



引文格式: 宋明伟, 彭义伟, 郎兴海, 等. 四川汶川“龙溪玉”地球化学特征及三星堆、金沙玉器的产地溯源[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 240–260. DOI: 10.12401/j.nwg.2024105

Citation: SONG Mingwei, PENG Yiwei, LANG Xinghai, et al. Geochemical Characteristics of Longxi Nephrite in Wenchuan and Origin of Sansandui and Jinsha Jades[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 240–260. DOI: 10.12401/j.nwg.2024105

四川汶川“龙溪玉”地球化学特征及三星堆、金沙玉器的产地溯源

宋明伟¹, 彭义伟^{1,*}, 郎兴海¹, 程文斌¹, 欧阳辉¹, 陈曦²,
赵甫峰¹, 彭磊¹, 蔡姬敏¹, 许文丽¹

(1. 成都理工大学地球与行星科学学院, 四川 成都 610059; 2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要: 四川龙溪玉在古蜀文化中扮演重要角色。为了探讨龙溪玉的地球化学识别标志及其与三星堆和金沙玉器矿料之间的关系, 笔者利用 X 射线粉晶衍射、X 射线荧光光谱、电子探针和电感耦合等离子体质谱仪等, 对龙溪玉的矿物成分和主微量元素特征进行了分析。结果表明, 龙溪玉为与大理岩相关的透闪石玉, 含少量方解石、白云石、滑石和磷灰石等副矿物。玉石通常具有墨绿色-黄绿色-浅绿色-青灰色色环; 高 P、Mn、V、Cr、Ni、U 含量和低 δCe 值 (>1), LREE/HREE 比值接近 1, 稀土元素配分曲线呈海鸥状, 具明显 Ce、Eu 负异常特征, 可以作为龙溪软玉的地球化学识别标志。龙溪玉的宝石学特征与金沙和三星堆遗址出土软玉相似, 稀土元素特征和金沙遗址玉器高度一致, 结合三地之间的地理位置等因素, 推测四川龙溪可能是三星堆玉器和金沙玉器中软玉玉料的主要来源地。

关键词: 龙溪玉; 三星堆遗址; 金沙遗址; 地球化学特征

中图分类号: P618; TS93

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0240-21

Geochemical Characteristics of Longxi Nephrite in Wenchuan and Origin of Sansandui and Jinsha Jades

SONG Mingwei¹, PENG Yiwei^{1,*}, LANG Xinghai¹, CHENG Wenbin¹, OUYANG Hui¹,
CHEN Xi², ZHAO Fufeng¹, PENG Lei¹, CAI Jimin¹, XU Wenli¹

(1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. School of Geoscience and Technology Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)

Abstract: Sichuan Longxi nephrite played an important role in ancient Sichuan culture. In order to investigate

收稿日期: 2024-09-08; 修回日期: 2024-11-22; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 成都理工大学三星堆多学科综合研究项目(11400-000525-18), 中国科技部“十四五”国家重点研发计划(2022YFC2905002-4), 国家自然科学基金项目(41702081)联合资助。

作者简介: 宋明伟(1997-), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: 2469749958@qq.com。

*通讯作者: 彭义伟(1987-), 男, 副教授, 硕士生导师, 长期从事矿床学及矿床地球化学教学与相关研究。E-mail: pengyiwei15@cdut.edu.cn。

the geochemical characteristics of Longxi nephrite and its relationship with Sanxingdui and Jinsha jade, the mineral and chemical composition of Longxi nephrite were analyzed by X-ray diffraction, X-ray fluorescence, an electron probe microanalyzer, and inductively coupled plasma mass spectrometry. Longxi nephrite is a tremolite jade similar to marble that contains a minor amount of calcite, dolomite, steatite, apatite, and rutile. It typically has a dark green-yellow green-light green-offwhite color ring. The geochemical properties include high P, Mn, V, Cr, Ni and U content, and low δCe values, and an LREE/HREE ratio close to 1. The REE partition curve is seagull-like, with clear Ce and Eu negative anomaly characteristics. The Longxi nephrite has gemological characteristics similar to the Jinsha and Sanxingdui jades and rare earth element properties that are extremely consistent with the Jinsha jades. Considering the geographical location between the three places, it is speculated that Jinsha and Sanxingdui jades may be sourced from Longxi nephrite.

Keywords: Longxi nephrite; Sanxingdui Site; Jinsha Site; geochemical characteristics

古玉器, 华夏文明之瑰宝。穿越千年时光, 承载深厚文化底蕴。从新石器时代初期开始, 古人便开始对优质玉石料进行加工, 用作日常礼器和装饰物。透闪石型玉石(软玉), 作为中国古玉器中最主要的类型之一, 其原料来源一直是众多学者研究和讨论的热点话题(廖任庆等, 2005; 刘飞等, 2009; 杨萍等, 2009; 钟友萍等, 2013; 于海燕等, 2019; 张跃峰等, 2022)。龙溪玉矿(点)位于四川省汶川县龙溪乡马灯村附近。前人对该地的玉料开展了细致岩相学、矿物学、宝石学以及光谱学研究, 认为其是“三星堆遗址”和“金沙遗址”古玉器玉料的重要产地(王春云, 1989, 1993; 向芳等, 2008a, 2008b; 王蔚宁等, 2022; 徐琳抒等, 2022; 白洞洲等, 2022; 付宛璐等, 2023)。龙溪软玉颜色多样, 主要有青色、青白色、青色、墨绿色等; 主要矿物为透闪石, 含少量方解石、白云石、滑石及磷灰石等次要矿物; 品质不同, 次要矿物含量也不同(王蔚宁等, 2022; 徐琳抒等, 2022; 白洞洲等, 2022; 付宛璐等, 2023)。龙溪玉平均密度为 $2.95 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 折射率为 $1.61\sim 1.62$, 在长、短波紫外光下呈荧光惰性(王蔚宁等, 2022; 徐琳抒等, 2022)。付宛璐等(2023)通过 X 射线荧光光谱和 XRF 微区面扫分析, 认为 V 和 Cr 可能是青绿色龙溪玉的致色元素。对于龙溪玉的成因, 王春云(1989, 1993)最早提出龙溪玉含玉体是通过白云质大理岩与硅酸溶液相互作用, 由白云石向透闪石转变而成。前人在综述国内外典型软玉产地玉石的特征时, 将龙溪玉划归为变质热液型或区域变质型(刘飞等, 2009; 景云涛等, 2022)。白洞洲等(2022)对龙溪玉样品进行化学成分分析, 认为龙溪玉的化学成分与接触交代作用形成的透闪石玉类似, 成玉过程很可能有岩浆热液的参与。先前的研究重点关注了龙

溪玉的地质和宝石学特性, 但在地球化学识别标志方面的研究尚显不足。然而, 这方面的研究对于三星堆和金沙遗址玉器的产地溯源具有重要意义。因此, 笔者在野外地质考察和室内岩相学观察的基础上, 对典型龙溪玉样品开展了系统的 X 射线粉晶衍射、X 射线荧光光谱、电子探针和电感耦合等离子体质谱分析, 对比了龙溪玉与其他产地软玉的差别, 探讨了龙溪玉与古蜀三星堆和金沙遗址的玉器矿料的可能联系。

1 地质背景

研究区位于青藏高原东部松潘-甘孜地体内。地体东西向延伸, 东宽西窄, 呈三角状。地体东南缘以龙门山断裂带为界, 与扬子板块毗邻(Zhang et al., 1984; Chen et al., 1995, 1996; 宋明伟等, 2024; 肖倩等, 2024; 谢佐彬等, 2024), 西南缘以金沙江缝合带与羌塘-昌都地块相接。金沙江缝合带被认为是晚古生代俯冲带(Sengör, 1985), 北侧为东昆仑-西秦岭造山带(图 1a)。

区内自西向东分别出露三叠纪西康群、石炭系+二叠系、泥盆系危关群和月里寨群、志留系茂县群、奥陶系以及震旦系地层。巨厚的($5\sim 10 \text{ km}$)三叠系西康群复理石沉积整合覆盖于 $4\sim 6 \text{ km}$ 厚震旦系-古生界系列之上; 在松潘-甘孜地体东部龙门山断裂带附近出露有前震旦纪(太古代—中元古代)结晶基底(图 1b)。印支期扬子、华北和羌塘 3 个块体之间的收敛使沉积盆地缩短、古特提斯闭合, 形成松潘-甘孜造山带(Sengör, 1985; Mattauer et al., 1992; Nie et al., 1994)。造山期, 三叠系的沉积层向南推覆于扬子板块之上, 同时震旦纪—古生代序列强烈变形, 形成大

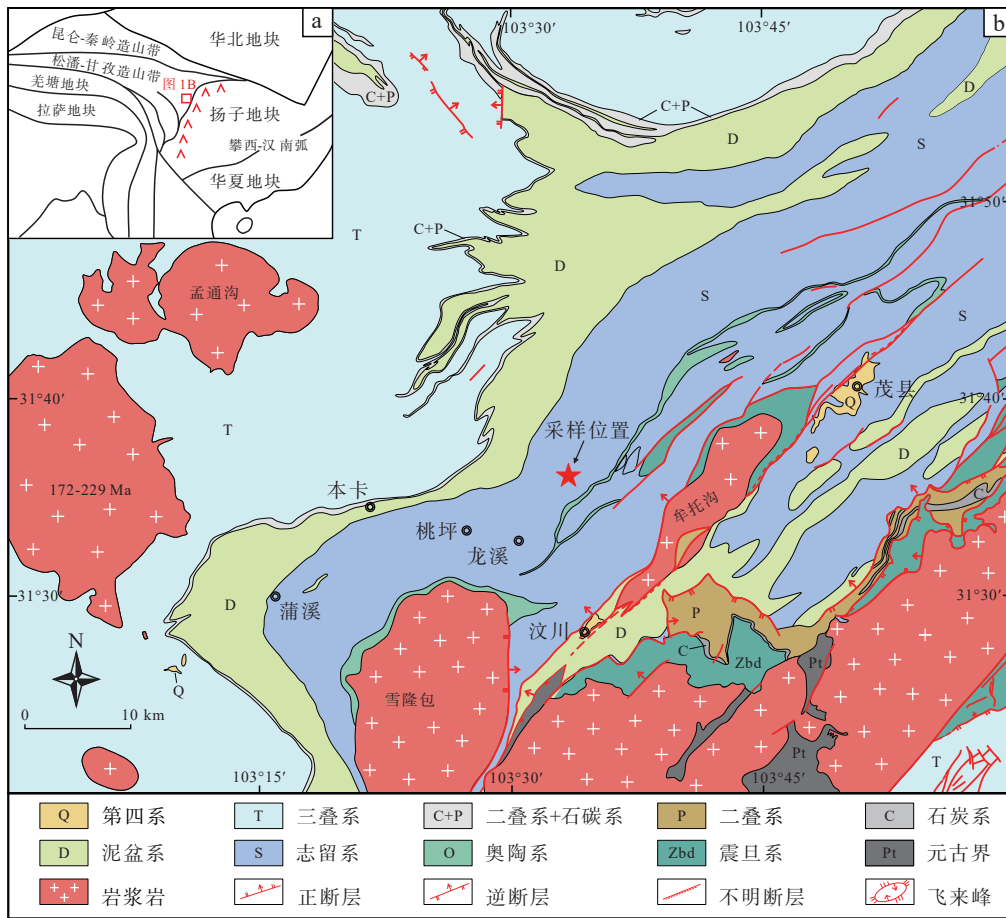


图1 汶川龙溪玉大地构造位置图(a)与区域地质简图(b)

Fig. 1 (a) Simplified geotectonic map, (b) geological map of the "Longxi nephrite" in Wenchuan

规模滑脱构造,使地壳明显增厚(Mattauer et al., 1992)。三叠系的沉积经历了极低到低级的绿片岩相变质,但震旦纪—古生界序列(丹巴地区)经历了 Barrovian 型变质作用(Mattauer et al., 1992; Huang et al., 2003)。Huang 等(2003)通过对松潘甘孜地体内丹巴变质地体的测年和变质作用温压条件分析,对比中生代花岗岩体形成时代的分布,认为中生代第一次变质作用主要发生于 204~190 Ma,与扬子—华北两陆块碰撞造成的地壳加厚和缩短有关;第二次变质事件相对较弱,发生于 165 Ma 前后,被认为是局部热扰动的产物。松潘—甘孜地体内广泛出露花岗岩侵入体。这些花岗岩体的空间分布没有明显的规律性,其形成时代主要在三叠纪末到侏罗纪时期(197~230 Ma),与印支运动有关(Roger et al., 2004; 胡健民等, 2005; 龚大兴等, 2019)。

四川龙溪软玉矿(点)位于松潘—甘孜地体东部,靠近 NE-SW 走向的茂汶断裂(图 1b)。在玉矿(点)西部的三叠纪西康群地层中出露印支晚期—燕山期的

老君沟和孟通沟花岗岩体,东边靠近茂汶断裂出露晋宁—澄江第四期牟托黑云花岗岩,南部出露雪隆包斜长花岗岩(图 1b)。龙溪软玉的含玉体产于志留系茂县群结晶灰岩夹透闪片岩、石榴角闪斜长变粒岩、透闪片岩、角闪黑云片岩之中,与下伏结晶灰岩平行不整合接触,同时被上覆变质火山岩所超复(图 2a)。

软玉产于由灰白色中厚层状透闪石化大理岩夹透闪石岩(透闪片岩)组成的含玉体中,通常呈不规则透镜状或薄层状,发育于透闪片岩和白云质大理岩局部强烈变形处,与大理岩相互间为整合接触(图 2)。依据龙溪软玉的颜色和矿物组成,大致可以将其分为黄绿色玉石、青灰色玉石、墨绿色玉石和黄绿色含放射状闪石矿物的玉石(图 3),且玉石通常呈现墨绿色—黄绿色—浅绿色—青白色(白色)的对称色环,部分样品内核为透闪片岩或透闪石化白云质大理岩(图 2d、图 3i~图 3k)。玉石中矿物主要为透闪石,其次为方解石、白云石,含少量磷灰石、金红石、滑石、黄铁矿、黄铜矿以及磁铁矿等(图 4)。玉石具有典型的纤维交

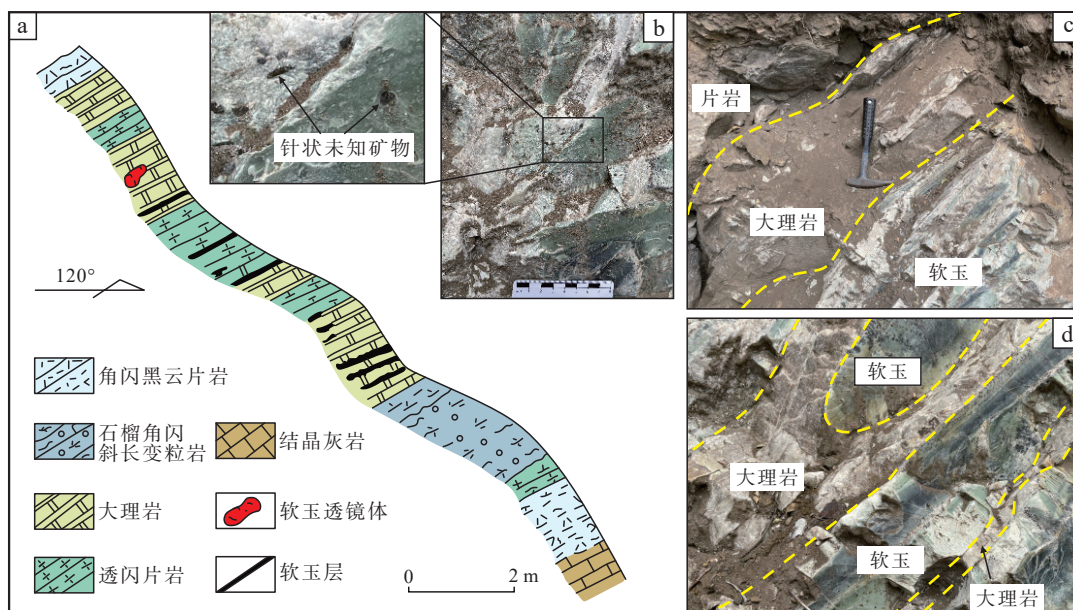


图2 龙溪玉地质剖面简图(a)(据王春云, 1993 修改)、龙溪玉野外露头照片(b~d)

Fig. 2 (a) The geological profile of Longxi nephrite, (b-d) the field photograph of Longxi nephrite

织结构和叶片交织结构(图 4d~图 4h), 可见方解石被透闪石交代形成的交代结构(图 4c); 部分玉石中透闪石和方解石等矿物具有定向排列特征(图 4f)。

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集

本次研究共采集了 49 块样品, 用于分析的样品共 12 件, 其中有 2 件角闪黑云片岩、1 件大理岩、9 件龙溪玉样品。所有样品均来自于四川汶川龙溪乡马灯村“龙溪玉”矿洞口(N31°35'9"; E103°33'22")。样品详细描述见表 1。测试前先对样品进行观察, 按照颜色、光泽、透明度、质地等基本特征对样品进行分类。选择典型样品制备探针片, 开展岩相学观察和电子探针(EPMA)分析。对部分样品进行碎样处理, 把粗碎过的样品放入玛瑙钵中进行手工研磨, 研磨至 200 目的粉末, 随后进行 X 射线粉晶衍射(XRD)、X 射线荧光光谱(XRF)和电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析(黄杰等, 2020; 杨眉等, 2021)。

2.2 测试方法

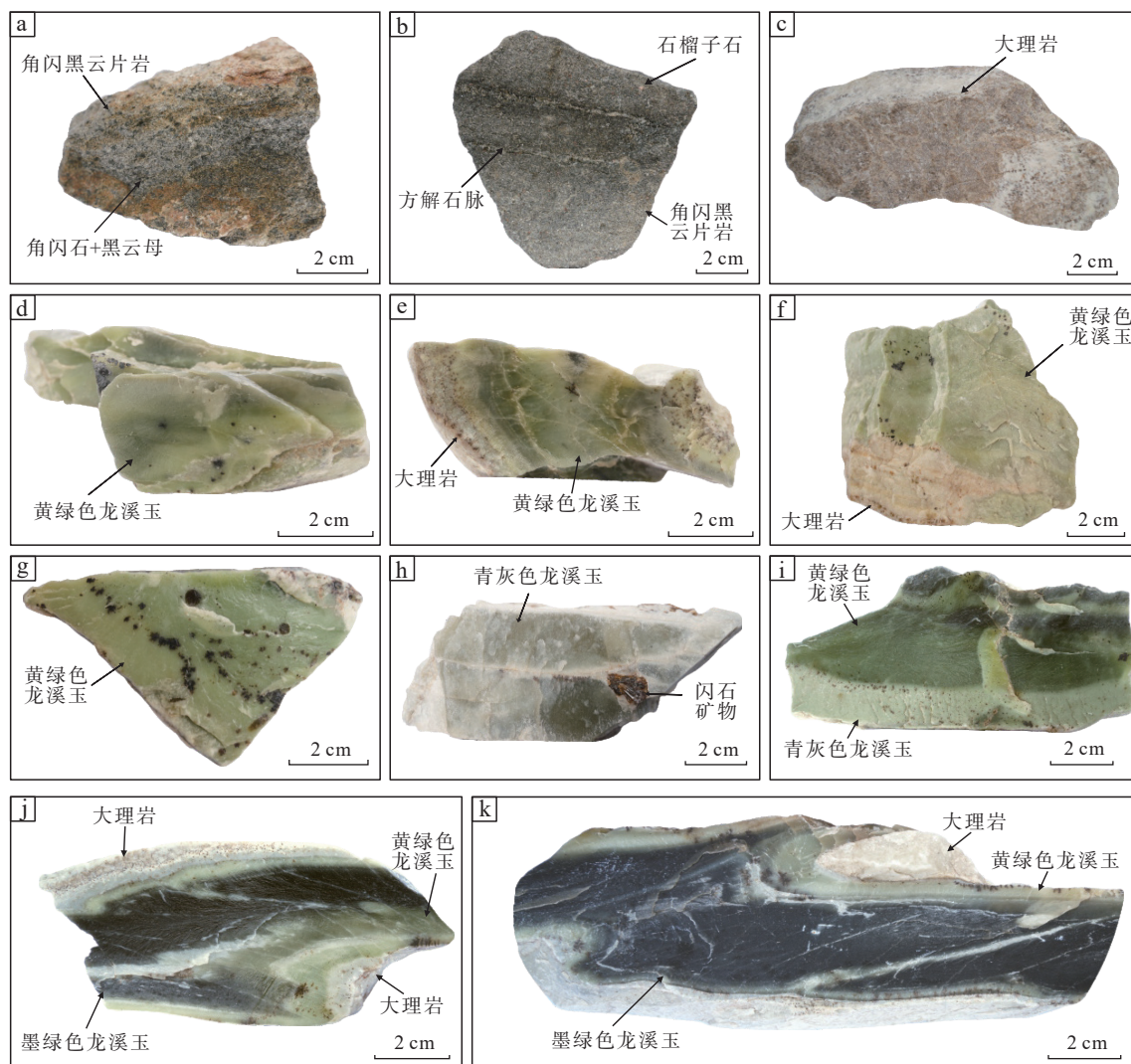
X 射线粉晶衍射分析和全岩主量元素分析测试在成都南达微构质检技术服务有限公司完成, 电子探针实验在西南石油大学地球科学与技术学院电子探针实验室完成。

(1) X 射线粉晶衍射分析(XRD): 测试仪器为日

本理学 Rigaku X 射线粉末衍射仪 ULTIMA IV。测试条件: Cu 靶, 电压 40 kV, 电流 40 mA, 扫描范围(2θ)为 5°~70°, 步进扫描速度 4°/min, 步长为 0.020°。采用 MDI Jade 6 处理实验数据。

(2) X 射线荧光光谱仪(XRF): 采用 Rigaku 公司的日本理学 ZSX Primus III+型波长色散 X 射线荧光光谱仪对不同样品进行主量元素含量分析。熔化无水四硼酸锂和偏硼酸锂作为试料, 硝酸铵作氧化剂, 氟化锂和少量溴化锂作助熔剂和脱模剂。试料: 熔剂(1:10), 在熔样机上熔融, 制成玻璃样片。分析元素均用理论 α 系数校正元素间的吸收-增强效应, 根据荧光强度计算主、次成分的量。

(3) 电子探针(EPMA): 采用型号为 JEOL-JXA-8230, 配备有 4 道波谱仪的电子探针显微分析仪(EPMA)对不同类型玉石进行分析。样品在上机测试之前先按照 Zhang 等(2016)提供的办法镀碳, 将样品镀上厚度约 20 nm 的均匀碳膜。电子探针工作条件为: 加速电压 15 Kv, 加速电流 20 nA, 束斑直径 10 μm。所有测试数据均进行了 ZAF 校正处理。Na, Mg, K, Ca, Fe, Ti, Al, Si, Ni, Cr, Mn 元素特征峰的测量时间为 10s, 上下背景测量时间为峰测量时间的一半。使用的国际 SPI 标样如下: Na(NaAlSi₃O₈)、Mg(MgCaSi₂O₆)、Al(NaAlSi₃O₈)、Si(NaAlSi₃O₈)、K(KAlSi₃O₈)、Ca(MgCaSi₂O₆)、Fe(FeCr₂O₄)、Cr(FeCr₂O₄)、Ti(TiO₂)、Mn(CaMnSi₂O₆)、Ni(Fe, Ni)₉S₈。



a. 角闪黑云片岩; b. 石榴角闪黑云片岩; c. 棕红色大理岩; d. 品质较好的黄绿色玉石; e~f. 黄绿色玉石边界存在大理岩; g. 黄绿色玉石中见针状闪石矿物; h. 青灰色玉石中可见到针状闪石矿物; i. 玉石具青灰色-黄绿色-墨绿色环带; j. 大理岩-青灰色玉石-墨绿色玉石-黄绿色玉石-大理岩环带; k. 墨绿色玉石-黄绿色玉石-大理岩

图3 龙溪玉玉石及部分围岩样品照片

Fig. 3 Hand specimen pictures of Long nephrite and some host rocks samples

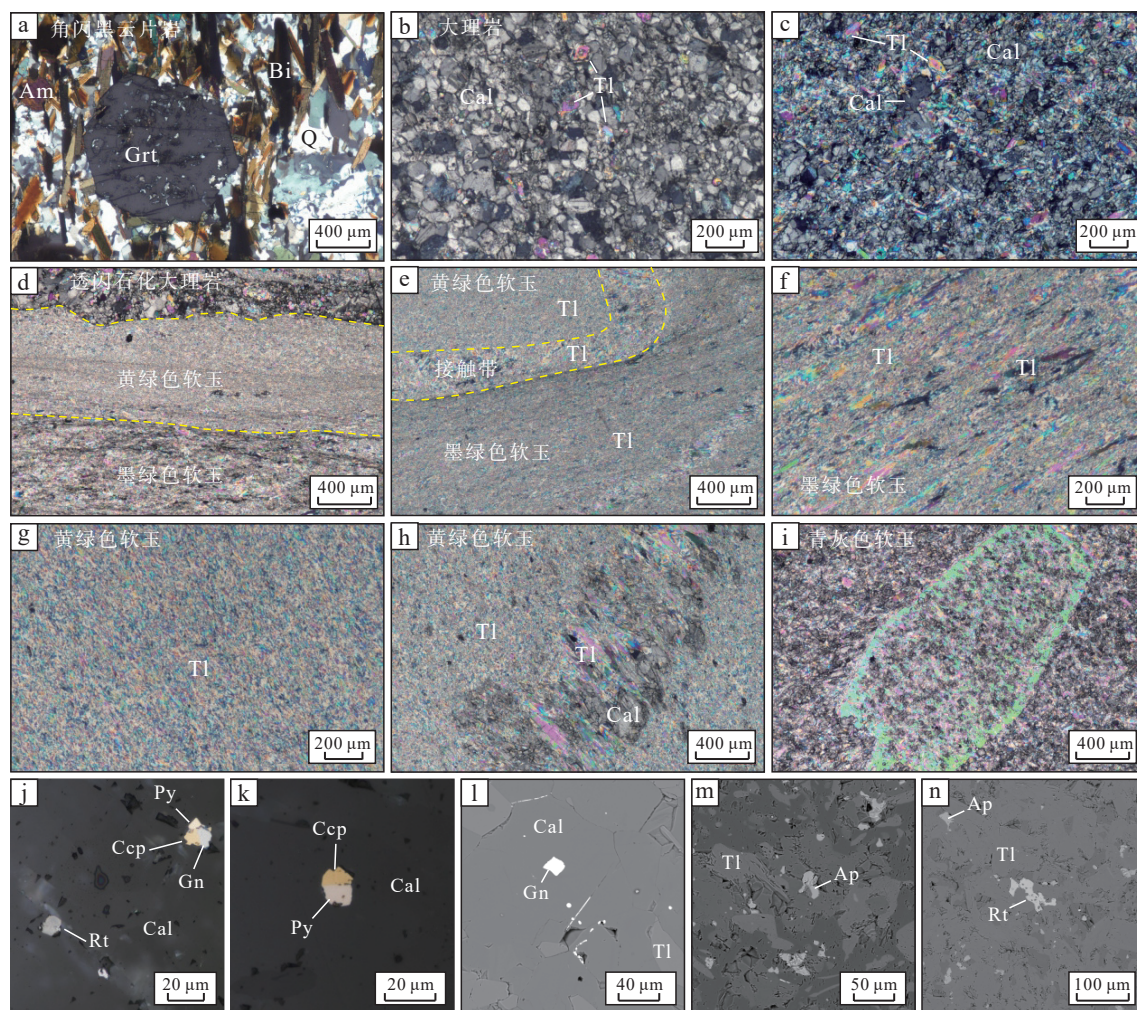
(4)电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS): 微量元素含量分析采用美国 PerkinElmer 公司的 NexION 1000G 电感耦合等离子体质谱仪进行。随同试料进行双份空白试验,所用试剂相同。随同试料,对标准物质进行分析。向封闭溶样器的内罐中称取 100 mg 试料,随后加入 1 ml 氢氟酸和 0.5 ml 硝酸,并进行密封处理。将溶样器放入烘箱中,在 $(185\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 左右加热 24 h。冷却后取出内罐,置于电热板上加热蒸干,再加入 0.5 ml 硝酸蒸发近干,重复操作此步骤一次。加入 5 ml 硝酸,再次密封,放入烘箱中, 130°C 加热 3 h。冷却后取出内罐,将溶液定量转移至塑料瓶中。用蒸馏水稀释,定容至 25 ml(或 50 ml)。此溶液直接

用于 ICP-MS 测定。

3 分析结果

3.1 矿物成分

透闪石的主要谱峰位置为 $9.0553\sim 9.0707\text{ \AA}$ (020)、 $8.4352\sim 8.4500\text{ \AA}$ (110)、 $3.1251\sim 3.1271\text{ \AA}$ (310)、 $2.7073\sim 2.7089\text{ \AA}$ (151)、 $1.6501\text{ \AA}$ (461)(JCPDS 标准卡片)。笔者共对 9 块龙溪玉样品开展了 X 射线粉末衍射实验。测试结果显示,所有玉石主要谱峰位置与强度几乎相同,与透闪石标准数据衍射谱线基本一致(图 5, 表 2),说明龙溪玉的矿物组分较单一,主



a. 石榴角闪黑云片岩中自形石榴子石; b. 大理岩中可见少量浸染状透闪石; c. 品质较差的玉石中见较多方解石; d. 透闪石化大理岩-黄绿色软玉-墨绿色软玉; e. 黄绿色软玉-墨绿色软玉; f. 墨绿色软玉中透闪石粒度较粗; g. 黄绿色玉石中透闪石颗粒细小; h. 黄绿色玉石中见粗粒透闪石+方解石脉; i. 青灰色玉石中见针柱状闪石矿物; j~l. 玉石中方解石与金红石、黄铜矿、黄铁矿以及方铅矿共生; m~n. 玉石中存在细粒金红石和磷灰石; Am. 角闪石; Bi. 黑云母; Grt. 石榴子石; Q. 石英; Tl. 透闪石; Cal. 方解石; Py. 黄铁矿; Ccp. 黄铜矿; Gn. 方铅矿; Rt. 金红石; Ap. 磷灰石; a~i. 正交偏光; j~k. 反射光; l~n. 背散射图像

图4 龙溪玉玉石及部分围岩样品镜下照片

Fig. 4 Mircophotos of Long nephrite and some host rocks samples

要由透闪石组成。所有样品中均存在白云石(2.8912), 在部分样品(LX-6、LX-10、LX-13和LX-23)中还可见滑石(9.34)、方解石(3.0325)以及云母(10.097)的特征谱线,说明龙溪玉中可能含少量滑石、方解石、白云石和云母,这与镜下观察及电子探针测试结果一致。从测试结果来看,一部分优质玉石样品(LX-6、LX-7、LX-23、LX-40和LX-45)的透闪石含量高(>80%),为典型透闪石玉;另外一部分品质较差的玉石(LX-10、LX-13、LX-14和LX-24)的透闪石含量较低(<80%),白云石含量在30%以上,属于白云石透闪石玉(表2)。

3.2 主量元素

角闪黑云片岩成分较为复杂,主要化学成分为

SiO_2 (51.1%~51.2%)、 Al_2O_3 (14.5%~14.8%)、 Fe_2O_3 (14.0%~14.7%)、 CaO (5.1%~5.6%)和 Na_2O (3.2%~4.0%)(表3)。矿体上盘大理岩的化学成分主要为 CaO (33.1%)和 MgO (18.5%),其烧失量大(LOI: 44.5%)。龙溪玉不同样品的元素含量和烧失量略有差异。其中,黄绿色优质玉料(LX-6和LX-7) SiO_2 含量为55.2%~56.6%, MgO 含量为23.4%~23.8%, CaO 含量为13.5%~14.2%,烧失量为2.6%~3.2%。表皮见水草花状深色物质的黄绿色玉料(LX-10) SiO_2 含量为50.3%, MgO 含量为23.3%, CaO 含量为14.9%,烧失量为7.1%。青灰色玉料(LX-13和LX-14) SiO_2 含量为34.6%~42.0%, MgO 含量为18.7%~22.1%, CaO 含量为17.8%~

表 1 四川龙溪玉及部分围岩样品的基本特征

Tab. 1 Gemmological characteristics of nephrite and some host rocks samples from Longxi, Sichuan Province

编号	岩性	描述
LX-1	角闪黑云片岩	深黑色，片状构造，主要矿物为角闪石、黑云母，呈定向排列。
LX-3	角闪黑云片岩	深黑色，片状构造，主要矿物为角闪石、黑云母以及少量石榴子石。
LX-4	大理岩	灰白色，具粒状变晶结构，块状构造。
LX-6	龙溪玉	黄绿色、品质优、质地纯、油脂光泽。
LX-7	龙溪玉	黄绿色、品质优、质地纯、油脂光泽，表皮为灰白色大理岩。
LX-10	龙溪玉	黄绿色、品质较优，表皮可见水草花状的深色物质。
LX-13	龙溪玉	青灰色、品质较差、质地较粗，丝绢-玻璃光泽。
LX-14	龙溪玉	青灰色、品质较差、质地较粗，丝绢-玻璃光泽。
LX-23	龙溪玉	青灰色、质地较粗，丝绢-玻璃光泽，可见针柱状矿物(直径可达0.8 cm)。
LX-24	龙溪玉	黄绿色、质地较细腻，油脂光泽，含较多针柱状矿物。
LX-40	龙溪玉	墨绿色、品质优，表皮为黄绿色玉石。
LX-45	龙溪玉	墨绿色，品质优，表皮为黄绿色玉石，中间夹淡黄色玉石和灰白色大理岩。

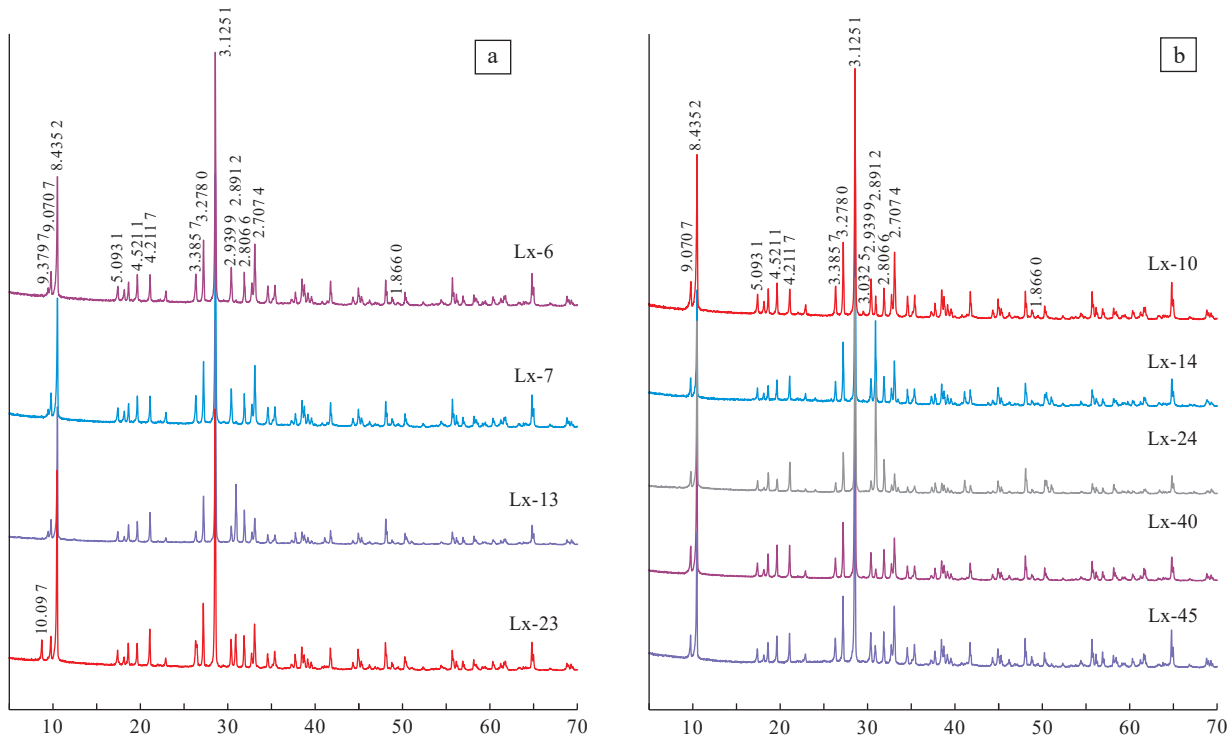


图5 四川龙溪玉样品的 X 射线粉末衍射图谱

Fig. 5 XRD patterns of nephrite samples from Longxi, Sichuan Province

23.7%，烧失量大(12.8%~17.7%)，这与其中含较多碳酸盐矿物有关。含针柱状矿物的玉料(LX-23 和 LX-24)SiO₂ 含量为 45.5%~52.2%，MgO 含量为 22.4%~23.6%，CaO 含量为 14.4%~17.1%，烧失量为 4.9%~9.9%。墨绿色玉料(LX-40 和 LX-45)SiO₂ 含量为 55.3%~55.4%，MgO 含量为 23.5%~23.7%，CaO 含量

为 13.6%~13.9%，烧失量为 3.1%~3.2%(表 3)。

3.3 矿物主量元素

所有样品的主要成分为 MgO、CaO、SiO₂，其次为 Na₂O、K₂O、P₂O₅、FeO 和 Al₂O₃ 等(表 4，图 6)。墨绿色(粗粒透闪石)、墨绿色(细粒透闪石)、黄绿色—青灰色(粗粒透闪石)、青灰色(细粒透闪石)玉石环带

表2 四川龙溪玉 XRD 分析结果统计表(%)

Tab. 2 The XRD analysis results from Longxi, Sichuan Province(%)

样品编号	LX-6	LX-7	LX-10	LX-13	LX-14	LX-23	LX-24	LX-40	LX-45
白云石	1.18	7.15	30.33	34.20	39.69	14.82	44.32	4.93	13.05
方解石	0.00	0.00	0.00	26.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
云母	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.98	0.00	0.00	0.00
闪石	94.63	92.85	66.15	38.89	60.31	81.20	55.68	95.07	86.95
滑石	4.19	0.00	3.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表3 龙溪软玉及部分围岩样品 XRF 分析结果统计表(%)

Tab. 3 The table of XRF results of Longxi nephrite and some host rock samples(%)

样品编号	LX-1	LX-3	LX-4	LX-6	LX-7	LX-10	LX-13	LX-14	LX-23	LX-24	LX-40	LX-45
名称	角闪黑 云片岩	角闪黑 云片岩	大理岩	黄绿色 龙溪玉	黄绿色 龙溪玉	黄绿色 龙溪玉	青灰色 龙溪玉	青灰色 龙溪玉	青灰色 龙溪玉	黄绿色 龙溪玉	墨绿色 龙溪玉	墨绿色 龙溪玉
Na ₂ O	4.01	3.17	0.07	0.25	0.28	0.23	0.24	0.26	0.29	0.30	0.23	0.21
MgO	3.70	3.74	18.52	23.87	23.44	23.63	18.68	22.05	23.58	22.40	23.52	23.68
Al ₂ O ₃	14.76	14.49	0.77	1.46	2.01	1.76	1.44	1.80	2.56	2.19	1.72	1.17
SiO ₂	51.10	51.27	1.08	56.59	55.18	50.30	34.63	42.00	52.17	45.52	55.32	55.37
P ₂ O ₅	0.86	1.20	0.51	0.23	0.19	0.25	0.70	0.32	0.25	0.63	0.05	0.20
SO ₃	0.41	0.05	0.07	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04
K ₂ O	1.51	2.30	0.01	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.29	0.07	0.03	0.04
CaO	5.56	5.11	33.08	13.51	14.24	14.91	23.74	17.76	14.37	17.01	13.60	13.95
TiO ₂	2.20	2.30	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	0.15	0.02	0.06	0.00	0.00
MnO	0.26	0.31	1.56	0.23	0.13	0.64	0.20	0.44	0.30	0.41	0.32	0.12
Fe ₂ O ₃	13.95	14.72	0.22	0.67	0.69	0.28	0.38	0.47	0.60	0.52	0.38	0.46
LOI	1.06	0.38	44.52	2.60	3.22	7.08	17.77	12.81	4.89	9.93	3.08	3.24

MgO 含量分别为 23.27%~23.95%、23.21%~24.14%、22.94%~23.91%、22.76%~24.17% 和 23.21%~23.96%; CaO 含量分别为 13.24%~13.80%、13.02%~13.75%、12.79%~13.75%、13.32%~13.72% 和 12.96%~13.61%; SiO₂ 含量分别为 58.09%~59.14%、57.26%~59.48%、55.66%~59.42%、56.37%~59.38% 和 57.4%~59.19%。墨绿色、黄绿色、青灰色玉石的 FeO 含量逐渐减少, 而 MnO 含量逐渐升高, 其余的成分(如 Na₂O、Al₂O₃、SiO₂、P₂O₅ 和 TiO₂ 等)则无明显变化(图 6)。

3.4 全岩微量元素(稀土元素)

3.4.1 微量元素特征

玉石及围岩微量元素测试结果(表 5)显示, 角闪黑云片岩中 Ba($1\,500.2\times 10^{-6}\sim 2\,997.1\times 10^{-6}$)、Ce($105.6\times 10^{-6}\sim 143.39\times 10^{-6}$)、Nd($70.6\times 10^{-6}\sim 87.8\times 10^{-6}$)、Sr($362.5\times 10^{-6}\sim 369.9\times 10^{-6}$)、Zn($159.0\times 10^{-6}\sim 244.1\times 10^{-6}$)和 V($41.8\times 10^{-6}\sim 56.5\times 10^{-6}$)等微量元素含量高;

大理岩中 Ba(18.4×10^{-6})、Pb(41.3×10^{-6})、Sr(463.2×10^{-6})、Zn(13.7×10^{-6})和 Ni(19.8×10^{-6})等微量元素含量较高; 玉石样品中 Ba($6.4\times 10^{-6}\sim 156.2\times 10^{-6}$)、Pb($1.98\times 10^{-6}\sim 70.25\times 10^{-6}$)、Sr($27.8\times 10^{-6}\sim 278.8\times 10^{-6}$)、Zn($84.6\times 10^{-6}\sim 302.8\times 10^{-6}$)、V($75.9\times 10^{-6}\sim 291.9\times 10^{-6}$)、Ni($19.0\times 10^{-6}\sim 103.5\times 10^{-6}$)和 Cr($19.9\times 10^{-6}\sim 357.2\times 10^{-6}$)等微量元素含量较高。

3.4.2 稀土元素特征

玉石及部分围岩微量元素测试结果(表 6, 图 7)显示, 2 件角闪黑云片岩的稀土元素总量(ΣREE)较高, 介于 $322.27\times 10^{-6}\sim 400.72\times 10^{-6}$ 之间, 轻重稀土分异较为明显, 其中轻稀土元素(LREE)为 $263.35\times 10^{-6}\sim 347.41\times 10^{-6}$, 重稀土元素(HREE)为 $53.31\times 10^{-6}\sim 58.91\times 10^{-6}$; LREE/HREE=4.47~6.52, (La/Yb)_N=3.97~8.21, $\delta\text{Eu}=0.89\sim 0.95$, $\delta\text{Ce}=0.88\sim 0.91$, Eu、Ce 均无异常趋势(图 7a)。

表 4 龙溪软玉电子探针分析结果统计表(%)
Tab. 4 The table of EPMA results of Longxi nephrite(%)

颜色	样品编号	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	Total
墨绿色	LX-8-1-1	0.24	23.50	0.05	13.51	0.04	0.52	58.60	1.20	0.07	0.00	0.04	97.76
墨绿色	LX-8-1-2	0.13	23.78	0.05	13.72	0.03	0.50	58.80	0.45	0.08	0.01	0.00	97.55
墨绿色	LX-8-1-3	0.11	23.75	0.06	13.61	0.00	0.47	59.08	0.53	0.09	0.03	0.04	97.77
墨绿色	LX-8-1-4	0.18	23.52	0.05	13.50	0.01	0.55	58.65	1.10	0.09	0.03	0.00	97.68
墨绿色	LX-8-1-5	0.13	23.95	0.05	13.56	0.02	0.45	59.14	0.63	0.11	0.00	0.03	98.06
墨绿色	LX-8-1-6	0.29	23.54	0.06	13.51	0.01	0.51	58.13	1.60	0.10	0.00	0.01	97.75
墨绿色	LX-8-1-7	0.20	23.53	0.05	13.32	0.00	0.51	58.70	0.92	0.09	0.01	0.00	97.34
墨绿色	LX-8-1-8	0.25	23.52	0.05	13.24	0.02	0.52	58.46	1.30	0.12	0.05	0.05	97.57
墨绿色	LX-8-1-9	0.18	23.79	0.05	13.80	0.00	0.54	58.36	1.04	0.09	0.00	0.04	97.88
墨绿色	LX-8-1-10	0.26	23.27	0.02	13.35	0.06	0.55	58.45	1.45	0.09	0.00	0.00	97.50
墨绿色	LX-8-3-1	0.09	24.08	0.05	13.47	0.02	0.53	59.20	0.22	0.12	0.00	0.00	97.78
墨绿色	LX-8-3-2	0.10	23.99	0.06	13.59	0.01	0.47	59.36	0.28	0.14	0.00	0.00	98.00
墨绿色	LX-8-3-3	0.06	23.80	0.01	13.75	0.00	0.42	59.21	0.31	0.06	0.00	0.01	97.63
墨绿色	LX-8-3-4	0.16	23.74	0.06	13.59	0.00	0.51	58.62	0.64	0.11	0.02	0.00	97.45
墨绿色	LX-8-3-5	0.11	23.91	0.04	13.60	0.02	0.43	58.98	0.45	0.10	0.02	0.00	97.64
墨绿色	LX-8-3-6	0.11	23.85	0.03	13.56	0.02	0.47	58.69	0.42	0.09	0.00	0.00	97.26
墨绿色	LX-8-3-7	0.16	23.92	0.02	13.12	0.01	0.53	58.92	0.93	0.11	0.00	0.03	97.72
墨绿色	LX-8-3-8	0.07	24.02	0.06	13.65	0.00	0.50	59.48	0.19	0.13	0.00	0.01	98.11
墨绿色	LX-8-3-9	0.14	23.67	0.04	13.60	0.07	0.52	59.04	0.54	0.10	0.00	0.03	97.75
墨绿色	LX-8-3-10	0.27	23.21	0.07	13.21	0.02	0.50	57.26	1.43	0.11	0.00	0.04	96.13
黄绿色	LX-24-2-1	0.07	23.92	0.03	13.75	0.02	0.43	59.42	0.17	0.24	0.00	0.00	98.05
黄绿色	LX-24-2-2	0.22	23.35	0.05	13.33	0.00	0.58	58.50	1.50	0.25	0.05	0.00	97.82
黄绿色	LX-24-2-3	0.39	22.99	0.03	13.36	0.00	0.53	57.57	2.52	0.24	0.14	0.01	97.86
黄绿色	LX-24-2-4	0.13	23.44	0.02	13.43	0.00	0.41	58.31	0.73	0.27	0.04	0.04	96.81
黄绿色	LX-24-2-5	0.03	23.78	0.01	13.72	0.00	0.34	58.94	0.04	0.16	0.01	0.01	97.03
黄绿色	LX-24-2-6	0.18	23.74	0.05	13.33	0.00	0.44	58.50	0.89	0.22	0.00	0.01	97.37
黄绿色	LX-24-2-7	0.10	23.86	0.02	13.41	0.01	0.38	59.20	0.25	0.21	0.01	0.00	97.45
黄绿色	LX-24-2-8	0.08	23.90	0.02	13.59	0.02	0.36	59.12	0.13	0.25	0.04	0.02	97.51
黄绿色	LX-24-2-9	0.30	22.94	0.02	12.79	0.02	0.44	55.66	3.38	0.23	0.06	0.02	95.86
黄绿色	LX-24-2-10	0.06	23.80	0.04	13.53	0.01	0.38	58.97	0.32	0.23	0.00	0.01	97.34
青灰色	LX-18-1-1	0.02	24.17	0.03	13.64	0.02	0.27	59.38	0.01	0.22	0.00	0.00	97.77
青灰色	LX-18-1-2	0.11	23.45	0.02	13.50	0.13	0.37	58.79	0.44	0.21	0.01	0.01	97.04
青灰色	LX-18-1-3	0.10	23.88	0.00	13.39	0.00	0.38	58.52	0.52	0.22	0.01	0.02	97.03
青灰色	LX-18-1-4	0.13	23.90	0.03	13.52	0.03	0.38	58.92	0.56	0.26	0.00	0.00	97.72
青灰色	LX-18-1-5	0.08	23.83	0.03	13.51	0.00	0.49	58.33	0.29	0.20	0.03	0.00	96.79
青灰色	LX-18-1-6	0.47	22.76	0.06	13.32	0.05	0.42	56.37	3.01	0.27	0.02	0.02	96.76
青灰色	LX-18-1-7	0.08	23.56	0.05	13.57	0.00	0.45	58.70	0.36	0.27	0.00	0.00	97.05
青灰色	LX-18-1-8	0.02	23.81	0.00	13.40	0.00	0.31	59.27	0.03	0.20	0.00	0.02	97.06

续表 4

颜色	样品编号	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	Total
青灰色	LX-18-1-9	0.04	23.94	0.01	13.72	0.00	0.35	59.32	0.05	0.22	0.00	0.03	97.68
青灰色	LX-18-1-10	0.05	23.92	0.01	13.71	0.00	0.27	59.24	0.07	0.22	0.00	0.02	97.50
青灰色	LX-18-2-1	0.22	23.52	0.02	12.96	0.00	0.41	58.31	1.22	0.26	0.00	0.03	96.94
青灰色	LX-18-2-2	0.21	23.48	0.02	13.29	0.04	0.33	58.47	1.35	0.25	0.00	0.02	97.46
青灰色	LX-18-2-3	0.21	23.35	0.04	13.21	0.03	0.43	57.88	1.33	0.28	0.01	0.02	96.79
青灰色	LX-18-2-4	0.22	23.46	0.07	13.04	0.00	0.40	58.26	1.48	0.29	0.01	0.03	97.25
青灰色	LX-18-2-5	0.10	23.62	0.02	13.38	0.00	0.28	58.58	0.47	0.23	0.01	0.03	96.71
青灰色	LX-18-2-6	0.16	23.72	0.05	13.36	0.00	0.43	58.49	0.77	0.22	0.00	0.02	97.22
青灰色	LX-18-2-7	0.25	23.21	0.06	13.02	0.00	0.35	58.12	1.42	0.24	0.00	0.02	96.72
青灰色	LX-18-2-8	0.03	23.96	0.00	13.61	0.00	0.23	59.19	0.05	0.18	0.00	0.01	97.26
青灰色	LX-18-2-9	0.23	23.38	0.02	13.19	0.00	0.37	58.15	1.29	0.26	0.02	0.02	96.97
青灰色	LX-18-2-10	0.22	23.53	0.02	13.34	0.02	0.33	58.37	1.43	0.23	0.00	0.00	97.47

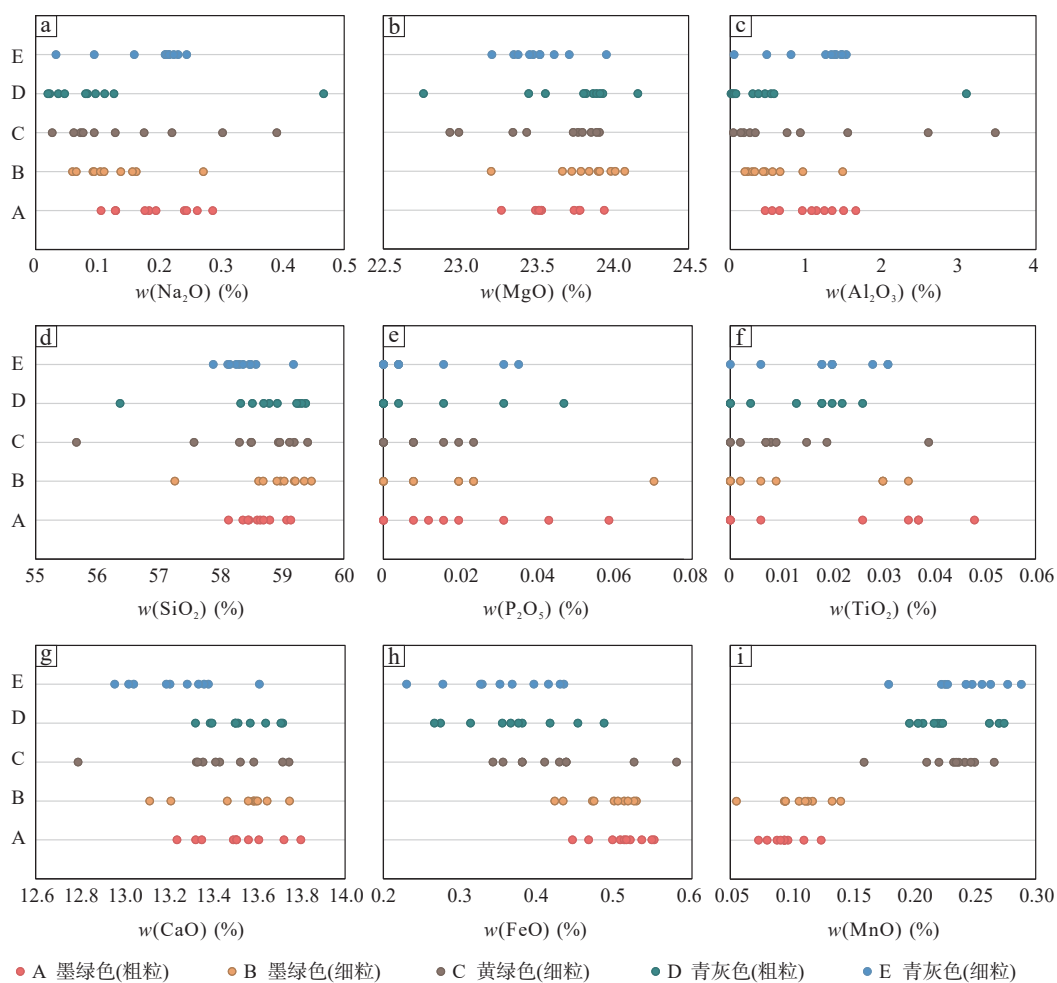


图6 四川龙溪软玉样品电子探针分析结果统计图

Fig. 6 The results of electron probe analysis of Longxi nephrite

大理岩的 $\Sigma\text{REE}=20.26\times 10^{-6}$, 轻重稀土分异不明显, $\text{LREE}=16.64\times 10^{-6}$, $\text{HREE}=3.62\times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE}=$

4.59, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=7.01$, $\delta\text{Eu}=0.77$, $\delta\text{Ce}=0.29$, 具明显 Eu 负异常和 Ce 负异常(图 7a)。

表 5 龙溪软玉及部分围岩样品的微量元素质量分数统计表(10^{-6})
Tab. 5 Trace elements mass fraction of Longxi nephrite and some host rocks samples(10^{-6})

编号	LX-1	LX-3	LX-4	LX-6	LX-7	LX-10	LX-13	LX-14	LX-23	LX-24	LX-40	LX-45
名称	角闪黑 云片岩	角闪黑 云片岩	大理岩	黄绿色 龙溪玉	黄绿色 龙溪玉	黄绿色 龙溪玉	青灰色 龙溪玉	青灰色 龙溪玉	青灰色 龙溪玉	黄绿色 龙溪玉	墨绿色 龙溪玉	墨绿色 龙溪玉
Ba	1 500.24	2 997.06	18.38	13.24	9.95	14.57	12.32	6.43	156.20	34.78	12.84	8.23
Be	4.63	3.76	0.15	1.02	0.88	1.22	1.00	1.23	1.07	1.39	1.01	0.76
Bi	0.15	1.10	0.59	0.23	0.16	0.29	0.18	0.24	0.12	0.14	0.12	0.14
Cd	0.23	0.19	0.29	1.79	1.37	3.92	2.48	4.32	2.42	9.33	2.90	0.89
Cs	2.60	3.85	0.12	0.07	0.05	0.05	0.04	0.03	0.26	0.11	0.07	0.04
Cu	18.62	9.25	7.65	13.16	14.38	15.33	19.43	16.01	3.34	16.10	5.31	9.74
Ga	29.70	26.38	1.08	2.00	2.14	2.79	1.93	2.70	3.15	3.71	2.61	1.54
Hf	1.39	1.00	0.19	0.22	0.25	0.24	0.21	0.45	1.72	0.74	0.17	0.16
In	0.32	0.12	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
Li	33.53	43.06	1.57	1.78	3.07	3.46	3.34	2.97	7.45	7.26	3.95	2.81
Mo	2.63	0.49	2.57	0.38	7.10	15.21	0.98	1.79	6.72	7.99	0.72	0.34
Nb	43.82	46.28	0.77	0.56	0.84	0.53	1.99	5.88	4.51	3.59	0.42	0.41
Pb	5.54	6.89	41.26	5.83	1.98	70.25	20.81	46.35	46.54	37.51	16.78	2.45
Rb	43.50	60.20	1.49	1.50	1.03	0.76	0.75	0.67	5.58	2.04	0.57	0.65
Sc	45.65	19.47	0.43	1.06	1.01	1.47	1.21	1.69	3.04	2.49	0.46	0.36
Sr	362.47	369.91	463.24	34.83	30.91	89.00	278.82	187.93	62.33	165.12	27.83	28.96
Ta	2.73	2.93	0.35	0.24	0.64	0.12	0.22	1.48	0.80	0.74	0.36	0.34
Th	5.65	7.59	0.21	0.32	0.30	0.61	0.83	1.02	1.08	2.55	0.23	0.20
Tl	0.25	0.46	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00
U	1.45	1.36	4.13	2.33	2.78	3.19	2.21	6.16	1.66	8.93	1.04	0.69
W	2.20	1.08	0.56	0.32	0.29	0.35	0.27	0.23	0.55	0.47	0.43	0.63
Y	88.19	75.91	8.95	20.40	16.78	15.46	28.50	32.23	13.94	26.85	6.10	3.81
Yb	9.80	6.25	0.65	1.90	1.28	1.38	1.83	2.00	0.96	1.59	0.40	0.18
Zn	159.00	244.10	13.72	128.73	148.11	174.96	91.00	186.43	146.87	302.82	207.65	84.56
Zr	20.54	12.81	5.16	3.22	3.95	3.83	3.62	9.18	16.14	6.60	3.44	3.31
V	56.50	41.82	13.00	193.57	170.44	132.94	226.71	274.18	75.85	291.90	146.75	111.60
Co	13.00	25.48	0.60	1.67	2.19	2.72	1.64	3.86	1.60	3.80	1.69	1.73
Ni	11.40	22.64	19.78	57.24	34.52	35.12	58.43	86.15	19.35	103.47	95.40	18.97
As	2.07	1.68	1.27	1.00	1.22	1.80	1.77	1.58	0.72	1.47	0.55	2.11
Cr	14.73	12.01	5.80	42.76	85.11	144.68	298.16	208.41	43.29	357.24	39.72	19.89

软玉样品的稀土元素总量差异比较大,介于 $5.39\times 10^{-6}\sim 63.14\times 10^{-6}$ 之间,品质差的玉料 ΣREE 要略高于品质好的玉料,黄绿色玉料(LX-6 和 LX-7) ΣREE 要略高于墨绿色玉料(LX-40 和 LX-45)。总的来说,玉石的轻重稀土分异不明显,其中轻稀土元素(LREE)为 $3.83\times 10^{-6}\sim 51.45\times 10^{-6}$,重稀土元素(HREE)为 $1.57\times$

$10^{-6}\sim 14.26\times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE}=0.62\sim 4.40$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.28\sim 6.85$, $\delta\text{Eu}=0.39\sim 0.69$, $\delta\text{Ce}=0.24\sim 0.49$, Eu、Ce 均具明显负异常到轻微负异常特征(图 7a)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7b)中,角闪黑云片岩的曲线呈右倾型,相对富集 Ba 和 Sm,相对亏损高场强元素 K、Th、Sr、Zr 和 Ti。大理岩样品和软玉样品具

表 6 龙溪软玉及部分围岩样品的稀土元素质量分数统计表(10^{-6})

Tab. 6 Rare earth elements mass fraction of Longxi nephrite and some host rocks samples(10^{-6})

编号	LX-1	LX-3	LX-4	LX-6	LX-7	LX-10	LX-13	LX-14	LX-23	LX-24	LX-40	LX-45
名称	角闪黑 云片岩	角闪黑 云片岩	大理岩	黄绿色 龙溪玉	黄绿色 龙溪玉	黄绿色 龙溪玉	青灰色 龙溪玉	青灰色 龙溪玉	青灰色 龙溪玉	黄绿色 龙溪玉	墨绿色 龙溪玉	墨绿色 龙溪玉
La	54.17	71.49	6.40	0.74	0.76	2.03	15.26	1.75	0.61	15.15	0.80	0.93
Ce	105.62	143.39	3.48	0.91	0.94	1.88	7.06	2.98	0.78	13.74	1.04	0.83
Pr	15.49	20.49	1.10	0.36	0.48	0.85	3.01	1.50	0.29	3.63	0.33	0.30
Nd	70.64	87.84	4.78	2.39	3.15	4.42	12.31	9.40	2.04	15.98	1.71	1.33
Sm	13.44	18.56	0.70	0.87	1.13	1.22	2.25	2.89	0.83	2.62	0.43	0.36
Eu	3.99	5.64	0.19	0.18	0.18	0.20	0.45	0.40	0.14	0.34	0.09	0.08
Gd	13.80	17.05	0.80	1.33	1.49	1.51	2.67	3.32	1.06	2.94	0.50	0.38
Tb	2.55	2.91	0.19	0.34	0.34	0.33	0.48	0.67	0.23	0.53	0.10	0.08
Dy	16.70	14.95	0.89	2.45	2.33	2.17	3.44	4.35	1.52	3.48	0.68	0.47
Ho	3.43	2.90	0.23	0.57	0.51	0.49	0.78	0.91	0.37	0.74	0.15	0.12
Er	9.68	7.22	0.62	1.63	1.29	1.39	2.19	2.40	1.03	1.91	0.43	0.27
Tm	1.48	1.06	0.10	0.29	0.22	0.21	0.30	0.37	0.16	0.28	0.07	0.04
Yb	9.80	6.25	0.65	1.90	1.28	1.38	1.83	2.00	0.96	1.59	0.40	0.18
Lu	1.47	0.97	0.14	0.31	0.20	0.23	0.29	0.24	0.14	0.22	0.06	0.02

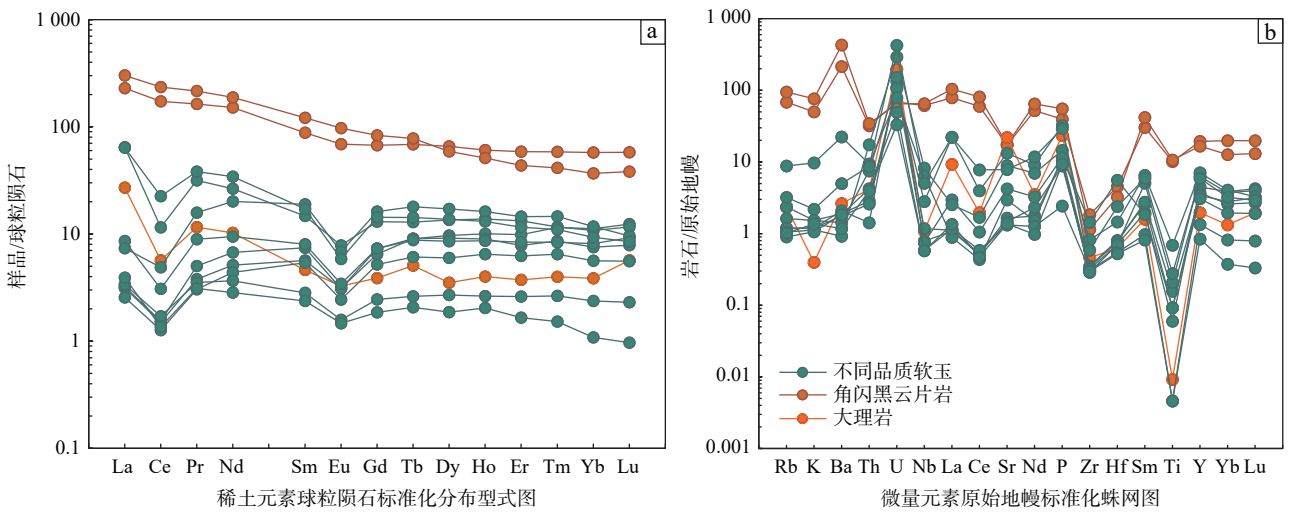


图7 龙溪玉及部分围岩稀土元素配分模式图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 7 (a) Chondrite-normalized REE patterns and (b) spider map of trace elements of Longxi nephrite and some host rocks samples

有相似的特征,曲线呈右倾型,相对富集 U、La、Sr、P,相对亏损 K、Nb、Cs、Zr、Ti。

4 讨论

4.1 龙溪玉地球化学识别标志

4.1.1 主量元素特征

软玉是一种以透闪石矿物为主的矿物集合体,软玉中常存在各类元素间的类质同象替代现象(赵慧博

等, 2022)。不同产地的软玉,由于成玉条件不同,各元素间的类质同象替代作用也存在差异。本次研究对比了不同产地软玉的电子探针(EPMA)数据,发现新疆和田、青海、广西大化等地的软玉 FeO^{T} 含量变化较大;江苏溧阳、黑龙江铁力、贵州罗甸、河南栾川、辽宁岫岩以及四川龙溪等地软玉 FeO^{T} 数据点较为集中;其中辽宁岫岩和河南栾川软玉 FeO^{T} 含量总体较高;四川龙溪、贵州罗甸以及黑龙江铁力软玉 FeO^{T} 含量较为接近;江苏溧阳 FeO^{T} 含量则总体较低(图 8a、

图 8b)。所有产地 $\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO}$ 和 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量无明显差别, 其中新疆和田和广西大化软玉 $\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO}$ 含量变化大, 贵州罗甸玉 $\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO}$ 含量较高, 江苏溧阳 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量略微较高(图 8a、图 8b)。在图 8c 中可明显发现龙溪玉的 P_2O_5 和 MnO 明显高于其余产地, 尤其 MnO 含量平均值达到了 0.2%; 除广西大化 MnO 含量平均值可达到 0.1% 以外, 其余产地均小于 0.1%。综上所述, 本文认为高 P_2O_5 和 MnO 含量可以作为龙溪软玉的地球化学标型特征之一。

4.1.2 微量元素特征

在地球化学研究过程中, 不同微量元素常具有不同的性质, 其可作为地球化学指示剂、示踪剂等(赵振华, 2016)。笔者对中国不同产地软玉的全岩微量元素数据(ICP-MS)进行收集, 不同产地软玉微量元素存在较为明显的差异(图 9)。

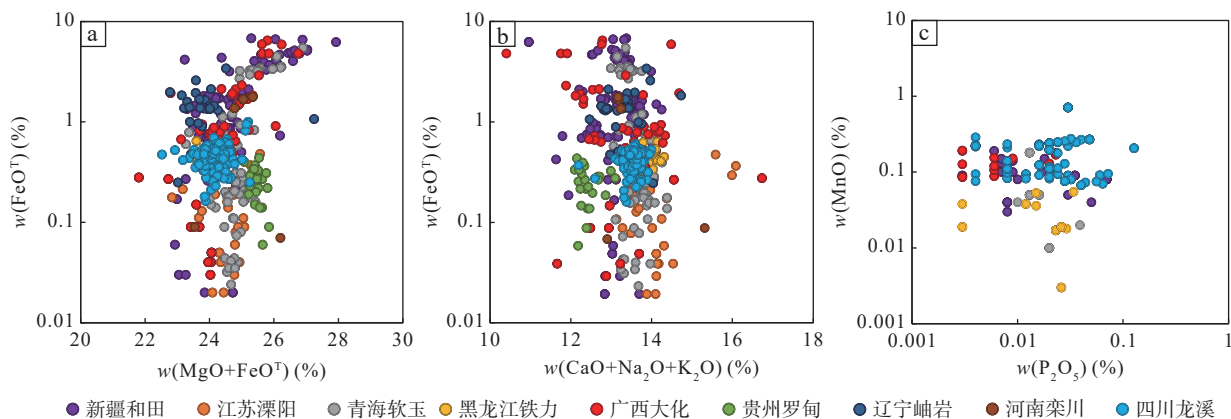
新疆和田玉 Zn 含量较高, Sr 和 U 含量较低, 且 Rb/Sr 和 Nb/Ta 值较大, 在 $\text{Sr}-\text{Rb}$ 图解中集中分布于两个区域; 青海软玉数据点总体变化较大, 且 Sr 含量低, 在 $\text{Sr}-\text{Rb}$ 和 $\text{Sr}-\text{V}$ 图解中具有较好的区分度; 广西大化软玉 Cr 、 Ni 、 Sr 含量均较高, Cu 含量以及 Rb/Sr 比值较低; 贵州罗甸玉 Co 、 Ni 和 Cr 含量较低, 在 $\text{Ni}-\text{Co}$ 和 $\text{Cr}-\text{Co}$ 图解中数据点较为集中, 且具有较好的区分度; 辽宁岫岩软玉 Cr 、 Co 、 Ni 和 U 含量较低, Cu 含量较高, 在 $\text{Cr}-\text{Co}$ 、 $\text{Cr}-\text{Ni}$ 和 $\text{Zn}-\text{Cu}$ 图解中, 可明显与其他产地的玉石相区别; 四川龙溪软玉 Ni 、 Cr 、 V 和 U 含量

高, 在 $\text{Ni}-\text{Co}$ 、 $\text{Cr}-\text{Ni}$ 、 $\text{Sr}-\text{V}$ 以及 $\text{U}-\text{Th}$ 图解中均能很好的与其他产地软玉数据相区别。通过上述总结, 本文认为高 V 、 Cr 和 Ni 含量可以作为龙溪软玉的地球化学标型特征之一, 其他微量元素也可以较好的区别不同产地玉石。

4.1.3 稀土元素特征

稀土元素是一组特殊的微量元素, 拥有独特的 4f 电子轨道。由于所有稀土元素均形成稳定的三价阳离子、且离子半径相近, 因此他们具有非常相似的物理和化学特征, 在任何地质体中都倾向于成组出现(张宏飞等, 2012)。笔者对中国不同产地软玉的稀土元素数据进行了收集, 并绘制了稀土元素配分模式图和散点图。

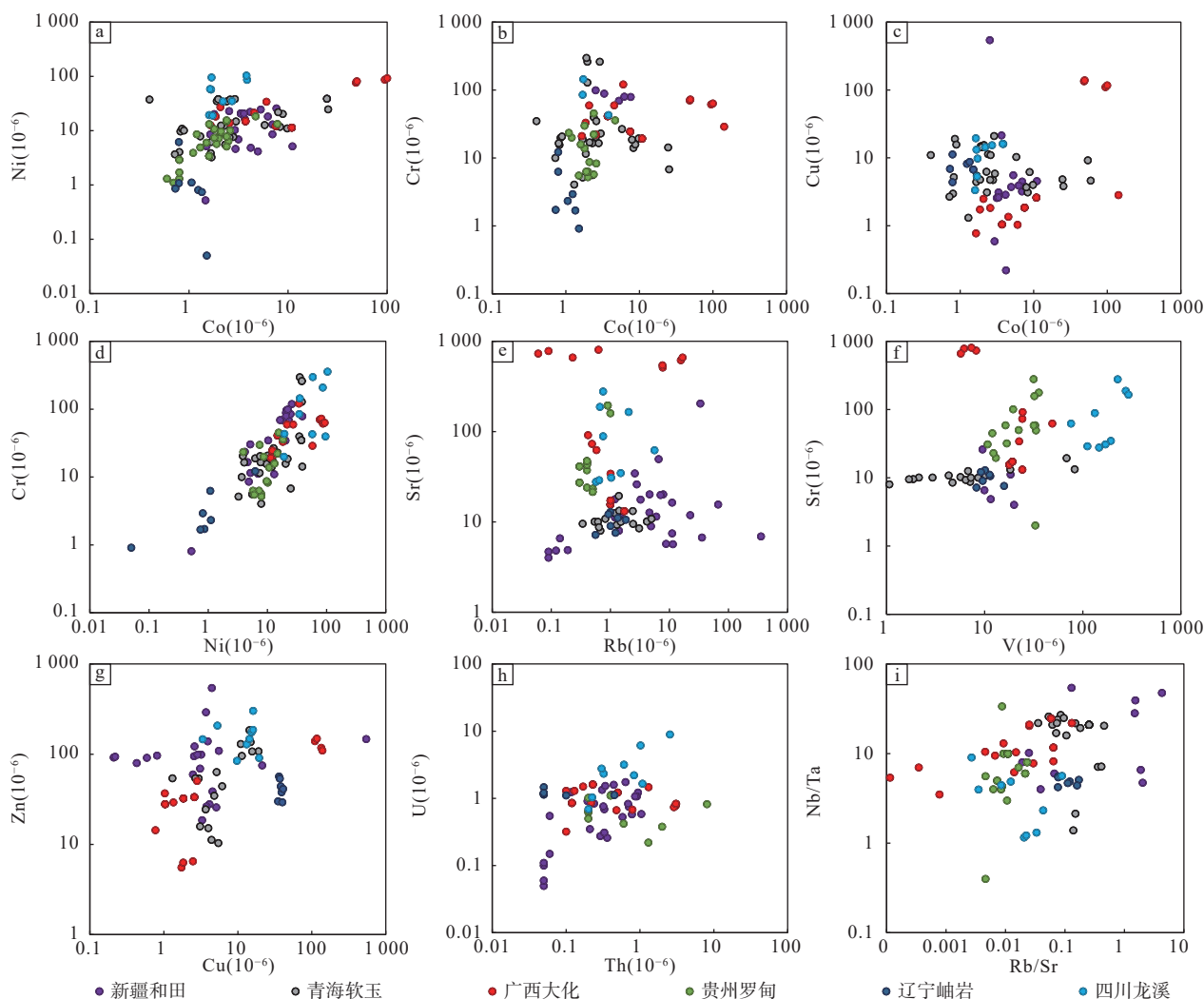
不同产地软玉的稀土元素配分模式图具有明显的特征(图 10)。新疆和田软玉呈现轻稀土元素富集特征, Ce 无明显异常, Eu 具明显负异常, 稀土元素配分曲线基本呈海鸥状(图 10a); 江苏溧阳软玉呈现轻稀土元素富集特征, Ce 和 Eu 无明显异常特征, 稀土元素配分曲线基本呈右倾的曲线(图 10b); 广西大化软玉具明显 Ce 、 Eu 负异常特征, 稀土元素配分曲线较为平缓(图 10c); 青海软玉呈现轻稀土元素轻微富集特征, Ce 、 Eu 无明显异常特征, 稀土元素配分曲线呈轻微右倾的曲线(图 10d); 黑龙江铁力软玉呈现轻稀土元素富集特征, Ce 具明显正异常、 Eu 无明显异常特征, 稀土元素配分曲线呈明显右倾的曲线(图 10e); 辽宁岫岩软玉 Ce 无明显异常、 Eu 具明显负



数据引自刘晶, 2002; 阴江宁, 2006; 李红军, 2008; 凌潇潇等, 2008; 韩磊, 2009; Liu et al., 2010; 秦瑶, 2013; 高诗佳, 2014; 吴之瑛等, 2014; 朴庭贤, 2014; 徐立国等, 2014; 杜季明, 2015; 李晶, 2016; 于海燕, 2016; 郝爽, 2016; 张小冲, 2016; 李晶, 2016; 吴璘洁, 2016; 陈慕雨, 2017; 申晓萍, 2017; 韩冬等, 2018; 贾玉衡, 2018; 刘喜锋等, 2019; 郑奋等, 2019; 姜颖, 2020; 黄倩心, 2021; 徐琳抒等, 2022; 王蔚宁等, 2022; 赵素鹏等, 2023

图8 中国典型软玉产地玉石主量元素特征对比图

Fig. 8 Characteristic comparison of main element characteristics of nephrite from different areas in China



数据引自阴江宁, 2006; 贾玉衡, 2018; 吴璘洁, 2016; 姜颖, 2020; 刘喜峰等, 2019; 于海燕, 2018; 陆俐合等, 2023; 蓝叶, 2022; 张亚东, 2015; 杨林等, 2012; 郑奋等, 2019

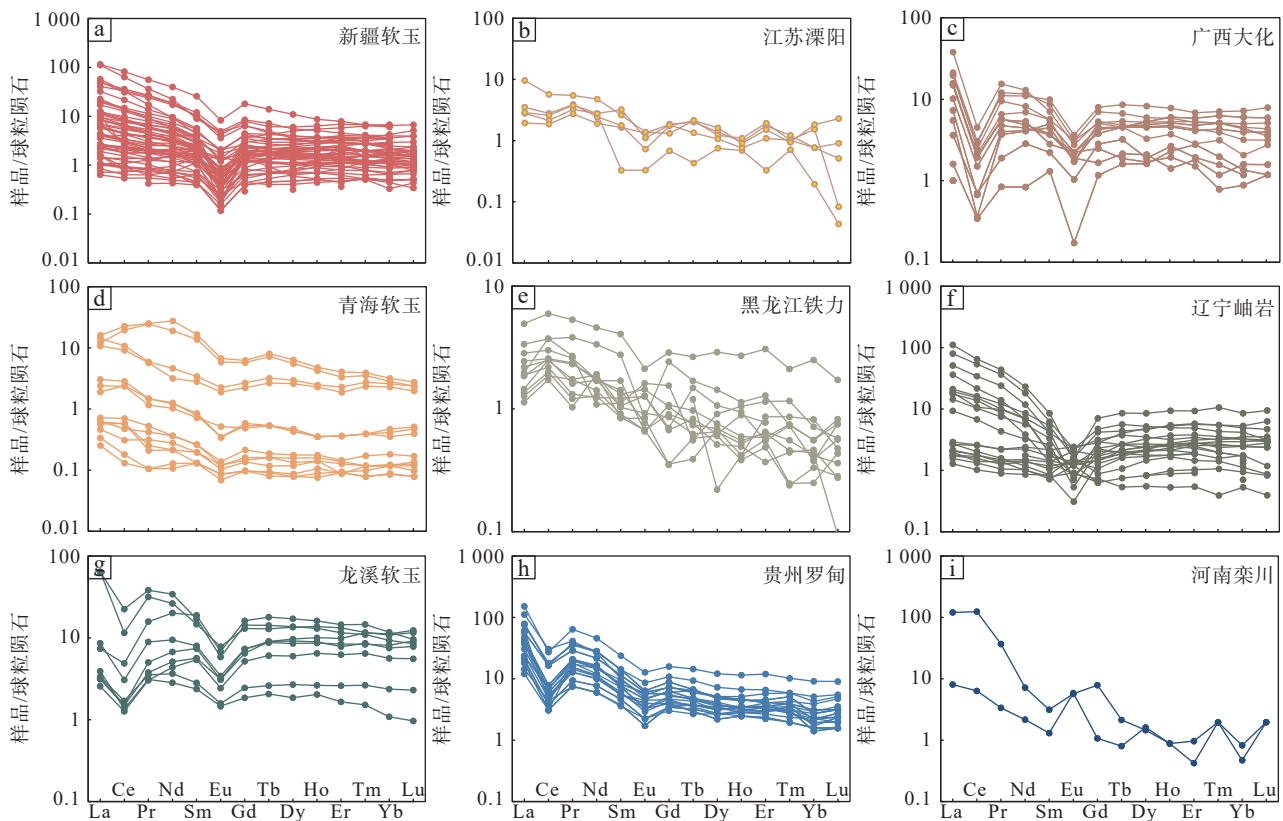
图9 中国典型软玉产地玉石微量元素特征对比图

Fig. 9 Characteristic comparison of trace elements of nephrite from different areas in China

异常特征, 稀土元素配分曲线呈海鸥状, 且轻稀土段曲线较为陡立, 重稀土段曲线较为平缓(图 10f); 四川龙溪软玉具明显 Ce、Eu 负异常特征, 稀土元素配分曲线较平缓(图 10g); 贵州罗甸软玉具明显 Ce、Eu 负异常特征, 稀土元素配分曲线呈右倾的曲线(图 10h); 河南南川软玉无明显 Ce 和 Eu 异常特征, 稀土元素配分曲线呈右倾的曲线(图 10i)。通过对比可知, 仅有广西大化软玉与龙溪软玉具有相识特征, 其他产地的软玉和龙溪玉均有较大差别。

对不同产地软玉的稀土元素进行投图, 不同产地的点相对分散, 有较好的区分度。新疆和田玉、江苏溧阳和辽宁岫岩等地软玉的 δCe 接近于 1, 垂向上具有直线分布特征; 青海软玉和黑龙江铁力软玉 δCe 大

于 1, 且青海软玉数据点相对分散、黑龙江铁力软玉则相对集中; 四川龙溪、贵州罗甸以及广西大化等地软玉的 δCe 明显小于 1, 且数据点较为集中(图 11)。各地区软玉 ΣREE 变化均较小, 贵州罗甸 ΣREE 相对较高, 青海软玉相对较低。龙溪软玉数据点与贵州罗甸玉和广西大化软玉的数据点难以区分(图 11a、图 11b)。龙溪软玉 LREE/HREE 值主要集中分布于 1 附近, 明显区别于其他产地(图 11c、图 11d)。各地区软玉的 LREE 和 HREE、 La_N/Yb_N 和 LREE/HREE 均具有明显的正相关性, 龙溪软玉 HREE 含量最高, 青海软玉 HREE 含量最低, 其余产地较为集中, 无明显区分度。综上所述, 低 δCe 值, 高 HREE 含量, LREE/HREE 比值接近 1, 稀土元素配分曲线呈海鸥状,



数据引自阴江宁, 2006; 王时麒, 2007; 向芳等, 2008a, 2008b; 程军等, 2000; 李晶等, 2010; Liu et al., 2011a, 2011b; 杨林等, 2012; 高诗佳, 2014; 张亚东, 2015; 吴璘洁, 2016; 雷成, 2016; 张勇, 2018; 于海燕, 2018; 贾玉衡, 2018; 刘喜锋等, 2019; 郑奋等, 2019; 姜颖, 2020; 尹作为, 2021; 蓝叶, 2022; 陆俐合等, 2023

图10 中国软玉稀土元素配分模式图

Fig. 10 Chondrite-normalized REE patterns of nephrite from different areas in China

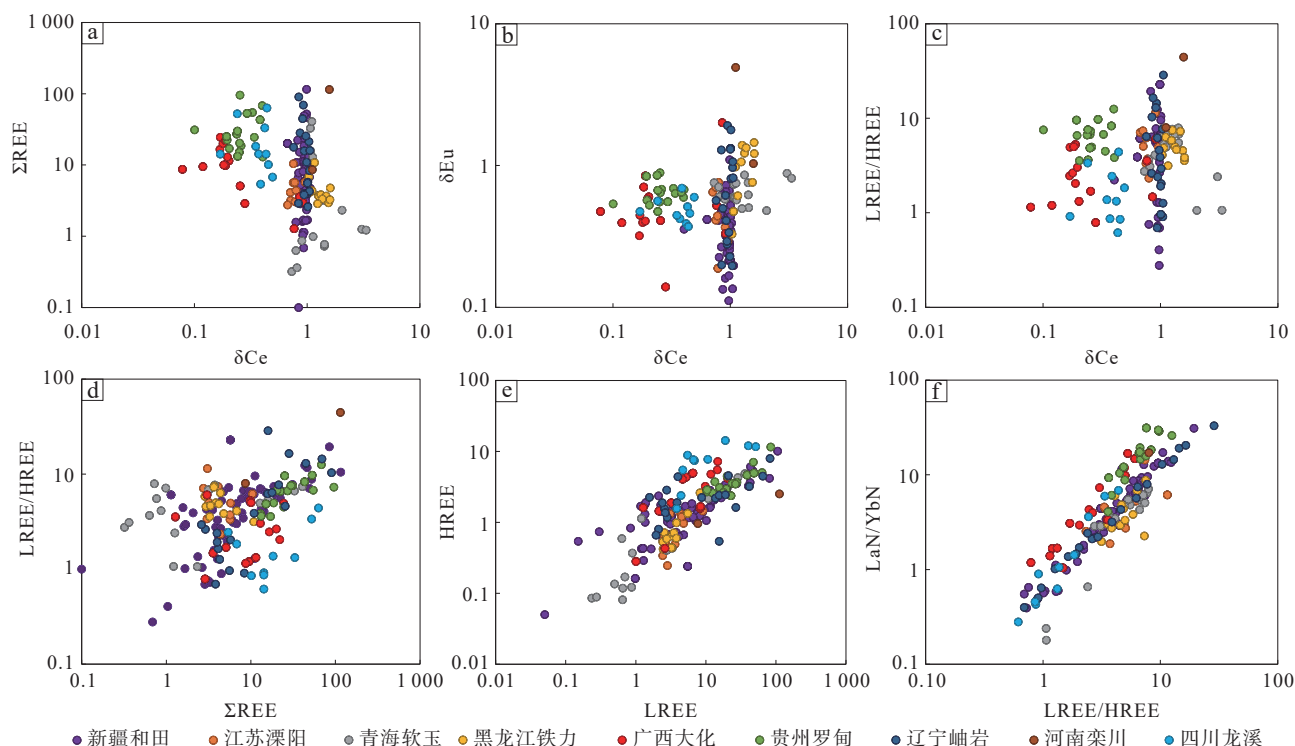
具明显 Ce、Eu 负异常特征可以作为龙溪软玉的地球化学标型特征之一。

4.2 三星堆和金沙玉器软玉矿料溯源

我国著名的三星堆遗址和金沙遗址出土了大量玉石器, 玉料以闪石玉(软玉)为主, 属于狭义的“玉石”; 其他玉料包括蛇纹石玉、红色玛瑙、大理岩、石英岩等, 属于广义的“玉石”; 另外还有少量砂岩、灰岩、斑岩等“石质”材料(朱章义等, 2002, 2004; 鲁昊等, 2021)。关于三星堆遗址和金沙遗址玉器的玉料来源众说纷纭(陈显丹, 2007; 向芳等, 2008a, 2008b; 杨骊等, 2015; 鲁昊等, 2021), 主要观点有: ①距三星堆不远的西部地区; ②新疆和田玉; ③江苏溧阳小梅岭玉矿; ④外地直接输入; ⑤岷江上游的“龙溪玉”或“珉玉”。由于三星堆和金沙玉器具有强烈的地域性色彩, 因此目前大多学者认为玉器应该是就地取材加工而成的作品(陈显丹, 2007; 向芳等, 2008a, 2008b; 杨骊等, 2015; 鲁昊等, 2021)。

金沙文化(距今 3200~2600 年)晚于三星堆文化

(距今 4500~3000 年), 时代上有所重叠, 二者不管是青铜器还是玉石器的造型和成分均具有一致性, 差别在于金沙遗址玉器个体较小、数量更多、造型更加丰富、制作更为精良。金沙玉器的制作工艺仍沿袭了三星堆时期的加工技术, 但整体水平更加精湛娴熟, 器物的形制更为规整, 钻孔后对孔眼等细节的处理亦越发细致, 打磨抛光也是非常细腻。装饰方面, 金沙玉器沿袭了三星堆玉器崇尚简单、朴素的传统风格, 流行在器身外侧雕琢凸起牙饰和在器身上加刻线纹, 体现出对三星堆玉器的继承和发展关系(朱章义等, 2002, 2004)。尤其是金沙遗址中出土的一件玉神人头像, 造型风格与三星堆二号坑铜神坛第三层山形座旁边的侧面人头像几乎完全相同, 与二号坑出土的大型铜兽面具也有相似之处, 同样表明了金沙遗址与三星堆之间有极其紧密的关系(干福熹等, 2017)。因此, 大部分学者认为金沙文化是三星堆文化的延续, 它们的玉石器很可能具有一致来源(向芳等, 2008a, 2008b; 杨骊等, 2015)。



数据引自阴江宁, 2006; 王时麒, 2007; 向芳等, 2008a, 2008b; 程军等, 2000; 李晶等, 2010; Liu et al., 2011a, 2011b; 杨林等, 2012; 高诗佳, 2014; 张亚东, 2015; 吴璘洁, 2016; 雷成, 2016; 张勇, 2018; 于海燕, 2018; 贾玉衡, 2018; 刘喜锋等, 2019; 郑奋等, 2019; 姜颖, 2020; 尹作为, 2021; 蓝叶, 2022; 陆俐合等, 2023

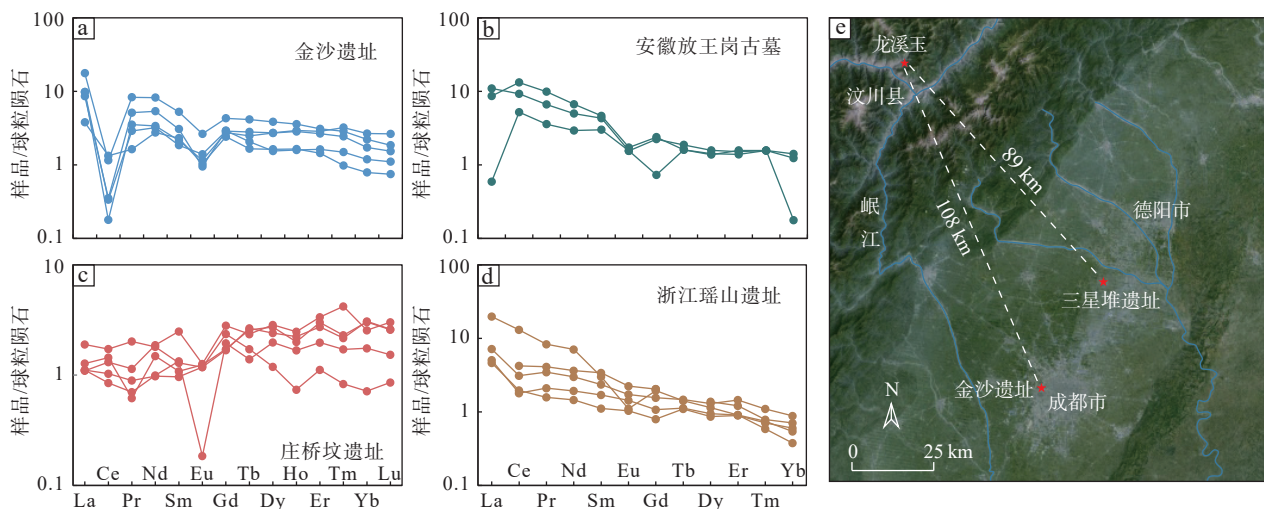
图11 中国软玉稀土元素散点图

Fig. 11 Scatter diagram of rare earth elements of nephrite from different areas in China

前人对三星堆玉器(软玉)的外观研究表明,虽经过次生变化难以辨别玉材原本的颜色,但从器物细节处可见玉材颜色多为青黑色、青绿色和暗绿色等,半透明-不透明,具油脂光泽(鲁昊等, 2021)。在金沙遗址,多数玉器(软玉)表现为不透明,材料疏松,多孔缝隙,表面硬度很低,在显微特征上表现为鳞片状滑石与柱状或细粒状透闪石组成的集合体(向芳等, 2008a, 2008b)。这些特征与龙溪软玉的外观特征很接近。龙溪软玉以墨绿色、黄绿色、浅绿色为主,有少量龙溪软玉样品局部显示为白色-青白色,玉石质地较软,裂纹较发育,主要为半透明—不透明,具油脂光泽或蜡状光泽。其矿物组合主要为透闪石,其次为方解石、白云石和滑石。品质较好的玉石主要为毛毡状交织结构、纤维定向结构等;品质差的玉石主要为纤维定向结构、叶片状定向结构。大部分样品中透闪石矿物均匀分布(图 4g、图 4h),部分样品中透闪石具定向分布特征(图 4d~图 4f)。这种定向排列的特征在其他产地软玉中较为罕见。另外,龙溪软玉和三星堆古玉的拉曼光谱相似,均具有 674 cm^{-1} 主峰(鲁昊等, 2021;

徐琳抒等, 2022)。

软玉的稀土元素在不同产地间的差异远远大于同一产地由于实验条件不同而产生的误差,这种不同产地软玉之间的差别,对物源示踪具有一定指示意义(程军等, 2000, 2005; 王时麒, 2007; 向芳等, 2008a, 2008b; 李晶等, 2010; Liu et al., 2011a, 2011b; 钟友萍等, 2013)。金沙遗址软玉的 ΣREE 平均值为 8.21, 轻(平均值为 5.85)、重稀土元素(平均值为 2.28)分异不明显, LREE/HREE 值平均为 2.57, 具明显 Ce、Eu 负异常特征, 稀土元素配分曲线呈海鸥状(图 12a~图 12d)。将金沙玉器与不同产地和遗址中软玉的稀土元素进行对比, 不难发现, 金沙遗址出土玉器的稀土配分模式图与贵州罗甸玉、广西大化玉以及四川龙溪玉具有相似性, 均表现出明显的 Ce、Eu 负异常特征(图 10; 图 12)。另外, 金沙遗址软玉的 δCe 平均值为 0.14, 明显小于 1。仅有贵州罗甸, 广西大化以及四川龙溪软玉的 δCe 值符合这一特征(图 10)。贵州罗甸玉轻重稀土分馏明显, 这一特征明显不同于金沙玉器。相比之下, 仅有四川龙溪以及广西大化软玉的稀土元素配



数据引自程军等, 2000; 程军等, 2005; 向芳等, 2008a, 2008b; 李晶等, 2010; 李晶, 2016

图12 不同遗址软玉稀土元素配分模式图(a)和四川盆地水系分布与三星堆、金沙遗址空间位置(b)

Fig. 12 (a) Chondrite-normalized REE patterns of nephrite from different ruins and (b) distribution of river system and spatial location of Sanxingdui and Jinsha sites in Sichuan Basin

分模式与金沙遗址软玉最为相似(图 10、图 12)。

金沙遗址和三星堆遗址出土的玉石器除了透闪石玉以外,还有部分蛇纹石玉、红色玛瑙、大理岩、石英岩等。金沙遗址和三星堆遗址北西汶川一带(图 12e)出产“龙溪玉”(软玉),其围岩发育蛇纹岩、大理岩、石英岩、砂岩等,与两地遗址出土玉石器材质组合极为类似。从地理位置上来说,四川龙溪玉矿与两地遗址距离较近,且之间均有河流连通,据《续汉书·郡国志》记载:“有玉垒山,出璧玉,湔水所出”。因此,该地很可能为金沙遗址和三星堆遗址玉石器提供原料来源。综上所述,对于三星堆与金沙遗址的软玉玉石器材质可能的来源,本研究倾向于四川龙门山地区汶川-茂县一带。

5 结论

(1)龙溪软玉的颜色以墨绿色、黄绿色、浅绿色为主,少量为白色-青灰色,通常呈现墨绿色-黄绿色-浅绿色-青灰色环带。

(2)龙溪软玉具有高 P、Mn、V、Cr、Ni、U 含量和低 δCe 值(>1), LREE/HREE 值接近 1, 稀土元素配分曲线呈海鸥状,具明显 Ce、Eu 负异常特征,可以作为龙溪软玉的地球化学识别标志。

(3)三星堆与金沙遗址的软玉玉石器材质可能主要来源于四川龙门山地区汶川-茂县一带。

参考文献(References):

- 白洞洲, 张跃峰, 丘志力, 等. 四川汶川“龙溪玉”的宝石学特征及成因初探[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文), 2022, 24(3): 1-9.
- BAI Dongzhou, ZHANG Yuefeng, QIU Zhili, et al. A Preliminary Study on the Gemmological Characteristic and Formation of “Longxi Yu” in Wenchuan, Sichuan Province[J]. Journal of Gems and Gemmology, 2022, 24(3): 1-9.
- 陈暴雨, 兰延, 陈志强, 等. 广西大化“水草花”软玉的宝石学特征[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文), 2017, 19(2): 41-48.
- CHEN Muyu, LAN Yan, CHEN Zhiqiang, et al. Gemmological Characteristic of Nephrite with Dendrite Pattern from Dahua, Guangxi Province[J]. Journal of Gems and Gemmology, 2017, 19(2): 41-48.
- 陈显丹. 三星堆出土玉石器研究综述[J]. 四川文物, 2007, 2: 59-63.
- CHEN Xiandan. Summary of research on jade and stone tools unearthed in Sanxingdui[J]. Sichuan Cultural Relics, 2007, 2: 59-63.
- 程军, 杨学明, 杨晓勇, 等. 良渚文化玉器的稀土元素特征及其考古学意义[J]. 稀土, 2000, 21(4): 1-4.
- CHENG Jun, YANG Xueming, YANG Xiaoyong, et al. REE Characteristics of the Liangzhu Culture Jade Artifacts Excavated from Yaoshan Site, Zhejiang Province, and Their Archaeological Implications[J]. Chinese Rare Earths, 2000, 21(4): 1-4.
- 程军, 王昌燧, 李德文, 等. 良渚文化遗址及放王岗汉墓出土玉器的物相及微量元素测试分析[J]. 考古, 2005, (7): 70-75.
- CHENG Jun, WANG Changsui, LI Dewen, et al. Sites the Fang-

- wanggang Han Tomb Analysis of the Phases and Microelement Contents of the Jades from Liangzhu Culture[J]. *Archaeology*, 2005, (7): 70–75.
- 杜季明. 广西大化透闪石玉的宝石矿物学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- DU Jinming. The Study on Gemological and Mineralogical Characteristics of Nephrite in Dahua, Guangxi[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- 付宛璐, 鲁昊, 柴珺, 等. 龙溪玉的光谱学特征及颜色成因[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(5): 1408–1412.
- FU Wanlu, LU Hao, CHAI Jun, et al. Spectroscopic Characteristics of Longxi Nephrite From Sichuan and Its Color Genesis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(5): 1408–1412.
- 干福熹, 李青会, 刘松, 等. 中国古代玉石和玉器的科学研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2017.
- 高诗佳. 黑龙江铁力软玉宝石矿物学特征及成因研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- GAO Shijia. The Study on Gemological and Mineralogical Characteristics and genesis of Nephrite in Tieli, Heilongjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- 龚大兴, 邹灏, 李阳, 等. 松潘-甘孜造山带东部猛古岩体元素地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2019, 38(6): 1129–1142.
- GONG Daxing, ZOU Hao, LI Yang, et al. Geochemical Characteristics and Zircon U-Pb Age of the Menggu Pluton in the Eastern Songpan-Garze Orogenic Belt[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2019, 38(6): 1129–1142.
- 韩冬, 刘喜锋, 刘琰, 等. 新疆和田地区大理岩型和和田玉的形成及致色因素探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 2018, 37(6): 1011–1026.
- HAN Dong, LIU Xifeng, LIU Yan, et al. Genesis of dolomite-related nephrite from Hetian and color-forming factors of typical nephrite in Hetian, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2018, 37(6): 1011–1026.
- 韩磊, 洪汉烈. 中国三地软玉的矿物组成和成矿地质背景研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 2019, 11(3): 6–10.
- HAN Lei, HONG Hanlei. Study on Mineral Components and Geological Background of Nephrites from Three Localities in China[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 2019, 11(3): 6–10.
- 黄倩心, 王时麒, 梁国科, 等. 广西巴马玉的矿物学特征及其成因探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 2021, 40(5): 977–990.
- HUANG Qianxin, WANG Shiqi, LIANG Guoke, et al. Mineralogical characteristics and genesis of Bama nephrite[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2021, 40(5): 977–990.
- 黄杰, 张辰子, 王真, 等. 河南方城双山玉的发现及初步研究[J]. *西北地质*, 2020, 53(3): 243–251.
- HUANG Jie, ZHANG Chenzi, WANG Zhen, et al. Discovery and Preliminary Study of Shuang Shan Jade in Fangcheng, Henan[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(3): 243–251.
- 郝爽, 张贵宾. 青海三岔口烟青色透闪石玉致色成因探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 2016, 35(S1): 12–18.
- HAO Shuang, ZHANG Guibin. The genesis of smoky-violet color in nephrite from Sanchakou, Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2016, 35(S1): 12–18.
- 胡健民, 孟庆任, 石玉若, 等. 松潘-甘孜地体内花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 867–880.
- HU Jianmin, MENG Qingen, SHI Yurao, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons from granitoid bodies in the Songpan-Ganzi terrane and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 867–880.
- 贾玉衡, 刘喜锋, 刘琰, 等. 新疆且末碧玉矿的成因研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2018, 37(5): 824–838.
- JIA Yuheng, LIU Xifeng, LIU Yan, et al. Petrogenesis of the serpentinite-related nephrite deposit in Qiemo County, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2018, 37(5): 824–838.
- 姜颖. 新疆若羌和田玉矿物岩石学特征及成因机理研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- JIANG Ying. Study on Petro-mineral Features and Genetic Mechanism of Ruqiang Nephrite, Xinjiang Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- 景云涛, 刘琰, 张勇, 等. 中国大理岩型和和田玉矿床的成矿时代、形成过程及找矿方向[J]. *岩石矿物学杂志*, 2022, 41(3): 651–667.
- JING Yuntao, LIU Yan, ZHANG Yong et al. Metallogenic age, formation process and prospecting direction of marble-related nephrite deposit in China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2022, 41(3): 651–667.
- 蓝叶. 广西大化透闪石玉的地球化学特征及成因初探[J]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
- LAN Ye. Geochemical characteristics and genesis of Tremolite Jade in Dahua, Guangxi[J]. Guilin: Guilin University of Technology, 2022.
- 雷成. 东昆仑小灶火软玉矿床成因研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
- LEI Cheng. The genesis of the Xiaozaohe nephrite deposit in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- 李红军, 蔡逸涛. 江苏溧阳软玉特征研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 2008(3): 16–19.
- LI Hongjun, CAI Yitao. Study on Characteristics of Nephrite from Liyang Jiangsu Province[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 2008(3): 16–19.
- 李晶. 中国典型产地软玉的宝石学矿物学特征及对良渚古玉器产地的指示[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.

- LI Jing. Mineralogical and gemological characteristics of typical nephrites in China for the origin identification on Liangzhu ancient jades[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- 李晶, 高洁, 童欣然, 等. 江苏溧阳软玉与良渚文化庄桥坟遗址出土软玉的特征对比研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2010, 12(3): 19–25.
- LI Jing, GAO Jie, DONG Xinran, et al. Comparative Study of Characteristics of Nephrites from Liyang Jiangsu Province and Zhuangqiaofen Site Zhejiang Province[J]. Journal of Gems and Gemmology, 2010, 12(3): 19–25.
- 廖任庆, 朱勤文. 中国各产地软玉的化学成分分析[J]. 宝石和宝石学杂志, 2005, 7(1): 25–30.
- LIAO Renqing, ZHU Qinwen. Chemical Composition Analysis of Nephrites from Different Localities in China[J]. Journal of Gems and Gemmology, 2005, 7(1): 25–30.
- 凌潇潇, 吴瑞华, 白峰, 等. 河南栾川透闪石玉的化学组成特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27(2): 157–163.
- LING Xiaoxiao, WU Ruihua, BAI Feng, et al. A study of tremolite jade from Luanchuan Henan Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2008, 27(2): 157–163.
- 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, 23(4): 375–380.
- LIU Fei, YU Xiaoyan. Classification and mineralogical characteristics of nephrite deposits in China[J]. Mineral Resources and Geology, 2009, 23(4): 375–380.
- 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, 4(2): 25–29.
- LIU Jing, CUI Wenyuan. Study on Nephrite(Tremolite Jade) from Three Localities in China[J]. Journal of Gems and Gemmology, 2002, 4(2): 25–29.
- 刘喜锋, 贾玉衡, 刘琰. 新疆若羌—且末戈壁料软玉的地球化学特征及成因类型研究[J]. 岩矿测试, 2019, 38(3): 316–325.
- LIU Xifeng, JIA Yuheng, LIU Yan. Geochemical Characteristics and Genetic Types of Gobi Nephrite in Ruqiang-Qiemo, Xinjiang[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(3): 316–325.
- 鲁昊, 付宛璐, 柴珺, 等. 三星堆遗址出土玉石器的成分检测及相关问题分析[J]. 故宫博物院院刊, 2021, (9): 123–142.
- LU Hao, FU Wanlu, CHAI Jun, et al. A Test Report on the Formulae of the Jade and Stone Objects Unearthed at the Sanxingdui Ruin Site and Other Related Issues[J]. Palace Museum Journal, 2021, (9): 123–142.
- 陆俐合, 于海燕, 蓝叶, 等. 广西大化县层控型透闪石玉成矿带不同岩体地球化学及锶同位素特征对比研究[J/OL]. 桂林理工大学学报, 2023, 1–13.
- LU Lihe, YU Haiyan, LAN Ye, et al. Comparative study on geochemistry and strontium isotope characteristics of different rock bodies in stratified tremolite jade metallogenic belt in Dahua, Guangxi[J/OL]. Journal of Guilin University of Technology, 2023, 1–13.
- 朴庭贤, 尹京武, 闫星光, 等. 贵州罗甸玉矿物学及成分特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33: 7–18.
- Park Jung Hyun, YIN Jingwu, YAN Xingguang, et al. Mineralogical characteristics of tremolite and diopside in Luodian, Guizhou Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33: 7–18.
- 秦瑶. 青海墨色软玉的宝石学特征及矿物组成研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- QIN Yao. Study on Gemmological Characteristics and mineral components of Qinghai black Nephrite[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- 申晓萍, 刘莉, 魏进国. 广西大化黑青色和田玉的矿物组成[J]. 宝石和宝石学杂志, 2017, 19(5): 25–29.
- SHEN Xiaoping, LIU Li, WEI Jinguo. Mineral Component of Black Cyan Nephrite from Dahua, Guangxi[J]. Journal of Gems and Gemmology, 2017, 19(5): 25–29.
- 宋明伟, 彭义伟, 陈友良, 等. 四川康定偏岩子造山型金矿床成因: 石英微量元素和硫化物 S 同位素证据[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(4): 596–613.
- SONG Mingwei, PENG Yiwei, CHEN Youliang, et al. Genesis of the Pianyanzi orogenic gold deposit in Kangding, Sichuan: Evidence from quartz trace elements and sulfide S isotopes[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2024, 51(4): 596–613.
- 王春云. 龙溪软玉的矿物学研究[J]. 地质地球化学, 1989(3): 96–101.
- WANG Cunyun. Mineralogical study of Longxi nephrite[J]. Earth and Environment, 1989(3): 96–101.
- 王春云. 龙溪软玉矿床地质及物化特征[J]. 矿产与地质, 1993, 7(3): 201–205.
- WANG Cunyun. Geology and physicochemical characteristics of Longxi nephrite[J]. Mineral Resources and Geology, 1993, 7(3): 201–205.
- 王时麒, 员雪梅, 李世波. 辽宁富铁蛇纹石玉的宝石学特征及开发利用[J]. 宝石和宝石学杂志, 2007, 9(4): 1–6.
- WANG Shiqi, YUN Xuemei, LI Shibao. Gemmological Characteristics and Developing Prospect of Fe-Rich Serpentine Jade from Liaoning Province[J]. Journal of Gems and Gemmology, 2007, 9(4): 1–6.
- 王蔚宁, 廖宗廷, 周征宇, 等. 四川龙溪软玉的宝石矿物学特征[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文), 2022, 24(1): 20–27.
- WANG Weining, LIAO Zongting, ZHOU Zhengyu, et al. Gemmological and Mineralogical Characteristics of Nephrite from Longxi, Sichuan Province[J]. Journal of Gems & Gemmology, 2022, 24(1): 20–27.
- 吴璘洁. 新疆且末天泰矿区和和田玉宝石矿物学特征及成因研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- WU Linjie. Study on Gemmological and Mineralogical Characteristics

- and Genesis of Nephrite inTiantai, Qiemo, Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- 吴之瑛, 王时麒, 凌潇潇. 辽宁岫岩县桑皮峪透闪石玉的玉石学特征与成因研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(S2): 15-24.
- WU Zhiying, WANG Shiqi, LIANG Xiaoxiao. Characteristics and origin of nephrite from Sangpiyu, Xiuyan County, Liaoning Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 27(02): 157-163.
- 向芳, 王成善, 蒋镇东, 等. 成都金沙玉器的稀土元素特征及材质来源[J]. 地球科学与环境学报, 2008a, 30(1): 54-56.
- XIANG Fang, WANG Chengshan, JIANG Zhengdong, et al. Rare-Earth Element Characters of Jadewares of Jinsha Site in Chengdu and Its Significance for Indicating Material Source[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008a, 30(1): 54-56.
- 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, 2008b, 108(3): 104-108.
- XIANG Fang, WANG Chengshan, YANG Yongfu, et al. A Study of Jadestone Sources at the Jinsha Site[J]. Jiangnan Archaeology, 2008b, 108(3): 104-108.
- 肖倩, 向芳, 辛中华, 等. 四川广汉联合遗址出土玉石器石料的选择策略研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 403-417.
- XIAO Qian, XIANG Fang, XIN Zhonghua, et al. Material selection strategy for jade and stone artifacts discovered at Lianhe Site in Guanghan County, Sichuan Province[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2024, 51(3): 403-417.
- 徐立国, 於晓晋, 王时麒. 广西大化东扛村透闪石玉的宝石学特征及成因[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(S1): 55-60.
- XU Liguang, YU Xiaojin, WANG Shiqi. The gemological characteristics and origin of Donggang Village tremolite jade in Dahua, Guangxi[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33(S1): 55-60.
- 谢佐彬, 向芳, 许强, 等. 大渡河上游阿娘寨古堰塞湖的发现及其特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 449-464.
- XIE Zuobin, XIANG Fang, XU Qiang, et al. Characteristics of ancient Aniangzhai barrier lake in upper reaches of Dadu River[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2024, 51(3): 449-464.
- 徐琳抒, 王蔚宁, 周征宇, 等. 三星堆及金沙玉器的产地溯源[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 1101-1109.
- XU Linshu, WANG Weining, ZHOU Zhengyu, et al. Origin of Sanxingdui and Jinsha Jades[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(8): 1101-1109.
- 杨骊, 段宇衡. 三星堆及金沙玉器的玉源初探—四重证据法的实验[J]. 百色学院学报, 2015, 28(3): 24-31.
- YANG Li, DUAN Yuheng. A Preliminary Exploration into Jade Sources in Sanxingdui and Jinsha Sites—An Experiment Based on Quadruple Evidence Methodology[J]. Journal of Baise University, 2015, 28(3): 24-31.
- 杨林, 林金辉, 王雷, 等. 贵州罗甸玉岩石化学特征及成因意义[J]. 矿物岩石, 2012, 32(2): 12-19.
- YANG Lin, LIN Jinhui, WANG Lei, et al. Petrochemical characteristics and genic significance of luodian jade from Guizhou[J]. Mineralogy and Petrology, 2012, 32(2): 12-19.
- 杨萍, 丘志力, 陈炳辉, 等. 现代微区测试技术在确定宝玉石产地来源中的应用及其研究进展[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 11(1): 1-19.
- YANG Ping, QIU Zhili, CHEN Binghui, et al. Application and Advances of Modern Microanalysis in Study of Origin and Occurrence of Gems and Jades. [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 11(1): 1-19.
- 杨眉, 何明跃, 王峰, 等. 陕西汉中蛇纹石玉的矿物学及光谱学特征研究[J]. 西北地质, 2021, 54(4): 142-155.
- YANG Mei, HE Mingyue, WANG Feng, et al. Mineralogical and Spectral Studies on the Serpentine Jade in Hanzhong, Shaanxi Province[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(4): 142-155.
- 阴江宁. 河南栾川玉石的岩石学和矿床学研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- YIN Jiangning. Petrology and Deposit Research on Nephrite and Serpentine of Luan Chuan, Henan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006.
- 尹作为, 王文薇, 周青超. 广西大化县透闪石玉的产地特征[J]. 地质科技通报, 2021, 40(6): 114-123.
- YAN Zouwei, WANG Wenwei, ZHOU Qingchao. Location characteristics of tremolite jade from Dahua, Guangxi[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(6): 114-123.
- 于海燕, 贾宗勇, 雷威. 中国软玉的稀土元素地球化学特征及影响因素研究[J]. 现代地质, 2019(3): 13-17.
- YU Haiyan, JIA Zongyong, LEI Wei. Study on Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Rare Earth Elements in Chinese Nephrite[J]. Modern Mining, 2019(3): 13-17.
- 于海燕, 阮青锋, 廖宝丽, 等. 青海不同矿区软玉地球化学特征及Ar-Ar定年研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2018, 37(4): 655-668.
- YU Haiyan, RUAN Qingfeng, LIAO Baoli, et al. Geochemical characteristics and Ar-Ar dating of different deposits in Qinghai Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2018, 37(4): 655-668.
- 于海燕. 青海软玉致色机制及成矿机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- YU Haiyan. Coloring and metallogenic mechanisms of different colors in Qinghai nephrite[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.
- 张宏飞, 高山, 张本仁, 等. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社,

- 2012.
- 张小冲. 于田赛底库拉木软玉的矿物学特征研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- ZHANG Xiaochong. Study on the mineralogy of Saidikulamu nephrite, Yutian[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- 张亚东. 贵州罗甸软玉矿地质地球化学特征及成矿规律研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- ZHANG Yadong. Study on Geologic-Geochemical Property and Metallogenic Regularity of Nephritic Ore in Luodian County, Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou University, 2015.
- 张勇, 魏华, 陆太进, 等. 新疆奥米夏和田玉矿床成因及锆石 LA-ICP-MS 定年研究 [J]. 岩矿测试, 2018, 37(6): 695-704.
- ZHANG Yong, WEI Hua, LU Taijin, et al. The Genesis and LA-ICP-MS Zircon Ages of the Omixia Nephrite Deposit, Xinjiang, China[J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(6): 695-704.
- 张跃峰, 丘志力, 杨炯, 等. 岩矿地球化学分析测试技术在古代玉器产地溯源中的应用及进展 [J]. 岩石矿物学杂志, 2022, 41(6): 1169-1186.
- ZHANG Yuefeng, QIU Zhili, YANG Jiong, et al. Applications and progress of petrogeochemical testing techniques in tracing the origin of ancient jade[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2022, 41(6): 1169-1186.
- 赵慧博, 同彦庄, 刘芳晓, 等. “西安绿”玉石的宝石矿物学特征研究 [J]. 西北地质, 2022, 55(2): 217-226.
- ZHAO Huibo, TONG Yanzhuang, LIU Fangxiao, et al. Study on the Characteristics of Gemology and Mineralogy of “Xi'an Green” Jade[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(2): 217-226.
- 赵素鹏, 孙宇航, 赵艳梅. 河南栾川软玉的成分研究分析及质量评价 [J]. 现代盐化工, 2023, 50(5): 139-142.
- ZHAO Supeng, SUN Yuhang, ZHAO Yanmei. Composition analysis and quality evaluation of Henan Luanchuan nephrite[J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2023, 50(5): 139-142.
- 赵振华. 微量元素地球化学原理 (第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- 郑奋, 刘琰, 张红清. 辽宁岫岩河磨玉岩石地球化学组成及锆石 U-Pb 定年研究 [J]. 岩矿测试, 2019, 38(4): 438-448.
- ZHENG Fen, LIU Yan, ZHANG Hongqing. The Petrogeochemistry and Zircon U-Pb Age of Nephrite Placer Deposit in Xiuyan, Liaoning[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(4): 438-448.
- 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 Youping, QIU Zhili, LI Liufe, 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.
- 朱章义, 王方, 张擎. 成都金沙遗址 I 区“梅苑”地点发掘一期简报 [J]. 文物, 2004(4): 4-65+97-100+3.
- ZHU Zhangyi, WANG Fang, ZHANG Qing. First Season of Excavation at Meiyuan of the Jinsha Site near Chengdu The Institute of Archaeology of Chengdu City[J]. Cultural Relics, 2004(4): 4-65+97-100+3.
- 朱章义, 张擎, 王方. 成都金沙遗址的发现、发掘与意义 [J]. 四川文物, 2002(2): 3-10+97-98.
- ZHU Zhangyi, ZHANG Qing, WANG Fang. The discovery, excavation and significance of Jinsha site in Chengdu[J]. Sichuan Cultural Relics, 2002(2): 3-10+97-98.
- Chen S F, Wilson C J L. Emplacement of the Longmen Shan Thrust-Nappe Belt along the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18: 413-440.
- Chen S F, Wilson C J L, Worley B A. Tectonic transition from the Songpan-Garze Fold Belt to the Sichuan Basin, south-western China[J]. Basin Research, 1995, 7: 235-253.
- Huang M, Buick I S, Hou L W. Tectonometamorphic Evolution of the Eastern Tibet Plateau: Evidence from the Central Songpan-Garze Orogenic Belt, Western China[J]. Journal of Petrology, 2003, 44: 255-278.
- Liu Y, Deng J, Shi G H et al. Chemical Zone of Nephrite in Alamas, Xinjiang, China[J]. Resource Geology, 2010, 60(3): 249-259.
- Liu Y, Deng J, Shi G H, et al. Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011a, 42: 440-451.
- Liu Y, Deng J, Shi G H, et al. Geochemistry and petrogenesis of placer nephrite from Hetian, Xinjiang, Northwest China[J]. Ore Geology Reviews, 2011b, 41: 122-132.
- Mattauer M, Malavieille J, Calassou S, et al. La chaîne Triasique de Songpan-Garze (Ouest Sechuan et Est Tibet): une chaîne de plissement-decollement sur marge passive[J]. Comptes Rendus de Academie des Sciences Paris, 1992, 314: 619-626.
- Nie S, Yin A, Rowley D B, et al. Exhumation of the Dabie Shan ultrahigh-pressure rocks and accumulation of the Songpan-Ganzi flysh sequence, central China[J]. Geology, 1994, 22: 999-1002.
- Roger F, Malavieille J, Leolup P H H, et al. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan-Ganzi Fold Belt (eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 22: 465-481.
- Sengör A M C. Tectonic subdivisions and evolution of Asia[J]. Bulletin of Technical University of Istanbul, 1985, 46: 355-435.
- Zhang R X, Yang S Y. A Mathematical Model for Determining Carbon Coating Thickness and Its Application in Electron Probe Microanalysis[J]. Microscopy and Microanalysis, 2016, 22(6): 1-7.
- Zhang Z H, Liou J G, Coleman R G. An outline of the plate tectonics of China[J]. Geological Society of American Bulletin, 1984, 95: 295-312.