故宫博物院藏良渚风格玉器的材质研究

罗 涵　徐 琳　李 合　屈雅洁　康葆强　张跃峰

内容提要　2019 年，作者通过 X 射线荧光能谱、拉曼光谱、红外光谱及 X 射线衍射方法，对故宫博物院藏良渚风格玉器的材质进行了无损检测，测试结果表明：56 件玉器中有 54 件为透闪石 – 阳起石玉，2 件为蛇纹石玉。所有测试样品的 Cr、Ni 元素含量均小于 0.01%，与大理岩型闪石、蛇纹石特征一致，排除超基性岩成因。其中大部分黄绿 – 青绿色、结构细腻的玉料具有典型的“华东玉料”特征，很可能来自东北地区，而琢刻御题诗玉器的玉料和沁色特征，则指向不同的埋藏环境，说明乾隆时期多地及不同时期的良渚文化风格玉器已经进入宫廷。

关键词　良渚玉器　成分分析　拉曼光谱　红外光谱　X 射线衍射

2019年6月，为配合“良渚与古代中国——玉器显示的五千年文明”展览，确定故宫博物院藏良渚玉器的矿物种属，器物部和文保科技部工作人员合作，首次对院藏良渚风格玉器的材质进行无损检测。本次检测的玉器共56件，器物来源为清宫旧藏和1949年后文物征集入藏。因文物数量多、等级高，检测地点选在地下库房。受检测环境限制，团队选择便携式的显微镜、拉曼光谱、红外光谱及X射线荧光能谱，尝试从外观特征观察和谱学分析两方面来采集基础数据，从而确定此批玉器的矿物种属并就材质特征进行归纳分析。

一　外观特征

1. 器形和纹饰

56件玉器包括玉璧10件、矮玉琮8件、高节琮8件、琮式管19件、玉管6件和其他器形5件。这些器物中，19件光素无纹，37件琢刻有典型良渚特征的神人纹或兽面纹[表一]。

[表一] 检测用故宫博物院良渚玉器一览表

	文物号	文物名称	位置	SiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Mg/(Mg+Fe)	矿物种属
1	故83946	青玉光素璧		59.2	2.1	3.1	24.2	15.9	0.1	0.94	透闪石
2	故83948	青玉光素璧		59.2	1.6	1.4	26.2	14.8	0.1	0.97	透闪石
3	故83998	碧玉光素璧		59.2	1.6	6.3	24.1	15.2	0.1	0.88	透闪石 – 阳起石

（续表一）

	文物号	文物名称	位置	SiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Mg/(Mg+Fe)	矿物种属
4	故84235	青玉光素合璧	之一	59.2	1.6	5.2	25.0	15.1	0.1	0.91	透闪石－阳起石
			之二	59.2	1.7	6.8	24.5	15.3	0.1	0.88	透闪石－阳起石
5	故95744	青玉璧		59.2	1.7	3.8	25.6	14.2	0.2	0.93	透闪石
6	新9611	乾隆题诗青玉光素璧		59.2	1.3	1.2	26.3	13.7	0.1	0.98	透闪石
7	新117155	青玉璧		59.2	2.6	7.4	21.1	14.9	0.2	0.85	透闪石－阳起石
8	新123894	青玉璧		59.2	1.8	5.0	24.7	14.7	0.1	0.91	透闪石－阳起石
9	新127481	玉璧		59.2	1.7	7.0	26.4	14.9	0.1	0.88	透闪石－阳起石
10	新127860	玉璧		59.2	3.4	7.4	22.0	17.9	0.4	0.85	透闪石－阳起石
11	故83951	玉琮		59.2	1.4	1.7	27.9	13.6	0.1	0.97	透闪石
12	故83952	经火玉琮		59.2	6.6	1.2	22.5	14.4	0.5	0.97	透闪石
13	故96002	青玉琮		59.2	1.9	1.1	23.6	13.7	0.1	0.98	透闪石
14	故96005	青玉琮		59.2	2.1	5.8	21.0	15.2	0.1	0.88	透闪石－阳起石
15	故103953	褐沁青玉琮		59.2	2.8	1.5	25.8	13.9	0.3	0.97	透闪石
16	故103956	黄玉琮		59.2	1.2	1.3	26.5	12.2	0.1	0.98	透闪石
17	新117974	青玉琮		59.2	1.7	5.9	24.1	15.6	0.1	0.89	透闪石－阳起石
18	新117975	青玉琮		59.2	1.0	0.8	26.6	13.7	0.1	0.98	透闪石
19	故83949	青玉琮		59.2	1.9	7.1	25.9	15.7	0.1	0.88	透闪石－阳起石
20	故96000	青玉琮		59.2	1.7	0.6	26.3	13.3	0.1	0.99	透闪石
21	故103955	青玉琮		59.2	2.0	2.4	23.3	14.0	0.1	0.95	透闪石
22	新63137	青玉琮	体身	59.2	0.5	1.1	27.4	13.4	0.1	0.98	透闪石
			褐底白点	59.2	1.4	1.9	25.3	14.9	0.1	0.96	透闪石
			白斑	59.2	1.4	2.1	26.0	14.9	0.1	0.96	透闪石
23	新93170	青玉琮		59.2	1.5	2.5	26.9	14.7	0.1	0.96	透闪石
24	新127866	青玉琮		59.2	1.7	0.3	25.6	15.6	0.3	0.99	透闪石
25	新136935	青玉琮		59.2	1.7	6.3	24.8	15.3	0.1	0.89	透闪石－阳起石
26	新155420	玉细纹琮		59.2	0.5	5.1	26.1	14.6	0.2	0.91	透闪石－阳起石
27	故83931	玉琮式管		59.2	3.7	6.8	26.5	15.1	0.3	0.88	透闪石－阳起石
28	故83932	青玉琮式管		59.2	1.0	1.9	27.8	11.7	0.1	0.97	透闪石
29	故83933	玉琮式管		59.2	1.3	1.3	27.9	12.6	0.1	0.98	透闪石
30	故83934	玉琮式管		59.2	1.6	0.6	26.4	13.6	0.1	0.99	透闪石
31	故83956	玉琮式管		59.2	1.4	1.3	26.8	12.5	0.1	0.98	透闪石
32	故83957	玉琮式管		59.2	2.0	1.4	27.0	13.4	0.2	0.97	透闪石
33	故83960	玉琮式管		59.2	1.4	0.6	26.6	14.7	0.2	0.99	透闪石
34	故84559	青玉琮式管		59.2	1.5	1.4	28.3	13.1	0.1	0.98	透闪石
35	故84686	青玉琮式管	浅色	59.2	3.3	3.1	24.8	15.6	0.3	0.94	透闪石
			深色	59.2	1.8	5.5	24.4	14.8	0.1	0.90	透闪石－阳起石
36	故84935	青玉人面纹琮式管		59.2	1.2	0.8	26.4	14.2	0.1	0.99	透闪石
37	故85051	玉琮式管		59.2	1.4	1.2	25.2	13.2	0.1	0.98	透闪石
38	故93801	满赭沁玉琮式管		59.2	1.8	1.3	26.9	13.5	0.2	0.98	透闪石
39	故94661	青玉式管		59.2	1.2	1.3	26.2	12.3	0.1	0.98	透闪石
40	故94768	青玉琮式管		59.2	2.4	1.6	24.8	15.3	0.3	0.97	透闪石
41	故94775	玉琮式管		59.2	1.5	1.2	26.8	12.9	0.1	0.98	透闪石

（续表一）

	文物号	文物名称	位置	SiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Mg/(Mg+Fe)	矿物种属
42	故94978	黄玉琮式管		59.2	1.4	0.9	30.7	14.4	0.1	0.99	透闪石
43	故95081	满褐沁琮式管		43.6	1.7	0.6	42.5	0.3	0.3	0.99	蛇纹石
44	新49535	玉琮式管		59.2	1.8	2.1	24.0	14.2	0.1	0.96	透闪石
45	新196060	青玉兽面纹管		59.2	3.4	0.5	29.6	13.1	0.2	0.99	透闪石
46	故85940	玉光素管		59.2	1.6	1.2	27.6	14.8	0.5	0.98	透闪石
47	故85941	玉光素管		59.2	2.5	1.2	28.2	14.0	0.1	0.98	透闪石
48	故225324	玉光素管		59.2	1.1	1.8	27.0	14.2	0.1	0.97	透闪石
49	故225325	玉光素管		43.6	1.7	3.8	48.7	2.8	0.3	0.96	蛇纹石
50	故225326	玉光素管		59.2	1.4	1.9	27.6	13.0	0.1	0.97	透闪石
51	故225327	玉光素管		59.2	1.4	1.5	30.5	13.3	0.2	0.98	透闪石
52	故84042	玉神人兽面纹璜	体身	59.2	1.6	0.5	27.9	13.4	0.2	0.99	透闪石
			较黑部位	59.2	2.0	0.5	27.7	14.3	0.2	0.99	透闪石
53	新200403	玉兽面纹饰		59.2	1.8	5.8	26.1	14.9	0.1	0.90	透闪石－阳起石
54	新49530	玉光素环		59.2	2.1	2.0	24.4	15.3	0.3	0.96	透闪石
55	新123355	玉锥形器		59.2	1.4	1.1	26.6	14.6	0.1	0.98	透闪石
56	新97512	青玉漆笔		59.2	2.1	1.2	27.5	15.1	0.1	0.98	透闪石

玉璧、玉环、玉管、锥形器、漆笔均光素无纹。玉璧外直径14.8－22.2厘米，好径自3.9－4.9厘米，厚度0.7－2.1厘米，多数玉璧厚度在1.0－1.2厘米。玉环外直径9.6厘米、内径6.8厘米。除乾隆题诗青光素玉璧外[表一：6]（此编号为本研究行文中所用之样品编号），玉璧外形轮廓较为规整，部分器物见截方取圆痕迹，表面经过细致打磨，也有残留切割痕迹。玉环工艺特点同玉璧相似。玉管长度3－5厘米，孔径1.0－1.6厘米。锥形器和漆笔造型相似，为四方弧面锥形，上端有穿孔，下方为锥尖。

玉琮及琮式管和玉璜琢刻有神人纹或兽面纹。玉琮为2－3节，高度4.1－7.6厘米，宽度5－11厘米，内径5.2－8.0厘米，琮身刻有神人纹或兽面纹，外形规整，打磨细致，经火玉琮仅琢磨处节尚未进行纹饰雕刻。进入清代宫廷后，矮玉琮被乾隆皇帝认为是玉杠头，多把内壁重新钻孔打直改制为香薰或花插，加配了铜鎏金内胆或木质底座，有三件在内外壁刻诗题字。高节琮5－15节，高度从19.8－34.8厘米，琢刻有神人纹，精美细致。琮式管为缩小版的玉琮，琢刻神人纹或兽面纹，大致有三种尺寸，短管长度2－3厘米，中管长度4.4－4.8厘米，长管长度为7.3－8.2厘米。玉神人兽面纹璜是这批玉器中纹饰琢刻最精美的一件，正面中央为兽面纹浅浮雕，两侧边角处为鸟纹浅浮雕，正反两面满刻螺旋纹和几何短直线。

2. 玉料特征

故宫博物院藏良渚玉器多数通体受沁，笔者将肉眼能观察到原玉料特征者定为A组，无法观察者定为B组〔图一〕。A组玉料有白－青白色、黄绿色、青－青绿色、褐绿色、灰绿色、碧绿－墨绿色六个颜色种类；从结晶情况来看，一部分为玉质细腻的隐晶质结构，另一部分为颗粒粗大的变晶结构，呈纤维状、放射状聚集。具体特征如下：(1)白色－青白色玉料，半透明、油脂光泽，毛毡状交织结构，结构细

〔图一〕A组玉器原料颜色特征
（1:55–玉锥形器，2:56–青玉漆笔，3:17–青玉琮，4:23–青玉琮，5:21–青玉琮，6:5–青玉璧，7:20–青玉琮）
（此编号与［表一］中的编号对应，余同）





1.　2.　3.　4.　5.　6.　7.

B组玉器的颜色特征



B组玉器的颜色特征

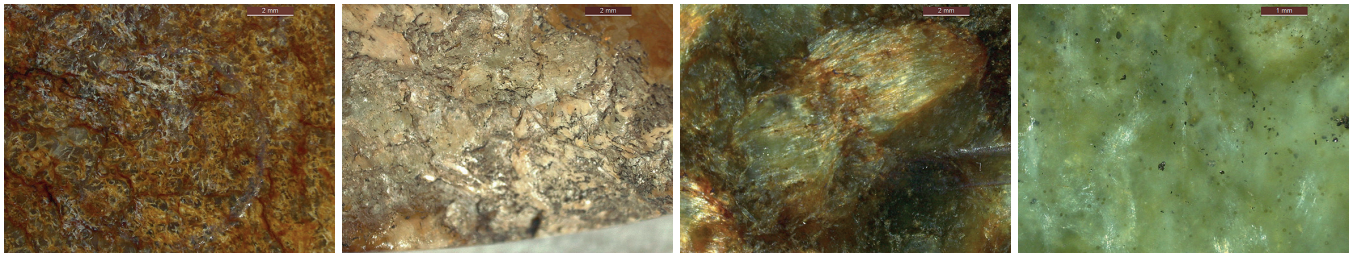


密，受沁可呈现黄褐色、褐红色和黑色，器物代表有[表一：45]青玉兽面纹管和[表一：55]玉锥形器，[表一：52]玉神人兽面纹璜沁色之间夹杂的疑似原玉料颗粒〔图二：1〕和[表一：6]乾隆御题诗青玉光素璧，旧磨损处也为白－青白色〔图二：2〕。(2)青黄绿色玉料，颜色斑杂、半透明、油脂至蜡状光泽，颗粒粗大呈纤维交织结构，受沁后呈褐黄色，亦见纱网状白沁。(3)青－青绿色玉料，颜色斑杂、半透明、油脂光泽，毛毡状交织结构、见斑状颗粒分布，受沁后呈褐色－黄白色、红褐色。(4)褐绿色玉料，微透明，蜡状光泽，纤维交织结构，有放射状、帚状结构，白沁呈条带状－纱网状分布，如[表一：23]青玉琮。(5)灰绿色玉料，微透明至蜡状光泽，纤维交织结构，有如[表一：24]青玉琮的放射状、帚状结构〔图二：3〕，多有大面积褐色沁，部分如[表一：3]碧玉光素璧含有黑色包裹体〔图二：4〕。(6)碧绿色玉料，微透明、油脂至蜡状光泽，纤维交织结构至片状－帚状结构，局部晶体颗粒粗大呈放射状，受沁后多呈棕褐色，有雾状白沁，部分含有黑色包裹体。典型器物如[表一：6]青玉璧和[表一：7]青玉琮。

3. 玉料颜色次生变化特征

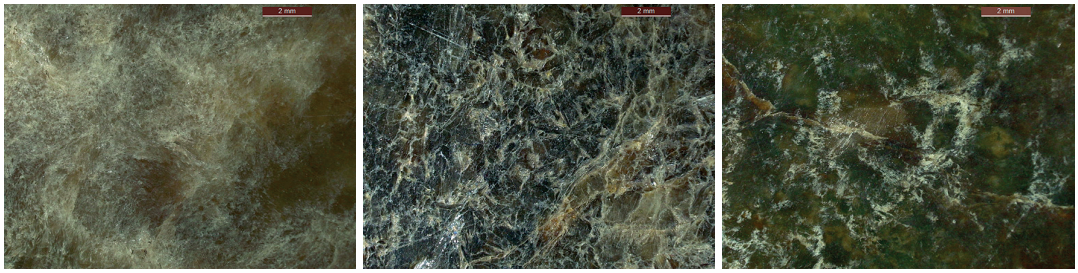
这批玉器经过埋藏沁蚀或盘玩后，玉料颜色多发生白色、黄白－灰白色、红褐－褐黄色三类变化〔图三〕，在同件器物上可组合出现。沁蚀后玉料透明度降低，由油脂光泽减弱为蜡状、土状光泽，表面颗粒结构松散孔隙化、碎裂化。白色沁可呈现点状、条带状、纱网状、雾状分布，土状光泽，常见于玉璧和高节

〔图二〕A组玉器原料的放大观察



1　2　3　4

〔图三〕沁色的分布形态
（1:2–青玉光素璧白沁雾化分布，2:7–青玉璧白沁纱网状分布，3:9–玉璧白沁点状分布，
4:18–青玉琮整体黄白化，5:39–青玉琮式管的褐红色沁，6:27–玉琮式管表面的褐色沁）

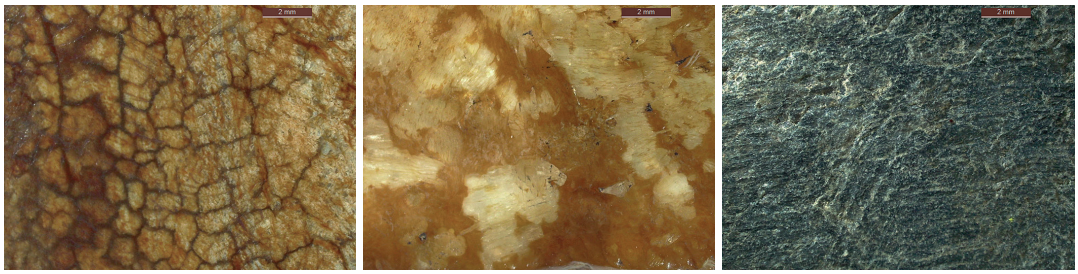


1　2　3



4　5　6

〔图四〕其他次生颜色变化
（1:52–玉神人兽面纹璜次生颜色沿裂隙分布，2:6–乾隆题诗青玉光素璧的表面颜色不均匀分布，3:12–经火玉琮表面特征）



1　2　3

琮中，一般位于器物的最表层。黄白–灰白色沁呈斑块状或面分布，使玉器呈瓷感，多出现于玉琮中。红褐色及褐黄色，疑似手工盘玩后发生的颜色变化，多出现在玉管中，玉料呈半透明–不透明，放大观察见棕褐色斑状半透明晶体，沁色斑杂或条带状分布。

玉器的其他次生颜色变化，还有未知成因的沿裂隙和表面的不均匀分布的深褐黄色和疑似经过火烧的整体黑色〔图四〕。

二　科技检测

1. 测试仪器和条件［表二］

［表二］**测试仪器和条件**

序号	项目	实验仪器及测试条件
1	X射线能谱	美国赛默飞世尔公司出产的Thermo scientific Niton XL3He型便携式X射线荧光能谱仪使用矿物模式(Mingmode)，设定Main Range、Low Range和Light Range分别测试30s，一次采样需90s。使用仪器自带的软件进行谱图处理后得到样品的元素含量分析结果；玉器原始测试结果经过标准曲线校正，并以氧化物形式给出。
2	拉曼光谱	美国必达泰克公司IRaman-plus型号，激发波长为785nm，分辨率为3.5cm^{-1}，扫描范围为200-3200cm^{-1}，光斑大小为90μm。
3	红外光谱	美国安捷伦公司出产的Agilent 4300 Handheld FTIR型便携式红外光谱仪，光谱范围650-4000cm^{-1}扫描次数：16次，分辨率4cm^{-1}，漫反射法。
4	X射线衍射	美国布鲁克公司Bruker D8 Discover型号实验条件：钴靶，微焦斑光源，光斑直径400μm，管电压40kV，管电流375mA，扫描范围2θ=25°-65°，步进扫描；步数：3，每步100秒。探测器：二维面探测器，Vantec-500；测角仪半径：198mm。

2. 成分分析

对56件玉器进行X射线荧光光谱分析，数据经过Si内标化处理，见[表一]。结果显示：[表一：43]满褐沁琮式管、[表一：49]光素玉管，主要化学成分为SiO_2、MgO，含量分别为43.6%、42.5%和43.6%、48.7%，接近蛇纹石的理论化学组成，指示其主要矿物成分为蛇纹石。从外观看，蛇纹石玉玉质细腻，肉眼很难观察到玉石结构。其余玉器主要化学成分为SiO_2、MgO、CaO,含量范围与闪石玉特征一致。部分颜色深的玉石含铁量较高，TFe_2O_3含量范围5.0%－7.4%。矿物学中，一般以Mg/(Mg+TFe)(原子比)=0.9作为透闪石和阳起石的分界，根据统计，54件闪石玉器中Mg/(Mg+TFe)大于等于0.9的玉器有43件占到79.6%，小于0.9的玉器11件占到20.3%〔图五〕。因便携XRF仪器误差，本文对Mg/(Mg+TFe)在0.9±0.02区间内的玉器中的透闪石－阳起石亚种不做细分，具体结果见〔图六〕。含铁量低的玉器主要有浅色玉璧、玉琮和有次生颜色变化的玉管，含铁量高的玉器主要为碧绿－墨绿色的玉璧和高节琮。

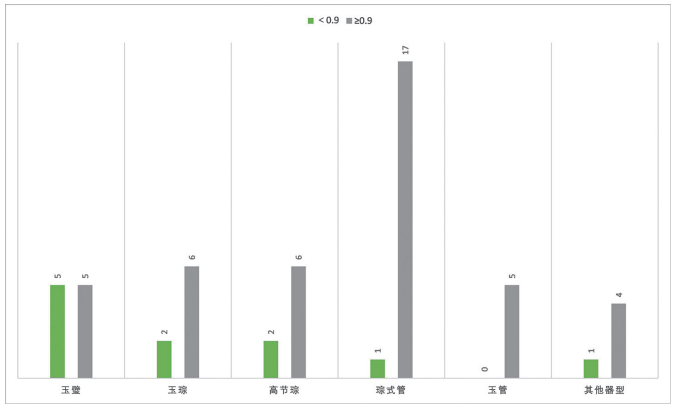
所有测试样品的Cr、Ni元素含量均小于0.01%。[表一：12]经火玉琮的钙、硅、镁比例符合闪石玉特征，Al元素含量较高，可能与过火后表面结构疏松，环境中富含的Al物质附着在样品表面有关。

3. 物相分析

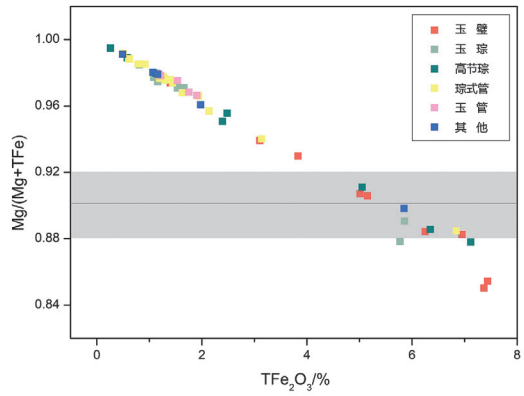
在成分分析的基础上，使用便携拉曼光谱仪对56件玉器进行物相分析，多数玉器的拉曼光谱显示为典型的透闪石－阳起石的矿物特征峰〔图七〕：179cm^{-1}和223cm^{-1}-M-O振动和晶格振动、674cm^{-1}-[SiO_4]的对称伸缩振动、1057cm^{-1}-[SiO_4]的不对称伸缩振动。

对拉曼荧光背景较高无法获得良好谱图的10件玉器使用便携红外光谱仪进行补充检测[表一：43]。满褐沁琮式管和[表一：49]玉光素管的红外光谱显示蛇纹石特征峰，为硅氧基团振动造成〔图八〕。对[表一：12]经火玉琮和受沁严重拉曼荧光背景较高的[表一：6]乾隆题诗青玉光素璧、[表一：15]褐沁青玉琮、[表一：52]玉神人兽面纹璜进行红外光谱的测试〔图九〕，均获得1092cm^{-1}、1152cm^{-1}、

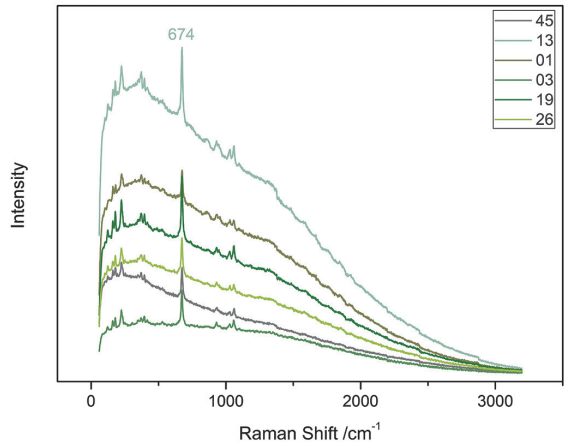
〔图五〕闪石玉器Mg/ (Mg+Fe)含量统计图



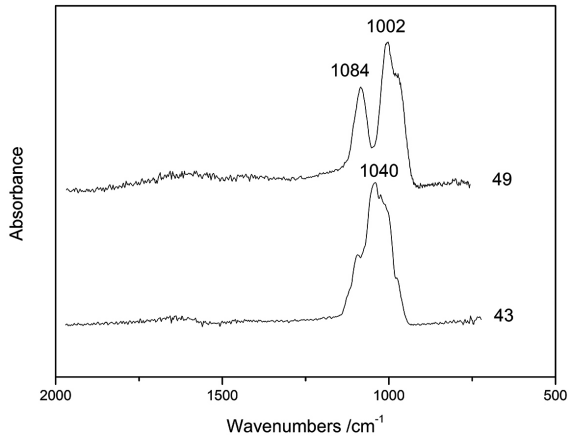
〔图六〕透闪石-阳起石分布散点图



〔图七〕部分玉器的拉曼光谱图



〔图八〕部分玉器的红外光谱图



995cm^{-1}、960cm^{-1}、917cm^{-1}、757cm^{-1}的谱峰，与透闪石一致。

对两件蛇纹石质玉器进行无损X射线衍射分析〔图十〕，结果显示[表一：43]满褐沁琮式管为叶蛇纹石，[表一：49]光素玉管为利蛇纹石。

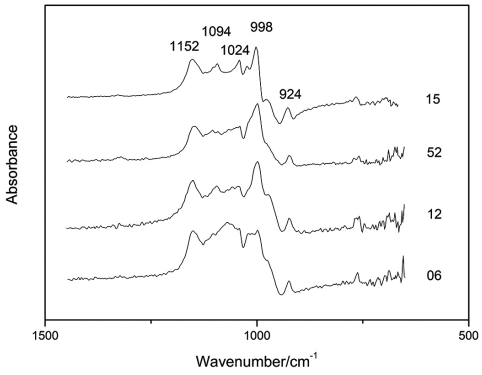
三　讨论和结论

（一）玉料外观特征的指示

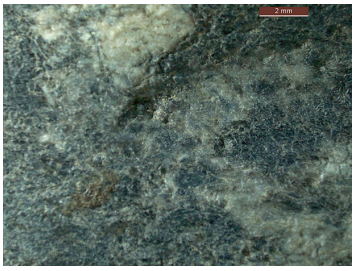
据郭明建统计，经过系统检测的249件良渚玉器中，206件为透闪石玉，43件为其他玉石，以蛇纹石玉和滑石岩为主‹1›。本实验检测的56件玉器，仅有2件为蛇纹石玉，检测玉石种类符合良渚玉器玉料种类范围。

‹1›　郭明建《良渚文化玉器产地的综合分析》，《中国国家博物馆馆刊》2017年第7期。

〔图九〕部分玉器的红外光谱图

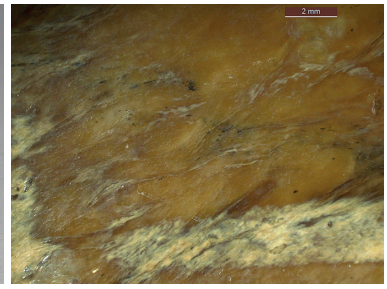






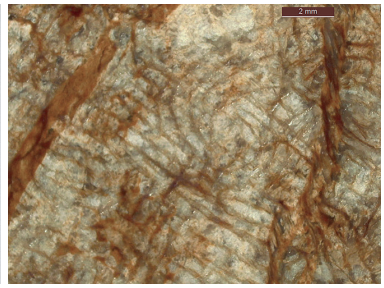
12–经火玉琮





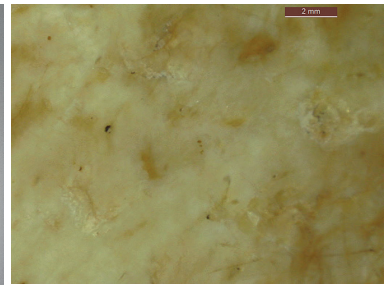
15–褐沁青玉琮





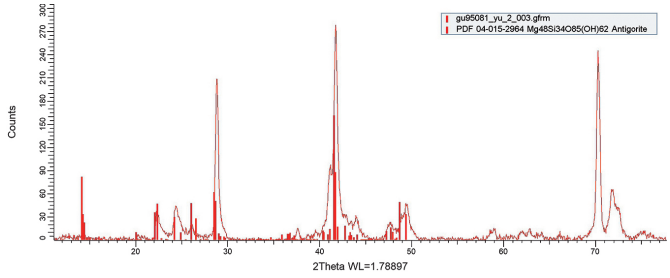
52–玉神人兽面纹璜

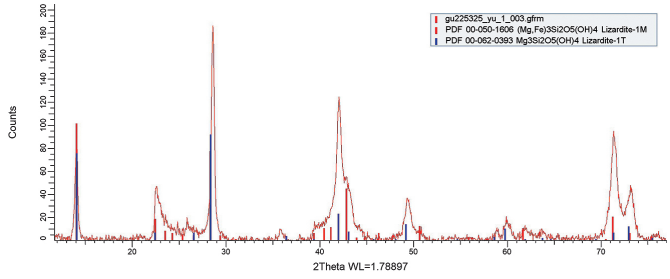




6–乾隆题诗青玉光素璧

〔图十〕蛇纹石质玉器的X射线衍射图







43–满褐沁琮式管



49–玉光素管

〔图十一〕部分玉器的斑状变晶结构



1. 17–青玉琮



2. 18–青玉琮

院藏部分玉琮因乾隆皇帝改制磨去沁色层而露出了原始玉料，为我们研究良渚玉器原料特征和玉料受沁前后的变化提供了可能。在两件玉琮的内壁上，观察到原始玉料的斑状变晶结构。[表一：17]青玉琮磨光内壁后改制成香薰，通体受沁呈褐黄色－黄白色，局部褐呈红色，沿绺裂分布，蜡状光泽，从内壁口沿处可以看出表面沁色深度大概在3－5毫米。原玉料呈豆绿－青绿色，微透明，油脂光泽，颜色呈斑块聚集，隐晶质结构。[表一：18]青玉琮，通体受沁，外表呈褐色－黄白色，见深褐色绺裂纹路，蜡状光泽。内壁口沿处见沁色渐变分布，原玉料灰青色，微透明，油脂光泽，斑状变晶结构。这两件器物都出现极其特征的斑状变晶结构，如〔图三：1，图十一〕。经过拉曼光谱检测，斑晶处和基底处均为闪石，可见这两件玉料中的斑状变晶结构是闪石玉在形成过程中，交代早期粗粒矿物而形成的残余结构。形成此类结构的玉石并不是直接通过流体沉淀而成，应属于R型软玉[1]。

另一种常见的结构是放射状、帚状变晶结构，这种结构在灰绿－墨绿玉璧和玉琮上较为明显，反映了这类玉石在早期粗粒矿物结晶时获得了较为宽松的生长空间。如[表一：5]青玉璧原料为墨绿色、半透明、亚玻璃光泽，纤维－放射状变晶结构，纤维束粗大〔图十二〕。

不同时期、不同地点良渚遗址出土的器物具有一脉相承的造型纹饰，但却可能有截然不同的玉料特征，前辈学者对这些玉器玉料进行过研究。古方认为闪石类玉器可分为黄绿－深浅不一的绿色且玉质纯净细腻类，浅褐色至墨绿色且绺裂斑杂类，以及“鸡骨白”或“象牙黄”类[2]；蒋卫东依据纤维结构差异将其分为结构细腻的湖绿色类和可见绢云母交杂的暗绿色类，前者受沁后呈鸡骨白色，后者受沁后呈五色斑杂[3]；郭明建将其分为纯色料、杂色料和鸡骨白，并且强调良渚文化还有颜色较黄的玉器以及整体呈黄褐

‹1› 丘志力等《新疆和田地区和田玉两种成玉机制探讨》，《吉林大学学报（地球科学版）》2015年7月。

‹2› 古方《良渚玉器部分玉料来源的蠡测》，《华夏考古》2007年第1期，第75－59页。

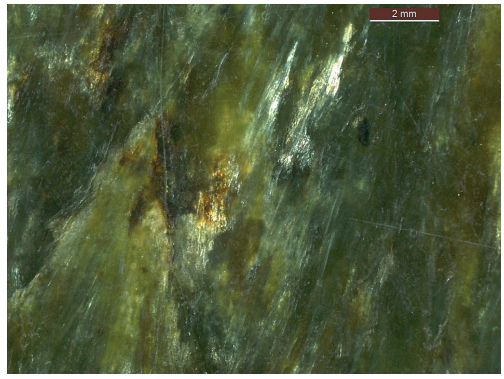
‹3› 蒋卫东《良渚文化玉器的原料和制琢》，浙江省文物考古研究所编《良渚文化研究——纪念良渚文化发现六十周年国际学术讨论会文集》，科学出版社，1999 年。

色、红褐色和茶褐色的玉器‹1›。

总结以上分类，前人皆提到在玉质结构上有细腻玉质和粗纤维两类，在颜色上，受沁前有黄绿色系和碧绿－墨绿色系，受沁后有鸡骨白、黄白、褐红－褐黄等系列。而本次检测的故宫博物院藏良渚玉器原料的特征颜色有白－青白色、黄绿色、青－青绿色、褐绿色、灰绿色、碧绿－墨绿色，特征沁色有白沁、黄白沁和经后期盘玩所呈的褐黄－褐红色，特征结构有斑状变晶结构和放射状/帚状变晶结构。其中[表一：52]玉神人兽面纹璜为本底白沁，同良渚核心区玉器玉料沁蚀状况相似，另一件[表一：5]青玉璧为灰绿－墨绿色，表面纱网状白色沁同良渚晚期玉料特征相似，两者应为不同来源，说明乾隆时期多期或多地的良渚文化玉器已经进入宫廷。

〔图十二〕5-青玉璧的斑状变晶结构





（二）玉料的产地来源信息

一般将透闪石－阳起石质玉的成因分为两类，一类是由基性/中酸性侵入体与富镁变质岩(大理岩)/沉积岩(白云岩或白云质灰岩)之间的变质作用，产出的白玉－青玉、青花玉等；另一类是蛇纹石化超基性岩与钙质围岩的变质作用形成的透闪石－阳起石玉，一般产出碧玉，基本都是沿蛇绿岩带分布‹2›‹3›。蛇纹石玉成因和闪石玉相似，一种是由富镁碳酸盐岩蚀变而成，如岫岩蛇纹石玉和信宜玉，另一种是由超基性岩自变质作用形成，为中低温热液矿床。

此次测试的玉璧和高节琮呈碧绿－墨绿色，致色元素为Fe元素〔图十三〕，这批玉器的Cr、Ni含量低于0.01%，与大理岩型闪石玉、蛇纹石玉特征一致，可排除超基性岩成因。所以即使玉璧、玉琮的颜色为灰绿－深绿，也能排除新疆玛纳斯、台湾花莲等超基性岩成因的典型碧玉产地。

邓淑苹先生根据自己多年史前玉器的研究经验，结合闻广先生等地质学者的岩矿分析工作，将史前时期多文化玉器的玉料来源从大区域以大兴安岭－太行山－巫山－雪峰山为界限，分为华东玉料和华西玉料，并认为华东区域范围内有五类特征玉料。张跃峰建立了基于微量元素的闪石玉产地溯源方法，并应用于良渚文化庄桥坟遗址出土的4件黄绿－青绿色闪石玉器的玉料来源分析，认为其中至少有2件

‹1› 前揭郭明建《良渚文化玉器产地的综合分析》。

‹2› 唐延龄、陈葆章、蒋壬华等《中国和田玉》，新疆人民出版社，1994年。

‹3› Harlow G E, Sorensen S S, "Jade (nephrite and jadeitite) and serpentinite:metasomatic connections", *International GeologyReview*, 2005.47. pp.113–146.

〔图十三〕青玉琮的颜色对比
（19–青玉琮Mg/（Mg+TFe）为0.88颜色较绿，20–青玉琮Mg/(Mg+TFe）为0.99颜色青灰）





玉器的玉料来自辽宁岫岩[1]。该研究从地球化学角度提供了良渚文化玉器玉料来自于东北地区的科学依据。在故宫博物院藏良渚玉器中，特征为黄绿色－青绿色、结构细腻的玉料具有典型的“华东玉料”特征，很可能是东北来源，有待今后进一步实验论证。

（三）结论

（1）X射线荧光能谱、拉曼光谱、红外光谱及X射线衍射的结果表明，56件玉器中有54件为透闪石－阳起石玉，2件为蛇纹石玉。

（2）所有测试样品的Cr、Ni元素含量均小于0.01%，与大理岩型闪石玉、蛇纹石特征一致，排除超基性岩成因。

（3）部分清宫旧藏故字号和琢刻御题诗的玉器的玉料和沁色特征，指向不同的埋藏环境，说明乾隆时期多地或不同时期的良渚文化玉器已经进入宫廷。

（4）故宫博物院藏良渚玉器中，特征为黄绿色－青绿色、结构细腻的玉料具有典型的“华东玉料”特征，很可能是东北来源。

附记：本文得到了故宫博物院文保科技部史宁昌研究员、雷勇研究员的大力支持，检测过程得到了文保科技部侯佳钰、赵丽、张毅、王雪莹，器物部张林杰、黄英、刘晶莹、刘思桐、杨立为、刘梦媛等老师们的大力协助，以及中山大学地球科学与工程学院丘志力教授的指导，在此谨致谢忱。

［作者单位：罗涵、李合、屈雅洁、康葆强，故宫博物院文保科技部；
徐琳，故宫博物院器物部；张跃峰，中山大学地球科学与工程学院］

（责任编辑：何　芳）

‹1› 张跃峰《北山及敦煌造山带古采矿遗址（群）软玉成矿体系：深部地质过程响应及其对丝绸之路华夏早期玉石文明的影响》，中山大学博士学位论文，2021年，第138页。