泥範X射線CT研究案例的逐漸增加，相信針對其時間演變和地區差異的研究今後也將不斷深化。

圖十一　福岡縣須玖Takauta遺址出土的彌生時期泥範和CT圖像 (本圖據春日市教育委員會，《須玖タカウタ遺跡3-5次調查》圖版8、頁109改繪)

30 春日市教育委員會，《須玖タカウタ遺跡3-5次調查—》(春日：春日市教育委員會，2017年3月)。

31 市元塁、輪田慧，〈X線CTスキャナによる川原寺裏山遺跡出土塑像の基礎調查〉，《飛鳥・川原寺裏山遺跡と東アジア　資料集》(吹田：關西大學文學部考古學研究室國愛シンポジウム実行委員會，2012年12月)，頁139-152。

四、小 結

本文介紹了利用X射線CT解析對青銅器製作技術進行研究的相關案例。

至今為止，有關復原青銅器製作技術的研究主要停留在傳統的考古學研究方法上，即根據器物表面殘存的製作痕跡對製作過程進行還原。但是，現有研究即使釐清了製作痕跡，仍不足以復原技術整體。通過X射線CT解析不僅能夠掌握器物表面的痕跡，還能夠挖掘器物內部的製作痕跡，從而將「製作痕跡」和「技術」更為密切地聯繫起來，也就是起到「中層」(Middle Range) 研究的作用。因此，積累器物表面製作痕跡和內部結構的事例並進行比較分析尤為重要。[32] 相對地，在運用科技手段之前，對青銅器表面進行細緻觀察，對製作痕跡有初步的、盡可能全面的了解也更是不可或缺。

除文物外，用X射線CT法解析在復原實驗中製成的成品，對闡明製作工藝和內部結構之間的關係也至為重要。同時，X射線CT法的有效性也在泥範結構和製作技術的研究中被證實。

除了X射線CT法之外，三維重建等技術也被應用於商周青銅器的研究上。[33] 期待今後考古調查和科技分析相結合，善用成像技術取得新的研究進展。

致謝：本文為科學研究費JP21720295、JP24320164、JP16H05946、JP17H01646、JP20H01365的部分成果。

32 丹羽崇史，〈CT解析與中國青銅器制作技術的研究〉，頁452-459。

33 三船温尚、廣川守，〈3Dスキャンと鋳造痕跡調査による古代中國青銅器の文様技法研究 (1) ―根津美術館所蔵饕餮文方罍と饕餮文方彝について―〉，*FUSUS*，第8號 (2016年2月)，頁43。

看穿青銅器的內部

李建深

前面的文章着重金屬文物研究大框架的構建，丹羽崇史的文章則着重於怎麼應用特定技術去研究特定問題。在這些特定技術中，成像技術分析成為丹羽文章的焦點，而在其中又以X射線 (即X光) 與CT解析 (即CT掃描) 技術應用為作者的實例研究。

眾所週知，X射線的應用程度非常廣泛。X射線帶有輻射性，不同程度的X射線能穿透多種材質的物件，但是某些特定材質（譬如鉛），則不能穿透。大眾都知道X射線在醫學上的應用，能讓我們透視病人身體內部的結構。然而，一張X射線照片只是從一個特定角度透視。CT掃描則是圍繞着病人身體一圈，從多個角度透視的眾多X射線組合圖，因此CT掃描圖能提供更多角度，可謂是X射線圖的升級360度版本。把病人身體換成青銅器，則是此文作者多個項目的研究對象。

20世紀早期的青銅器研究多關注其形狀與紋飾設計，相關分類研究可謂汗牛充棟。這在缺乏對技術研究的關注下、在沒有新時代技術幫助的學術背景下，單純靠拓片、繪畫等材料記錄、研究青銅器，未嘗不是當時有效的進路。隨着拓片、圖片製作技術的改進與出版成本的降低，學者對青銅器的關注不再局限於其形狀紋飾，對青銅器製造技術的研究也漸漸為學者所知所用。青銅器鑄造時留下的紋飾，未必是美觀的，以前未必能吸引觀察者。但是若觀察者抱着該青銅器是怎麼鑄造的問題而嘗試觀察青銅器，青銅器表皮上的製造痕跡則漸漸映入眼簾。20世紀中後期的製造技術研究，提出了眾多重要問題，建構了青銅鑄造技術研究的典範。隨着觀察意識與技術的演變，更多的製作痕跡漸漸顯露。X射線技術與其升級版本CT掃描，則是新型觀察手段，可以揭示更多藏在青銅器內部的製作痕跡。此前，除非打破青銅器，否則人們是見不到這些痕跡的。在文物保護日益受人重視的前提下，研究者只能採取對文物無損害的觀察手段。

中國青銅器的鑄造，可簡單分為模、範、芯、墊片等的前期準備，熔煉原料成為青銅合金，以及後期處理等步驟。隨着20世紀技術研究的興起，前輩學者提出的技術問題讓研究者關注到了青銅表皮的製作痕跡，已得到了大量成果。譬如範線的存在證明中國先秦青銅器採用了分範鑄造法，墊片的外露揭示了墊片在

支撐模及範時的使用，這些大多可以在器物表皮看到。但是，正如丹羽崇史的文章所展示，更多的痕跡在青銅器的內部，不透過X射線是難以觀察到的。譬如多次澆鑄的痕跡——外部的青銅熔液覆蓋在已經成形的內部銅部件上，或者是後澆鑄的熔液鑽入已經成形的銅部件裏，扣住或鎖死分開的銅部件。這些痕跡有些可在器物表皮看到，但表皮的銅鏽蝕往往會遮蓋住製作的痕跡。因此，有着「透視眼」的X射線可在這類情況下大派用場。丹羽崇史的文章正為我們一一揭示了諸如此類新時代技術的應用。

藝術史、考古、3D技術

李建深

摘　要

本文集中討論藝術史與考古結合現代科技如何帶給我們研究方法上的範式轉移。本文從作者開展的幾個研究案例出發，先以新石器時代城址、青銅器大規模生產等幾個案例作討論基礎，結合3D掃描技術，討論我們如何在藝術史與考古研究中發掘新問題，進而搜集與展示可重覆驗證，讓公眾參與觀察、檢驗的證據。在這些基礎上，藝術史與考古將迎來研究方法上的新挑戰。

關鍵詞：3D技術、藝術史、考古、遺址、青銅器

一、引 言

陳寅恪 (1890-1969) 謂：「一時代之學術，必有其新材料與新問題。取用此材料，以研求問題，則為此時代學術之新潮流。」[1] 那麼新科技呢？能否為我們帶來新材料與新問題？又或幫助我們發現新材料與新問題？層出不窮的新科技，又是否能為我們帶來層出不窮的新材料與新問題？誠然，除了研究科技的人文學者外，多數人文學者着重的是新材料與新問題；有些人文學者更是反對跨學科研究，反對將新科技融入人文研究中。但是，在藝術史、考古等中國千年學術傳統之外的學科中，研究者關心的空間、器物等非文字材料，在近百年中不斷有新材料湧現，新問題也隨之層出不窮，為人文學科帶來極多衝擊。近百年中新科技也如雨後春笋般層出不窮，無論其能否為人文學科帶來真正意義上的質性改變，人類為其投入的人力物力卻是不可忽視的現象。本文即以此為出發點，討論在藝術史與考古學中，現代科技能否為我們帶來新材料與新問題，怎樣為我們帶來新材料與新問題，而我們又如何以新穎的研究方法去應對新材料與新問題。

1 陳寅恪，〈陳垣敦煌劫餘錄序〉，《國立中央研究院歷史語言研究所集刊》，第一本第二分 (1930年)，頁231。

二、研究案例與所使用之現代科技

（一）藝術史、考古與3D掃描技術

藝術史、考古、物質文化、視覺文化等學科都是關注物品、空間的學科（因空間也是由物質組成，以下為行文簡潔，有時會將物品、空間等統稱為「物質」）。不論這些學科關注古代還是現當代的研究材料，它們的研究對象都較相似，即研究古代至當代人類所創造創建的空間與物品。不同於其他人文學科專注以文字為基礎的研究材料，上述學科關注的是如何研究這些空間與物品。它們會關注對這些空間與物品進行描述的文字紀錄；但其主要研究材料還是以空間與物品本身為基礎。文字材料是由活生生的人留下的紀錄，間接記錄了那人「說」/「寫」出來的話。空間與物品則不會主動告訴研究者它們是怎樣來的、在「想」甚麼、製造它們的人又在背後想甚麼等等；這需要研究者透過間接的方法「拷問」它們。即使製造空間、物品的人留下自己的日記、札記等記錄自己如何製造這些空間與物品，關注物品空間的研究者也不能直接把這些日記、札記等作為第一手可信可靠的材料，因為這些自傳式材料也可能存在製造者的自我記憶創造、扭曲、添加、偽造事實等情況。關注物品空間的研究者之可信可靠的第一手研究材料，還是來自空間與物品本身。這構成了文字材料與物質材料之研究方法的根本不同。

研究者對於文字材料與物質材料的記錄方法也有所不同。文字材料的記錄方法比較直接，照着抄就行了。文字本來就是一種記錄方法，在文字書寫系統成熟後，這一直是人類最方便快捷的一種記錄方法。至於對空間、物品的紀錄，則困難得多。人類一直在尋求如何盡可能減少信息遺失量來記錄空間與物品。文字能用來形容空間、物品，但是遺失了太多信息量，而且對記錄下來的信息，每個人的解讀可能都不一樣。茲以一小試驗證之：依照一段同樣的形容某一物件的文字，請每個人畫下他心中所認為的這個物件的形狀，便可推斷此段文字可能記錄和遺失哪些信息。圖畫能記錄大量信息，[2] 但攝影術發明後，相片成了主流。有了影片（影片即快速展示的一幀幀相片，不過展示得太快以至於人眼沒有察覺而已）後，影片與相片皆是記錄空間與物品的主流方法。但是，影片與相片的視角，只是攝影師的視角。觀眾只能以攝影師控制的攝像視角看到其記錄的空間與物品，不能以自身的視角隨意觀看。於是3D（三維）掃描與3D電腦模型對空間與物品的記錄方法便應運而生。3D掃描是記錄手段，3D電腦模型是其成果，以不同儲存形式存在，可以隨觀者意志自由轉動。基於真實物質的3D掃描，不同於3D設計。3D設計可以天馬行空，設計者可以參考真正存在的物質，但設計者以意創造的成分居多，設計者可以不需顧及參考物質的真正大小、形狀，空間的真實距離。但建基於真實物質的3D掃描與其成果，則是以最大程度記錄真實物質的大小、形狀、色彩、空間距離為目標。此二者有其根本不同之處。

着重於物品、空間研究的學科以建基於真實物質的3D電腦模型紀錄作研究材料，這可謂是天作之合。以藝術考古為例，一件青銅器，從文字紀錄、圖畫紀錄、到相片與影片紀錄，經歷了不同的記錄手法，並且都是以記錄者的視覺為紀錄前提。3D模型則嘗試打破此一前提，以相較開放自由的視覺方式記錄此青銅器（當然後世的科技會以更豐富的手段去記錄，但在2022年，這是最為開放自由的科技了）。[3] 觀者甲可以自己選擇，從青銅器的上部轉到底部；觀者乙可以專注於青銅器的耳部，只在此處旋轉；觀者丙可以……。[4] 藝術考古研究者對此種技術的需要最為顯著。願意被動接受信息的普通觀眾能觀看相片從而知悉青銅器的某些特點，但其受約束於攝影者感興趣的角度。若攝影者只對青銅器某一側的花紋感興趣，從而拍下其相片，觀眾就只能看到此一側的花紋，但底部、另一側的特點則完全看不到了。建基於此青銅器的3D模型，則容許研究者以不同角度轉動，最大程度地了解其不同部位的特點。對於一個墓葬空間、一個古代建築、一座座偏佈古遺跡的山，都能以3D模型記錄下來，讓研究者自主觀看。3D掃描者的工作是到當地，或在器物面前掃描，其成果應是能隨觀者興趣自由轉動觀看的。在2022年來說，沒有比這更好的技術了，所以說它們是天作之合，是十分恰當的。

當然也不是所有的藝術考古研究者都對3D技術感興趣。純粹關注平面畫作的學者較少對3D技術感興趣。關注建築背後的思想含義、政治經濟社會文化背景的研究者也對此未必感興趣，因為他們更關注的可能還是文字材料。思想含義、政經社文等領域，用文字來表達較為有效。在人與人的溝通中，最為有效表達思維的方式是語言，記錄其語言即構成一種文字材料。關注物質材料的研究者之中，只有那些專注於空間是怎樣設計建構、物品是怎樣設計製造這類問題的

2 當然還有一種方法，是將原有的空間與物品複製出來，但這又牽涉另外的討論了，此處不贅。

3 見筆者主持之香港優質教育基金項目「中國歷史教學與3D文物」之成果：https://digital.lib.hkbu.edu.hk/history/3d-artifacts/html/

4 360攝像不具備由觀者完全自主觀看的功能，它與3D模型是不同的技術。

學者才對3D技術感興趣。因為3D技術幫助他們記錄這些設計建造的痕跡，重構設計製造的過程與設計製造者不依賴語言的想法。這種人文與3D技術的結合才是天作之合。以下筆者會以幾種不同的3D模型紀錄來論述其與藝術考古是如何結合的。

（二）大空間的紀錄與研究問題

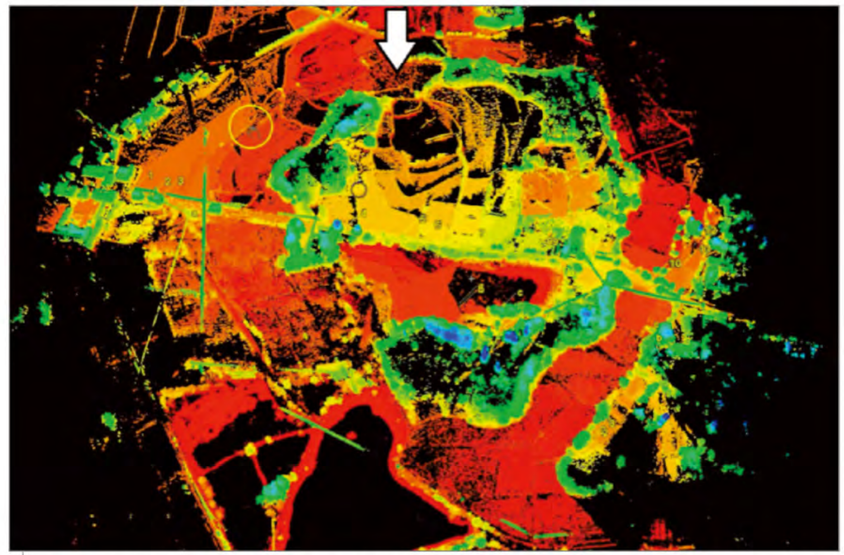
研究者不能只是研究如何以3D技術記錄空間的構造，而應思考此技術如何有助於研究者探索、解決相關問題。2018年，筆者曾帶領團隊到湖北省石首市的走馬嶺新石器時代遺址作考察，並在小範圍內試用了3D空間掃描技術 (所用儀器為Leica ScanStation P50)，嘗試以此技術發展一些新的研究方法。[5] 走馬嶺現存一些公元前3000年左右的城牆、房屋、墓葬遺址，某些部分被現代房屋和耕地覆蓋、破壞，在文物保存方面值得留下3D模型紀錄，在研究方面也值得作深入探索。走馬嶺最明顯的是其城牆特徵，分別有內城、外城、壕溝/護城河等。[6] 圖一中間的綠色地帶為其內城範圍，城垣周長約1200米，城址面積約為7.8萬平方米。城垣距城內地面高約5米，距城外地面7至8米。圍繞着內城的紅色地帶為內城與外城中間的濠溝，寬距約為25-30米。最外層的綠色為外城的邊界。內城有幾個缺口，有可能是以前的城門。圖一內城的上部有一缺口（白色箭頭所示），有可能是水門（西門），[7] 連接外圍的上津湖。長江流域的城址因水網發達，多設有水門便利水上交通。[8]

5 由於此文仍是以靜態的二維文件形式出版，故在此未能展示3D模型能自由轉動觀看的功能。此外還有用宇宙射線muon tomography等技術來構建3D地貌的研究，見Jacques Marteau et al., "DIAPHANE: Muon Tomography Applied to Volcanoes, Civil Engineering, Archaeology," conference paper at the 14th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors (IPRD16), 3-6 October, 2016, Siena, Italy, arXiv:1612.03905v1 [physics.geo-ph]. 技術不一樣，但使用目的與3D掃描較相似，此處不擬詳細展開討論。

6 見張之恒，〈長江流域史前古城的初步研究〉，《東南文化》，期2 (1998)，頁8-9；荊州市博物館等，〈湖北石首市走馬嶺新石器時代遺址發掘簡報〉，《考古》，期4 (1998)，頁16-38；荊州市文物考古研究所等，〈湖北公安、石首三座古城勘查報告〉，收入北京大學中國考古學研究中心編，《古代文明 (第4卷)》；北京：文物出版社，2005，頁404-412；武漢大學歷史學院、石首市博物館，〈湖北石首走馬嶺遺址周邊史前遺址調查簡報〉，《江漢考古》，期1 (2017)，頁3-12；武漢大學歷史學院考古系、石首市走馬嶺考古遺址公園管理所，〈湖北石首市走馬嶺新石器時代城址的發掘〉，《考古》，期9 (2018)，頁3-24。

7 張之恒，〈長江流域史前古城的初步研究〉，頁11-12；荊州市文物考古研究所等，〈湖北公安、石首三座古城勘查報告〉，頁410-411；武漢大學歷史學院考古系、石首市走馬嶺考古遺址公園管理所，〈湖北石首市走馬嶺新石器時代城址的發掘〉，頁5-7、23。

8 武漢大學歷史學院、石首市博物館，〈湖北石首走馬嶺遺址周邊史前遺址調查簡報〉，頁11-12。



圖一　公元前3000年左右的湖北石首走馬嶺遺址3D模型截圖。李建深團隊製圖。感謝武漢大學單思偉協助。

1. 走馬嶺遺址城牆各門及附近地形關係研究

近年，走馬嶺遺址考古研究已非常細緻深入，但仍有很多可探索空間。如城牆的佈局，城門各門之間的關係，與附近地形之關係等，仍可作深入研究。城牆的佈局，在今日樹叢、房屋的遮擋下，比較難以一目了然地看清，進而作直觀之分析。而城牆各門也因遮擋、泥土流失而失去原貌。水門亦因淤泥堆積而無從探測其貌。加之城門的建構為何在此地而非他處，與附近地形的高低對比，遠方河流的關係等，在現有條件下較難看清，亦較難研究。

但有了3D模型後，我們可作空間佈局的細緻分析。城牆的佈局可以在模型中去除民居、樹叢的遮擋後清晰顯示出來（從而不需砍去現實中的樹木）。某城門與鄰近城門的距離，與其他各門的距離，包括直線距離和實際行走距離等，都可作模擬分析。這些都是探索城門建造、防御功能需思考的問題。[9]

9 彭蛟、單思偉，〈基於低空航拍影像和GIS的遺跡平面圖繪製與分析〉，《華夏考古》，期2，(2019)，頁109-116。

以前的水門現在覆有大量淤泥，無法探測其原有面貌。但是在探明原有水門泥土之深度後，可以在3D模型內模擬去除淤泥，不用在實地花費大量人力物力去除。其方法是用洛陽鏟作小範圍鑽探，探明新石器時期的泥土層位，給出絕對深度，如距今表土多少米、範圍面積多大等，即可以在3D模型內模擬。而取得附近地形的3D數據資料後，可以清晰看出城牆與河流、附近地形的高低差，探討城牆在此處修建的原因。同樣，在3D模型中，我們可以用探鏟測得的資料作出各種類比，包括模擬壕溝/護城河深度，探討護城河的修建原因、與水門的關係、分佈範圍等。在模擬過程中，我們可能提出更多新問題，為實地考古發掘帶來更多思考。

2. 同一遺址不同時期之比較及演變

在城址研究中，揭示出同一個城址之演變是非常重要的研究切入點，這需要不同時期的城址分佈資料以及地圖。地圖有分平面圖、等高線圖、地形圖等，但以3D場景作比較，則較少見。若能以3D場景作比較，可對不同時期同一地點之城址作絕對規模之演變比較，在3D模型上清晰展示出來。早期、中期、晚期各有甚麼特點，這些特點怎樣不斷添加或減少，都可以清晰展示，啟發我們提出更多問題。以往只能以特點變化的平面地圖作展示，依靠想像的成份較多，現今以3D場景可提供更多想像和推測依據。在走馬嶺的例子中，我們只是粗略把現有的遺址作3D模型，但其實可以分得更細緻。[10] 以鑽探出來的數據為基準，在3D模型中模擬不同時期走馬嶺城址的不同變化，看其變化多還是不多，再探究其原因，這又是一個新的研究題目。

3. 走馬嶺遺址與其它新石器時代遺址比較

現今新石器時代城址研究中，互相比較同時期之城址是一較為受歡迎之研究路向，此法可看出同時期不同城址之獨特性。[11] 唯此法受制於純平面地形地圖。若能以3D場景作比較，則不同遺址之獨特性便可顯而易見：包括遺址的高度變化、在不同高地上的建築之不同、不同遺址之居民如何應對不同地形、居民如何分佈功能相類似之建築、在不同視覺下能見到的景物之不同……這些方面對於研究城址規劃、建築分佈、城址建築功能、城址景觀等問題大有裨益。

4. 走馬嶺遺址與各歷史時期遺址比較

相對於同時期之遺址比較，不同期之不同遺址比較也是熱門方向，但也缺乏3D場景之比較。這些資料將為研究不同期遺址聚落群的集體演變提供一個大平台。我們可以利用這些資料平台作不同期遺址群的模擬，揭示其演變規律、模式等。

5. 其他遺址與其他空間技術

在從前的考古地形研究中，研究者多數依靠等高線圖等普通地圖。衛星地圖普及後也發揮其大作用，如在20世紀60至70年代，美國出於戰略目的對中國不同地域拍攝了一些衛星地圖 (CORONA)，從1995年逐步解密後，這些拍下當時未有大基建變動的地貌的衛星地圖，對照今天的地圖，別有一番研究意義。[12] 如今有了3D地形模型和場景，當可探討上述問題，乃至更多新問題。

在對湖北省武漢市盤龍城遺址的研究中，學者採用了多種新穎技術去研究其古代地形。[13] 當地研究者問及商代時候的水域範圍有多大，與今天的水域有甚麼分別。他們透過鑽探測量不同時期的地層，得知商代水域範圍（如圖二所示），進而探知商代盤龍城的人類居住模式，哪裏是農田，哪裏是房屋居住地，哪裏是水路交通帶……這些信息為探尋當時的政治、經濟、社會運作模式提供更多研究資料。[14]

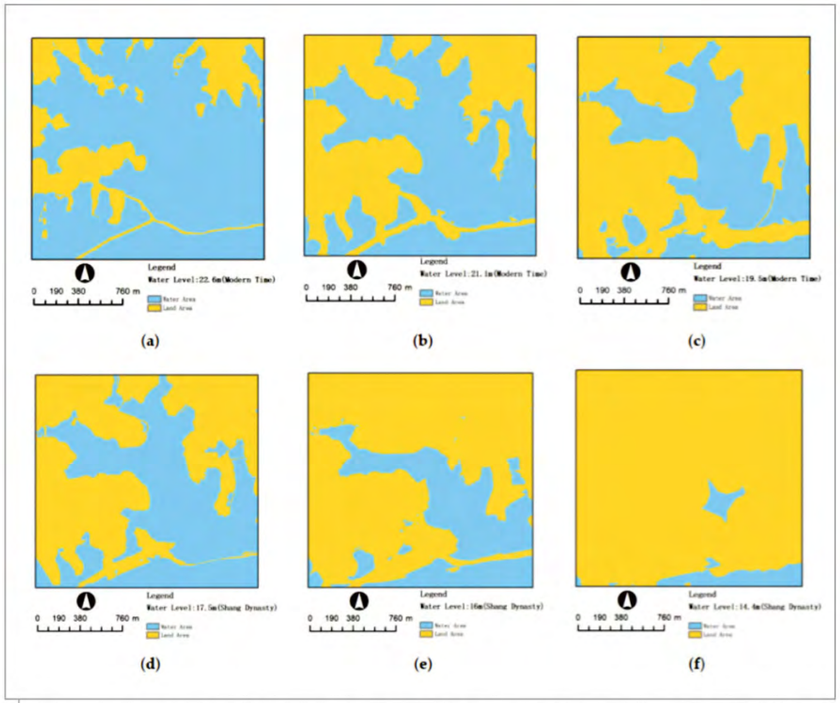
10 可分為大溪文化晚期，屈家嶺文化早、中、晚三期，石家河文化早、中期等。見荊州市博物館等，〈湖北石首市走馬嶺新石器時代遺址發掘簡報〉，頁37。

11 劉輝，〈長江中游史前城址的聚落結構與社會形態〉，《江漢考古》，期5 (2017)，頁44。參見良渚文化的研究Colin Renfrew and Bin Liu, "The Emergence of Complex Society in China: The Case of Liangzhu," *Antiquity* 92.364 (2018), pp. 975-90. 至於石峁文化的研究，參見Li Jaang et al., "When Peripheries Were Centres: A Preliminary Study of the Shimao-centred Polity in the Loess Highland, China," *Antiquity* 92.364 (2018), pp. 1008-22.

12 Li Min, "Archaeological Landscapes of China and the Application of Corona Images," in Douglas C. Comer and Michael J. Harrower eds., *Mapping Archaeological Landscapes from Space* (New York: Springer, 2013), pp. 45-54. DOI: 10.1007/978-1-4614-6074-9_5. CORONA計劃見網站：https://corona.cast.uark.edu.

13 武漢大學歷史學院等，〈武漢市盤龍城遺址水下勘探及試掘簡報〉，《江漢考古》，期5 (2018)，頁78-87；Liu Jianfeng et al., "A Settlement Landscape Reconstruction Approach Using GIS Analysis with Integrated Terrain Data of Land and Water: A Case Study of the Panlongcheng Site in the Shang Dynasty (Wuhan, China)," *Remote Sensing*, 13.5087 (2021), pp. 1-17. DOI: 10.3390/rs13245087

14 Liu Jianfeng et al., "A Settlement Landscape Reconstruction Approach Using GIS Analysis with Integrated Terrain Data of Land and Water: A Case Study of the Panlongcheng Site in the Shang Dynasty (Wuhan, China)," pp. 2, 15-16；武漢大學歷史學院等，〈武漢市盤龍城遺址水下勘探及試掘簡報〉，頁86。

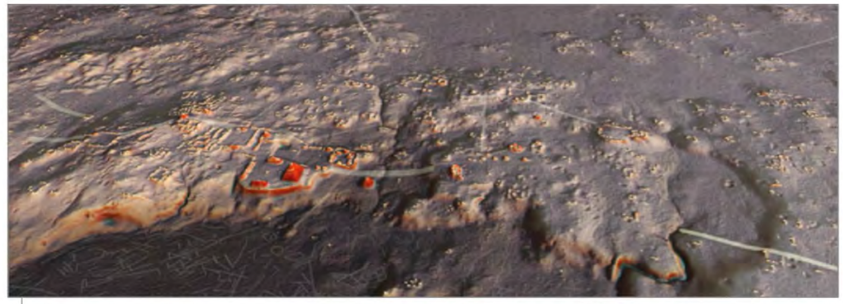


圖二　盤龍城遺址地域與水域：上面三分圖為現代水域，展示在不同季節的範圍；下面三分圖為商代不同季節的水域。見Liu Jianfeng et al., "A Settlement Landscape Reconstruction Approach Using GIS Analysis with Integrated Terrain Data of Land and Water: A Case Study of the Panlongcheng Site in the Shang Dynasty (Wuhan, China)," 圖15，頁14。感謝武漢大學張昌平授權圖片轉載。

3D掃描中有一項激光測量技術，稱為LiDAR (light detection and ranging)，可以裝在無人機上，更大範圍地測量3D地形。在中美洲的瑪雅考古中，由於很多古遺址範圍都不甚明瞭，而且隱藏在茂密的叢林中，以LiDAR作3D測量是技術首選。當裝上LiDAR的無人機飛越大片叢林時，該地段已被激光測量下來；研究者再在電腦中以特定程式把樹林去除，就能把裸露地形突顯出來（圖三）。

圖三突顯出來的裸露地形，有很多高出正常地面的規則形狀的物體，就是人工建築物，有金字塔、祭壇、宮殿等。[15] 這些建築物長年被茂密的叢林覆蓋，以往也有激光測量，但要靠人力托着機器一步步測量出來；現在能快速測量大片

15 Marcello A. Canuto et al., "Ancient Lowland Maya Complexity as Revealed by Air-borne Laser Scanning of Northern Guatemala," *Science*, 361.eaau0137 (2018), pp. 1-17. DOI: 10.1126/science.aau0137



圖三　危地馬拉的瑪雅遺址Naachtun的LiDAR測量後的分析圖。圖片來源：Luke Auld-Thomas與Marcello A. Canuto。見Canuto et al., "Ancient Lowland Maya Complexity as Revealed by Air-borne Laser Scanning of Northern Guatemala," 無圖號，無頁碼。感謝Tulane University的Marcello A. Canuto授權圖片轉載。

地域，而且精準度毫不遜色，兼能生成3D場景，解決上述的研究問題。[16] 筆者想起自己2012年在危地馬拉叢林的泥濘中托着機器，一天只能走一小範圍丈量遺址建築，箇中苦況，今日的LiDAR測量師再也不用體會了。瑪雅考古已大量引入LiDAR技術，未來應能發現更多被叢林覆蓋的遺址，從而有望更加豐富研究方向與內容。

（三）物件的紀錄與研究問題

以往的中國藝術史研究者更多關注的是平面藝術品，如畫作、書法作品等。這不僅僅是研究關注點的問題，也是研究材料限制的問題。這些作品多是以出版物流傳世界，而平面出版物只能刊載文字與圖片。圖片所能傳達的是攝影師的角度，不利於研究者主動發掘自己的角度。因此世界各地的藝術史與考古研究者都面臨相似的問題。而世界上大量的藝術品與考古出土文物卻是三維物品，因此，三維物品與3D技術的結合能給研究者帶來更多質性改變。研究者要細緻審視遠在千里之外的物件的外部痕跡，只需有其3D模型就行。至於要審視其造型設計等，更是易如反掌。

16 Takeshi Inomata et al., "Archaeological Application of Airborne LiDAR with Object-Based Vegetation Classification and Visualization Techniques at the Lowland Maya Site of Ceibal, Guatemala," *Remote Sensing*, 9.6 (2017), pp. 1-27. DOI: 10.3390/rs9060563; Inomata, Takeshi et al., "Archaeological Application of Airborne LiDAR to Examine Social Changes in the Ceibal Region of the Maya Lowlands," *PLoS ONE*, 13.2 (2018), pp. 1-37. DOI: 10.1371/journal.pone.0191619; Canuto, Marcello A. et al., "Ancient Lowland Maya Complexity as Revealed by Air-borne Laser Scanning of Northern Guatemala."

1. 公元前500年左右的青銅四腳獸

筆者曾嘗試問及一個新研究問題：我們能否用3D技術找出人類大規模工業生產史上最早的一模一樣的器物群組？一模一樣的器物群組能證明它們是在同一工作坊/工廠裏生產出來，很有可能產自同一流水線。若它們的數量繁多，結構複雜，則很有可能證明它們是大規模工業生產的器物。

至少有三隻約產於公元前500年左右的結構複雜、紋飾精密的青銅獸是一模一樣 (identical) 的器物。[17] 這三隻青銅獸現藏於美國華盛頓弗利爾美術館 (Freer Gallery of Art)、三藩市亞洲藝術博物館 (Asian Art Museum)、英國倫敦大英博物館 (British Museum)。它們很有可能是20世紀初期在中國山西侯馬一帶被發現，然後被輾轉販賣到這三所博物館的。前輩學者已初步辨認出這三隻青銅獸很可能是一模一樣的，但他們只用文字簡單描述，沒有提供具體證明。[18] 他們的研究工作為我們提供了很多線索，縱然不是堅實的證據，但比起我們從零開始大海撈針已經是好得多了。

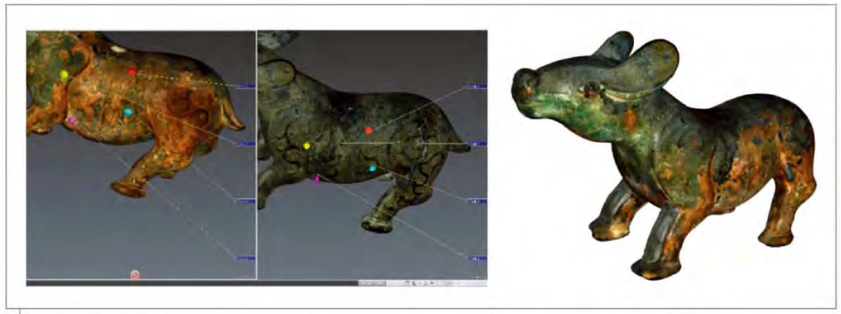
這組青銅獸不純粹是手工式的產物。單純以圖片比對它們的紋飾，已知曉它們的紋飾位置、特點不差分毫。再比對它們的大小數據、形狀，也是非常接近。而要確證它們是一模一樣的，則需以它們各自的3D模型來比對。在現實生活中，這三隻青銅獸很難放在一起比對。但藉着電腦中的3D模型，不僅可以自由轉動比對，還能將其中一隻嵌入另一隻體內，看它們的形狀、大小是否切合（圖四）。這項技術在現代工業生產中經常使用，用以比對產品是否跟產品原型切合，有助進一步的零部件組裝。我們把這技術應用在檢驗公元前500年的青銅產品中，從而知悉其背後生產線至少組裝了三隻一模一樣的青銅獸。發現更多一模一樣、結構複雜的青銅器，應能豐富古代人類工業生產史的內容與討論。[19] 如果再進一步與後世與其它器型的大規模工業生產活動，如銅鐘、秦代的度量衡器、[20] 鐵器、黃銅等生產史結合起來，中國的工業史研究將會迎來全新面貌。

17 此處的「一模一樣」是專用詞語，見Kin Sum (Sammy) Li et al., "Decorated Model, Replication, and Assembly Line of the Bronze Industrial Production in 500 BCE China," *Early China*, 44 (2021), pp. 109-42. DOI: https://www.doi.org/10.1017/eac.2021.9

18 Li et al., "Decorated Model, Replication, and Assembly Line of the Bronze Industrial Production in 500 BCE China," pp. 115-119.

19 見公元前300年左右的大規模生產青銅鏡的討論：Kin Sum (Sammy) Li, "The Component-Model Method of Mirror Manufacture in 300 BCE China," *Archives of Asian Art*, 67.2 (2017), pp. 257-76. https://doi-org.lib-ezproxy.hkbu.edu.hk/10.1215/00666637-4229728.

20 Kin Sum (Sammy) Li, "Attaining Accuracy and Precision of Measuring Containers during the Qin Dynasty," *Journal of Chinese History*, 6.1 (2022), pp. 1-22. https://doi.org/10.1017/jch.2020.47.



圖四　大英博物館與三藩市亞洲藝術博物館的青銅獸3D模型比對與嵌入。李建深團隊製圖。

2. 玉石器上的刻痕結構

新穎的3D技術能應用在更微小的物體結構上。人類基因、原子世界的3D圖譜不斷更新，已是明證。不過這些技術與藝術史考古學科相差較大。我們未來可將相關技術應用在玉石器的刻痕結構上，重新檢視人類如何在玉石器上刻劃出精美的紋飾。[21] 鄧聰等學者已用高清相片呈現玉石器上的細微刻痕，從而探索相關玉石器製作技術、刻劃工具的使用、玉石工匠的組織等問題。[22] 但是我們還可以進一步以精密的3D掃描技術呈現這些細微刻痕的3D結構，即刻痕的深淺、寬窄、角度等，進而探索直線刻痕與彎線刻痕的深淺寬窄是否一致？刻痕在3D模型中能呈現其不同角度，如呈凹槽形狀的刻痕橫剖面，是否每條刻痕都一樣？不同的話，會否是同一工匠力度不一所致？不同工匠所致？還是不同工具所致？工匠在處理玉石器不同部位時會否用不同力度、不同工具，從而留下不同刻痕？高清相片能呈現大量我們用肉眼未能清晰看到的細微部分，配合精密3D掃描技術，當能呈現更多細部信息，讓我們能提出更多新穎問題。

河南二里頭出土的綠松石龍頭的細部與其中的綠松石薄片可以為我們提供更多新線索，它們約產於公元前1800年。從二里頭文化第二期M3綠松石龍的薄片之高清相片可見，[23] 其刻痕錯落有致，有某一面呈直線形狀的，但也有與這些直線交叉相間的。工匠在刻劃時想的是甚麼？為甚麼要這樣磨或是這樣刻？這樣

21 周振宇、關瑩，〈多視角三維重建技術在石製品研究中的應用〉，《人類學學報》，卷36期1，(2017)，頁38-48。

22 鄧聰等編，《牙璋與國家起源：牙璋圖錄及論集》(北京：科學出版社，2018)，頁1-4，110-111等。

23 由於版權問題，此處未能刊出其照片。惟讀者可自行搜索相關高清照片。

磨/刻的效果是甚麼？這工匠能否實現其所想要的效果？我們從這龍頭上的諸多綠松石薄片得知，這些薄片的大小、形狀都非常相似，表明龍頭的製作工匠是用這些製作一致的薄片組成大概的龍頭部位。在這些部位——背景之上，配以完全不同製法的龍頭「蒜頭式」鼻子，間以白色玉石與綠松石的長鼻子主幹，再嵌入圓形白玉眼睛，將這些變為主紋。在變化多端的主紋與大量同一製法的背景互相對比下，龍頭的眼睛、鼻子、長鼻主幹都清楚顯示出來。進一步探索不同形狀玉石的製作與其細緻的刻痕，對了解龍頭製作工匠的創作意念、手法、技術，大有裨益。高清相片配以精密3D掃描模型，當是未來的大方向。

3. 可驗證、可挑戰的研究

若把3D模型變為開放的、公眾可檢索的資訊，這將會對藝術史、考古界帶來極大衝擊。以往藝術史、考古研究範圍內的空間、器物大多只有專家能接觸，由專家或攝影師以自己感興趣的角度拍攝下照片或影片，然後將其研究角度、內容以權威身份介紹給讀者觀眾。普通讀者沒有置疑的可能，因為他們只能相信權威。較專業、但仍不能親身接觸該空間、器物的讀者或許能質疑其研究方法、角度，但對於拍攝下的相片、觀察結果，他們只能被動接受。而開放的、可讓公眾檢索的空間器物3D模型則可讓專業與非專業、不能接觸該空間器物的讀者親自檢測研究者某些觀察結果，驗證、補充、修改、或者推翻其觀點。這樣的藝術史、考古世界將會更豐富多元。

未來的藝術史、考古世界，應該以3D技術，盡量公開其研究材料。這些材料多數是能觀察的，某些是能量度的，其觀察、檢視過程是可以重覆的，這些在公開的3D模型中都能呈現，讓公眾重覆原有研究者的觀察、檢測結果，以驗證或挑戰研究者的觀點。公開、可觀察、可量度、可重覆、可挑戰的研究，將改變以往藝術史、考古的權威一言堂現象，這些學科將迎來研究方法上的範式轉移。

四、結 論

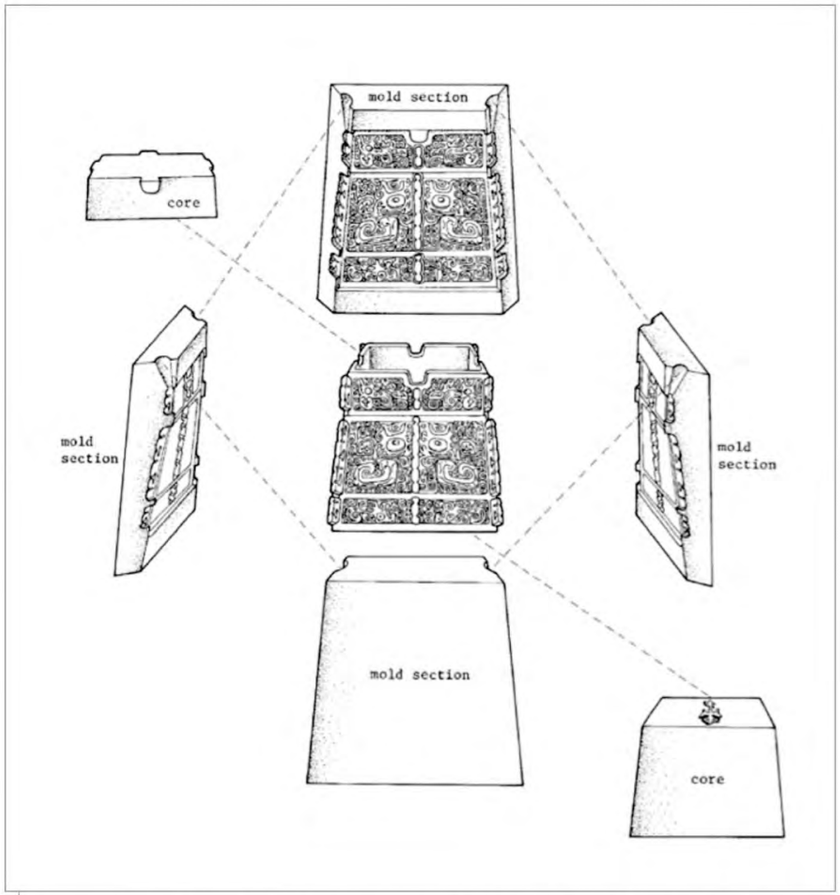
中國的考古學正以飛快的速度向世界提供新材料、新問題，而學者對那些在數千年中流傳的藝術品研究也是方興未艾。如今，不僅僅是在中國，古今人類廣大的活動範圍都不斷湧現傳世藝術品和考古發掘物品。人類建造和改造的空間在全世界都是非常值得關注的材料。我們結合了能把空間、普遍物品、微觀結構進行3D掃描的技術，能把這些新材料以公開的3D模型方式展示給全世界的觀眾。在新材料中，我們能夠發現更多前人問所未問、聞所未聞、思所未思的問題。在處理新材料與新問題的過程中，我們或許能夠提出新的觀點，豐富或改寫人類歷史。但是，不同於以往，藝術史、考古學者不再固步自封，即滿足於自己提出新觀點後，不理會別人能否驗證、檢測自己基於別人未能親身接觸空間、器物而未能達致的觀察結果。相反，我們盡量公開自己的空間、器物觀察結果，以觀眾自主轉動的3D模型呈現，然後讓公眾驗證、挑戰。這種可觀察、可量度、可重覆、可挑戰的研究方法有望成為藝術史、考古學的新範式，並將會給當下的人文學術研究帶來新面貌。

致謝：此論文獲中國香港特別行政區研究資助局優配研究金及傑出青年學者計劃 (項目編號 HKBU 22601019、12625716、12604017、14600118、12618422)，香港特別行政區優質教育基金 (編號2018/1337)、香港浸會大學Equipment Matching Fund (RC-EMF 07/17-18)、香港浸會大學饒宗頤國學院資助，以及文中述及各博物館、考古研究所工作人員之協助，謹此致謝。

3D技術與藝術考古：先秦全同青銅器之探索及相關議題評述

彭 鵬

材料、理論和方法可謂推動一個學科的三駕馬車。就學術研究而言，材料限定對象，理論左右視角，而方法則為實踐理性之道器。「工欲善其事，必先利其器」（《論語．衛靈公》）——材料有限時，牛刀殺雞，仍可遊刃有餘；若視角恰切，正若剖雀，亦不失為透徹。理論與方法皆有小大之辨，其大者兩相統之即似庫恩 (Thomas Kuhn,1922-1996) 所言之「範式」(paradigm)。過去幾十年，藝術考古歷數次範式轉向，而方興之勢，其一即數字化浪潮。數碼技術確為藝術考古帶來諸多可能，其中既有機遇，亦存挑戰，對此討論層出不窮。僅以美國大學藝術學會旗下《藝術通報》(*The Art Bulletin*) 為例，過去一年即有〈繪製數字時代之藝術史〉等綜述，以及〈超越透視範式：近世繪畫空間及其所受數字化挑戰〉等探微。[1] 在中國藝術考古中，數碼浪潮也來勢洶洶，僅石窟一類，對敦煌、雲岡、天龍山等造像與壁畫的3D掃描和互動展示，更是屢見不鮮。[2] 工具上的追求走向極致，常令人癡之於術而忘乎道，流於形式而失之內容。如何善器而不耽於器，進技而不止於技，惟具問題意識者方可棄執入真。筆者熟悉之3D人文 (3D Humanities) 研家多治早期中國 (Early China)，用力至勤而兼具問題意識者，首推香港浸會大學的李建深。本文以李氏探尋先秦全同吉金個案為主線，旁及華夏青銅鑄造背景及相關學術爭鳴。在此基礎上，試觀李氏如何以3D掃描呈器物細節，從而以實證手段解一長懸難題。所示「冰川」僅為海下一角，惟盼讀者可察李文留白處之洞天，藉此體會其所攻問題之關鍵。

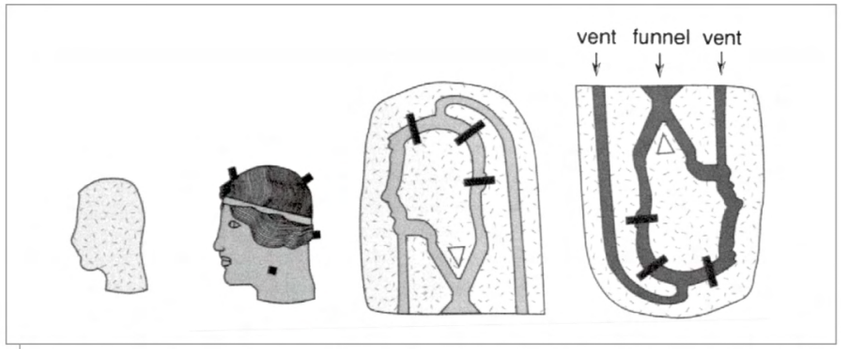


圖一　塊範法示意圖，以鑄方彝器身為例：模 (model，居中者，亦可視為終器)、塊範 (mold sections)、芯 (cores)。見Robert W. Bagley, "Shang Ritual Bronzes: Casting Technique and Vessel Design," *Archives of Asian Art* 43 (1990), 圖5，頁9。(注：本圖僅示概意，具體分範塊數當一器一議；為固合範，範塊常攜榫卯，此圖忽略。相關討論見Bagley此文，頁10)。

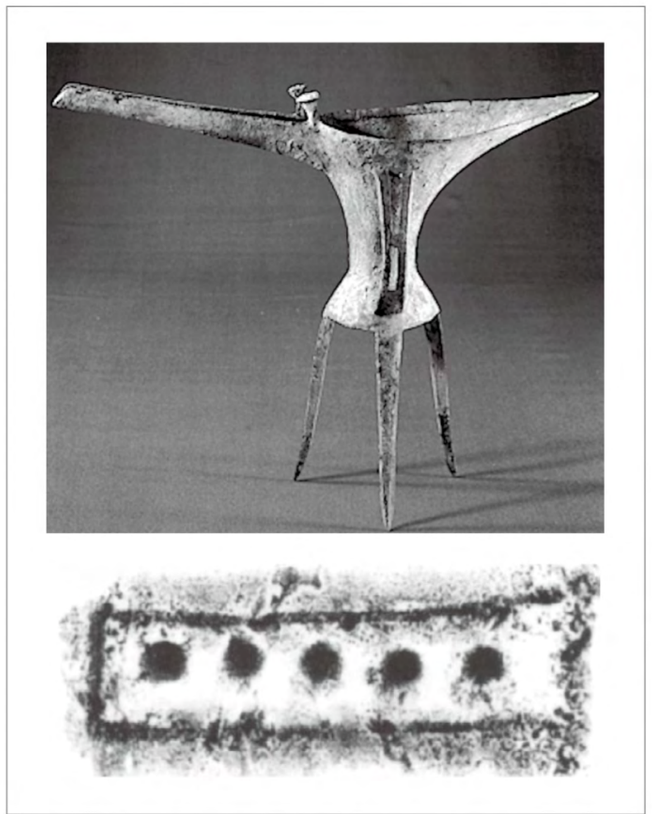
1 詳見Jorge Sebastián Lozano, "Mapping Art History in the Digital Era," *The Art Bulletin* 103: 3 (2021), pp. 1-16; Stephen H. Whiteman, "Beyond the Perspectival Paradigm: Early Modern Pictorial Space and Digital Challenges to the Field," *The Art Bulletin* 103: 2 (2021), pp. 8-23.

2 例如，天龍山石窟的數字修復和3D展示詳見CAEA (Center for the Art of East Asia), The University of Chicago: *Tianlongshan Caves Project*, https://tls.uchicago.edu/ (2022年5月16日訪)。

圖二　哈佛藝術博物館 (Harvard Art Museums) 所藏青銅方彝，高29.8厘米，約公元前12世紀。圖片來源：https://harvardartmuseums.org/collections/object/203988；圖號：1943. 52. 109 © President and Fellows of Harvard College.



圖三　失蠟法示意圖，由左至右依次為：1（形近泥芯）；2（包芯蠟模）；3（覆模泥範）；4（熔模澆鑄）。見Séan Hemingway, "Bronze Sculpture," in Roger Ling ed., *Making Classical Art: Process & Practice* (Stroud, Tempus, and Charleston: Arcadia Pub., 2000), 圖18，頁40。



圖四　青銅爵 (上，高22.5厘米) 及其器表紋飾（下，呈於拓片）。出於河南偃師二里頭遺址，約公元前16世紀。見Peng Peng, *Metalworking in Bronze Age China: The Lost-wax Process* (Amherst, New York: Cambria Press, 2020), 圖8a-b，頁205-206。

以容器為大宗的先秦青銅禮器，其成形以鑄造 (casting) 為主，而域外常見的錘鍱 (hammering) 等鍛法 (forging) 則久微於華夏。作為鑄範較早出現的形式，敞腔之單範 (open mold) 與閉合之雙範 (bivalve/two-piece mold) 足遂形簡者成其所鑄。當鑄形趨繁時，對於雙範尚非必攜之「模」(model) 漸不可或缺。複雜其鑄形，則錯綜其模，如何脫範於模遂成不小挑戰。大而觀之，可解此結者有二。其一，可將分範之塊數增至所需，此即「塊範法」(section-mold/piece-mold casting，圖一) 稱謂之由來。其二，可將原模徑直熔除，在範內留下型腔，則澆鑄前全無開範之虞：此法常以失蠟 (lost-wax process，圖三) 稱之，屬熔模鑄造 (investment casting) 。將塊範法與失蠟法視為同一難題的兩種克服，此僅為方便對比鑄造邏輯，而並非嚴格技術史書寫。[3] 自公元前兩千紀中葉以降，所謂「三代」（「夏」乃爭論不休）銅器，如非單、雙範或其衍生（如疊鑄）即可成形者（如兵、鏡、鉤、幣中形簡者），則絕多鑄自塊範；而在東周之前，雖失蠟未必華夏所不聞，中原卻鮮有其確證，惟其邊地偶得散跡。[4] 以塊範鑄器，模賦其形卻未必其紋：公元前十六世紀的二里頭銅爵，其紋飾呈點線狀突起，必始刻於範（圖四）。就銅鑄紋飾而言，其凹凸錯落皆正於模而反於範。若整紋盡飾於範，一旦由簡入繁，層紋疊樣，於腦於手，皆為難應之挑戰。而紋如圖二方彝秀密多層者，則多成於泥模。此時縱有「模範合作」之可能，[5] 僅就本器觀之，其要紋亦必以模作為主。如是吉金，其終鑄之品貌幾為原模之翻版。該模精工細刻，若為今人所得，必長保用之而數翻其範，系列產品便可層出。耐人尋味的是，非但此方彝獨一無二，同時器盡皆無雙。事實上，公元前一千紀中葉之前，雖有所謂「一模多器」等觀察，[6] 然細審之，形、紋皆合之全同器仍無一例現於華夏。觀此現象，加之如殷墟等鑄址，所遺模量遠微於範，不少學者遂採石璋如 (1902-2004)「刮模成芯」之倡，縱此假說至今難覓信證。[7] 更有甚者，倪克魯 (Lukas Nickel) 見商周銅器形同者常有，卻乏紋亦合者，另籌他緒後拋一驚人之論：縱貫中國青銅時代，範鑄僅採未飾之素模，而花紋概莫能外，始終成於泥範。[8] 言之鑿鑿，全同器之闕如貌似豁然開朗。然此高論，惟圖二方彝一例可否：此器全飾，是否果如倪氏所言，盡皆陰就於泥範，凡刻者觀此必清。而青銅時代紋風近乎此例者，又豈可勝數？

倪氏奇譚，已為貝格立 (Robert Bagley) 所正，[9] 然貝氏亦好奇於青銅時代早期，凡器概無紋同之究竟。早在1987年，貝氏在其《賽克勒所藏商代青銅禮器》(*Shang Ritual Bronzes in the Arthur M. Sackler Collections*) 中即談及此惑：縱信「削模成芯」，此乃後舉，並無涉翻範紋於模，更無礙其所翻為一或多；由此，器紋無雙另有他故，若仍歸因於技術，或出自更早環節。[10] 三年後，貝氏舊罔重提：「因不甚顯明之由，商代鑄工似從未復用其模；複製現象為已知商鑄中所未見。」[11] 此語境下，貝氏所言之「模」，自非倪氏日後咬定之「素模」，而當為飾模；此時，「同模器」方可泛代本文所言之「全同器」，蓋無人知十餘載後，竟有論者視素模為範鑄不易之定用。倪氏素模論後又三載 (2009年)，貝氏就其積年之惑再作表態，並疑其因出於生產之外：觀殷墟鑄匠之化技，欲器同紋而竟不達，難免匪夷所思；大約器之全同非不能也，實不為也：齊整者不免板滯，雷同者了無生氣，多器形紋如一，估非時之貴族所好。[12] 此固僅為一測，然以貝氏之審慎，言及於此實殊不易；而以貝氏之睿，抱之經年而難釋其懷，足見問題意味深長。作為貝氏高足，李氏深盼可攜3D利器，對此題目再作延拓。如李氏所言，吉金浩繁，前輩學者目之所及，常基於出土背景相近者，而系統排查尚待時日。此外，地下青銅層出不窮，[13] 全同器是否終隱於中國青銅時代早期，無人知曉。任何經驗材料 (empirical data)，研者以歸納 (induction) 攻之萬難確證其假設，然久致其力而不遇反例，信心必與日俱增。早於公元前一千紀中葉之華夏，全同器未得一見，此永留探索之空間，卻漸為彌堅之信念。而倪氏觀殷墟婦好墓 (約公元前1200年) 之數十觚，每遇形合而尺寸亦近者，未嘗不愕觚紋各異

3 見Peng Peng, *Metalworking in Bronze Age China: The Lost-wax Process* (Amherst, New York: Cambria Press, 2020), pp. 5-7.［編者按：讀者可詳參彭鵬此書與丹羽崇史文章中對失蠟法的討論。］

4 見Peng Peng, "Was Lost-wax Casting Adopted in Pre-Qin Chinese Bronze Art?" Orientations January/February (2018), pp. 110-111; Peng, *Metalworking in Bronze Age China: The Lost-wax Process*, pp. 151-157.

5 萬家保曾將中國青銅時代早期容器紋飾分為「範作」、「模作」、「模範合作」、「複雜模作」等。見萬家保，〈安陽及黃陂兩商代遺址銅器紋飾之比較〉，《中國藝術史集刊》，期7 (1977)，頁8。

6 詳見岳洪彬、岳占偉，〈試析殷墟鑄中的「一模多器」現象〉，《南方文物》，期3 (2014)，頁92-99。

7 見石璋如，〈殷代的鑄銅工藝〉，《中央研究院歷史語言研究所集刊》，期26 (1955)，頁105、120。評此洞論，見葉萬松，〈我國西周前期青銅鑄造工藝之研究〉，《考古》，期7 (1984)，頁656-660；蘇榮譽，〈二十世紀對先秦青銅禮器鑄造技術的研究〉，收入泉屋博古館、九州國立博物館編，《泉屋透賞：泉屋博古館青銅器透射掃描解析》(北京：科學出版社，2015)，頁431-432。

8 倪克魯原文為："*Throughout* the Bronze Age undecorated models stood at the beginning of the casting process. Decoration was *always* applied directly to the outer mold…"；"We thus have bronzes of identical shapes with varying decoration. "見Lukas Nickel, "Imperfect Symmetry: Re-Thinking Bronze Casting Technology in Ancient China," *Artibus Asiae* 66: 1 (2006), pp. 5 & 35. 引文中斜體為筆者所加。

9 詳見Robert Bagley, "Anyang Mold-Making and the Decorated Model," *Artibus Asiae* 69: 1 (2009), pp. 39-90.

10 見Robert W. Bagley, *Shang Ritual Bronzes in the Arthur M. Sackler Collections* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1987), pp. 40 and 61, note 188.

11 見Robert W. Bagley, "Shang Ritual Bronzes: Casting Technique and Vessel Design," *Archives of Asian Art* 43 (1990), p. 20, note 3.

12 見Bagley, "Anyang Mold-Making and the Decorated Model," pp. 83–84.

13 見Kin Sum (Sammy) Li et al., "Decorated Models, Replication, and Assembly Lines for Bronze Industrial Production in 500 B.C.E China," *Early China* 44 (2021), p. 112.

其趣；以效率至上之工業視角度之，倪氏遂陷迷思：若施要紋於泥模，而匠欲鑄組器，緣何不舉一模而翻數範，反捨近求遠，每成一範，必獨鑿新模？何以解惑，據倪氏言，惟舉素模翻範，再各飾其範。[14] 主素模而重效率，倪氏此說雖謬，於今人竟有戚戚。倪氏所倡並非閉門造車之臆，疑其深受東周某新興鑄法所啟。然其以偏概全，既視時風個案為華夏通例，更疏今古類比之限度，可惜可嘆。

蓋啟倪氏之法造興於西元前一千紀中葉，仍屬塊範之疇，其鑄或稱「新田風格」。[15] 新田者，春秋晚期之晉都，斷為今晉西南侯馬遺址。其製吉金廣佈華夏，即所謂「侯馬銅鑄」。新田器表紋佈體例，始見於西周晚期，飾帶繞器，連綿不間，常無主題單元劃分或對稱之虞。[16] 然與西周器相比，新田紋飾密若細虺，斷而可續，更適藏拙。與此相適，侯馬新技應運而生，縱其確切起源，於時於地尚待考榷；而風格、技術之成孰先孰後，亦暫難確辨，或如蛋雞，互協共就。鋪墊至此，當述東周範鑄之技業革變。自1957年侯馬鑄坊重見天日以來，此新法速得矚目，得其名曰「印板」技術：判其飾板所「印」者，乃新田器式上「同組花紋的反複」。[17] 此說影響甚巨，後常稱「模印」法，至今不絕於學界。[18] 然如下文將述，侯馬紋作並非常言之「印」(imprint)，其鑄坊所遺紋板亦難徑稱「印」(stamp) 模。此後經年，三晉考古界又有侯馬「分塊模」(fractional models) 之論，以釋新田器表常含紋樣單元之重複。[19] 在《侯馬陶範藝術》(*Art of the Houma Foundry*) (1996年) 一書中，山西考古研究所同仁仍襲此說。[20] 然正如其合作者貝格立稍早所言，該法「不容修裁、彎曲或縮略［花紋］單元」，與新田器飾細節難符。[21] 貝氏此評恰亦可釋侯馬銅鑄中，上及「印板」或「模印」說法之欠。

14 見Nickel, "Imperfect Symmetry: Re-Thinking Bronze Casting Technology in Ancient China," pp. 35–36.

15 見黃銘崇，〈山彪鎮一號墓的歷史座標〉，《古今論衡》，期5 (2000)，頁3-16。

16 對此裝飾佈局之討論，見 Lothar von Falkenhausen, "Late Western Zhou Taste," *Études chinoises* 18: 1-2 (1999), p. 149.

17 見侯馬市考古發掘委員會，〈侯馬牛村古城南東周遺址發掘簡報〉，《考古》，期2 (1962)，頁59。

18 如南普恆等，〈山西隰縣瓦窯坡墓地M23出土銅器的技術特徵及相關問題〉，《中原文物》，期1 (2019)，頁118。

19 如張萬鍾言，「原來陶模是依據其圓形弧度計算出的，有的用四塊，有的用六塊。」見張萬鍾，〈泥型鑄造發展史〉，《中國歷史博物館館刊》，期10 (1987)，頁32。後張氏又言，「分塊模，就是按着器物的對稱關係，根據器物形狀、紋飾以及各種附件，分別做模，把形狀相同，紋飾一樣，對稱的部位，分成相等的塊，然後只做其中一塊模，烘乾後在模上按着需要反複翻製外範，合成一個完整的鑄型。」見張萬鍾，〈東周時期泥型鑄造的新成就：從侯馬出土的陶範試探分塊模的造型工藝〉，《中國歷史博物館館刊》，期1 (1996)，頁28。

20 見山西省考古研究所，《侯馬陶範藝術》(*Art of the Houma Foundry*) (新澤西：普林斯頓大學出版社，1996)，頁7-10。

21 見Robert W. Bagley, "What the Bronzes from Hunyuan Tell Us about the Foundry at Houma," *Orientations* 26: 1 (1995), p. 222, note in bibliography (item 3).

而無稽於侯馬之分塊模法竟被某研者推而廣之，聯頗類倪克魯於素模之所見，以通註華夏青銅時代。[22] 奈何於殷墟、侯馬或其餘早期鑄址所現芸芸，從未見分塊模之相關物證。此六經注我之舉，無涉任何憑據線索，皆出論者增產提效之念。[23] 而今以實證角度觀之，產效之慮，早於侯馬者仍為華夏所未嘗見。[24] 侯馬紋作確多着眼於量產，透察其法者非據鑄坊所遺，乃基於所成之器：盧芹齋 (1880-1957) 舊藏「智君子鑑」一對，分入美國兩館，其形製、大小皆合，花紋亦近，且銘同字；凱瑟 (Barbara Keyser) 女士潛心對比二器，悟其紋於細處參差之由，遂揭侯馬新鑄之隱奧。[25] 以此雙鑑為例，簡而言之，蓋以素模翻兩器（如非更多）之範，其形可定；而器飾則出於所謂「樣板」(pattern block)[26]：將濕泥撳入此紋「模」後可得諸單元，對其「修裁、彎曲或縮略」（見上文貝氏言）並加統協後，遂依次植於兩範內表（此獨立操作下，範紋於細處萬難如一）；待兩器範成，其後環節幾與傳統塊範法無別。

樣板法之紋作，略修《夢溪筆談》議活字印刷之言，可謂若止為二三，未為簡易；若製數十百千，則事半功倍。蓋紋飾僅刻於樣板（如圖五），俟其所成，盡可批產量製。然此雖省紋刻之貴手，卻倍增範作之辛勞，此消彼長處，必涉成範工序之細化，而彰生產模式之革變。泥紋之壓印、抽剝、裁修、貼合，率非一日之功，而將其統於範壁而秩趣兩全，又需經年之識。於此稍有不智，便生造作：如圖六之犧尊，其飾凡二十三處，皆出同一樣板，隨形賦紋，曲直不一，裁略各殊。然煞費苦心下，拼殘接絮，如衣牆紙；今眼觀之，或具集破之拙，但錦灰之間，仍彌襤褸之氣。犧尊花紋單元又見於圓壺一對，然恰如上述智君子鑑，兩壺遠觀如一，近審紋非全同。[27] 李氏若有興致，不妨執3D掃獵，但觀其獲；而就今目所及，樣板法所鑄青銅，概無飾同之例。試問如上鑑、壺組器，侯馬鑄匠緣何各妝其範，而不以同法飾模，以省分綴之功？不厭其煩背後或獨具匠心，或有難言之隱：莫非面對飾模，欲數翻其範者，終不免有心無力？侯馬工

22 見董亞巍，《範鑄青銅》(北京：北京藝術與科學電子出版社，2007)，頁4-6，41-49。

23 相關評述，見Peng, *Metalworking in Bronze Age China: The Lost-wax Process*, pp. 35-36, note 81.

24 見Bagley, "Anyang Mold-Making and the Decorated Model," p. 84.

25 詳見Barbara W. Keyser, "Decor Replication in Two Late Chou Bronze 'Chien'," *Ars Orientalis* 11 (1979), pp. 127-162.

26 該詞所指為板狀紋飾樣塊（可粗視為紋模，然非形模），烘焙而堅，反覆可用，於侯馬鑄遺中常見。凱瑟1979年文中稱之為 "pattern block"，後貝格立在數文中沿用此詞。許傑 (Jay Xu) 在其所譯貝氏一文中，呼其為「樣板」，本文沿用此譯。見Robert W. Bagley,〈從渾源銅器看侯馬鑄銅作坊〉，《文物保護與考古科學》，期10: 1 (1998)，頁25。

27 相關討論見Bagley, "What the Bronzes from Hunyuan Tell Us about the Foundry at Houma," pp. 216-222.

坊對產效之重，已為不爭事實，按說當動此心；然以飾模鑄系列器，以侯馬匠作之能，又斷具其力：圖七所示組獸即此一顯證，其新田風格自不待言，而形紋酷肖，貝格立早言其為「現知最早用數器一[飾]模工藝」者；而弔詭之處在於，此諸器無涉侯馬新法，乃出自傳統塊範鑄造，即青銅時代早期常見之「飾模法」（礙於倪克魯素模論，暫以此稱別之）。[28] 貝氏確具慧眼，然此三獸如今已陸海相隔，倘言其全同，須證於分毫之際。而能在此尺度上得確證而廣服眾者，莫過於3D技術。誠如李氏所言，「在現實生活中，這三隻青銅獸是很難放在一起比對的。但在電腦中的3D模型，不僅可以自由轉動比對，還能將其中一隻嵌入另一隻體內，看它們的形狀、大小是否切合。」[29] 在對此三器及京都藤井齊成會有鄰館 (Fujii Saiseikai Yūrinkan, Kyōto) 另一銅獸做細緻3D分析後（圖八），李氏遂信四者共享同一飾模：前三者於形於紋，皆為宏觀意義上的全同，而有鄰館銅獸僅軀幹前部略別，料其飾模經數次翻範而有所損補。[30] 眼上得來終覺淺，為絕知此事，李氏以3D技術躬行其證，一（飾）模多範終成侯馬不移之見。此舉意義不言而喻，而論定背後摧嚅成觀處，上及尚不能十一。

圖五　陶製紋飾樣板，寬19厘米，出於山西侯馬遺址，約公元前5世紀。見山西省考古研究所，《侯馬陶範藝術》(*Art of the Houma Foundry*) (新澤西：普林斯頓大學出版社，1996年)，圖130，頁93。

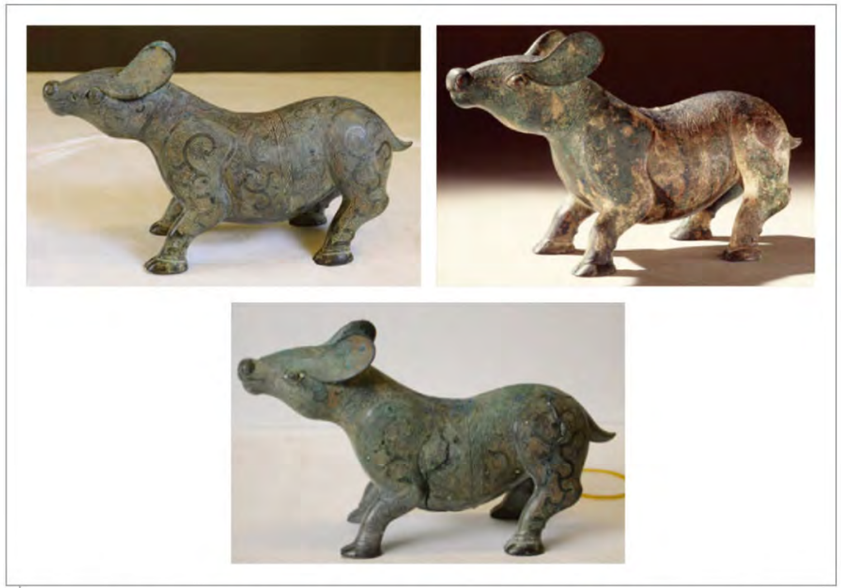
28 見Bagley,〈從潭源銅器看侯馬鑄銅作坊〉，頁24。

29 見李建深〈藝術史、考古、3D技術〉（本刊），節2.3.1。

30 詳見Li et al., "Decorated Models, Replication, and Assembly Lines for Bronze Industrial Production in 500 B.C.E China," pp. 114-135.

圖六　上海博物館所藏青銅犧尊 (上，長58.7厘米) 及其器紋（下，呈於着彩拓片，皆同一樣板所出）。器出山西潭源，約公元前5世紀前葉。

圖片來源：https://www.shanghaimuseum.net/mu/frontend/pg/m/article/id/CI00000404 © 2015 Shanghai Museum; Robert W. Bagley, "What the Bronzes from Hunyuan Tell Us about the Foundry at Houma," *Orientations* 26.1 (1995), 圖5，頁216。



圖七　系列青銅獸，分藏於弗利爾美術館(Freer Gallery of Art，上左)、大英博物館(British Museum，上右)與舊金山亞洲藝術博物館 (Asian Art Museum of San Francisco，下)。獸長皆20.5厘米，約公元前5世紀前葉。見Kin Sum (Sammy) Li et al., "Decorated Models, Replication, and Assembly Lines for Bronze Industrial Production in 500 B.C.E China," *Early China* 44 (2021), 圖1-3，頁117。

圖八　大英博物館與舊金山亞洲藝術博物館所藏青銅獸3D模型疊嵌及比照：以不同角度（左）與參照點（右）示其形紋契合。見Li et al., "Decorated Models, Replication, and Assembly Lines for Bronze Industrial Production in 500 B.C.E China," 圖19 & 20，頁132。

3D技術如日方升，其在藝術考古中之應用，宏及遺址空間，微及器物刻痕，盡於李文個案中呈現。每案背後，皆別具妙湛，然不知者以為淡易。單於青銅器研究中，3D掃描可為處仍比比皆是，在此僅舉一例。拙著曾審大都會博物館 (Metropolitan Museum of Art, New York) 所藏一雙層器（圖九），時以「絕對底切」(absolute undercuts, 見圖九：右上) 細節為由，斷其透空外殼為失蠟所鑄。[31] 所據雖別，此判頗合於齊思 (W. Thomas Chase)、樂芙蒂 (Helen Loveday) 等見，[32] 獨與徐得娜 (Donna Strahan) 近論相左。徐氏頗疑此殼鑄法概與失蠟無涉，其證一者，乃透空紋飾上所見「範線」。[33] 然鑄家皆知，所謂「範線」，並非與失蠟絕然牴牾，蓋失蠟、塊範大可合一，即今仍常見之「間接失蠟法」(indirect lost-wax process)。[34] 徐氏餘證基於其所獲系列二維物像：如圖十所示，透空器殼下半球四單元圖影相疊後，竟有形紋契合之狀。徐氏遂斷此四者模並非整出自蠟具，否則，以單元蠟模之孱薄透空，必現「扭曲、擠壓、塌陷」之跡，而不可呈全同 (identical) 之象；上駁華夏早期莫須有之「分塊模」遂入徐氏視野：若以四分之一透空飾模翻四系列範，則此四者全同，合諸範為一而鑄器，則見四重複單元。[35] 在此姑不論徐氏以塊範所倡鑄式之惑，[36] 亦不探以蠟成模之可行另式，[37] 但評一處：透空單元處處三維蔓展（見圖九：下），言其四者如一，不可僅基於二維圖像。試使以3D模型複交疊之，四單元未必仍渾然相契。他日李氏若於此有思，不妨攜手共探，盼驗其詳。

31 見Peng, *Metalworking in Bronze Age China: The Lost-wax Process*, p. 67. 關於「絕對底切」特徵描述及緣其常為失蠟鑄件可靠標誌，見該書，頁64。

32 見W. Thomas Chase, *Ancient Chinese Bronze Art: Casting the Precious Sacral Vessel* (New York City: China House Gallery, China Institute in America, 1991), pp. 72-73; Helen Loveday, "Diversity in Eastern Zhou Bronze Casting: A Look at a Group of Openwork Vessels," *Journal of East Asian Archaeology* 4: 1-4 (2002), pp. 111 & 131.

33 見Donna Strahan, "Debating the Use of Lost-wax Casting in Ancient China," *Forbes Lecture on Scientific Research in the Field of Asian Art* (Freer Gallery of Art and Arthur M. Sackler Gallery, Smithsonian, 2019), p. 19. 徐氏徑稱此痕為 "mold seams"（範縫），釋為塊範法澆鑄中，熔液入範隙冷凝後所成器痕。此類線狀突起確由範縫所致，然其終為器表凸痕，仍言之「縫」不妥，不妨隨學界目前慣例，稱之為 "mold marks"（範線）；然此所謂「範線」內涵未必如一，並非必然指向其引申之意(即 "section-mold cast marks"，塊範鑄痕)。此器範線圖例，見Strahan文，頁18，圖18；頁20，圖20。

34 見Peng, *Metalworking in Bronze Age China: The Lost-wax Process*, pp. 67-68. 關於間接失蠟法定義及討論，見該書, 頁9-10。

35 徐氏文中不止一處提及，四花紋單元皆出一（套）範故呈全同之象 ("Since each quarter was made from the same molds...each quarter is identical to the others." ".... the same mold was used to produce each quarter")，初讀此論，讀者易惑：以徐氏所倡之塊範法鑄器，範僅不可複用，此四者如何由同一套範相繼鑄取？滋此誤解者，乃徐氏不確之謂：細讀方知，並非四單元皆出一範，徐氏所欲言者，乃四（套）範皆翻於同一單元模（即圓器模四分之一）。見Strahan, "Debating the Use of Lost-wax Casting in Ancient China," pp. 19-20.

36 見Strahan, "Debating the Use of Lost-wax Casting in Ancient China," pp. 19-20. 此法不經之格，頗類一前見：王金潮，〈談論曾侯乙尊盤的鑄造工藝〉，《東南文化》，期1 (2002)，頁70-74。對此之駁議，見Peng, "Was Lost-wax Casting Adopted in Pre-Qin Chinese Bronze Art?" pp. 105–108; Peng, *Metalworking in Bronze Age China: The Lost-wax Process*, pp. 43-47.

37 相關討論，見Peng, *Metalworking in Bronze Age China: The Lost-wax Process*, pp. 67-71.

圖九　紐約大都會博物館所藏雙層器 (上左，高21.9厘米，公元前5-3世紀，疑為燻爐；圖號：47.27ab) 及其透空外殼細部：上殼外飾所呈「絕對底切」（上右）與下殼內壁所見三維蔓展（下）。圖片來源：全器圖見W. Thomas Chase, *Ancient Chinese Bronze Art: Casting the Precious Sacral Vessel* (New York City: China House Gallery, China Institute in America, 1991), 圖35，頁73；細部圖為作者攝。

圖十　大都會博物館雙層器透空外飾下殼四單元複合疊加 (composite overlay) 及細部比對。見 Donna Strahan, "Debating the Use of Lost-wax Casting in Ancient China," *Forbes Lecture on Scientific Research in the Field of Asian Art* (Freer Gallery of Art and Arthur M. Sackler Gallery, Smithsonian, 2019), 圖17&19，頁21；Photos by Donna Strahan/Objects Conservation/Image © The Metropolitan Museum of Art. Color by Soon Kai Poh.

致謝：本文獲香港研究資助局優配研究金 (RGC Early Career Scheme；計劃編號: 24609620) 和香港中文大學文學院2021-22年Direct Grant for Research (計劃編號: 4051178) 資助，謹此致謝。

先秦全同青銅器的求索

李建深

青銅器是先秦時代中國的重要工業產品，同時也是宗族、國家的重要禮器，在先秦中國物質史的研究中佔有重要位置。青銅器固然重要，但也不代表其他工業產品不重要。同時代的玉器、絲織品等工業產品，也是宗族、國家祭祀、禮儀中的重要組成物品，不容忽視。但由於種種原因，如青銅器較易保存，有較多銘文或鑄或刻在其上，同時也得到文字史家的較多關注，令其在先秦中國物質史研究中地位超然。對其設計、製作技術、銘文、墓葬放置、禮器組合關係等，學者皆投入大量研究精力。故青銅器作為先秦中國藝術與考古的重要證據，學者不可不重視。

對於青銅器的銘文的關注，由來已久，基本上從漢代以來已有專家解讀商周時代的銅器銘文（又稱金文）。宋代在金石學、「考古」學（不同於後世的考古學）的推動下，金文解讀尤為盛行，更不用說在考據學盛行的清代了。20世紀中，金文解讀再上一層樓，達至前所未有的高度。然而，青銅器的設計與製作技藝研究，卻是20世紀前期才開始盛行。當然，宋代學者的著錄中也有對銅器外形的描述，但多限於對器形的描述，而非對銅器設計理念的探索。誠然，藝術史是近代歐洲的舶來品，銅器製作技術研究也是20世紀的產物。

在銅器設計、製作技術研究的汪洋大海中，探尋彭鵬文中所述的「全同」青銅器是其中一個分支。自20世紀以來，銅器設計與製作中縈繞學者腦海的一個重要問題是，工匠究竟從甚麼材料、部件開始其製作工序？如彭鵬文中所述，以前有人說是用失蠟法，以蠟先製作模，然後用泥範覆蓋之，然後加熱讓蠟流出，泥範的中腔位置就是失去的蠟模，倒入熔解後的高熱銅液，待其冷卻即可成青銅器。有人說是用飾範法，從沒製作過模，而是先製泥範，在泥範上加上紋飾，倒入銅液可成。有人說是用飾模法，一切都在模上先修飾妥當，後覆以泥範，待泥範吸取其紋飾，之後再分開泥範，取出模，再合併泥範，倒入銅液。一時眾說紛紜，莫衷一是，但也促成20世紀銅器工藝研究的百花齊放、百家爭鳴。藝術考古材料的不斷湧現，使答案越趨明顯，就是飾模法、分範法在商、西周時代中國的大流行。有失蠟法、飾範法的出現，但其出現較晚，在中原地區要到春秋時代。而彭鵬的第一本學術專著*Metalworking in Bronze Age China: The Lost-Wax Process* (New York: Cambria Press, 2020)，就是研究先秦中國的失蠟法。其細緻梳理、翔實論證，是現時研究失蠟法的集大成之作。

在飾模法、分範法的大流行下，有一個特殊現象。理論上用這些方法，可以生產出一模一樣的銅器。可是在春秋時代以前的銅器，沒有出現過一模一樣的銅器配對。是學者未找到這樣的配對呢？還是它們在春秋時代以前沒有生產過、沒有出現過？李建深在2022年期刊*Early China*上聯同大英博物館、三藩市亞洲藝術博物館、弗利爾美術館與及一眾3D掃描專家，即對此進行過討論。今又有彭鵬的文章，使我們的探索脈絡更加清晰明瞭，理論背景、未來展望更加鮮明。

中國史前玉器技術淺說

鄧 聰

摘 要

狹義的礦物學將玉分為硬玉（翡翠）和軟玉兩類。在中國史前時期，軟玉的使用更為廣泛。時至今日，在東亞地區，玉器仍多用軟玉製成。新石器時代至青銅時代的早期玉文化中，除日本外，軟玉在東亞代表最高的價值，甚至是王權的象徵。技術是促進人類社會發展的一個重要因素，技術的選擇，往往與社會的文化價值觀相聯繫。本文擬從製玉技術演進的角度，分析玉文化在中國的史前發展特徵，總結三大製玉技術及其發展階段，探究技術與社會的關聯。

關鍵詞：中國、玉技術、砂繩切割、輪軸機械、鋸片切割

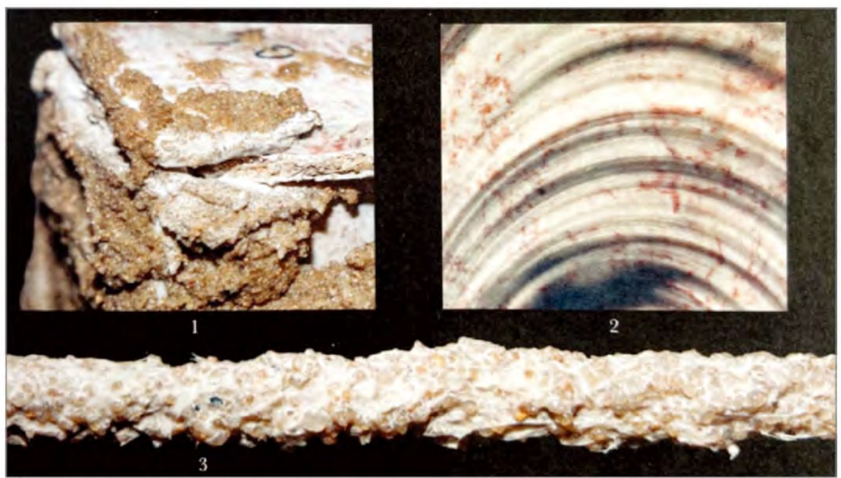
一、前 言

考古學家歷來對古代玉器的工藝十分重視，然而對古代攻玉技術的探索，雖歷時悠久，卻仍有諸多值得反思之處。玉器製作技術的現代考古學實驗的研究，是很重要的研究項目，古代人類製作玉器的動機，始終是現代實驗者難以掌握的。實驗考古學的限制是很明顯的。「他山之石，可以攻玉」，史前石器研究是對玉器技術分析研究的基礎。上世紀80年代以後，中國考古學者廣泛參與到古代玉器工藝的研究中，研究者結合聚落考古、玉作坊及操作鏈的概念，在充分繼承現代世界石器工藝學研究的成果後，逐步開展了對萬年古代玉器的科學技術研究。以下就史前製玉工藝的代表性技術及其技術選擇作簡要探討。

二、玉器製作工藝技術的探討

（一）砂繩切割

新石器時代東亞玉器的表面上，常見到線狀的切割痕跡，牟永抗指出是以「柔性線狀物帶動砂粒切割」[1] 形成，可稱之為「砂繩截玉」，黃建秋[2]、張敬國[3] 等對新石器時代玉器線切割技術進行了實驗復原，對這一技術有了更深刻的認識。筆者在2005年，從工藝學的角度出發，分別就方法和技術考察砂繩截玉，[4] 提出以痕跡破壞特徵解讀玦口痕跡，分析不同的技術特徵。通過線切割與片切割兩種技術的實驗對比和切割面觀察，詳細分析了不同類型玦口的形成原因，並指出從線切割的入口（劃痕）、線切割面的起伏波紋的形狀、分割結束位置的破裂特徵以及分割體兩側的形態這四個方面入手，便能全面總結線切割從開始到結束形態上的變化，進而復原史前玉器的製作模（圖一）。通過對東亞出土玉器的時空分析，興隆窪文化、紅山文化、凌家灘文化和良渚文化都存在着大量帶有砂繩切割痕跡的玉器。同時，筆者指出興隆窪文化時期的玉器，是已知最早使用線切割技術的玉器。線切割技術起源於中國東北，再向四方擴散。自黑龍江以南的東北平原、黃河下游山東一帶、長江流域中、下游，至粵北北江水系這一遼闊的範圍，都發現過新石器時代玉器線切割的痕跡。



圖一　香港中文大學研究人員進行的砂繩切割玉器實驗
1. 砂繩切割過程中產生玉石漿
2. 實驗製作出完整砂繩切割面，由上而下切割，波浪起伏不平
3. 砂繩結合柔性切割工具

1 牟永抗，〈關於史前琢玉工藝考古學研究的一些看法〉，收入錢憲和、方建能編，《史前琢玉工藝技術》(台北：國立台灣博物館，2003)，頁20。

2 黃建秋等，〈良渚文化治玉技法的實驗考古研究〉，收入錢憲和、方建能編，《史前琢玉工藝技術》(台北：國立台灣博物館，2003)，頁157-188。

3 張敬國、張敏、陳啟賢，〈線性工具開料之初步實驗——玉器雕琢工藝顯微探索之一〉，《東南文化》，期4 (2003)，頁46-50。

4 鄧聰，〈以今鑒古——玉石切割實驗考古〉，《故宮文物月刊》，期264 (2005)，頁76-89；鄧聰，〈以柔制剛——砂繩截玉考〉，《故宮文物月刊》，期265 (2005)，頁70-82。

之後，筆者在金沙玉器的研究中總結了砂繩切割玉料表面的兩大特徵：分割開始方式，與鋸片切割配合使用以及切割面上的起伏波紋痕跡。金沙玉器中有大量砂繩切割應用的實例，牙璋2001CQJC:82運用砂繩切割進行玉器剖半切割，是前所未見的嘗試。同時金沙玉器上利用砂繩切割進行鏤空雕刻，在工藝技術上受良渚影響深遠。砂繩切割的技術以距今約9,000年的黑龍江小南山遺址出土的玉玦、匕形器、玉料為所見最早，這一發現將砂繩切割技術的時間上限比之前推早了千年。玉器工藝學研究，必須超越器物外形的限制，從不同類型的器物當中總結出共同的技術特徵，以貫通史前人類文化脈絡。砂繩切割擴散之處，即是中國玉文化足跡所至之地。[5]

2019年，筆者通過對黑龍江小南山、遼寧興隆窪興隆溝、俄羅斯濱海鬼門洞、日本桑野等遺址出土玉玦玦口處砂繩切割技術類型的對比研究，確認了起源於中國東北地區的砂繩切割技術在整個東北亞地區的擴散。[6]

（二）鋸片切割

鋸片切割指以石鋸等片狀工具在玉料一側切割加工，最後或以打擊或以加壓的重力完成分割的切割工藝（圖二）。在牛河梁遺址出土玉器研究中[7]，運用高倍顯微鏡電子掃描手段，首次系統地闡釋了鋸片切割工藝的內涵。鋸片切割主要應用於玉片素材的生產和玉器表面紋飾加工定位與刻劃兩方面，尤其是在鏤空轉角位上以鋸片切割進行十字定位標記，在整個東北亞範圍都有廣泛的發現。[8]

5 鄧聰，〈玉器砂繩切割考〉，收入王毅、鄧聰編，《金沙玉工1》(成都：四川人民出版社，2017)，頁125-135。

6 鄧聰、李有騫，〈世界最早砂繩切割技術——東北亞看桑野遺址出土的玉玦〉，收入福井県あわら市教育委員会編，《桑野遺跡》(福井：福井県あわら市教育委員会，2019)，頁207-211。

7 鄧聰，〈牛河梁遺址出土玉器技術初探〉，收入遼寧省文物考古研究所編，《牛河梁——紅山文化遺址發掘報告 (1983-2003)》(北京：文物出版社，2013)，頁525-540。

8 Sergei A. Komissarov, "The Ancient Jades of Asia in the Light of Investigations by the Russian Archaeologists," in Tang Chung ed., *East Asian Jade: Symbol of Excellence*, Vol. II (Hong Kong: Centre for Chinese Archaeology and Art, The Chinese University of Hong Kong, 1998), pp. 250-279.

圖二　香港中文大學研究人員進行鉅片切割玉器實驗

2017年，筆者從金沙玉器的鋸片切割工藝入手，考察了該項技術的工藝源流。金沙、三星堆玉器、玉料上均發現大量鋸片切割痕跡，最長達到一米以上。從世界考古學角度來看，鋸片切割是人類最古老的切割技術。歐亞大陸舊石器時代中期莫斯特 (Mousteria) 文化的石器中有大量石片製作的石鋸。舊石器時代晚期，很多骨質的管珠由鋸片切割分解。距今9,000-8,000年階段，以中國黑龍江、日本北海道、俄羅斯遠東濱海為代表的東北亞地區發現了鋸片切割工具和相對應的玉石器飾物。在興隆窪文化中，鋸片切割運用於玉片素材的製作。進入4,000年前階段，鋸片切割幾乎全面取代了砂繩切割，盛極一時。山東地區龍山文化玉禮器製作是鋸片切割技術新的高峰，這一技術在黃河流域迅速擴散，隨後進入中原地區，成就了二里頭大型玉禮器的輝煌。隨着時間推移，在二里崗、湖北盤龍城以及四川三星堆、金沙中都有宏偉的巨型玉器陸續出土。[9]

9 鄧聰，〈玉器鋸片切割考〉，收入王毅、鄧聰編，《金沙玉工1》(成都：四川人民出版社，2017)，頁163-173。

（三）管鑽技術

玉器的鑽孔工藝中管鑽的應用十分普遍，管鑽的具體方法，周曉陸、張敏所推測的是：

> ……把已截割好的玉料，定好圓心之後，將開了槽的竹管安放在圓心上，管子的上端可能用木板或石塊加一定的壓力，一人穩定竹管，並不斷向槽內加水添砂，也可借此人氣力，向下加以壓力，另外一人或兩人用皮條的兩端來回拉，使管子轉動，以帶動砂粒磨擦而鑽圓孔。[10]

然而在本世紀初，筆者提出了不同的思路：1995年，距今4,000年的澳門黑沙95A探方第一層生活面中發現一處紅燒土與礫石構築的遺跡。圍繞着紅燒土出土了環玦製品及芯（圖三）。據觀察，環的內壁及芯的管鑽面上，均遺留有由於高速旋轉形成的光澤及線狀痕跡。就在紅燒土的附近，還出土了一種長橢圓形的礫石，礫石長軸兩端各有一處乳凸，兩處乳凸周圍亦可以見到有明顯由於高速旋轉帶動而形成的光澤及線狀痕。環、芯及上述礫石三者出土位置相當接近，而三者同樣遺留有由高速帶動旋轉的摩擦痕跡。該文提到，4,000多年前環珠江口地區，很可能有一種以轆轤為軸心的旋轉機器被用作環玦的管鑽穿孔，即利用轆轤軸承支撐旋轉盤帶向着同一個方向進行旋轉運動，帶動了在其上已固定的玉石毛坯，而製作者以竹管狀物套在毛坯上施壓，由於旋盤的轉動，竹管在石英砂與水幫助下，使鑽孔等順利完成。轆轤軸承是支撐整個旋轉機械的關鍵，多為乳突狀礪石，在整個環珠江口地區常伴隨環玦玉器一同出土。此外，轆轤軸承在珠江口地區之外也有發現，浙江羅家角遺址、仰韶文化的西干溝遺址所出鑽頭皆有可能為轆轤，凌家灘M20:45有110件管鑽穿孔的芯出土和一件石轆轤共伴出土於M23號墓內，證實了旋轉機械鑽孔技術在5,300年前已經存在。良渚玉器鑽孔很可能與之存在關聯性。[11] 旋轉機械在玉器鑽孔上的應用在中國科技史上具有里程碑意義。以機械手段進行玉器加工，標誌着史前玉器製作工藝的革命性突破。

10 周曉陸、張敏，〈治玉說〉，《南京博物院集刊》，期7 (1984)，頁46-61。

11 鄧聰，〈環珠江口考古之崛起〉，收入李世源、鄧聰編，《珠海文物集萃》(香港：香港中文大學中國考古藝術研究中心，2000)，頁12-60。

圖三　1995年澳門黑沙遺址轆轤軸承出土狀況及轆轤旋轉機械復原示意圖

2002年，筆者受到日本著名玉器學者寺村光晴的啟發，進一步完善了轆轤軸承鑽孔的技術構造理論，在寺村光晴《ものづくりの考古學》中〈玉作とその流通〉一章的「工作機械」一節中，討論到玉器管鑽加工機械的「迴轉盤尖軸石器」。這種石器可能被安裝在轆轤縱軸的上端，其一端尖凸部份是插入迴轉中央承軸的位置。[12] 筆者認為，寶鏡灣出土的轆轤軸承器中，有十件為縱軸一面有乳凸，橫斷面大多為圓形或橢圓形，是由琢製精工將器體加工成器，石質主要為石英岩，質地堅硬適合作為轆轤軸承，而器身橫剖面多呈圓形，顯示轆轤軸承器的自體可能是固定於圓盤中部，與迴轉盤一同轉動。另外一些轆轤軸承器的橫剖面呈顯着不規則形狀。這顯示有可能此種轆轤軸承器是固定在軸上，在其上迴轉盤可以自由旋轉。寶鏡灣遺址尚出土有四件縱軸兩端都有乳凸的轆轤軸承器，可能起着一種自轉軸承的作用。筆者推測到了龍山文化的階段，環珠江口地區轆轤的旋轉台機械，已經具備多軸聯動和複合旋轉加工的能力。[13]

12 寺村光晴，〈玉作とその流通〉，收入大田區立鄉土博物館編，《ものづくりの考古學》(東京：東京美術，2001)，頁230。

13 鄧聰，〈史前玉器管鑽轆轤機械的討論〉，《中國社會科學院古代文明研究中心通訊》，期3 (2002)，頁49-51。

在之後一年的研究中，筆者相繼發表了東亞範圍內管鑽技術研究的最新進展。首先，根據對單面鑽孔的芯的觀察得知，管鑽面表面是上下起伏的。此種在管鑽面上的特徵被命名為「波紋式推進」，可觀察到有波峰、波長及波谷的結構，推測可能是與在穿孔過程中管鑽上加壓的力量有關。此種波狀起伏可調節大小的鑽孔形式，揭示了鑽管很可能是一些具有柔韌性的工具。第二，先前命名為「轆轤軸承器」的石器在台灣地區也有很多新的發現，說明了台灣地區在約4,000年前，已存在了轆轤管鑽的技術。第三，對中國管鑽技術體系的認識的突破性發現：很可能早在6,000多年前，黃河、長江流域就已經使用了轆轤機械。且在6,000多年前，有可能轆轤機械已被應用在玉器的製作上。距今5,000多年，凌家灘及良渚玉琮上精良的管鑽技術，是繼承了此地區二、三千年前管鑽技術悠久的傳統。4,000多年前，珠江三角洲地區的寶鏡灣管鑽技術的出現，估計是沿襲了長江流域玉器文化的傳統。在東南亞地區，越南長睛玉作坊遺址的轆轤機械，都可視為管鑽技術由南中國向東南亞大陸的一種文化擴散現象。[14]

之後幾年，轆轤軸承問題依託中華文明探源工程和多學科的研究寫作，得到了較全面的揭示，[15] 歷史文獻、民族學材料均顯示：轆轤機械的歷史十分悠久。通過民族學考察和實驗考古，轆轤旋轉機械的結構、安裝方式和運作方式也得到證實。考古學方材料方面，東亞地區出土了大量依賴管鑽技術進行製作的玉器，玉器鑽孔與旋轉運動之間的關係愈發緊密。從學術史角度出發，東亞範圍內從史前到青銅時代，發現了大量乳突尖狀石器。該種石器在東亞大陸的發現，從認識程度來說，可以分為兩組。第一組：包括中國東北、黃河和長江流域。從遼河、黃河以至長江，新石器中期到青銅時代的遺址中，出土了數量相當豐富的被認為是石鑽穿孔或研磨的工具，這些工具的具體功能是開孔或開孔後沿邊的加工，學界以石鑽開孔功能說為主流。第二組：環珠江口地區的遺址，特別是澳門、香港、珠海等地都有過乳突尖狀石器密集出土，經過研究論證，對該種石器類別、出土狀況等有較多的掌握。筆者在21世紀初的研究中，就已確認該種石器的性質為輪軸旋轉機械所用軸承，即轆轤軸承器，而解釋其具體使用方式的過程，則需要回到澳門黑沙轆轤出土時，遺跡其他器物的空間關係中：以轆轤軸承為圓心，半徑二至三米的範圍內，出土的同一層位文物，包括毛坯、芯、殘玦等，及存在過但已被取走的環、玦，都是轆轤旋轉加工的對象。礪石、石錘、鑿是輔助工具。玉作坊內以轆轤機械為核心的活動情景，清晰浮現。轆轤旋轉運動場景的復原，可以通過整體環玦製作過程來理解。據觀察，轆轤周邊二至三米區環的內壁及芯的管鑽面上，均遺留有由於高速旋轉而形成的光澤及弦線痕。同樣，轆轤為中心半徑一米範圍內軸承石器的長軸兩端，特別是乳突的周圍，亦可見明顯由高速旋轉帶動而形成的光澤及弦線痕。環、芯及上述軸承三者，在轆轤機械中由同一旋轉軸心帶動而同時轉動。具體操作推測是先把環玦的毛坯，在輪盤上固定。毛坯上緊貼固定的竹管，鑽孔時摻水加砂。此時，轆轤內的軸承，是處於輪盤與木軸中間，軸承為減少摩擦和過熱，相應自由水平旋轉。總之，在轆轤木軸不動情況下，以車筒等結構穩定輪盤。通過推動輪盤，轉換機械功，產生強大的推動力，完成管鑽工作。

對於目前所見考古出土的軸承，依軸頭形態功能的差異，可分榫狀、山狀、尖狀三種，又可根據使用過程中軸承旋轉與不旋轉的區別，分為固定軸承與滾動軸承兩大類。從東亞轆轤軸承的歷史發展來看，距今7,500年前轆轤軸承的起源與東北的玉文化有着密切關係。距今約6,000多年前，長江流域玉文化的發展，促進了轆轤滾柱軸承的使用。距今約4,000年前後，嶺南一帶出現了發達的環玦文化，由之帶動下轆轤技術向南覆蓋遠及東南亞半島及附近島嶼。

以下介紹目前已知最早的一例：查海T04082:1石鑽，通過對其形態及功能的分析，石器技術形態顯示，器身很可能是被牢固安裝在轆轤木車軸上方內孔，此器物並非手持鑽孔工具，而是經細緻設計的一種與輪盤木車軸牢固安裝組合的結構。以上製作特徵論述T04082:1石鑽應改訂為轆轤機械的軸承，輪盤可能作水平狀旋轉。T04082:1在榫頭一方榫頂位置，可見明顯琢擊形成的圓弧面，不見旋轉研磨痕跡，而榫頸及旋轉面上，則有清晰旋轉痕。榫頸高度超過1.5厘米，軸承有長期被使用的痕迹。榫頸旋轉面上，留下清晰同心圓旋轉運動痕跡。筆者通過實驗考古復原了該種使用痕跡的形成過程，通過對實驗考古成果的考察，對之前出土的一些性質存疑的軸承，就可以一錘定音。實驗考古學對查海T04082:1石質軸承功能的論證，其意義是相當重大的，說明至遲到查海興隆窪文化時期，成熟的輪軸鑽孔機械已經出現 [16]。

14 鄧聰，〈東亞史前玉器管鑽技術試釋〉，收入錢憲和、方建能編，《史前琢玉工藝術技術》(台北：國立台灣博物館，2003)，頁145-156。

15 鄧聰，〈中華文明探源與轆轤機械的發現〉，收入鄧聰、鄭煒明編，《澳門黑沙玉石作坊》(澳門：澳門民政總署，2013)，頁286-331。

16 鄧聰，〈中國最早的石質軸承的實驗考古試論——查海遺址軸承形態分析〉，收入遼寧省文物考古研究所編，《慶祝郭大順先生八秩華誕論文集》(北京：文物出版社，2018)，頁131-141。

三、小結

狹義的礦物學上，玉可分為硬玉（翡翠）和軟玉兩類。然而，在中國史前社會，軟玉的使用更為廣泛。在東亞地區，玉器仍多用軟玉製成，新石器時代至青銅時代早期玉文化中，除日本外，軟玉在東亞成為最高的價值觀象徵，甚至是王權的代表。

廣義玉文化的產生，最早見阿爾泰山西北部的丹尼索瓦 (Denisova) 人洞穴中，發現了目前最早的綠泥石手鐲，其年代大致屬於距今四萬年前後的舊石器時代晚期，當地獵人們以磨製技術加工。值得注意的是，丹尼索瓦手鐲，可能存在破損後二次改製的行為。

技術是促進人類社會發展的一個重要因素，技術的選擇，往往與社會的文化價值相聯繫。從製玉技術演進的角度，玉文化在中國史前發展有以下幾個階段。距今二萬年前後，製玉的鋸片技術已經較為發達。而中國玉文化最早的起源地為中國東北地區，並在整個新石器時代出現了逐步南傳的趨向。

在距今9,000-8,000年前後，製玉技術相比舊石器時代的工藝更進一步：在依舊保留了打製技術的基礎上，砂繩切割技術走向成熟，並迅速從中國東北地區傳播至中國東部的大部份地區。判斷運用砂繩技術的重要依據，是玉器的切割面上殘留的起伏波紋切割痕。

距今7,000-5,000年，中國東北地區輪軸機械得到運用，不少遺址出土過石質的輪軸。人們開始追求玉器的大量化生產和正圓形態，專業集團組織性的玉器生產活動也逐漸出現。

距今4,000-3,000年間王權誕生伊始，大型片狀玉器被賦予至高無上的文化意義——以牙璋為例，這一器類由二里頭遺址迅速擴散至南中國地區，可能指向了王權概念的傳播——此時的政治力量控制了玉器的製作及使用。但需要注意的一點是，在不同的時段，玉器背後的文化意義，可能不盡相同，對玉文化的考察，要通過對原料、技術、裝飾等多方面的因素進行考量。

史前中國玉文化分析，玉原料本身和多種技術交替是研究的核心課題。而技術內涵，又具工藝與社會象徵的意義。隨着時間、空間的變化出現了技術上的變化，因應社會不同的價值取向發生轉移，同一技術的選擇也會產生不同社會的涵義。對技術解析，有必要結合工藝及社會背景的考慮，這方面的研究有待今後的深入。

後記：筆者學習玉技術史多年，本文粗略概括近年一些研究的發展，見笑大方之家。本文構思得裨益於浸會大學李建深甚多，謹致衷心的感謝。

玉器技術研究的背景

李建深

前幾篇文章討論了以材質分類的金屬文物，鄧聰這篇文章則是討論玉器。材質分類框架下研究玉器，該如何從玉器中提取信息？

世界上的玉石器研究者甚眾。在中國，玉器一直以來被認為是重要禮器，研究者尤多。在20世紀前期或更早前，部分不能接觸實物、只能靠一兩張靜態的圖片觀察器物的研究者，往往不能以自己自由的視角去觀察器物，在提取信息時大受限制。在玉器研究中，有部分研究是探索玉器的文化含意。玉器的文化含意研究大多依靠文字材料，這對了解玉器的大歷史有其獨特貢獻，但也有其限制。史前的玉器自然無文字記載，後世的文字材料只是對前期玉器的猜測；傳統的文字史家對玉工的設計與製作技術基本沒多大興趣，致使這層面的討論盡付闕如。這些因素對玉器研究在古代中國歷史中的探索是非常不利的。所幸，鄧聰歷年來致力於玉器製作工藝此領域，收穫頗豐，此文便是其近年來研究成果的總結之作。

玉器工藝與石器工藝是密不可分的。在人類歷史中的石器時代所開創的工藝，有很多都應用在玉器上，所以石玉文化、石玉工藝應結合來看。人類大約於300萬年前製作、使用石器。與此同時，人類一直保持着對美的追求，包括使用看起來較漂亮、稀奇的石器，在技術上也追求多樣化、細緻化。在這大背景下，漂亮的石頭，包括玉，自然進入石器工匠的眼簾。

在這大背景下，有兩個問題一直是學者們想要解決的。一是世界上很多地方都有着悠久的石器製作傳統，有些來自不同區域的石器製作技術及其成品都非常相似，這究竟是某一處的工匠研發後，逐漸散播開去的呢？還是各地工匠獨立研發，其相似性只是偶然的呢？若是後者，這麼多的相似技術與成品單單用偶然性來解釋足夠嗎？若是前者，則牽涉第二個問題：史前人類的交通能力有多強？我們經常自然而然地覺得在史前時代應該是交通不便的，史前人類是不可能實現遠距離交通的。但是，這些自然而然的「覺得」有無實證的支持？學者要的是實證支持，鄧聰以及其他學者一直以來的玉石工藝研究，可以為這些現代智人起源、史前人類的行為之大問題提供多種思路。

鄧聰總結其研究歷程與成果，其文章包括「砂繩切割、鋸片切割、管鑽技術」三大技術傳統的研究，牽涉了史前人類行為、物料獲取、加工、控制等問題。在砂繩切割技術中，我們可看到最早的使用痕跡可在中國東北、俄羅斯等地出土的器物上看到。此技術逐步擴散，在東亞各地的玉工製作中可見到類似砂繩切割痕跡。關於鋸片切割，在舊石器時代中期廣大的歐亞大陸已出現有鋸工具，其後則在中國東北、華東、華中、西南等地的出土文物中被發現有鋸片的使用痕跡。管鑽技術有南北傳統，此文着重於南中國（香港、澳門、珠海）的技術傳統，此技術遠播東南亞。在鄧聰鍥而不捨的追尋、細緻入微的觀察下，整個東亞大陸玉器製作工藝的圖畫逐漸清晰呈現，玉器細緻的製作技術以及這些技術的起源、傳播，都一一涉及。

玉器研究受各種條件的限制，過往學者多着力於玉器文化的詮釋。在新技術湧現的時代背景下，更多學者專注於玉器工藝的研究。過往欠缺對工藝的研究，造成了此領域基礎研究材料的欠缺。在此情況下，如何在其上建立起更多結合社會背景的研究，還有很長的路要走。因為基礎材料的欠缺，我們不能單一化地批評玉器乃至其它器物的研究者只集中於工藝上，忽略其人文社會背景。我們應關注的是，如何讓玉器工藝研究為我們發掘出更多信息，豐富我們對古代玉工設計、技術的認識，並在此堅實基礎上，再進一步展拓人文社會的詮釋空間。

結合高科技的中國古代玉器研究

廖雅婷

摘　要

考古學在發展中不斷吸收不同學科領域的理論和研究方法，其中古玉研究也採用日新月異的自然科學手段。本文集中討論中國古代玉器研究中所應用的諸多現代科技手段，從學界部分古玉研究的案例入手，探索現代科學方法輔助下玉器研究的範式轉移，以期為古玉原料獲取、製作工藝、使用痕跡等研究提供新思路。

關鍵詞：中國古代玉器、玉料來源、玉器製作工藝、現代科技手段

一、引 言

倫福儒 (Colin Renfrew) 和巴恩 (Paul Bahn) 曾提出，考古學研究分為三個方面：一是問題、觀念和理論 (questions/ideas/theory)；二是研究方法和技術 (research methods)；三是田野考古發現 (discoveries in the field)。[1] 其中，科技方法作為研究手段，可在科學理論的指導下於考古學研究中發揮巨大作用。在出土玉器的考古學研究中，具有問題意識，在相應理論指導下以適當之科學研究方法與技術，結合考古出土材料去研究並解決問題，尤為重要。

李約瑟 (Joseph Needham,1900-1995) 曾在《中國科學技術史》(*Science and Civilisation in China*) 中提到，「對玉的愛好，可以說是中國的文化特色之一，啟迪着雕刻家、詩人、畫家的無限靈感。」他對中國古代玉器的加工方法進行探索，並認為依據安特生 (Johan Gunnar Andersson,1874-1960) 對新石器時代治玉工具的描述，玉器被證明是在沒有金屬幫助的情況下製造的，但必須使用解玉砂 (abrasive sand)，其中可能也使用了砂岩或板岩薄片作為切割工具。[2] 可惜，他並未對解玉砂、解玉工具、治玉工藝、先民在治玉過程中的行為與組織形式等問題進行更為深入細緻的研究。中國是東亞乃至世界玉文化最發達的國家。[3] 雖然近年來科技考古工作發展蓬勃，但是迄今為止，玉器工藝技術研究在科技史上的重要性並未得到相應體現。

目前中國考古發現最早的玉器可追溯至9,000年以前的小南山遺址。[4] 玉的定義有廣義與狹義之分，廣義為「石之美者」，狹義則從其礦物組成方面來進行界定，即「真玉」(true jade)，包括「軟玉」(閃石玉 nephrite，$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$) 和「硬玉」(輝石玉 jadeite，$NaAlSi_2O_6$)。[5] 古玉在研究中的基本問題是區分真玉和假玉的礦物成分和顯微結構。現代科技分析結果表明，中國新石器時代開始出現的真玉是軟玉，是具有交織纖維顯微結構 (interfelted fibrous microstructure) 的透閃石-陽起石 (tremolite-actinolite, $Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$) 系列礦物集合體。軟玉顏色常見者為黃綠色、淡黃色、白色等，其濃度變化不大，會隨着透閃石-陽起石中鐵含量增高而顏色加深。真玉文化時期，蛇紋石、石英、葉臘石、熒石等礦物所製裝飾品上也有與真玉相似的製作工藝；聞廣稱此類礦物為「假玉」(pseudo jade) 或「似玉」，亦將其視為中國史前古玉礦物，軟玉與似玉礦物可以通過室溫紅外吸收光譜 (room-temperature infrared absorption spectra) 及X光粉晶照相等方法予以區分。[6] 本文採用的是玉器的廣義定義。

在中國古代玉器研究中，除了偶爾對玉器殘件使用破損分析外，一般都盡量使用無損分析。相較於青銅器、陶器等研究，玉器的科技分析、儀器測試更為受限，雖然出發點是為了保護珍貴的玉器文物，但也在一定程度上影響了玉器科技研究的發展。不過，隨着科技的不斷進步，近年來，一些傳統的科技設備變得小型而便攜，這使得以往在實驗室中才能進行的拉曼光譜分析 (laser Raman spectroscopy, LRS)、X射線衍射圖譜分析 (x-ray diffraction, XRD)、紅外光譜分

1 Colin Renfrew and Paul Bahn, *Archaeology: Theories, Methods and Practice* (London: Thames & Hudson, 2016), 7th edition, p. 21.

2 Joseph Needham, *Science and Civilisation in China* (Cambridge: Cambridge University Press, 1970), vol. 3, pp. 663-669.

3 楊伯達，〈中國古代玉器面面觀〉，收入楊伯達、徐氏藝術館編，《古玉考》(香港：徐氏藝術基金版，1992)，頁1-21。

4 鄧聰，〈小南山與海上玉路〉，《中國文物報》（北京），2021年3月19日，第5版。

5 干福熹，〈中國古代玉器和玉石科技考古研究的幾點看法〉，《文物保護與考古科學》，期20 (2008年12月)，頁17-26。

6 John R. Fraser, "Nephrite in British Columbia," (M.A. Thesis, Department of Geology, University of British Columbia, 1972), p. 21; Richard C. Bradt, "The Toughness of Jade," *American Mineralogist*, 58 (1973), pp.727-732；聞廣，〈蘇南新石器時代的玉器考古地質學研究〉，《文物》，期10 (1986年10月)，頁42-49。室溫穆氏堡爾譜可以確定透閃石-陽起石所含鐵中高價 (Fe^{3+}) 與低價 (Fe^{2+}) 的佔位比率，軟玉中高價鐵所佔比率增高時，可使其色調偏黃，淺色者尤為明顯。聞廣，〈中國古玉地質考古學研究的續進展〉，《故宮學術季刊》，期1 (1993年)，頁9-30；聞廣，〈中國大陸史前古玉若干特徵〉，收入鄧聰編，《東亞玉器》，(香港：中國考古藝術研究中心，1998)，冊3，頁217-221。

析等可以更為方便地在考古工地或者文物庫房進行現場分析。此外，各種無損分析技術在內容和精度上的發展也為玉器的科技分析提供了重要契機。[7] 隨着科技考古的不斷發展，多種科技檢測分析手段、技術方法不斷改進，玉器研究方法上的範式轉移為中國古玉研究注入了新的血液。科技考古應該做到自然科學與人文科學的完美契合，既重視科技手段，也不拘泥於考古科技層面，在理論導向和研究目標上盡量達成一致，將科技手段與考古學問題結合起來，達成高效的跨學科研究，此為大勢所趨。

二、現代科技手段在古代玉料質地及來源分析中的應用

除了某些產地單一的特殊玉器品種外，一般而言，古玉溯源較為複雜困難，其中涉及到科學分析技術的應用。目前已知全球軟玉主要有兩種地質產狀：鎂質大理岩和蛇紋石化超基性岩。前者主要分佈於新疆崑崙山和田、四川汶川、遼寧寬甸等地，後者則分佈於新疆天山瑪納斯、河南淅川、台灣花蓮等。國外已知軟玉產狀以蛇紋石化超基性岩居多。[8] 在古玉原料來源的研究中，首先要判斷其種類，然後探索具體產地。不過，值得注意的是，現代已知軟玉產地並非一定是古人開採的軟玉產地，很有可能某些古代原料產地現今已不復存在。不同玉礦的化學成分、微量元素、結構組織等特徵有所差異。在鑒定玉料時，化學成分分析方法主要是用於檢測礦物成分，有無損分析和有損分析兩種方法。而偏光顯微鏡及掃描電鏡等常用於確定礦物結構。這些現代科技方法可用於辨別玉料質地及來源。

（一）、有損分析及無損分析方法

1、有損分析

從地質學視角而言，在玉石原料的分析中，一般會將樣品切片來觀察其顯微特徵，但是這種破損分析方法會影響玉器文物的完整性，故而未被學界廣泛採納。學者們對玉器文物的研究慎之又慎，在萬不得已的情況下，或會在最小損耗的前提下取古玉殘件的少量玉器粉末樣本來進行分析。例如20世紀90年代後期，聞廣、荊志淳等學者採用岩礦物理、化學分析對古玉殘片進行分析，並指出利用分子震動模式與頻率特徵的室溫紅外吸收光譜對礦物的分辨能力強，且用量僅在1mg左右。[9] 不過，出於保護玉器文物的目的，有損分析方法並未被廣泛應用。

2、無損分析

學界採用無損分析方法來研究古玉，運用外束質子激發X熒光發射分析法(proton induced x-ray emission, PIXE)、X射線衍射法、鐳射拉曼光譜技術等，將所獲譜線與標準譜線進行對比，以確定玉石的礦物成分。[10] 不過，鑒於這些分析結果會受到玉質結構及玉器表面拋光程度等影響，研究者一般會將多種科技手段結合，以克服各種儀器的條件限制，做到分析結果互為驗證、取長補短。無損分析研究目標在於，通過玉料的化學成分、礦相組成、顯微結構、微量指紋測定來確定玉質及來源。

（二）、研究案例及擬解決問題

在玉器研究中，僅關注科技本身是不夠的，研究者還應重視考古學和藝術史研究的具體問題。科學手段所得分析結果可以解決甚麼問題？是否發現新問題？產生了哪些新的研究視角和思路？可否被舉一反三應用到考古學及藝術史的其他研究問題中去？

7 岳超龍、朱創，〈中國古代玉器科技研究述評〉，《中國科技史雜誌》，卷38期1 (2017年3月)，頁111-122。

8 聞廣、荊志淳，〈澧西西周玉器地質考古學研究——中國古玉地質考古學研究之三〉，《考古學報》，期2 (1993年4月)，頁251-280。

9 聞廣、荊志淳，〈中國古玉地質考古學研究〉，收入徐湖平、汪遵國、鄭旗編，《東方文明之光——良渚文化發現60周年紀念文集》(海口：海南國際新聞出版中心，1996)，頁427-431；聞廣，〈辨玉〉，《文物》，期7 (1992年7月)，頁75-80。

10 任熾剛、承煥生、陳建新，《質子X熒光分析和質子顯微鏡》(北京：原子能出版社，1982年)，頁85-170。PIXE是利用質子束流、無損定量分析樣品元素組分的方法，因其靈敏度較高，對含量為10-6g/g量級的微量元素具有極好的分析精度，基本滿足古代玉器玉石微量元素種類及含量的無損分析，且能一次分析較多的微量元素種類，分析速度快，樣品的製備也容易得多，故而多被利用於探索玉器原料產地。

趙虹霞、張朱武、千福熹，〈用於中國古代玉器質地監測和溯源中的無損分析方法〉，《廣西民族大學學報（自然科學版）》，期4 (2009年12月)，頁42-53。不同產地的同種玉石的礦物成分、結構組成有所差別，這些可用XRD進行快速鑒定，伴生礦物的種類與含量差異為玉器原料來源探索提供信息。

趙虹霞、千福熹，〈拉曼光譜技術在中國古玉、古玉器鑒定和研究中的應用〉，《光譜學與光譜分析》，2009年11期 (2009年11月)，頁2989-2993。通過分析拉曼光譜的峰位、峰強、線型、線寬達到從分子水平研究樣品結構及分析鑒定物質。共焦顯微拉曼技術可有效排除焦平面干擾信號，適用於半透明樣品，這是其在古玉結構測試和材質鑒定中的優勢，多波長激光拉曼光譜峰值強且信噪比更好。目前便攜式拉曼光譜儀得到廣泛應用。

1、玉器原料溯源問題（殷墟、金沙）

2007年，荊志淳等學者對部分殷墟出土玉器進行近紅外光譜分析，結果顯示殷墟玉料的來源十分複雜，具體地點暫無法確認，仍需進一步的研究。[11] 2008年，干福熹等人採用外束質子激發X射線熒光、X射線衍射以及鐳射拉曼光譜等技術手段，對河南安陽殷墟安陽市文源綠島和賽格廣場出土的25件玉器進行了礦物學特徵分析，結果顯示80%為透閃石軟玉且出自同一個礦區，玉質較好，其他樣品多屬蛇紋石類型玉石和白雲石岩。[12] 值得注意的是，除了對玉料來源的關注，研究者也應關注玉器成品是本地製作，還是與同時段其他地區交換所得，是本地傳世品，抑或是外地傳世品等問題，這對於研究玉器的風格、工藝、區域文化互動等都意義非凡。

2018年，成都金沙博物館與中山大學研究團隊合作對汶川縣龍溪鄉馬燈村玉礦點進行野外調研，採集玉料樣品及周圍岩樣品，並尋訪當地鄉民了解近年來玉礦的變化及使用情況。研究者結合偏光顯微鏡、X射線熒光光譜 (x-ray fluorescence, XRF)、鐳射剝蝕電感耦合等離子體質譜 (LA-ICP-MS)、鐳射拉曼光譜等科學分析方法對採樣進行檢測，並將結果與金沙遺址所出玉器文物進行對比研究，提出龍溪鄉周邊的玉器材質組成特徵類似於金沙遺址出土的玉器玉料。研究者將其與中國其他礦源產地玉料樣本進行比對，提出金沙遺址所出大部分玉器應為就地取材製作而成。[13] 除了原料溯源，此研究結果還可用於進一步研究金沙玉器數量和類型多樣的原因，以及其背後的社會生產形態、技術發展狀況、與同時期周邊文化的交流等。

2、用玉等級問題

(1) 史前玉器案例（紅山、良渚）

聞廣曾依據現代科學研究方法對紅山文化牛河梁遺址墓葬用玉進行區分：第一等級以JN2Z1M14、JN2Z1M22、JN5Z1M1為代表，全用真玉；第二等級以JN2Z1M7、JN2Z1M11、JN2Z1M17等為代表，全用假玉；第三等級以JN2Z1M6為代表，未曾用玉。在良渚文化玉器的研究中，他提出，良渚文化時期用玉至少可分為四個等級：第一等級以餘杭反山YFM12等為代表，全為真玉；第二等級以青浦福泉山QFM9等為代表，真玉為主且摻有假玉；第三等級以海寧荷葉地HHM3和HHM9等為代表，真假玉基本各佔一半；第四等級如荷葉地HHM8及HHM13則全非玉。這四個等級玉器的數量和質地也有一定差別。[14]

這涉及早期精英對玉器成品的壟斷，關乎價值起源問題的探索，以及貴重物品的價值等級遞變概念。早期精英擁有的貴重物品是如何獲得高價值的呢？是精英利用既定權力把價值賦予至其能夠壟斷並隨意控制的物資上嗎？還是說其實是有價值的物品本身抬升了擁有者的社會地位、從而導致了精英階層的出現？Richard G. Lesure提出，價值等級的判定可以區分有近似外形和組成成分的物品，從而建立不同物品之間的符號聯繫。然後，學者們可從物品的價值差異入手進行探討。這為評估古人和他們的社會行為提供豐富的隱喻來源，進而為不平等的出現、以及早期等級社會產生與發展的研究進行助力。[15] 例如，鄧聰曾提出，鑒於質地、尺寸、製作工藝、紋飾等的差異，良渚玉器存在價值等級遞變。[16] 筆者認為，這種價值判定於良渚複雜社會的產生與發展問題的深入研究而言，意義深遠。

(2) 西漢南越王墓玉器

聞廣曾用室溫紅外吸收光譜、X射線粉晶照相等方法測定西漢南越王墓出土玉器。經檢測得知，南越王玉衣中夾雜有少量假玉片。[17] 民國章鴻釗 (1877-1951)《石雅》提及，「古人辨玉，首德而次符。」[18] 玉德之說可見於《禮記．聘義》、《管子．水地》、《說文解字》。李約瑟曾提出，真玉可以通過密度和折射率來辨別。[19] 然而，這些都是後世的論述，在有史記載之前，在沒有現代科技輔助的

11 荊志淳等，〈M54號墓出土玉器的地質考古學研究〉，《安陽殷墟花園莊東地商代墓葬》(北京：科學出版社，2007)，頁345-387。

12 干福熹等，〈河南安陽市新出土殷墟玉器的無損分析檢測的研究〉，《文物保護與考古科學》，期4 (2008年11月)，頁26-35。

13 檢測分析報告待發表，引自王方，〈古蜀玉器玉料分析及礦源產地調查情況綜述〉，《四川文物》，期1 (2022年2月)，頁94-105。

14 聞廣，〈澧西西周玉器地址考古學研究——中國古玉地址考古學研究之三〉，頁34-35。

15 Richard G. Lesure, "On the Genesis of Value in Early Hierarchical Societies," in *Material Symbols: Culture and Economy in Prehistory* (Carbondale, IL: Center for Archaeological Investigations, Southern Illinois University, 1999), pp. 23-55.

16 鄧聰，〈良渚玉器微刻與王權象徵等諸問題〉，收入鄧聰、曹錦炎編，《良渚玉工：良渚玉器工藝源流論集》（香港：香港中文大學中國考古藝術研究中心，2015)，頁34-35。

17 聞廣，〈中國古玉地質考古學研究——西漢南越王墓玉器〉，《考古》，期11 (1991年11月)，頁1032-1038。

18 章鴻釗，〈石雅〉，《地質專報》，乙種2號 (1927)。

19 Needham, *Science and Civilisation in China*, vol. 3, p. 664.

時代，古人真的能對現代礦物學和寶石學定義的真假玉進行鑒別嗎？[20] 他們僅憑肉眼區分（聞廣曾提及哪怕是如今工作多年的地質工作者或古玉行家也很難做到）抑或依據礦源的不同來進行治玉活動？[21] 鑒於史前所出玉器多有就地取材的特徵，史前先民在治玉時若碰巧從真玉玉礦採玉，那他們的成品湊巧皆為真玉。這樣能否解釋真玉集中出現的情況？[22] 這是否也是古玉的質地和數量在不同文化、不同墓葬中表現出相同特徵的原因之一？另外，既然以考古材料觀之，從新石器時代早期的小南山及查海文化，到中期的紅山文化，再到晚期良渚文化時期，史前先民們治玉用玉似達到較高水準，那麼在西漢時期，用玉禮制有無可能與玉料材質有關？《周禮· 冬官考工記· 玉人》曾載：「天子用全，上公用龍，侯用瓚，伯用將。」[23] 南越王墓出土玉衣夾雜少量假玉是否有可能故意為之？是否為了避免僭越？此現代科技檢測分析結果或可結合考古出土資料、傳世文獻來研究西漢諸侯王的用玉禮制等問題。

3、早期區域文化互動與技術交流

目前多數考古遺址並不位於玉料產地。對於這類遺址，有諸多研究問題值得深究。遺址中玉料來自何處？如何獲取？粗加工後是以半成品還是成品形態輸出？運輸途徑如何？玉料採集者與治玉工人及玉器的使用者之間是何關係？這些都關係到先民的活動路線、生產與交換等行為的方法及模式，關乎區域文化互動與技術交流。例如，劉莉、陳星燦、方輝等學者曾提出，二里崗國家文化擴張或許是為了獲取金屬、鹽、玉和原始瓷等資源。[24] 這就是一個非常值得借鑒的 、將早期中國的玉器等貴重物品與早期國家發展問題相結合的考古學案例。

在日新月異的現代科學技術幫助下，玉料質地及來源分析的相關研究正蓬勃發展。比重測試、偏光顯微鏡、掃描電子顯微鏡、外束質子激發X熒光發射分析法、X射線衍射法、鐳射拉曼光譜技術、微量元素分析、穩定同位素分析、稀土元素分析等正被應用於玉料的科學分析中。跨學科合作使得玉器研究資訊、視野、分析角度日益豐富，促進了新問題的發現與綜合性的比較研究。但是，從已發表材料觀之，目前學界對多個遺址的玉器材料及產地來源的認識仍有諸多不足之處，相關問題有待進一步研究。其中，檢測樣本和分析數量尚不充足，礦源調查範圍還較狹窄，樣本採集數量較少等問題頗為普遍。想要形成更為全面可靠的科學鑒別結果，還需要更為深入地開展玉礦的實地調查和玉器文物的科學測試分析，建立出土文物與礦源數據庫。此外，由於不同地區出產玉料的表觀特徵、礦物學特徵、化學成分特徵等展示了不同區域的文化及技術發展的獨特之處，因此不同地區玉料產地的材料數據還可以進行對比研究，盡可能對比出具體遺址出土文物的礦源數據。科學測試分析結果及數據庫除了能用於研究玉礦開採、選料、運輸、生產加工等較為直觀的問題，還有助深入探究這些環節背後的古代人類行為、社會生產及組織形態、用玉禮制、區域文化交流與技術互動等問題。

三、現代科技手段在古代玉器製作工藝研究中的應用

軟玉的莫氏硬度在6-6.5，其硬度之高，使得先民治玉絕非易事。[25] 作為玉器生產的場所，玉作坊中多見一些成品、半成品、殘次品、廢料、加工工具等。在現代科技的輔助下，出土材料的識別與分類有助於還原玉器製作不同階段的器物組合甚至整個玉器製作過程。古代玉器生產是一個費時費力的過程。這其中的具體工藝研究涉及諸多不同的技術步驟以及加工工具。[26] 而學者對這兩個方面的關注，將有助於對治玉工匠的組織分工、社會行為模式等研究問題的深入開展。不過，有時候考古學出土的相關證據較為零散，研究資訊不全可能會干擾研究者的判斷，使其無法準確識別，這使解讀治玉工具和工藝技術對社會結構的影響變得困難。

20 現代礦物學及寶石學定義的真假玉是對中國古玉相關認識的繼承與科學化。見聞廣，〈用玉的等級制度 ——古玉叢談（九）〉，《故宮文物月刊》，卷135 (1994年)，頁88-97。

21 聞廣，〈中國古玉地質考古學研究的續進展〉，頁9-30。

22 私人通訊，蒙李建深賜教，2021年。

23 （漢）鄭玄注，〈冬官考工記· 玉人〉，《周禮》(台北：新興書局，1964)，頁237-238。

24 Liu Li and Chen Xingcan, "Cities and Towns: The Control of Natural Resources in Early States," *Bulletin of the Museum of Far Eastern Antiquities*, 73 (January, 2001), 5-47; Liu Li and Chen Xingcan, *State Formation in Early China* (London: Duckworth, 2003), pp.85-130；陳星燦、劉莉、趙春燕，〈解鹽與中國早期國家的形成〉，收入李水城、羅泰主編，《中國鹽業考古》(北京：科學出版社，2010)，輯2，頁42-65；方輝，〈商王朝經略東方的考古學觀察〉，收入荊志淳、唐際根、高嶋謙一編，《多維視域——商王朝與中國早期文明研究》(北京：科學出版社，2009)，頁70-84。

25 F. J. Turner, "Geological Investigation of the Nephrites, Serpentines, and Related 'Greenstones' Used by the Maoris of Otago and South Canterbury," *Transactions of the Proceedings of the Royal Society of New Zealand*, 65:2 (1935), pp. 187-210; 此外，某些拋光軟玉樣品表面硬度更可達6.5-7，見John R. Fraser, "Nephrite in British Columbia," pp. 46-51.

26 Brigitte Kovacevich, "The Organization of Jade Production at Cancuen, Guatemala," in Zachary X. Hruby, Geoffrey E. Braswell and Oswaldo Fernando Chinchilla Mazariegos eds., *The Technology of Maya Civilization, Political Economy and Beyond in Lithic Studies* (Sheffield; Oakville, CT: Equinox, 2011), pp. 151-166.

治玉步驟方面，Brigitte Kovacevich曾依據中美洲和亞洲治玉群體的民族志與民族史學記錄，結合古典瑪雅 (Maya) 文明晚期危地馬拉 (Guatemala) 坎昆 (Cancuen) 遺址的考古發掘數據，提出玉器分段生產工序 (segmented manufacturing sequence of jades) 概念，並認為玉器生產任務是由不同的社會群體完成的。相關論述也可見於中國史前玉器的研究中。[27] 有學者曾提出觀點認為，良渚時期平民玉工僅參與初步加工以及簡單玉管、墜、珠等飾物的製作，而高等級玉禮器（玉琮、鉞等）的製作及成品則掌握在精英階層的手中。[28] 精英們壟斷了玉器的分段生產工序和神人獸面紋微刻技術，這可能是一種史前的社會控制形式和獲得權力的途徑。筆者認為，這種被壟斷的特定類型的玉器成品應該就是Marcel Mauss提到的「immeubles不動產」，即使流傳至他人之手，也仍與其原持有者有關，是不可讓渡的財富，主要用於禮儀場所或僅以有限途徑進行傳播。[29] 由此可見，雖然表面上研究者從出土玉器文物入手解讀的是具體的加工技術，實則這也體現了玉工的設計理念、當時人類的消費及使用需求。

加工工具方面，不同原材料的選用原則和加工技術也蘊含諸多寶貴的研究資訊。[30] 玉器製造過程中使用了哪些治玉工具？不同工具的使用方法是甚麼？工具的形態在使用中發生了甚麼變化？[31] 是否會被重複利用？同一個工具是否有多個用途及使用方式？人類行為闡釋 (interpretation of the behavior) 對古玉製作工藝研究也助力頗多。人在使用工具過程中運用了哪些肌肉？[32] 治玉工匠是如何施力的？不同的治玉步驟如何分工？使用了多少人力？每個治玉階段工時多久？而這些研究問題，在現代科技的輔助下，都有可能被分析。

27 Kovacevich, "The Organization of Jade Production at Cancuen, Guatemala," pp. 151-166. 2000年，鄧聰曾對香港白芒遺址出土環玦製作工序分四個工程進行非常詳細的闡述，見鄧聰，〈環珠江口考古之崛起——玉石飾物作坊研究舉隅〉，頁19-55。

28 鄧聰，〈良渚玉器微刻與王權象徵等諸問題〉，頁34-35。

29 Marcel Mauss, "Essai sur le don. Forme et raison de l'échange dans les sociétés archaïques," *l'Année Sociologique, seconde série*, 1923-1924, p. 17; Annette B. Weiner, "Inalienable Possessions: The Forgotten Dimension," in *Inalienable Possessions: the Paradox of Keeping-while-giving* (Berkeley: University of California Press, 1992), pp.23-43; Annette B. Weiner, "Inalienable Wealth," *American Ethnologist*, 12:2 (May, 1985), pp. 210-227; Lesure, "On the Genesis of Value in Early Hierarchical Societies," p. 26.

30 J. Desmond Clark, "Studies of Hunter-Gathers as an Aid to the Interpretation of Prehistoric Societies," in Richard B. Lee and Irven DeVore eds., *Man the Hunter* (Chicago: Aldine de Gruyter, 1968), pp. 276-280.

31 鄧聰，〈中國最早石製軸承的功能實驗考古試論——查海遺址軸承形態分析〉，收入遼寧省文物考古研究所編，《慶祝郭大順先生八秩華誕論文集》(北京：文物出版社，2018)，頁131-141。

32 私人通訊，蒙李建深賜教，2022年。

技術學 (technology) 是研究技藝 (technique) 的科學 (science)。科學既是技藝的結果，也是其原因所在。[33] 學者們在研究古代治玉工藝時，需十分細緻地考慮到古人實際操作中可能出現的諸多問題。例如，線切割作為切割工藝被應用於不同大小的玉料上時，其切割位置、加工工具、固定方式及切割操作方向等都會有所差別。[34] 這就是科學指導方法和技藝在實際運用中的差距，這些具體的研究問題可以通過實驗考古來幫助理解。玉工對於不同治玉步驟及不同玉料位置所需工具的選擇、在應用不同加工工藝時身體不同部位肌肉的調動、力度的調節等都值得進一步的關注。這些問題對於玉工組織的研究意義匪淺。畢竟，研究工藝技術其實也是對人的行為的研究。[35] 先民們在治玉之時，通過創造性的實踐所得達成自身認同、並融入自身思想。這也是治玉工藝技術存在地域差別的原因之一。不過，如今科技可在一定程度上消弭相關研究的地域差異。目前治玉工藝的研究借鑒了已經發展成熟的石器研究理論及方法。以往玉器工藝研究者多會提到《天工開物》和一些現代玉器工藝學著作，雖然有一定的啟示作用，但以近世玉器工藝論著研究古玉，確有諸多不精確之處。[36] 近年來，以高科技研究古代玉器製作工藝的有效手段主要有實驗考古與微痕分析等。

（一）民族學調查與實驗考古

重現史前人類生產與工具使用的整個過程並非易事。研究考古遺存，有時需要選取現代族群進行類比，這些族群仍在使用與史前人類相同或近似的工具。[37] 不過，民族學家可能無法管窺漫漫時間長河呈現出的過程特性。[38] 玉器工藝研究中，民族學調查和實驗考古相結合可以將實驗結果與考古出土文物進行對比，為研究古人治玉工藝提供新視野。[39] James Mathieu提出實驗考古 (experimental archaeology)，即在可控的模擬實驗條件下，設計出一系列方法、技術和分析

33 Marcel Mauss, "Techniques and Technology (1941/1948)," in *Techniques, Technology and Civilization* (New York: Durkheim Press/Berghahn, 2006), pp. 147-154.

34 鄧聰、呂紅亮、陳璋，〈以今鑒古——玉石切割實驗考古〉，《故宮文物月刊》，期264 (2005)，頁76-89。

35 Marcel Mauss, "The Divisions of Sociology (1927, extracts)," in *Techniques, Technology and Civilization* (New York: Durkheim Press/Berghahn, 2006), pp. 49-54.

36（明）宋應星 (1587-?)，〈玉〉，《天工開物》(香港：金楓出版社，1987)，冊2，頁334-343；趙永魁、張加勉，《中國玉石雕刻工藝技術》(北京：北京美術工藝出版社，1998)。

37 Leslie G. Freeman, "A Theoretical Framework for Interpreting Archaeological Materials," in Richard B. Lee and Irven DeVore eds., *Man the Hunter* (Chicago: Aldine Publishing Company, 1968), pp. 262-267.

38 Lewis R. Binford, "Methodological Considerations of the Archaeological Use of Ethnographic Data," in Richard B. Lee and Irven DeVore eds., *Man the Hunter* (Chicago: Aldine de Gruyter, 1968), pp. 268-273.

39 袁靖，〈科技考古的思考〉，《江漢考古》，期4 (2018年8月)，頁3-10。

手段，盡可能重現古代物品、人類行為及實踐過程，為考古學問題的研究提供參考數據。[40] 研究者可以通過設定不同的實驗條件，對實驗玉器上留下的微痕進行觀察，進而與出土文物上的微痕對比分析，以得到有用的工藝資訊。1950年，Sidney Howard Hansford (1899-1973) 最早使用竹管與普通建築用砂對軟玉鑽孔工藝進行研究。[41] 此後，實驗考古逐漸成為玉器技術研究的一種重要方法。

以玉器加熱的實驗考古研究為例，軟玉加熱時會產生一些物理和化學變化。目前一些研究觀點認為，中國古代玉器可能有多種加熱原因：或是為了軟化玉料使其表面加工更容易，或是為了達成某些顏色效果，或是曾作為燎玉被用於祭祀等特定場合。[42]

1、玉器加熱能否軟化玉石使其加工更為容易

軟玉會因為次生變化 (secondary alteration) 中顯微結構變得疏鬆而硬度下降，而軟玉成礦是逐漸降溫的過程。聞廣受此啟發，提出加熱可軟化玉石使加工變得更容易。他將YFM20:184透閃石軟玉殘璧切成小塊在馬弗爐內加熱，其中YFM20:184-12加熱至950°C (保持5小時)，YFM20:184-1加熱至659°C (保持1小時)，與未經加熱的YFM20:184進行對比。結果顯示，受熱標本的Fe/(Fe+Mg)$_{p.f.u.}$%發生變化。YFM20:184-1表面為棕黑色，YFM20:184-12褪色發白呈不透明的狀態，二者顯微結構有變鬆的趨勢，但礦物成分並未發生變化。金屬工具出現之前，史前玉器的雕刻並非易事。聞廣依據模擬實驗結果、結合良渚時期製陶可以達到模擬實驗溫度這項工藝條件，推測良渚玉器上的微雕可能是經過加熱處理而使得表層硬度降低，從而更易刻劃。[43] 這種推斷為研究神秘而精美的良渚微雕工藝提供了新思路。

然而，Russel J. Beck和Janet G. Douglas的加熱實驗結果顯示，火燒不但不能使透閃石-陽起石軟玉的硬度降低，反而還會增加其硬度。[44] 在Douglas的加熱實驗中，軟玉在800°C之前會稍微變硬，而非變軟。在此溫度之後，材料變脆並出現細小斷裂，卻仍不會變軟。目前學界尚未發現玉石熱處理會使其器表變軟而讓加工更容易的實證。關於玉器加熱是否會軟化玉石使其加工更為容易的相關推測，仍有很大的研究空間。

2、玉器加熱導致的顏色及物相變化

Janet G. Douglas等學者對弗利爾美術館和賽克勒美術館 (Arthur M. Sackler Gallery and Freer Gallery of Art) 館藏的中國古玉器 (公元前4000年-公元220年) 進行了礦物學及製作工藝方面的研究。[45] X射線熒光光譜檢測結果顯示，這批軟玉的三氧化二鉻 (Cr_2O_3)、氧化鎳 (NiO) 含量偏低，屬於白雲岩大理石類 (dolomitic marbles)。研究者將幾件新疆和田軟玉樣本置於500-1000°C的火中加熱24小時，並採用X射線衍射和傅立葉變化紅外光譜法 (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR) 方法對其館藏中國古玉是否曾被加熱進行研究。結果表明，加熱過程引起了顏色的顯著變化。在溫度達到800°C並保持24小時之際，軟玉的顏色由黃綠變為深棕乃至黑色。當軟玉被加熱至800°C以上時，因為結晶水被析出而轉化為透輝石（圖一）。[46]

40 James R. Mathieu, "Introduction- Experimental Archaeology: Replicating Past Objects, Behaviors, and Processes," in James R. Mathieu ed., *Experimental Archaeology: Replicating Past Objects, Behaviours and Processes* (Oxford: Archaeopress, 2002), pp. 1-12.

41 Sidney H. Hansford, *Chinese Jade Carving* (Great Britain: Lund Humphries and Co. Ltd, 1950), pp. 94-95.

42 Russel J. Beck, "A New Development in Understanding the Prehistoric Usage of Nephrite in New Zealand," in Foss Leach and Janet Davidson eds., *Archaeological Studies of Pacific Stone Resources* (Oxford: British Archaeological Reports,1981), pp. 21-29; Marian Domanski and John Webb, "A Review of Heat Treatment Research," *Lithic Technology*, 32:2 (Fall 2007), pp.153-194; Francesca Casadio et al., "A Stone Kneeling Figure in the Art Institute of Chicago: New Evidence from Scientific Investigations and Archaeological Finds in China," in Janet G. Douglas, Paul Jett, and John Winter eds., *Scientific Research on the Sculptural Arts of Asia: Proceedings of the Third Forbes Symposium at the Freer Gallery of Art* (Washington D. C.: Archetype Publications, 2007), pp. 3-11; Wang Rong, Wang Changsui and Tang Jigen, "A Jade Parrot from the Tomb of Fu Hao at Yinxu and Liao Sacrifices of the Shang Dynasty," *Antiquity*, 92:362 (2018), pp. 368-382；聞廣，〈中國古玉地質考古學研究的續進展〉，頁21-26；荊志淳等，〈M54號墓出土玉器的地質考古學研究〉，頁345-387；楊州，《甲骨金文中所見「玉」資料的初步研究》(北京：首都師範大學博士論文，2007)，頁88-91。

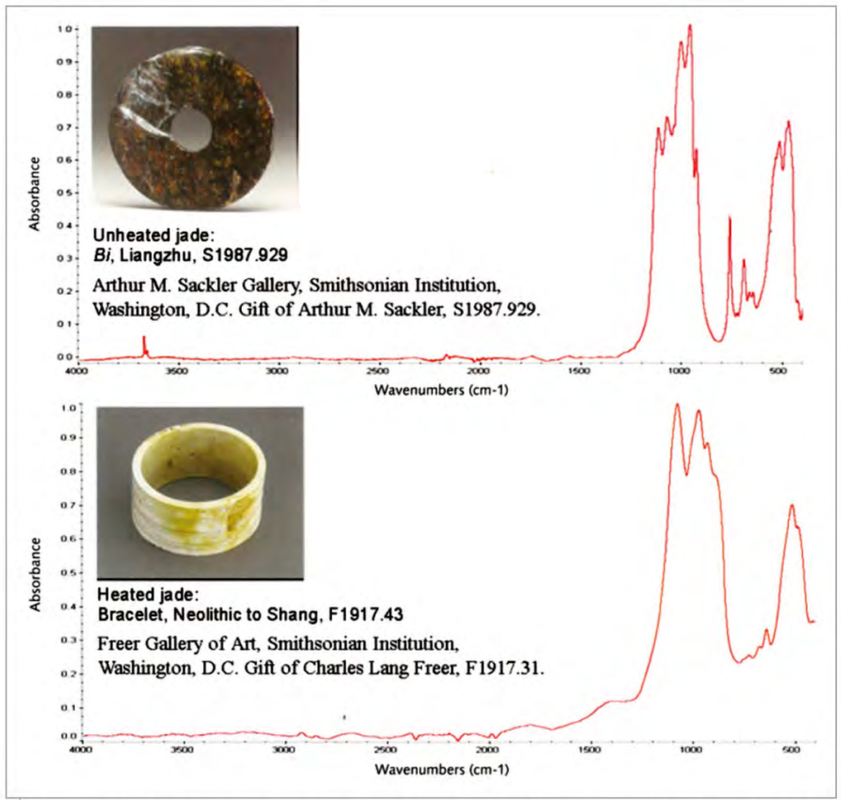
43 聞廣，〈中國古玉地質考古學研究的續進展〉，頁21-26。關於玉器加熱後刻化的相關研究，還可見溫雅棣、羅春曉、鄭漫麗，〈玉器刻畫工藝考〉，收入王毅、鄧聰主編，《金沙玉工1：金沙遺址出土玉石璋研究》，頁189-201。溫等人認為從受沁程度觀之，金沙遺址所出土部分玉璋表面發白，與良渚玉器受沁情況類似，或也符合聞廣提及的加熱後特徵。

44 Russel J. Beck, "A New Development in Understanding the Prehistoric Usage of Nephrite in New Zealand," pp. 21-29; Janet G. Douglas, "The Effect of Heat on Nephrite and Detection of Heated Chinese Jades by X-ray Diffraction (XRD) and Fourier-transform Infrared Spectroscopy (FTIR)," in Qian Xianhe ed., *Proceedings of the Conference on Archaic Jades across the Taiwan Strait* (Taipei: Guoli taiwan daxue lixueyuan dizhi kexuexi, 2001), vol.2, pp. 543-554.

45 Janet G. Douglas, "Research Relating to Early Chinese Jades in the Arthur M. Sackler Gallery and the Freer Gallery of Art," in Thomas Lawton ed., *New Frontiers in Global Archaeology: Defining China's Ancient Traditions* (Beijing: AMS Foundation for the Arts, Science and Humanities, 2008), pp. 265-278.

46 有關使用FTIR和XRD檢測熱處理的討論，見Janet G. Douglas, "The Effect of Heat on Nephrite and Detection of Heated Chinese Jades by X-ray Diffraction (XRD) and Fourier-transform Infrared Spectroscopy (FTIR)," pp. 543-554.

以弗利爾美術館藏品F1917.43為例。1959年，此藏品的X光衍射法樣品檢測結果顯示其為透輝石。但有趣的是，在半個世紀以後，室溫紅外光譜分析檢測結果表明樣品為透閃石。聞廣指出，這件藏品本為透閃石軟玉，高溫加熱厚表面局部轉化為透輝石，藏品表面的龜裂紋就是其可能曾被高溫加熱的證據。此外，牛河梁遺址出土的白色頑火輝石仿貝 (JN2Z1CJ:1) 也可能是古人為了達到想要的顏色，由蛇紋石加熱而形成的。他進一步提出，古玉中現已知的透輝石和頑輝石都不是古玉原生礦物。[47]



圖一　上：未加熱的玉璧及其FTIR光譜顯示它由透閃石（軟玉）組成。下：加熱的玉手鐲及其FTIR光譜顯示它已轉化為透輝石。轉化發生在800°C以上。見Janet G. Douglas, "Research Relating to Early Chinese Jades in the Arthur M. Sackler Gallery and the Freer Gallery of Art," 圖2，頁274。感謝Smithsonian Museum Conservation Institute的Janet G. Douglas 授權圖片轉載。

47 聞廣，〈古玉地質考古學研究方法續〉，《張家坡西周玉器》(北京：文物出版社，2007)，頁136-147。

此外，鄭建以江蘇鎮江所產現代綠色蛇紋石進行加熱實驗，結果顯示加熱樣品在1000°C時變為白色，與江蘇吳縣草鞋山遺址出土的良渚文化蛇紋石玉管顏色相似。譚立平等學者以台灣地區花蓮高鐵透閃石玉進行加熱，在溫度到達700°C時，樣本由黃綠色變成黃色，在860°C時變成黑色。[48] 這些加熱實驗表明，陽起石或透閃石在加熱過程中的顏色變化不盡相同。而這樣的結果與鐵的含量密切相關，鐵含量變少則玉器在加熱中容易變白。早前，陽起石 (actinolite) 的類似研究結果表明，礦物變黑的溫度隨着軟玉鐵含量增加而降低。[49] 實際上，在透閃石或陽起石的物相轉變過程中，的確存在低價鐵 (Fe^{2+}) 氧化為高價鐵 (Fe^{3+}) 及鐵含量減少等事實。[50] 筆者認為，以上加熱實驗雖為現今學者完成，卻也能從某些方面展現古玉加熱過程中顏色及物相變化曾經存在的可能性。

3、以加熱實驗研究玉石器曾否用於燎祭

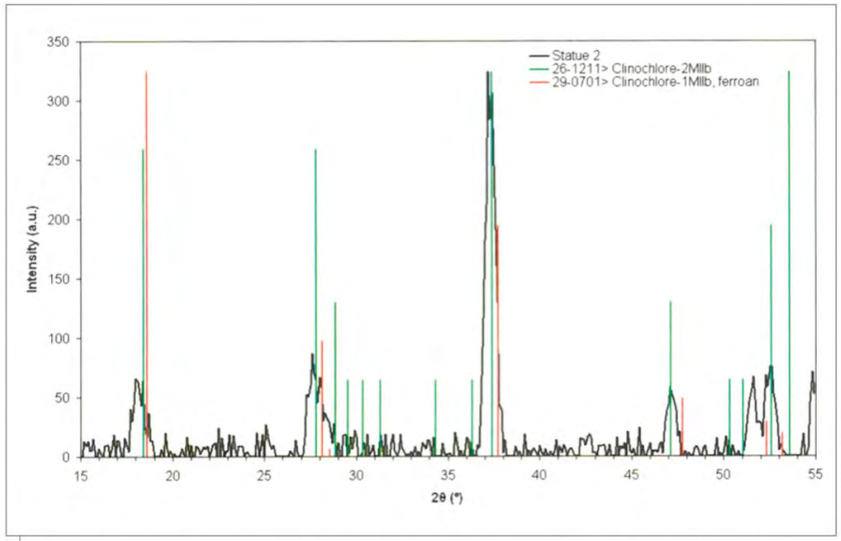
研究者對芝加哥藝術學院 (Art Institute of Chicago) 藏下跪人像的下巴下方進行了原位X射線衍射研究（圖二）。結果顯示其衍射曲線與斜綠泥石 (clinochlore) 的參考衍射曲線最為接近。為了進行表面痕跡的模擬實驗，所用的綠泥石參照樣品是X射線衍射圖檢測結果與含鐵斜綠泥石 (ferroan clinochlore, $(Mg,Fe^{2+})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$) 相匹配的綠泥石族礦物，其鐵含量高於跪人像。斜綠泥石的莫氏硬度為2-2.5，與下跪人像硬度小於3且能輕易被銅刻劃的情況相符。

為了驗證下跪人像是在埋葬前或埋葬時被火燒的假設，研究者將含鐵的斜綠泥石片岩樣品分成九份，使用X射線熒光光譜進行了氧化鐵 (Fe_2O_3) 的鐵含量測試，並進行加熱，觀察其顏色變化。其中，一個樣品不加熱（對照組），另外八個分別在莫來石爐 (mullite furnace) 中以不同溫度加熱24小時，冷卻至室溫後以肉眼和立體顯微鏡進行觀察。受熱樣品的顏色和形態變化是不可逆的。實驗結果顯示，不同溫度下樣品呈現的顏色有所差異 (圖三：1)。其中，600°C樣品橫截面的立體顯微鏡觀察展示了加熱導致的表面顏色變暗效果，150-200微米

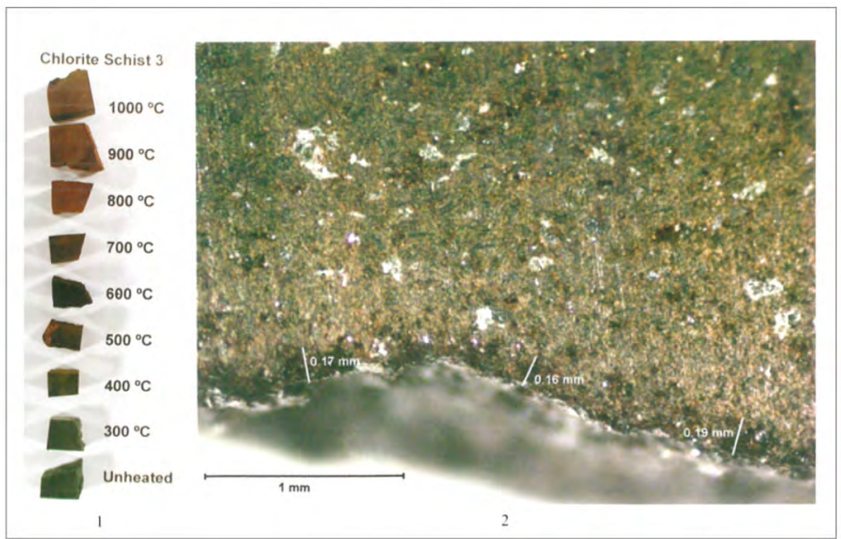
48 鄭建，〈江蘇吳縣新石器時代遺址出土的古玉研究〉，《考古學集刊》(北京：中國社會科學出版社，1983)，集3，頁218-224；Tan Liping et al., *A Mineralogical Study of the Fengtien Nephrite Deposits of Hualien* (Taipei: National Science Council, 1978), p.81.

49 D.S. Belyankin and E.V. Donskaya, "Thermo-optical Investigation of Actinolite," *Bulletin de l'Academie des Sciences de l'URSS*, 1 (1939), pp. 95-104.

50 王榮，〈中國古代透閃石-陽起石玉器白化機制研究述要〉，《文物保護與考古科學》，卷29期4 (2017年8月)，頁88-100。



圖二　使用Cr(Kα) 激發在下跪人像的下巴下方原位記錄的X射線衍射圖。見Francesca Casadio et al., "A Stone Kneeling Figure in the Art Institute of Chicago: New Evidence from Scientific Investigations and Archaeological Finds in China," 圖3，頁5。感謝Northwestern University/Art Institute of Chicago的Francesca Casadio以及Archetype Publications Ltd的James Black授權圖片轉載。



圖三　1. 不同溫度下熱處理後的富鐵綠泥石片岩樣品。2. 加熱至600°C的綠泥石樣品橫截面的顯微照片。見Francesca Casadio et al., "A Stone Kneeling Figure in the Art Institute of Chicago: New Evidence from Scientific Investigations and Archaeological Finds in China," 圖12、13，頁8。感謝Northwestern University/Art Institute of Chicago的Francesca Casadio以及Archetype Publications Ltd的James Black 授權圖片轉載。

厚的樣品視覺上幾近黑色，較之大部分樣品顏色更暗 (圖三：2)。600-800°C是明火可達之溫度，此加熱實驗結果是否意味着下跪人像曾在祭祀等特殊儀式情景中被火燔燎過？

燎祭用玉相關記載可見於《詩．大雅．雲漢》、《禮記．郊特牲》、《周禮．大宗伯》等傳世文獻材料。[52] 在甲骨文卜辭的記載中，也多見玉器用於燎祭例子。玉器燎祭的對象有「王亥」、山、河等，祭祀同一個對象可選用不同的玉器。[53] 此外，在考古發掘證據方面，三星堆一號祭祀坑曾發掘出土約三立方米經火燔燎敲碎的骨渣，以及大量被火燒過的玉石器、青銅器、金器、陶器、象牙、貝等。二號祭祀坑出土的遺物也可見火燒過的痕跡。發掘者認為，這兩個祭祀坑是古蜀重大綜合祭祀活動的遺存：包括「燔燎」以祭天、「瘞埋」以祭地、「懸肆」以祭山等形式。鑒於玉璋和玉戈 (公元前1300-前1100年) 上可見被火燒的痕跡，且器具上不見使用痕，有研究者推測此類文物在儀式中被用作儀仗。[54] 以上由傳世文獻、甲骨文和田野考古等綜合入手的研究方法是饒宗頤 (1917-2018) 所言之「三重證據法」。[55] 筆者相信，在現代科技方法的輔助下，燎祭用玉的相關研究將走得更遠。

玉器加熱是否會軟化玉石使其加工更為容易尚存爭議。加熱處理能否協助玉工將成品製成其想要達成的顏色效果、古人有否將經過加熱處理的玉器用於祭祀或其他儀式場合等，亦非定論。古人治玉動機、觀念和行為模式、社會組織形式等都與今時之人有所差別。不過，儘管古玉加熱的判別並非易事，玉器加熱實驗對於古玉加熱行為的探索仍有一定啟示作用。研究者需注意，實驗參數的多變性無法掌控，實驗考古所能達到的效果有限。現代考古學實驗只能作為參考數據為古代玉器工藝的研究提供某種可能性，不宜被奉為圭臬。

51 Casadio et al., "A Stone Kneeling Figure in the Art Institute of Chicago: New Evidence from Scientific Investigations and Archaeological Finds in China," pp. 3-11.

52「靡神不舉，靡愛斯牲。圭璧既卒，寧莫我聽」，見（漢）毛亨，《毛詩正義》(香港：中華書局，1964)，冊5，頁1593-1595；「天子奉玉升柴加於牲上」，見（漢）鄭玄注、（唐）孔穎達正義、呂友仁整理，〈郊特牲第十一〉，《禮記正義》(上海：上海古籍出版社，2008)，冊2，頁1023-1111；「以禋祀祀昊天上帝」，「禋之言煙也。周人尚臭，煙氣之臭，聞者積柴實牲體焉……或有玉帛燔燎而升煙」，見（漢）鄭玄注，《周禮》，頁98-102。

53 黃然偉，〈燎祭〉，《殷周史料論集》(香港：三聯書店，1995)，頁17-27；楊州，〈甲骨金文中所見「玉」資料的初步研究〉，頁90-91。

54 四川文管會等，〈廣漢三星堆遺址一號祭祀坑發掘簡報〉，《文物》，期10 (1987年10月)，頁1-15；四川文管會等，〈廣漢三星堆遺址二號祭祀坑發掘簡報〉，《文物》，期5 (1989年5月)，頁1-20；香港文化博物館編，《三星閃燿，金沙流采：神秘的古蜀文明》(香港：康樂及文化事務署，2007)，頁180-181、187。

55 饒宗頤，〈談三重證據法——十干與立主〉，《選堂集林》(香港：中華書局，2012)，頁1-6。

（二） 微痕分析

微痕分析 (microwear或use-wear analysis) 是石器研究的基本方法之一，源自前蘇聯。微痕方法創始人是S. A. Semenov (1898-1978)，其於1957年通過實驗手段，以60倍以下低倍顯微觀察考古發現的石製品微痕來判斷工具的用途。[56] 及後，低倍法被用於觀察石刃疤痕與磨損，以George Odell為代表；而高倍法一般運用金相顯微鏡 (metallurgical microscope，放大100-500倍) 進行觀察，以Lawrence H. Keeley為代表。[57] 鑒於兩種方法各有其優缺點，二者在微痕分析中常搭配使用，以低倍觀察為基礎，高倍觀察具體位置，研究考古學問題。微痕分析逐漸被廣泛應用於石器研究中。[58] 玉器具備石器的礦物特徵，容易保存製作及使用痕跡，因此石器領域日漸成熟的研究方法及術語體系對於玉器研究有借鑒意義。[59] 作為古玉科學研究的一個重要方面，微痕分析可以幫助研究者多角度、多方面地探索人類行為、社會生產生活及發展狀況、治玉工匠組織分工、宗教信仰及精神文明等諸多課題。

一般而言，研究者在接觸玉器文物時會先憑肉眼進行觀察，輔以放大鏡等工具。鄧聰等學者以高清數碼照相機對玉器表面的微痕進行高清攝影呈現。[60] 這其中就包含了大量出土玉器文物的整體展現及細部分析，對於探索古代玉器的製作工藝、使用與改製、古代玉工的設計思路及實踐行為，以及玉作坊的研究等都意義重大。此外，微痕分析方法主要還有以下兩種：

56 S. A. Semenov, *Prehistoric Technology: An Experimental Study of the Oldest Tools and Artefacts from Traces of Manufacture and Wear*, trans. M. W. Thompson (New Jersey: Barnes Noble Books, 1964), pp. 74-83.

57 George H. Odell, "Micro-wear in Perspective: A Sympathetic Response to Lawrence H. Keeley," *World Archaeology*, 7:2 (October, 1975), 226-240; George H. Odell, *Lithic Analysis* (New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2004). Lawrence H. Keeley and M. H. Newcomer, "Microwear Analysis of Experimental Flint Tools: a Test Case," *Journal of Archaeological Science*, 4 (1977), pp. 29-62; Lawrence H. Keeley, *Experimental Determination of Stone Tool Uses-A Microwear Analysis* (Chicago: University of Chicago Press, 1980).

58 George F. MacDonald and David Sanger, "Some Aspects of Microscope Analysis and Photomicrography of Lithic Artifacts," *American Antiquity*, 33 (April, 1968), pp. 237-240; 童恩正，〈石器的微痕研究〉，《史前研究》，期2 (1983年9月)，頁151-158；Roger Grace, "Limitations and Applications of Use-wear Analysis," *The Interpretative Possibilities of Microwear Studies*, Societas Archaeologica Upsaliensis, AUN 14, Uppsala Sweden, (January, 1990), pp. 9-14；沈辰、陳淳，〈微痕研究（低倍法）的探索與實踐——兼談小長梁遺址石製品的微痕觀察〉，《考古》，期7 (2001年7月)，頁62-73。

59 溫雅棣、鄧聰，〈考古學操作鏈與玉器研究〉，《玉器考古通訊》，期1 (2014年)，頁74-80。

60 王毅、鄧聰編，《金沙玉工1：金沙遺址出土玉石璋研究》(香港：香港中文大學中國考古藝術研究中心，2017)；吉平、鄧聰編，《哈民玉器研究》(北京：中華書局，2018)；鄧聰、鄭州市文物考古研究院編，《牙璋與國家起源：牙璋圖錄及論集》(北京：科學出版社，2018)。

1、掃描電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM)

玉器文物十分珍貴，一般不可隨意外借或進行有損取樣。研究者常將現代牙科醫學的超精細矽膠翻模用於玉器的無損微痕複製，結合SEM觀察普通顯微鏡無法看到的玉器加工及使用痕。質量上好的軟玉一般需要放大1,000倍以上才能清晰展現其顯微結構。[61] 精確複製了玉器或者加工工具表面痕跡的矽膠印模可被切割成平坦且大小合適的形狀，以便觀察，也可重複使用。不過值得注意的是，印模所留痕跡的「高」和「低」、「凹」和「凸」與玉器表面正好相反。矽膠是流動性材料，可複製玉器孔、槽中無法直接觀察的部位，十分細緻全面。SEM的解析度及放大倍數高 (10-10,000倍)、景深效果好且成像立體感強、測量精準，是目前研究玉器微痕的有效方法。[62]

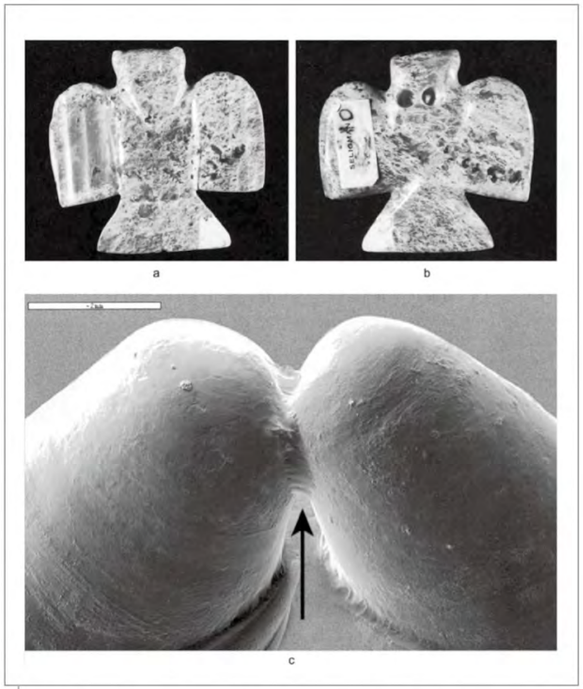
2004年起，Margaret Sax等學者將SEM應用於大英博物館館藏中國玉器（圖四）的工藝技術研究之中，將玉器加工工藝分為旋轉技術 (rotary techniques) 和非旋轉技術 (non-rotary techniques) 兩大類。其中，旋轉技術包括鑽孔和輪盤切割技術，非旋轉技術涵蓋鋸片切割、砂繩切割、減地以及陰刻技術。[63] 這為之後的玉器工藝技術研究帶來新方法，對於玉器器表遺留微痕的解讀而言，意義深遠。

2014年，二里頭報告書對玉器工藝微痕的SEM顯微觀察與測量技術進行了詳細著述：包括標本選取、製模材料選用、印模製取流程、SEM觀察、治玉工具判斷、實驗考古等。研究者以二里頭玉柄形器、鳥形器、龍松石龍形器和七孔刀等為例，對玉器的鑽孔、鋸片切割、減地、陰刻、打磨等工藝痕跡進行了微痕分析。值得注意的是，依據SEM分析結果，學者尚未在二里頭遺址出土玉器中見

61 葉曉紅、鄧聰，〈史前玉工轆轤軸承器的SEM分析——以環珠江口地區為例〉，收入鄧聰編，《澳門黑沙史前輪軸機械國際會議論文集》(澳門：民政總署文化康體部，2014)，頁44-67。

62 中國社會科學院考古研究所，〈玉器工藝微痕的SEM分析〉，《二里頭 (1999-2006) 》(北京：文物出版社，2014)，冊3，頁1398-1413；Joseph Goldstein et al., *Scanning Electron Microscope and X-Ray Microanalysis* (New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003), 3rd edition, pp. 1-20.

63 Margaret Sax et al., "The Identification of Carving Techniques on Chinese Jade," *Journal of Archaeological Science*, 31 (2004), pp. 1413-1428; Margaret Sax et al., "The Introduction of Rotary Incising Wheels for Working Jade in China," in Janet G. Douglas, Paul Jett, and John Winter ed., *Scientific Research on the Sculptural Arts of Asia: Proceedings of the Third Forbes Symposium at the Freer Gallery of Art* (London: Archetype Publications, 2007), pp.20-25. Margaret Sax, Carol Michaelson and Nigel D. Meeks, "A Methodology to Identify Techniques of Jade Carving in China: the Neolithic Period," in Thomas Lawton ed., *New Frontiers in Global Archaeology: Defining China's Ancient Traditions* (Beijing: AMS Foundation for the Arts, Science and Humanities, 2008), pp. 279-295. 中文翻譯依中國社會科學院考古研究所編，《二里頭 (1999-2006) 》，冊3，頁1398。



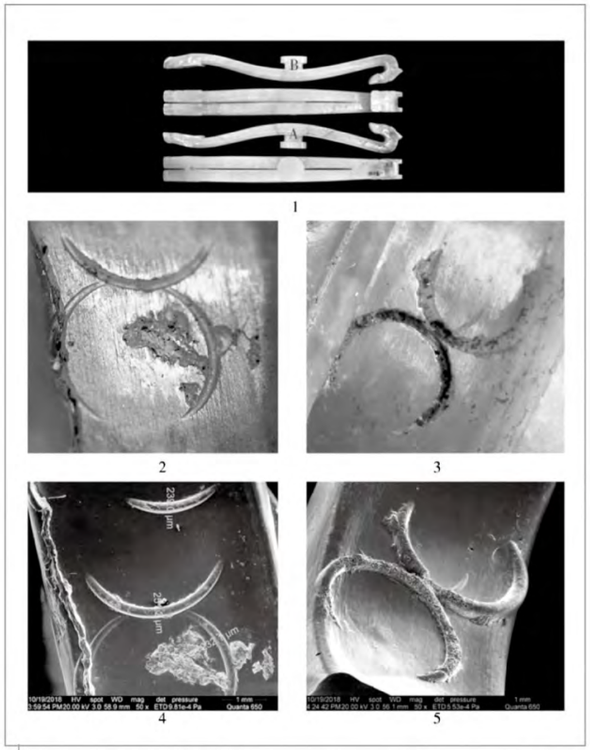
圖四　(a,b)大英博物館藏紅山文化玉鳥墜(1973.7-26.116)正面、背面，寬53、最厚處11毫米，(c)背面懸掛孔的SEM圖像。見Margaret Sax et al.,"The Identification of Carving Techniques on Chinese Jade," 圖4，頁1422。感謝The British Museum的Margaret Sax授權圖片轉載，以及Michela Bonardi協助圖片版權使用申請。© The Trustees of the British Museum

到使用砂繩切割及輪盤切割的實證。[64] 鄧聰等學者鑒於二里頭遺址的鑽孔技術已較為成熟，且龍山文化時期製陶業中的快速運轉陶輪裝置已頗發達，結合實驗考古結果，提出二里頭文化時期的鑽孔技術或已使用了輪盤及轆轤軸承裝置的觀點。[65] 此外，研究者還可結合實驗和SEM對比分析結果判斷解玉砂的粒度、粒級及使用方式。[66] 葉曉紅等學者對山東臨朐西朱封出土龍山時代晚期玉器進行了SEM微痕分析研究，並提出，鋸片切割工藝為二里頭文化大型片狀玉器的出現提供了設計靈感與技術支持。此外，獅子山楚王陵玉器的SEM分析結果表明，鑽

64 中國社會科學院考古研究所編，《二里頭1999-2006》，冊3，頁1398-1413。

65 中國社會科學院考古研究所編，《二里頭考古六十年》(北京：中國社會科學出版社，2019)，頁155-186。

66 葉曉紅，〈二里頭遺址出土玉器的工藝技術分析〉，收入中國社會科學院考古研究所編，《夏商都邑與文化》(北京：中國社會科學出版社，2014)，冊2，頁401-430。



圖五　獅子山雙龍首玉帶鉤 (獅：884)，1. 整體 2. 鈕柱側面A處管鑽痕 3. 鈕柱側面B處管鑽痕 4. 鈕柱側面A處管鑽痕SEM圖(50X) 5. 鈕柱側面B處管鑽痕SEM圖 (50X)。見葉曉紅等，〈鑽孔技術在西漢玉器工藝中的靈活應用——以獅子山楚王陵為例〉，圖3，頁89。感謝中國社會科學院考古研究所葉曉紅、山東大學文化遺產研究院鄧聰授權圖片轉載。

孔技術除了被常規地應用於玉璧等圓形對稱玉器的製作、實用孔和線鋸透雕前的穿孔，還被靈活應用於圓雕或浮雕玉器的透雕、減地、掏膛等工序。以獅子山出土玉帶鉤 (獅：884) 為例（圖五），玉帶鉤的毛坯製作工序完成後，鉤身與鉤鈕中間部位曾經數次管鑽直至去除多餘玉料，此後再打磨鉤鈕的鈕柱部分。[67] 由此可見，在現代科技的幫助下，古玉鑽孔技術的研究得到了拓展。

67 葉曉紅，〈西朱封龍山文化玉器加工技術研究〉，收入杜金鵬編，《臨朐西朱封龍山文化玉器研究》(北京：科學出版社，2015)，頁199-226頁；中國社會科學院考古研究所編，《二里頭1999-2006》，冊3，頁1402-1406；宗時珍、葉曉紅，〈略論徐州獅子山楚王墓出土玉器工藝〉，《故宮博物院院刊》，期3 (2019年3月)，頁59-68；葉曉紅等，〈鑽孔技術在西漢玉器工藝中的靈活應用——以獅子山楚王陵為例〉，《文物》，期9 (2020年9月)，頁86-92。

以上研究案例對於探索古人玉器加工工藝、加工工具的使用方法極具啟發性，研究者可據科學分析結果對研究對象的實際功能進行更精準的判斷與進一步研究。不同類型玉器文物共同呈現的技術特徵可用於研究該治玉工藝的擴散。且該技術在不同時期、不同地點、不同玉器的用途也可能不一樣，這就需要不同的微痕分析證據進行輔助研究。

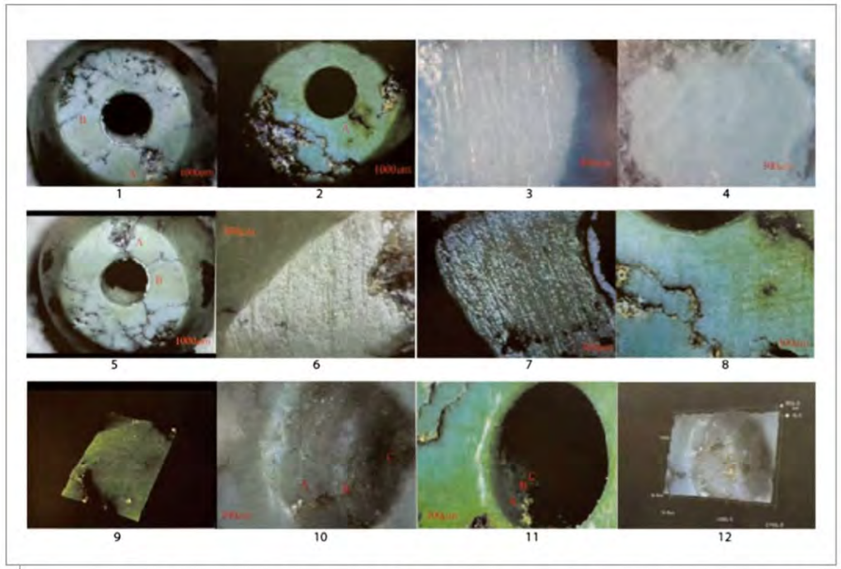
2、三維重建 (3D reconstruction) 技術

近年來，隨着數字圖像處理技術的發展，三維重建技術逐步被用於考古學研究、文化遺產保護、博物館展示（數字博物館）等方面。[68] 不過，儘管在考古學及藝術史的研究中，考古發掘遺址及出土文物等的三維重建理論與方法日臻完善，可為古玉研究提供更為豐富的研究信息，但該技術目前在玉器微痕分析中的應用仍不多見，值得進一步推廣。

楊益民等學者提出，數碼顯微鏡配合景深擴展 (extended depth of focus, EDF) 技術，或有希望在相當範圍內清晰展示整個視場。與此同時，利用三維圖像重建功能，還可對微痕進行更為立體全面的三維觀察和測量。2008年，楊氏使用帶有景深擴展技術的數碼顯微鏡，對西周中期倗國墓地出土的一件綠松石珠進行了微痕分析（圖六），發現其表面有明顯的打磨和鑽孔痕跡。[69] 另外，此研究還結合了綠松石打磨的現代模擬實驗，分析綠松石表面的打磨工具。這是實驗考古與三維觀察相結合的研究案例，在方法上對軟玉製作工藝的探索極具啟發性。

68 劉建國，〈三維重建在文物考古工作中的應用〉，《中國文化遺產》，期5 (2015年9月)，頁43-47；劉建國，〈可移動文物的多視角影像三維重建〉，《考古》，期12 (2016年12月)，頁97-103；周振宇、關瑩，〈多視角三維重建技術在石製品研究中的應用〉，《人類學學報》，卷36期1 (2017年2月)，頁38-48。

69 楊益民等，〈西周倗國墓地綠松石珠微痕的數碼顯微鏡分析〉，《文物保護與考古科學》，卷20期1 (2008年2月)，頁46-49。



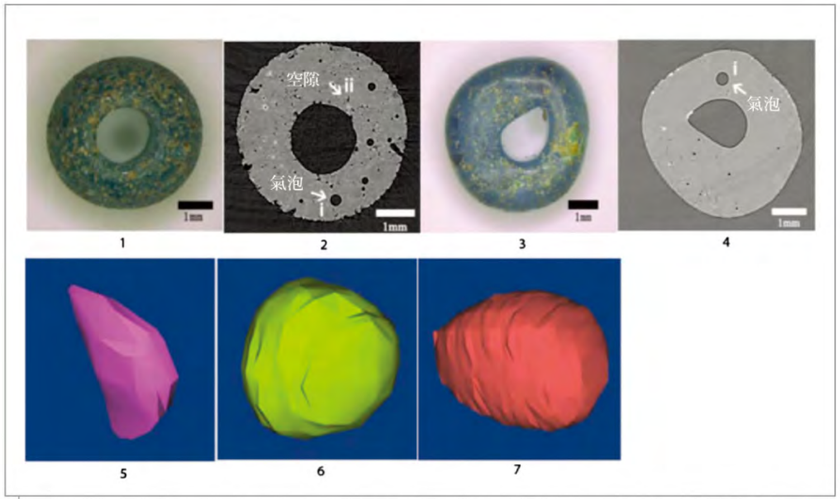
圖六　1. 石珠正面(30X)；2. 石珠反面(30X)；3. 綠松石手動打磨模擬；4. 綠松石機械打磨模擬；5. 另一角度之石珠正面(30X)；6. 石珠正面A區(100X)；7. 石珠正面B區(100X)；8. 石珠反面A區(100X)；9. 石珠反面A區縱橫交錯處三維成像(500X)；10. 石珠正面鑽孔景深擴展照(175X)；11. 石珠反面鑽孔景深擴展照(175X)；12. 石珠正面鑽孔三維成像(175X)。見楊益民等，《西周倗國墓地綠松石珠微痕的數碼顯微鏡分析》，圖60-71，彩版6-7。感謝中國科學院大學楊益民授權圖片轉載。

此外，顯微CT技術是無損3D成像技術，可清晰揭示所測器物的內部顯微結構，常被用於玻璃珠、釉砂、釉陶等的研究。[70] 2012年，谷舟等學者研究在倗國墓地出土的另一枚石珠，因其孔徑過小 (1.1 mm)，內壁微痕信息以數碼顯微鏡難以進行有效觀察，因而提出可結合高精度CT掃描重建三維圖像，以此研究石珠穿孔內部的加工痕跡，分析鑽孔工藝。[71] 2014年，谷舟等將CT技術應用於河南淅川馬川墓地出土料珠的研究中（圖七）。[72] 可見三維技術對於現如今玉器微痕分析的研究而言，前景極好，能為玉器微痕的三維立體化展示提供可能性和更豐富的研究資訊，促進玉石工藝技術研究的進一步開展。

70 Yang Yimin et al., "Nondestructive Analysis of Dragonfly Eye Beads from the Warring States Period, Excavated from a Chu Tomb at the Shenmingpu Site, Henan Province, China," *Microscope and Microanalysis*, 19:2 (2013), pp. 335-343; Martina Bertini, Rajmund Mokso and Eva M. Krupp, "Unwinding the Spiral: Discovering the Manufacturing Method of Iron Age Scottish Glass Beads," *Journal of Archaeological Science*, 43 (2014), pp. 256-266.

71 谷舟等，〈顯微CT在早期釉砂研究中的應用：以西周倗國出土釉砂珠為例〉，《核技術》，卷35期4 (2012年4月)，頁265-269。

72 谷舟等，〈顯微CT技術在古代料珠研究中的應用——以河南淅川縣馬川墓地出土料珠為例〉，《CT理論與應用研究》，期5 (2014年9月)，頁797-803。



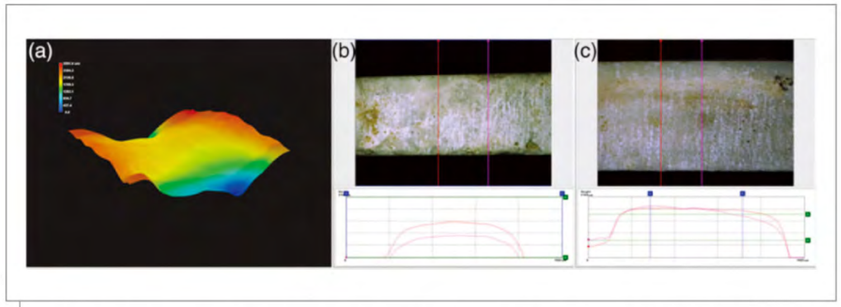
圖七　1. M118-100；2. M118-100的CT橫截面切片；3. M156-23；4. M156-23CT橫截面切片；5. M118-100點ii處孔隙的三維模型；6. M118-100點i處氣泡的三維模型；7. M156-23點i處氣泡的三維模型。谷舟等，〈顯微CT技術在古代料珠研究中的應用——以河南淅川縣馬川墓地出土料珠為例〉，圖1、3，頁799-800。感謝中國科學院大學楊益民授權圖片轉載。

2016年，岳超龍等學者運用數碼顯微鏡 (VHX-600ESO, Keyence, Japan)、配合景深擴展技術，對晚商殷墟 (公元前1300-前1046年) 出土的兩件玉柄形器 (AY1, AY2) 進行了三維圖像重建。他們結合拉曼光譜 (Lab Ram HR, JY Horiba, France)、掃描電子顯微鏡 (SEM, EVO25, Carl Zeiss, Germany) 等現代科技，為玉器的科學測量和資訊提取提供了更立體全面的資訊。這其中也包括模擬實驗所得微痕資訊，以探究其製作工藝及功能。結果表明，這兩件玉柄形器的製作可能分為四個步驟：粗坯切割，外緣和玉柄製作，以及單面拋光。研究者認為這表明玉柄形器可能用於祭禮，而非用作髮簪或柄形飾。[73]

此研究應用了數碼顯微鏡配合景深擴展 (EDF)、三維模型 (three-dimensional model)（圖八）等技術。擴展的焦深可用於呈現高精度的圖像並顯示測量物體表面的諸多資訊。而三維模型可以將不同焦點位置拍攝的圖像進行合成和疊加，集記錄、測量和展示功能於一體。[74] 研究者認為，不論是切割抑或是拋光，關鍵在

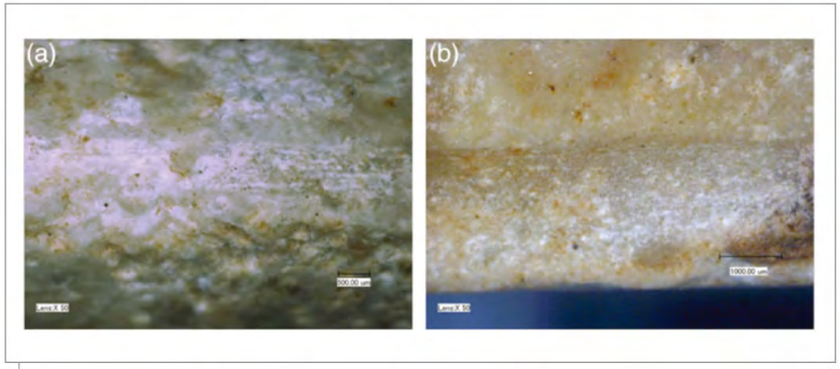
73 Yue Chaolong et al., "The Carving Technology of the Handle-shaped Artifacts from Yinxu (c. 1300-1046 BC) in China," *Archaeometry*, 59:3 (2017), pp. 566-573.

74 Wu Yan and Wang Changsui, "Extended Depth of Focus Image for Phytolith Analysis," *Journal of Archaeological Science*, 36 (2009), pp. 2253–2257; Gu Zhou et al., "Investigating the Tool Marks of Stone Reliefs from the Mausoleum of Cao Cao (AD155– AD220) in China," *Journal of Archaeological Science*, 43 (2014), pp. 31–37.

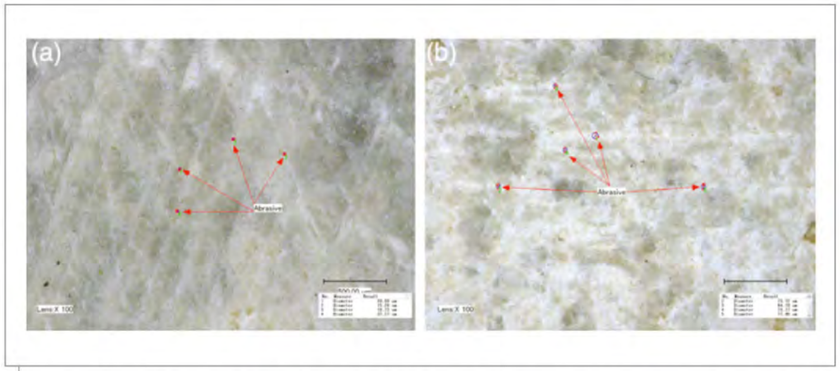


圖八　玉柄形器AY1和AY2的柄部顯微照片。(a) AY2三維模型圖。深色表示最高層次 (highest level)，淺色表示最深層次 (deepest level)，斑駁的顏色說明表面並不平坦。(b)上半部分是AY1其中一個凹槽的表面；下半部分是沿兩條線的橫截面輪廓，兩個橫截面輪廓彼此不重合進一步說明了表面並不平整。(c) AY2凹槽細節。見Yue Chaolong et al., "The Carving Technology of the Handle-shaped Artifacts from Yinxu (C. 1300-1046BC) in China," 圖5，頁571。感謝中國科學院大學朱劍、南方科技大學岳超龍授權圖片轉載。

於玉器表面的磨損與摩擦。玉石表面的紋路由解玉砂造成。結果顯示，治玉工具所留下加工痕跡的寬度約等於解玉砂顆粒的直徑（圖九、十），這為深入研究解玉砂的粒度與粒級、玉器製作工藝等提供了豐富信息。



圖九　AY1和AY2邊緣凹槽的顯微照片。二者痕跡尺寸的不同表明AY1與AY2上使用了不同粒度、粒級的解玉砂。見Yue Chaolong et al., "The Carving Technology of the Handle-shaped Artifacts from Yinxu (c. 1300-1046 BC) in China," 圖4，頁570。感謝中國科學院大學朱劍、南方科技大學岳超龍授權圖片轉載。



圖十　AY1兩側解玉砂痕跡，玉柄形器表面的紋路是解玉砂留下的。工具所留痕跡 (tool marks) 的寬度約等於解玉砂直徑。顆粒大小如圖所示。見Yue Chaolong et al., "The Carving Technology of the Handle-shaped Artifacts from Yinxu (c. 1300-1046 BC) in China," 圖6，圖571。感謝中國科學院大學朱劍、南方科技大學岳超龍授權圖片轉載。

受以上科技手段以及研究案例啟發，筆者認為，將高清攝影、掃描電子顯微鏡、三維重建等多種現代科技方法相結合，或可互為補充，最大程度幫助研究者獲取更為豐富的研究資訊，拓展新的研究視野和角度，從而達成更全面的玉器微痕分析，為研究玉器工藝技術、工藝傳播流轉、人類行為、與玉器製作相關的社會組織形式、生產關係、區域之間的文化技術交流等提供更豐富的微痕資料。

四、結 論

考古學在發展中不斷吸收不同學科領域的理論和研究方法，運用自然科學研究古玉的趨勢方興未艾。玉料獲取、製作工藝、使用痕跡等研究，都是目前玉器科技考古可以深入開展的方向，對探究古代人類行為、社會組織形式及生產生活狀況、精神文明發展以及區域文化互動等都意義重大。對不同玉礦的化學成分、微量元素、結構組織等特徵的科學測量促進了玉料質地及來源分析研究。各種無損分析為主的技術手段在內容和精度上不斷發展，為玉器的科技分析提供了重要契機。此外，在高清攝影、掃描電子顯微鏡等技術手段的幫助下，玉器表面及相關加工工具的製作痕與使用痕的微痕分析，也正隨着跨學科合作而蓬勃發展。而三維重建技術雖然目前仍然很少被應用於玉器微痕分析，但為玉器微痕的三維立體化展示提供了諸多研究層面的可能性，將來或可得到廣泛的應用。玉器研究在重視科技手段的同時，還應該重視理論導向與研究目標上的一致性，將科技手段與考古學、藝術史研究中的具體問題緊密結合。迄今為止，雖然玉器研究還有待新的考古發現，且具體的研究方法和技術手段還有待進步和完善，但隨着跨學科合作不斷推進，玉器研究的視野會不斷拓寬，新思路、新問題、新觀點將層出不窮，古玉研究的深度和廣度將更上一層樓。

致謝：在本文寫作過程中，本人導師李建深給予了很多寶貴意見，謹致謝忱。

玉器研究中的高科技與人文探索

李建深

高科技給了我們更多的「眼睛」，去看我們以前單純靠肉眼看不到的許多個「世界」。這句話適用於不同材質器物的研究，套用在玉器研究中，也相當適切。玉器研究的高科技眼睛，主要是讓我們能看得更細。不同程度的微觀世界，是用不同工具與鏡片發現出來的，能得出不同的觀察結果，自然也能提出不同的問題。地質學家關心玉器，是關心玉作為一種礦石而去問玉的形成、分佈等的地質學問題。而藝術史、考古、歷史學家關心玉器，自然是以人文角度出發，運用高科技帶來的「新眼睛」，探索新穎的歷史人文空間。廖雅婷的文章就是對這些新視角、新探索的回顧與總結。

與青銅器研究一樣，玉器研究者也喜歡問及玉料來源的問題。礦物學分析可以推論出一組玉器來自於某一礦區，這樣可以大概知道同一地區出土的玉器有哪幾組玉礦來源。廖在此文中指出，眾多研究河南安陽殷墟的學者辨識出殷墟的玉料來源很多樣化。殷墟作為公元前1500-前1050年左右東亞地區的一個大都會，其玉料來源多樣化不出意料之外。一個大都會必然會虹吸眾多周邊地區的資源，正如今日國際上的幾個大都會一樣。遠程交易所帶來的奇珍異品，必然成為大都會精英展示其財富、權勢、地位的物品。因此，殷墟大都會的精英必然會收集從古到今、名聞遐邇的玉器珍品。而他們是怎麼收集的，從哪裏收來的，則要依靠礦相分析告訴我們玉料是從哪裏來的，離殷墟有多遠；而對交通路線的推敲則揭示玉料傳播的過程。但是，正如青銅器的原料來源分析一樣，在對中國乃至整個亞洲的玉石礦成分分析建立一個統一標準的大數據庫前，玉料來源分析只能存在某種推測可能性。基本上，分析了某些玉器後，要把這個數據對比這個統一標準的大數據庫，然後得出這些玉器大概屬於哪個礦區，不屬於哪些礦區，這樣的比對才有意義。但是，亦有可能這些礦區已在歷史中消失了，再也找不到了，那比對就失去了意義。來源分析有其貢獻，但也有其限制。不過，廖文指出，這樣的比對、推論仍可協助解決某些以往想都不敢想的問題。

玉器製作工藝研究，於鄧聰文章中有大量回顧總結，廖文則指出一個重要研究方向：重視模擬實驗與古玉製作痕跡的比對。古玉的製作涉及轉瞬即逝的動作，這些動作是怎樣產生的？玉工用了哪些肌肉去實施？動作向哪個方向進行？這些轉瞬即逝的動作，不可能在影片發明前被清楚記錄下來。但是，這些動作在玉器上留下了其使用工具、器物的痕跡，亦即肌肉運動、器具運動留下的痕跡。研究留下的痕跡，加上推敲，可以推論玉工實施了甚麼動作，簡單點來說，就是他們做了甚麼。鄧文指出的眾多觀察痕跡，如管鑽、研磨等加工痕跡；廖文指出的加熱加工，都是觀察玉器上留下的製作痕跡而作出的推斷。再加上模擬實驗、民族學考察，透過觀察今人在玉器上加工的痕跡和實施的動作，然後比對哪一種痕跡、哪一種動作與古玉和古代玉工的更接近，即可得出大概的推論。當然這不是絕對、百分百可靠的證據，但可以作為可靠性極高的參考。而這些參考，透過現代高清攝影、微觀技術、三維建模，可以呈現在讀者眼前，讓讀者也參與其推論過程。這些方法在以往也是不敢想像的。

當然，人文學者要駕馭科技，而不是被科技牽着鼻子走。礦相分析等一系列工具可以為我們分辨出哪些是真玉、哪些是假玉，或者哪些是普通但又美觀的石頭。但是，古人分得清楚嗎？我們要牢記，真假玉的分法只是現代人的分法，古人是沒有這種意識的。較有可能的情況是，古人喜歡諸多美觀的石頭，好「石之美者」，把它們一併收集、加工、裝飾，變為自己的收藏。從某處石礦中發現的石頭，剛好全是現代人界定的所謂「軟玉」，則從這處石/玉礦中採集出來加工的石頭全是軟玉，而這批加工而成的石頭變為某地區精英的珍貴玉器收藏品。又或是他們已知道哪種石頭較硬，能用以刻劃其它石頭；哪種石頭較軟；哪種又介乎二者中間。如此一來，硬石頭與軟石頭之分又可把某些玉石分出來。我們要從當時人的思維與動作出發，這才是人文探索。

餘論——歷史研究需要科技，科技研發需要歷史

李建深

本期特輯的系列文章是關於中國藝術史、考古學科的反思，是技術與社會的歷史研究，是對如何應用現代高新科技於人文社會領域的回顧與展望。在這些領域中，我們更要強調歷史研究、特別是歷史上的技術研究，需要現代科技協助，而科技發展也需要歷史研究的指引。二者是相輔相成的關係。

在現今科技發展日新月異的大潮流下，人文、歷史的研究在運用高新科技時，很容易被高新科技牽着鼻子走，也很容易被人詬病為人文歷史與高新科技的盲目結合，或是盲目追求、炫耀新技術而忽略人文歷史的本質。本期特輯中每位作者的研究課題都大量應用了現代科技，是否屬於盲目追求應用高新科技則留待讀者自行判斷。不過，對技術與社會的歷史研究，在未來只會與更多的高新科技結合，這是不可阻擋的潮流。新潮流下自然會有新的質疑，譬如批評古代技術研究者只專注於技術，卻不結合當時社會狀況去解釋其時的技術研發。如要說服批評者，我們只能不斷去發現、累積、掌握更多的技術基礎研究資料，在未來更多更好地總括、整理、糅合成能挑戰人文社會當時得令的信念之研究理論，這樣才能讓這些領域更好地發展下去。現今則只能韜光養晦，把握少有的機會、課題、資金去累積基礎資料。

現時非常流行的「數位人文」(digital humanities，或譯作數碼人文/數字人文) 研究則是值得古代技術與社會研究者、藝術史家、考古學家深思反省的方向。數位人文研究能整合大量的資料，總結出某時代某地區某團體人群的歷史規律，兼之能將人文研究結合現時研究界投入最多資源的數字本位研究——即電腦科學、統計學等學科，成為現今炙手可熱的研究方向。但是，對數位人文研究方向能結合人文學科與電腦大數據統計表達欣賞的同時，我們也可思考如下問題，即人文研究可否被數字化？應否被數字化？人文研究若與電腦大數據統計結合，會否變為統計學的應用研究？統計要得出規律，首要考慮的是樣本是否足夠與合適。歷史研究中的統計應用，最難的就是搜集足夠與合適的樣本了。在古代技術研究中，大規模樣本本來就缺乏，又因出土、收藏器物機構的不同而難以集中，所以很難在古代技術研究中運用統計。如果沒有統一標準的話，則更是毫無可能。所以潛偉的文章提倡要建構具統一標準的資料庫，要搜集具統一標準的樣本分析，是未來的大工程、大項目，要真正做成還需要克服很多困難。

本期特輯對於由統計而得出人文規律等大問題沒有給予足夠討論，原因之一在於大多數作者主要關注的是人類創造力的研究。我們探討得更多的是金屬器物（主要是青銅器）、玉器的設計與製作，以及這些產品設計、製作技藝的變化，這些都是對人類創造力的研究，不可能倚靠統計得出規律。我們更強調的是觀察，即應用高新科技帶來的新穎觀察手段，觀察我們從未見到的世界，不論是微觀世界，還是宏觀世界。觀察到我們未見過、未接觸過的世界，自然會促使我們去問更多問題。對於人類創造力的關注，也決定了我們問的問題自然也跟器物在這些世界中的呈現，以及如何能更好地理解器物設計者、製作者的思考過程息息相關。新科技帶來的觀察手段，對於本期特輯的作者來說，不是去尋求統計的大模型，而是去探索創造力的呈現。這跟現時流行的數位人文研究有諸多不同。

由於我們關心器物設計者、製作者的思考過程，我們要從器物的蛛絲馬跡中探尋他們的頭腦、身體留下的痕跡，探尋他們與空間、物質互動的痕跡，我們的觀察手段當然是越多越好。就像一個偵探到了謀殺案現場，怎樣從案發現場發現蛛絲馬跡，探尋兇手作案時的思考、動作過程，觀察手段當然也是越多越好。我們這些渴求新穎觀察手段的研究者，大可以主動、大膽地向科技研發者提出新科技的研發方向。以往的碳十四 (C14)、X射線等技術，是先有技術、然後才應用在歷史研究中。今後能否由歷史研究者提供指引和路徑，從而啟發科技人員完成研發工作？這種由人文歷史先導的科技研發，具有革命性和前瞻性，並能提高歷史研究在科技發展中的地位。譬如要尋找形狀、大小、紋飾相同的「全同」青銅器，在茫茫物海中怎麼探尋？若是未來的人工智能可在以圖片搜尋相似圖片的技術上，發展出以三維物件搜尋相似三維物件的技術，那必將有助全同青銅器物的尋找，有助重構人類大規模生產青銅器的歷史，有助人類重新思考大規模工業生產對人類歷史的重要性，而這種搜尋技術也可以是現今高新技術的研究方向。再譬如，3D掃描還未能普及化，還不能省時省力地掃描玉器上的微細痕跡；又如3D展示，現時在互聯網上展示青銅器、玉器的三維內外結構，也未有很好的解決方案。這些都是新的觀察世界的方法，是古代技術研究者渴望的觀察世界的新方法。

更多的新穎觀察方向是由豐富的想像力引領而來的。人類有了新的想像，於是設計出新的問題，由此發明新的觀察手段，探尋未知的世界，未知的世界又啟發人類產生更多新的想像，循環不斷，周而復始。歷史、人文研究需要科技的協助，而科技研發也需要歷史、人文的協助。

至於人類的想像力是否真能天馬行空，無窮無盡，那就留待人文學者繼續去發掘了。

《開物：科技與文化》徵稿啟事

《開物：科技與文化》由香港理工大學中國文化學系主辦，旨在探討自古至今科技與歷史、文化及社會之緊密聯繫，並促進跨學科交流。本刊重點關注科學與技術研究對社會和文化的影響、科學倫理、醫療人文、數字人文、環境史、歷史地理、以及考古等交叉學科與新興前沿領域，熱忱期待學界同仁不吝賜稿。具體要求如下：

一　文稿總體要求：可讀性與學術性兼備、主題明確、論述清晰、資料豐富準確、體例規範、文字明白曉暢、忌晦澀艱深之學術術語堆砌。

二　請遵從學術規範、文責自負。來稿需為尚未發表之手稿、請勿一稿多投。

三　來稿文字為繁體中文，篇幅宜在一萬字以內。稿件圖片需作者確定獲得授權發表許可。來稿前，請認真檢查字體、避免簡繁混合，並對語言進行潤色，確保文字精煉暢達。

四　文稿引文注釋凡例，請參照《開物：科技與文化》撰稿格式要求。

五　有關作者信息（姓名、工作單位、通信郵箱）請統一附於文末。

六　來稿經本刊錄用後，本刊擁有對稿件的專用出版權和網絡傳播權。如有媒體轉載需求，需獲得本刊同意並註明由本刊首發。

香港理工大學中國文化學系
中國歷史與文化研究中心 編

PolyU Press
香港理工大學出版社

ISBN 978-962-367-873-5