

# 甘肃马衔山软玉成矿及玉料产地来源 地质地球化学特征分析\*

张钰岩<sup>1</sup>, 丘志力<sup>1,4</sup>, 杨江南<sup>2</sup>, 张跃峰<sup>1</sup>, 杨翰<sup>1</sup>, 杨炯<sup>3</sup>, 李榴芬<sup>1,4</sup>

(1. 中山大学地球科学与工程学院//宝玉石研究鉴定(评估)中心, 广东 广州 510275;

2. 兰州大学博物馆, 甘肃 兰州 730000;

3. 泰山学院旅游学院, 山东 泰安 271021;

4. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

**摘要:**甘肃马衔山软玉矿矿化见于新元古界马衔山群一套混合岩、大理岩、黑云母片岩组成的变质地层内,被认为是新石器时代晚期齐家文化玉器玉料的重要来源之一。在野外考察采样基础上,采用X射线粉末衍射、扫描电镜、电子探针、ICP-MS、LA-ICP-MS等测试技术,对马衔山成矿围岩及其软玉玉料进行了矿物、岩石及地球化学分析,确定了该地软玉矿物组成、结构构造和主微量、稀土元素组成;在此基础上探讨了马衔山软玉成矿及产地来源的地质地球化学特征。获得以下主要认识:①马衔山软玉具片状变晶结构和纤维交织结构,玉料主要由透闪石、少量楣石、微量黝帘石及磷灰石组成,优质玉料透闪石含量可达98%以上;②透闪石为3个不同时期矿化产物,成玉主要和中晚期的透闪石化有关。玉料属于镁质大理岩成因,成玉主要和晚期的碱性花岗岩侵入形成的交代变质作用有关;③马衔山软玉微量元素组成,稀土元素含量及分布模式和新疆和田、青海地区及辽宁的软玉有所不同。微量元素具有Th/U高、Cu低特点,稀土元素含量低、具有“海鸥式”稀土元素配分模式等可以作为该产地玉料的源区特征。

**关键词:**软玉;成矿;地球化学;产地来源特征;甘肃马衔山

中图分类号: P588.1 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2018)02-0001-11

## The geological and geochemical characteristics of nephrites in Maxianshan, Gansu province and their implication for raw material source of the *Qijia Culture* jadewares

ZHANG Yuyan<sup>1</sup>, QIU Zhili<sup>1,4</sup>, YANG Jiangnan<sup>2</sup>, ZHANG Yuefeng<sup>1</sup>, YANG Han<sup>1</sup>, YANG Jiong<sup>3</sup>, LI Liufen<sup>1,4</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering//Gem Testing and Appraisal Center,

Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Museum of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. School of Tourism, Taishan University, Tai'an 271021, China;

4. Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resources,  
Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Maxianshan nephrite ore in Gansu Province was found in the Neoproterozoic Maxianshan

\* 收稿日期: 2017-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(41173041, 41673032); 山东省自然科学基金(ZR2015DM008)

作者简介: 张钰岩(1992年生), 男; 研究方向: 矿物与岩石学, 矿床学; E-mail: Zhyuyan3@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 丘志力(1963年生), 男; 研究方向: 宝玉石成矿与重大地质作用过程及古玉文明演化; E-mail: qiuzhili@mail.sysu.edu.cn

group, a set of metamorphic strata consisting of migmatite, marble and biotite schist, which was regarded as one of the most important material sources of the nephrite jades of the *Qijia Culture*. In order to find out the probability of the Maxianshan nephrites as the raw materials of the nephrite jades of the *Qijia Culture*, the combined field investigation and instrumental analyses of XRD, SEM, EMPA, ICP-MS and LA-ICP-MS are applied to analyze the mineralogy, petrology and geochemistry of Maxianshan nephrites and their country rocks, including mineral composition, structure feature, and chemical composition of the nephrites such as major & trace elements, rare earth elements, and therefore to explore the mineralization of the Maxianshan nephrite mine. The main findings are summarized as follows: ① Maxianshan nephrites are yellow-white to yellow-green (mostly green) in color, characterized by lamellar amorphous structure and fiber interwoven structure, and composed of more than 98% amount of tremolite mineral and tiny amount of sphene, zoisite and apatite minerals; ② The tremolite minerals in nephrites were formed in three mineralization periods, and the principal nephrite ore is mainly related to the tremolites of middle and late periods. The formation of jade grade nephrites was associated with marbleization caused by metasomatism in connection with late intruded alkali granites; ③ The Maxianshan nephrite is characterized by high Th/U, low Cu and REE element, and seagull REE distribution pattern, being different from other nephrites from Hetian of Xinjiang, Qinghai and Liaoning.

**Key words:** nephrite; mineralization; geochemistry; origin characteristics; Maxianshan of Gansu

马衔山玉矿是齐家文化玉器分布区域内一个重新被发现的矿点, 该矿点玉料的开采历史较长, 但目前对这个矿点玉料的科学研究尚未见正式报道。齐家文化是分布在黄河上游地区、范围覆盖甘肃、宁夏、青海、内蒙古等 4 省区, 时间跨度大约在公元前 (2200 - 1600) 年。考古器物的研究认为齐家文化主要是以陶器和红青铜器为特色的一支重要的考古学文化<sup>[1-2]</sup>。然而, 随着进一步的发掘, 在齐家文化分布范围内, 尤其是青海、甘肃一带, 数量繁多、质量精美的齐家文化玉器陆续出土, 在齐家文化玉器的重要性开始被重新认识<sup>[3-4]</sup>; 进一步的考古学研究初步得出, 马衔山玉矿的玉料可能是齐家文化玉器玉料的重要来源<sup>[3,5]</sup>。本文通过对马衔山玉矿进行野外考察采样, 对玉料的地质地球化学特征进行研究, 并探究其玉料成矿期次与成因等, 为尚处于起步阶段的齐家文化玉器用料来源溯源提供基础的岩石矿物地球化学依据。

## 1 区域地质及成矿围岩

### 1.1 区域地质概况

马衔山位于甘肃省兰州市南部的临洮县峡口镇, 地处兴隆山南侧, 呈西北、东南走向, 平均海拔 3 000 m 以上; 软玉矿位于峡口镇政府北约 9 km 处马衔山脉南部余脉, 地理坐标为东经 104°4'16", 北纬 35°39'8"。

区域构造上, 马衔山矿点位于中祁连造山带东

段隆起带上, 该区古生代以来以褶皱隆起为主, 山体地形陡然耸立, 两侧谷地地形低缓, 高差较为悬殊<sup>[6]</sup>。祁连地区中间隆起带的雏形最早形成于早元古代末期, 一套递增变质中压相系的高绿片岩-高角闪岩相岩石构成了该区的变质基底, 强烈的区域动力热变质作用导致该区岩石出现明显的混合岩化和混合花岗岩化作用, 中、上元古界地层曾遭受强烈区域动力变质作用的影响, 形成多个北西向和东西向区域性复式褶皱构造。根据碎屑锆石年龄频谱、岩浆锆石年龄、铍同位素模式年龄、地层对比以及古生物演化等证据, 有学者认为晚元古代时矿点所在的祁连地块与扬子地块已经拼贴为统一的地块<sup>[6-10]</sup>。

马衔山岩体的平面形状总体呈北西-南东向的长卵圆形, 长轴展布方向与区域构造线一致, 出露面积约 170 km<sup>2</sup>。横剖面上, 片麻岩的片麻理产状在北东区向西陡倾、南西区则向南西倾斜, 片麻状构造显示本区呈倒转复式斜歪背形, 向北东倒转, 轴部由马衔山群下组组成 (图 1)<sup>[6-10]</sup>。

马衔山玉矿点附近主要出露的地层为前震旦系马衔山群花岗杂岩体、大理岩、下震旦统兴隆山群硅质灰岩、下震旦统高家湾组碳酸盐岩、少量前寒武系皋兰群石英片岩、白垩统河口群砂岩及砂砾岩等<sup>[7-8]</sup>, 其中和玉矿脉最密切接触的是前震旦马衔山群黑云母片岩、大理岩、二长花岗岩和钾长混合花岗岩, 其中钾长混合花岗岩多见眼球状构造。矿

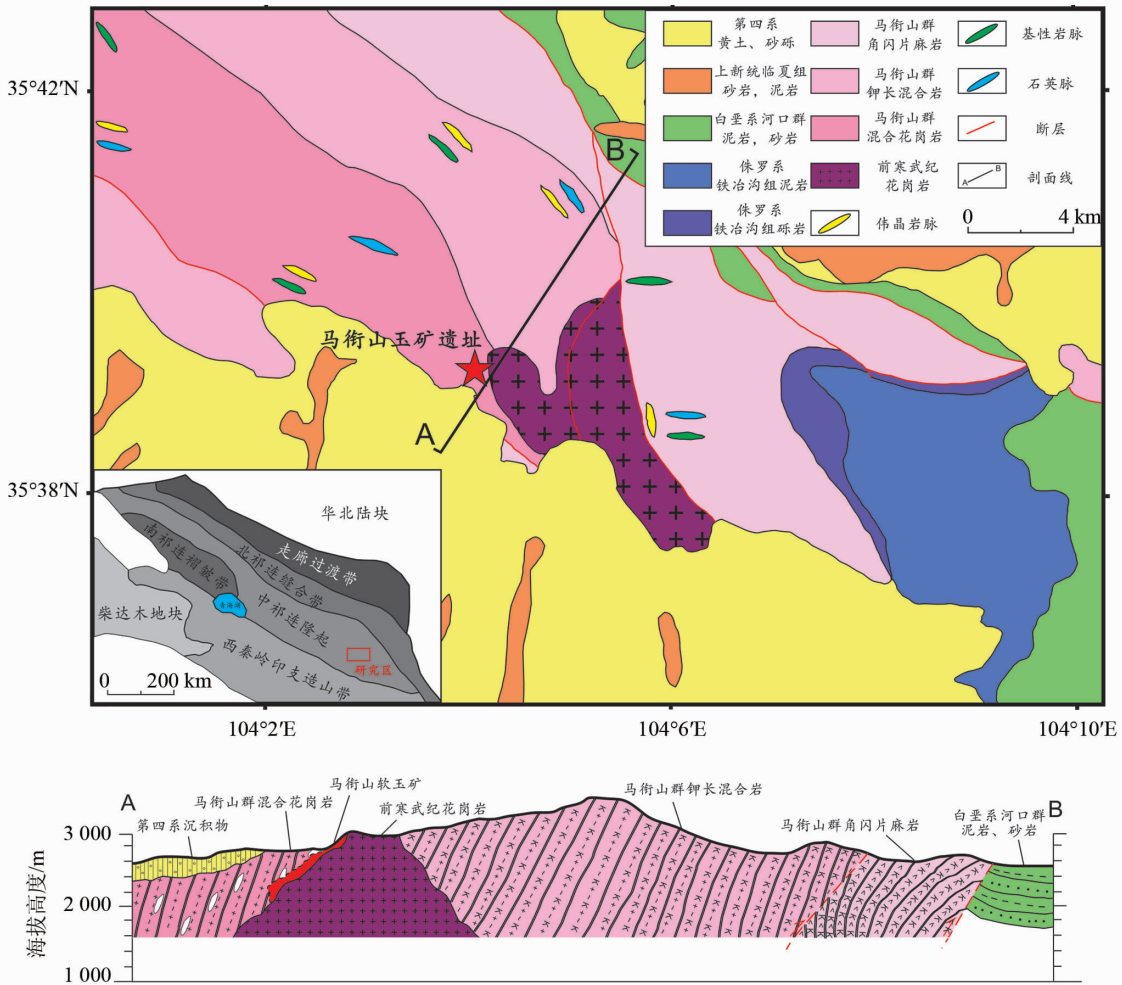


图 1 马衔山地区简化地质构造图及马衔山软玉矿化剖面图 (根据文献 [9], 1:20 万地质图 I4803 幅等修改)  
 Fig. 1 The sketch map of tectonic location & geology and cross section of Maxianshan nephrite mine

点附近可以见到颇多的花岗伟晶岩脉及石英/硅质脉穿插矿体, 显示成矿区域后期富含挥发分并有多余的硅质流体活动。

### 1.2 马衔山玉矿围岩及其基本特征

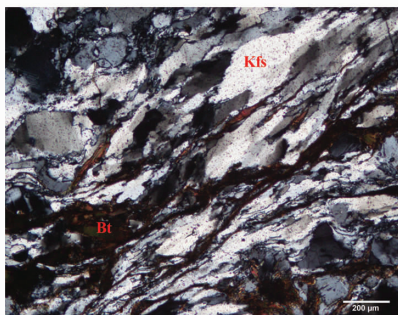
马衔山软玉矿的围岩由马衔山群的一套花岗杂岩体、大理岩、黑云母片岩组成, 其主要岩性为二长花岗岩和钾长花岗岩 (属于马衔山群花岗杂岩体), 因后期热液作用, 部分二长花岗岩和钾长花岗岩发生变质。而与马衔山软玉矿成矿联系紧密的成矿围岩主要为蛇纹石化大理岩及部分透辉岩。

**1.2.1 围岩矿物组成特征** 野外以及显微镜观察表明, 玉矿围岩为马衔山群花岗杂岩体, 以粗中粒变晶结构, 眼球状、片麻状构造为特征, 眼球含量变化在 20% ~ 50%。眼球状花岗岩中, 眼球主要是由钾长石碎斑构成 (图 2a), 少量为斜长石。其

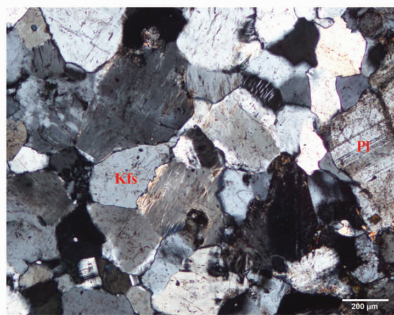
形态特征为不对称透镜状 (眼球状), 粒径多为 1 ~ 1.5 cm, 个别大至 2 cm × 4 cm。总体上, 岩体变形不均匀, 构造强应变带与弱应变域呈间列分布。强应变带的岩石多具糜棱结构 (图 2a), 眼球状和条带状构造, 具糜棱岩化特点; 弱应变域的岩石则以粒状变晶结构 (图 2b)、块状构造为特征。

**1.2.2 矿化围岩矿物组成特征** 与马衔山软玉矿成因联系更紧密的矿化带围岩为部分蛇纹石化大理岩及透辉岩 (图 2)。大理岩中可见钾长石、透辉石 (图 2 (c-d)) 等矿物, 可见糜棱结构 (图 2c), 其中部分大理岩方解石可见残余变晶结构 (图 2e), 边缘发生重结晶或少量的透闪石化。透辉岩主要组成矿物有透辉石及少量透闪石。透辉石常呈柱/粒状变晶结构或镶嵌结构 (图 2f)。

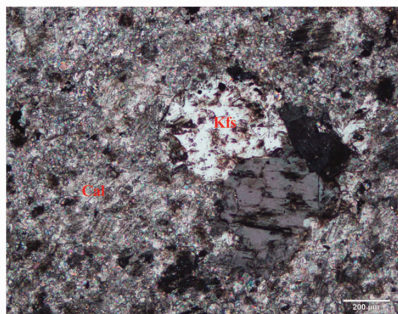
(a) 糜棱岩化的钾长花岗岩



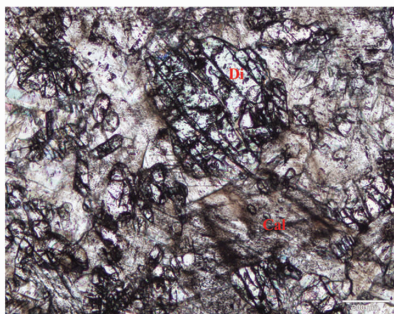
(b) 钾长岩中具有 的变晶粒状结构



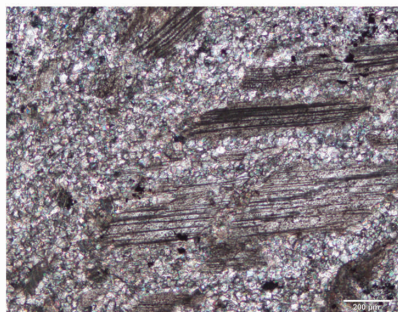
(c) 大理岩中的糜棱结构



(d) 矽卡岩化大理岩



(e) 大理岩中两期方解石



(f) 透辉岩

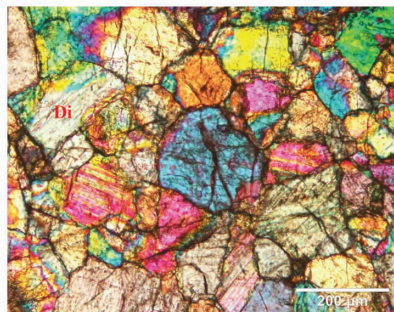


图 2 马衔山软玉矿围岩显微镜下照片 ((d) 为单偏光, 其他均为正交偏光)

Fig. 2 Microscopic photos of surrounding rocks of Maxianshan nephrite mine

## 2 样品及测试方法

### 2.1 样品情况

马衔山矿点出露在马衔山山脉的半山腰上, 现在零星开采的矿点上方可见古代开采遗址, 但遗址已被后期的采挖活动破坏, 有学者认为遗址的开采活动始于清代道光年或者更早<sup>[5]</sup>。马衔山玉矿的规模不大, 主要以地方民众零星开采为主, 采矿主要沿马衔山群大理岩和后期花岗岩的接触带附近展开, 大理岩可见明显的蛇纹石化, 有 3 个不同采矿层位, 部分层位可以见到较多的蛇纹石质玉石, 其中下部层位的开采规模最大。马衔山玉矿的玉料, 主要来自采矿点附近的山地 (山流水料) 及正在

开采的玉矿点 (山料), 对民间人士的调研显示, 部分马衔山玉料的子料可以在下游的大碧河中捡到。

本文研究所用的玉料均采自马衔山玉矿矿体, 样品主要为黄白、黄绿色及绿色 (图 3), 通常为半透明 - 不透明, 蜡状光泽至油脂光泽, 折射率 1.61 ~ 1.62, 密度为 2.85 ~ 2.98 g/cm<sup>3</sup>, 平均 2.93 g/cm<sup>3</sup>, 与国内其他产地如新疆和田、青海、辽宁岫岩、江苏小梅岭等<sup>[11-22]</sup>软玉基本特征一致。

本文主要对 8 块玉料样品中的 3 个样品 (LM-01, LM-11, LM-12) 进行了地球化学特征分析, 对 5 个样品 (MXS-J1, MXS-J2, MXS-J3, MXS-J4, MXS-J5) 进行了岩相、矿相分析测试。

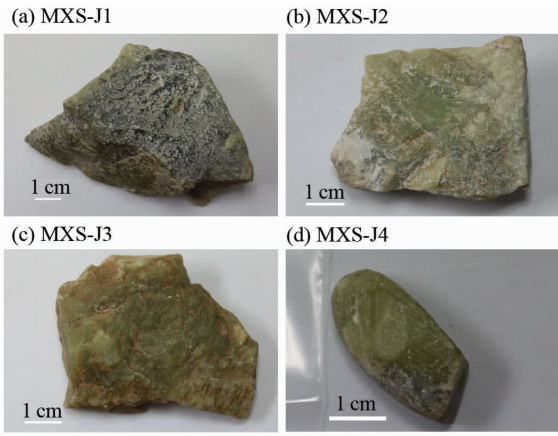


图 3 马衔山软玉矿玉料

Fig. 3 The rock hand specimen photos of Maxianshan nephrites

## 2.2 测试方法

采用显微镜薄片观察法，扫描电镜、X 射线衍射、电子探针、LA-ICP-MS 等测试方法进行了研究。扫描电镜观测测试在中山大学测试中心完成，采用日本电子株式会社生产的 Field Emission Scanning Eletron Microscope，型号为 JSM-6330F。加速电压为 25 kV，分辨率为 1.5 nm。电子探针测试在中山大学测试中心完成，仪器为日本电子株式会社生产的 JXA-8800R 电子探针测试仪，加速电压 15 kV，束斑最小直径 1  $\mu\text{m}$ 。X 射线衍射测试在中山大学化学与化学工程学院中心实验室完成。实验采用日本理学 RIGAKU 所生产的 X 射线粉晶衍射仪。实验条件为 40 kV，100 mA；扫描范围  $5^\circ \sim 70^\circ$ ，步进扫描速度为  $10^\circ (2\theta) / \text{min}$ ，步长  $0.020^\circ$ 。

微量元素含量测试在武汉上谱分析科技有限责任公司分析测试中心利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成。激光剥蚀等离子发射光谱及质谱 (LA-ICP-MS) 测试在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成，ICP-MS 为 Agilent7700e。

## 3 结果

### 3.1 矿物组成及结构特征

薄片观察显示，马衔山软玉中透闪石矿物的含量普遍在 95% ~ 98% 之间，部分样品中可见少量残斑透辉石、透闪石和楣石等。透闪石主要呈柱状、针状和隐晶质纤维状 3 种，软玉结构主要有 4 种：① 片状变晶结构 (图 4b)，是较常见的一种结构。该结构常见于玉石与围岩的交接带，纤维状透

闪石彼此紧密结合，形成片状集合体，颗粒最长可大于 50  $\mu\text{m}$ ，最宽可达 25  $\mu\text{m}$ ，具有弱定向性。具有此种结构的透闪石颗粒较粗，玉质感较差，韧性一般，大部分马衔山软玉玉质感较差与此有关。② 纤维交织结构 (图 4a)，不常见，但具有此结构类型的软玉其玉质较好。它是由不同排列方向的透闪石变晶以不同角度相互交织、缠结而成，无明显顺序。颗粒粒径  $< 2 \mu\text{m}$ ，长度 5 ~ 15  $\mu\text{m}$  不等。这种结构是软玉具有良好韧性的主要原因<sup>[11-12]</sup>。③ 斑状变晶结构 (图 4c)，由相对尺寸明显较大的柱状透闪石变晶分布于由细小纤维状透闪石变晶等组成的基质中形成。斑晶长可达 50  $\mu\text{m}$ ，宽一般小于 25  $\mu\text{m}$ 。部分柱状斑晶已被后期形成的纤维状透闪石交代。④ 毛毡状交织结构 (图 4d)，出现于部分质量质地较细腻 (玉质感好) 的软玉样品中，其中透闪石纤维均一，直径一般小于 3  $\mu\text{m}$ ，一般杂乱状紧密交织成毡状。

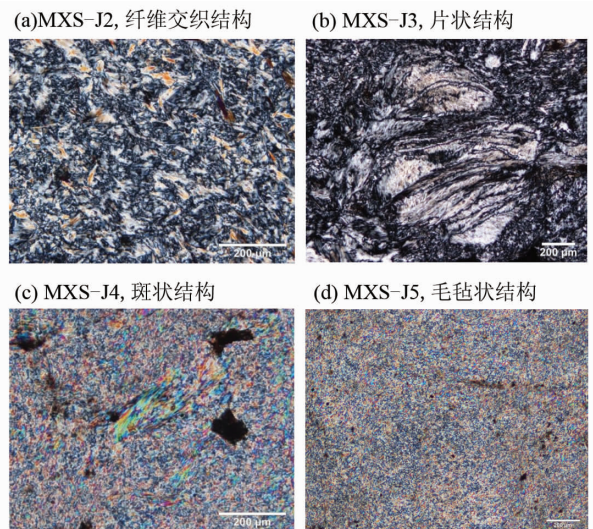


图 4 马衔山软玉正交偏光下的显微变晶结构  
Fig. 4 Microscopic photos of crystalloblastic textures of tremolites of Maxianshan nephrites

扫描电镜下观察显示 MXS-J4 和 MXS-J5 两个样品玉质感较好 (图 5 (a, b))，呈显微纤维交织结构及显微捆状 (帚状) 变晶结构。其透闪石矿物纤维细长，部分纤维直径  $< 1 \mu\text{m}$ ，纤维紧密结合，相互穿插交错或聚集成束状、捆状。这种特殊的穿插交错结构使透闪石纤维之间产生了一种机械结合力或绞合力<sup>[11,23]</sup>，增强了软玉的韧度。

MXS-J2 和 MXS-J1 样品为玉质感一般的样品 (图 5 (c, d))，呈显微斑状变晶结构和显微片状变晶结构。透闪石纤维较上述玉质感好的样品更粗

大,多呈柱状或片状结合。相互交织的紧密程度较低,致使透闪石纤维之间的机械结合力较低,观感上呈现为软玉质地一般。

有葡萄石的衍射峰外,其他样品均表现为较纯的透闪石矿物特征峰。

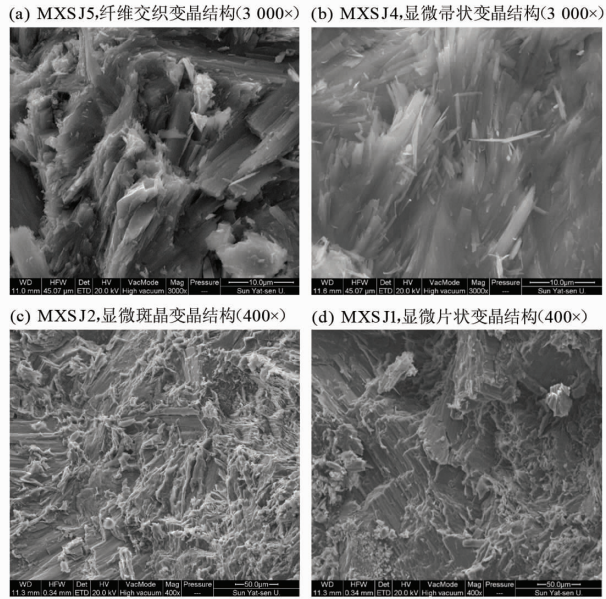


图 5 甘肃马街山软玉 SEM 图像

Fig. 5 SEM photograph of tremolites in Maxianshan nephrites

### 3.2 谱学特征

马街山软玉 X 射线粉末衍射图谱主要谱峰位和强度基本一致,且与标准透闪石衍射图谱基本一致(见图 6)<sup>[24]</sup>。除样品 MXS-J3 在  $2\theta = 51.70^\circ$  处,

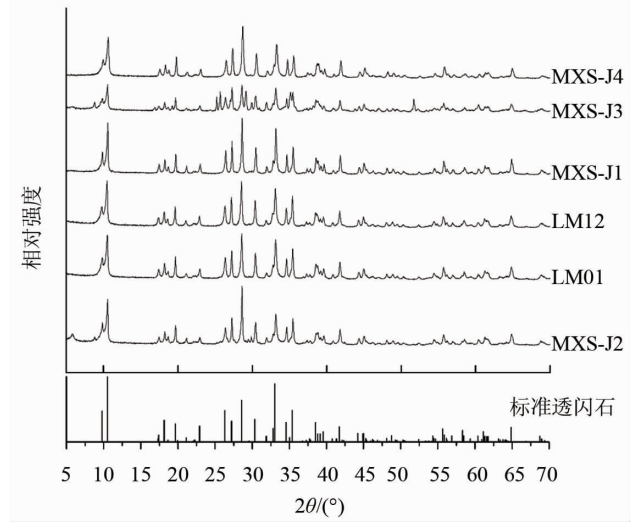


图 6 马街山软玉 X 射线衍射图谱

Fig. 6 The XRD patterns of Maxianshan nephrites

### 3.3 透闪石矿物主量元素

马街山软玉样品电子探针测试结果见表 1。透闪石矿物的主要成分  $\text{SiO}_2$ , 为 57.74% ~ 58.93%, 平均 58.40%;  $\text{MgO}$  为 23.60% ~ 24.24%, 平均 23.83%;  $\text{CaO}$  为 13.17% ~ 13.70%, 平均 13.41%。样品总量 96% ~ 98%, 说明软玉中含有 OH 等电子探针难以探测的成分。

表 1 马街山软玉和其他产地软玉中透闪石的主量元素化学组成<sup>1)</sup>

Table 1 Major element compositions of tremolite of the nephrites from Maxianshan and other locations in China

产地	样品号	$w_B/\%$										$\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$
		$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{FeO}$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	Total	
马街山	LM01-1	57.74	0.31	-	1.05	0.06	23.71	13.70	0.07	0.02	96.66	0.976
	LM01-2	57.85	0.40	-	1.01	0.05	23.62	13.46	0.06	0.03	96.48	0.976
	LM11-1	59.02	0.69	-	0.34	0.02	24.24	13.36	0.03	0.05	97.74	1.000
	LM11-2	58.47	0.60	0.02	0.35	0.05	23.60	13.17	0.06	0.05	96.35	1.000
	LM11-3	58.93	0.82	-	0.29	0.07	23.97	13.35	0.07	0.05	97.54	1.000
其他产地	新疆 <sup>[25]</sup>	57.66	0.93	0.09	1.33	0.09	24.26	12.65	0.27	0.27	97.55	-
	青海 <sup>[14]</sup>	59.14	0.71	0.05	2.44	0.06	23.95	11.79	0.37	0.37	98.88	-
	江苏 <sup>[15]</sup>	57.01	0.03	0.03	0.04	0.06	23.42	11.54	0.45	0.30	92.88	-

1) - 表示无数据。以 23 个氧离子数为基准计算得到透闪石阳离子组成。透闪石属于闪石族矿物中的钙质闪石亚族,是透闪石-铁阳起石系列矿物。

依据表 1 结果，马衔山软玉透闪石样品中的  $(Ca^{2+} + Na^+) \geq 1.34, Na^+ < 0.67, (Na^+ + K^+) < 0.5, Si^{4+} \geq 7.50, Mg^{2+}/(Mg^{2+} + Fe^{2+}) \geq 0.9$ ，判断其主要矿物成分为透闪石<sup>[26]</sup>。相比于新疆和田<sup>[25]</sup>、青海<sup>[14]</sup>和江苏小梅岭<sup>[15]</sup>软玉，马衔山软玉中透闪石的  $Na_2O、K_2O$  含量均较低。

### 3.4 透闪石微量元素

马衔山软玉微量元素含量见表 2，稀土元素配分形式见图 7。稀土元素在地壳岩石中分布广泛，是性质极相似的地球化学元素组（镧系元素），在地质、地球化学作用过程中经常作为一个整体而活动，除岩浆熔融及流体作用外，其他地质作用基本上难以破坏其整体组成的稳定性<sup>[28]</sup>，其分馏作用可灵敏地反映地质、地球化学过程的性质及其差异。因此，稀土元素常作为判断岩石、矿物成因来源的重要依据。钟友萍等<sup>[29]</sup>依据稀土元素组成及其分布模式对软玉产地来源判别进行了研究，并证明其应是一种有效的判别工具。

马衔山软玉样品的  $\Sigma REE$  值很低（图 7a），大部分样品的稀土元素分布曲线呈水平“海鸥状”，具有 LREE、HREE 分异不明显，Eu 负异常明显、Ce 无明显异常的特点，没有明显的 LREE、HREE 富集与亏损。

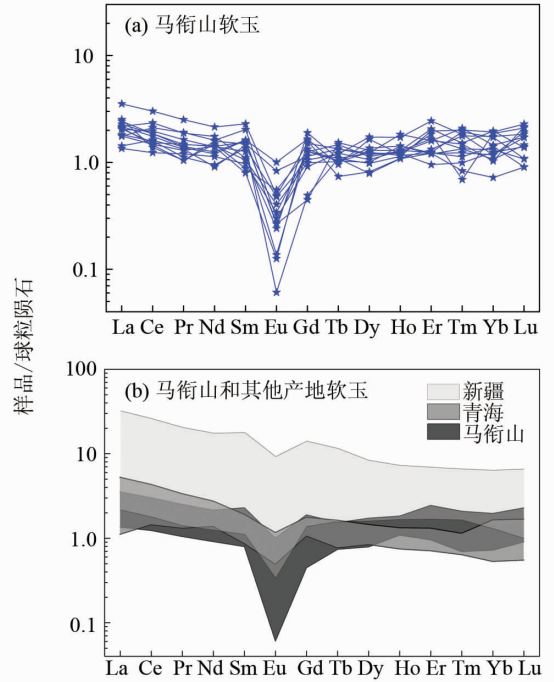


图 7 马衔山软玉球粒陨石标准化稀土配分模式以及与其他产地的对比<sup>[29]</sup>

Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution patterns of Maxianshan nephrites and their comparison to other nephrites from Xinjiang and Qinghai<sup>[29]</sup>

表 2 马衔山软玉和其他产地软玉微量元素<sup>1)</sup>

Table 2 Trace element compositions of nephrites from Maxianshan and other locations in China  $w_B/(mg \cdot kg^{-1})$

编号	马衔山软玉					其他产地软玉		
	LM01-1	LM01-02	LM01-03	LM12-01	LM11-02	新疆 <sup>[13]</sup>	辽宁 <sup>[27]</sup>	青海 <sup>[25]</sup>
Li	5.52	6.77	5.96	11.80	8.49	-	-	2.52
Be	11.90	12.50	13.00	20.70	18.30	3.47	13.60	1.23
Sc	1.28	1.99	2.10	1.20	1.57	0.28	-	-
V	14.80	11.10	12.70	25.50	22.70	4.30	17.60	19.30
Cr	19.60	10.10	12.50	99.10	2.47	2.32	7.48	9.03
Co	3.76	3.88	3.49	1.15	0.34	4.99	5.06	1.81
Ni	4.96	2.72	2.48	6.06	0.58	66.60	2.31	6.15
Cu	0.60	0.05	0.16	1.30	0.48	8.29	4.76	7.74
Zn	105.00	108.00	109.00	88.60	90.10	204.00	2.48	38.60
Ga	1.27	1.46	1.07	2.21	1.89	0.47	1.08	-
Rb	1.12	1.34	0.97	13.50	3.45	3.28	-	-
Sr	5.68	7.00	6.91	5.80	5.15	8.96	-	7.06
Zr	16.50	11.40	14.30	8.25	10.10	6.95	-	-
Nb	3.03	0.72	0.60	5.35	4.18	0.23	5.75	-
Sn	0.24	1.09	0.73	0.40	1.21	0.72	7.07	-
Cs	0.47	0.71	0.56	2.23	1.09	1.07	2.32	0.53
Ba	5.46	5.19	4.58	6.50	5.12	6.82	-	4.21
Hf	0.63	1.49	1.90	0.23	0.29	0.16	0.16	-
Ta	0.10	0.02	-	0.09	0.05	0.02	0.29	-
Pb	1.67	3.18	2.53	6.22	8.45	4.84	10.20	5.07
Th	13.70	5.37	5.11	0.73	0.40	0.07	0.91	0.30
U	1.44	0.58	0.55	1.00	0.66	0.89	9.74	0.76

1) - 表示无数据

## 4 讨论

### 4.1 马衔山软玉成矿期次及成因类型

显微镜下观察显示, 马衔山软玉中的透闪石存在不同的结构类型。

早期柱状、斑状透闪石: 该期次透闪石粒度较大, 其柱体长度集中在  $750 \sim 850 \mu\text{m}$ , 宽度集中在  $250 \mu\text{m}$  左右, 也有柱体长达  $1270 \mu\text{m}$  和短至  $153 \mu\text{m}$  者; 晶形较完整或者成残斑状, 横截面可见菱形切面; 在平行于柱面的方向上一组解理较为发育, 个别可见两组解理。

中期针柱状透闪石: 粒度较小, 长度  $< 60 \mu\text{m}$ , 宽度  $< 40 \mu\text{m}$ , 半自形, 呈单晶或隐晶质集合体形式产出, 针状透闪石为主, 在其周边及内部可见交代早期粗粒透闪石现象, 针柱状透闪石无论大小, 相互穿插, 交织共生, 为同时期产物。但可见其边缘不平滑, 有时被更加细小的毛毡状透闪石交代, 保留针状柱形态的假象。因此, 纤维状透闪石期次晚于针状透闪石。

晚期纤维状透闪石: 该期次由极细小的、无定向性的纤维状透闪石以不同形态、不同角度相互交织而成, 显微镜下无法测量其大小。部分纤维状透闪石交代早期柱状透闪石及中期针状透闪石呈束状或放射状分布。

中晚期细针状透闪石因交代不完全而保留了早期柱状透闪石假象, 由此可见柱状透闪石形成早于针状、纤维状透闪石, 而毛毡状透闪石交代中期针柱状透闪石, 应该是最晚期产物。显然, 马衔山软

玉的形成可以分为早中晚 3 个成矿 (物) 期次, 对品质较好的玉料观察显示, 成玉主要和中晚两期的透闪石有关。

软玉的成矿主要分为大理岩交代和超基性岩变质 2 种类型。大理岩型软玉由花岗闪长岩和镁质大理岩接触交代而形成, 主要矿物成分以透闪石为主, 但是少数样品受地质环境影响也会变为阳起石; 第二种类型软玉以碧玉为主, 由超基性岩 (镁铁质岩石) 矿物变质形成, 主要化学成分为透闪石 - 阳起石<sup>[25,29]</sup>。

前人分析显示, 软玉的  $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$  值对判断软玉的成因类型具有明显的统计学意义<sup>[30-31]</sup>。 $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg}) = 0 \sim 7\%$  的镁质大理岩型软玉的比例可达 88%, 而蛇纹岩化超基性岩型软玉的  $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg}) = 7\% \sim 14\%$ 。不同计算方法表明, 直接用玉石氧化物成分的 Fe、Mg 原子数计算  $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$  所得结果是一致的<sup>[31]</sup>。一般根据 Cr、Co、Ni 含量进行联合判别, 也可结合野外地质情况分析。

马衔山软玉的  $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$  值计算结果及与其他软玉的对比值见表 3。马衔山软玉的  $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$  为  $0.77\% \sim 2.42\%$ , 均在小于 7% 的范围并且较低, 而与新疆和田、青海及江苏小梅岭的软玉等一致, 属于镁质大理岩交代成因。上述结果和该地软玉矿点矿化带围岩主要为透辉石、楣石、黝帘石及磷灰石等矽卡岩化矿物组合的特点相匹配, 也与 Cr、Co、Ni 微量元素丰度仍然较低相一致。

表 3 马衔山和其他产地软玉铁镁特征与成因类型关系

Table 3 FeO and MgO characteristics of nephrites from Maxianshan and other locations in China and their association with the genetic types

产地和样品	$w_B/\%$		$\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$	成因类型	
	FeO	MgO	%		
马衔山	LM01-1	1.054	23.708	2.42	
	LM01-2	1.014	23.623	2.34	
	LM11-1	0.336	24.240	0.77	镁质大理岩型
	LM11-2	0.349	23.595	0.82	
	LM11-3	0.290	23.967	0.67	
其他产地	新疆和田 <sup>[25]</sup>	1.33	24.26	2.96	镁质大理岩型
	青海 <sup>[14]</sup>	2.44	23.95	5.37	镁质大理岩型
	江苏小梅岭 <sup>[15]</sup>	0.04	23.42	0.08	镁质大理岩型

## 4.2 马衔山软玉产地来源的地质地球化学特征分析

马衔山软玉被认为可能是齐家文化中玉器文化玉料的重要来源, 而目前认为齐家文化玉器玉料可能的来源包括甘肃、新疆和青海<sup>[8]</sup>等地。因此, 确定齐家文化玉器用料的产地, 需要获得 3 种产地软玉产地来源的判别标志。本文以上述测试为基础, 结合前人研究, 从矿物组成、结构特征和稀土化学组成多个方面进行玉料产地来源的简要分析。

**4.2.1 主要矿物组成及结构特点** 目前我国几个具有代表性产地的软玉的矿物组成及其结构分别为: 新疆和田地区<sup>[11-13,16-18,20-21]</sup>、青海地区<sup>[14,16-21]</sup>及辽宁岫岩<sup>[13,16-18,22]</sup>地区的软玉以常含有石墨、磁铁矿及部分金属矿物为特征, 同时新疆和田和青海地区软玉的透闪石矿物结构细, 以纤维交织结构为主, 此外, 青海地区软玉在外部特征上表现出透明度较高, 有水线(透明度更高的小脉体)等特点; 江苏小梅岭<sup>[15,17-18]</sup>地区和辽宁岫岩地区的软玉则以透闪石矿物结构较粗, 多见柱状变晶结构为特征。

与国内其他代表性产地的软玉对比, 马衔山软玉在矿物组成上与其他几个产地的主要区别是副矿物含有榍石, 未见石墨及金属矿物的存在。因此, 含有较多榍石、无石墨及金属矿物的存在是马衔山软玉的重要特征, 是产地来源的矿物学标志之一。

虽然马衔山软玉也可见软玉纤维交织变晶结构、纤维放射状变晶结构、毛毡状变晶结构等<sup>[11-21]</sup>。但马衔山软玉片状变晶结构更为突出、结构定向性的特征较为明显(图 4b) 可以成为其产地来源的矿物结构佐证之一。

**4.2.2 玉料产地微量及稀土元素特征** 和新疆<sup>[13]</sup>、青海<sup>[25]</sup>及辽宁<sup>[27]</sup>软玉相比(表 2), 马衔山软玉的亲铁元素 Cr、Co、Ni、V 的相对含量除 Ni 较新疆和田低以外, 其余大部分高于或与其它两产地相近; 高场强元素 Sc、Th、U、Zr、Hf、Nb、Ta 等元素中, 除 Ta 以外, 其余大部分高于新疆, 而放射性元素 U 明显低于辽宁, 和新疆、青海相近, 但 Th/U 比值均明显高于对比的 3 个产地; 大离子亲石元素 Cs、Be、Ba、Rb、Sr、Li、Ga 出现分异, 其中 Li、Be、Ga 含量均略大于其他 3 个产地, Rb、Sr、Cs、Ba 的含量则与其他 3 个产地相似, 其中 LM12-1 的大离子亲石元素含量相比其他几个样品都高, 可能和交代的原岩有关; 和流体关系密切的有色金属成矿元素 Cu、Zn、Sn、Pb 中, Cu 含量则明显低于其他三个产地, Zn 含量较辽宁和青海产地高, 但低于新疆。总的来说, 和新

疆软玉相比, 马衔山软玉微量元素具有 Be, Cr, Th/U 高, Ni 和 Cu 低; 和青海软玉-辽宁软玉相比, 则具有 Zn, Th/U 高, Cu 低的特点。

由 3 产地软玉稀土元素球粒陨石标准化数据进行叠加分析(图 7b) 可知, 三产地软玉均存在 Eu 负异常, Ce 无明显异常, 稀土分布曲线呈近水平“海鸥状”的分布模式。所不同的是, 新疆和田软玉和青海地区软玉均存在另外一组呈现 LREE 轻微富集的样品, 但新疆软玉稀土含量相对更高, 而马衔山软玉稀土含量最低。上述特征显示, 新疆和青海地区软玉成玉过程有关的岩浆岩除碱性花岗岩外可能还有其他类型的中酸性侵入体。而目前所获得的马衔山软玉样品可能主要和分异程度较高的碱性花岗岩有关。显然, 稀土元素含量低及“海鸥式”的稀土元素配分模式,  $La_N/Yb_N$  值低, 可以作为马衔山软玉产地地球化学特征之一, 但需要结合其它的因素进行判别。

## 5 结 论

1) 甘肃新元古界马衔山群内马衔山软玉矿, 主要和一套花岗杂岩体(主要岩性为二长花岗岩和钾长混合花岗岩)、大理岩、黑云母片岩有关。软玉各项物理参数均与新疆和田玉相近。矿物组成为透闪石、可含榍石、少量磷灰石和黝帘石。

2) 透闪石矿物形态可见柱状、针状和纤维状形态, 片状变晶结构、显微榍状变晶结构为主。根据透闪石形态特点及其相互关系, 透闪石为三期不同矿化产物, 成玉主要和中晚期的透闪石化有关。玉料属于大理岩接触交代成因, “海鸥式”稀土元素分布模式特点显示成矿有关的岩浆岩主要和碱性花岗岩有关。

3) 软玉微量元素, 稀土元素含量及分布模式和新疆和田、青海地区及辽宁的软玉有所不同。其中, 微量元素具有 Th/U 高、Cu 低特点、稀土元素含量低、具有“海鸥式”稀土元素配分模式等可以作为其软玉产地来源的重要标志。

**致谢:** 北京大学玉器与玉文化中心吕宇斐先生参加了第一次野外考察, 和通信作者进行过富有启发的交流, 特此感谢。

## 参考文献:

- [1] 严文明. 甘肃彩陶的源流[J]. 文物, 1978(10):62-76.  
YAN W M. The origin and development of Gansu painted pottery [J]. Cultural Relics, 1978(10):62-76.

- [2] 孙淑芸, 韩汝玢. 中国早期铜器的初步研究[J]. 考古学报, 1981(3):287-302.  
SUN S Y, HAN R F. A preliminary study of early bronze ware in China[J]. Acta Archaeologica Sinica, 1981(3):287-302.
- [3] 谢晓燕. 齐家文化玉器研究[D]. 西安:西北师范大学, 2011.
- [4] 易华, 唐士乾. 正本清源说齐家——纪念齐家文化发现90周年[J]. 丝绸之路, 2015(13):32-36.  
YI H, TANG S Q. The introduction of the *Qijia Culture*—in memory of the 90th anniversary of the *Qijia culture* discovery[J]. Silk Road, 2015(13):32-36.
- [5] 古方. 甘肃临洮马衔山玉矿调查[R/OL]. [http://comment.artron.net-20141224-n693349\\_2.html](http://comment.artron.net-20141224-n693349_2.html). 2014-12-24.
- [6] 杨秀芬. 兰州地区地质构造的形成与发展[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 1983(2):58-64.  
YANG X F. The formation and evolution of geological tectonics in Lanzhou area[J]. Journal of Northwest Normal University(Natural Science), 1983(2):58-64.
- [7] WANG C Y, ZHANG H F, REN G H. Sub-microscopic textures and retrogressive metamorphic origin of Longxi nephrite[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 1990, 9(2):182-187
- [8] 董国安, 杨怀仁, 杨宏仪, 等. 祁连地块前寒武纪基底锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 2007, 13:1572-1585.  
DONG G A, YANG H R, YANG H Y, et al. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Precambrian basement in Qilian block and its geological significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 13:1572-1585.
- [9] 王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 等. 甘肃马衔山花岗岩杂岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年及其构造意义[J]. 地质学报, 2007, 81(1):72-78  
WANG H L J, HE S P, CHEN J L, et al. LA-ICPMS dating of zircon U-Pb and its tectonic significance of Maxianshan granitoid intrusive complex, Gansu province[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(1):72-78.
- [10] 徐旺春, 张宏飞, 柳小明. 锆石 U-Pb 定年限制祁连山高级变质岩系的形成时代及其构造意义[J]. 科学通报, 2007(10):1174-1180.  
XU W C, ZHANG H F, LIU X M. Zircon U-Pb dating limits the formation age and tectonic significance of the upper metamorphic rocks of Qilian Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 2007(10):1174-1180.
- [11] 吴瑞华, 李雯雯. 新疆和田玉石学特征及其扫描电镜研究[J]. 岩石学报, 1999(4):638-644.  
WU R H, LI W W. Study on petrological feature and SEM of Xinjiang Hetian Jade[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999(4):638-644.
- [12] 李举子, 吴瑞华, 凌潇潇, 李青会. 和田软玉的化学成分和显微结构研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2009(4):9-14.  
LI J Z, WU R H, LING X X, et al. Study on chemical compositions and microstructures of nephrite from Hetian [J]. Journal of Gems and Gemmology, 2009(4):9-14.
- [13] 周振华, 冯佳睿. 新疆软玉、岫岩软玉的岩石矿物学对比研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2010(3):331-340.  
ZHOU Z H, FENG J R. A petrological and mineralogical comparison between Xinjiang nephrite and Xiuyan nephrite [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010(3):331-340.
- [14] 冯晓燕, 张蓓莉. 青海软玉的成分及结构特征[J]. 宝石和宝石学杂志, 2004, 6(4):7-9.  
FENG X Y, ZHANG P L. Study on compositions and texture characteristics of nephrite from Qinghai Province [J]. Journal of Gems and Gemmology, 2004, 6(4):7-9.
- [15] 何明跃, 朱友楠, 李宏博. 江苏省溧阳梅岭玉(软玉)的宝石学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(S1):99-104.  
HE M Y, ZHU Y N, LI H B. Gemmological characteristics of Meiling jade from Liyang, Jiangsu Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2002, 21(S1):99-104.
- [16] 蒋壬华. 和田玉[J]. 上海地质, 1998(2):49-58.  
JIANG R H. Hetian jade [J]. Shanghai Geology, 1998(2):49-58.
- [17] 刘飞, 余晓艳. 中国软玉矿床类型及其矿物学特征[J]. 矿产与地质, 2009(4):375-380.  
LIU F, YU X Y. Classification and mineralogical characteristics of nephrite deposits in China [J]. Mineral Resources and Geology, 2009(4):375-380.
- [18] 鲁力, 边智虹, 王芳, 等. 不同产地软玉品种的矿物组成、显微结构及表现特征的对比研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2014(2):56-64.  
LU L, BIAN Z H, WANG F, et al. Comparative study on mineral components, microstructures and appearance characteristics of nephrite from different origins [J]. Journal of Gems and Gemmology, 2014(2):56-64.
- [19] 李冉, 廖宗廷, 李玉加, 等. 青海软玉中硅灰石的确定及其意义[J]. 宝石和宝石学杂志, 2004(1):17-19.  
LI R, LIAO Z T, LI Y J, et al. Wollastonite in Qinghai nephrite jade and its significance [J]. Journal of Gems and Gemmology, 2004(1):17-19.

- [20] 柴凤梅,帕拉提·阿布都卡迪尔. 和田软玉与青海软玉的宝石学特征对比研究[J]. 新疆工学院学报, 2000(1):77-80.  
CHAI M F, ABDULKADIR P. Comparative study of the gemological characteristics of nephrite of Hetian jade and Qinghai jade[J]. Journal of Xinjiang Institute of Technology, 2000(1):77-80.
- [21] 唐延龄,陈葆章,蒋壬华. 中国和田玉[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,1994:75-76.
- [22] 王时麒. 中国岫岩玉[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [23] 卢保奇,亓利剑,夏义本,等. 四川软玉猫眼的显微结构及扫描电镜研究[J]. 上海地质, 2007, 28(2):64-67.  
LU B Q, QI L J, XIA Y B, et al. The microstructure and SEM study on nephrite cat's eye from Sichuan province [J]. Shanghai Geology, 2007, 28(2):64-67.
- [24] 张永旺,刘琰,刘涛涛,等. 新疆和田透闪石软玉的振动光谱[J]. 光谱学与光谱分析,2012(2):398-401.  
ZHANG Y W, LIU Y, LIU T T, et al. Vibrational spectra of Hetian nephrite from Xinjiang [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012(2):398-401.
- [25] 张朱武,干福熹,承煊生. 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, 30(3):367-372.  
ZHANG Z W, GAN F X, CHENG H S. Chemical composition characteristic of nephrite formed by different metallogenic mechanisms and geological environments [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(3):367-372.
- [26] SCHUMACHER J C, 王立本. 角闪石电子探针分析数据中三价铁比值的估算[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(2):189-198.  
SCHUMACHER J C, WANG L B. Estimation of ferric iron ratio in electronic microprobe analysis data of amphibole[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(2):189-198.
- [27] 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):79-90.  
WANG S Q, DUAN T Y, ZHENG Z Z. Mineralogical and petrological characteristics of Xiuyan nephrite and its minerogenetic model[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2002, 21(S1):79-90.
- [28] 周国兴,赵恩好,岳明新,曹丹红. 稀土元素地球化学分析在地质学中的意义[J]. 地质与资源,2014(5):495-499.  
ZHOU G X, ZHAO E H, YUE M X, CAO D H. Geological significance of rare earth elements in geochemical analysis[J]. Geology and Resources, 2014(5):495-499.
- [29] 钟友萍,丘志力,李榴芬,等. 利用稀土元素组成模式及其参数进行国内软玉产地来源辨识的探索[J]. 中国稀土学报, 2013, 31(6):738-748.  
ZHONG Y P, QIU Z L, LI L F, et al. REE composition of nephrite jades from major mines in China and their significance for indicating origin [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2013, 31(6):738-748.
- [30] 闻广,荆志淳. 中国古玉地质考古学研究[C]//中国地质科学院地质研究所文集,1997.  
WEN G, XING Z C. Geological archaeology of ancient jades in China[C]//Anthology of the Institute of geology of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1997.
- [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.  
ZHU Q W, YANG R C, HAN Z L, et al. Archaeometric analysis of jade artefacts recovered from the tomb of the Marquise Yi of the Zeng State[J]. Jiangnan Archaeology, 2009(1):106-111.