

文章编号: 1000-4734(2014)02-0223-11

# 贵州罗甸玉的矿物学及矿床学初步研究

李凯旋<sup>1,2</sup>, 姜婷丽<sup>3\*</sup>, 邢乐才<sup>1,2</sup>, 周明忠<sup>4</sup>, 罗泰义<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学 北京 100080;  
3. 贵州省产品质量监督检验院, 贵州 贵阳 550004; 4. 贵州师范大学, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:** 罗甸玉的主要组成矿物为透闪石, 具有典型的毛毡状纤维交织结构, 次要矿物为透辉石和滑石, 次要矿物的含量及结构是影响玉石质量的主要因素。罗甸玉微量元素中 Cr-Ni-Co 的含量远低于交代蛇纹岩型软玉, 与交代白云岩型软玉相当。球粒陨石均一化的稀土元素配分模式为右倾型, 具有强烈的 Ce 负异常 ( $\delta\text{Ce}=0.21\sim 0.34$ ) 和弱 Eu 负异常, 与我国典型的新疆和田玉、岫岩玉差别非常明显。罗甸玉、矿区辉绿岩、地层硅质岩的地球化学特征对比发现, 辉绿岩的侵入主要提供了热源, 罗甸玉形成过程中大量的 Mg 可能来源于海水循环, 稀土元素主要继承了地层中二叠系硅质岩的特征, 并在蚀变过程中进一步叠加了热循环海水的信息。综合区域地质、矿物学及地球化学的研究成果, 我们认为在约 255 Ma 时黔南辉绿岩岩床侵入, 上覆海水通过断裂体系形成大规模的热传导循环, 形成厚大的外接触蚀变带, 同时不断将海水中的 Mg 循环输送到下部, 通过白云岩化、透辉石化、透闪石化及滑石化等蚀变反应, 最终形成罗甸透闪石玉矿床。

**关键词:** 罗甸玉; 矿物学特征; 地球化学特征; 矿床成因

**中图分类号:** P57; P61

**文献标识码:** A

**作者简介:** 李凯旋, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 矿床地球化学方向. E-mail: likaixuan636528@gmail.com

玉石根据硬度可以划分为硬玉 (Jadeite) 和软玉 (nephrite)。硬玉 (玉石分类名称) 一般指翡翠, 主要组成矿物为硬玉 (矿物学名称); 软玉的主要组成矿物为透闪石, 具有洁白无瑕和温润雅致的特点, 也可称之为透闪石玉, 典型代表是新疆和田玉。软玉在中国的开发利用历史悠久, 最早可追溯到新石器时期。国内外透闪石玉的研究主要体现在矿物学、矿床学以及化学组成方面。矿物学方面研究较为深入, 主要通过偏光显微镜、X 射线粉晶衍射、红外光谱、电子探针、扫描电镜对其矿物成分、化学组成、结构构造进行鉴别<sup>[1-6]</sup>, 证明透闪石玉的主要成分是透闪石, 以发育纤维交织 (毛毡状结构) 结构为特征。矿床学方面的研究主要体现在矿床成因、矿床类型划分上, 透闪石玉矿床的成因一般与中酸性、基性、超基性侵入岩有关; 与中酸性岩、基性岩有关的透闪石玉被认为是接触交代成因的, Si 来自岩浆热液, Mg、Ca 来自镁质碳酸盐岩围岩<sup>[7-9]</sup>; 有关超基性岩的透闪石玉<sup>[10,11]</sup>系由超基性岩蚀变成蛇纹岩再与围岩接触交代形成, 其 Mg、Si 来自超基性岩, Ca 来自围岩。对于透闪石玉矿床类

型的划分是矿床学研究的重点, 在国内一般有两种分法, 一种是依据热液来源把透闪石玉矿床分为岩浆热液型和变质热液型<sup>[9]</sup>, 另一种以容矿围岩为基础, 将透闪石玉矿床分为镁质碳酸盐岩型和超镁铁岩型<sup>[12]</sup>; 国外则依据透闪石玉成因特征将其分为交代白云石型和交代蛇纹石型<sup>[13]</sup>。

贵州罗甸透闪石玉 (简称罗甸玉) 发现于 2009 年, 主要分布在贵州省罗甸县和望谟县南部, 产于辉绿岩岩床与中下二叠统碳酸盐岩地层的接触带中。宝石矿物学的研究确定了罗甸玉的矿物成分、折射率、密度、结晶度, 并运用 SEM 揭示了玉石的显微结构<sup>[14,15]</sup>; 但矿床学的研究还处于起步阶段, 仅依据矿床产出的地质环境认为该矿床属接触交代型, 辉绿岩床为其提供主要的成矿物质和热源<sup>[15-17]</sup>, 因此有关矿床学方面的研究仍需加强。本文对一些典型的罗甸玉样品开展了矿物学和地球化学分析, 通过主微量元素的对比分析, 结合区域构造和地层特征, 提出了“辉绿岩供热上覆海水供镁”的成矿模式。

## 1 区域地质与矿区地质

贵州的二叠系地层分布广泛, 发育完整, 沉积类型多样, 其中罗甸—望谟地区的二叠系属于南盘江地层分区, 和黔南、黔北分区有较大差别。

收稿日期: 2013-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 41072054)

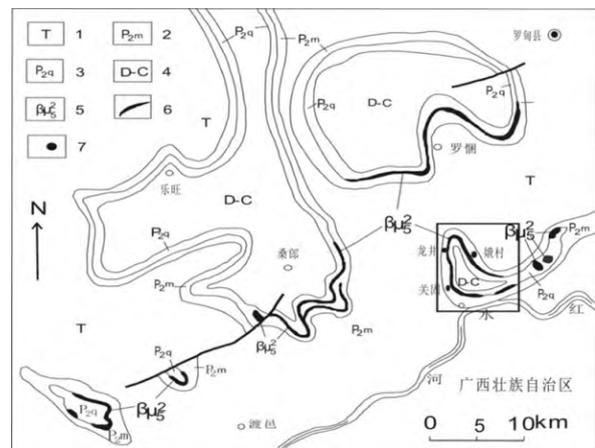
\* 通讯作者, E-mail: jiangdou317@sina.com

早二叠世, 黔北分区为半局限台地相不纯的碳酸盐岩, 黔南分区为开阔台地相较纯的碳酸盐岩, 南盘江分区为浅海盆地和台地边缘斜坡深水相的暗色碳酸盐岩和硅泥质岩。南盘江分区下二叠统的地层单位为四大寨组, 层型剖面位于紫云县四大寨乡的晒瓦, 可分为 2 段, 下段改交段以杂色粘土岩为主, 上段冲头段以深灰色硅质条带微晶灰岩为主, 冲头段上部普遍白云岩化; 南盘江区上二叠统地层单位为晒瓦组, 主要岩性为深水相的碳硅质泥岩组合。南盘江地层分区的二叠纪研究整体比较薄弱, 上述的四大寨组和晒瓦组使用较少, 在 1:20 万的地质图及矿产图中二叠纪地层还是使用栖霞组、茅口组、吴家坪组等地层单位。

峨眉山大火成岩省(或地幔柱)岩浆活动是华南二叠世时期(主要喷发时期为 257~260 Ma<sup>[18]</sup>)最重要的火山岩浆作用, 喷出岩分布面积超过了 50 万 km<sup>2</sup><sup>[19-21]</sup>, 主要分布在云南、贵州和四川。在贵州有溢流喷发和岩床(墙)侵入两种表现形式, 其中溢流喷发的拉斑玄武岩主要分布在贵州西部, 分布面积约 3.2 万 km<sup>2</sup>。岩床(墙)状辉绿岩主要分布在黔西北和黔南两个地区, 黔西北有岩床(墙)80 余处, 产状以岩床为主, 最大岩体出露长 40 余 km, 主要侵入地层为茅口组一二段之间, 但大部分岩体与围岩的接触交代作用微弱, 个别如威宁县儿马冲岩体可以发育约 4 m 厚的砂卡岩化带及近 2 m 厚的大理岩化带。黔南区有岩体 11 处, 产状均为岩床, 出露最长约 20 km, 一般 1~10 km, 岩床厚度一般 15~70 m, 侵入地层均为二叠系四大寨组中部(1:20 万地质图中一般标为栖霞组与茅口组之间), 接触带围岩普遍具有大理岩化蚀变, 局部有透闪石化和硅化, 顶板茅口组地层中大理岩化带厚度一般 30~40 m, 底板栖霞组中厚度一般 10 m(罗甸幅 1:20 万区域地质测量书)。

罗甸透闪石玉矿床主要产出于罗甸县南部的关固村一带(图 1), 与辉绿岩岩床的侵入关系极为密切。矿区总体为一复式背斜, 即由北北西向的冗里背斜和近东西向的峨劳背斜叠加而成<sup>[22]</sup>, 从核部到翼部出露地层分别为石炭系、二叠系、三叠系。与成矿相关的地层为二叠系四大寨组, 岩性以灰岩夹燧石条带或燧石结核为主; 该地区二叠系地层研究资料较多的是纳水剖面, 该剖面距罗甸县罗悃镇罗苏村西南约 7 km, 与关固村比较接近。贵州罗甸纳水剖面从下石炭统上部至上二叠统出露十分完整连续, 古地理上为台地前坡带的下部至深水盆地边缘, 二叠系可识别出

4 个相带: 盆地相、斜坡相、陆棚相、台地前斜坡相<sup>[23]</sup>, 是研究黔南斜坡相沉积特征的绝佳地点。区内岩浆岩仅有辉绿岩分布, 晚二叠世辉绿岩(255.00±0.62 Ma<sup>[22]</sup>)呈岩床侵入到二叠系的层滑构造空间<sup>[17,22]</sup>, 引起二叠系下部燧石条带灰岩发生透闪石化和大理岩化。关固矿区的接触交代带厚度接近 50 m 左右, 地层的灰岩普遍发生大理岩化, 同时地层中的硅质条带(一般厚度 10~20 cm 左右)或结核则发生透闪石化形成软玉, 呈层状、似层状、结核状产于大理岩化带或透闪石大理岩化带中; 相对应, 矿区的矿石类型包括结核状矿石和条带状似层状矿石, 当地开采主要集中于条带状似层状矿石。



1. 三叠系; 2. 二叠系中统茅口组; 3. 二叠系中统栖霞组; 4. 泥盆系、石炭系未分; 5. 辉绿岩; 6. 辉绿岩侵入体; 7. 罗甸玉矿点

图 1 罗甸玉矿区区域地质图(据范二川等, 2012)

Fig. 1. Regional geological map of nephrite deposit in Luodian.

## 2 样品处理和分析方法

分析所用样品均来自对关固矿区实地考察取样, 采样的矿石类型为条带状似层状罗甸玉。

对采取的罗甸玉典型样品制成光薄片, 供偏光显微镜下观察和电子探针能谱分析所用; 取少量样品, 磨至 200 目以下进行主、微量元素的测试。电子探针分析、主微量元素的测试都在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成, 其中电子探针及能谱分析在日本 EPMA-1600 上进行, 分析时的额定输出为 2.5 kV, 4.5 nA。主量元素测试采用 X 射线荧光光谱(XRF)法, 样品制备采用熔片法制成圆玻璃片, 使用荷兰帕纳科 AXIOS PW4400 X 射线荧光光谱仪分析, 分析精度在 0.3% 以内。微量元素的测试采用四级杆型电感耦合等离子体质谱(Q-ICP-

MS) 进行分析, 分析精度优于 5%; 样品前处理如下: 准确称取样品 50 mg, 放入 Teflon 坩埚中, 加入 1 mL HF 和 1 mL HNO<sub>3</sub>, 盖上盖子放入不锈钢套中, 放入烘箱中 190 °C 加热 40 h; 冷却后取出钢套, 拿出钢套中的坩埚置于 200 °C 的电热板上蒸干, 待完全蒸干加入 0.6 mL HNO<sub>3</sub>, 再次蒸干; 然后加入 1 mL 的 0.5 μg/mL Rh 内标溶液和 2 mL HNO<sub>3</sub>, 再加少量去离子水, 至坩埚一半满并再次放入钢套中, 在 140 °C 下加热 8 h 后取出摇匀, 吸取其中 400 μL 溶液移到离心管中, 加入蒸馏水定容到 10 mL 待上机测试。

### 3 罗甸透闪石玉的矿物学特征

#### 3.1 透闪石玉手标本特征

罗甸玉石按颜色可划分为白玉、青白玉、青玉以及斑点玉和草花玉<sup>[17]</sup>, 缺少新疆、青海等地区所产的墨玉<sup>[24,25]</sup>和辽宁岫岩所产的糖玉以及黄色色调类玉石<sup>[3]</sup>, 而草花玉、斑点玉却是当地一大特色<sup>[15,17]</sup>, 其它地区鲜有发现。

按照上述分类, 罗甸关固矿区主要的玉石是白玉, 有少量青玉和青白玉, 本次研究样品的手标本特征分述如下:

(1) 白玉: 瓷白色—乳白色, 半透明, 油脂-蜡状断口, 润性变化较大, 乳白色润性较好, 本文划分为罗甸玉中的上品 (LD001, LD05), 瓷白色样品感觉比较干涩, 品质稍差, 本文划分为罗甸玉中的中品 (PL950, LD02)。

(2) 青白玉: 白色—浅绿色过渡, 半透明, 油脂-蜡状断口, 润性较好 (LD04)。

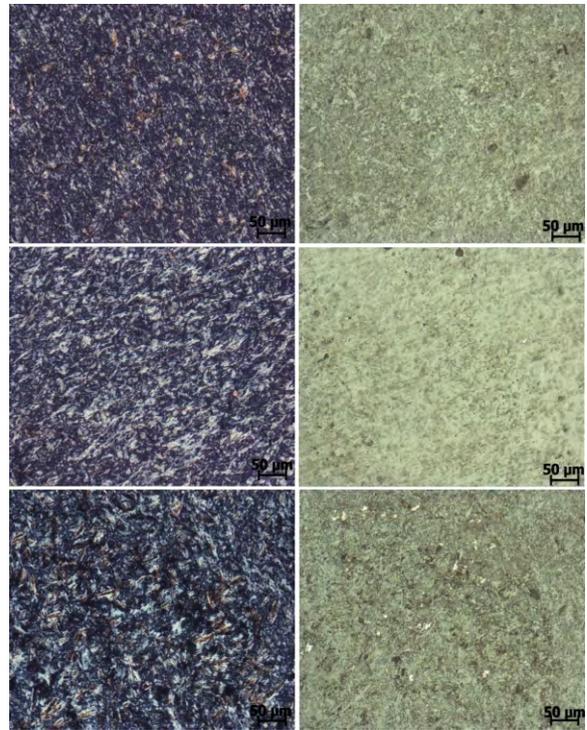
(3) 青玉: 浅绿色, 半透明, 蜡状断口, 润性较好 (LD01)。

#### 3.2 透闪石玉矿物学特征

根据对不同类型样品所做的镜下鉴定, 不同颜色的罗甸玉的矿物组合及元素地球化学特征 (详见后面论述) 目前还没有发现明显的差别, 但不同质地的罗甸玉在矿物粒度和结构上有一定差别, 根据这种差别, 我们将罗甸玉划分为如下 3 种, 总结不同类型的主要特征如下:

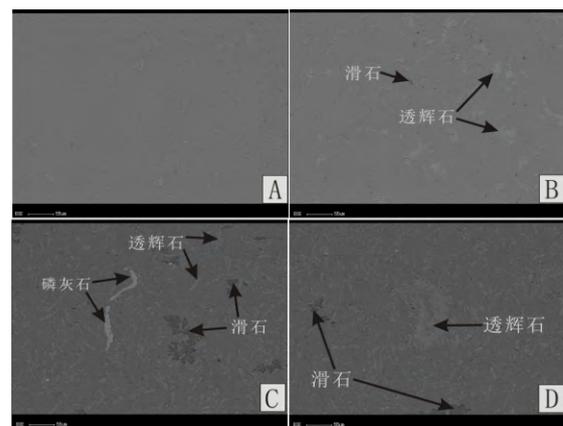
(1) 上品罗甸玉: 主要是白玉, 也有青玉, 典型结构如图 2 (上) 所示。此类玉石几乎全部由透闪石组成, 目估透闪石含量大于 98%, 透辉石 1%~2%, 还含有微量的滑石和磷灰石; 矿物分布均一致密, 由大量细微针状透闪石形成毛毡状纤维交织结构; 纤维状透闪石的粒度在光学显

微镜下非常均一, 透闪石晶体相互交织, 粒度大小难以分辨; 粒状、短柱状的透辉石的粒度偏光显微镜下难以分辨, 背散射图片 (图 3) 中不见滑石, 辉石颗粒单个出现, 长轴延伸一般在 5~20 μm 范围内。



左侧透射光下拍摄, 右侧反射光下拍摄; 从上到下依次为上品、中品、下品罗甸玉

图 2 罗甸玉偏光显微镜下特征  
Fig. 2. Feature of Luodian nephrite under polarizing microscope.



A 为上品罗甸玉图像, 未见滑石, 透辉石颗粒零星出现; B 为中品罗甸玉图像, 滑石呈极细小的斑点, 细小透辉石颗粒聚集成斑点; C、D 为下品罗甸玉图像, 透辉石、滑石可聚集成团斑。图中最亮的为磷灰石, 短柱状稍暗的是透辉石, 少数聚集成斑状, 最广泛分布的透闪石, 最暗的为滑石

图 3 罗甸玉背散射图像  
Fig. 3. EBSP map of Luodian nephrite.

(2) 中品罗甸玉: 如图 2 (中) 所示; 此类玉石透闪石目估含量大于 95%, 透辉石 3%~5%, 其他矿物主要有滑石 (部分青玉中滑石的含量可达 2%~3%) 和磷灰石; 大量细针状纤维状透闪石形成纤维交织结构, 构成玉石的基质, 整体均一致密; 粒状透辉石斑点状分布其中, 整体分布均一; 透闪石的粒度在光学显微镜下难以分辨, 但明显大于上品罗甸玉, 背散射图像中滑石呈极细小的斑点, 透辉石的粒度一般在 5~30 μm 左右, 多个颗粒构成斑点, 含量明显增加。

(3) 下品罗甸玉: 如图 2 (下) 所示, 此类玉石透闪石目估含量大于 90%, 透辉石 5%~8%, 其他矿物主要有滑石和磷灰石; 大量细针状纤维状透闪石形成纤维交织结构, 粒度基本均一构成玉石的基质; 背散射图像显示, 下品罗甸玉中透辉石含量明显增多, 细粒透辉石呈柱状分布, 粒度一般 5~30 μm, 局部聚集成团斑状, 偶见粗粒透辉石聚集成条带状分布; 滑石也明显增多, 并呈 20~50 μm 的团斑状分布。

通过以上对比可以认为, 玉石结构及透辉石的含量和粒度影响玉石的光泽和润性, 粒度细纤维交织结构发育的玉石, 质量也就越好; 透辉石

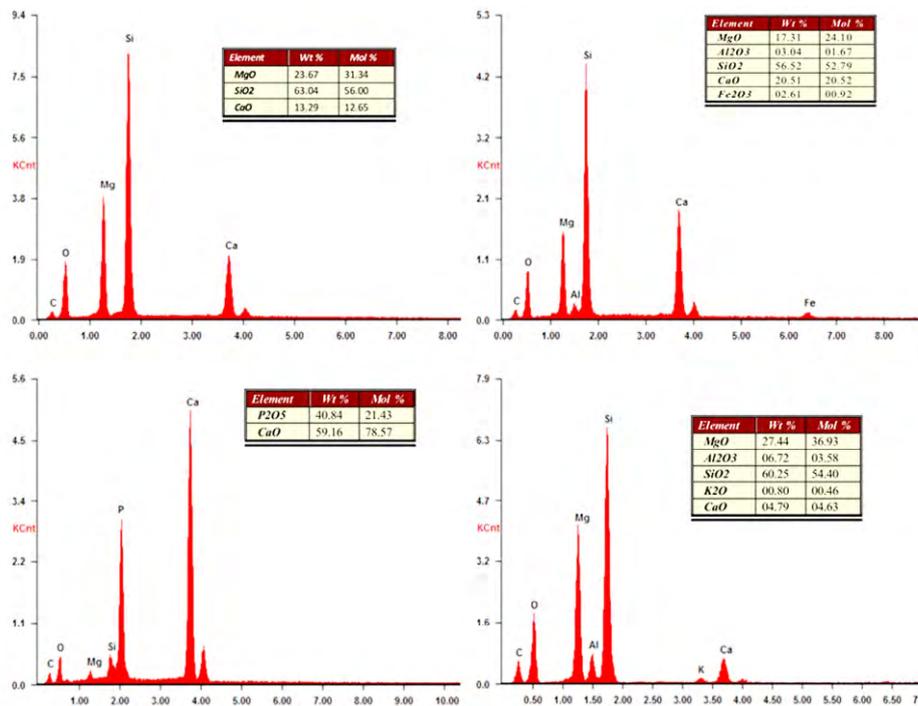
的含量越高, 粒度越大, 玉石的质量就越差。

电子探针能谱分析进一步确证了罗甸玉的主要成分为透闪石, 其次有少量透辉石, 还有极少量的磷灰石、滑石 (如图 3、4 所示)。代表性的矿物背散射图整理为图 3, 所得能谱图选择有代表性的列为图 4。能谱图显示各种透闪石玉中透闪石成分很纯, 基本无类质同象置换现象 (图 4 中的左上); 透辉石则含有一定量的 Fe 和 Al 的置换 (图 4 右上), 而滑石成分中普遍含有一定量的 Al、Ca (图 4 右下)。

### 4 罗甸透闪石玉的元素地球化学特征

#### 4.1 主量元素地球化学特征

相关样品的 X 射线荧光光谱 (XRF) 分析结果显示于表 1。由表 1 可见, 罗甸玉的主要成分含量范围是  $w(\text{SiO}_2)$ : 54.29%~57.13%,  $w(\text{CaO})$ : 11.69%~13.48%,  $w(\text{MgO})$ : 24.51%~25.86%, 与透闪石的标准分子式  $\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$  的化学计量非常接近 (标准透闪石分子中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  的质量分数分别为 59.26%, 13.83%, 24.69%)。



左上为透闪石 (主要成分是 MgO、CaO、SiO<sub>2</sub>, 摩尔比值近似于标准透闪石的 5:2:8); 右上为透辉石 (主要成分 MgO、CaO、SiO<sub>2</sub>, 摩尔比值近似于标准透辉石的 1:1:2, 还含有少量 Al 和 Fe); 左下为磷灰石 (图谱中显示的该矿物主要成分为 P 和 Ca, 少量的 Mg、Si 为周围矿物的干扰所致; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 CaO 的摩尔比值近似于标准磷灰石中的 3:5); 右下滑石 (图谱中显示的矿物成分主要为 MgO、SiO<sub>2</sub>, MgO 和 SiO<sub>2</sub> 的摩尔比值近似标准滑石中的 3:4, 少量 Ca、Al 为类质同象

图 4 罗甸玉矿物组分能谱图

Fig. 4. Energy spectrum of Luodian nephrite mineral composition.

表 1 罗甸透闪石玉的主量元素的 XRF 分析结果 (w<sub>B</sub>%)

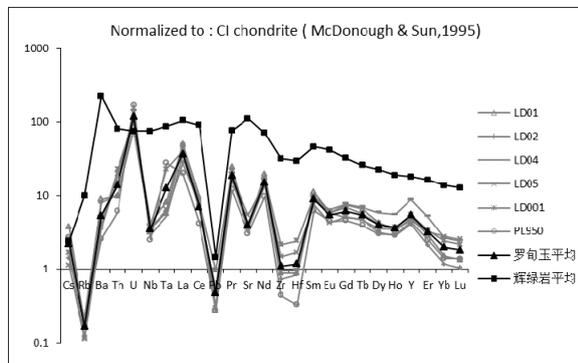
Table 1. Chemical composition of nephrite of Luodian, Guizhou Province, by XRF analysis

样品编号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
LD01	56.58	0.04	0.10	0.11	0.01	24.60	11.69	0.09	0.10	-
LD02	57.01	0.03	0.12	0.13	0.01	25.65	11.99	0.05	0.11	-
LD04	57.13	0.02	0.20	0.15	0.01	25.86	12.09	0.04	0.10	0.003
LD05	54.29	0.02	0.21	0.18	0.01	24.51	13.48	0.20	0.13	-
LD001	54.75	0.05	0.35	0.75	0.02	22.25	14.81	0.48	0.12	0.025
PL950	59.12	0.02	0.52	0.45	0.03	24.41	11.87	0.24	0.11	0.027

注: “-”表示低于检测限.

### 4.2 微量元素地球化学特征

微量元素测试所得数据结果如表 2 所示。从球粒陨石均一化的多元素配分模式图 (图 5) 可见, 不同颜色不同品相罗甸玉的微量元素整体上相当均一, 变化很小, 表现为明显的 Rb-Nb (Ta)-Pb-Sr-Zr (Hf) 亏损和 U 的富集。其中, Co 的数据由于存在样品加工装置的污染, 表中未予列出。稀土元素数据的分析结果如表 3 所示。稀土元素总量变化范围为  $16.8 \times 10^{-6} \sim 34.6 \times 10^{-6}$ , 球粒陨石均一化的配分模式图 (图 6) 为右倾模式, 具有强烈的 Ce 负异常 ( $\delta Ce=0.21 \sim 0.34$ ) 和弱的 Eu 负异常 ( $\delta Eu=0.63 \sim 0.83$ ), 轻稀土相对重稀土富集 (LREE/HREE=4.80 ~ 8.25,  $La_N/Yb_N=14.50 \sim 34.55$ )。



辉绿岩数据来自韩伟<sup>[22]</sup>; 球粒陨石数据引自 Mcdonough & Sun(1995)

图 5 罗甸玉微量元素蛛网图

Fig. 5. Spider diagram for Luodian nephrite.

## 5 罗甸玉的矿床成因剖析

透闪石玉矿床的形成包括了能量与物质两方面因素。首先是岩浆岩的侵入提供了成矿所需的能量, 这一点基本上没有争议; 形成透闪石所需的 Ca、Mg、Si 及水是制约矿床成因的另一个重要因素, 其来源有待斟酌。

罗甸透闪石玉矿床是基性岩墙侵入到燧石条带灰岩中而引起的矿化, 以产出的地质环境而

论, 不同于新疆玛纳斯碧玉、新西兰等地区玉石 (超基性岩蚀变的蛇纹岩与中基性火山岩或火山碎屑岩交代而成<sup>[9-10,28-29]</sup>), 也不同于新疆和田、辽宁岫岩、江苏溧阳玉石以及韩国春川等地玉石 (中酸性岩体侵入到镁质碳酸盐岩或白云岩中引起的矿化<sup>[26,30]</sup>); 与青海三岔口透闪石玉矿床比较相似, 都产于基性岩与碳酸盐岩的接触部位<sup>[7,31]</sup>, 是一种新类型的透闪石玉矿床。

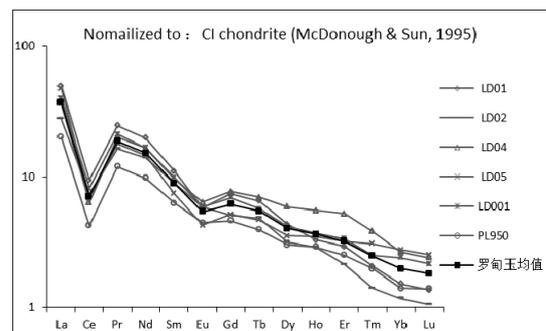


图 6 罗甸玉的球粒陨石均一化稀土元素配分图

Fig. 6. REE distribution diagram for Luodian nephrite.

### 5.1 辉绿岩岩床产出的地质特征制约

与 ELIPS 有关的辉绿岩侵入体 (主要是岩床) 在贵州主要分布在黔西北和黔南, 高热的玄武岩浆进入地层, 提供了接触变质所需要的能量, 但在黔西北地区, 相关的接触变质带普遍比较薄, 围岩主要变化是重结晶和褪色, 一般不具有接触蚀变, 仅威宁儿马冲岩体接触带比较厚 (4 m 砂卡岩带+2 m 大理岩化带); 而在黔南地区, 接触带普遍较厚 (0.5~2.0 m), 特别在矿区, 岩床顶底板接触带的厚度差异很明显 (底板 10 m 左右, 顶板可达 30~50 m)。

在上述 2 个地区, 辉绿岩接触的主要围岩都是灰岩, 侵入地层主要是二叠纪相当于茅口组一二段之间的地层, 侵位深度估计大致在 300 m 左右 (罗甸幅 1:20 万区域地质测量书)。根据侵位年龄, 侵入层位与上覆地层之间近似于水平侵位, 如果纯粹考虑辉绿岩与灰岩之间的物理意义

表 2 微量元素含量的 Q-ICP-MS 分析结果 ( $w_B/10^{-6}$ )

Table 2. Ttrace elements result by Q-ICP-MS

样品编号	LD01	LD02	LD04	LD05	LD001	PL950	罗甸-Z	岫岩-W	和田-L	辉绿岩-H
Li	35.3	19.9	38.2	26.3	20.6	32.6	22.1	-	-	11.1
Be	0.22	0.14	0.28	0.17	0.22	0.07	0.19	13.6	-	0.84
V	4.69	4.16	4.13	4.64	8.43	3.34	6.64	17.6	-	301
Cr	5.04	6.85	35.6	15.4	26.7	14.0	13.8	7.48	63.9	77.9
Co	-	-	-	-	-	-	11.0	5.06	-	57.6
Ni	9.14	9.23	9.48	11.3	4.19	2.85	16.2	2.31	1.63	68.7
Cu	0.97	0.74	1.52	0.69	0.23	0.29	27.6	4.76	-	133
Zn	10.8	13.1	15.2	10.9	13.5	12.2	14.7	2.48	-	308
Ga	0.73	0.50	0.55	0.50	0.51	0.39	-	1.08	-	19.3
Rb	0.42	0.51	0.38	0.26	0.27	0.45	0.63	-	23.7	22.8
Sr	26.7	25.9	30.1	39.5	29.8	22.3	28.6	-	10.9	809
Y	7.92	6.42	13.8	7.40	8.63	7.03	8.03	-	6.38	28.2
Zr	3.35	2.76	3.71	5.67	8.18	1.68	1.84	-	2.66	121
Nb	1.04	0.86	0.71	0.89	0.94	0.60	0.72	5.75	-	17.9
Cs	0.72	0.27	0.49	0.22	0.32	0.51	1.97	2.32	-	0.46
Ba	21.4	19.3	12.6	8.92	9.80	6.21	18.3	-	7.06	536
Hf	0.09	0.09	0.10	0.17	0.25	0.03	0.12	0.16	0.07	3.03
Ta	0.11	0.08	0.07	0.09	0.31	0.38	-	-	0.09	1.19
Pb	0.69	0.78	1.32	1.14	2.41	0.69	4.59	10.2	-	3.62
Th	0.29	0.29	0.44	0.57	0.67	0.18	0.38	0.91	0.19	2.35
U	0.79	0.57	1.04	0.84	0.74	1.25	1.24	9.74	0.95	0.55

注: 表中罗甸-Z 来自支雪颖数<sup>[14]</sup>据平均, 岫岩-W 来自王时麟<sup>[3]</sup>, 和田-L 来自 Yan Liu<sup>[26]</sup>数据平均, 辉绿岩-H 来自韩伟<sup>[22]</sup>数据品均; “-”表示未测或未给出。

表 3 稀土元素含量的 Q-ICP-MS 分析结果 ( $w_B/10^{-6}$ )

Table 3. REE result by Q-ICP-MS

样品编号	LD01	LD02	LD04	LD05	LD001	PL950	罗甸-Z	岫岩-W	和田-L	辉绿岩-H	铁桥-Q
La	11.8	6.58	8.65	11.3	9.47	4.78	6.40	12.1	3.98	24.7	4.74
Ce	5.79	4.53	3.89	4.21	5.01	2.59	3.79	20.7	6.27	55.5	2.67
Pr	2.28	1.52	1.87	1.67	1.97	1.11	1.44	2.17	0.62	7.09	0.78
Nd	9.05	6.36	7.56	6.64	7.61	4.45	5.83	5.41	2.07	32.4	3.03
Sm	1.64	1.33	1.43	1.10	1.46	0.93	1.15	0.59	0.43	6.82	0.59
Eu	0.33	0.33	0.36	0.24	0.33	0.25	0.28	0.09	0.05	2.35	0.12
Gd	1.47	1.01	1.54	1.03	1.37	0.92	1.22	0.67	0.49	6.43	0.58
Tb	0.24	0.17	0.25	0.17	0.21	0.14	0.18	0.15	0.09	0.94	0.09
Dy	1.06	0.78	1.45	0.87	1.02	0.74	1.01	0.98	0.64	5.56	0.54
Ho	0.18	0.16	0.30	0.19	0.20	0.16	0.21	0.22	0.15	1.04	0.11
Er	0.47	0.34	0.83	0.52	0.54	0.40	0.52	0.66	0.45	2.61	0.29
Tm	0.05	0.03	0.09	0.08	0.06	0.05	0.06	0.09	0.07	0.36	0.04
Yb	0.25	0.19	0.43	0.44	0.39	0.23	0.33	0.62	0.44	2.21	0.22
Lu	0.03	0.03	0.06	0.06	0.05	0.03	0.05	0.08	0.07	0.31	0.03
ÓREE	34.6	23.4	28.7	28.5	29.7	16.8	22.5	44.6	15.8	148	13.8
LREE	30.9	20.7	23.8	25.2	25.9	14.1	18.9	41.1	13.4	129	11.9
HREE	3.74	2.71	4.95	3.35	3.84	2.67	3.55	3.46	2.39	19.4	1.88
LREE/HREE	8.25	7.63	4.80	7.51	6.72	5.29	5.32	11.9	5.61	6.63	6.34
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	34.6	25.1	14.5	18.3	17.5	15.2	14.1	14.2	6.45	8.02	15.8
äEu	0.63	0.83	0.73	0.68	0.70	0.82	0.73	0.48	0.31	1.07	0.56
äCe	0.26	0.34	0.23	0.21	0.27	0.26	0.29	0.91	0.88	1.01	0.31

注: 表中罗甸-Z 来自支雪颖数<sup>[14]</sup>据平均, 岫岩-W 来自王时麟<sup>[3]</sup>, 和田-L 来自 Yan Liu<sup>[26]</sup>数据平均, 辉绿岩-H 来自韩伟<sup>[22]</sup>数据品均, 铁桥-Q 来自邱振<sup>[27]</sup>数据平均。

的热传导, 接触带大理岩化的规模主要与侵入的岩浆量有关。如果考虑到围岩地层中有良好的热

传导介质时, 热接触蚀变带的规模可能会扩大很多。实际地质过程中, 水具有最大的热容而成为

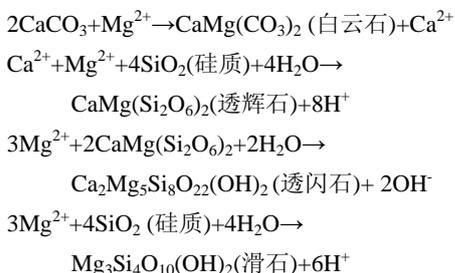
良好的热传导介质; 但是只有热传导介质能够形成良好的热驱动循环时, 才能够稳定地将岩浆热源中的能量向围岩传递, 就如同一套城市供暖系统。

根据两地具有明显差异的接触蚀变带, 我们认为, 黔南罗甸地区的二叠纪辉绿岩岩床在侵入过程中普遍形成了大规模的热传导循环, 因而发育厚大的接触交代变质带, 黔西北地区在大部分岩体侵入过程中都未能形成良好的热传导循环, 因而不发育接触变质带。

## 5.2 矿床及矿物特征制约

通过对关固矿区的野外地质观察, 认为透闪石玉主要有两种产出类型: 条带状似层状及结核状, 矿体产出的特征和区域上相应灰岩地层中的硅质条带或硅质结核的产状完全相似, 表明在接触变质发育的过程中, 成矿热液(也即上述的热传导介质)通过对原始地层中的层状条带状硅质岩或结核状硅质岩进行交代, 形成相关的矿化。

矿物学的观察表明, 在纤维交织结构的致密透闪石中总是能发现一定的透辉石, 不同品相的罗甸玉中不同粒度的透辉石都稳定存在, 局部表现为交代残余结构, 表明形成透闪石的过程中可能先形成透辉石。不同品相的罗甸玉中都能发现滑石的存在, 在玉石中以不同大小的孤立的岛状集合体存在, 滑石代表热液交代最后期形成的矿物, 可能代表了残留的热液通道相, 也表明成矿热液是以富 Mg 为特征。矿化过程中透辉石化及透闪石化所需的 Ca, 热循环海水携带有大量的 Ca, 同时在热液对灰岩围岩的交代过程中, 也可以通过白云岩化置换而获得一部分 Ca。结合区域地层不均一的白云岩化的特征, 有关的反应过程可以表示为:



从上述反应可见, 成矿过程需要大量的 Mg, Mg 在整个区域地质过程中演化, 决定了罗甸透闪石玉的成矿模式。

## 5.3 与其他地区透闪石玉的对比

罗甸透闪石玉与新疆和田、青海所产优质玉

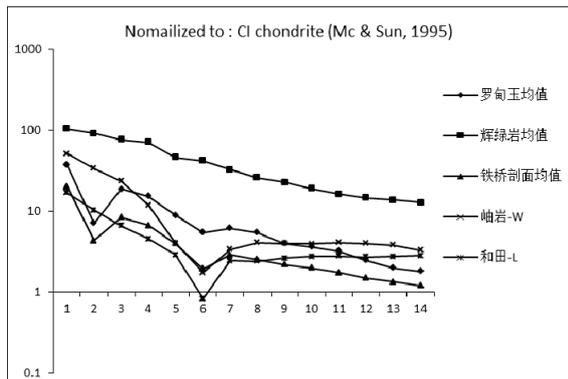
石相比, 油润性不足。据杨林<sup>[15]</sup>对玉石中透闪石晶胞参数的测定, 指出罗甸玉透闪石的结晶度较新疆、青海高, 导致该区玉石的油润性也降低。此外, 罗甸玉玉石中普遍出现透辉石, 尤其是瓷白色玉石类型中透辉石的含量可高达 10% 左右, 也可能是影响玉石油润性的主要原因之一。

在微量元素上, 罗甸玉中 SiO<sub>2</sub>、CaO、MgO 的含量与新疆和田、青海三岔口、辽宁岫岩等地区相比不具有明显的差别, 含量范围位于中国各地透闪石玉主要成分的变化范围之内, w(SiO<sub>2</sub>)=53.34% ~ 60.56%、w(CaO)=11.06% ~ 14.92%、w(MgO)=20.88% ~ 27.51%<sup>[27]</sup>, 即罗甸玉和其他中国各地透闪石玉的主要成分相当, 主要组成矿物为透闪石。此外, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、MnO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub> 的含量范围也与其它地区所产透闪石玉一致, 没有明显差别。

对软玉而言, Cr-Ni-Co 三元素具有明显的成因意义, 常用来划分玉石的成因类型<sup>[28,32-34]</sup>。本次分析的罗甸玉 w(Cr) 平均为 17.27×10<sup>-6</sup> (5.04×10<sup>-6</sup> ~ 35.60×10<sup>-6</sup>), w(Ni) 平均为 7.71×10<sup>-6</sup> (2.85×10<sup>-6</sup> ~ 11.35×10<sup>-6</sup>), 支雪颖测得的 Cr-Ni-Co 三元素平均值分别为 13.8×10<sup>-6</sup>、16.2×10<sup>-6</sup>、11.0×10<sup>-6</sup><sup>[14]</sup>。与交代蛇纹岩型软玉相比, 罗甸玉的 Cr-Ni-Co 明显低于新疆玛纳斯、新西兰等蛇纹岩型<sup>[33]</sup> [w(Cr)=170×10<sup>-6</sup> ~ 3271×10<sup>-6</sup>, w(Ni)=1429×10<sup>-6</sup> ~ 2833×10<sup>-6</sup>, w(Co)=138×10<sup>-6</sup> ~ 265×10<sup>-6</sup>], 而在新疆和田、青海格尔木等交代白云岩型的含量范围之内<sup>[28,33]</sup>, [w(Cr) = 13×10<sup>-6</sup> ~ 152×10<sup>-6</sup>, w(Ni) = 0.05×10<sup>-6</sup> ~ 23×10<sup>-6</sup>, w(Co) = 1×10<sup>-6</sup> ~ 58×10<sup>-6</sup>]。

本次分析样品的稀土元素总量变化范围为 16.8×10<sup>-6</sup> ~ 34.6×10<sup>-6</sup>, 稀土球粒陨石均一化的配分模式图为右倾模式, 具有强烈的 Ce 负异常 (δCe=0.21 ~ 0.34) 和弱的 Eu 负异常 (δEu=0.63 ~ 0.83) (图 7)。与罗甸玉稀土元素特征相比, 辉绿岩稀土配分模式没有明显的 Ce 异常和 Eu 异常, 轻重稀土分异明显, 但低于罗甸玉的稀土分异程度, 总稀土含量高出于罗甸玉甚多, 说明罗甸玉的稀土元素配分模式并非来自辉绿岩。而代表茅口组硅质岩的铁桥剖面中硅质岩的稀土配分模式 (强的 Ce 负异常, 明显的轻重稀土分异) 与罗甸玉极为相似, 因此罗甸玉的稀土配分模式应该继承了地层硅质岩的特征。图中还显示和田玉和岫岩玉的稀土配分模式为轻稀土富集、重稀土平坦型, 无 Ce 异常, 有较强的 Eu 负异常。和田玉和岫岩玉属接触交代型矿床, 侵入的中酸性

岩浆提供矿化所需硅质，镁质碳酸盐岩提供矿化所需的 Mg 和 Ca；玉石的这种轻重稀土分异和强的 Eu 异常与大多数中酸性岩体的稀土配分模式类似，很可能代表了侵入的中酸性岩体的稀土配分模式。以上差异表明和田、岫岩软玉的成矿过程中，侵入的中酸性岩浆提供了成矿物质，而罗甸玉成矿过程中地层硅质岩提供矿化所需的硅质，侵入的辉绿岩稀土配分模式与玉石相差较大，没有物源上的相关性，只起到了热动力的作用。



罗甸玉平均来自本次分析数据，辉绿岩均值来自韩伟数据平均<sup>[22]</sup>，铁桥剖面均值来自邱振数据平均<sup>[27]</sup>，岫岩-W 来自王时麟数<sup>[3]</sup>据平均，和田-L 数据来自 Yan Liu<sup>[26]</sup>数据平均

图 7 稀土元素配分对比图  
Fig. 7. Comparison of REE distribution.

### 5.4 辉绿岩与成矿的关系

区域地质观测表明，侵入的辉绿岩岩床比较稳定，没有在岩床的内接触带发现有大规模的辉绿岩蚀变。近于同时的黔西北地区 and 黔南地区的辉绿岩成分对比表明，二者的 MgO 含量相当（黔西北平均为 4.53%（19 件平均），罗甸岩床平均为 4.30%（2 件平均）（贵州区域地质志），韩伟等<sup>[22]</sup>的 10 件样品平均值为 6.40%，至少表明没有明显的 Mg 丢失过程），表明在侵入接触蚀变的过程中辉绿岩本身没有明显的大规模的 Mg 置换蚀变。进一步对罗甸辉绿岩和罗甸玉的多元素配分对比（图 5）也表明，二者的微量元素模式差距很大，暗示罗甸辉绿岩在罗甸玉的形成过程中并未提供大量的物源。

### 5.5 硅质岩与成矿的关系

通过野外地质观察和区域层序对比，我们可以认为罗甸玉是四大寨组（相当于茅口组）地层中的硅质岩（结核状、条带状、层状）被后期热液交代蚀变的结果，因此我们需要了解相当层位

的初始物质的地球化学特征。

与矿区相邻的纳水剖面是研究深水相二叠系层序的良好剖面，李红敬等<sup>[23]</sup>对该剖面二叠系层序中的硅质岩进行了大量的稀土分析，北美页岩标准化的模式为水平配分模式，以发育强烈的 Ce 负异常（层状硅质岩平均为 0.21，团块状硅质岩平均为 0.25，条带状硅质岩平均为 0.22）为特征，暗示了远离陆缘的洋盆环境。广西来宾地区的铁桥剖面也相当于茅口组地层中的硅质岩，主要是不纯的钙质硅质岩，其稀土元素模式和纳水剖面几乎完全一致，发育强烈的 Ce 负异常（平均 0.40）<sup>[27]</sup>，八渡剖面的四大寨组硅质岩则为不纯的含钙泥质硅质岩，稀土配分模式有所变化，主要表现为稀土第一分组亏损中重稀土水平的配分模式，Ce 的负异常减弱<sup>[48]</sup>。铁桥剖面的稀土特征和纳水剖面更为接近，数据相对完整，可以作为矿化前硅质岩的代表，欠缺的一些典型的微量元素可以用八渡剖面硅质岩的数据作为代表。

通过罗甸玉与同期相近沉积环境的硅质岩对比图（图 8）可以看出，在硅质岩发生透闪石化的过程中，主量元素主要表现为大量的 Mg、Na（K）的带入，同时置换约 20% 的 Si 被热液带出（Si 的基数高，在图上这种亏损表现很不明显），这些特征和现代海底的热液活动特征非常相近，海水中最丰富的是 Na、Mg 及 K，通过热液循环，几乎在所有的现代海底喷水口，Mg 都是极度亏损的，目前在高温海底热液的成分讨论中，一

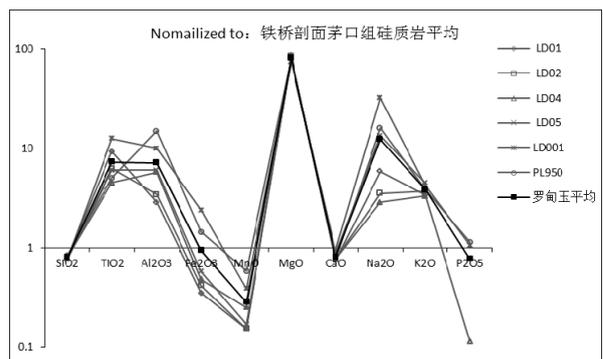


图 8 罗甸玉的主量元素配分模式（铁桥剖面茅口硅质岩平均值均一化）

Fig. 8. Major elements distribution of Luodian nephrite.

般也是通过将 Mg 含量清零来对热液组分进行校正。图上还显示出 Ti 和 Al 的明显带入，估计这两个元素和 Fe 一样主要与玉石中稳定存在的透辉石关系密切（能谱图中透辉石总含有微量的 Fe、Al），可能代表了早期透辉石化过程中围岩中的泥质成分的再分配。

必须注意的是, Mn 的带出非常明显, 暗示了蚀变过程能够将硅质岩中的 Mn 活化带出, Fe 也大部分表现为带出。对大部分玉石而言, 主量元素中的 Fe、Mn 及碳质是重要的致色因素, 罗甸玉的铁主要赋存在透辉石中, 在透辉石向透闪石的转变过程中铁被带出; Mn 在原始的硅质岩中主要与微量的方解石有关, 透闪石化过程中 Mn 进入溶液迁移; 中下品的罗甸玉在镜下观察中有时能发现少量的碳质细脉, 表明原始硅质岩中的有机质在蚀变过程中热解并向周围迁移。

罗甸玉的稀土元素配分模式和罗甸辉绿岩(无 Ce 异常和弱的 Eu 正异常)明显不同, 但和纳水剖面、铁桥剖面硅质岩非常相似(图 7), 表明在硅质岩的透闪石化过程中稀土的模式没有十分明显的改变。但进一步, 如果以铁桥剖面平均值对罗甸玉样品进行均一化, 我们可以进一步分辨罗甸玉形成过程中的热液特征。

从图 9 中可见, 与铁桥硅质岩相比较, 罗甸玉整体具有与铁桥硅质岩相似的稀土配分特征, 表现为平坦配分模式, 同时罗甸玉依然表现出明显的 Ce 负异常(除去样品 LD02 的  $\delta\text{Ce}$  值为 1.03 其它  $\delta\text{Ce}$  范围在 0.70~0.84 之间, 平均 0.80) 和 Eu 正异常( $\delta\text{Eu}$  值范围在 1.11~1.52 之间, 平均 1.30), 前者代表热液继承了上覆循环海水的特性, 后者则代表了海水在辉绿岩侵入驱动的热传导循环过程中产生的稀土分馏特征。

进一步通过多元素的配分模式(图 10), 我们发现在硅质岩透闪石化的过程中, 大部分元素都被清洗得很干净, 包括 Zr-Hf-Nb 等惰性元素, 仅稀土元素和 U(可能还有少量的 Ta)得到一定的富集。

## 5.6 成矿模式总结及预判

结合上面关于大规模热传导介质循环的分析, 我们认为在约 255 Ma 时黔南辉绿岩侵入, 上覆海水通过断裂体系形成大规模的热传导循环, 形成厚大的外接触蚀变带, 同时不断将海水中的 Mg 循环输送到下部, 通过白云岩化、透辉石化、透闪石化及滑石化, 最终形成罗甸透闪石玉矿床。

根据上述成矿过程的分析, 我们预期, 罗甸玉相关的 H-O-Mg 同位素研究可以更好地提供当时海水的信息。

大规模的 Mg 循环过程不仅形成透闪石蚀变矿化, 同时也对上覆灰岩地层进行 Mg 交代即白云岩化, 根据杨绳武等<sup>[36]</sup>、刘家润等<sup>[37]</sup>对黔南地

层的研究, 茅口组地层中发育灰岩夹硅质岩, 灰岩在部分地区相变为团斑状白云质灰岩。目前罗甸玉的开发还局限于透闪石化大理岩带出露良好的地方, 对于区域性的找矿远景规划, 建议对相关地区的茅口组地层开展区域性白云岩化强度填图。

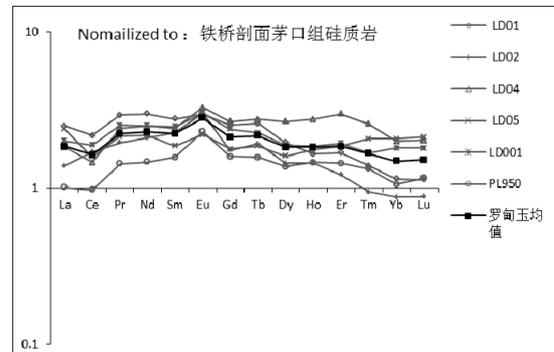


图 9 罗甸玉稀土元素配分图(铁桥剖面茅口组硅质岩稀土平均值均一化)

Fig. 9. REE distribution of Luodian nephrite.

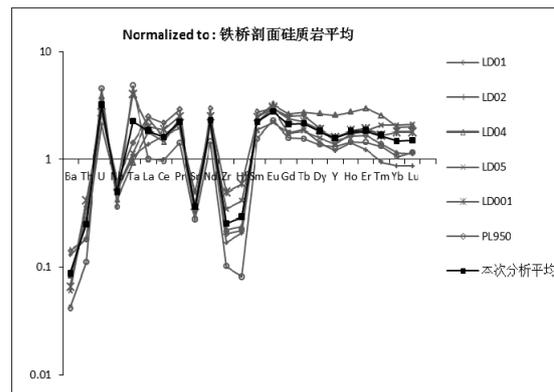


图 10 罗甸玉微量元素配分图(铁桥剖面茅口组硅质岩微量元素平均值均一化)

Fig. 10. Trace elements distribution of Luodian nephrite.

## 6 总结

(1) 峨眉山玄武岩在贵州以溢流喷发为主, 同时也有大量辉绿岩岩床侵入。在黔西北地区, 与辉绿岩岩床相关的接触变质带普遍比较薄; 但在贵州南部的罗甸和望谟地区, 辉绿岩床沿四大寨组中上部(大致相当于栖霞组与茅口组的界面)侵入, 并在顶底地层中形成不同厚度的大理岩化接触交代带, 底板地层中接触交代带一般厚约 10 m, 而在顶板地层中一般厚约 40 m。根据两地具有明显差异的接触蚀变带, 我们推测黔南罗甸地区二叠纪辉绿岩岩床在侵入过程中与上覆海水形成了大规模的热传导循环, 因而发育厚大的接触变质带, 而在黔西北未形成大规模的热

传导系统。

(2) 贵州罗甸玉的主要矿物成分为透闪石, 具有典型的纤维交织结构; 次要矿物为透辉石和滑石, 特征副矿物为磷灰石, 其中透辉石含量和矿物结构是影响玉石质量的主要因素。依据不同罗甸玉中各矿物含量和结构构造的差异可以把玉石分为上、中、下品: 上品罗甸玉几乎全部由透闪石组成, 透闪石含量大于 98%, 粒度均一, 透辉石含量极少; 中品罗甸玉中透闪石目估含量大于 95%, 透辉石 3%~5%; 下品罗甸玉中透闪石目估含量大于 90%, 粒度均一性差, 透辉石含量 5%~8%。

(3) 在主量元素上, 罗甸玉与中国其他地区玉石相比不具有明显的差别, 但与同期相近沉积环境的硅质岩对比可以看出, 在硅质岩发生透闪石化的过程中, 主量元素主要表现为大量的 Mg、Na (K) 的带入, 同时置换约 20% 的 Si 被热液带出, 这些特征和现代海底的热液活动特征非常相近。微量元素中 Cr-Ni-Co 三元素对软玉具有明显的成因意义, 罗甸玉中 Cr-Ni-Co 三元素的含量明显低于交代蛇纹岩型软玉, 而与交代白云岩型相差不大; 与辉绿岩的多元素配分对比暗示罗甸辉绿岩在罗甸玉的形成过程中并未提供

大量的物源。罗甸玉稀土元素配分模式为右倾模式, 轻重稀土元素分异明显, 具有强烈的 Ce 负异常 ( $\delta Ce=0.21 \sim 0.34$ ) 和弱的 Eu 负异常 ( $\delta Eu=0.63 \sim 0.83$ ), 与辉绿岩无强的 Ce 异常、弱的 Eu 异常以及较高的稀土元素含量明显不同, 也与新疆和田玉具有无 Ce 异常而具有明显的 Eu 负异常的模式差别较大, 而与代表茅口组硅质岩的纳水剖面中硅质岩的稀土配分模式 (强的 Ce 负异常, 明显的轻重稀土分异) 极为相似, 表明罗甸玉的稀土配分模式继承于地层硅质岩, 成矿过程中侵入的辉绿岩只起到了热动力的作用。进一步对比罗甸玉与铁桥剖面微量、稀土元素特征发现, 辉绿岩侵入引起的海水热循环引起 Eu 的分馏和稀土元素以及 U 的富集。

(4) 基于透闪石岩产出的地质特征和对辉绿岩、地层硅质岩、透闪石岩的主微量元素以及稀土元素的对比分析, 我们认为在黔南罗甸—望谟地区, 约 255 Ma 时辉绿岩沿四大寨组中上部岩性界面侵入, 上覆海水通过断裂体系形成大规模的热传导循环, 形成厚大的外接触蚀变带, 同时不断将海水中的 Mg 循环输送到下部, 通过白云岩化、透辉石化、透闪石化及滑石化等蚀变反应, 最终形成罗甸透闪石玉矿床。

## 参 考 文 献:

- [1] 汤红云, 钱伟吉, 陆晓颖, 等. 青海软玉产出的地质特征及物质成分特征[J]. 宝石和宝石学杂志, 2012, 14(1): 24-31.
- [2] 周征宇, 廖宗廷, 陈盈, 等. 青海软玉的岩石矿物学特征[J]. 岩矿测试, 2008, 27(1): 17-20.
- [3] 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.
- [4] 崔文元, 吴伟娟, 刘岩. 江苏溧阳透闪石玉的研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(s1): 91-98.
- [5] 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, 10(3): 16-19.
- [6] 周征宇, 陈盈, 廖宗廷, 等. 溧阳软玉的岩石矿物学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(5): 491-494.
- [7] 周征宇, 廖宗廷, 马婷婷, 等. 青海三岔口软玉成矿类型及成矿机制探讨[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(9): 1191-1194.
- [8] 贺林芳, 李红中, 徐丽. 新疆和田玉的性质特征及其成矿机理探讨[J]. 中山大学研究生学刊: 自然科学与医学版, 2009, 30(1): 55-64.
- [9] 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, 8(4): 375-380.
- [10] 唐延龄, 刘德权, 周汝洪. 新疆玛纳斯碧玉的成矿地质特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(s1): 22-25.
- [11] 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): 593-602.
- [12] 唐延龄, 刘德权, 周汝洪. 和田玉的名称, 文化, 玉质和矿床类型之探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(s1): 13-21.
- [13] Harlow G, Sorensen S. Jade (nephrite and jadeite) and serpentinite: metasomatic connections [J]. *International Geology Review*, 2005, 47(2): 113-146.
- [14] 支颖雪, 廖冠琳, 陈琼, 等. 贵州罗甸软玉的宝石矿物学特征[J]. 宝石和宝石学杂志, 2011, 13(4): 7-13.
- [15] 杨林. 贵州罗甸玉矿物岩石学特征及成因机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [16] 范二川, 兰永文, 戴朝辉, 等. 贵州省罗甸透闪石矿床地质特征及找矿预测[J]. 矿物学报, 2012, 32(002): 304-309.
- [17] 黄勇, 郝家棚, 白龙, 等. 贵州省元里软玉矿的发现及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(4): 612-620.
- [18] Shellnutt J G, Denyszyn S W, Mundil R. Precise age determination of mafic and felsic intrusive rocks from the Permian Emeishan large igneous province (SW China) [J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(1): 118-126.
- [19] Xu Y-G, Chung S-L. The Emeishan large igneous province: evidence for mantle plume activity and melting conditions [J]. *Geochimica*, 2001, 30(1): 1-9.
- [20] Zhong H, Campbell I H, Zhu W-G, et al. Timing and source constraints on the relationship between mafic and felsic intrusions in the Emeishan large igneous province [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(5): 1374-1395.

- [21] Zhou M-F, Malpas J, Song X-Y, et al. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196(3): 113-122.
- [22] 韩伟, 罗金海, 樊俊雷, 等. 贵州罗甸晚二叠世辉绿岩及其区域构造意义 [J]. *地质论评*, 2009, 55(6): 795-803.
- [23] 李红敬, 解习农, 颜佳新, 等. 扬子地区典型剖面二叠系不同沉积相地球化学特征[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(2): 16-23.
- [24] 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.
- [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.
- [26] 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(3): 440-451.
- [27] 邱振, 王清晨. 广西来宾中上二叠统硅质岩海底热液成因的地球化学证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(5): 725-737.
- [28] Adams C, Beck R, Campbell H. Characterisation and origin of New Zealand nephrite jade using its strontium isotopic signature [J]. *Lithos*, 2007, 97(3): 307-322.
- [29] Grapes R H, Yun S. Geochemistry of a New Zealand nephrite weathering rind [J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 2010, 53(4): 413-426.
- [30] Yui T-F, Kwon S-T. Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea [J]. *Economic Geology*, 2002, 97(3): 593-601.
- [31] 周征宇, 廖宗廷, 马婷婷, 等. 东昆仑三岔口软玉成矿机制及成矿物质源分析[J]. *地质找矿论丛*, 2006, 9(3): 195-198.
- [32] Kostov R I, Protophristov C, Stoyanov C, et al. Micro-PIXE geochemical fingerprinting of nephrite neolithic artifacts from Southwest Bulgaria [J]. *Geoarchaeology*, 2012, 27(5): 457-469.
- [33] Zhang Z, Gan F, Cheng H. PIXE analysis of nephrite minerals from different deposits [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2011, 269(4): 460-465.
- [34] Zhang Z, Xu Y, Cheng H, et al. Comparison of trace elements analysis of nephrite samples from different deposits by PIXE and ICP-AES [J]. *X-Ray Spectrometry*, 2012, 41(6): 367-370.
- [35] Huang H, Du Y, Huang Z, et al. Depositional chemistry of chert during late Paleozoic from western Guangxi and its implication for the tectonic evolution of the Youjiang Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(3): 479-493.
- [36] 杨绳武, 肖伟民, 王洪第, 董文兰, 龙家荣, 董卫平. 贵州栖霞组与茅口组的界线讨论[J]. *地层学杂志*, 1981, 5(2): 118-127.
- [37] 刘家润, 杨湘宁, 施贵军, 冯洪真. 黔南茅口期台地相层序地层及类分布特征[J]. *地层学杂志*, 2002, 26(3): 221-225.

## A Preliminary Study on Mineralogy and Ore Deposits Genetical Model of Luodian Nephrite Jade, Luodian, Guizhou Province, China

LI Kai-xuan<sup>1,2</sup>, JIANG Ting-li<sup>3</sup>, XING Le-cai<sup>1,2</sup>, ZHOU Ming-zhong<sup>4</sup>, LUO Tai-yi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 3. Guizhou Bureau of Quality and Technical Supervision,

Guiyang 550004, China; 4. Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** Luodian nephrite consist of main tremolite with minor diopside and talc, with prevail interweave structure. The typical structure and mineral composition dominate the quality of nephrite. Value of trace elements content of Cr-Ni-Co in Luodian nephrite is much lower than that of serpentinite metasomatism type nephrite and has the same range of metasomatized dolomite type nephrite. The strong Ce negative anomaly ( $\delta\text{Ce}=0.21-0.34$ ) and not obvious Eu negative anomaly of the nephrite's right-slop REE patterns make it obviously different from famous nephrite in Hetian and Xiuyan. Through geochemical characteristics comparison of Luodian nephrite, diabase dyke, siliceous rock, it's reasonable to consider that, during the mineralization of Luodian nephrite, the intrusion of diabase plays the role of heat-source and massive Mg possibly come from thermal circle of seawater. Features of REE inherited from siliceous rock with alteration replenish the information of cyclic thermal seawater. By summarizing the research result of areal geology, mineralogy, geochemistry, we conclude that, at about 255 Ma, the up-intrusion of the diabase dyke caused the overlying seawater forming large-scale heat exchange circulation through the fracture system and then the upper thick massively contacted metamorphic zone produced; simultaneously, the Mg was continually transmitted to bottom to generate dolomitization, diopsidization, tremolitization, steatitization and in the final, the nephrite ore deposit occurrence.

**Key words:** Luodian nephrite jade; mineralogy; geochemistry; genetical model