

良渚玉器中的地质语言

李平^{1,2}, 廖宗廷^{2,3}, 周征宇^{1,2}

(1. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 上海宝石及材料工艺工程技术研究中心, 上海 200092;

3. 同济大学人文学院, 上海 200092)

摘要: 良渚文化因出土了大量精美的玉器而闻名世界, 但玉料的来源存在着较大的争议, 这是探讨良渚文化是否为本土文明的关键线索之一。除了被赋予的社会属性以外, 玉首先是特定地质作用下形成的矿产资源, 这决定了地球科学是古玉研究中极为重要的一环。以地球科学的思想和方法为指导, 结合良渚玉器的矿物特征、岩石结构、化学成分等剖析了其携带的地质信息, 探讨了良渚玉料和小梅岭软玉的亲缘性, 支持了良渚文化的本土起源。

关键词: 良渚玉器; 地质信息; 小梅岭软玉; 本土起源

中图分类号: P581; P585

文献标志码: A

Geological Language in Liangzhu Jades

LI Ping^{1,2}, LIAO Zongting^{2,3}, ZHOU Zhengyu^{1,2}

(1. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Engineering and Technology Research Center for Gem and Materials Technics, Shanghai 200092, China; 3. School of Humanities, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Liangzhu Culture is world-famous for a large number of exquisite nephrite artifacts, but the provenance of nephrite materials has been a considerable controversy over the past several decades, which is one of the keys to judging whether Liangzhu Culture is a native civilization. In addition to social attributes, nephrite, as a mineral resource, is a result of special geological processes at first, indicating that Earth science is an important part of researches of ancient jades. In combination with mineral characteristics, textures, and chemical compositions of Liangzhu jades, this paper deciphers the geological information from the ideologies and methods of Earth science and discusses an affinity between Xiaomeiling nephrite and nephrites used in Liangzhu Culture, supporting the native origin of

Liangzhu Culture.

Key words: Liangzhu jades; geological information; Xiaomeiling nephrite; native origin

良渚文化是长江下游地区新石器时代晚期最重要的文化遗存之一, 出土了大量种类丰富、图案优美、工艺精湛的玉器^[1], 为探究中华文明的起源提供了珍贵的线索, 而制作如此之多玉器的原料从何而来一直困扰着广大学者。一些学者从玉器的颜色、矿物组成、红外及拉曼光谱等角度讨论了小梅岭软玉与良渚玉器用料之间的相似性^[2-4]; 也有学者因二者 Sr 含量上的较大差异推断小梅岭软玉不是良渚玉器用料的来源^[5-6]; 另有学者认为良渚玉器的用料可能来自于辽东半岛的岫岩^[7]或者新疆和阗^[8]。目前, 由于缺乏对良渚玉器中所含地质语言的系统破译, 导致对其玉料来源的认识存在一定争议。

本文结合前人的考古和地质成果多角度地对良渚玉器携带的地质信息进行了破译, 并针对性地与上述潜在的玉料来源进行了比对, 以讨论良渚先民用玉的地质源头。

1 良渚玉器中的地质信息

长期以来地质学家主要使用破坏性的测试方法对软玉的矿物组成、结构构造、化学成分等进行研究; 而良渚玉器是非常珍贵的文物, 其稀少性、独特性、不可再生性等诸多特性决定了考古学家倾向使用无损测试的方法对其进行探究^[5-6, 9]。虽然无损测试有利于文物的保护, 但获得的信息主要来自玉器发生风化的表层, 缺乏对玉器内部信息的挖掘, 如何

收稿日期: 2022-06-08

基金项目: 上海市科学技术委员会科技计划(12DZ2251100)

第一作者: 李平(1992—), 男, 博士生, 主要研究方向为岩石学、矿物学、矿床学。E-mail: liping3010@163.com

通信作者: 廖宗廷(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为系统宝石学、中国玉文化。

E-mail: liaozt@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

构建现有考古数据和地质数据的联系将有助于约束良渚先民用玉的来源。另外,良渚玉器经历了数千年的埋藏,其携带的地质信息也随着玉料的蚀变或多或少发生了改变,需要对获得的玉器信息进行适当的反演才能用于与地质数据的比对,特别要重视对风化十分敏感的化学成分的变化。

1.1 矿物组成

软玉是一种主要由透闪石或阳起石及少量其他矿物构成的变质岩,其矿物共生组合不是任意的,主要取决于形成软玉时的物质来源和相关地质作用的物理化学条件^[10]。对玉器矿物共生组合的探究有助于约束玉料的成因,进一步圈定玉料的大致来源,这类类似于利用陪葬的玉器组合确定墓主人的身份、等级和地位^[11]。大部分良渚玉器主要由透闪石构成^[2, 5-6, 12],含有透辉石、直闪石、阳起石、磁铁矿、褐铁矿、赤铁矿等副矿物^[2, 12-13]。其中透闪石可分为两类,一类是灰白色或灰绿色细粒透闪石构成的基质;另一类为白色或浅绿色的透闪石变斑晶,晶面洁净少蚀变^[2]。透辉石多为粗粒的白色或暗色单晶体,在基质中离散分布^[2, 13];阳起石一般为绿色或暗绿色纤维状的集合体;磁铁矿、褐铁矿与赤铁矿呈细小的斑点与阳起石共生^[2, 12]。

从地理位置上看,小梅岭玉矿不仅与各个良渚文化遗址近在咫尺(图1),而且是长江下游地区唯一一处具有一定储量的高质量玉矿,这些得天独厚的条件使海拔仅有132 m的小梅岭玉矿成为良渚玉器用料最重要的潜在来源。小梅岭软玉主要由微晶透闪石组成的基质和透闪石变斑晶组成的集合体构成,副矿物包括少量的透辉石、阳起石、磁铁矿、赤铁矿、金云母、萤石、磷灰石、锆石等^[14]。就矿物组成而言,前人在良渚玉器中鉴定出的矿物与小梅岭软玉的基本一致。而辽东半岛的岫岩软玉形成于区域变质作用,矿区内常见蛇纹石化、滑石化、绿泥石化等低温蚀变现象^[15-16],玉中未见透辉石,因而矿物学方面的证据尚不支持良渚玉器的用料来自于辽宁岫岩。此外,部分良渚玉器主要由阳起石构成^[2-3],这一点较目前产出的小梅岭软玉有所不同,可能说明了良渚先民用玉的多源性。

1.2 岩石结构

变质岩的结构具有非常重要的指示意义,可以反映变质岩的形成过程、期次、变质程度等多方面的信息,也是变质岩分类命名的重要依据^[17-18]。良渚玉器的结构十分独特,许多玉器白化的基质中分布着大量的暗色较自形的变斑晶(图2a、2b)和带状的集

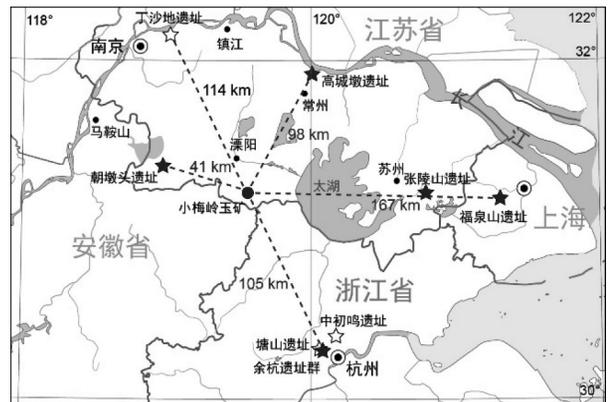


图1 小梅岭玉矿及部分良渚遗址的分布

Fig.1 Distribution map of Xiaomeiling nephrite and some Liangzhu sites

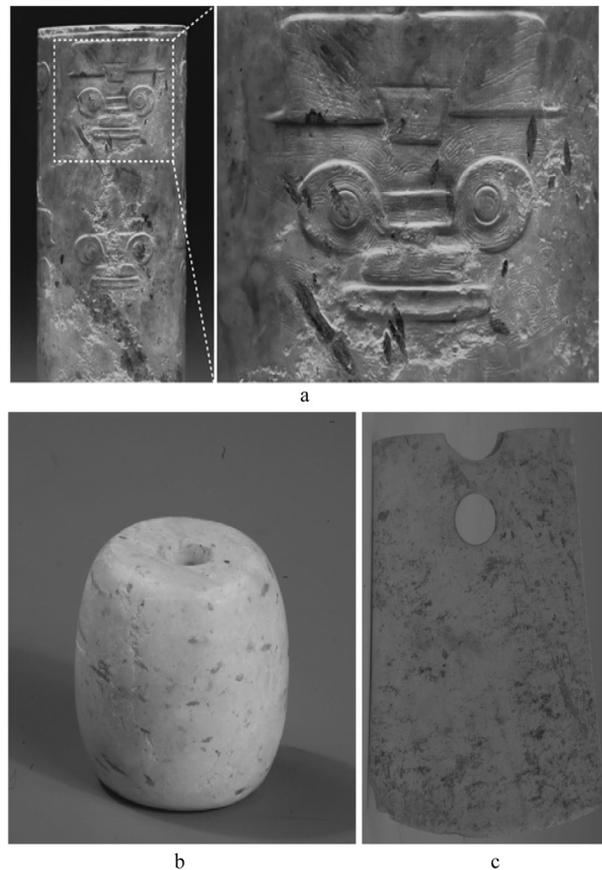


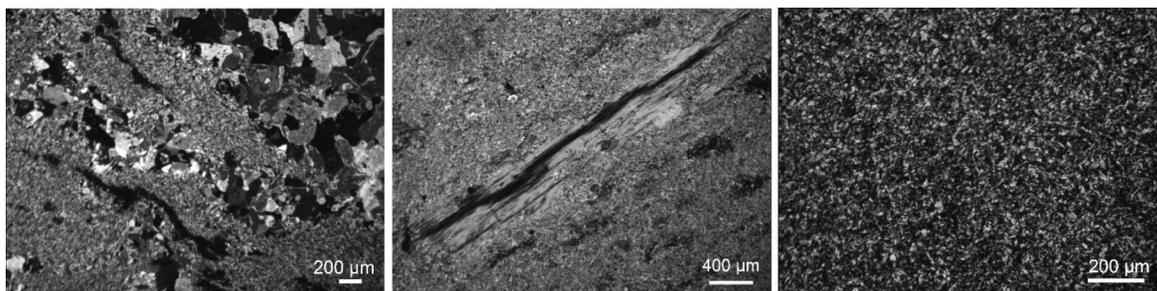
图2 良渚玉器中较自形的变斑晶和变斑晶集合体带
Fig.2 Some idioblastic porphyroblasts and porphyroblast aggregate bands in Liangzhu jades

合体(图2a、2c)。良渚玉器显示的结构与现代意义上的软玉结构存在较大的差异,反映出良渚先民与今人在软玉结构上的认知差异。部分良渚玉器的基质几乎已经完全白化,但其中的变斑晶却似乎未发生蚀变(图2c),可归因于变斑晶与基质的差异性风化,变斑晶较小的比表面积使其具有更强的抗风化能力^[19]。风化速率上的差异还将加速变斑晶与基质

在晶界上的机械性解离^[20],从而出现“基质生坑”而“变斑晶凸出”的现象(图2a)。

小梅岭软玉中的透闪石变斑晶发育了被微晶透闪石沿边缘及解理进行取代的多种交代残留结构(图3a、3b)。由于交代作用不彻底,导致透闪石变斑晶集合体以条带状和断续的斑块状残留在细腻的基质中(图3a),形成的结构与图2a所示的岩石结构十分相似。随着交代作用的持续进行,它们将进一步缩小成半自形或它形的单个晶体(图3b),形成的结构与图2b所示的岩石结构较为接近。小梅岭软玉中的透辉石要么呈自形的柱状(图4b、4c),要么呈半自形的粒

状(图4d)分布于细腻的基质中,其形态与双孔玉钺(图4a)和玉鼓形大珠(图2b)中的变斑晶如出一辙,有力地支持了小梅岭软玉为这些良渚玉器用料的来源。总的来说,良渚玉器中的变斑晶自形程度较高,缺乏弯曲、扭折、破碎等常见的微观构造现象,与小梅岭软玉中的变斑晶所示状态一致;而世界上大多数的软玉矿床蕴藏在造山带,如新疆软玉^[21-23]、岫岩软玉^[15]、丰田软玉^[24-25]、东萨彦软玉^[26]、加拿大软玉^[27-28]、春川软玉^[29-30]等,这类软玉很难避免构造作用的影响,玉中的矿物常表现出各种变形,如叶理^[26]、晶体弯曲^[30]、矿物鱼^[31]等,可以与良渚玉器的用料相区别。



a 由透闪石基质与粗粒透闪石集合体构成的交代残留结构 b 被微晶透闪石取代的透闪石变斑晶 c 由微晶透闪石构成的显微粒状变晶结构

图3 小梅岭软玉的结构演化

Fig.3 Texture evolution of Xiaomeiling nephrite

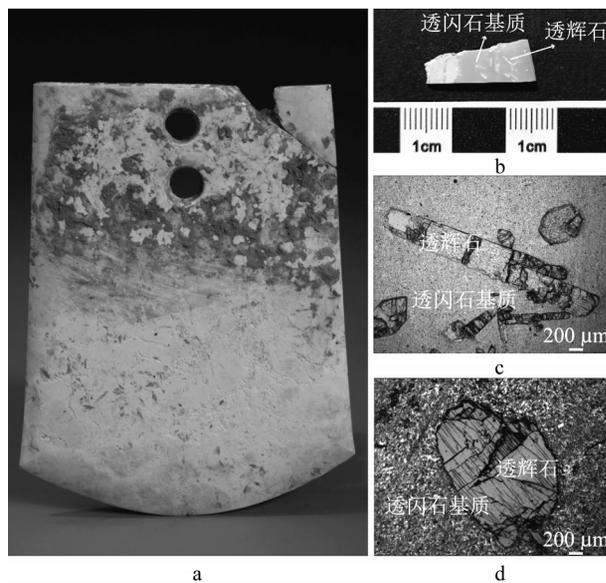


图4 良渚钺中的变斑晶形态(a)与小梅岭软玉中透辉石的形态(b、c、d)

Fig.4 Morphology of porphyroblasts in Liangzhu Yue (a) and diopsides in Xiaomeiling nephrite (b, c, and d)

小梅岭软玉产于晚燕山期庙西花岗岩与二叠纪栖霞组碳酸盐岩的接触带^[32],其氩氩年龄为

(117.0±3.2) Ma,与庙西花岗岩中钾长石的氩氩年龄(117.2±2.6) Ma基本一致^[33]。该时期恰逢古太平洋板块俯冲角度增加,下扬子地区处于由挤压向拉张演变的构造转换期^[34-37],这为小梅岭软玉中的矿物提供了宽松的生长空间,使矿物可按照自身的结晶习性自由生长。另一方面小梅岭玉矿的三面皆被庙西花岗岩所包围^[32],使狭小空间内的小梅岭软玉获得了持续而稳定的热量,客观上促进了粗粒变斑晶的生长,这样的成矿环境正对应于良渚玉器中粗粒变斑晶所指示的矿物生长条件。

1.3 化学成分

前人的研究已经表明良渚玉器中缺乏Cr、Co、Ni等化学成分^[5-6],也未见蛇纹岩型软玉中常见的铬铁矿,并且其岩石结构也与蛇纹岩型软玉不同,因此关于良渚玉器来源的讨论可限定在东亚的碳酸盐岩型软玉之中。良渚玉器的一个重要成分特征是其具有很高的碱金属含量(图5)^[14],同时高城墩遗址出土玉器的平均碱金属含量^[5]明显低于余杭遗址群出土的玉器^[6],但这两个遗址出土玉器的平均碱金属含量却与不同颜色系列的小梅岭软玉如出一辙^[4]。此外,钟华邦^[32]在小梅岭软玉中发现了Na₂O质量分数

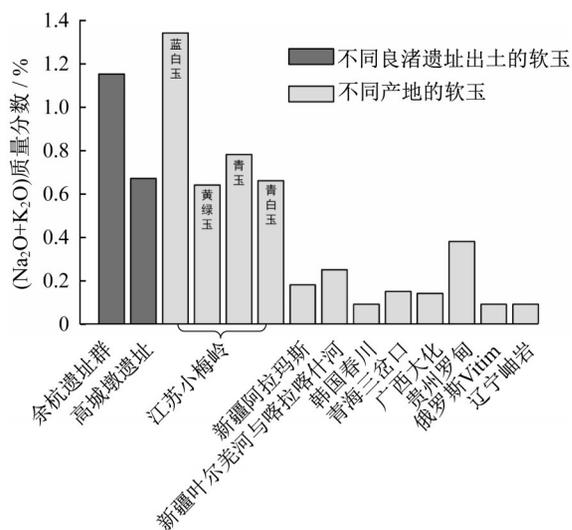


图5 部分良渚玉器与东亚地区部分碳酸盐岩型软玉中碱金属(Na₂O+K₂O)的平均质量分数

Fig.5 Average alkali metal (Na₂O+K₂O) contents in some Liangzhu jades and carbonate rock-related nephrites within East Asia

高达4.26%~6.47%的透闪石,这与余杭遗址群出土的ZJ1-1、ZJ1-11a、ZJ2-10等玉器中的Na₂O含量较接近^[6]。这些证据不仅有力地佐证了小梅岭软玉与良渚玉器用料的亲缘性,还可能反映了不同良渚聚落之间用玉等级的差异^[3,11]。等级高的余杭聚落用玉最为细腻,平均碱金属含量最高,与Li等^[4]研究的蓝白色小梅岭软玉(LY-C-2)相对应;等级略低的高城墩聚落用玉的质量较低^[3,11],平均碱金属含量也较低,与Li等^[4]研究的黄绿(HL)、青(Q)和青白(QB)颜色系列的小梅岭软玉相对应。

长江中下游酸性又潮湿的埋藏条件使得Na、K等活性元素易从良渚玉器中流失,诱发角闪石结构的破坏,因此余杭遗址群出土的玉器较其他良渚遗址出土的玉器白化程度更明显的现象很可能源于玉料中K、Na含量的差异。需要注意的是这些良渚玉器的主要化学成分是由非破坏性的质子激发X射线荧光分析技术测定的,皆为玉器风化表面的成分,换言之这些玉器在埋藏前应含有更为丰富的K和Na,而目前仅有小梅岭软玉与之匹配,这也成为小梅岭软玉和良渚玉器用料之间的关键纽带之一。

由于高城墩遗址和余杭遗址群出土的良渚玉器表面的Sr含量明显低于小梅岭软玉中的Sr含量,有学者推测小梅岭软玉不是良渚先民用玉的来源^[5-6]。然而Sr是一种活性很强的元素,会随着岩石的风化而损耗,所以风化岩石中的Sr亏损是一个较普遍的现象^[38-40],例如岫岩河磨玉风化层中剩余的Sr含

量就低于未风化层中的Sr含量^[41]。向芳等^[42]则是剔除了Rb、Sr、Ba等活性元素后,利用活性较弱的微量元素追溯金沙遗址出土玉器的地质来源。因此,在利用化学成分对出土玉器进行溯源时尤应注意风化过程中元素的地球化学行为;同时应尽可能选择未蚀变的玉器或玉器上蚀变程度低的区域进行成分测试^[43]。

1.4 红外及拉曼光谱

红外及拉曼光谱是分析矿物结构的无损技术,已在古玉研究中得到广泛应用。良渚玉器的红外及拉曼光谱^[3,6]虽然与标准透闪石十分接近^[44],但也存在细微的差别。例如在红外光谱中,良渚玉器中透闪石的OH伸缩振动($\nu(\text{OH})$)位于3671 cm⁻¹附近^[3],略低于标准透闪石的3675 cm⁻¹;而在拉曼光谱中,良渚玉器中透闪石的Si-O-Si对称伸缩振动($\nu_s(\text{Si-O-Si})$)位于671 cm⁻¹附近^[6],亦略低于标准透闪石的675 cm⁻¹。这两个变化反映了良渚玉器中透闪石的晶体结构与标准透闪石存在一定的差异。

对钙角闪石族而言,拉曼光谱中675 cm⁻¹附近的 $\nu_s(\text{Si-O-Si})$ 与单位角闪石分子中的Fe²⁺原子数满足简单的线性关系: $X=0.066 \times (\nu-659.3)$,式中X的物理意义为 $X=\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ ^[44]。当 $\nu_s(\text{Si-O-Si})$ 为671 cm⁻¹时, $X=0.78$,该矿物应为阳起石而非透闪石,这与良渚玉器的主要组成矿物不符,因此上述两个变化与角闪石中的Fe²⁺含量无关。当角闪石硅氧骨架中的Si⁴⁺被Al³⁺替代后,Na⁺、K⁺等一些阳离子将占据晶格中的空位以平衡电荷,导致角闪石中的Al³⁺含量正比于碱金属而反比于Si⁴⁺^[45],这与良渚玉器富碱富Al的成分特征相符。由于Al³⁺的离子半径大于Si⁴⁺,被Al³⁺替代后的Al-O-Si键的键长大于Si-O-Si键的键长^[46],从而导致透闪石中的 $\nu_s(\text{Al-O-Si})$ 由675 cm⁻¹向671 cm⁻¹的变化。当角闪石中的空位被离子半径较大的Na⁺和K⁺占据时,OH偶极子中的H⁺与Na⁺和K⁺之间的相互排斥会使OH基团的键长缩短,将引起OH基团的振动频率增加^[47],但OH基团的振动频率会随着角闪石中Al³⁺含量的增加而降低^[45,48],因此良渚玉器红外光谱中3675 cm⁻¹到3671 cm⁻¹的变化是角闪石中Na⁺-Al³⁺耦合对OH基团产生的影响。这恰与小梅岭软玉中透闪石表现出的振动光谱特征相一致,佐证了小梅岭软玉与良渚玉器之间存在由阳离子含量和占位引起的透闪石局部构型上的紧密联系^[4]。

1.5 长江下游地区的潜在软玉

软玉矿床的分布往往是区域性的,如塔里木盆

地南缘分布的碳酸盐岩型软玉成矿带^[22,49]和北美地区的蛇纹岩型软玉成矿带^[50-51]。江苏溧阳小梅岭村软玉矿的发现表明长江下游地区具有开发其他软玉矿床的潜力。其次,考虑到良渚文化的分布与长江下游地区在空间上的高度重叠,这些潜在的软玉矿床也可能被良渚先民发现。古代典籍记载长江中下游地区盛产金、银、铜及瑶琨(美玉)等矿产,其中金属矿产已得到了长江中下游多金属成矿带的印证^[52-53]。考古工作也表明早在先秦时期的鄂东、皖南、宁镇等地区已存在大规模的铜矿开采活动^[54-55]。这些金属矿产多来自晚燕山期富碱侵入岩形成的矽卡岩型金属矿床^[52,56],在矽卡岩成矿的过程中很可能也形成了一些软玉,出露后被良渚先民发现并利用,但随着文明的衰落渐渐被遗忘在历史的长河中,正如现今已很难考证《山海经·南山经》中诸多金玉之山的确切位置。

句容市伏牛山矽卡岩型铜矿主要产于晚燕山期花岗岩闪长斑岩与栖霞组和青龙组碳酸盐岩的接触带,矽卡岩矿物包括石榴子石、透辉石、透闪石、绿帘石、阳起石、符山石等^[57],而距此不远的句容丁沙地遗址就出土了具有良渚文化特征的软玉质玉璞和加工残余料^[58]。塘山遗址和中初鸣遗址则是余杭遗址群附近的两个具有代表性的玉器作坊,也出土了大量的玉料、半成品玉器、成品玉器及残件。不同的是塘山遗址出土的玉器主要由软玉制成,而中初鸣遗址出土的玉器多由蛇纹石制成^[59],这些制玉作坊的发现不仅说明了良渚先民已经能够有效地鉴别一些玉石材料,而且反映了良渚文化至少在玉器的加工上已经产生了劳动分工。

2 结语

经过几千年的埋藏,良渚玉器携带的地质信息或多或少发生了变化,应将它们视为风化岩石进行研究。在对良渚玉器进行溯源时既要考虑外部环境对玉器产生的影响,也应注意玉器自身成分与结构对风化做出的响应。良渚玉器在矿物组成、晶体形态、岩石结构、化学成分、红外及拉曼光谱等诸多方面残留的信息仍表明小梅岭软玉是良渚先民软玉用料的重要来源之一,这是良渚文化本土起源的直接证据,而长江下游地区潜在的软玉矿床为良渚先民提供了其他的用料可能。

从玉器作坊出土的加工玉料可以看出,良渚文化已形成了水平较高的玉石加工体系,而良渚文化、

崧泽文化、马家浜文化在玉器上表现出的演化步调诠释了良渚先民在代代相传中日渐精湛的制玉技艺,这种文化上的传承是良渚文化作为太湖地区本土文化的另一重要见证。

作者贡献声明:

李平:设计研究思路,参与论文撰写与修改。

廖宗廷:提出建议并参与论文修改。

周征宇:提出建议并参与论文修改。

参考文献:

- [1] 何国俊. 良渚文化玉器原料来源探讨[J]. 南方文物, 2005, 4: 28. HE Guojun. Jade ware raw material source of inquiry for Liangzhu Culture[J]. Cultural Relics in Southern China, 2005, 5: 28.
- [2] 郑建. 寺墩遗址出土良渚文化玉器鉴定报告[C]//东方文明之光:良渚文化发现60周年纪念文集(1936—1996). 海口:海南国际新闻出版中心, 1996: 432-441. ZHENG Jian. The appraisal report on Liangzhu jades unearthed from Sidun site [C]//The Light of Oriental Civilization: Collected Essays in Commemoration of the 60th Anniversary of the Discovery of Liangzhu Culture (1936—1996). Haikou: Hainan International Press and Publication Center, 1996: 432-441.
- [3] 闻广, 荆志淳. 福泉山与崧泽玉器地质考古学研究——中国古玉地质考古学研究之二[J]. 考古, 1993, 7: 627. WEN Guang, JING Zhichun. A geoarchaeological study of ancient Chinese jade (II): jade from Fuquanshan and Songze sites[J]. Archaeology, 1993, 7: 627.
- [4] LI P, LIAO Z, ZHOU Z, *et al.* Evidences from infrared and Raman spectra: Xiaomeiling is one reasonable provenance of nephrite materials used in Liangzhu Culture[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2021, 261: 120012.
- [5] 顾冬红, 干福熹, 承焕生, 等. 江阴高城墩遗址出土良渚文化玉器的无损分析研究[J]. 文物保护与考古科学, 2010, 22(4): 42. GU Donghong, GAN Fuxi, CHENG Huansheng, *et al.* Non-destructive analysis of Liangzhu Culture jade artifacts from the Gaochengdun site of Jiangyin[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2010, 22(4): 42.
- [6] GAN F X, CAO J Y, CHENG H S, *et al.* The non-destructive analysis of ancient jade artifacts unearthed from the Liangzhu sites at Yuhang, Zhejiang [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(12): 3404.
- [7] 古方. 良渚玉器部分玉料来源的勘测[J]. 华夏考古, 2007, 1: 75. GU Fang. Research on the source of some material of Liangzhu jades[J]. Huaxia Archaeology, 2007, 7: 75.
- [8] 李约瑟. 中国科学技术史[M]. 北京: 科学出版社, 1976. NEEDHAM J T M. History of science and technology in China [M]. Beijing: Science Press, 1976.

- [9] CASADIO F, DOUGLAS J G, FABER K T. Noninvasive methods for the investigation of ancient Chinese jades: an integrated analytical approach[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2007, 387(3): 791.
- [10] 肖渊甫, 郑荣才, 邓江红. 岩石学简明教程[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
XIAO Yuanfu, ZHENG Rongcai, DENG Jianghong. *Petrology introduction*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [11] 方向明. 成组玉礼器与良渚文明模式[J]. 博物院, 2019, 2: 16.
FANG Xiangming. Group of ritual jades and Liangzhu cultural pattern[J]. *Museum*, 2019, 2: 16.
- [12] 郑建. 吴县张陵山东山遗址出土玉器鉴定报告[J]. 文物, 1986, 10: 39.
ZHENG Jian. Appraisal report on jades unearthed from Dongshan site of Zhanglingshan in Wu County [J]. *Cultural Relics*, 1986, 10: 39.
- [13] COOK F A. Raised relief on nephrite jade artifacts: observations, explanations and implications [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2013, 40(2): 943.
- [14] LI P, LIAO Z, ZHOU Z. The residual geological information in Liangzhu jades: implications for their provenance[J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2022, 133(3): 256.
- [15] ZHANG C, YU X, JIANG T. Mineral association and graphite inclusions in nephrite jade from Liaoning, Northeast China: implications for metamorphic conditions and ore genesis [J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10: 425.
- [16] 王时麒, 段体玉, 郑姿姿. 岫岩软玉(透闪石玉)的矿物岩石学特征及成矿模式[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(S1): 79.
WANG Shiqi, DUAN Tiyu, ZHENG Zizi. Mineralogical and petrological characteristics of Xiuyan nephrite and its minerogenetic model [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2002, 21(S1): 79.
- [17] SEN G. *Metamorphism and metamorphic rocks* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014.
- [18] PHILPOTTS A R, AGUE J J. *Principles of igneous and metamorphic petrology* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [19] ZHANG H, BLOOM P R, NATER E A. Change in surface area and dissolution rates during hornblende dissolution at pH 4.0[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(8): 1681.
- [20] ISRAELI Y, EMMANUEL S. Impact of grain size and rock composition on simulated rock weathering [J]. *Earth Surface Dynamics*, 2018, 6(2): 319.
- [21] JIANG Y, SHI G, XU L, *et al.* Mineralogy and geochemistry of nephrite jade from Yinggelike deposit, Altyn Tagh (Xinjiang, NW China)[J]. *Minerals*, 2020, 10: 418.
- [22] LIU Y, ZHANG R Q, ZHANG Z Y, *et al.* Mineral inclusions and SHRIMP U-Pb dating of zircons from the Alamas nephrite and granodiorite: implications for the genesis of a magnesian skarn deposit[J]. *Lithos*, 2015, 212/215: 128.
- [23] LIU Y, DENG J, SHI G, *et al.* Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42: 440.
- [24] YUI T F, YEH H W, LEE C W. Stable isotope studies of nephrite deposits from Fengtien, Taiwan [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(3): 593.
- [25] YUI T F, USUKI T, CHEN C Y, *et al.* Dating thin zircon rims by NanoSIMS: the Fengtien nephrite (Taiwan) is the youngest jade on Earth [J]. *International Geology Review*, 2014, 56(16): 1932.
- [26] PROKHOR S A. The genesis of nephrite and emplacement of the nephrite-bearing ultramafic complexes of East Sayan [J]. *International Geology Review*, 1991, 33: 290.
- [27] JIANG B, BAI F, ZHAO J. Mineralogical and geochemical characteristics of green nephrite from Kutcho, Northern British Columbia, Canada[J]. *Lithos*, 2021, 388/389: 106030.
- [28] 吴青蔓, 吴瑞华, 赵洋洋, 等. 加拿大Cassiar碧玉的宝石矿物学特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(S1): 43.
WU Qingman, WU Ruihua, ZHAO Yangyang, *et al.* Gemological and mineralogical characteristics of green nephrite from Cassiar, Canada [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2014, 33(S1): 43.
- [29] KIM W S. Nephrite from Chuncheon, Korea[J]. *The Journal of Gemmology*, 1995, 24(8): 547.
- [30] FENG Y, HE X, JING Y. A new model for the formation of nephrite deposits: a case study of the Chuncheon nephrite deposit, South Korea[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 141: 104655.
- [31] LIU Y, ZHANG R, ABUDUWAYITI M, *et al.* SHRIMP U-Pb zircon ages, mineral compositions and geochemistry of placer nephrite in the Yurungkash and Karakash River deposits, West Kunlun, Xinjiang, Northwest China: implication for a magnesium skarn[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72: 699.
- [32] 钟华邦. 梅岭玉地质特征及成因探讨[J]. 宝石和宝石学杂志, 2000, 2(1): 39.
ZHONG Huabang. Study on the geological characteristics and genesis of Meiling jade[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 2000, 2(1): 39.
- [33] 周述蓉, 罗清华, 贺云翱, 等. 氩氩同位素定年法在殷商文化玉器考古上之应用[C]//2004年安阳殷商文明国际学术研讨会. 北京: 社会科学文献出版社, 2004: 615-622.
ZHOU Shurong, LUO Qinghua, HE Yunxiang, *et al.* The application of Ar-Ar dating in jade archaeology of Yin Shang culture [C]//2004 Anyang Yinshang Civilization International Symposium. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2004: 615-622.
- [34] 舒良树, 周新民. 中国东南部晚中生代构造作用[J]. 地质评论, 2002, 48(3): 249.
SHU Liangshu, ZHOU Xinmin. Late mesozoic tectonism of Southeast China[J]. *Geological Review*, 2002, 38(3): 249.
- [35] HE Z Y, XU X S. Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction [J]. *Chemical Geology*, 2012, 328: 208.
- [36] MAO J, LIU P, GOLDFARB R J, *et al.* Cretaceous large-

- scale metal accumulation triggered by post-subductional large-scale extension, East Asia [J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 136: 104270.
- [37] ZHOU X, SUN T, SHEN W, *et al.* Petrogenesis of mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution [J]. *Episodes*, 2006, 29(1): 26.
- [38] CONDIE K C, DENGATE J, CULLERS R L. Behavior of rare earth elements in a paleoweathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(2): 279.
- [39] MIDDELBURG J J, VAN DER WEIJDEN C H, WOITTEZ J R W. Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks [J]. *Chemical Geology*, 1988, 68(3/4): 253.
- [40] MA Y, LIU C. Sr isotope evolution during chemical weathering of granites-impact of relative weathering rates of minerals [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 44(8): 726.
- [41] 徐海鹏, 丰爱平, 王时麒, 等. 辽宁岫岩软玉砂矿的成因及资源保护 [J]. *资源科学*, 2000, 22(2): 24.
XU Haipeng, FENG Aiping, WANG Shiqi, *et al.* The origin of Liaoning Xiuyan nephrite placer resources and their protection [J]. *Resource Geology*, 2000, 22(2): 24.
- [42] 向芳, 王成善, 杨永富, 等. 金沙遗址玉器的材质来源探讨 [J]. *江汉考古*, 2008, 3: 104.
XIANG Fang, WANG Chengshan, YANG Yongfu, *et al.* A study of jadestone sources at the Jinsha site [J]. *Jiangnan Archaeology*, 2008, 3: 104.
- [43] KOSTOV R I, PROTOCHRISTOV C, STOYANOV C, *et al.* Micro-PIXE geochemical fingerprinting of nephrite Neolithic artifacts from Southwest Bulgaria [J]. *Geoarchaeology*, 2012, 27(5): 457.
- [44] BERSANI D, ANDÒ S, SCROCCO L, *et al.* Composition of amphiboles in the tremolite - ferro - actinolite series by raman spectroscopy [J]. *Minerals*, 2019, 9(8): 491.
- [45] DELLA VENTURA G, HAWTHORNE F C, ROBERT J L, *et al.* Synthesis and infrared spectroscopy of amphiboles along the tremolite-pargasite join [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2003, 15(2): 341.
- [46] WAESSELMANN N, SCHLÜTER J, MALCHEREK T, *et al.* Nondestructive determination of the amphibole crystal-chemical formulae by Raman spectroscopy: one step closer [J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2019, 51(9): 1530.
- [47] SBROSCIA M, DELLA VENTURA G, IEZZI G, *et al.* Quantifying the A-site occupancy in amphiboles: a Raman study in the OH-stretching region [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2018, 30: 429.
- [48] DELLA VENTURA G, HAWTHORNE F C, ROBERT J L, *et al.* Short-range order of cations in synthetic amphiboles along the richterite-pargasite join [J]. *European Journal of Mineralogy*, 1999, 11(1): 79.
- [49] GAO K, SHI G, WANG M, *et al.* The Tashisayi nephrite deposit from South Altyn Tagh, Xinjiang, Northwest China [J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10(4): 1597.
- [50] LEAMING S F. Jade in Canada [J]. *Geological Survey of Canada Papers*, 1978, 19: 1.
- [51] HARLOW G E, SORENSEN S S. Jade (nephrite and jadeite) and serpentinite: metasomatic connections [J]. *International Geology Review*, 2005, 47(2): 113.
- [52] 周涛发, 范裕, 袁峰. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(8): 1665.
ZHOU Taofa, FAN Yu, YUAN Feng. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(8): 1665.
- [53] SUN W, YUAN F, JOWITT S M, *et al.* Geochronology and geochemistry of the Fe ore-bearing Zhonggu intrusions of the Ningwu Basin: implications for tectonic setting and contemporaneous Cu-Au mineralization in the Middle-Lower Yangtze Metallogenic Belt [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 84: 246.
- [54] 肖梦龙. 试论江南吴国青铜器 [J]. *东南文化*, 1986(1): 96.
XIAO Menglong. On the bronzes of Wu state in Jiangnan [J]. *Southeast Culture*, 1986(1): 96.
- [55] 杨立新. 皖南古代铜矿的发现及其历史价值 [J]. *东南文化*, 1991(2): 131.
YANG Lixin. The discovery of ancient copper deposits in southern Anhui and its historical value [J]. *Southeast Culture*, 1991(2): 131.
- [56] 许继峰, 王强, 徐义刚, 等. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 576.
XU Jifeng, WANG Qiang, XU Yigang, *et al.* Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: constraint to origin of magma with HREE and Y depletion [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(4): 576.
- [57] 汪希, 金鑫, 罗鸣. 江苏省句容市伏牛山北部矿区铜矿成因及找矿方向 [J]. *西部探矿工程*, 2016, 28(2): 117.
WANG Xi, JIN Xin, LUO Ming. The origin and prospecting direction of copper deposits in the northern Funiushan mining area, Jurong, Jiangsu Province [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2016, 28(2): 117.
- [58] 陆建方, 杭涛, 韩建立. 江苏句容丁沙地遗址第二次发掘简报 [J]. *考古*, 2001, 5: 22.
LU Jianfang, HANG Tao, HAN Jianli. The second season of excavation at the Dingshadi site, Jurong, Jiangsu [J]. *Cultural Relics*, 2001, 5: 22.
- [59] 朱叶菲, 王永磊, 周建忠, 等. 浙江德清县中初鸣良渚文化制玉作坊遗址群的发掘 [J]. *考古*, 2021, 6: 56.
ZHU Yefei, WANG Yonglei, ZHOU Jianzhong, *et al.* Excavation of the Liangzhu cultural lapidary workshop clusters at Zhongchuming in Deqing County, Zhejiang [J]. *Archaeology*, 2021, 6: 56.