

中国古代玉器科技研究述评

岳超龙¹ 朱 剑²

(1. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所,北京 100044; 2. 中国科学院大学考古学与人类学系,北京 100049)

摘 要 我国玉文化源远流长。随着科技的进步,运用多种技术手段,对考古发掘出土的古代玉器进行材质分析、加工工艺、沁蚀机理等方面研究的重要性不言而喻。本文较为系统地梳理、总结近30年来玉器的科技工作,深入探讨了古代玉器加工技术的起源与发展脉络、玉料来源、环境对玉质的影响等问题,评述了该阶段发表的相关成果。

关键词 古代玉器 玉料来源 加工工艺 受沁机理

中图分类号 N092:K854

文献标识码 A **文章编号** 1673-1441(2017)01-0111-12

1 研究背景

考古发现证明,我国先民开发利用玉器的历史至少在8000年以上。玉器的种类繁多、内涵隽永,发展脉络清晰。相对其它遗存而言,中国玉文化不仅历史悠久,且绵延不断。“如果用一种文化来代表中华文化,那就是玉文化”^①,季羨林先生的这句话十分贴切地体现了我国玉文化的重要性。

科技考古在中国已有几十年的发展历程,各种分析手段、技术方法不断被应用于考古领域并逐步完善,这为阐释考古资料提供了新的途径。玉器虽属重要的出土文物,但其残次品甚少,又忌讳有损分析,故而相对青铜、陶瓷等文物而言,对玉器的科技分析、仪器测试颇受限制,严重影响了玉器科技研究的进展,这较之玉器研究的重要性来说显得极不协调。

近年来,随着技术的进步,传统设备在小型化、便携性等方面有显著提升,一些以往只能在实验室完成的分析,如拉曼光谱分析、X射线衍射图谱分析、红外图谱分析等,经过仪器小型化后,可以方便、直接地在库房或工地进行现场分析。同时,各种无损技术推陈出

收稿日期: 2016-12-07; 修回日期: 2017-01-21

作者简介: 岳超龙,1988年生,河南封丘人,理学硕士,中国科学院大学博士研究生,研究方向为商周考古、玉器考古;朱剑(通讯作者),江苏常州人,理学博士,中国科学院大学副教授,研究方向为科技考古、X射线技术。基金项目: 中国自然科学基金(编号:U1432243)。

① 刘国祥. 红山文化与西辽河流域文明起源的模式与特征[A]. 刘国祥,邓聪. 玉根国脉(一): 2011“岫岩玉与中国玉文化学术研讨会”文集[C]. 北京: 科学出版社, 2011. 153—161.

新,文物无损分析的内容和精度等方面也获得了长足的进展。仪器的小型化和无损技术的革新与进步,为玉器的科技分析提供了重要契机。借助技术进步,在未来的时间里,科技人员有望在相关领域获取较之以往更为全面和清晰的认识,深入推动古玉研究的进展。

一般说来,玉器的传统研究分为材、质、工、纹等多个方面,而玉器的科技分析,则聚焦于产地、工艺(即制作或加工方法)和受沁机理等三个方面。

何以为玉?目前学术界关于玉的定义已有较为一致的认识。玉的定义一般有广义与狭义之分,广义玉即“石之美者”,狭义玉是从自然科学角度根据其矿物组成进行界定^[1]。我国出土玉器材质纷杂,不同时期使用的状况有所不同,因此更适合以广义概念进行界定区分。提及“玉”,人们第一时间想到的就是“和田玉”,和田玉作为“国玉”地位的形成经过了和地方玉料竞争以及与社会主流文化契合的复杂经历。和田玉是较为宽泛、笼统的称呼,就学界而言,称为以透闪石矿物为主的“闪石玉”更为专业、明确。出土玉器中闪石质玉所占比例反映了经济发展与文化交流的强弱。玉器始于新石器时代的石器,其功能经由从生产工具到饰品,并演变为礼器、权利象征,不同时期玉料来源表现出不同的特征。新石器时代的玉料多为“就地取材”^[2,3],种类庞杂,来源呈多元化。至历史时期,闪石质玉逐渐成为玉器的主流,但地方玉种仍有发展,这一时期玉料来源与政治权利、文化政策、军事力量等息息相关。需要指出的是,出土玉器与近现代制作的玉器并不对应,这是因为生产力水平的差异、地矿分布及开采地点的变化、再次埋藏的成器产生新的次生变化以及不同时期对玉器审美及要求的不同,因此不能简单的将现今玉器与玉材的知识直接运用到考古样品上去探讨古人对玉的认识与使用。

其次,玉器制作技术来源于石器,是石器制作发展到一定程度的产物。由于缺乏文献记录,玉器加工技术多参照石质生产工具的加工进行研究,在选料、解料、定型、钻孔等方面。玉器的加工与石器制作不尽相同,尤其是钻孔、打磨抛光等,玉器加工技术更为成熟,这与砣具的出现密不可分。可以认为,砣具的出现是玉器制作工艺历史上的一次革命^[4]。新的技术手段全面揭示了原本隐藏、不易观察的钻孔内壁、镂空、底层纹饰等信息。而模拟实验、显微观察、三维图像立体重建等科学技术手段的发展与成熟为研究玉器的制作工艺,提供了更多的信息和资料。

受沁机制亦是玉器研究中至关重要的内容。玉器一般只经过简单的形体加工,对原料的物理性能改变不多,但在考古实践中亦有例外,如玉礼器在祭祀过程中经过燔烧、瘞埋等处理后物理性能发生了变化。就目前现状而言,对玉器开展的保护工作相对较少,且主要集中于玉器受沁机理的探讨。受沁是玉器在长时间埋藏过程中受温度、湿度、土壤成分等综合环境因素作用的产物,其形成机理比较复杂。玉器受沁机理是了解玉器变化的重要途径,可为古玉保护与鉴定提供依据。宗教、祭祀等文化行为,亦可能对玉产生作用,也会对玉器形态造成影响。因此,如何对此进行区分和辨别,虽有研究但仍知之甚少,是一个亟待深入探讨的课题。

近30年是中国科技考古全面发展的时期,科技考古研究在不同领域都取得了重大进展。许多高等院校、科研机构和文博单位纷纷购买仪器设备,设立专业研究机构。科技考古人才的持续培养,分析方法和各种技术手段的广泛应用,使得这一时期的科技考古得以全面开展,取得了极为丰硕的成果。因此本文拟从玉器研究内容出发,尝试综述评论已有

的研究进展和成果,借以总结若干经验与问题,以供相关学界参考。鉴于学术水平所限,难免挂一漏万,甚至出现谬误,还请方家不吝赐教。

2 玉器材质及其来源研究

玉器科技考古材料学方面的研究由来已久。早在 20 世纪 80 年代,中国科学技术大学王昌燧即与安徽省文物考古研究所合作,利用 X 射线衍射(XRD)、透射电镜、偏光显微镜和原子吸收光谱等手段,对凌家滩出土的玉器进行测试分析,初步判断了其工艺和材质,并提出当时可能已经使用旋转的机械工具^[5];在此基础上,蔡文静等采用多种手段进一步对其材质及加工工艺进行了探讨,指出凌家滩出土玉器的质地复杂,以透闪石玉,即软玉为主,尚处于玉、石不分的阶段。在此之后,相关研究络绎见诸报刊。朱勤文、张敬国^[6]通过将凌家滩出土鸡骨白古玉器碎片与新疆和田软玉、辽宁岫岩软玉进行全岩化学成分对比,确认样品为软玉,与和田软玉中白玉、青白玉相当,同时推测玉料的形成属镁质大理岩型,为探讨凌家滩出土玉器的玉料来源提供了依据;孙先如^[7]等人对凌家滩遗址闪石类玉器的矿物成分、结构进行红外光谱及 XRD 分析,确认样品主要为透闪石玉,这一工作为寻找新石器时代古人玉石采集开发地点提供了重要参考。20 世纪 90 年代后期,闻广、荆志淳^[8,9]等人亦采用地质学上的岩矿物理、化学分析手段对玉器残片进行分析,取得了一系列的成果。然而,鉴于这些分析多为破损分析,故难以将其广泛应用于出土玉器的研究之中。

2000 年以后,新的无损分析方法,特别是新兴大科学装置的成功应用,有力地推动了出土玉器测试工作的深入开展。相对而言,质子激发 X 荧光发射分析法(PIXE)在我国玉器研究中应用较多。PIXE 是利用质子束流、无损定量分析样品元素组分的方法^[10]。该方法灵敏度高,许多元素的分析灵敏度可达几个 $\mu\text{g/g}$,早已成熟应用于材料、地质等领域,近来也被顺理成章地用于探索玉器的原料产地。早在 1999 年,承焕生^[11]等较为全面地检测了不同时期的多种玉料样品后,认为 PIXE 方法能够有效和准确地鉴别玉料种类,又具有无损的优点,其应用前景不容低估。之后,朱海信^[12]等学者对上海青浦福泉山遗址良渚文化玉器进行了专门的 PIXE 分析,发现这批玉器材质为软玉、岫玉混杂,岫玉来源应非小梅岭玉矿,而应有其它来源,并对受沁机理做了阐释。张朱武^[13]进一步探讨了 PIXE 工作的适应环境和工作条件。

随着工作的不断开展,PIXE 方法已经成为玉器分析中常用的方法。然而,人们逐渐认识到,仅依赖成分分析显然远远不够,还需要结合结构分析,如利用 X 射线衍射(XRD)、拉曼光谱分析(Raman)、红外光谱分析(IR)等技术,进行综合分析测试,方能更好地解释玉器材质和来源等问题。

结构分析技术中,拉曼光谱分析近年来发展迅速。拉曼光谱分析是基于拉曼散射光谱的峰位、峰强、线型、带宽等分析样品分子结构并鉴定物质组成的方法^[14],多波长激光拉曼光谱仪针对不同吸收带的样品可减少荧光背景影响,其峰值强且信噪比更佳^[15]。随着技术的进步,便携式激光拉曼(LRS)技术业已成熟,并获广泛应用,同时其在文物无损测试技术上面,也得到不断改进和完善。王荣^[16]等曾利用 Raman、XRD、PIXE 分析,得出

785 nm 激发光源的拉曼光谱可以有效克服荧光背景,认为进一步结合 632.8 nm 激发光源,可以较好地无损鉴别古代玉器的材质,并将该方法成功地应用于安徽潜山薛家岗遗址出土玉器的鉴定上^[17]。赵虹霞、干福熹^[15]等学者采用复旦大学分析测试中心的一台法国 Dilor 公司生产的 LabRam-1B 型共焦显微 Raman 光谱仪对浙江余杭良渚遗址、河南安阳殷墟遗址的出土玉器和新疆现代玉石样品做了对比分析,并通过对国内外已有的 5 种常见玉石标准谱,成功地对古代样品进行了无损鉴定,系统阐明了激光拉曼光谱技术在古玉器结构测试和材质鉴定中的可行性。

在此之后,这种联合应用多种无损的成分和结构分析手段,综合分析,进而开展对古代玉器分析研究的方法逐渐发展成熟,并获得学界广泛认可。典型的工作有 2010 年,干福熹^[18]等学者采用 PIXE、XRD、激光拉曼光谱(LBS)等多种技术,针对良渚文化遗址群贵族墓葬出土的大量精美玉器,进行了全面而系统的分析工作。

相应的,这一时期其他相关玉器研究也大量开展,例如,董俊卿^[19]、干福熹^[20]、陈聚兴^[21]、吴沫^[22]、张治国^[23]、闻广^[8, 24-28]、曹妙聪^[29]、朱勤文^[30, 31]等人运用 XRD、Raman、PIXE、扫描电子显微镜-X 射线能谱仪(SEM-EDX)、能量色散 X 荧光能谱仪(EDXRF)、傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)等多种手段分别对殷墟新出土的商代玉器、广东博罗横岭山商周时期玉器、陕西长安沣西西周玉器、江西靖安东周玉器、甘肃崇信于家湾周代玉器、湖北随州曾侯乙墓出土玉器残片、江苏高邮神居山二号汉墓出土玉器、广西南越王墓出土汉代玉器进行了分析测试,并从原料产地、加工工艺、受沁机理、文化交流等多方面进行了探讨,取得了丰硕的成果。值得一提的是,吴沫对横岭山商周时期玉器采用石英质样品的包裹体分析方法,为玉料来源研究提供了新的思路。

如前所述,中国玉器发展延绵数千年,一些重要玉矿至今仍在开采。对现代玉器样品的分析检测能够得到不同产地的系统数据,建立标准数据库,从而为追踪古代玉器的玉料来源提供参考依据。研究者从不同角度出发,分别对现代常见玉矿玉料的成矿原理^[32]、结构成分^[33-39]、分析方法^[40-47]等进行了系统研究,对和田玉、独山玉、岫岩玉以及历史上和中国存在交流的俄罗斯软玉、缅甸软玉等进行分析,给出了这些矿物的组成和明确的谱学特征。通过对比出土玉器与现代玉矿样品的结构成分,对玉料的产地研究也取得了一定收获。20 世纪 90 年代,随着江苏溧阳小梅岭透闪石的发现,考古和地质学界多数人认为梅岭玉应当是良渚遗址出土透闪石玉器的来源^[25, 48-51]。而干福熹^[18]等人则根据特征元素锶(Sr)的示踪作用指出,良渚透闪石玉器并非来自小梅岭玉矿,考虑到良渚文化的分布地域与古人的活动范围,似应源自天目山余脉。红山文化玉器来自本地(岫岩)的观点在学界确凿无疑。一般认识,红山文化玉器主要为岫玉与部分闪石玉,岫玉来自岫岩本地,而闪石玉可能来自新疆、中原地区。新的材质分析工作^[40]表明红山文化玉器基本为闪石质玉,与岫岩河磨玉的材质、成分极为近似,故而,红山文化的玉器确为本地原料,但非岫玉(蛇纹石玉),而为河磨玉(闪石质玉),即所谓的岫岩老玉。这一工作为出土玉器的玉料正源提供了关键信息。

随着多种技术的应用以及分析案例的不断增加,对玉器科技分析的宏观认识也得到加强。赵虹霞^[52]等人在总结、综述 PIXE、XRD、LRS 技术的发展与现状的基础上,对透闪石-阳起石型、蛇纹石型、长石型、青金石和绿松石等五种常见的玉石进行了系统分析,着

重讨论了河南安阳殷墟与浙江余杭良渚遗址群出土玉器的质地与来源,阐述了科技分析在玉器溯源工作中的作用和方向。干福熹^[1]回顾并总结了我国出土玉器研究工作的进展,介绍了古代玉器的定义与分类标准,探讨了中国古玉器质地和玉料来源,指出了中国古代玉器科技分析和研究中存在的问题,这对今后的玉器研究有着重要的指导意义。

3 玉器制作工艺研究

古代玉器的加工制作必然会在器物表面残留加工的痕迹。虽经过打磨、抛光等后期处理,但高倍显微镜等仪器仍能揭示其蛛丝马迹,从而反推出古代玉器的制作工艺。人们知道,微痕分析最初应用于石器分析^[53],之后方拓展至玉器领域。一般说来,玉器制作工艺主要包括玉料的切割、钻孔与砣具的产生和运用等。目前,对玉器制作工艺的探讨主要采用显微观察和模拟实验两种方法。近年发展迅速的三维重建技术为玉器工艺的复原分析提供了新的有效途径^[54,55]。超精细硅胶翻膜的扫描电镜观察使原初普通显微镜无法看到的玉器加工痕迹清晰显现,而硅胶膜切割的便利以及重复使用的优点,可最大程度保护文物安全并提取玉器工艺信息。综合现有技术发展及研究的现状,超精细硅胶膜观察方法是目前探讨玉器微痕及加工工艺等问题最为行之有效的方法。

玉器微痕显微观察的设备主要有光学显微镜和扫描电镜^[56]。牟永抗^[57]最早对线切割面进行了总结;邓聪^[58-60]对东亚地区古代玉器的线切割、管钻技术进行了梳理,对线切割、砣切割、砣具、管钻、轴承系统等问题进行了系统的阐述。早期研究认为,殷墟时,砣具已然成熟^[61]。至于砣具究竟起源于何时,学术界讨论激烈,而凌家滩遗址则是史前时期有无砣具的争论焦点^[62-67]。杨建芳^[68]对比分析了一系列存在争议的玉器微痕后,明确指出,砣具在中国出现的时间不早于春秋时期。无论如何,这些讨论表明显微观察在探讨古代玉器制作工艺上具有不可替代的作用,同时也为进一步探讨玉器制作的相关问题提供了借鉴。干福熹^[18]等人分析了良渚遗址群出土玉器后认为,当时玉器的加工工具应为专门选择的燧石、叶腊石质火成岩和硅线石等;陈启贤^[69]针对微痕观察分析方法在古玉研究中的功用开展了相关模拟实验并进行了总结。此外,马萧林^[70]、王荣^[71]、张敏^[72]、万俐^[73]、王强^[74]、王方^[75]、吕曼^[76]等分别对河南灵宝西坡遗址、安徽潜山薛家岗遗址、江苏句容城头山遗址、良渚文化诸遗址、海岱地区新石器时代遗址、四川成都金沙遗址、江苏苏州真山大墓出土的玉器进行了加工工艺的研究,为不同时期、不同地域的玉器加工特征提供了参考标准。

模拟实验是对古代治玉工艺的有益探索。通过不同条件的设定,对切割、钻孔痕迹进行观察,对比出土玉器上的微痕能够得到较为准确的工艺信息。邓聪^[77,78]对古代玉器制作工艺的模拟实验进行了总结,并从凌家滩遗址出土的、存在制作工艺争论的水晶耳珥入手,采用麻绳、水晶、海砂等材料成功制作出相似的耳珥,对比加工痕迹认为当时并未出现砣具。席永杰^[79]等人利用麻绳、河砂对岫岩软玉进行实验,得到了切割玉器的时间、效率等信息,并指出所需注意的问题等,他还利用弓式手动钻具得到了与红山文化玉器相似的钻孔,为了解红山文化玉器的制作提供了参考。张敬国^[80]等人对和田玉料采用麻绳、建筑用砂进行了针对性实验;邓聪^[81]等人采用叶腊石进行了切割实验,对微痕进行了观察

对比。郑州大学靳松安^[82]等学者使用麻绳、皮绳、竹片等对南阳独山玉进行了切割模拟。这些工作,使得我们对不同玉料的加工有了进一步认识。通过模拟实验,对于史前时期不同地域不同质地玉器的切割与钻孔有了较为直观可靠的了解,并为下一步微痕分析工作的展开提供了基础。

目前,利用扫描电镜,观察超精细硅胶覆膜的方法,是探知古玉加工工艺的最为可行的新思路和新方法。超精细硅胶膜材料来自现代牙科医学,利用其流动性及凝固定型的特征,广泛应用于牙齿形态观察、病患部位塑形翻模等领域。对玉器考古样品而言,其流动性、非粘附性、易塑性、非渗透性及高精度表面反馈等特点,能够直接应用于玉器表面微痕取样工作。这一方法国外学者有系统而广泛的应用^[83-87]。中国出土玉器研究方面,中国社会科学院考古研究所^[88]对二里头出土玉器进行了研究尝试并取得了显著效果,对于玉器表面工具及纹饰加工顺序都有令人耳目一新的认识。叶晓红^[89]等人利用这一方法对河南桐柏月河一号春秋墓出土的玉器进行分析,初步判断春秋晚期玉器阴刻工艺已成熟使用了添加解玉砂的旋转砣具技术。此外,岳超龙^[90]等人利用这一方法,对殷墟出土的两件柄形器进行观察,成功复原了白云石质柄形器的加工流程,反映出殷墟时期玉石制作已经专业化、系统化。同时,利用微痕分析,将加工制作与功能使用联系起来,综合判断和了解玉器的丧葬礼仪等功能。相关研究工作的进展,为玉器原始功能探索提供了新的研究思路。

4 玉器受沁机理的分析和研究

玉石成器,其后无论在地上或地下,总是会受到自然环境的影响。这种脱离原始状态后发生的变化,一般统称为次生变化。而玉器界常把埋藏环境造成的变化称为受沁或风化。无疑,对受沁相关内容的研究,特别对了解玉器在埋藏环境中的变化以及对出土玉器的保护等方面,皆具有重要的意义。

次生变化或受沁,从现象而言主要分为颜色、透明度和光泽度变化等。其中,颜色变化的特征最为明显,因而常用于表征受沁现象,如白化、黑化、黄化、绿化、黑化、褐化等。黑化、黄化、绿化、黑化、褐化等主要与(过渡)金属离子致色相关,而特别普遍的玉器白化现象则主要涉及玉质疏松,因而通常最受关注^[91],例如,良渚和凌家滩出土的鸡骨白古玉。早在20世纪90年代,闻广已明确指出,包括良渚玉器在内的出土白化玉器是由于玉质结构疏松所致^[92]。此后,很多学者都对良渚玉器的白化现象进行了分析,王荣曾对2007年以前的工作进行过系统的梳理和总结^[93]。2011年,干福熹^[18]团队在对大量良渚玉器进行无损分析的基础上,通过对玉器表面受沁部位与未受沁部位的化学成分分析,认为透闪石型玉器受淋滤作用影响,表面氧化镁(MgO)和氧化钙(CaO)流失,二氧化硅(SiO₂)含量升高, SiO₂在玉石表面胶结而阻止了MgO和CaO的进一步流失,在玉器表面形成玻璃光泽的“包浆”;蛇纹石型玉器则由于MgO易流失而导致玉器明显受沁。对凌家滩白化玉器的研究稍晚,2001年,台湾学者方建能^[94]和林泗滨^[95]等首先开展了一些研究工作,指出凌家滩玉器的玉质几乎都有次生变化,很多玉器的原初玉质极为均匀细致,故而其白化现象也极为均匀,然而,若玉质不均匀,则不同的风化差异将导致不同的沉积层

纹或斑晶。研究表明,白化后,孔隙度加大,比重和硬度皆有所降低。2002年,朱勤文^[96]等人利用偏光显微镜、矿物折射率、FTIR、XRD及LRS等手段对凌家滩出土玉器碎片进行分析,确定其材质均为软玉,鸡骨白部分的物理性能均已发生改变,但未能合理解释鸡骨白的成因。同年,冯敏^[97]等开始对凌家滩遗址出土玉器的受沁状况进行了相关研究。通过综合考虑古代玉器不同的埋藏环境和风化影响等条件,发现凌家滩鸡骨白玉器存在“外实内松”的现象,指出其表面具粘手感、手触之后留下指纹印迹的现象与高岭石在玉器表面的富集有关。之后,冯敏、王荣^[93]等又以“古玉器受沁机理”为题对我国南方地区、不同材质的玉器的受沁情况进行了较为系统的研究。他们分别用粉末状与块状玉料开展模拟实验,在此基础上,对良渚文化透闪石玉器和凌家滩遗址蛇纹石玉器的受沁过程进行了跟踪探讨,发现“外实内松”白化玉器的受沁过程先后经历风化淋滤和渗透胶结两个阶段。这一研究成果对解释玉器埋藏过程中内部结构和颜色的变化动因,对保护出土的鸡骨白类玉器以及玉器辨伪等都有重要的参考价值。

其它地区的相关研究亦有进展,如吴沫^[22]等人分析广东横岭山商周时期白色玉器后认为,在酸性土壤的长期腐蚀下,透闪石质玉器的结构变得疏松,致使透闪石玉石的晶体孔隙度增大,玉石对光的漫反射作用增强,呈现白色和不透明的外观。张治国^[23]对甘肃于家湾周墓出土玉器的受沁部位与未受沁部位进行化学成分和扫描电镜对比分析,认为玉器在埋藏土壤的长期作用下,随着所含硅、镁元素大量流失,其结构逐渐疏松,形成白色和不透明的外观。观察发现,其受沁处的微观形貌呈岛屿状,内部结构已遭受一定程度的破坏。研究显示,上述不同地域白化玉器的受沁机制十分相近。

与此同时,一些新的认识不断形成,如新技术的应用为研究出土玉器受沁机理提供了更为有效的工具等。曾楠^[47]将光学相干层析(OCT)方法应用于玉石检测。该方法表明OCT图像特征可直观显示古代玉器钙化沁色部分不同的光学特性,可以预言,OCT成像技术在辨别古代玉器钙化沁色特征上具有一定的应用前景。丁思聪^[98]等人在评述古代玉器受沁机理研究工作的基础上,提出了“次生变化”的新概念;借助考古学研究中的功能分类、“微环境”复原和文化研究等理论,阐释古玉的受沁机制,向我们展示了一个全新的视角。王荣^[99]等的研究指出,严重白化的玉器已属于脆弱性文物,针对这类受沁古玉器在制定展陈设施或保存措施时,更应规范其保存环境。为此,他们进行了相对湿度的模拟实验,在实验的时间尺度范围内,结构致密的透闪石玉器和蛇纹石玉器能适应各种湿度条件,而中高湿度的环境条件有利于结构相对疏松的透闪石玉器、蛇纹石玉器以及蛇纹石化的方解石的保存。他特别强调,不适宜的湿度环境将对玉器文物产生永久性的破坏,它是导致许多博物馆内玉器产生各种病症的主要原因,应该引起足够的重视。王昌燧^[100]在对古代玉器受沁机制开展相关研究工作的基础上,提出古代玉器受沁蚀变存在南北方差异,同一遗址内,蛇纹石玉与透闪石玉的受沁程度也存在差异等问题,对这些问题的深入探讨,应有着重要的现实意义。

5 结语

通过对近年出土玉器科技分析工作的回顾,可以看出利用科技手段对中国出土玉器

的研究集中在玉料产地、制作工艺和沁色机理等多个方面,测试手段从少到多,使用仪器渐趋多元、精密,分析方法日臻成熟,业已取得丰硕的成果,但也存在着诸多问题。

目前对我国古代的玉料种类、结构、化学成分及分布基本达成了共识,但对玉料产地的研究却存在着较大的分歧,各地透闪石的主成分是一致的^[35],拉曼光谱尚难确认玉器亚种,在中国古代玉矿分布广泛,玉料种类繁多,要想确认玉器原料的产地确实存在一定困难。干福熹等学者对微量元素分析并示踪的方法虽然取得了比较显著的成果,有一定的应用前景,但同时也面临着微量元素数据库建设不足等问题。因此,只有建立全面而系统的中国现代玉矿与不同地域出土玉器的微量元素数据库,这一方法的优越性才能实现。此外,由于早期科技分析工作需要样品有损分析而使获得样品受到很大的限制,随着无损分析技术日益成熟,数据库的建立已经变得并不遥远。

玉器原料及其来源、制作工艺与受沁机理的探讨,对认识玉器在古代社会发展中所起作用,对出土玉器的保护和传世玉器的辨伪等都具有重要意义。但对于历史时期出土玉器的研究还存在明显不足,这将了解中国玉文化的发展与传承带来一定的缺憾。

在考古材料丰富、分析技术成熟、社会需求不断提高的新形势下,传统考古工作者需要与科技考古领域的专家通力合作,认真分析玉器研究领域的症结所在,积极拓宽科研思路,尝试多种分析测试手段的交叉应用,将中国玉文化科学研究推上一个新台阶。

致谢 感谢中国科学院大学王昌燧教授、宋国定教授对本文撰写、修改给予的指导与帮助;感谢中国社会科学院考古研究所唐际根研究员对于行文思路的建议;感谢复旦大学文物与博物馆学系王荣副教授对玉器风化研究提供的建议与帮助。

参 考 文 献

- 1 干福熹. 中国古代玉器和玉石科技考古研究的几点看法[J]. 文物保护与考古科学, 2008 (20): 17—26.
- 2 闻广. 苏南新石器时代的玉器考古地质学研究[J]. 文物, 1986 (10): 52—49.
- 3 栾秉璩. 史前古玉玉质及玉料来源之探讨[A]. 中国玉文化玉学论丛三编(下)[C]. 北京: 紫禁城出版社, 2005. 620—629.
- 4 杨伯达. 中国玉器全集[C]. 石家庄: 河北美术出版社, 2005. 35—80.
- 5 安徽省文物考古研究所, 中国科学技术大学开放研究实验室. 凌家滩墓葬玉器测试研究[J]. 文物, 1989 (4): 10—13.
- 6 朱勤文, 张敬国. 安徽凌家滩出土古玉器软玉的化学成分特征[J]. 宝石和宝石学杂志, 2002 (2): 18—21.
- 7 孙先如, 张敬国, 汪焕荣等. 安徽含山县凌家滩遗址新石器时代闪石类玉器研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, (21): 124—128.
- 8 闻广, 荆志淳. 沔西西周玉器地质考古学研究——中国古玉地质考古学研究之三[J]. 考古学报, 1993 (2): 251—280.
- 9 闻广, 荆志淳. 中国古玉地质考古学研究[A]. 徐湖平. 东方文明之光——良渚文化发现60周年纪念文集[C]. 海口: 海南国际新闻出版中, 1996. 427—431.
- 10 任焯刚, 承焕生, 陈建新. 质子X荧光分析和质子显微镜[M]. 北京: 原子能出版社, 1982. 85—170.
- 11 承焕生, 陈刚, 朱海信等. 用质子激发X荧光分析技术鉴别玉器种类[J]. 核技术, 1999 (4): 233—236.
- 12 朱海信, 承焕生, 杨福家等. 福泉山良渚文化玉器的PIXE分析[J]. 核技术, 2001 (2): 149—153.
- 13 张朱武, 承焕生, 干福熹. 玉石及中国古代玉器的PIXE分析[J]. 核技术, 2009 (11): 833—838.

- 14 毛振伟,朱剑. 文物光谱分析[M]. 南京: 江苏科学技术出版社,2010. 10—235.
- 15 赵虹霞,干福熹. 拉曼光谱技术在中国古玉、古玉器鉴定和研究中的应用[J]. 光谱学与光谱分析,2009,(11): 2989—2993.
- 16 王荣,朔知,承焕生. 安徽史前孙家城和皇家堰等遗址出土玉器的无损科技研究[J]. 复旦学报(自然科学版),2011,(2): 121—130.
- 17 王荣,冯敏,吴卫红等. 拉曼光谱在薛家岗古玉测试分析中的应用[J]. 光谱学与光谱分析,2005,(9): 1422—1425.
- 18 干福熹,曹锦炎,承焕生等. 浙江余杭良渚遗址群出土玉器的无损分析研究[J]. 中国科学: 技术科学,2011,(1): 1—15.
- 19 董俊卿,干福熹,承焕生等. 河南境内出土早期玉器初步研究[J]. 华夏考古,2011,(3): 20—30.
- 20 干福熹,承焕生,孔德铭等. 河南安阳市新出土殷墟玉器的无损分析检测的研究[J]. 文物保护与考古科学,2008,(4): 26—35.
- 21 陈聚兴. 新干商代大墓玉器鉴定[A]. 江苏省博物馆等. 新干商代大墓[M]. 北京: 文物出版社,1997. 301—307.
- 22 吴沫,丘志力,吴海贵. 横岭山商周时期玉器的质地、白化现象和玉料产地研究[J]. 文物保护与考古科学,2008,(3): 19—29.
- 23 张治国,马清林. 甘肃崇信于家湾周墓出土玉器研究[J]. 考古与文物,2009,(2): 97—102.
- 24 闻广,荆志纯. 中国古玉地质考古研究——西汉南越王墓玉器[J]. 考古,1991,(11): 1032—1038.
- 25 闻广,荆志纯. 福泉山与崧泽玉器地质考古研究——中国古玉地质考古研究之二[J]. 考古,1993,(7): 627—644.
- 26 闻广,荆志纯. 高邮神居山二号汉墓玉器地质考古研究——中国古玉地质考古研究之四[J]. 文物,1994,(5): 83—94.
- 27 闻广. 全世界最早的真玉器[J]. 故宫文物月刊,1993,(11): 114—121.
- 28 闻广. 用玉的等级制度——古玉丛谈(九)[J]. 故宫文物月刊,1994,(12): 88—97.
- 29 曹妙聪,朱勤文. 靖安古玉器的环境扫描电子显微镜表征[J]. 宝石和宝石学杂志,2009,(1): 25—30.
- 30 朱勤文,曹妙聪,樊昌生等. 江西靖安东周墓出土玉器的玉质特征研究[J]. 宝石和宝石学杂志,2011,(2): 20—26.
- 31 朱勤文,杨若晨,韩壮丽等. 曾侯乙墓出土古玉器碎片玉质成分研究[J]. 江汉考古,2009,(1): 106—111.
- 32 张朱武,干福熹,承焕生. 不同成矿机理和地质环境下形成的软玉的化学成分特征[J]. 矿物学报,2010,(3): 367—372.
- 33 汪涛. 辽宁岫岩蛇纹石玉研究[D]. 北京大学硕士学位论文,2001.
- 34 刘晶,崔文元. 中国三个产地的软玉(透闪石玉)研究[J]. 宝石和宝石学杂志,2002,(2): 25—29.
- 35 伏修峰,干福熹,马波等. 几种不同产地软玉的岩相机构和无损成分分析[J]. 岩石学报,2007,(5): 1197—1202.
- 36 王时麒,段体玉,闫欣. 岫岩软玉的初步研究[J]. 珠宝科技,1998,(2): 46—49.
- 37 赵虹霞,干福熹. 不同产地软玉的拉曼光谱分析及在古玉器无损研究中的应用[J]. 光散射学报,2009,(4): 345—354.
- 38 张晓辉,吴瑞华,王乐燕. 俄罗斯贝加尔湖地区软玉的岩石学特征研究[J]. 宝石和宝石学杂志,2001,(1): 12—17.
- 39 谢意红,张珠福. 加州软玉和缅甸软玉特征及矿物成分的研究[J]. 岩矿测试,2004,(1): 46.
- 40 王立本,刘亚玲. 和田玉、玛纳斯碧玉和岫岩老玉(透闪石玉)的X射线粉晶衍射特征[J]. 岩石矿物学杂志,2002,(21): 62—67.
- 41 杨主恩,王士元. 和田玉的电镜显微形貌和能谱特征[J]. 岩石矿物学杂志,2002,(21): 57—61.
- 42 钟晓玲,王士元,谭立文等. 新疆和田玉的谱学特征及其鉴别标志的研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版),2003,(3): 285—289.

- 43 徐安武,杨小勇,孙在涇等. 河南南阳独山玉的 PIXE 研究[J]. 核技术,1999 (9): 533—538.
- 44 贾秀琴,韩松,王昌燧. 中子活化分析对河南南阳独山玉的研究[J]. 核技术,2002 (3): 201—205.
- 45 刘志勇,干福熹,承焕生等. 河南南阳独山玉的岩相结构和无损分析[J]. 硅酸盐学报,2008 (9): 1330—1334.
- 46 刘志勇,干福熹,承焕生等. 蛇纹石质古玉器的无损分析研究[J]. 自然科学史研究,2008 (3): 370—377.
- 47 曾楠,何永红,马辉. 用于玉石结构分析的光学相干层析技术[J]. 光学精密工程,2008 (7): 1335—1342.
- 48 钟华邦. 江苏溧阳南部梅岭玉的发现[J]. 江苏地质,1995 (3): 176—178.
- 49 崔文元,吴伟娟,刘岩. 江苏溧阳透闪石玉的研究[J]. 岩石矿物学杂志,2002 (21): 91—98.
- 50 钟华邦,张洪石. 江苏梅岭玉的基本特征[J]. 岩石矿物学杂志,2002 (21): 105—109.
- 51 邓聪. 东亚玉器[M]. 香港: 香港中文大学中国考古艺术研究中心,1998.
- 52 赵虹霞,张朱武,干福熹. 用于中国古代玉器质地鉴别和溯源中的无损分析方法[J]. 广西民族大学学报(自然科学版),2009 (4): 42—53.
- 53 王幼平. 石器研究: 旧石器时代考古方法初探[M]. 北京: 北京大学出版社,2006.
- 54 刘建国. 三维重建在文物考古工作中的应用[J]. 中国文化遗产,2015 (5).
- 55 谷舟,杨益民,齐雪义等. 显微 CT 技术在古代料珠研究中的应用——以河南淅川县马川墓地出土料珠为例[J]. CT 理论与应用研究,2014 (5): 797—803.
- 56 邓聪,刘国祥,叶晓红. 玉器微痕分析[A]. 刘国祥. 名家论玉(一)[C]. 北京: 科学出版社,2009. 274—300.
- 57 牟永抗. 良渚文化玉器三题[J]. 文物,1989 (5): 65—70.
- 58 邓聪. 东亚玉器线切割研究现状[A]. 浙江省文物考古研究所. 纪念良渚遗址发现七十周年学术研讨会文集[C]. 北京: 科学出版社,2006. 335—339.
- 59 邓聪. 东亚史前玉器管钻技术试释[A]. 钱宪和,方建能. 史前琢玉工艺技术[C]. 台北: 台湾博物馆,2003. 145—156.
- 60 高锦麟,邓聪. 从角动量守恒原则谈史前滚动轴承发现的意义[A]. 邓聪. 澳门黑沙史前轮轴机械国际会议论文集[C]. 澳门: 澳门特别行政区民政总署文化康体部,2014. 100—109.
- 61 北京市玉器厂技术研究组. 对商代琢玉工艺的一些初步看法[J]. 考古,1976 (4): 229—233.
- 62 杨伯达. 试论先玉器工艺及玉器工艺之区别特点[J]. 考古,2004 (10): 62—68.
- 63 张广文. 凌家滩出土新石器时代玉器上的“V”“U”形截面加工痕与片状厚砣具的使用[A]. 钱宪和,方建能. 史前琢玉工艺技术[C]. 台北: 台湾博物馆,2003. 61—68.
- 64 牟永抗. 关于史前琢玉工艺考古学研究的一些看法[A]. 钱宪和,方建能. 史前琢玉工艺技术[C]. 台北: 台湾博物馆,2003. 19—40.
- 65 黄宣佩. 良渚玉器上砣研痕之研究[A]. 钱宪和,方建能. 史前琢玉工艺技术[C]. 台北: 台湾博物馆,2003. 67—86.
- 66 张敬国,杨竹英,陈启贤. 凌家滩玉器微痕迹的显微观察与研究——中国砣的发现[J]. 东南文化,2002 (5): 16—27.
- 67 杨伯达. 关于琢玉工具的再探讨[J]. 南阳师范学院学报(社会科学版),2007 (2): 72—76.
- 68 杨建芳. 关于线切割、砣切割和砣刻——兼论始用砣具的年代[J]. 文物,2009 (7): 53—67.
- 69 陈启贤. 琢碾微痕探索在古玉研究中的功用[J]. 文物,2009 (7): 68—73.
- 70 马萧林,李新伟,杨海青. 灵宝西坡仰韶文化墓地出土玉器初步研究[J]. 中原文物,2006 (2): 69—73.
- 71 王荣,朔知,王昌燧. 薛家岗玉器加工工艺的微痕迹初探[J]. 文物保护与考古科学,2009 (4): 48—58.
- 72 张敏. 句容城头山遗址出土的史前玉器及相关问题的探讨[J]. 东南文化,2001 (6): 42—49.
- 73 万俐. 也谈良渚文化玉器的雕琢工艺及发白现象[J]. 东南文化,2002 (6): 54—59.
- 74 王强. 海岱地区新石器时代玉料来源及琢玉工艺初探[J]. 华夏考古,2008 (2): 76—83.
- 75 王方. 金沙玉器制作工艺的初步观察[J]. 中原文物,2006 (6): 77—83.
- 76 吕曼. 从真山出土玉器谈吴国的琢玉工艺[J]. 东南文化,2000 (5): 11—13.
- 77 邓聪,吕红亮,陈玮. 以柔制刚: 砂绳截玉考[J]. 故宫文物月刊,2005 (265): 70—82.
- 78 邓聪. 线切割 VS. 砣切割——凌家滩水晶耳珥凹槽的制作实验[J]. 故宫学术季刊,2005 (1): 35—51.

- 79 席永杰,张国强. 红山文化玉器线切割、钻孔技术实验报告[J]. 北方文物,2009 (1): 110—112.
- 80 张敬国,张敏,陈启贤. 线性工具开料之初步实验——玉器雕琢工艺显微探索之一[J]. 东南文化,2003 (4): 46—50.
- 81 邓聪,吕红亮,陈玮. 以今鉴古: 玉石切割实验考古[J]. 故宫文物月刊,2005 (264): 76—89.
- 82 靳松安. 河南省南水北调工程丹江口库区新石器时代遗址出土石器研究[Z]. 河南省南水北调中线工程文物保护项目科研课题,资料尚未公布.
- 83 Margaret S ,Nigel D M ,Carol M etc. The identification of carving techniques on Chinese jade[J]. *Journal of Archaeological Science* ,2004 (31): 1413—1428.
- 84 Margaret S ,Ji K Z. The technology of jades excavated at the Western Zhou ,Jin Marquis cemetery ,Tianma—Qucun ,Beizhao ,Shanxi province: recognition of tools and techniques[J]. *Journal of Archaeological Science* ,2013 (40): 1067—1079.
- 85 Jonathan M K. Bead Replicas An Alternative to Antique Bead Collecting[J]. *Ornament* ,1996 ,20(12): 68—71.
- 86 Jonathan M K. Stone Beads and Pendant Making Techniques[A]. James W L. *In A Bead Timeline. Vol. 1 Prehistory to 1200 CE*[M]. The Bead Museum: Washington ,DC. 2003 ,14—19.
- 87 Jonathan M K. Eye Beads from the Indus Tradition: Technology ,Style and Chronology[J]. *Journal of Asian Civilizations* ,2013 ,26(2): 36—42.
- 88 中国社会科学院考古研究所. 二里头(1999—2006) [M]. 北京: 文物出版社,2014. 1374—1427.
- 89 叶晓红,刘新,蒋宏杰等. 河南省南阳市桐柏县月河一号春秋墓出土玉器阴刻技术的微痕分析[J]. 南方文物,2015 (4): 112—119.
- 90 Yue C L ,Song G D ,Zhu J etc. The Carving Technology of the Handle—shaped Artefacts from Yinxu(C. 1300—1046 BC) in China[J]. *Archaeometry* ,doi: 10. 1111/arc. 12276(2016) .
- 91 Wang R. Progress Review of the Scientific Study of Chinese Ancient Jade[J]. *Archaeometry* ,2011 ,53(4): 674—692.
- 92 闻广. 古玉丛谈(六)——古玉的受沁[J]. 故宫文物月刊,1994 (11): 92—101.
- 93 王荣. 古玉器受沁机理初探[D]. 中国科学技术大学博士学位论文,2007.
- 94 方建能,钱宪和,谭立平等. 从凌家滩古玉之玉质、次生变化及工艺制作技术看凌家滩的玉器文化与科学技术[A]. 台湾大学地质科学系. 海峡两岸古玉学会议论文集[C]. 台北: 国立台湾大学出版委员会,2001. 231—244.
- 95 林泗滨,陈正宏. 凌家滩古玉和良渚风格古玉之矿物学研究[A]. 台湾大学地质科学系. 海峡两岸古玉学会议论文集[C]. 台北: 国立台湾大学出版委员会,2001. 511—524.
- 96 朱勤文,张敬国,吴沫. 凌家滩出土鸡骨白古玉器玉质研究[J]. 岩石矿物学杂志,2002 (21): 129—133.
- 97 冯敏,王昌燧,王荣等. 凌家滩古玉受沁过程分析[J]. 文物保护与考古科学,2005 (1): 22—26.
- 98 丁思聪,蒋成龙. 古玉次生变化研究述评[J]. 中原文物,2012 (6): 36—44.
- 99 Gong M T ,Wang R ,Chen H S. Preliminary study on the impact of relative humidity on the conservation of jade[J]. *Study in Conservation* ,2013 ,58(2): 88—94.
- 100 王昌燧. 科技考古进展[M]. 北京: 科学出版社,2013.

Progress Review of the Recently Scientific Study on Chinese Ancient Jade

YUE Chaolong¹ ZHU Jian²

(1. *Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China*

2. *Department of Scientific History and Archaeometry, School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract Ancient jade serves as an important symbol of Chinese traditional culture. Jade culture has a long history in China. The study of it is a critical part of Chinese tradition. The interdisciplinary study of cultural heritage has become a scholarly key point in archaeological jade. The past 30 years have witnessed great progress in research on ancient jade, with the involvement of basic theory and the technological application of many science subjects. This paper summarizes the research status, methodology and prospects in the research on the origin of material, carving technology of jade and secondary change of Chinese ancient jade.

Keywords Chinese ancient jade, the origin of materials, carving technology of jade, secondary change