

· 宝玉石矿物学 ·

## 广西巴马玉的矿物学特征及其成因探讨

黄倩心<sup>1</sup>, 王时麒<sup>1</sup>, 梁国科<sup>2</sup>, 杨晓东<sup>3</sup>, 吴祥珂<sup>2</sup>

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 广西地质调查院, 广西 南宁 530023; 3. 广西科学院 应用物理所, 广西 南宁 530007)

**摘要:** 继贵州罗甸、广西大化发现多个新型透闪石玉矿床之后, 在同属黔桂地区的广西巴马亦发现了透闪石玉矿。通过偏光显微镜镜下观察、X射线衍射仪、电子探针及重砂分析等测试手段对广西巴马玉的宝玉石矿物学特征进行了研究, 发现巴马玉主要由微晶透闪石组成, 具毛毡状结构和束状结构, 多见水草花结构, 其主要矿物成分为微晶透闪石集合体, 并含有滑石、褐铁矿、高岭石等次要矿物,  $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})-Si$  投点显示数个巴马玉样品分别属于透闪石和阳起石, 定名为闪石玉。巴马透闪石玉的密度为  $2.81\sim 3.00\text{ g/cm}^3$ , 折射率为 1.61, 硬度为 5.19~5.32, 次要矿物滑石是导致其硬度低的原因。根据电子探针数据计算出巴马玉相关化学式并对比分析, 发现巴马玉样品中 C 位  $Fe^{2+}$  的数量为 0.08~0.67 a. p. f. u., 随着样品颜色从淡紫到青灰到深青灰变化, C 位  $Fe^{2+}$  的数量也相继增加, 说明颜色的变青加深与巴马玉 Fe 元素的含量增加有关。X 射线衍射分析结果显示水草花的矿物成分中有针铁矿的存在, 说明巴马玉水草花为地表次生结构。通过野外观察, 对其主要化学元素、稀有元素以及稀土元素等特征进行综合分析并与其它矿点的相关特征进行横向对比, 基本确定了巴马玉矿床为辉绿岩侵入碳酸盐岩经过岩浆热液接触交代作用而形成的层控性接触交代型岩浆热液矿床, 与之前发现的位于黔桂地区的贵州罗甸、广西大化闪石玉的成因一致, 它们应属于同一矿带。

**关键词:** 巴马玉; 结构; 成分; 矿物学特征; 矿床成因

中图分类号: P578.955; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)05-0977-14

## Mineralogical characteristics and genesis of Bama nephrite

HUANG Qian-xin<sup>1</sup>, WANG Shi-qi<sup>1</sup>, LIANG Guo-ke<sup>2</sup>, YANG Xiao-dong<sup>3</sup> and WU Xiang-ke<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Guangxi Institute of Geological Survey, Nanning 530023, China; 3. Institute for Applied Physics, Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530007, China)

**Abstract:** Following the discovery of Luodian nephrite and Dahua nephrite, another nephrite mineral spot was also found in Bama, Guangxi, which also belongs to Qian-Gui area. Analysis methods, such as orthogonal polarization microscope, X-ray powder diffraction, electron probe microanalysis and artificial heavy concentrate, were employed to study petrographic characteristics, mineral composition, color-forming factors and the genesis. These studies show that the main mineral composition of Bama nephrite is microcrystalline tremolite or actinolite, and other minor minerals, such as talc, limonite, kaolinite, etc. Bama nephrite shows felty structure, bundle structure and structure of the pattern of aquatic plant. Spots of  $Mg/(Mg+Fe^{2+})-Si$  of Bama nephrite plot into tremolite or actinolite. The

收稿日期: 2021-03-24; 接受日期: 2021-05-11; 编辑: 郝艳丽

作者简介: 黄倩心(1974-), 女, 矿物学、岩石学、矿床学专业珠宝方向硕士, 珠宝玉石鉴定师, E-mail: kelly-qx.huang@pku.edu.cn;

通讯作者: 王时麒(1937-), 男, 教授, 地球化学专业, 长期从事矿物学、岩石学、矿床学、地球化学和宝石学教学、科研与鉴定工作, E-mail: pkugac@pku.edu.cn.

网络首发时间: 2021-06-07; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20210607.1558.004.html>

hardness of Bama nephrite is between 5.19~5.32, the density is between 2.81~3.00 g/cm<sup>3</sup>, the refractive index is about 1.61. Talc, auxiliary mineral of Bama nephrite, is the cause of lower hardness. According to the electron probe data, the relevant chemical formulas of Bama jade were calculated and compared and analyzed, we found that the green color of Bama nephrite is related to 0.08~0.67 a. p. f. u of Fe in C site in tremolite, which suggests that the increasing content of Fe in C site in Bama nephrite leads to change of the colors of nephrite from light purple to dark green. The data of X-ray powder diffraction show that goethite was in the structure of the pattern of aquatic plant, implying that the structure of the pattern of aquatic plant of Bama nephrite was formed on the surface of the earth. Through field observation, the comprehensively analysis of major elements, rare elements and rare earth elements, and comparison with related features of other mine point, the authors consider that the genetic type of Bama nephrite deposit is belongs to stratabound and contact metasomatic magmatic hydrothermal deposit, which is resulted from the magmatic hydrothermal contact metasomatism induced by diabase intruding into carbonate rock. Bama nephrite is the same genetic type with Luodian and Dahua nephrite deposits in Qian-Gui area which have been found in previous study. They are belong to the same ore belt.

**Key words:** Bama nephrite; structure; composition; mineralogical characteristics; genesis of ore deposit

众所周知,透闪石玉的产地主要分布在新疆、青海、辽宁等地区。邓燕华(1992)把透闪石玉矿按其地质产状分为花岗岩-花岗闪长岩与大理岩接触交代型、超基性岩交代岩型和变质岩型3种。其后,刘飞等(2009)按成矿热液的来源将透闪石玉矿床分为岩浆热液型和变质热液型两大类。岩浆热液型矿床中的侵入岩涵盖了超基性-基性-中酸性-酸性的各种岩石类型,其中中酸性岩浆岩(花岗岩或闪长岩)侵入到碳酸盐岩中交代成因的透闪石玉矿包含新疆和田玉(蒋玉华,1998;Liu *et al.*,2011a,2015)和青海格尔木软玉(董必谦,1996),青海三岔口软玉属于基性的辉长岩体与碳酸盐岩交代成因(周征宇等,2008),而辽宁岫岩的透闪石玉则属于变质热液型(王时麒等,2007)。2009年以后,黔桂地区相继出现新型透闪石矿发现的相关报道,例如贵州罗甸发现了多个透闪石玉矿(杨林,2013),2011年广西大化也发现了多个透闪石玉矿点(王时麒等,2016)。杨林(2013)、王时麒等(2016)的研究表明,黔桂地区新发现的透闪石矿矿床虽然也是岩浆热液接触交代型矿床,但是它们是由基性的辉绿岩侵入碳酸盐岩经接触交代作用而形成的。王时麒等(2017)更提出了黔桂地区红水河流域围绕辉绿岩形成岩浆热液接触交代型透闪石玉矿带的看法,并预判广西百色以西地区、田阳、巴马等地有辉绿岩出露的地方很有可能也会发现新的透闪石玉矿点。

2018年3月,根据上述线索,广西地质调查院在开展广西1:5万甲篆、凤凰、巴马、民安幅区域地质调查项目的工作过程中,成功定位了巴马玉相关矿

点(梁国科等,2020)。笔者在巴马玉矿点进行了实地考察及采样后,通过多种实验手段对巴马玉样品进行了宝玉石矿物学研究,进而探讨了其构造、成因,可为其之后的开发、利用提供科学理论依据。

## 1 区域地质背景

广西巴马地处云贵高原东南部、桂西喀斯特岩溶区,位于扬子板块西南缘、右江褶皱系北部、百色凹陷区,地处特提斯与滨太平洋构造域交接部位(郭福祥,1994)。区域内断裂构造发育,具多期性,多期活动特征明显,断层按性质有走滑断层、正断层、逆(冲)断层,根据断裂方向大致可分为近EW向、NW向、NE向断裂。受区域应力作用,区域褶皱发育,较典型的褶皱构造有东山箱状背斜、三石槽状向斜、凤凰梳状背斜、兰木槽状向斜、西山箱状背斜、月里槽状向斜、龙田穹窿、乙圩-燕洞复式褶皱。

研究区的地层属于斜坡-盆地相地层序列,出露的地层从老到新有上古生界石炭系南丹组(C<sub>2</sub>P<sub>1n</sub>),二叠系四大寨组(P<sub>2s</sub>)、领好组(P<sub>3lh</sub>),中生界石炮组(T<sub>1s</sub>)。其中南丹组主要有薄层纹层状白云岩、各种含硅质团块微晶砂页岩、泥晶灰岩、薄层硅质岩等;四大寨组主要有灰质泥岩、硅质岩、硅质灰岩以及少量白云质灰岩等;领好组主要有各类泥岩、硅质岩等;石炮组主要含硅质泥岩、细-粉砂岩等。

区域内岩浆岩主要以基性侵入岩为主,少量为酸性岩,出露的基性岩有华力西晚期辉长辉绿岩、正长辉长岩、辉绿岩。岩体受构造控制明显,与地质构

造线方向一致,侵入于背斜核部,岩体呈岩床、岩墙成群产出,侵入上石炭统南丹组—中二叠统四大寨组中,从中心往两边岩性变化依次为粗粒正长辉长岩、中-粗粒辉长辉绿岩、细-中粒辉绿岩。相关地层、岩浆岩、区域断裂分布情况参见图1。

透闪石玉矿点位于班交村良地屯 80°方位约 800 m 的山坡上,附近有多处大面积的辉绿岩出露,岩体受构造控制明显,出露于民安背斜的核部,侵入于二叠系四大寨组中。巴马玉矿体分布在辉绿岩与四大寨组的微晶灰岩、白云岩夹硅质条带、燧石条带灰岩外接触蚀变带中(图1)。岩层受热变质作用较强,在外接触带 1~10 m 范围内有大理岩化及透

闪石化、硅化、滑石化等蚀变现象,矿体为接触交代蚀变而成,主要呈似层状,其次为脉状、透镜状产出,走向近东西向,地表可见矿化厚度约十余米,长约 100 m(图2a)。巴马玉受背斜构造的控制,矿点位于乙圩-燕洞复式背斜内,主要由巴马背斜及一系列次级褶皱组成,区内断裂构造发育,主要有 NW 向和 NE 向两组,其中辉绿岩(图2c)与围岩外接触带具有大理岩化(图2d)及滑石化、透闪石化、硅化等蚀变特征,从岩体往外,依次为透闪石化带-透闪石化大理岩带-大理岩带-大理岩化灰岩带,其中透闪石化致密者形成透闪石玉(图2e、2f)(梁国科等, 2020)。

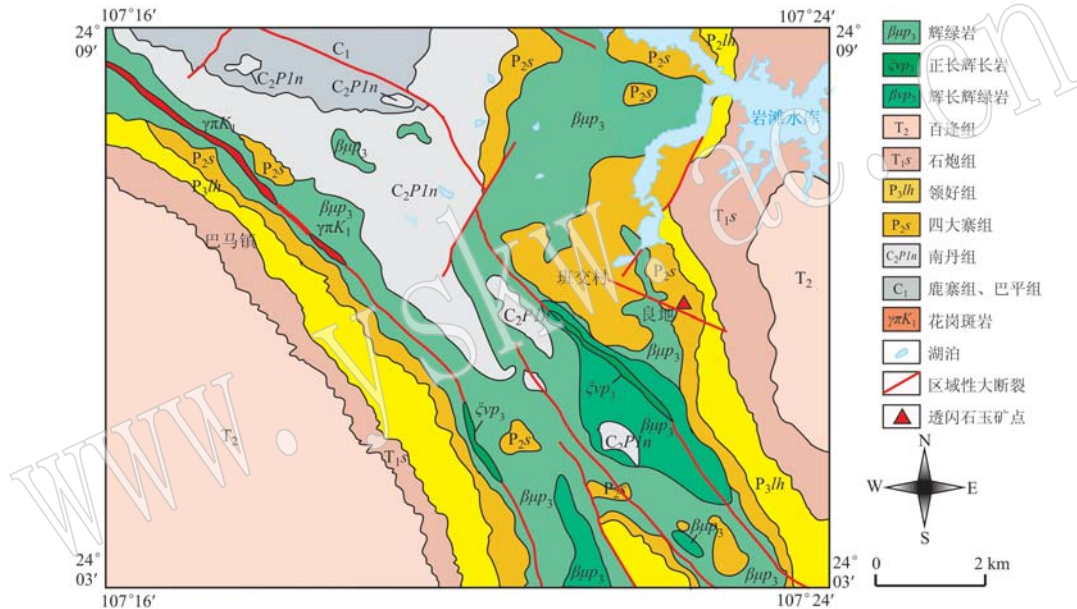


图1 巴马玉矿区域地质简图[据广西壮族自治区地质调查院(2019)<sup>①</sup>改绘]

Fig. 1 Regional geological of Bama nephrite deposit (Guangxi Institute of Geological Survey, 2019)<sup>①</sup>

## 2 样品采集与分析方法

### 2.1 样品采集

巴马玉矿体出露地表,本次样品均为地表采集,受到一定的次生风化作用影响(图2f)。本次研究采集了班交村一带巴马玉矿点 20 余块原石样品,其中选取了不同基底色且水草花形态比较有代表性的 5 块样品(巴-1、巴-3、巴-9、巴-10、巴-13)及 1 块围岩样品进行重点研究(图3)。样品呈致密块状,以淡青灰色或淡紫灰色为基底色,抛光面基本呈弱油性-瓷状光泽,并且多面多维度呈现出各种形态的黑褐-棕

褐色水草花纹。

### 2.2 分析方法

采用北京大学地球与空间科学学院显微镜室的电子偏光显微镜对巴马玉样品的岩石薄片进行了单偏光、正交偏光下的观察,以了解其矿物组成及其相关结构。

采用中国地质大学(北京)珠宝学院宝石学实验室 TH763 数显显微硬度计对巴马玉样品进行硬度测试,5 个样本各取 5 个点分别施以 0.1 kgf 的试验力,再取平均值将维氏硬度换算成摩氏硬度。其余物理性质在北大珠宝鉴定中心通过静水力学法、折射仪等完成测试。

① 广西壮族自治区地质调查院. 2019. 1:50 000 巴马区域地质图民安幅.

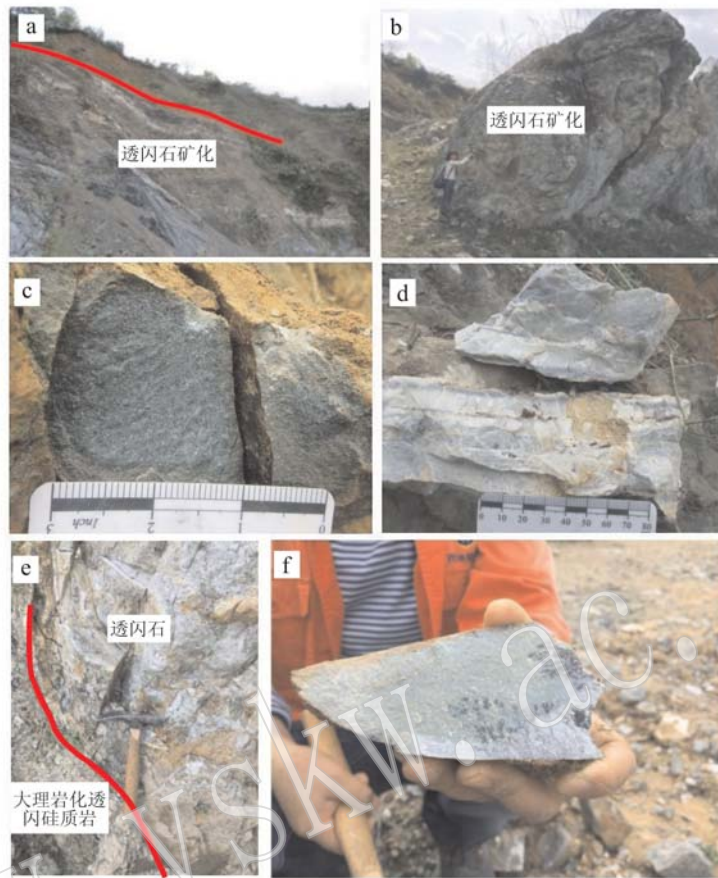


图2 巴马玉矿点野外照片

Fig. 2 The field occurrence of Bama nephrite deposit

a—出露的透闪石矿化带; b—巴马透闪石玉矿出露地表; c—辉绿岩; d—大理岩化灰岩; e—巴马玉与硅质岩接触; f—巴马玉  
 a—occurrence of tremolite mineralization zone; b—Bama nephrite in the field; c—diabase; d—marble limestone; e—Bama nephrite and siliceous rock; f—Bama nephrite



图3 巴马玉手标本

Fig. 3 Photographs of Bama nephrite samples

将5个样品(巴-1、巴-3、巴-9、巴-10、巴-13)各制成200目粉末状,另外人工将巴-1水草花表面深色物质从玉石表面剥离、富集,获得20 mg的200目深色粉末,一并进行了X射线粉晶衍射分析。分析在北京北达燕园微构分析测试中心有限公司的X射线衍射仪(D/max-rB)上进行,CuK $\alpha$ 靶,靶电压40 kV,管电流100 mA,发散缝1°,接受狭缝0.3 mm,防散射狭缝1°,连续扫描类型,扫描速度8°/min,步长0.02。

矿物成分的电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室的JXA-8230电子探针仪上进行,加速电压15 kV,束流 $1\times 10^{-8}$  A,束斑2  $\mu\text{m}$ ,修正方法PRZ。

人工重砂分析委托河北省廊坊市尚艺岩矿检测技术服务有限公司进行,设备为双目显微镜、高频介电矿物分选仪、带式矿物电磁分选仪。

全岩主量和微量元素分析测定在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。其中主量元素分析采用ARL ADVANT XP+(美国赛默飞公司)顺序式X射线荧光光谱仪分析,分析元素包括F~U,激发电流50 mA,电压50 kV,分析灵敏度

0.001%;微量元素分析采用美国安捷伦科技有限公司Agilent ICPMS 7500ce型电感耦合等离子体质谱仪,分析的相对误差小于10%,测试精度小于5%。

### 3 分析结果

#### 3.1 镜下观察

巴马玉样品肉眼看无颗粒感、玉质细腻,具隐晶质结构。显微镜下观察,发现样品的晶体颗粒细小,大部分大小比较均匀,高倍镜下能隐约看到晶体形状,但边界不清晰。其结构多以变晶结构为主,多见等粒变晶结构(图4a),亦可见不等粒变晶结构(图4b),按矿物间相互关系和晶体排列方式分,多见毛毡状结构(图4c)、束状结构(图4d)等。样品的另一大特点是次生充填结构发育,呈现多种形态的水草花状结构(图4e)。镜下未发现除透闪石晶体外的其它矿物晶体,可见巴马玉矿物组成中透闪石占比极高,但也不排除有光性和干涉色与透闪石相近的矿物存在。

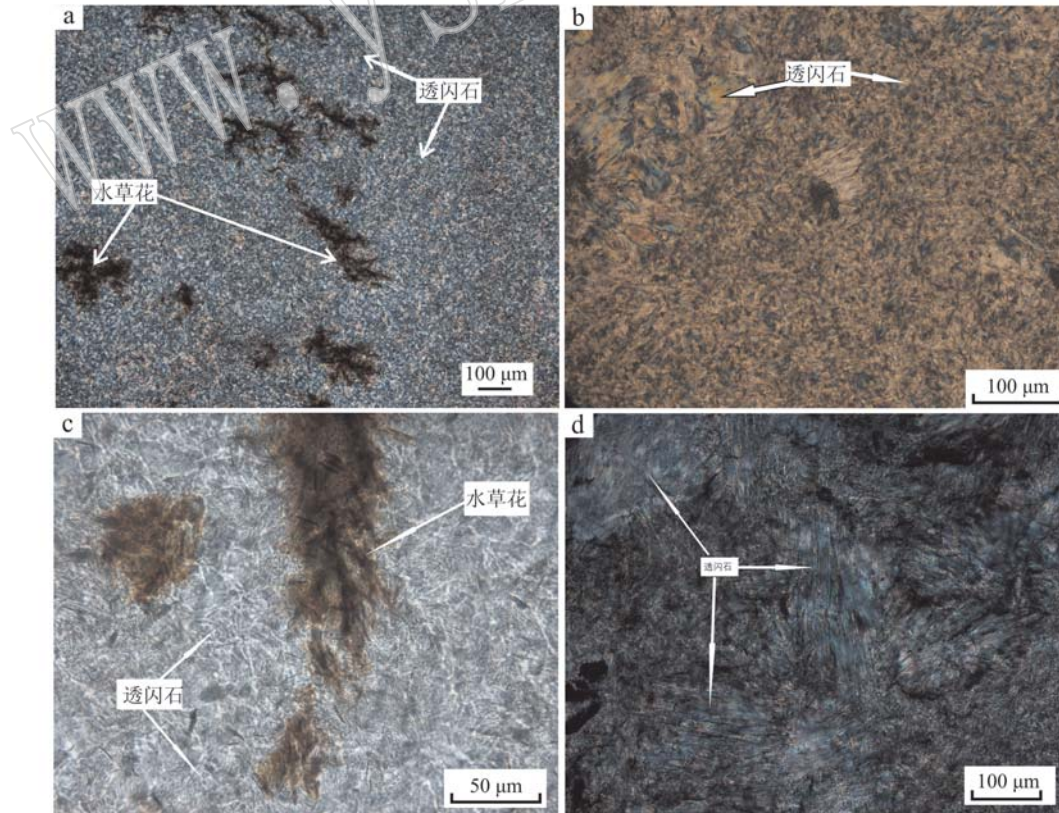


图4 巴马玉的显微镜下照片

Fig. 4 Microscope photograph of Bama nephrite

### 3.2 宝石学特征

巴马玉样品的宝石学参数测试结果见表1。

### 3.3 X射线衍射测试

X射线衍射分析结果显示,5个样品的透闪石含量为92%~97%,滑石含量为3%~6%,另外少数

标样含极少量高岭石(表2)。

水草花表面深色物质富集样品的X射线粉晶衍射图(图5)中,大部分特征衍射峰归属于阳起石,个别归属于针铁矿和滑石。另外,在 $20^{\circ}$ ~ $40^{\circ}$ 的 $2\theta$ 范围内,可见非晶峰。

表1 巴马玉样本宝石学参数表

Table 1 Gemological characteristics of Bama nephrite samples

样品	巴-1	巴-3	巴-9	巴-10	巴-13
颜色	淡青黄色	青灰色	淡紫灰色	深青灰色	淡黄色
花纹	多面水草花发育	短枝水草花	丛状水草花	水草花发育	长细枝状水草花发育
光泽	弱油脂-瓷状光泽	弱油脂-瓷状光泽	弱油脂-瓷状光泽	弱油脂-瓷状光泽	弱油脂-瓷状光泽
折射率	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61
透明度	不透明	不透明	微透明	不透明	不透明
光性特征	非均质集合体	非均质集合体	非均质集合体	非均质集合体	非均质集合体
密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	2.81	2.88	2.96	3.00	2.93
硬度	5.19	5.30	5.19	5.29	5.32
断口	参差状断口	参差状断口	参差状断口	参差状断口	参差状断口

表2 巴马玉样品X射线衍射定量分析结果

Table 2 Quantitative analysis results of X-ray diffraction in Bama nephrite samples

样品	透闪石	滑石	高岭石
巴-1	95	5	-
巴-3	96	4	-
巴-9	97	3	-
巴-10	94	6	-
巴-13	92	6	2

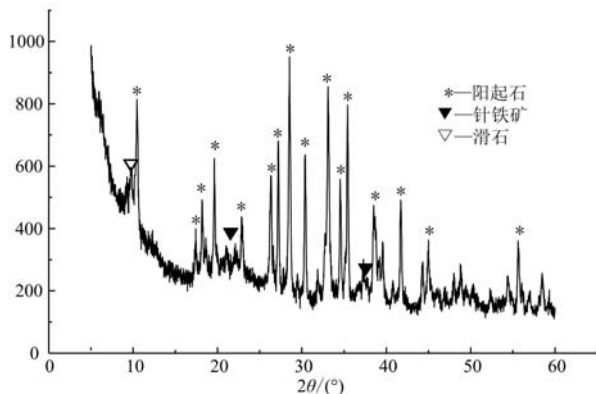


图5 巴马玉“水草花”富集粉末X射线粉晶衍射图  
Fig. 5 XRD spectra of Bama nephrite samples

### 3.4 电子探针分析

样品巴-3、巴-9、巴-10的相关电子探针分析结果

及以23个氧原子数为基础计算出的阳离子数详见表3。从表3可知,巴马玉的主要化学组成为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 和 $\text{CaO}$ ,它们的平均值分别为59.33%、21.53%和12.09%,与标准透闪石 $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ 的理论值(59.17%、24.81%和13.81%)相近,再结合镜下观察,初步确定巴马玉的主要矿物组成为透闪石-阳起石系列矿物。角闪石族的标准分子式为 $\text{A}_{0-1}\text{B}_2\text{C}_5\text{T}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ,其中 $\text{A} = \text{K}^+、\text{Na}^+$ ,  $\text{B} = \text{Ca}^{2+}、\text{Na}^+、\text{Mg}^{2+}、\text{Mn}^{2+}、\text{Fe}^{2+}、\text{Li}^+$ ,  $\text{C} = \text{Mg}^{2+}、\text{Mn}^{2+}、\text{Fe}^{2+}、\text{Fe}^{3+}、\text{Cr}^{3+}、\text{Al}^{3+}、\text{Ti}^{4+}、\text{Zr}^{4+}$ ;  $\text{T} = \text{Si}^{4+}、\text{Al}^{3+}、\text{Ti}^{4+}$ (IMA-CNMMN, 1997),各组阳离子的类质同像现象十分普遍,可形成许多类质同像系列矿物(秦善, 2011)。根据IMA-CNMMN的钙质角闪石分类方案,巴马玉中的主要矿物属于角闪石族矿物中的钙质角闪石亚族中的透闪石-阳起石系列(图6)。巴马玉的 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 平均值较透闪石理论值偏低,而其 $\text{FeO}$ 与 $\text{MnO}$ 含量(分别为4.02%、0.5%)远高于新疆地区透闪石玉(墨玉除外)(1.57%、0.07%)(Liu *et al.*, 2011a; 刘喜锋等, 2017, 2019; 韩冬等, 2018)以及岫岩地区透闪石玉的平均值(3.26%、0.06%)(郑奋等, 2019)。根据表3计算出的部分巴马玉样品的晶体化学式见表4。结合表4推断这可能与不同占位中 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 以类质同像的方式替代 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 有关。

表 3 巴马玉样品的电子探针成分分析结果  
Table 3 Electron microprobe analyses result of Bama nephrite samples

$w_B/\%$

颜色	青灰色(巴-3)		淡紫灰色(巴-9)		深青灰色(巴-10)		
	巴-3-1	巴-3-2	巴-9-1	巴-9-2	巴-10-1	巴-10-2	巴-10-3
SiO <sub>2</sub>	60.16	58.72	61.62	60.67	57.74	58.62	57.78
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.06	0.05	0.00	0.08	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09	0.27	0.30	0.26	0.07	0.06	0.15
FeO	4.80	4.80	0.64	0.73	6.46	5.91	4.80
MnO	0.37	0.39	0.33	0.39	0.96	0.55	0.51
MgO	20.84	21.04	23.86	23.35	19.34	20.33	21.95
CaO	11.69	10.35	12.69	12.53	12.77	12.72	11.89
Na <sub>2</sub> O	0.06	0.05	0.04	0.06	0.01	0.05	0.02
K <sub>2</sub> O	0.01	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01
Total	97.97	95.68	99.55	98.02	97.46	98.26	97.11
Si <sup>4+</sup>	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Ti <sup>4+</sup>	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Al <sup>3+</sup>	0.01	0.04	0.05	0.04	0.01	0.01	0.02
Fe <sup>2+</sup>	0.55	0.56	0.07	0.08	0.76	0.68	0.56
Mn <sup>2+</sup>	0.04	0.05	0.04	0.05	0.11	0.07	0.06
Mg <sup>2+</sup>	4.24	4.38	4.70	4.68	4.03	4.18	4.54
Ca <sup>2+</sup>	1.71	1.55	1.80	1.80	1.91	1.88	1.77
Na <sup>+</sup>	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00
K <sup>+</sup>	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg <sup>2+</sup> /(Mg <sup>2+</sup> +Fe <sup>2+</sup> )	0.89	0.89	0.98	0.98	0.84	0.86	0.89

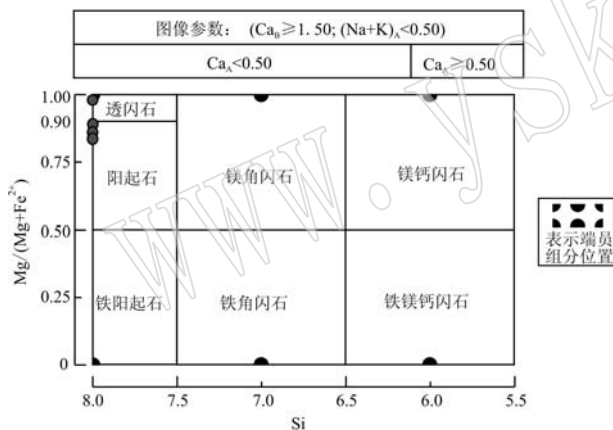


图 6 巴马玉中主要矿物的 Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>) - Si 投点图 (据 IMA-CNMMN, 1997)

Fig. 6 The plot of Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>) - Si of Bama nephrite samples (IMA-CNMMN, 1997)

### 3.5 人工重砂分析

人工重砂分析结果显示,巴马玉中含有的少量矿物组成有钛铁矿、方铅矿、锆石、磷灰石、褐铁矿等(表 5)。

### 3.6 地球化学特征

#### (1) 主要元素特征

根据巴马玉样品的主要元素分析结果(表 6),巴马玉样品的主要化学成分为 SiO<sub>2</sub> (57.58% ~ 58.82%, 平均 58.37%)、MgO (22.19% ~ 24.43%, 平均 23.75%), CaO (9.82% ~ 11.76%, 平均 10.99%), 与透闪石的理论值 (分别为 59.17%、24.81%、13.81%) 比较接近,但各值均偏低,尤其 CaO 的含量明显偏低。另外,巴马玉样品的 MnO 含量为 0.31% ~ 0.64%, 不仅高于地壳平均化学成分 MnO 含量为

表 4 巴马玉标本晶体化学式

Table 4 Crystals chemical formula of Bama nephrite samples

样品	晶体化学式	定名
巴-3(1)	(Ca <sub>1.71</sub> Na <sub>0.02</sub> ) <sub>1.73</sub> (Mg <sub>4.24</sub> Mn <sub>0.04</sub> Fe <sub>0.55</sub> Al <sub>0.01</sub> ) <sub>4.84</sub> Si <sub>8</sub> <sup>4+</sup> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	阳起石
巴-3(2)	(Ca <sub>1.55</sub> Na <sub>0.01</sub> ) <sub>1.56</sub> (Mg <sub>4.38</sub> Mn <sub>0.05</sub> Fe <sub>0.56</sub> Al <sub>0.04</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) <sub>5.04</sub> Si <sub>8</sub> <sup>4+</sup> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	阳起石
巴-3(平均)	(Ca <sub>1.63</sub> Na <sub>0.02</sub> ) <sub>1.65</sub> (Mg <sub>4.31</sub> Mn <sub>0.05</sub> Fe <sub>0.56</sub> Al <sub>0.03</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) <sub>4.96</sub> Si <sub>8</sub> <sup>4+</sup> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	阳起石
巴-9(1)	(K <sub>0.01</sub> ) <sub>0.01</sub> (Ca <sub>1.80</sub> Na <sub>0.01</sub> ) <sub>1.81</sub> (Mg <sub>4.70</sub> Mn <sub>0.04</sub> Fe <sub>0.07</sub> Al <sub>0.05</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) <sub>4.87</sub> Si <sub>8</sub> <sup>4+</sup> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	透闪石
巴-9(2)	(Ca <sub>1.80</sub> Na <sub>0.02</sub> ) <sub>1.82</sub> (Mg <sub>4.68</sub> Mn <sub>0.05</sub> Fe <sub>0.08</sub> Al <sub>0.05</sub> ) <sub>4.86</sub> Si <sub>8</sub> <sup>4+</sup> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	透闪石
巴-9(平均)	(K <sub>0.01</sub> ) <sub>0.01</sub> (Ca <sub>1.80</sub> Na <sub>0.02</sub> ) <sub>1.82</sub> (Mg <sub>4.69</sub> Mn <sub>0.05</sub> Fe <sub>0.08</sub> Al <sub>0.05</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) <sub>4.88</sub> Si <sub>8</sub> <sup>4+</sup> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	透闪石
巴-10(1)	(Ca <sub>1.91</sub> ) <sub>1.91</sub> (Mg <sub>4.03</sub> Mn <sub>0.11</sub> Fe <sub>0.76</sub> Al <sub>0.01</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) <sub>4.92</sub> Si <sub>8</sub> <sup>4+</sup> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	阳起石
巴-10(2)	(Ca <sub>1.88</sub> Na <sub>0.01</sub> ) <sub>1.89</sub> (Mg <sub>4.18</sub> Mn <sub>0.07</sub> Fe <sub>0.68</sub> Al <sub>0.01</sub> ) <sub>4.94</sub> Si <sub>8</sub> <sup>4+</sup> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	阳起石
巴-10(3)	(Ca <sub>1.77</sub> ) <sub>1.77</sub> (Mg <sub>4.54</sub> Mn <sub>0.06</sub> Fe <sub>0.56</sub> Al <sub>0.02</sub> ) <sub>5.18</sub> Si <sub>8</sub> <sup>4+</sup> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	阳起石
巴-10(平均)	(Ca <sub>1.85</sub> ) <sub>1.85</sub> (Mg <sub>4.25</sub> Mn <sub>0.08</sub> Fe <sub>0.67</sub> Al <sub>0.01</sub> ) <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> <sup>4+</sup> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	阳起石

表5 人工重砂分析结果(巴-1)

Table 5 Artificial heavy concentrate analysis result of sample Ba-1

矿物名称	矿物特征
钛铁矿	黑色,次棱角粒状,块状,不透明,弱金属光泽,高硬度,粒径0.04~0.2 mm
方铅矿	铅灰色,立方体,不透明,金属光泽,低硬度,粒径0.04~0.15 mm
锆石	粉色,自形-半自形柱状为主,次滚圆粒状为次,断柱状块状少量,大部分晶体表面略显毛躁,透明度不高,晶型不完整,有缺损,少数较光洁,完整,晶体中可见少量暗色微晶包体,高硬度,金刚光泽,粒径0.03~0.12 mm,伸长系数:1.2~2,2~3;分选性好,磨圆度低,搬运痕迹不显,推测该锆石可能经短距离或较短距离搬运而来。
磷灰石	白色,次滚圆柱状,粒状,透明,玻璃光泽,中硬度,粒径0.03~0.12 mm
褐铁矿	褐红色,褐黑色,次棱角至次滚圆粒状,不透明,弱金属光泽,中硬度,粒径0.05~0.15 mm

注:其余极微量矿物省略。

表6 巴马玉的主要元素分析结果

 $w_B/\%$ 

Table 6 Major element content of Bama nephrite

编号	巴-1	巴-3	巴-9	巴-10	巴-13
SiO <sub>2</sub>	58.60	58.82	58.24	57.58	58.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.31	0.20	0.27	0.46	0.55
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.86	2.48	0.82	5.82	1.04
CaO	11.16	11.05	11.76	9.82	11.14
MgO	23.89	23.82	24.43	22.19	24.43
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
MnO	0.42	0.31	0.50	0.33	0.64
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.02	0.02	0.08	0.00
LOI	3.49	3.20	3.85	3.56	3.49
Total	99.80	99.93	99.93	99.86	99.93

表7 巴马玉样品微量元素分析数据

 $w_B/10^{-6}$ 

Table 7 Abundance of trace element of Bama nephrite samples

元素	巴-1	巴-3	巴-9	巴-10	巴-13	围岩	克拉克值
Li	4.07	4.73	4.88	3.31	4.96	8.94	20
Be	0.11	0.76	0.22	0.29	0.35	1.64	2.8
P	89.0	80.2	65.7	84.6	56.8	148.0	1050
Se	1.39	1.28	1.42	1.15	1.37	9.21	22
Ti	67.7	84.7	161.9	76.4	77.9	1 274.0	5 700
V	2.53	3.06	2.93	3.07	1.80	67.20	135
Cr	5.53	15.56	18.08	13.04	5.95	144.00	100
Mn	2 981.5	2 421.9	3 482.9	2 799.1	5 387.9	537.0	950
Co	2.76	3.61	1.69	15.84	1.67	7.34	25
Ni	3.96	3.29	3.40	3.98	3.58	59.30	75
Cu	0.41	1.34	1.76	5.87	1.10	3.01	55
Zn	15.1	24.7	19.4	16.1	31.6	35.9	70
Ga	1.11	0.81	0.62	1.40	1.38	7.17	15
Rb	0.24	0.37	0.24	0.23	0.16	0.81	90
Sr	16.1	24.0	32.3	22.8	27.9	38.5	375
Y	3.89	4.65	7.75	6.13	5.68	12.70	33
Zr	2.57	4.41	7.25	5.01	3.32	48.70	165
Nb	0.53	0.55	0.66	0.68	0.48	5.60	20
Mo	0.03	0.08	0.10	0.09	0.00	0.51	1.5
Cd	0.04	0.06	0.02	0.05	0.06	0.04	0.2
Sn	0.96	1.11	0.52	0.42	0.74	1.14	2
Cs	0.09	0.11	0.40	0.18	0.28	0.27	3.7
Ba	2.51	8.14	7.03	24.10	14.00	18.20	425
Hf	0.09	0.14	0.23	0.17	0.10	1.30	3
Ta	0.02	0.10	0.00	0.13	0.05	0.15	2
W	0.06	0.22	0.12	0.12	0.00	4.18	1.5
Tl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
Pb	0.58	2.25	1.34	3.05	1.84	2.28	12.5
Th	0.36	0.44	0.45	0.49	0.33	5.42	9.6
U	0.14	0.34	0.29	0.28	0.06	1.62	2.7

0.2%(赵伦山等, 1988), 更远高于附近相同地质条件出产的大化玉的 MnO 平均含量 0.05%(王时麒等, 2016)以及新疆和田玉的 MnO 平均含量 0.08%(Liu *et al.*, 2011a), 且其 MnO 与 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量呈近乎反比关系, 其中 MnO 含量最高的巴-9、巴-13 对应的 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量相对较低。另外, 巴马玉样品 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 0.82%~5.82%、均值 2.40%, 远高于附近相同地质条件出产的大化玉 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 0.09%~1.92%(均值 0.68%)(王时麒等, 2016)及新疆和田玉 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 0.41%~1.96%(均值 0.96%)(Liu *et al.*, 2011a)。

## (2) 微量、稀土元素特征

从微量元素分析结果(表7)可知, 与表示地壳元素丰度的克拉克值(赵伦山等, 1988)相比, 巴马玉样品除 Mn 元素相对富集之外, Ti 元素明显亏损, 其它元素均不同程度亏损。5 个巴马玉样品颜色及水草花的发育程度各不同, 它们对应的微量元素 Mn 含量也有相应的变化, 颜色浅且水草花较少的样品 Mn 元素含量相对较低, 反之 Mn 元素含量则较高。Th/U 值为 1.28~5.03, 平均 2.45, 具有海相的特征

(何幼斌等, 2007)。

巴马玉样品稀土元素总量为  $8.23 \times 10^{-6} \sim 38.45 \times 10^{-6}$ (表8), 说明各样的稀土元素含量有明显差异。LREE/HREE 值在 2.03~13.14 之间, 球粒陨石标准化配分模式图(图7)呈右倾, 为轻稀土元素富集型,



表8 巴马玉样品稀土元素分析数据表  $w_B/10^{-6}$   
Table 8 Abundance of REE in Bama nephrite samples

样品号	巴-1	巴-3	巴-9	巴-10	巴-13	围岩
La	2.56	3.13	2.11	5.07	16.8	37.8
Ce	1.27	1.15	1.14	1.95	7.36	70.1
Pr	0.54	0.43	0.35	0.78	2.25	9.46
Nd	1.86	1.68	1.59	2.81	7.65	33.9
Sm	0.48	0.45	0.50	0.70	1.50	6.59
Eu	0.07	0.06	0.14	0.08	0.17	0.72
Gd	0.40	0.43	0.63	0.60	1.01	4.48
Tb	0.06	0.07	0.11	0.09	0.13	0.58
Dy	0.37	0.43	0.78	0.60	0.72	2.72
Ho	0.08	0.10	0.18	0.13	0.13	0.45
Er	0.23	0.30	0.52	0.36	0.36	1.10
Tm	0.03	0.05	0.08	0.05	0.05	0.14
Yb	0.24	0.35	0.50	0.32	0.29	0.88
Lu	0.04	0.06	0.07	0.04	0.04	0.12
ΣREE	8.23	8.69	8.72	13.59	38.45	169.04
LREE	6.78	6.90	5.84	11.39	35.73	158.57
HREE	1.46	1.79	2.88	2.20	2.72	10.47
LREE/HREE	4.64	3.85	2.03	5.18	13.14	15.15
δEu	0.47	0.40	0.77	0.38	0.39	0.39
δCe	0.24	0.21	0.29	0.21	0.25	0.85

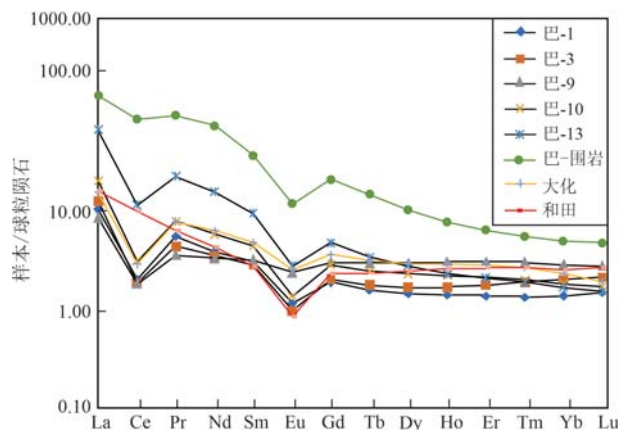


图7 巴马玉稀土元素球粒陨石标准化配分模式图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of Bama nephrite  
大化数据来自王时麒等(2016)数据均值; 和田数据  
来自 Liu 等(2011a)数据均值  
the data of Dahua and Hetian from Wang Shiqi *et al.*, 2016 and Liu  
*et al.*, 2011a, respectively

## 4 讨论

轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对平坦,  $\delta Ce = 0.21 \sim 0.29$ ,  $\delta Eu = 0.38 \sim 0.77$ , Ce、Eu 均具明显负异常。

### 4.1 巴马玉的矿物组成与硬度的关系

通过上述实验对巴马玉的研究, 发现巴马玉主要组成是透闪石(或阳起石)集合体, 其次矿物是

表9 巴马玉与其它地区透闪石玉物理性质对比

Table 9 Comparison of physical characteristics between Bama nephrite and the other nephrite

	巴马玉	大化玉	罗甸玉	新疆和田玉
密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	2.81~3.00	2.85~2.99	2.80~2.87	2.93~2.97
折射率	1.61	1.59~1.61	1.60~1.63	1.60~1.62
硬度	5.19~5.32	5.2~5.8	6.26~6.67	6.5~6.9
光泽	瓷状光泽, 少数呈油脂光泽	蜡状或瓷状光泽, 少数呈油脂光泽	蜡状、弱油脂-油脂、弱玻璃光泽	油脂、蜡状光泽

注: 大化玉数据来自王时麒等(2016); 罗甸玉数据来自杨林(2013); 新疆和田玉数据来自崔文元等(2002)。

滑石及少量的其它矿物。闪石玉的硬度理论值是 6.0~6.5(张蓓莉, 2006)。由表 1 可知, 巴马玉硬度均值在 5.26 左右, 远低于理论值, 也低于罗甸玉和大化玉(表 9)。由表 9 可知, 整个黔桂地区的透闪石玉总体偏低, 不仅低于理论值, 更是远低于经典的新疆和田玉。巴马玉的其余物理性质与各产地透闪石玉基本相近。

滑石的摩氏硬度为 1, 透闪石摩氏硬度为 6, 由于巴马玉中含 3%~6% 的滑石, 导致巴马玉硬度明显偏低。X 射线粉晶衍射分析检测结果说明, 辉绿岩与围岩的接触带在热液进入后接触交代形成了透闪石, 后

续热液的进入形成了滑石, 导致了透闪石滑石化。

### 4.2 水草花物质组成及成因

巴马玉的水草花结构(图 8a) 是其标志性特点之一。大化玉和罗甸玉也有水草花, 多为点状、斑状花纹, 但少见与巴马玉形态类似的花纹(张妮等, 2015; 王时麒等, 2016)。前人研究认为, 水草花均为次生形成, 广西大化水草花玉是暗褐色-黑色锰质氧化物沿微裂隙渗透充填而成, 但未鉴定出具体矿物(陈慕雨等, 2017); 罗甸花斑玉为隐晶质方铁矿和非晶态 Fe, 充填于疏松的变晶结构溶孔中而成(张妮等, 2015)。虽然新疆和田玉中未见明确报道水草花

玉,但是籽料的草花结构经研究证实其为次生色沿裂隙进入表皮及其深部而成,并且易附着于其他次生矿物之上(李育洁等, 2017)。

偏光显微镜下的观察发现,巴马玉样品的水草花确为棕褐色致色矿物扩散到微裂隙及矿物晶体颗粒间形成。普遍认为水草花结构的形成是因为各种地壳运动导致玉石产生微裂隙,在地表氧化条件下,高价 Fe、Mn 的氧化物溶液沿着玉石的微裂隙和颗粒间隙渗透扩散所致,是一种次生产物(王时麒等, 2002; 韩文等, 2013)。

水草花部位粉末样品的 X 射线粉晶衍射图(图 5)显示,样品粉末中存在阳起石、滑石,这与其他 5 个标本的粉末样品测试结果一致。而  $d=4.186 \text{ \AA}$ 、 $2\theta=21.206$  和  $d=2.4478 \text{ \AA}$ 、 $2\theta=36.684$  的这两个衍射峰分别是针铁矿的最强峰及次强峰,其中衍射峰  $d=4.186 \text{ \AA}$ 、 $2\theta=21.206$  是与阳起石峰分离的一个 100% 的针铁矿强度最高的特征衍射峰。针铁矿富含  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 一般在地表强氧化环境下形成,一般呈棕褐色到红色,结合镜下观察到玉样品水草花结构为棕褐色,推测出巴马玉样品中含有针铁矿。另外,  $2\theta$  为  $20^\circ\sim 40^\circ$  范围内的非晶峰(图 5)提示可能存在非晶体矿物,进入巴马玉内部的高价铁氧化物胶体部分结晶形成为高价铁矿物(针铁矿),另有一部分铁仍以高价氧化物的胶体形式存在。

#### 4.3 巴马玉的致色因素

关于玉石致色方面,前人(Grudin *et al.*, 1979; 吴瑞华等, 1994; 王时麒等, 2007; 杨林, 2013; 于海燕, 2016; 郝爽等, 2016)已经做了大量的研究,一般认为在微量元素方面,玉石主要由过渡族金属离子致色,且主要集中在元素周期表中的第 IV 周期中的 8 个过渡元素离子: Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu。这些过渡金属离子进入晶格,可以构成矿物的主要成分,也可以是以类质同像的方式替换

矿物原有的部分阳离子。

对大量闪石玉白玉、青玉、碧玉、墨玉的全岩微量元素、微量元素的统计研究表明,Fe、Cr、Mn 一直被认为是各类闪石玉的主要致色因素(Liu *et al.*, 2011b; 于海燕, 2016; 刘喜锋等, 2018, 2019; 韩冬等, 2018),且闪石玉的颜色与致色元素在 C 位中含量有关(韩冬等, 2018)。前人的研究表明,罗甸玉青玉的 C 位  $\text{Fe}^{2+}$  的数量为  $0.01\sim 0.03 \text{ a. p. f. u.}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  的数量为  $0.01\sim 0.02 \text{ a. p. f. u.}$ ; 大化玉青玉的 C 位  $\text{Fe}^{2+}$  的数量为  $0.04\sim 0.10 \text{ a. p. f. u.}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  的数量为  $0\sim 0.02 \text{ a. p. f. u.}$ ; 新疆青玉的 C 位  $\text{Fe}^{2+}$  的数量为  $0.01\sim 0.76 \text{ a. p. f. u.}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  的数量为  $0.01\sim 0.02 \text{ a. p. f. u.}$ (杨林, 2013; 杜季明, 2015; 韩冬等, 2018)。根据表 4 可知,巴马玉 3 个标本中 C 位  $\text{Fe}^{2+}$  的数量为  $0.08\sim 0.67 \text{ a. p. f. u.}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  的数量为  $0.05\sim 0.08 \text{ a. p. f. u.}$ 。通过对比可以发现,巴马玉中 C 位  $\text{Fe}^{2+}$  的数量远高于罗甸玉、大化玉中的青玉,而与新疆青玉更为接近;而巴马玉中的  $\text{Mn}^{2+}$  的数量均远高于上述各地青玉,平均为它们的 4~5 倍。由图 8a 可见,巴马玉不同颜色的微区 MnO 的含量相差不大,但是 FeO 含量由低到高对应由淡紫、青到深青的颜色过渡。相关研究表明,Mn 元素对青海各色软玉的致色均产生了一定影响(于海燕, 2016),且新疆、青海、巴马三地所产闪石玉的颜色确实随着 MnO 含量递减而呈现由深到浅的变化(图 8b)。考虑到巴马玉中的 Mn 含量远高于国内其它产地出产的闪石玉的 Mn 含量,因此不能排除巴马玉所共有的灰色调是  $\text{Fe}^{2+}$  与  $\text{Mn}^{2+}$  共同作用的结果。

#### 4.4 巴马玉成矿条件及矿床成因

巴马玉位于古生界下辉绿岩外接触带的二叠系中,与目前黔桂其它地区发现的闪石玉一致,说明其受地层岩性控制明显。巴马地区二叠系四大寨组分布范围较广泛,发育完全,以富含 Ca、Mg 的碳酸盐

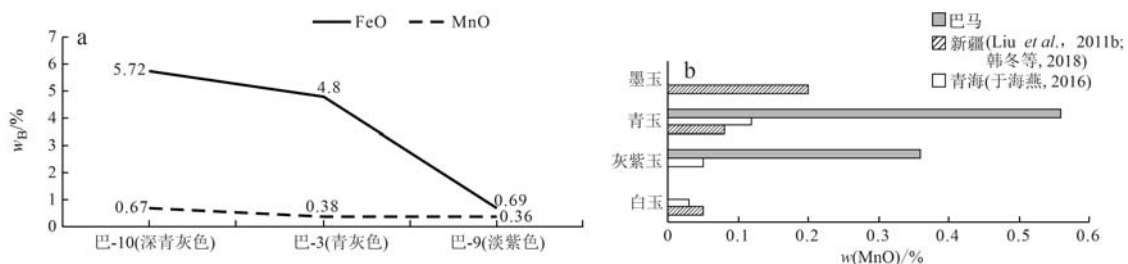


图 8 巴马玉的 Fe、Mn 含量图

Fig. 8 Content of Fe and Mn in Bama nephrite samples

岩沉积为主,主要由薄-中层状含生物微晶灰岩、白云质灰岩、白云岩夹硅质条带组合而成。因受到高温加热影响,四大寨组灰岩、白云岩等与辉绿岩的接触带发生重结晶变为大理岩。富含Ca、Mg的碳酸盐岩有利于透闪石玉的形成,它为巴马玉提供了Ca、Mg元素来源,而硅质条带夹层主要提供Si元素来源,弥补了辉绿岩的岩浆热液中Si元素的不足,从而为巴马闪石玉的形成提供足够的物质基础(王时麒等,2016;梁国科等,2020)。

从构造上看,巴马玉位于巴马背斜内,其背斜核部有基性岩体侵入,具多期次活动,矿化强烈,成矿条件良好。罗甸地区床井穹隆、峨旁背斜、桑郎背斜等背斜构造均有罗甸玉产出,紧邻巴马的大化玉矿亦主要分布在巴考-布邦复背斜和板皇复背斜(杨林,2013;王时麒等,2016)。上述地质现象表明,包含巴马玉在内的黔桂地区闪石玉的形成明显受背斜构造控制。

巴马地区分布大面积的辉绿岩,岩体在黔南罗甸、望漠地区和桂西大化、巴马、百色地区多呈岩床状,长度从几千米到十几千米不等,厚度一般为十几米至70 m,出露宽度一般为1~2 km。巴马玉所在的民安地区辉绿岩年龄为 $259.70 \pm 1.4 \sim 259.00 \pm 1.2$  Ma(广西壮族自治区地质调查院,2019)<sup>①</sup>,桂西地区基性岩全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $256.2 \pm 0.8$  Ma(范蔚茗等,2004),罗甸地区辉绿岩年龄为 $255.00 \pm 0.62$  Ma(韩伟等,2009),大化岩滩辉绿岩锆石U-Pb年龄为 $260.5 \pm 3$  Ma(王时麒等,2016),表明3个地区的辉绿岩大致在同一时代形成,为区内闪石玉矿床的形成奠定了基础。巴马玉与大化玉的稀土元素分配趋势基本一致(图7),二者的成矿物质可能均来源于二叠纪的碳酸盐岩(王时麒等,2016),再结合毗邻的巴马玉与大化玉均形成于辉绿岩与碳酸盐质围岩的外接触带这一特征产状,基本可以确定二者属于成因一致的同—矿带。

前人研究已表明,大化玉的成矿流体来自于辉绿岩带来的岩浆热液(王时麒等,2016),结合野外观察巴马玉所处环境地层条件、岩浆岩条件以及周围并未发现大规模变质岩的情况,推测巴马玉的成矿所需热量和水来自辉绿岩所带来的岩浆热液。辉绿岩岩浆的侵入活动为巴马玉成矿带来了热液。岩浆中的热液沿裂隙进入与围岩中的灰岩、白云岩等

碳酸盐岩相接触,在一定的温度、压力下,通过接触交代作用,热液萃取了接触带中的Ca、Mg、Si等元素,发生了透闪石化作用,最终得以形成透闪石玉(王时麒等,2016;梁国科等,2020)。虽然巴马玉矿与常见的镁质矽卡岩型闪石玉矿一样都属于岩浆热液接触交代型矿床,但镁质矽卡岩型闪石玉的典型代表新疆和田玉是中酸性岩浆岩侵入碳酸盐岩后发生热液接触交代所形成,而巴马玉为基性岩侵入夹硅质岩的碳酸盐岩后发生热液接触交代所形成,属于一种新型闪石玉矿床,其成矿模式与黔桂地区罗甸玉、大化玉(王时麒等,2017)基本一致。

综上所述,同处于右江盆地、红水河流域且分布在辉绿岩脉上的黔桂地区罗甸、大化、巴马所产出的闪石玉物理性质相近,成因相似,稀土元素特征相近,表明巴马玉与大化玉、罗甸玉矿是属于同一地质带、在相同的地域环境背景下成矿的,其沿辉绿岩体呈大型矿带出现与前人的研究推论(王时麒等,2017)相一致。

## 5 结论

(1) 通过偏光显微镜镜下观察、X射线粉晶衍射、电子探针、人工重砂等手段分析后明确巴马玉属于透闪石玉,主要矿物组成为透闪石(部分为阳起石),次要矿物有滑石、钛铁矿、方铅矿、锆石、磷灰石以及表生矿物褐铁矿、针铁矿、高岭石等,其硬度偏小的原因是因为含有3%~6%的滑石。

(2) X射线粉晶衍射分析结果显示,巴马玉水草花富集粉末样品的组成矿物中含针铁矿晶体及非晶体的高价铁氧化物,说明水草花结构为巴马玉在地表次生形成。

(3) 主量、微量元素分析结果显示,巴马玉从淡紫到黄到青,Fe含量逐渐升高,说明Fe是巴马玉呈现青色的主要致色因素;Mn含量较高,推测Mn和Fe的含量共同影响巴马玉颜色。

(4) 综合研究结果表明,巴马闪石玉属于辉绿岩侵入碳酸盐岩所形成的层控性岩浆热液接触交代型矿床,其成矿年龄与辉绿岩侵入围岩时代相近;巴马玉与大化玉、罗甸玉具有相同的地质背景和类似的产状特征,表明它们都属于成因相同的层控性岩浆热液接触交代型矿床,应为红水河流域围绕辉绿

① 广西壮族自治区地质调查院. 2019. 1:50 000 巴马区域地质图民安幅.

岩的同一玉矿带。

**致谢** 感谢韦少华先生为本次研究提供的早期巴马玉样本;感谢宁迪先生提供巴马玉矿点位置的相关线索以及巴马玉工艺品照片;感谢北京北达燕园微构分析测试中心的薛雍老师对本次研究的X射线粉末衍射实验数据分析的指导;感谢北大宝石鉴定中心的孟丽娟老师对本次研究的电子探针数据分析提供的指导;感谢广西地质调查院相关同志在本次研究的野外勘探以及论文撰写过程中所提供的协助以及相关资料,由于篇幅,恕不一一提名。特别感谢中国珠宝玉石首饰行业协会副秘书长韦光明先生所给予的各方面大力支持,使本次研究得以顺利进行。

## References

- Chen Muyu, Lan Yan, Chen Zhiqiang, *et al.* 2017. Gemmological characteristic of nephrite with dendrite pattern from Dahua, Guangxi Province[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 19(2): 41~48 (in Chinese with English abstract).
- Cui Wenyuan and Yang Fuxu. 2002. The study of Hetian Jade (Nephrite)[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(S1): 26~33 (in Chinese).
- Deng Yanhua. 1992. *Gemstone (Jade) Deposit* [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 104~112 (in Chinese).
- Dong Biqian. 1996. Geology and gemological characteristics of nephrite in Ge'ermu, Qinghai[J]. *Building Materials Geology*, (S): 23~24 (in Chinese).
- Du Jiming. 2020. The Study on Gemological and Mineralogical Characteristics of Nephrite in Dahua, Guangxi[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Fan Weiming, Wang Yuejun, Peng Touping, *et al.* 2004. Ar-Ar & U-Pb chronology of Late Paleozoic basalt in West Guangxi and its constraints on eruption age of Emeishan basalt province[J]. *Chinese Science Bulletin*, (18): 1 892~1 900 (in Chinese).
- Grudin M I, Sekerin A P and Sekerina N V. 1979. Nature of nephrites of various color[J]. *Soviet Geology and Geophysics*, 20(2): 122~124.
- Guo Fuxiang. 1994. Geotectonice unit in Guangxi Province[J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 14(3): 233~243 (in Chinese).
- Han Dong, Liu Xifeng, Liu Yan, *et al.* 2018. Genesis of dolomite-related nephrite from color-forming factors of typical nephrite in Hetian, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(6): 1 011~1 026 (in Chinese with English abstract).
- Han Wen, Hong Hanlie, Wu Yu, *et al.* 2013. Color genesis of brown Jade from Hetian Nephrite[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(6): 1 446~1 450 (in Chinese with English abstract).
- Han Wei, Luo Jinhai, Fan Junlei, *et al.* 2009. Late Permian diabase in Luodian, Southeastern Guizhou, and its tectonic significances[J]. *Geological Review*, 55(6): 795~803 (in Chinese with English abstract).
- Hao Shuang and Zhang Guibin. 2016. The genesis of smoky-violet color in nephrite from Sanchakou, Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(S1): 12~18 (in Chinese with English abstract).
- He Youbin and Wang Wenguang. 2007. *Sedimentary Rocks and Facies* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 272~273 (in Chinese).
- IMA-CNMMN. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names[J]. *Mineralogical Magazine*, 61: 295~321.
- Jiang Renhua. 1998. Hetian Jade[J]. *Shanghai Geology*, (2): 49~58 (in Chinese).
- Li Yujie, Wang Lisheng, Li Xinling, *et al.* 2017. The types and characteristics of the secondary minerals in nephrite [A]. *Gemology & Technology—Proceedings of China International Gemology Academic Conference (2017)* [C]. 206~211 (in Chinese with English abstract).
- Liang Guoke, Wu Xiangke, Huang Qianxin, *et al.* 2020. The discovery of Bama nephrite and its prospecting direction[J]. *Southern Land and Resource*, (7): 66~69 (in Chinese).
- Liu Fei and Yu Xiaoyan. 2009. Classification and mineralogical characteristics of nephrite deposits in China [J]. *Mineral Resources and Geology*, 23(4): 375~380 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xifeng, Jia Yuheng, Liu Yan, *et al.* 2019. Geochemical characteristics and genetic types of Gobi nephrite in Ruoqiang-Qiemo, Xinjiang [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 38(3): 316~325 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xifeng, Liu Yan, Li Zijiang, *et al.* 2017. The genesis and SHRIMP U-Pb zircon dating of the Pishan brown nephrite bearing Mg-skarn deposit in Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(2): 259~273 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xifeng, Zhang Hongqing, Liu Yan, *et al.* 2018. Mineralogical characteristics and genesis of green nephrite from the world [J]. *Rock*

- and Mineral Analysis, 37(5): 479~489 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Deng J, Shi G H, *et al.* 2011a. Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(3): 440~451.
- Liu Y, Deng J, Shi G H, *et al.* 2011b. Geochemistry and petrogenesis of placer nephrite in Hetian, Xinjiang, Northwest China [J]. *Ore Geology Reviews*, 41(1): 122~132.
- Liu Y, Zhang R Q, Zhang Z Y, *et al.* 2015. Mineral inclusions and SHRIMP U-Pb dating of zircons from the Alamas nephrite and granodiorite: Implications for the genesis of a magnesian skarn deposit [J]. *Lithos*, 212~215: 128~144.
- Qin Shan. 2011. *Structural Mineralogy* [M]. Beijing: Peking University Press, 115~117 (in Chinese).
- Wang Shiqi, Duan Tiyu and Zheng Zizi. 2002. Petro-mineral features and genetic mode of Xiuyan Jade (Nephrite) [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (S1): 79~90 (in Chinese).
- Wang Shiqi and Xu Ligu. 2017. Geological characteristics and genesis of the new nephrite deposits in Qianguai Region and its prospecting direction [A]. *Gemology & Technology—Proceedings of China International Gemology Academic Conference (2017)* [C], 182~188 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shiqi, Yu Guang, Yu Xiaojin, *et al.* 2016. *Chinese Dahua Jade* [M]. Beijing: Science Press, 14, 21~22, 56~57, 59, 62~64 (in Chinese).
- Wang Shiqi, Zhao Chaohong, Yu Guang, *et al.* 2007. *Chinese Xiuyan Jade* [M]. Beijing: Science Press, 30, 46~47, 105~107 (in Chinese).
- Wu Niandong, Wu Weizhou, Rong Hong, *et al.* 2017. The discovery and significance of Late Triassic marine bivalves in northern Youjiang Basin of Guangxi [J]. *Journal of Stratigraphy*, 41(3): 273~277 (in Chinese with English abstract).
- Wu Ruihua, Wang Chunsheng and Yuan Xiaojiang. 1994. *Improvements and Identification Method of Natural Gemstone* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 74 (in Chinese).
- Yang Lin. 2014. Study on Petro-mineral Features and Genetic Mechanism of Luodian Jade, Guizhou Province [D]. Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Yu Haiyan. 2016. *Coloring and Metallogenic Mechanisms of Different Colors in Qinhai Nephrite* [D]. Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- Zhang Beili. 2006. *Systematic Gemmology (2nd version)* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 365~367 (in Chinese).
- Zhang Ni, Liu Ziqiang, Lin Chunming, *et al.* 2015. Study on ingredients and formation of the stains in granophyric nephrite [A]. *Gemology & Technology—Proceedings of China Gemology Academic Conference (2015)* [C], 260~263 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Lunshan and Zhang Benren. 1988. *Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 33~36 (in Chinese).
- Zheng Fen, Liu Yan and Zhang Hongqing. 2019. The petrogeochemistry and zircon U-Pb age of nephrite placer deposit in Xiuyan, Liaoning [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 38(4): 438~448 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhengyu, Liao Zongting, Chen Ying, *et al.* 2008. Petrological and mineralogical characteristics of Qinghai nephrite [J]. *Rock and Mineral Analysis*, (1): 17~20 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈慕雨, 兰 延, 陈志强, 等. 2017. 广西大化“水草花”软玉的宝石学特征 [J]. *宝石和宝石学杂志*, 19(2): 41~48.
- 崔文元, 杨富绪. 2002. 和田玉(透闪石玉)的研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 21(S1): 26~33.
- 邓燕华. 1992. *宝(玉)石矿床* [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 104~112.
- 董必谦. 1996. 青海省格尔木木玉地质简况及玉石特征 [J]. *建材地质*, (S): 23~24.
- 杜季明. 2015. 广西大化透闪石玉的宝石矿物学特征研究 [D]. 中国地质大学(北京).
- 范蔚茗, 王岳军, 彭头平, 等. 2004. 桂西晚古生代玄武岩 Ar-Ar 和 U-Pb 年代学及其对峨眉山玄武岩省喷发时代的约束 [J]. *科学通报*, (18): 1 892~1 900.
- 郭福祥. 1994. 广西大地构造单元 [J]. *桂林冶金地质学院学报*, 14(3): 233~243.
- 韩 冬, 刘喜锋, 刘 琰, 等. 2018. 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*, 37(6): 1 011~1 026.
- 韩 文, 洪汉烈, 吴 钰, 等. 2013. 和田玉糖玉的致色机理研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 33(6): 1 446~1 450.
- 韩 伟, 罗金海, 樊俊雷, 等. 2009. 贵州罗甸晚二叠世辉绿岩及其区域构造意义 [J]. *地质论评*, 55(6): 795~803.
- 郝 爽, 张贵宾. 2016. 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*, 35(S1): 12~18.
- 何幼斌, 王文广. 2007. *沉积岩与沉积相* [M]. 北京: 石油工业出版社, 272~273.

- 蒋壬华. 1998. 和田玉[J]. 上海地质, (2): 49~58.
- 李育洁, 王礼胜, 李新岭, 等. 2017. 软玉次生矿物的种类及特征研究[A]. 中国国际珠宝首饰学术交流会论文集(2017)[C], 206~211.
- 梁国科, 吴祥珂, 黄倩心, 等. 2020. 广西巴马地区透闪石玉的发现和找矿方向探讨[J]. 南方国土资源, (7): 66~69.
- 刘飞, 余晓艳. 2009. 中国软玉矿床类型及其矿物学特征[J]. 矿产与地质, 23(4): 375~380.
- 刘喜锋, 贾玉衡, 刘琰. 2019. 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, 38(3): 316~325.
- 刘喜锋, 刘琰, 李自静, 等. 2017. 新疆皮山镁质砂卡岩矿床(含糖玉)成因及锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 岩石矿物学杂志, 36(2): 259~273.
- 刘喜锋, 张红清, 刘琰, 等. 2018. 世界范围内代表性碧玉的矿物特征和成因研究[J]. 岩矿测试, 37(5): 479~489.
- 秦善. 2011. 结构矿物学[M]. 北京: 北京大学出版社, 115~117.
- 王时麒, 段体玉, 郑姿姿. 2002. 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, (S1): 79~90.
- 王时麒, 徐立国. 2017. 黔桂新型软玉矿床的地质特征、矿床成因及找矿方向[A]. 中国国际珠宝首饰学术交流会论文集(2017)[C], 182~188.
- 王时麒, 于洗, 於晓晋, 等. 2016. 中国大化玉[M]. 北京: 科学出版社, 14, 21~22, 56~57, 59, 62~64.
- 王时麒, 赵朝洪, 于洗, 等. 2007. 中国岫岩玉[M]. 北京: 科学出版社, 30, 46~47, 105~107.
- 吴瑞华, 王春生, 袁晓江. 1994. 天然宝石的改善及鉴定方法[M]. 北京: 地质出版社, 74.
- 杨林. 2013. 贵州罗甸玉矿物岩石学特征及成因机理研究[D]. 成都理工大学.
- 于海燕. 2016. 青海软玉致色机制及成矿机制研究[D]. 南京大学.
- 张蓓莉. 2006. 系统宝石学(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 365~367.
- 张妮, 刘自强, 林春明, 等. 2015. 贵州罗甸透闪石质“花斑玉”的致斑物质组成及成因研究[A]. 珠宝与科技——中国珠宝首饰学术交流会论文集(2015)[C]. 260~263.
- 赵伦山, 张本仁. 1988. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 33~36.
- 郑奋, 刘琰, 张红清. 2019. 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, 38(4): 438~448.
- 周征宇, 廖宗廷, 陈盈, 等. 2008. 青海软玉的岩石矿物学特征[J]. 岩矿测试, (1): 17~20.