

紫色“山仔濑石”的颜色成因及成矿机制研究

武嘉欣^{1,2}, 陈涛^{1,2}, 郑金宇^{1,2,3}, 庄玥^{1,2}, 田静琳^{1,2}, 黄赵颖^{1,2}

(1. 中国地质大学 珠宝学院, 湖北 武汉 430074; 2. 湖北省珠宝工程技术研究中心, 湖北 武汉 430074;
3. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 紫色“山仔濑石”为寿山石的一种, 是一种由层状硅酸盐矿物组成的黏土质玉石。其表层风化为黄色, 内部为紫色, 属于图章石中较为稀少的颜色品种。本文采用常规的宝石显微镜对其外观特征进行详细观察; 利用X射线粉晶衍射仪、显微激光拉曼光谱仪、扫描电子显微镜、激光剥蚀等离子质谱仪等对其矿物组成、化学成分、稀土元素特征及谱学特征进行测试; 利用全岩化学分析、紫外-可见分光光度计、SPSS分析模型对其颜色成因进行研究。结果发现紫色“山仔濑石”的主要矿物组成为伊利石, 次要矿物为独居石、磷钼铝石、赤铁矿和重晶石; 其稀土元素指示性数据呈现出轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损的现象, 指示其矿物成因与还原的酸性热液蚀变有关; 紫色“山仔濑石”的紫色色调深浅与伊利石中Mn含量高低呈现正相关性; 紫色“山仔濑石”内主要矿物和次要矿物的种类、分布特征和形成温度的不同说明在成矿后期存在多期热液侵入, 紫色“山仔濑石”的形成过程与寿山地区的成矿规律具有一致性。

关键词: 紫色“山仔濑石”; 伊利石; 扫描电子显微镜; 拉曼光谱; 成矿机制

中图分类号: P619.28⁺1; P574

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)02-0263-12

Research on the metallogenic process and color origin of purple “Shanzilai stone”

WU Jia-xin^{1,2}, CHEN Tao^{1,2}, ZHENG Jin-yu^{1,2,3}, ZHUANG Yue^{1,2}, TIAN Jing-lin^{1,2} and
HUANG Zhao-ying^{1,2}

(1. Gemmological Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Gems and Jewelry Engineering Technology Research Center, Wuhan 430074, China; 3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Purple “Shanzilai stone”, a kind of Shoushan stone, is a layered silicate mineral clay jade. Its surface weathering for yellow, interior purple, corresponds to the seal stone in the rather unusual color variants. A standard gemstone microscope was used to examine the visual attributes. X-ray powder crystal diffractometer, microscopic laser Raman spectrometer, scanning electron microscope, and laser denudation plasma mass spectrometer were used to investigate the mineral composition, chemical composition, and rare earth elements (REE). The cause of the color was investigated using whole-rock chemical analysis, UV-visible spectrophotometer, and SPSS analytical model. According to the findings, the principal mineral composition of the purple “Shanzilai stone” is illite, with minor minerals including monazite, gorceixite, hematite and barite. The REE indicator data demonstrate an enrich of LREE components and a deficiency of HREE, indicating that the minerals’ origin is associated to less acidic

收稿日期: 2022-11-01; 接受日期: 2023-01-30; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金(42072252); 中国地质大学(武汉)珠宝检测创新中心开放基金(CIGTWZ-2022022)

作者简介: 武嘉欣(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为宝石学和矿物学, E-mail: wujiaxin@cug.edu.cn; 通讯作者: 陈涛(1979-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事宝石学和矿物学研究, E-mail: chentao@cug.edu.cn.

hydrothermal alteration. Illite's purple hues and manganese concentration have a favorable association. The different types, distribution characteristics, and formation temperatures of the main minerals and secondary minerals in purple "Shanzilai stone" indicate that hydrothermal intrusion occurred several times during the late mineralization period, and the purple "Shanzilai stone" formation process is consistent with the metallogenic law in the Shoushan area.

Key words: purple "Shanzilai stone"; illite; scanning electron microscope; Raman spectroscopy; metallogenic mechanism

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42072252); Open Fund of Jewelry Detection Innovation Center of China University of Geosciences (Wuhan) (CIGTWZ-2022022)

图章石是我国特有的宝玉石,由层状硅酸盐矿物组成,因其具有较低的硬度、温润的外观而被广泛应用于图章和篆刻材料,并因此而得名。图章石与我国历史文化息息相关,它是篆刻艺术的承载体,自古就为王公贵胄、文人墨客所喜爱。图章石中的紫色品种非常稀少,具有较强的收藏和鉴赏价值。紫色“山仔濑石”是图章石中的少见品种,产于福建寿山金山顶北部与连江县交接的山仔濑而得名,属于图章石中的寿山石。书中记载:“山仔濑石”质地较脆,微透明,石具各色,多不透明,其中黄砂少部分,尚可雕刻(郑宗坦, 2006; 方宗珪, 2016)。

目前国内报道的由层状硅酸盐矿物组成的紫色玉石有丁香紫玉和寿山石“月尾紫”。其中丁香紫玉的主要矿物成分为锂云母和钠长石,紫色锂云母的存在是其颜色的来源(张文弢, 2013; 王亚军等, 2014)。寿山石“月尾紫”的主要矿物成分是地开石,基质中充填着大量的赤铁矿是其整体呈现紫色的原因,而赤铁矿的色调和在基质当中富集程度的不同是导致其紫色深浅变化的主要原因(韩文等, 2012)。目前对紫色“山仔濑石”的研究较少,且在显微镜下观察到紫色“山仔濑石”的表面特征与丁香紫玉和寿山石“月尾紫”仍有一定的差别,所以紫色“山仔濑石”的宝石矿物学特征和颜色成因有待进一步研究。前人已经有人对山仔濑地区的矿产进行了研究,如汤德平等(2005)发现“山仔濑石”的主要矿物类型为伊利石,“汶洋石”的主要矿物组成是伊利石和叶蜡石。但并未对山仔濑地区的紫色图章石进行研究,本文选取山仔濑地区所产的5块紫色图章石对其进行了宝石学和矿物学特征分析,确定其主要矿物、次要矿物以及致色原因,并对其矿床成因进行了初步探讨。

1 区域地质概况

寿山盆地位于中国东部浙闽粤火山活动带的中部,盆地形态不规则,总体沿北东向展布。寿山盆地周缘出露火山碎屑沉积岩,该地区在火山喷发后岩浆侵入活动强烈,形成白垩纪酸性、中酸性花岗岩,以及岩浆分异作用不稳定性导致的多期次性热液蚀变作用发育的次生石英岩化,即地开石化、叶蜡石化、伊利石化和黄铁矿化等(李玉娟等, 2021; 詹玉坤, 2021)。在主要火山机体周围形成的环状断裂、放射状断裂和断裂带多属于后期断裂,部分属于继承性断裂,而区域性断裂带发育有北东向和北西向两组。寿山盆地南北边缘为具有明显左型走滑性质的永定-闽江口断裂带的北延部分,区域性北西向断裂带为山仔濑-东雁、寿山-峨眉、双贵山-台尖山、邱里-北峰贯穿寿山盆地(李玉娟等, 2021)。

山仔濑石矿区位于金山顶火山喷发中心西北方约2 km处(图1),属于山地地形,该区区域构造位于中国东部沿海中生代火山带闽东火山活动亚带,寿山-峨眉火山喷发盆地的东缘,区内出露有早白垩世小溪组第二段流纹岩、流纹质晶屑凝灰岩、流纹质晶屑熔结凝灰岩和流纹质晶屑凝灰熔岩等。在金山顶火山喷发中心附近的山仔濑矿区的区域内构造主要以断裂为主,发育有北东向压扭性断裂和北西向张扭性断裂这两组断裂,北西向断裂为本区主要断裂,线理清楚,张性明显,岩石挤压破碎,此组断裂以及其次生断裂、裂隙与伊利石矿的蚀变和成矿密切相关,此区域内发生强烈的热液蚀变现象,次生石英岩化明显(江爱耕等, 1997)。

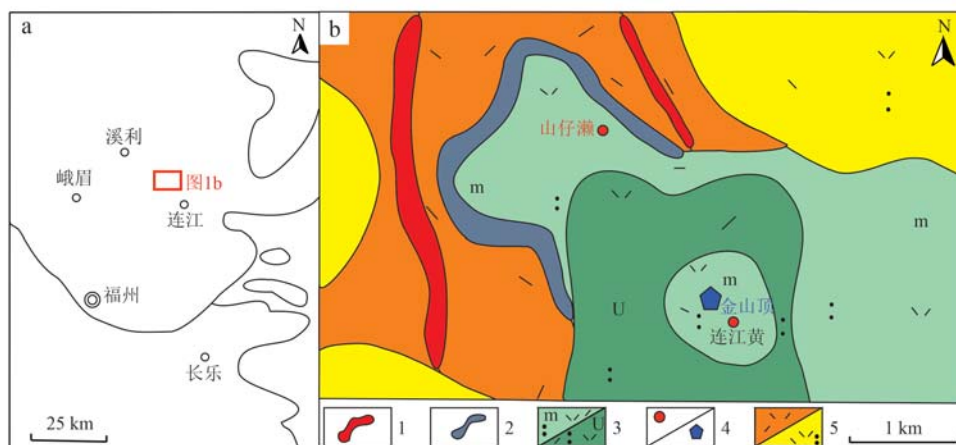


图1 紫色“山仔瀨石”矿区区域地理位置图(a)和矿床地质简图(b)(据江爱耕等, 1997; 李玉娟等, 2021)

Fig. 1 Geographical location map (a) and regional geological map (b) of purple “Shanzilai stone” mining area (modified after Jiang Aigeng *et al.*, 1997; Li Yujuan *et al.*, 2021)

1—岩性界面; 2—岩相界面; 3—流纹质晶屑熔结凝灰岩(m)和流纹质晶屑凝灰熔岩(U); 4—矿点、火山喷发中心; 5—流纹岩、流纹质晶屑凝灰岩

1—Lithologic interface; 2—lithofacies interface; 3—fused tuff (m) and coagulated ash lava (U) of rhyolitic crystal debris; 4—mining sites and volcanic eruption centers; 5—rhyolite, rhyolitic crystalline tuff

2 样品与分析方法

此次样品为野外采集后选取的,紫色“山仔瀨石”样品在表面风化层呈现黄色,“肉”为紫色,样品抛光前为土状光泽,抛光后为油脂光泽,都呈现微透明。选取不同紫色色调的样品进行测试,其中 SZL-Z-1、SZL-Z-3 为弱紫色,而 SZL-Z-2-D、SZL-Z-8-D、SZL-Z-11-D 为紫色。样品表面经风化剥蚀后为黄色,内部为紫色,所以紫色应该是自生色(图2)。在显微镜下观察其内部存在黄色点状矿物以及呈团雾状分布的白色矿物,表面裂隙较多。

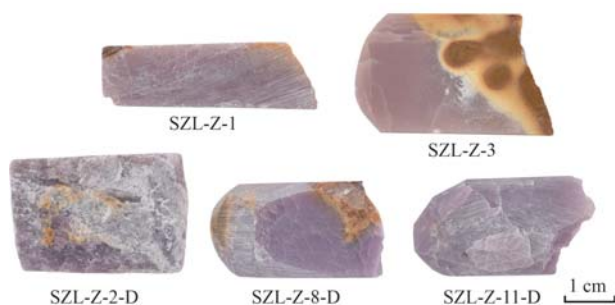


图2 紫色“山仔瀨石”样品

Fig. 2 Samples of purple “Shanzilai stone”

采用中国地质大学(武汉)材料与化学学院 AXS D8 ADVANCE 型 X 射线粉晶衍射仪对矿物组成进行分析,测试前将样品磨制成 200 目的粉末,堆叠体积大于 0.25 cm^3 ,测试条件:电压为 40 kV,电流为 40 mA,采用 CuK α 射线,Ni 滤波,波长为 $1.540\ 598 \text{ \AA}$ 。

采用中国地质大学(武汉)地质过程与国家重点实验室 HITACHI180270 型原子分光光度计对主要矿物的全岩化学元素种类进行分析,测试温度 20°C ,湿度 60%,实验严格按照 GB/T14506-2010 进行测试。

采用中国地质大学(武汉)材料与化学学院 WITec alpha300 R 型显微激光拉曼对次要矿物进行分析,激发光源 473 nm,输出功率 10 mW,采集时间 20 s,采集次数 2 次。

采用中国地质大学(武汉)地质过程与国家重点实验室 Thermos Fisher Helios G4 CX 聚焦离子电子束电镜对矿物的表面形貌和微区表征进行分析。采用牛津 Oxford Instrument Aztec X-max 80 能谱仪对其能谱进行测试。测试前对样品进行喷碳处理,测试电压为 10 kV 或 20 kV,电流 1.4 nA 或 0.34 nA。

采用中国地质大学(武汉)地质过程与国家重点实验室 LA-ICP-MS 对稀土元素特征进行分析,其中分析采用的激光剥蚀系统为 GeoLas2005,等离子体

质谱仪为 Aglient7500a。激光能量 70 MJ, 频率 8 Hz, 激光束斑直径 44 μm 。

采用中国地质大学(武汉)珠宝学院 Gem UV-100 对致色离子进行分析。

3 分析结果

3.1 X 射线粉晶衍射分析结果

对 5 块紫色“山仔濞石”样品(SZL-Z-1、SZL-Z-2-D、SZL-Z-3、SZL-Z-8-D、SZL-Z-11-D)进行了 X 射线粉晶衍射(XRD)测试,其结果见图 3 和表 1,由于白云母和伊利石都归属于二八面体的层状硅酸盐,二者的主要区别是 10 $\text{\AA}$ 衍射峰半高宽的不同(图 3b),通过 Kübler 指数进行计算后得出,样品的结晶度分别为 0.68°、0.58°、0.83°、0.68°、0.63°,所以判断样品为伊利石(郑金宇, 2021)(图 3c),表 1 可见磷钡铝石和重晶石的衍射峰。

对于伊利石而言,主要具有 $1M_d$ 、 $1M$ 、 $2M_1$ 多型结构(陈涛, 2012), $2M_1$ 型伊利石主要有 4.11、3.88、3.50、3.20、2.93、2.86 $\text{\AA}$ 等特征衍射峰,而 $1M$ 型主要有 3.66 $\text{\AA}$ 和 3.06 $\text{\AA}$ 这 2 个特征衍射峰峰(金章东等, 2000)(表 1),在图 3a 箭头位置处的 3.50 $\text{\AA}$ 和 3.20 $\text{\AA}$ 这 2 个峰位值与理论值存在一定的偏差,相关研究表明伊利石多型存在 $1M_d \rightarrow 1M \rightarrow 2M_1$ 这一转化方向,所以可能是由于 $1M$ 型向 $2M_1$ 型转化不完全导致的,所以样品当中含有 $1M$ 型伊利石和 $2M_1$ 型伊利石。

3.2 显微激光拉曼分析结果

对紫色“山仔濞石”当中存在的褐红色斑点状矿物进行测试,可见在 215 和 291 cm^{-1} 处有赤铁矿的拉曼谱峰(图 4)(Defaria and Lopes, 2007)。

3.3 全岩化学分析结果

通过测试颜色色调不同样品中主要矿物(制样时未选择含次要矿物的部分)的全岩化学元素来判断致色元素,其中 SZL-Z-1、SZL-Z-3 为弱紫色,而 SZL-Z-2-D、SZL-Z-8-D、SZL-Z-11-D 为紫色。

根据表 2, 5 个样品当中 Fe_2O_3 的含量在 0.13% 到 0.19% 之间,随着紫色色调的增加,其含量有着微弱的增加,而 MnO 的含量呈梯度式的增加。颜色较深的样品中 MnO 的含量在 0.10% 到 0.20% 之间,颜色色调呈弱紫色的样品中 MnO 的含量是 0.04% 和 0.05%,所以 MnO 的含量与样品紫色色调密切相关,初步判断 Mn 是紫色“山仔濞石”的致

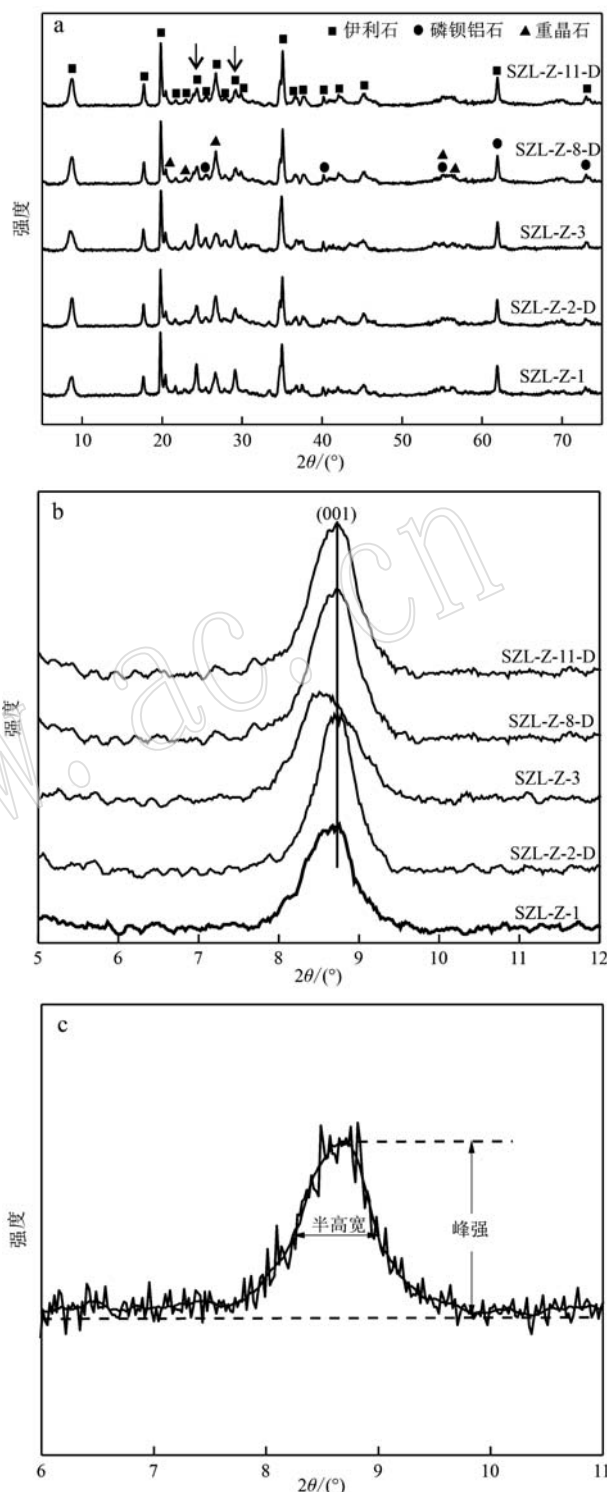


图 3 紫色“山仔濞石”样品的 XRD 谱图

Fig. 3 XRD patterns of purple “Shanzilai stone” samples
a—紫色“山仔濞石”的 XRD 谱图; b—紫色“山仔濞石”的小角度 (001) XRD 谱图; c—在 (001) 处的半高宽示意图
a—XRD patterns of purple “Shanzilai stone”; b—XRD patterns at small angles (001); c—schematic diagram of half height width at small angles (001)

表 1 紫色“山仔瀨石”主要的 X 射线衍射峰数据
Table 1 The main X-ray diffraction peak data of purple “Shanzilai stone”

<i>d</i> /Å	2θ/°	<i>hkl</i>	<i>I</i> / <i>I</i> ₀	矿物成分
10.16	8.69	002	61	I(2M ₁)
5.01	17.71	004	47	I(2M ₁)
4.45	19.80	110	67	I(2M ₁)
4.34	20.43	111	6	I(2M ₁)/B
4.11	21.63	021	14	I(2M ₁)
3.88	22.91	11 $\bar{3}$	23	I(2M ₁)/B
3.66	24.29	$\bar{1}$ 12	40	I(1M)
3.50	25.45	11 $\bar{4}$	37	I(2M ₁)/G
3.34	26.69	006	64	I(2M ₁)/B
3.20	27.88	114	31	I(2M ₁)
3.07	29.10	112	40	I(1M)
2.93	30.52	20 $\bar{6}$	17	I(2M ₁)
2.86	31.16	11 $\bar{6}$	20	I(2M ₁)
2.56	35.04	021	100	I(2M ₁)
2.44	36.79	31 $\bar{4}$	18	I(2M ₁)
2.39	37.58	312	16	I(2M ₁)
2.24	40.15	22 $\bar{1}$	9	I(2M ₁)/G
2.15	42.01	$\bar{1}$ 33	12	I(1M)
2.01	45.15	0.10	33	I(2M ₁)
1.67	55.01	421	15	B/G
1.63	56.31	231	8	B
1.50	61.92	312	4	I(2M ₁)/G
1.30	73.00	117	12	I(2M ₁)/G

注：I—伊利石；B—重晶石；C—磷钼铝石；PDF 卡片号：43-0685（2M₁ 伊利石）；29-1496（1M 伊利石）；01-1229（重晶石）；75-1684（磷钼铝石）。

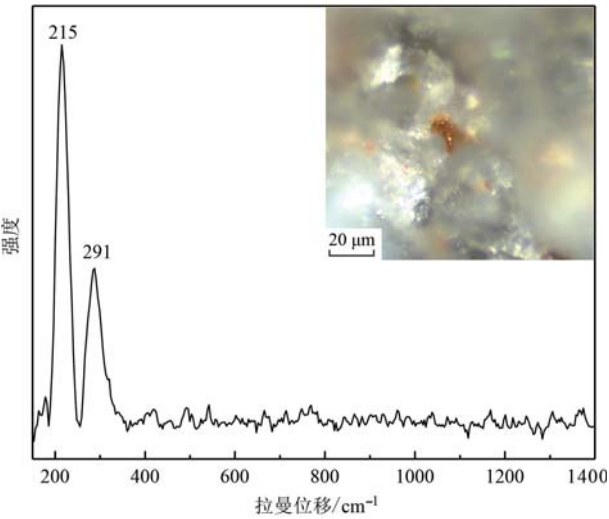


图 4 紫色“山仔瀨石”中赤铁矿的拉曼谱峰
(RRUFF 号：R050300)

Fig. 4 Raman spectrum peaks of hematite from purple “Shanzilai stone” samples (RRUFF number: R050300)

表 2 紫色“山仔瀨石”中伊利石的全岩化学分析 *w_B*/％
Table 2 Whole rock chemical analysis of Illite in purple “Shanzilai stone”

样品号	SZL-Z-1	SZL-Z-2-D	SZL-Z-3	SZL-Z-8-D	SZL-Z-11-D
颜色	弱紫色	紫色	弱紫色	紫色	紫色
SiO ₂	46.98	46.78	46.84	46.97	46.88
Al ₂ O ₃	36.74	36.05	35.69	36.92	35.86
^T Fe ₂ O ₃	0.13	0.16	0.13	0.19	0.16
MgO	0.38	0.36	0.46	0.30	0.31
CaO	0.15	0.08	0.06	0.07	0.03
Na ₂ O	0.13	0.13	0.12	0.12	0.13
K ₂ O	9.22	9.30	9.18	9.08	9.26
TiO ₂	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
MnO	0.05	0.13	0.04	0.20	0.10
H ₂ O ⁻	1.02	0.88	1.12	1.24	0.92
烧失量	6.70	6.50	6.84	6.84	6.62
总量	101.51	100.38	100.45	101.96	100.29

色元素。
采用阴离子计算法(以 11 个氧原子为基准)对其晶体化学式进行计算,最终结果如表 3 所示。紫色“山仔瀨石”样品当中的层间离子数(K 和 Na)在 0.60~0.85 之间,在伊利石的范围内(陈涛, 2012)。

表 3 紫色“山仔瀨石”样品中伊利石的晶体化学式
Table 3 Crystal chemical formula of illite in purple “Shanzilai stone”

样品号	晶体化学式
SZL-Z-3	(K _{0.77} Na _{0.02})Σ=0.79(Al _{1.85} Mg _{0.05})Σ=1.90 (Si _{3.08} Al _{0.92})Σ=4.00O ₁₀ (OH) ₂
SZL-Z-1	(K _{0.77} Na _{0.02})Σ=0.79(Al _{1.88} Mg _{0.04})Σ=1.92 (Si _{3.06} Al _{0.94})Σ=4.00O ₁₀ (OH) ₂
SZL-Z-11-D	(K _{0.78} Na _{0.02})Σ=0.80(Al _{1.88} Mg _{0.03})Σ=1.91 (Si _{3.09} Al _{0.91})Σ=4.00O ₁₀ (OH) ₂
SZL-Z-2-D	(K _{0.78} Na _{0.02})Σ=0.80(Al _{1.88} Mg _{0.04})Σ=1.92 (Si _{3.08} Al _{0.92})Σ=4.00O ₁₀ (OH) ₂
SZL-Z-8-D	(K _{0.75} Na _{0.02})Σ=0.77(Al _{1.86} Mg _{0.03})Σ=1.89 (Si _{3.04} Al _{0.96})Σ=4.00O ₁₀ (OH) ₂

3.4 扫描电子显微镜分析结果

在紫色“山仔瀨石”新鲜断裂面的 SEM 像中,可见样品整体呈现出层状分布且分布具有不定向性的特点,其中层状伊利石矿物的最大的生长方向差角约为 90°,伊利石颗粒在三维空间内的生长呈无序性(图 5a)。在其内部可见黄色点状包体,在 SEM 下呈鲕状(图 5c)、假六方片状和玫瑰花瓣状(图 5d)集合体,能谱测试后得出是含 Sr 的磷钼铝石,其化学式是 (Sr_{0.19}Ba_{0.48}Pb_{0.07})Σ=0.74Al_{2.79}(P_{1.12}O₄)(P_{1.12}O₃OH)(OH)₆。在背散射电子像中可以看见较高衬度的碎

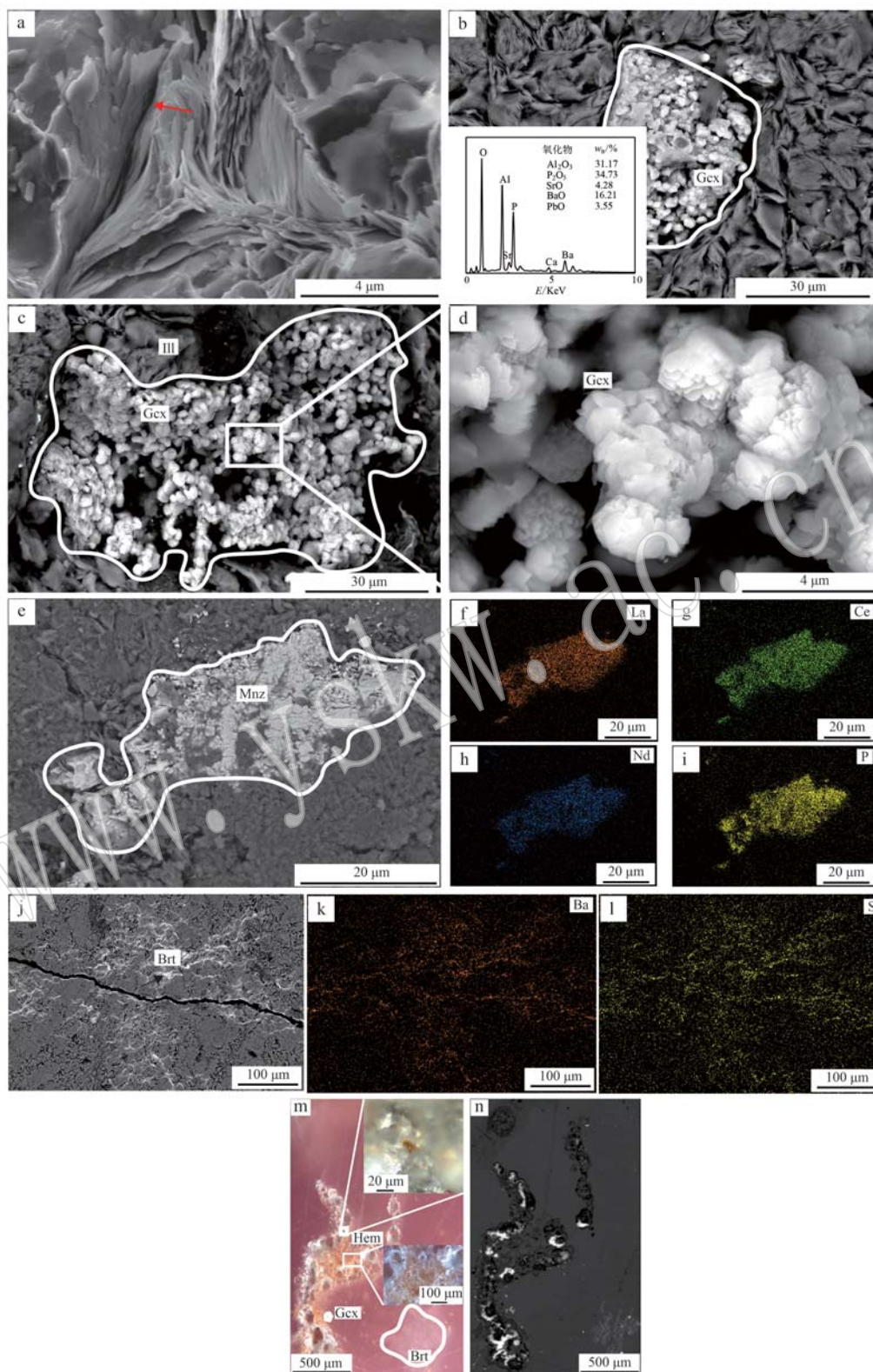


图 5 紫色“山仔濑石”的扫描电子显微镜特征

Fig. 5 Morphologic characteristics of purple “Shanzilai stone” under SEM

a—伊利石的 SEM 图像; b, c, d—含 Sr 磷钽铝石的 SEM 图像; e—独居石的表面微形貌; f, g, h, i—独居石的 EDS 元素分布; j—重晶石的面微形貌; k, l—重晶石的 EDS 元素分布; m, n—显微镜和扫描电子显微镜下的微孔隙形貌; Ill—伊利石; Gcx—磷钽铝石; Mnz—独居石; Brt—重晶石; Hem—赤铁矿

a—SEM image of illite; b, c, d—SEM image of Sr-gorceixite; e—SEM image of monazite; f, g, h, i—EDS elemental mappings of monazite; j—SEM image of barite; k, l—EDS elemental mappings of barite; m, n—micropores under microscope and SEM; Ill—illite; Gcx—gorceixite; Mnz—monazite; Brt—barite; Hem—hematite

屑块状矿物,能谱测试结果是独居石($\text{Ce,La,Nd}\text{PO}_4$) (图 5e),呈半自形-他形。白色团絮状包体为重晶石,其以浸染状分布于伊利石的微裂隙当中(图 5j),在显微镜和 SEM 下可见内部有比较疏松的微孔隙,其附近有聚集呈胶状结构的赤铁矿(图 5m)。

3.5 LA-ICP-MS 分析结果

从表 4 可以看出,样品 ΣREE 的值在 7.52×10^{-6} ~ 30.54×10^{-6} 之间,表明稀土元素在热液蚀变过程

当中是具有一定的流动性(祁冬梅等, 2015),同时具有轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损的右倾特征(图 6)。(La/Yb)_N 的值介于 1.77~4.03 之间且变化较大,有的样品 ≥ 4 ,个别样品略低于 2,而且(La/Ce)_N 的值介于 1.34~1.58 之间,其变化范围较小,表明样品中轻重稀土元素分馏现象较为明显,(La/Lu)_N 的值介于 1.61~5.52 之间,均值为 3.40,表明在热液蚀变过程中形成的紫色“山仔瀨石”

表 4 紫色“山仔瀨石”的稀土元素 LA-ICP-MS 分析结果

Table 4 LA-ICP-MS analysis result of REE elements of purple “Shanzilai stone”

元素	SZL-Z-1-01	SZL-Z-1-02	SZL-Z-1-03	SZL-Z-2-D-01	SZL-Z-2-D-02	SZL-Z-2-D-03	SZL-Z-3-01	SZL-Z-3-02	SZL-Z-3-03	SZL-Z-8-D-01	SZL-Z-8-D-02	SZL-Z-8-D-03	SZL-Z-11-D-01	SZL-Z-11-D-02	SZL-Z-11-D-03
La	5.36	5.19	5.61	4.07	4.70	3.98	1.71	1.99	2.48	1.51	1.31	1.39	3.79	4.26	4.34
Ce	9.40	8.58	9.93	7.53	8.23	7.04	3.01	3.42	4.18	2.47	2.23	2.37	7.33	7.60	7.53
Pr	1.17	1.12	1.24	0.88	1.06	0.87	0.37	0.35	0.47	0.27	0.25	0.26	1.00	0.95	0.93
Nd	5.28	4.68	5.43	3.67	4.29	3.27	1.53	2.41	1.72	1.41	1.06	1.15	4.00	3.89	3.48
Sm	1.21	1.43	1.85	1.02	1.17	1.14	0.54	0.57	1.03	0.41	0.32	0.46	0.88	1.05	1.58
Eu	0.32	0.37	0.45	0.28	0.33	0.29	0.13	0.11	0.15	0.13	0.12	0.12	0.34	0.34	0.40
Gd	2.11	1.89	2.13	1.22	1.59	1.73	0.65	1.10	1.21	0.58	0.60	0.48	1.92	1.97	1.46
Tb	0.23	0.30	0.27	0.20	0.23	0.20	0.08	0.09	0.13	0.08	0.08	0.09	0.26	0.26	0.20
Dy	1.33	1.50	1.63	1.22	1.57	1.34	0.66	0.75	0.35	0.41	0.61	0.50	1.46	1.44	1.31
Ho	0.31	0.33	0.37	0.26	0.26	0.24	0.14	0.18	0.30	0.13	0.10	0.11	0.35	0.34	0.30
Er	0.63	0.84	0.79	0.72	0.82	0.81	0.49	0.46	0.59	0.45	0.31	0.37	0.82	0.72	0.58
Tm	0.11	0.19	0.12	0.13	0.14	0.08	0.07	0.06	0.07	0.05	0.06	0.06	0.11	0.11	0.10
Yb	0.77	0.89	0.60	0.81	0.72	0.77	0.69	0.67	0.59	0.57	0.40	0.30	0.55	0.80	0.78
Lu	0.15	0.10	0.12	0.11	0.12	0.10	0.09	0.09	0.17	0.08	0.06	0.06	0.10	0.13	0.12
ΣREE	28.39	27.40	30.54	22.13	25.24	21.86	10.16	12.25	13.44	8.55	7.52	7.71	22.90	23.86	23.11
(La/Yb) _N	4.97	4.19	6.65	3.60	4.65	3.69	1.77	2.14	3.00	1.90	2.33	3.36	4.94	3.83	3.98
(La/Ce) _N	1.47	1.56	1.46	1.40	1.47	1.46	1.47	1.50	1.53	1.58	1.52	1.51	1.34	1.45	1.49
(La/Lu) _N	3.76	5.52	5.17	3.91	4.32	4.35	1.97	2.25	1.61	2.04	2.25	2.49	3.99	3.41	4.02
δEu	0.92	1.04	1.04	1.16	1.12	0.95	1.01	0.64	0.62	1.23	1.26	1.18	1.21	1.09	1.21

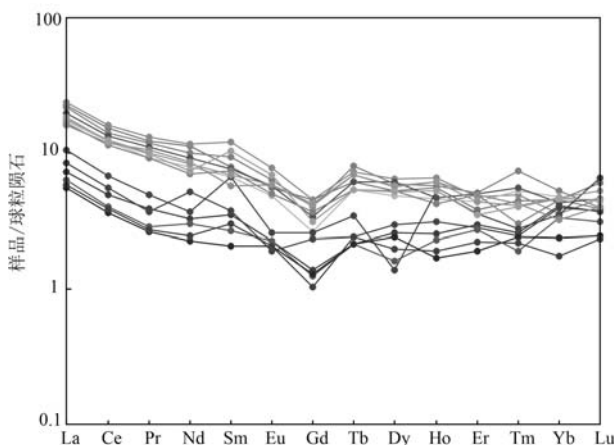


图 6 紫色“山仔瀨石”稀土元素配分图(标准化数据引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 REE distribution patterns of purple “Shanzilai stone” (standardized data from Sun and McDonough, 1989)

并不具备典型的热液特征, δEu 的值介于 0.62~1.26 之间,均值为 1.05,为正异常,表明其形成的热液为还原的酸性热液(Sun and McDonough, 1989; McDonough and Sun, 1995; 张虎才, 1997)。

3.6 紫外可见吸收光谱分析结果

紫色“山仔瀨石”中紫色色度具有明显差别,对不同紫色色度的样品进行紫外可见吸收光谱测试。所测试的样品当中在 439 nm 和 451 nm 可见微弱的吸收带;在紫色较深的样品当中有较强的 554 nm 强吸收宽带,颜色较浅的样品中有较弱的 550 nm 宽吸收带,其峰位出现蓝移(图 7a)。

4 讨论

4.1 颜色成因

如图 7a 所示在 439 nm 和 451 nm 出现的微弱的吸

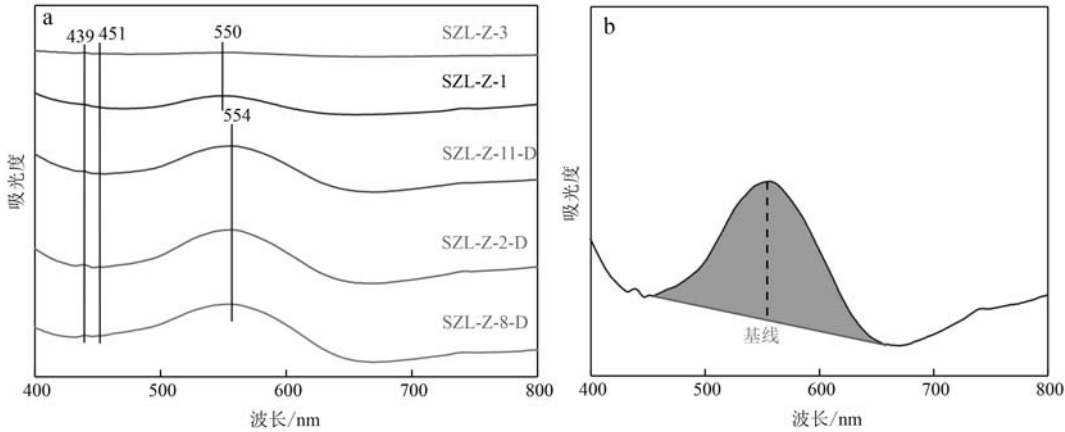


图 7 紫色“山仔濑石”的紫外可见吸收光谱和积分光面积示意图

Fig. 7 UV-Vis absorption spectrum of purple “Shanzilai stone” and schematic diagram of integrated optical area

a—紫色“山仔濑石”的紫外可见吸收光谱; b—550 nm 和 554 nm 处积分光面积示意图

a—UV-Vis absorption spectrum of purple “Shanzilai stone”; b—schematic diagram of integrated optical area at 550 nm and 554 nm

收带是 Fe^{3+} 所致,而在 550 nm 处微弱的吸收宽带和 554 nm 处强吸收宽带是 Mn^{3+} 所致 (Rehman *et al.*, 2020),而含锰、铁这些过渡元素的矿物是通过其 d 轨道电子的跃迁致色,同时考虑到过渡元素在进入矿物当中元素离子半径大小和价态作为关键因素也起着一定的作用,而 Mn^{3+} 和 Fe^{3+} 与处于八面体中六配位的 Al^{3+} 的离子半径极为接近,且还具有等价态和电荷平衡态,所以可以取代 Al^{3+} 进入到八面体当中,同样在八面体当中也可以取代 Si^{4+} 。而 Fe^{3+} 需要较高的含量 ($>1\,000\times 10^{-6}$) 时才能显色 (Rehman *et al.*, 2020)。在进行紫外可见吸收光谱测试和全岩化学分析后,发现颜色色调的变化与铁、锰元素具有一定的相关性。所以对 Mn^{3+} 所致吸收宽带的强弱和锰含量的高低进行相关性判断。

在对次要矿物进行 EDS 测试时发现其元素组成并不含锰元素,所以锰元素全部存在于伊利石当中。于是对样品在紫外可见吸收光谱中 550 nm 和 554 nm 处的宽吸收带以基线为底进行积分光面积 (图 7b) 计算,将从全岩化学分析得到的锰含量和积分光面积 (表 5) 进行 SPSS 拟合后,显著性 F 变化量是 0.034 (<0.05),说明被解释变量与解释变量全体的线性关系是显著的,可建立线性方程,从其一元线性回归中得到调整后的 R^2 为 0.729,初步判定模型拟合程度良好,结果表明锰含量与其对应的积分光面积的关系极为密切。

在 SPSS 的拟合当中可以通过 D-W 值检验来进行判断模型当中的残差独立性检验,通过查询

Durbin Watson table 发现其 D-W 值 (2.22) 接近 2,认定为残差独立,观测值相互独立的可能性较大,通过检验。所以锰含量与积分光面积是具有正相关性。

表 5 紫色“山仔濑石”中伊利石的积分光面积计算结果和锰含量

Table 5 Calculation results of integrated light area and manganese content of illite in purple “Shanzilai stone”

样品号	SZL-Z-1	SZL-Z-2-D	SZL-Z-3	SZL-Z-8-D	SZL-Z-11-D
颜色	弱紫色	紫色	弱紫色	紫色	紫色
积分光面积/%	281.94	971.87	45.21	1047.92	798.62
锰含量 $w_B/\%$	0.045	0.130	0.039	0.200	0.098

综上所述,通过 SPSS 模型证明了锰含量与紫外可见光谱中锰吸收的积分光面积呈正相关性,锰含量越高, Mn^{3+} 在八面体上的配位的数量越多,紫色色调越深,所吸收的积分光面积就越大,所以锰是最主要的致色元素。对于 Fe^{3+} 而言,在紫外光谱当中所对应的吸收峰很微弱,在全岩化学分析中的数据得知铁含量在各个样品中的变化是差别不大的,所以铁含量在样品整体色调上的影响受到锰含量的制约。如在 SZL-Z-3 中通过肉眼判断其颜色是弱紫色,是由于锰含量的减少导致的紫色色调降低,最终呈现出弱紫色。

4.2 成矿机制初探

4.2.1 成矿条件

寿山地区的矿床成矿过程当中,火山作用只是寿山石成矿的前提条件,后期所发生的多期次热液

侵入作用是成矿的主要阶段,其矿床成因类型为火山热液交代-岩浆热液改造型矿床(詹玉坤, 2021),在这一地区形成的次生石英岩体及相应的非金属矿床系列在空间上是归属于断裂-中心式机构,是控制这一类矿床的主要火山构造类型(陈鹤年等, 1986)。

在金山顶附近有区域性的北西向“山仔瀨-东雁”断裂带,断裂带在金山顶火山口的北东向上的断裂呈现锯齿状,张性特征为主,线性清楚,单侧呈现为断裂切错性,岩石挤压破碎,劈理化明显(李玉娟等, 2021)。在成矿过程当中,一般认为成矿与蚀变是同时发生的,当火山热液($\geq 400^{\circ}\text{C}$)向围岩渗透扩散时与围岩发生反应,随着远离矿化部位形成不同矿物组合,构成不同的蚀变带,大量的硅化(包括赤铁矿化)和成矿元素的沉淀也多集中在蚀变的期后(王联魁等, 1977)。

火山作用阶段的火山碎屑岩在形成黏土矿物时也具有一定的优势,小溪组火山碎屑岩是寿山石的主要含矿围岩,以流纹质晶屑凝灰岩,流纹质晶屑熔结凝灰岩等为主(李玉娟等, 2021; 詹玉坤, 2021),此类岩石由于具有结构疏松、透水性好等特点而容易发生热液交代作用(刘云贵, 2013),同时大气水和地表水为还原性的酸性热液的形成提供了水源(陈鹤年等, 1986),所以此类热液蚀变型矿床的形成依赖于空间、物源、水源的共同作用。

4.2.2 成矿期次

紫色“山仔瀨石”的主要矿物是伊利石,其含量在95%以上,伊利石的形成与生长环境的温度、pH值、压力、K含量和生长时间等具有一定的关系,其中温度最为重要,而相关研究表明在1M型和2M₁型伊利石共存时其温度范围是280~360 $^{\circ}\text{C}$ (金章东等, 2000)。

对于次要矿物而言,紫色“山仔瀨石”形成于断裂带-金山顶火山喷发中心处的热液蚀变矿床,所以判断在这一矿区所产出的独居石是热液成因的独居石(强山峰等, 2013),而这一类独居石常呈团粒状、浸染状和细粒状分布于热液交代岩和矿脉当中(李治平等, 2021)。在电子显微镜下可见独居石结构简单,不发育成分带,无明显的平直岩浆环带和复杂的化学成分(图5e),内部结构较疏松,其边缘呈碎屑块状分布。由于其形成的温度范围是140~200 $^{\circ}\text{C}$ (黄从俊, 2019),且在伊利石的内部呈现一定范围的聚集,说明独居石的形成早于伊利石,所以判断独

居石并不属于与伊利石同一期热液蚀变的产物,而是属于前一期热液蚀变的产物。

磷钼铝石被发现于广泛的地球化学环境当中,一般产于碳酸盐泥质页岩,石英岩和凝灰岩当中,形成温度为200~300 $^{\circ}\text{C}$,在pH值4.0~6.8之间最为稳定(Migaszewski *et al.*, 2007),指示了母岩矿物的热液环境为酸性。磷钼铝石的结晶形态是受到了晶体结构当中Ba、Sr、Pb的增益影响所产生的假六方片状、鳞片状和玫瑰花状(图5d),整体呈现出微晶团粒状(图5c)(Walter *et al.*, 1995)。磷钼铝石一般形成于富铁矿物的附近,同时也为含铁的磷钼铝石提供了铁的来源,由于在紫色“山仔瀨石”当中并未发现长石类矿物和黄铁矿等标志性矿物,所以Ba、Al、P等来自于碳质泥页岩和火山碎屑岩(Migaszewski *et al.*, 2007)。磷钼铝石的形成可能是由于风化作用和热液蚀变作用使得围岩当中成矿的主要元素浸出,在成矿母岩中体现出了一定的流动性,从而生成的一些微量的次生磷酸铝矿物(Greiff *et al.*, 1984)。磷钼铝石分布于主要矿物伊利石的内部,其与伊利石(层状硅酸盐)形成一定的伪同态,说明磷钼铝石与伊利石的晶体生长产生了一定的相似性。从二者的形成温度范围来判断,有部分磷钼铝石的形成是早于伊利石形成的,说明了磷钼铝石可能是前一期热液蚀变的产物或者是与伊利石的母岩共生,也有可能部分磷钼铝石是属于与伊利石蚀变成矿的同一期热液蚀变产物。同时在紫色“山仔瀨石”内部呈现出磷钼铝石的阶段性富集(如图8中A和B位置所示),表明在热液蚀变的过程中存在岩浆分异产生热液的多次侵入,导致侵入热液的pH值和温度出现往复的变化,最终导致磷钼铝石产生特殊的分布特征。此外,磷钼铝石的化学元素组成和含量具有一定的差异性,例如在样品测试当中还存在微量的铈等元素,可能是与晶体结构的包容性(同一配位上的离子具有相似的离子半径、化学键键能)有



图8 紫色“山仔瀨石”中磷钼铝石阶段性富集照片
Fig. 8 Photo of phase enrichment of goebsite in purple “Shanzilai stone”

一定的关系。同样也表明了磷钡铝石的形成环境相对复杂,其母岩矿物中的化学元素种类丰富。

在显微镜下可见重晶石呈白色浸染状和团雾状分布(图5j),SEM下可见沿伊利石片层裂隙处分布的细粒状微晶集合体,而重晶石的形成常常是从水溶液中沉淀形成的,所以在紫色“山仔濑石”当中的重晶石可能是热液流体在流经微裂隙处沉淀下来的,且分布的不均匀性可能是由于热液上升的压力、空间以及流体性质差异导致的,相关研究表明热液成矿期重晶石的形成是基于还原条件的热液流体在母岩当中占主导地位(Ehya and Mazraei, 2017),且围岩当中含硫矿物和含 Ba^{2+} 和低价态 S 的热液为其提供物源(Yang *et al.*, 2008)。呈细粒状微晶集合体的重晶石沿着伊利石的裂隙分布,说明是在同一期热液蚀变过程中,随着重晶石在热液中的溶解度降低导致其微晶沿着裂隙处分布而呈现出的团雾状分布特征。

在紫色“山仔濑石”内的微孔隙当中存在一定量分散分布的赤铁矿颗粒(图5m),在微孔隙附近聚集性分布。而赤铁矿在陆相火成岩型矿床中一般形成于含水硅酸盐矿物叠加作用阶段或者硅化-泥化-碳酸盐化阶段,其形成时的温度范围是 $50 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 。在含水硅酸盐矿物叠加作用阶段主要表现为早期蚀变岩的叠加蚀变作用,在早阶段形成含水硅酸盐矿物(如伊利石)的过程当中伴随较强的赤铁矿化,表现为在裂隙处或者孔隙处分布,在硅化-泥化-碳酸盐化阶段会普遍发生硅化、伊利石化等,在蚀变强烈时几乎无法辨别其原岩成分,赤铁矿一般呈现胶状结构,常与硅化、伊利石化等共生或伴生在一起,形成复杂的蚀变带。因此根据紫色“山仔濑石”内部的赤铁矿的分布特征和结构特征来看,其可能形成于含水硅酸盐矿物叠加作用阶段或者硅化-泥化-碳酸盐化阶段(江满容, 2014)。

综上,通过次要矿物的形成环境判断形成紫色“山仔濑石”的热液为还原的酸性热液,不同种类的次要矿物在紫色山仔濑石中交代充填,不同种类次要矿物的不同形成温度、结构特征以及分布特征也指示了其热液的多次侵入。在紫色“山仔濑石”中的独居石为伊利石形成的前一期热液蚀变产物,赤铁矿可能形成于早期伊利石蚀变岩的叠加蚀变阶段或者硅化-泥化-碳酸盐化阶段,重晶石属于与伊利石

同一期的蚀变产物,而磷钡铝石可能是与伊利石蚀变成矿同一期热液蚀变产物或者是前一期蚀变产物(图9)。通过前人的研究和主要矿物、次要矿物的形成条件以及其赋存方式,判断山仔濑地区紫色“山仔濑石”的形成是由前期火山作用所提供的火山碎屑岩(流纹质晶屑凝灰岩等),经过后期多次热液的侵入、充填和交代,最终形成紫色“山仔濑石”中的主要矿物伊利石和不同种类的次要矿物,所以此地区矿区的形成过程与寿山地区成矿的形成规律具有一致性。

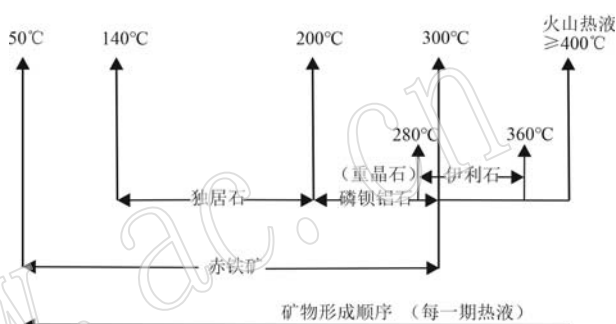


图9 紫色“山仔濑石”中主要矿物、次要矿物的形成温度汇总图

Fig. 9 Summary of formation temperature of major and minor minerals in purple “Shanzilai stone”

5 结论

(1) 紫色“山仔濑石”的主要组成矿物为伊利石,次要矿物为独居石、磷钡铝石、赤铁矿和重晶石。其中白色团絮状矿物为重晶石,浅黄色点状物为磷钡铝石,深褐色点状物为赤铁矿,内部还存在一定量的微孔隙。

(2) 紫色“山仔濑石”的致色离子主要为 Mn^{3+} 。Fe 含量在各个样品中的差别不大, Mn 含量越高 Mn^{3+} 在八面体上配位的数量越多,其紫色色调就越深。

(3) 山仔濑地区可见前期火山作用形成的火山碎屑岩,而在热液蚀变过程中热液为还原的酸性热液,且紫色“山仔濑石”内主要矿物伊利石和次要矿物的种类、分布方式和形成温度的不同,说明在紫色“山仔濑石”形成过程中呈现出热液的多次侵入,所以紫色“山仔濑石”的成矿机制与寿山地区矿床的成矿规律具有一致性。

References

- Chen Henian, Wu Quanhui, He Jurui, *et al.* 1986. Study on the metallogenic characteristics of secondary quartzite bearing type non-metallic deposit series[J]. *Journal of Chinese Academy of Geological Sciences*, (3): 115~123(in Chinese with English abstract).
- Chen Tao. 2012. Study on Microstructure Characteristics of Illite[M]. Beijing: Science Press, 37~38(in Chinese with English abstract).
- Defaria D and Lopes F. 2007. Heated goethite and natural hematite: Can Raman spectroscopy be used to differentiate them? [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 45(2): 117~121.
- Ehya F and Mazraei S. 2017. Hydrothermal barite mineralization at Chenarvardeh Deposit, Markazi Province, Iran: Evidences from REE geochemistry and fluid inclusions[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 134: 299~307.
- Fang Zonggui. 2016. Shoushan Stone Book[M]. Beijing: Xinxing Publishing House, 47~48(in Chinese with English abstract).
- Greiffo W, Herrmann K, Müller G, *et al.* 1984. Sr-gorceixite, a weathering product in rich iron ores from the Córrego Do Feijão Mine, Minas Gerais, Brazil[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 87(4): 418~419.
- Han Wen, Hong Hanlie, Chen Tao, *et al.* 2012. Mineralogical characteristics of “Yueweizi” from Shoushan County, Fujian Province[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 14(2): 8~12(in Chinese with English abstract).
- Huang Congjun. 2019. Geology and Geochemistry Study on the Lala IOCG Deposit, Southwestern Margin of Yangtze Block[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Jiang Aigeng and Tang Deping. 1997. Features of the illite deposit in Xili Lianjiang, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 16(3): 132~137(in Chinese with English abstract).
- Jiang Manrong. 2014. Ore Fabric Characteristics and Its Genetic Significance of Continental Volcanic Type Iron Ore Deposits[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhangdong, Zhu Jinchu, Ji Junfeng, *et al.* 2000. Contrast between two illites of different origins and the distinctive significance of illitic alteration zones at Dexing porphyry copper ore field[J]. *Geological Journal of Chinese Universities*, 6(1): 72~79(in Chinese with English abstract).
- Li Yujuan, Chen Runsheng, Yang Zhong, *et al.* 2021. Discussion on several problems of metallogenic geological condition and genesis of Shoushan Stone[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 23(1): 1~11(in Chinese with English abstract).
- Li Zhiping and Pi Qiaohui. 2021. Geochemical characteristics and geological significance of hydrothermal monazite in Laozhaiwan gold deposit [J]. *Shandong Land and Resources*, 37(5): 17~25(in Chinese with English abstract).
- LiuYungui. 2013. Study on Gemmology and Mineralogy of Tianhuang Stone[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- McDonough W and Sun S. 1995. The composition of the earth [J]. *Chemical Geology*, 120(3): 223~253.
- Migaszewski Z, Starnawska E and Galuszka A. 2007. Gorceixite from the Upper Cambrian rocks of the Podwisniówka mine pit, Holy Cross Mountains (south-central Poland) [J]. *Mineralogia*, 38(2): 171.
- Qi Dongmei, Zhou Hanwen, Gong Yongjun, *et al.* 2015. Element mobility during the fluid-rock hydrothermal alteration: Evidence from altered porphyritic granite in IV pipe of the Qiyugou gold deposit, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2 655~2 673(in Chinese with English abstract).
- Qiang Shanfeng, Bi Shijian, Deng Xiaodong, *et al.* 2013. Monazite U-Th-Pb ages of the Qinnan gold deposit, Xiaoqinling district: Implications for regional metallogenesis and tectonic setting[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 38(1): 43~56(in Chinese with English abstract).
- Rehman H, Martens G, Tsai Y, *et al.* 2020. An X-ray absorption near-edge structure (xanes) study on the oxidation state of chromophores in natural kunzite samples from Nuristan, Afghanistan[J]. *Minerals*, 10(5): 463.
- Sun S and McDonough W. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tang Deping, Yao Chunmao and Xie Xiaojian. 2005. Gemmology of some new varieties of Shoushan Stone[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 7(4): 1~6.
- Walter A-V, Nahon D, Flicoteaux R, *et al.* 1995. Behaviour of major and trace elements and fractionation of REE under tropical weathering of a typical apatite-rich carbonatite from Brazil[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 136(3): 591~602.
- Wang Liankui, Cao Junchen, Yang Bolin, *et al.* 1977. A geochemical

- model of alteration in the surrounding rock of medium and low temperature hydrothermal near ore (A case study of a mining area)[J]. *Geochimica*, (1): 25~46, 85~86 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yajun, Yuan Xinqiang and Fu Hanqin. 2014. Mineralogical characteristics of gem-quality lepidolite rock in Xinjiang[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 16(4): 22~28 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ruidong, Wei Huairui, Bao Miao, *et al.* 2008. Discovery of hydrothermal venting community at the base of Cambrian barite in Guizhou Province, Western China: Implication for the Cambrian biological explosion[J]. *Progress in Natural Science*, 18(1): 65~70.
- Zhan Yukun. 2021. Analysis of the geological characteristics and mining mode of Shoushan Rock mineral resources in Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 40(2): 98~109 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hucai. 1997. *Geochemical Characteristics and Theoretical basis of Elemental supergenesis* [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 127~136 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wentao. 2013. Gemological characteristics of Lilac purple jade [J]. *Science & Technology Information*, (21): 67, 72 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jinyu. 2021. Variety Identification of Excavated Field Stones in Shoushan[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Zheng Zongtan. 2006. *Identification of Shoushan Stone Species* [M]. Fuzhou: Haifeng Press (in Chinese with English abstract).
- 黄从俊. 2019. 扬子地块西南缘拉拉 IOCG 矿床地质地球化学研究 [D]. 成都: 成都理工大学.
- 江爱耕, 汤德平. 1997. 福建连江溪利伊利石矿床地质特征[J]. *福建地质*, 16(3): 132~137.
- 江满容. 2014. 陆相火山岩型铁矿床矿石组构学特征及其成因意义 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 金章东, 朱金初, 季峻峰, 等. 2000. 德兴斑岩铜矿田两类伊利石的存在及其在蚀变分带中的意义[J]. *高校地质学报*, 6(1): 72~79.
- 李玉娟, 陈润生, 杨 仲, 等. 2021. 寿山石成矿地质条件及成因研究的若干问题讨论[J]. *宝石和宝石学杂志*, 23(1): 1~11.
- 李治平, 皮桥辉. 2021. 老寨湾金矿热液独居石地球化学特征及地质意义[J]. *山东国土资源*, 37(5): 17~25.
- 刘云贵. 2013. 田黄的宝石学和矿物学研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 祁冬梅, 周汉文, 宫勇军, 等. 2015. 岩石热液蚀变作用过程元素的活动性——河南祁雨沟金矿Ⅳ号岩体蚀变花岗岩斑岩的研究[J]. *岩石学报*, 31(9): 2 655~2 673.
- 强山峰, 毕诗健, 邓晓东, 等. 2013. 豫西小秦岭地区秦南金矿床热液独居石 U-Th-Pb 定年及其地质意义[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 38(1): 43~56.
- 汤德平, 姚春茂, 解小建. 2005. 一些寿山石新品种的宝石学研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 7(4): 1~6.
- 王联魁, 曹俊臣, 杨柏林, 等. 1977. 中低温热液近矿围岩蚀变的地球化学模型(以某矿区为例)[J]. *地球化学*, (1): 25~46, 85~86.
- 王亚军, 袁心强, 付汗青. 2014. 新疆宝石级锂云母岩的矿物学特征研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 16(4): 22~28.
- 詹玉坤. 2021. 福建寿山石矿产地质特征及成矿模式分析[J]. *福建地质*, 40(2): 98~109.
- 张虎才. 1997. 元素表生地球化学特征及理论基础[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 127~136.
- 张文毅. 2013. 丁香紫玉的宝石学特征[J]. *科技信息*, (21): 67, 72.
- 郑金宇. 2021. 寿山掘性田石的品种鉴定[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 郑宗坦. 2006. *寿山石种鉴真* [M]. 福州: 海风出版社.

附中文参考文献

- 陈鹤年, 巫全淮, 贺菊瑞, 等. 1986. 次生石英岩容矿型非金属矿床系列的矿种、组合及其成矿作用特征[J]. *中国地质科学院院报*, (3): 115~123.
- 陈 涛. 2012. 伊利石的微结构特征研究[M]. 北京: 科学出版社, 37~38.
- 方宗珪. 2016. 寿山石全书[M]. 北京: 新星出版社, 47~48.
- 韩 文, 洪汉烈, 陈 涛, 等. 2012. 福建寿山石“月尾紫”的矿物学特征研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 14(2): 8~12.