

· 宝玉石矿物学 ·

## 福建寿山善伯石及其“花生糕”的研究

杨茜涵<sup>1</sup>, 陈 涛<sup>1</sup>, 姚春茂<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学 珠宝学院, 湖北 武汉 430074; 2. 金玉满堂珠宝行, 福建 福州 350001)

**摘要:** 善伯石是具有悠久历史的寿山石品种之一, 质地脂润细腻, 善伯石中特征的“花生糕”对于其品种以及品质都具有重要意义。通过光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)配能谱仪(EDS)、显微激光拉曼光谱仪(LR)、红外光谱仪(IR)、电子探针(EPMA)的检测与分析研究了善伯石及影响善伯石“花生糕”的因素, 发现白色“花生糕”的内部聚集了大量细小杂质矿物锐钛矿, 而红色“花生糕”部分的杂质矿物主要为赤铁矿等含铁矿物, 其后期浸染形成红色斑块。同时, 善伯石中“花生糕”区域往往分布有石英, 个别含有叶蜡石; 当锐钛矿颗粒较大时, 其分散于善伯石基质中即构成了肉眼可见的砂金般反光点, 俗称“金沙”。

**关键词:** 寿山石; 善伯石; “花生糕”; 锐钛矿; 含铁矿物

中图分类号: P578. 964; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)03-0512-09

### A study of Shanbo Stone of Shoushan in Fujian Province and its “Peanut Cake”

YANG Xi-han<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup> and YAO Chun-mao<sup>2</sup>

(1. Gemological Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Gemstone Jewelry Company, Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** The Shanbo Stone has long been one of the varieties in larderite. Its exquisite texture and delicate feature make it popular, and the “Peanut Cake” has important significance for its identification and classification. In this paper, the authors investigated the Shanbo Stone and its “Peanut Cake” through detection and experimental analysis. The detection results by optical microscope and scanning electron microscope (SEM) with energy dispersive spectrometer (EDS), laser Raman spectroscopy (LR), Infrared spectrometer (IR) and electron microprobe analysis (EPMA) show that a large number of microcrystalline anatases are the main factors influencing the white “Peanut Cake”, and the main impurities in the red “Peanut Cake” are iron minerals, which form disseminated red patches later. Quartz is distributed in some white “Peanut Cake”, and pyrophyllite is also observed in part of white “Peanut Cake”. Besides, the complete crystal anatase dispersed in Shanbo stone constitutes a visible gold like reflective point.

**Key words:** larderite; Shanbo Stone; “Peanut Cake”; anatase; iron mineral

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China (41572033); Hubei Provincial Natural Science Foundation of China (2015CFB269); Gemological Institute of China University of Geosciences Science Foundation (CIGTXM-S201626, CIGTXM-201603)

收稿日期: 2017-09-07; 接受日期: 2018-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572033); 湖北省自然科学基金项目(2015CFB269); 中国地质大学(武汉)珠宝学院科研基金项目(CIGTXM-S201626, CIGTXM-201603)

作者简介: 杨茜涵(1993-), 女, 硕士研究生, 宝石学专业, E-mail: 445088891@qq.com; 通讯作者: 陈 涛(1979-), 女, 教授, 矿物学、宝石学专业, E-mail: summerjewelry@163.com.

中国的印章篆刻艺术源远流长,从千年前至今,异彩纷呈,经久不衰。其中寿山石作为四大印石之一,丽质天成,自清代始便为文人雅士所爱,其中上品更是作为贡品纳入宫中,为帝王之冕(叶少波,2012)。寿山石不单具有斑斓的秀色,还具有润、灵、莹、嫩、赋五大特点。自康熙七年(1668年)第一部寿山石文化专著《观石录》问世,相继有《后观石录》、《寿山石谱》、《寿山石小志》、《寿山石刻史话》等专著问世,记载了寿山石文化史的沧桑与辉煌(顾志平,2006)。

善伯石是福建寿山地区月尾山矿段产出的寿山石品种之一,属于山坑石的一个品类,按产出山系又归为高山系(汤德平等,2005;张蓓莉,2006;邹天人等,2010)。位于寿山村东南面的善伯山,与月尾峰相邻,与都成坑山隔溪相望。《寿山石小志》记载:善伯洞“所出之石,质结如尼姑楼、迷翠寮,盖亦杜陵坑之余脉也。色极多,红如桃花,黄如蜜蜡,灰如秋梨,白如水晶,赤如鸡冠,紫如茄皮,种种具备。内隐粉白块,似花生糕。红紫点似丹砂,间多金银砂,闪烁其光。其明翠温纯者,则直入杜陵坑之堂奥。其次者诸色相间,虽砂丁错之,皆新巧妙绝。”即指善伯石质地晶莹脂润,蜡性较强,颜色丰富,半透明或微透明,富有光泽,肌理中可有金沙,而善伯石内部独特的“花生糕”则是指善伯石中透明度较差的斑点或团块,可大可小,颜色各异,可为白色、红色、粉白色等,因形状像捣碎的花生米,故而形象称之为“花生糕”。“花生糕”的存在对善伯石具有鉴定性意义。

目前对于善伯石中“花生糕”的研究较少,此次通过对善伯石样品的检测与分析,研究了善伯石以及影响善伯石“花生糕”的因素。

## 1 样品与实验测试

### 1.1 善伯石样品

本次研究所用的5块善伯石样品均来自福建寿山村善伯矿区实地采集的标本(图1a)。样品具棱角清晰的块状构造,微透明,部分样品表面有白垩色的风化表皮,内部肉质均为近白色,抛光面具蜡状光泽到油脂光泽,样品在反射光下有肉眼可见的点状反光。样品编号SB-1~5,其中SB-2~5这4块样品磨成薄片(图1b~1e)。

样品SB-3、SB-4薄片边部及内部的白色不透明细小斑块、团块(图1c、1d)与样品SB-5薄片的红色斑块(图1e)即为“花生糕”。样品中还有白色不透明区域,在SB-2~5都有分布,位于基底矿物(杂质矿物之下普遍分布的矿物,为样品的主要组成矿物,一般为粘土矿物)之上。SB-2的白色不透明区域主要呈条带状、网状、浸染状分布(图1b),SB-3与SB-4的白色区域呈团块状、树枝状、浸染状、撕扯状、点状分布,几乎不透明,并且光泽也较弱,SB-5的白色区域位于红色“花生糕”周围(图1e)。样品SB-2和SB-5中还有橙红到暗红色的脉状区域。同时,样品中还有一些较透明的区域,如SB-3中团块状区域及样品SB-5中长条宽带状透明区域(图1e)。除以上提

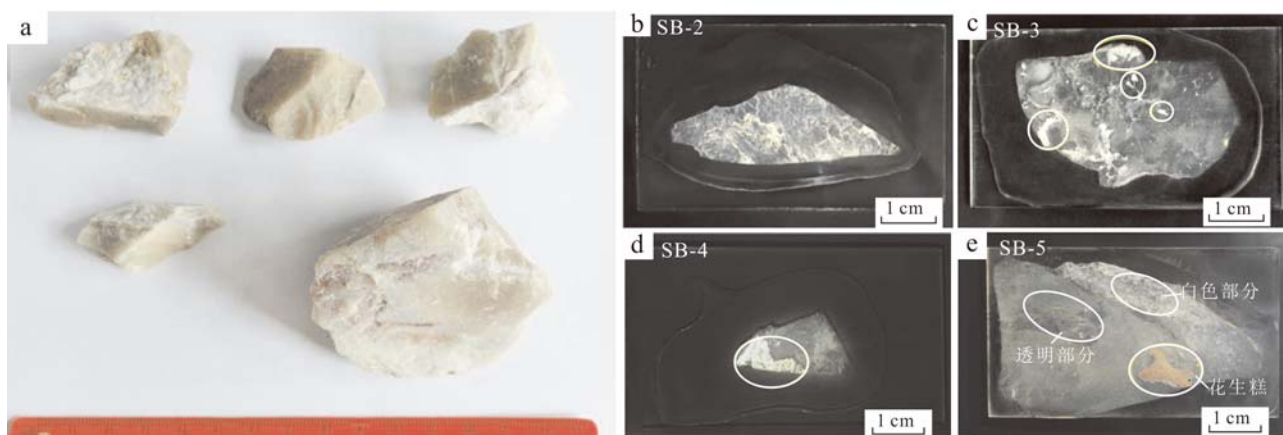


图1 善伯石样品及“花生糕”

Fig. 1 Shanbo Stone sample and its “Peanut Cake”

a—寿山善伯石样品; b~e—SB-2~SB-5 善伯石样品薄片: c—SB-3 样品上的“花生糕”分布; d—SB-4 样品上的“花生糕”; e—SB-5 样品的透明、白色及“花生糕”部分

a—Shanbo Stone sample; b~e—SB-2 to SB-5 of Shanbo Stone slices: c—the distribution of “Peanut Cake” on sample SB-3; d—“Peanut Cake” on sample SB-4; e—transparent, white part and “Peanut Cake” on sample SB-5

及的白色、红色以及透明区域以外的区域均称为基质区域。

## 1.2 实验测试

光学显微镜观察与 SEM 测试均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行。光学显微镜观察使用 OLYMPUS BX53 偏反光显微镜。扫描电子显微镜分析采用配有能谱仪(EDS)的 Quanta200 型环境扫描电子显微镜。实验时将样品薄片喷碳后测试,测试电压为 20 kV,束斑大小为 5.0  $\mu\text{m}$ 。

激光拉曼光谱与红外吸收光谱测试均在中国地质大学(武汉)珠宝学院大型仪器实验室进行。拉曼光谱分析采用 Bruker Senterra 显微拉曼光谱仪,测试条件:激光波长 532 nm,激光功率 20 mW,积分时间 20 s,扫描次数 3 次,扫描范围 45 ~ 4 500  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率 3 ~ 5  $\text{cm}^{-1}$ ,测试温度 20 $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 42%。红外吸收光谱(IR)测试使用 Nicolet6700 型傅里叶变换红外光谱仪,采用 KBr 压片法,分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数 12 次,扫描范围为 400 ~ 4 000  $\text{cm}^{-1}$ 。

电子探针成分分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用配备有 4 道波谱仪的 JEOL JXA-8100 电子探针完成。测试之前镀膜约 20 nm 的碳膜。测试条件:加速电压 15 kV,加速电流 20 nA,束斑直径 10  $\mu\text{m}$ 。所有测试数据均进行

ZAF 校正处理。各元素特征峰的测量时间为 10 ~ 20 s,上下背景的测量时间是峰测量时间的一半。使用的标样为:透长石(K)、镁铝榴石(Fe、Al)、透辉石(Ca、Mg)、硬玉(Na)、蔷薇辉石(Mn)、橄榄石(Si)、磷灰石(P)和金红石(Ti)。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 显微观察分析

正交偏光下,样品基质部分为显微隐晶结构,矿物集合体颗粒边界不清晰,难以分辨单矿物形态。其中部分显微晶质集合体由具有共同消光位的片状矿物叠置而成,集合体直径约 100 ~ 250  $\mu\text{m}$ (图 2a)。样品较透明区域对应的矿物集合体与基质区域的集合体大小明显不同,如样品 SB-5,其透明区域的矿物集合体小,一般直径小于 50  $\mu\text{m}$ (图 2b)。

样品中不透明的浸染状、撕扯状或斑点状的白色区域,包括白色“花生糕”区域,在单偏光与正交偏光下分别呈黄褐色和黑色(图 2d、2e),透射光下显示其由黑色点状物质聚集在基底矿物中形成(图 2f),在反射光下观察样品白色区域,呈明显的白色且亮度远远高于周围区域,显雾状亮感(图 2c、图 3a),为一些具金属光泽、直径约为 3 ~ 10  $\mu\text{m}$  的白色矿物散布于基底矿物中形成。所有样品的基质部分

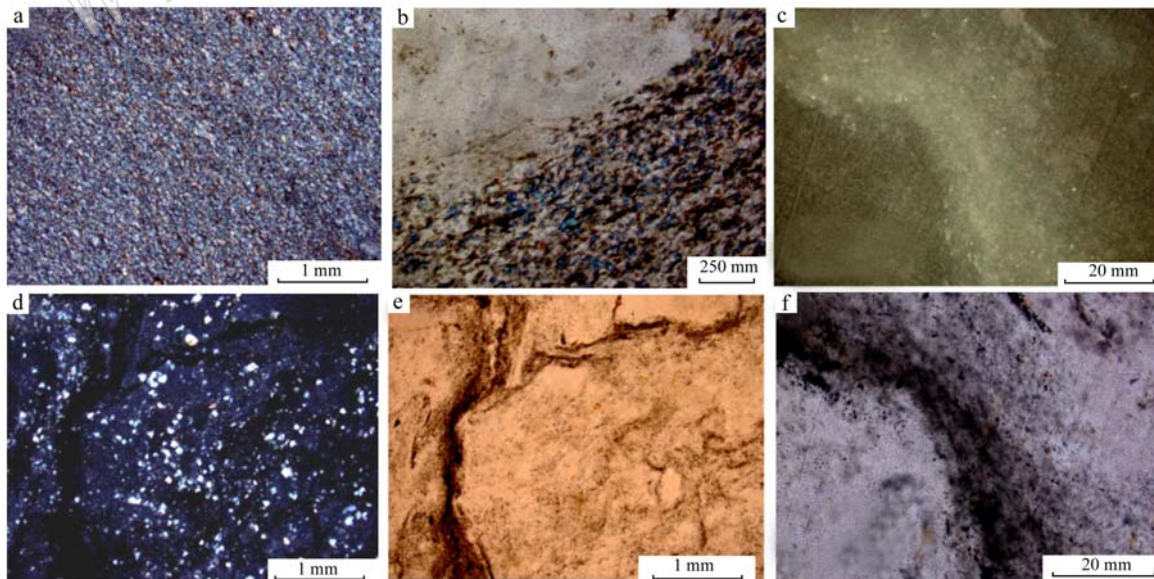


图 2 善伯石中基质、透明部分及白色部分的显微图

Fig. 2 Microscope images of matrix, transparent and white part in Shanbo Stone samples

a—基质部分,正交偏光; b—基质部分与透明部分,正交偏光; c—白色部分,反射光; d—白色部分,正交偏光; e—白色部分,单偏光; f—白色部分,透射光  
a—matrix part, crossed nicols; b—matrix and transparent part, crossed nicols; c—white part, reflecting light; d—white part, crossed nicols; e—white part, plainlight; f—white part, transmitted light

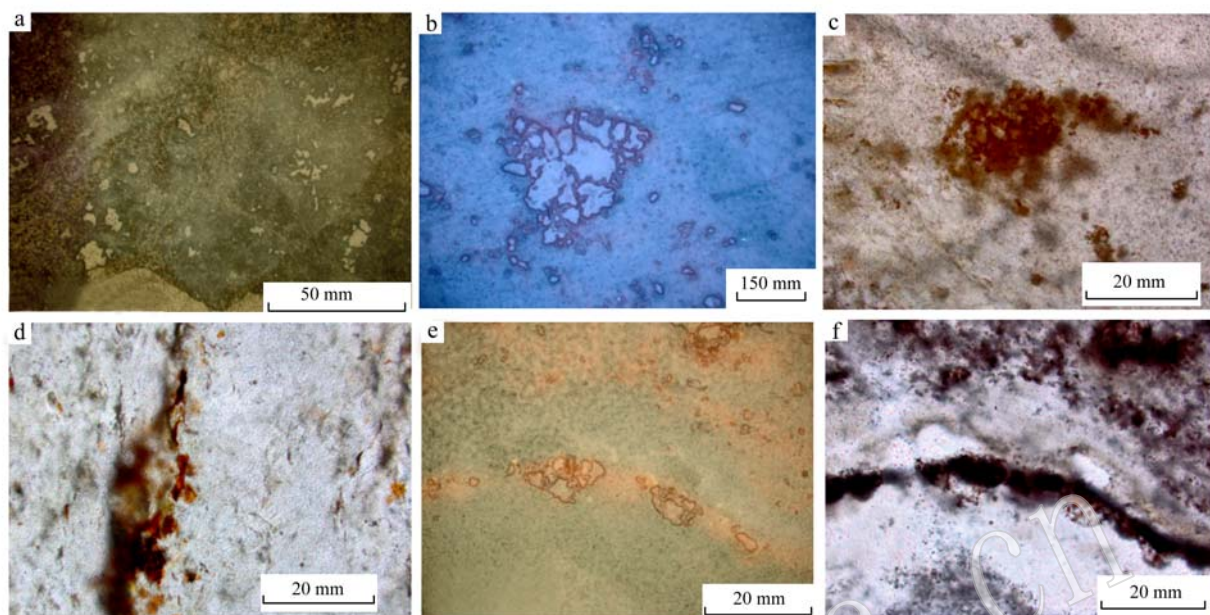


图3 善伯石中白色与红色“花生糕”及红色脉状部分的显微图

Fig. 3 Microscope images of red and white “Peanut Cake”, red veined part in Shanbo Stone samples  
 a—白色“花生糕”，反射光；b—表面凸出的透明矿物，反射光；c—红色部分，透射与反射光；d—红色脉状部分，透射光；e—红色“花生糕”部分，反射光；f—红色“花生糕”部分，透射光  
 a—white “Peanut Cake”，reflecting light；b—transparent mineral protruding from the surface, reflecting light；c—red part, transmitted and reflecting light；d—red vein, transmitted light；e—red “Peanut Cake”，reflecting light；f—red “Peanut Cake”，transmitted light

均可见这种金属光泽的矿物，颗粒较大时粒径可达15~20 μm，是样品呈现砂金般反光的原因。

样品薄片反射光下可见表面有凸起的矿物颗粒(图3a、3b)，形态破碎，大小不均，光泽比基底矿物略强，透射光下呈无色透明，推测该矿物的硬度高于寿山石，因此抛磨时凸出表面。因高岭石常与石英相伴生(董晋琨, 2008)，笔者初步推断该矿物为石英。

样品中红色区域由结晶形态不规则的红色杂质矿物组成。这些杂质矿物在单偏光和正交偏光下均为深褐色，呈浸染状或斑点状分布于基底中或白色透明矿物颗粒周围(图3c)，聚集成红色脉状或斑块状，出露到样品表面则往往只表现为极细的脉状(图3d)。反射光下可见表面出露的无色矿物颗粒位于红脉之上，透射光下可见红脉由红色的浸染状杂质矿物造成(图3e、3f)。推测红色“花生糕”的致色原因亦是这些杂质矿物。

## 2.2 扫描电子显微镜及能谱仪分析

样品SB-2基质与白色区域的背散射电子像(图4)及能谱测试分析表明，基质部分与白色区域的主要组成均为高岭石族矿物(表1)。同时，所有样品不同区域的背散射电子像衬度基本一致，主要成分为高岭石族矿物，不同区域所含杂质矿物有所不同。

样品SB-3的白色区域，背散射电子像下有20~40 μm的竹叶状矿物，随机分布于基底矿物之中(图5)。能谱测试显示，其Al:Si的比值小，约为1:2，与叶蜡石 $Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2$ 的Al:Si值相符(表1)，但这一现象仅在SB-3样品中存在，其他样品中暂未发现叶蜡石的成分。

SEM的背散射电子像衬度图中，所有样品的白色区域普遍有大量斑杂的细小点状杂质分布，呈浸染状、聚集状或散点状，与样品中不透明白色部分的分布位置对应(图6a)。能谱分析其成分为 $TiO_2$ ，其集合体大小为5~20 μm(图6b)，可能为白色区域及“花生糕”呈现白色的原因。

透明矿物在扫描电镜下表现为凸出的碎屑状集合体，约20~300 μm，大小不等，偶尔可见较大的颗粒，其形态与光学显微镜的反射光下看到的凸出表面的颗粒相同。能谱分析显示其成分只含Si、O两种元素，且比例为1:2，化学式为 $SiO_2$ (图6c、6d)。

样品SB-5及SB-2中红色脉状物质在SEM镜下表现为极细的脉状，与光学显微镜下看到的红色物质出露到样品表面形成的细线一致。能谱测试结果显示，除去高岭石族矿物的成分，其主要元素为铁(图7a)。结合光学显微镜下观察的结果，推测应为

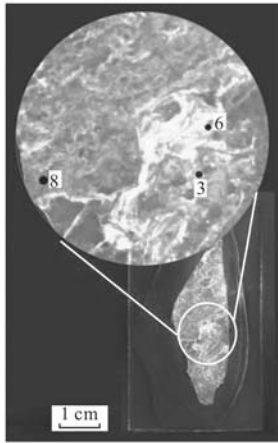


图4 样品 SB-2 不同部分的 EDS 测试点位  
Fig. 4 Test point of EDS in sample SB-2

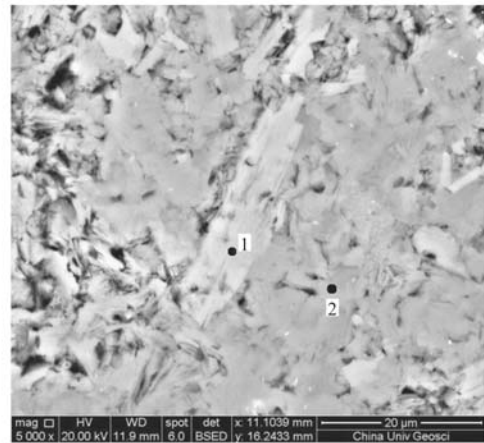


图5 样品 SB-3 中竹叶状矿物与基质 EDS 测试点位  
Fig. 5 Test point of EDS in sample SB-3

表1 扫描电镜能谱仪成分测试结果  $w_B/\%$   
Table 1 EDS analyses of samples

|        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | 理想化学式   |
|--------|--------------------------------|------------------|---|
| SB-2.3 | 43.96                          | 56.04            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2 SiO <sub>2</sub> |
| SB-2.6 | 43.97                          | 56.03            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2 SiO <sub>2</sub> |
| SB-2.8 | 44.07                          | 55.93            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2 SiO <sub>2</sub> |
| SB-3.1 | 29.76                          | 70.24            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 4 SiO <sub>2</sub> |
| SB-3.2 | 44.30                          | 55.70            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2 SiO <sub>2</sub> |

铁的氧化物呈脉状浸染进入寿山石基底矿物中。

在样品 SB-5 的成分衬度像下,善伯石透明区域可见成分衬度不同的微小矿物。能谱分析其含 Al、Si、P、S、Fe、Sr、O 多种元素(图 7b)。由于矿物较小,可能混入了基底的 Al、Si 等元素,但根据其他元素以及之前学者的研究,推断其可能为硫磷铝锶石 SrAl<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>(刘云贵等, 2013)。

### 2.3 显微拉曼光谱测试分析

前人研究表明,善伯石的主要组成为高岭石-地开石的过渡物质(汤德平等, 1999; 汤颖莹等, 2008; 刘卫东等, 2009)。样品在 45 ~ 1 450 cm<sup>-1</sup> 范围内出现 241、270、336、433、461、747、793、914 cm<sup>-1</sup> 的拉曼光谱谱峰(图 8a), 3 500 ~ 3 800 cm<sup>-1</sup> 范围内有 3 个谱峰为特征峰(Balan *et al.*, 2005)。高岭石族矿物结构中有 4 种类型的不等效 OH, 分别为内羟基 OH<sub>1</sub>、内表面羟基 OH<sub>2</sub>、OH<sub>3</sub> 和 OH<sub>4</sub>。3 个阶梯状谱峰由这些羟基的伸缩振动引起。其中高岭石的 3 625、3 695 cm<sup>-1</sup> 处谱峰的强度较大, 3 652 cm<sup>-1</sup> 处的谱峰强度则相对较弱, 呈“山”字形; 而地开石, 3 625、3 652、3 695 cm<sup>-1</sup> 左右的谱峰强度从低频至高

频依次减弱, 呈阶梯状(Balan *et al.*, 2005)。样品中不同位置的拉曼图谱显示, 基质部分主要为地开石及地开石-高岭石过渡矿物, 而透明区域为地开石-高岭石过渡矿物和少量高岭石; 在样品白色“花生糕”部分, 基底矿物为高岭石与地开石(图 8b)。

样品表面出露的金属光泽矿物上测出 146、398、519、641 cm<sup>-1</sup> 处的拉曼谱峰(图 9a), 通过与拉曼光谱数据库比对, 确认该矿物为锐钛矿, 与 SEM 能谱测得的 TiO<sub>2</sub> 对应。对样品颗粒细小的白色区域进行测试, 会出现锐钛矿与地开石的混合谱。锐钛矿与金红石为同质异像, 其形成温度为 300℃ 左右(塔娜等, 2013), 为低温产物, 可转变为金红石(王森等, 2017)。锐钛矿作为善伯石中的杂质矿物出现, 指示了善伯石形成的低温条件。

样品“花生糕”区域表面凸出的透明矿物的拉曼测试显示 129、205、465 cm<sup>-1</sup> 处几个谱峰(图 9b), 以 465 cm<sup>-1</sup> 处的谱峰为特征峰, 符合石英的标准拉曼谱峰, 与能谱的成分测试一致。

样品红色“花生糕”区域中呈浸染状分布于基底中的红色矿物的拉曼测试可见 1 320 cm<sup>-1</sup> 谱峰(图 10), 与赤铁矿的标准拉曼谱峰相符。结合 SEM 的成分衬度像, 其出露面较小, 激光束斑范围内赤铁矿与石英以及基底矿物同时存在, 因此显示高岭石族矿物、石英与赤铁矿的混合图谱。

### 2.4 红外光谱分析

高岭石族矿物有多种多型, 其中地开石与高岭石具有相同的化学成分, 但由于空间群不相同, 因而被认为是不同的多型结构。地开石与高岭石的红外光谱在指纹区(1 200 ~ 1 400 cm<sup>-1</sup>) 差异微小, 无法

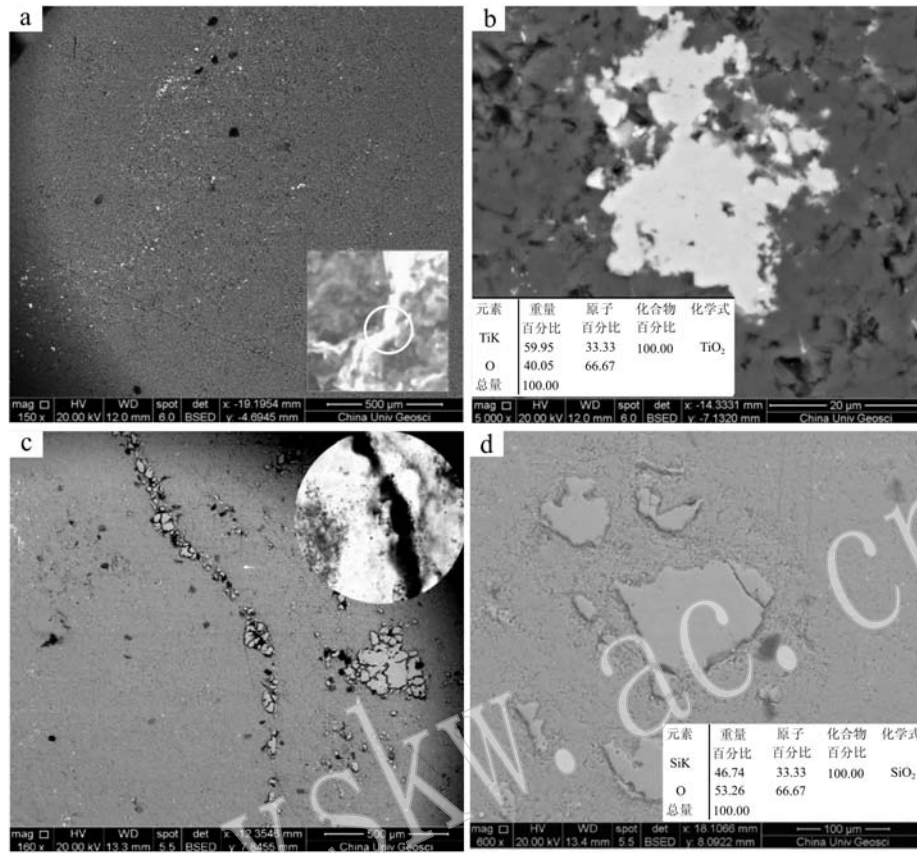


图 6 善伯石中“花生糕”及透明矿物颗粒的背散射电子像衬度图与 EDS 测试结果

Fig. 6 SEM and EDS result of “Peanut Cake” and transparent mineral in the sample

a—白色部分对应的 SEM 像；b—白色部分中矿物的 SEM 像及 EDS 测试结果；c—红色“花生糕”对应的 SEM 像；d—凸出表面的透明矿物颗粒及 EDS 测试结果  
a—SEM image of the white part；b—EDS test results and SEM image of minerals in the white part；c—SEM image of red “Peanut Cake”；d—EDS test results and SEM image of transparent minerals protruding from the surface

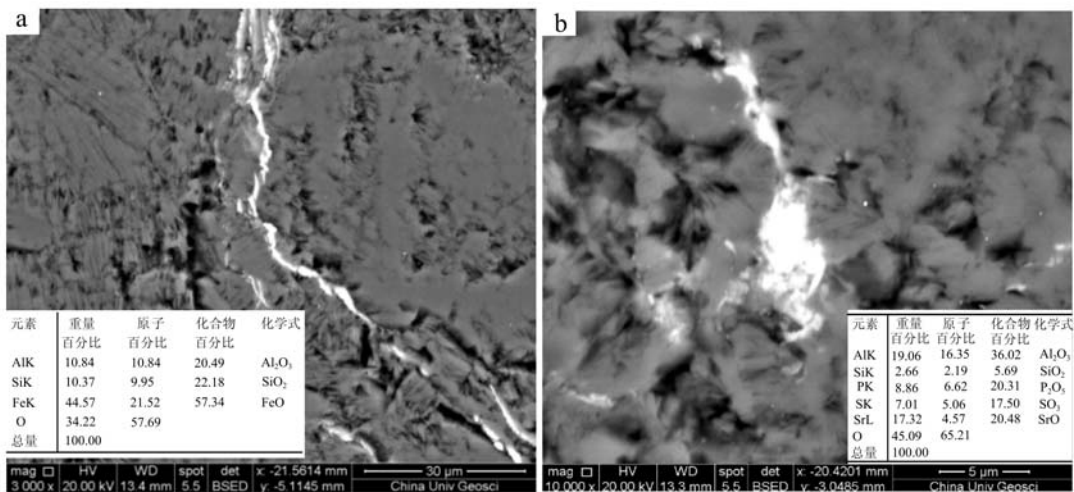


图 7 善伯石中红色部分(a)和杂质矿物(b)的 BSE 像衬度图与 EDS 结果

Fig. 7 SEM and EDS result of red part(a) and red impurities(b) in the sample

作为区分的依据，二者区分主要通过官能团区 OH 的振动吸收峰的解析。高岭石族矿物晶体结构中均

有 4 种类型的不等效 OH。一般认为，3 620 cm<sup>-1</sup>附近的吸收为内羟基 OH<sub>1</sub> 引起，3 650 cm<sup>-1</sup>附近的吸

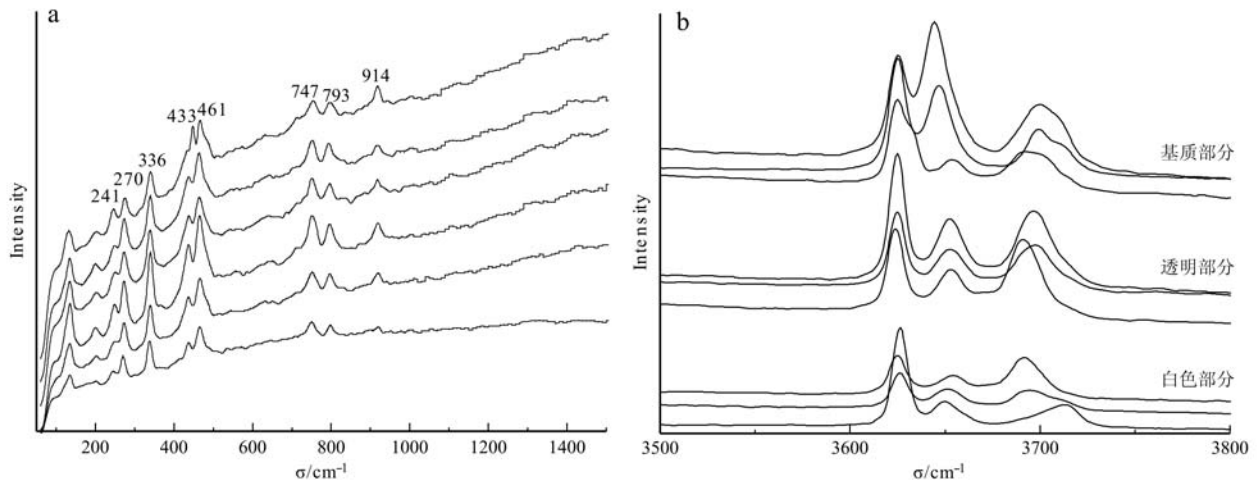


图8 善伯石基质、白色及透明部分的拉曼光谱

Fig. 8 Raman spectra of matrix, white and transparent part in Shanbo Stone samples

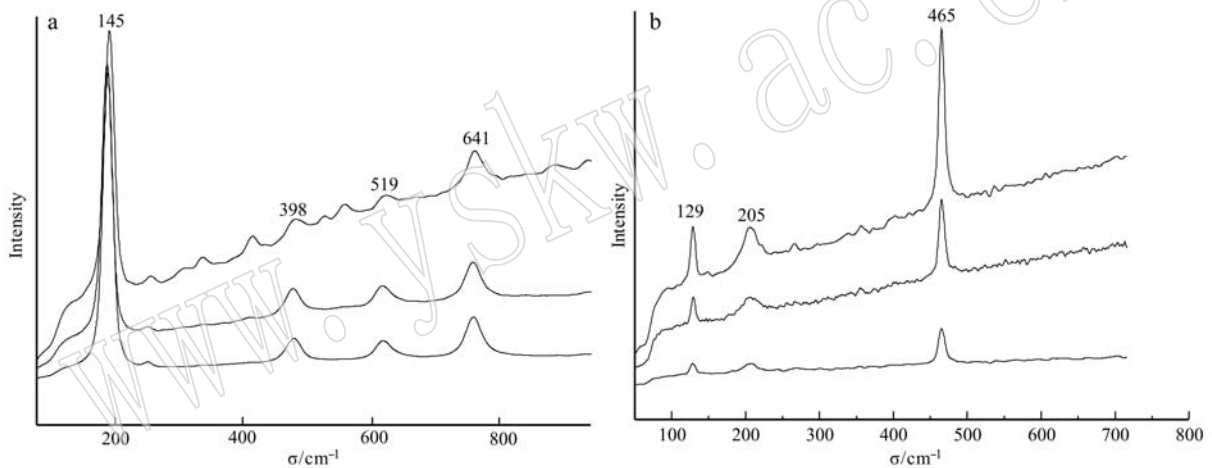


图9 善伯石中金属矿物(a)和透明矿物颗粒(b)的拉曼光谱

Fig. 9 Raman spectra of metallic minerals (a) and transparent minerals (b) in samples

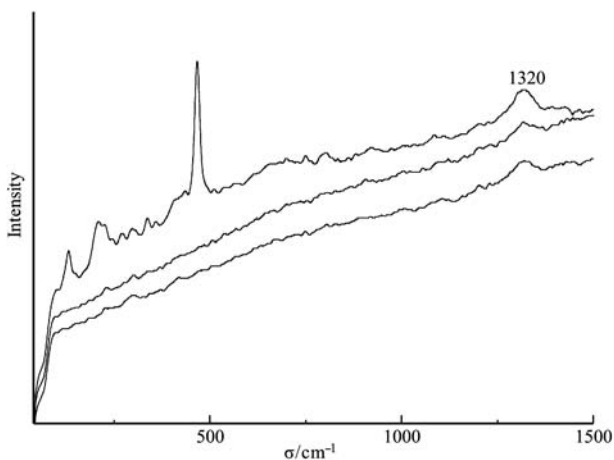


图10 善伯石中红色部分的拉曼光谱

Fig. 10 Raman spectra of red part in samples

收属于内表面羟基  $\text{OH}_2$  与  $\text{OH}_4$  的同相伸缩振动,  $3700\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收由内表面羟基  $\text{OH}_3$  引起(张有瑜, 1990)。

善伯石的基质与透明部分在官能团区的红外光谱图(图11)显示, 样品都具有  $3621\text{ cm}^{-1}$ 、 $3653\text{ cm}^{-1}$  和  $3694\text{ cm}^{-1}$  吸收峰, 可见其基质与透明部分高频区3个峰的峰强与峰位置并未出现一定的分化, 其矿物类型与有序度没有较大变化, 因此二者在成分上具有一致性, 且基本符合高岭石族矿物的吸收谱峰位置及相对强度分布特征(Wilson, 1987)。

## 2.5 电子探针测试分析

电子探针分析结果(表2)显示, 样品中基底矿物部分的  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  值介于  $1.22 \sim 1.29$  之间, 接近高岭石的  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  的  $1.18$ , 表明其均为高岭石族

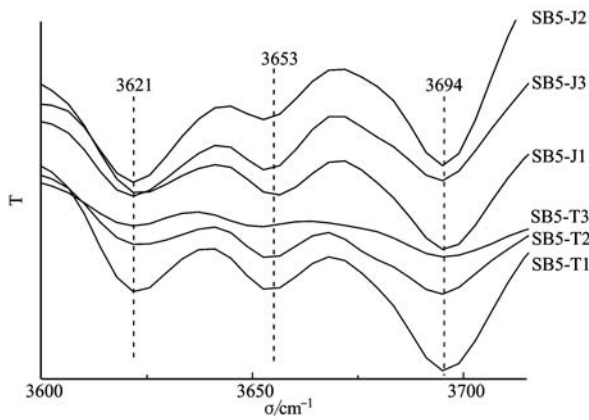


图 11 善伯石不同位置的红外光谱

Fig. 11 Infrared spectra of different parts in samples

T—透明部分；J—基质部分

T—transparent part；J—matrix part

矿物，其平均晶体结构化学式为  $(K_{0.01}Fe_{0.09}Al_{3.85})_{3.95}[Si_{4.07}O_{9.90}](OH)_{8.10}$ ，接近高岭石族矿物的理论化学式  $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$  (赵珊茸, 2011)。同一样品的不同区域，包括白色“花生糕”部分和基质部分，主要元素成分相同，且 Fe、Ti、Mn 等其他元素也没有明显的分布规律。

样品中叶蜡石的  $SiO_2/Al_2O_3$  值为 2.36 ~ 2.50，与叶蜡石理论化学式中  $Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2$  的  $SiO_2/Al_2O_3$  值 2.35 相近。而样品 SB-2 与 SB-3 中白色斑杂矿物与 SB-5 中具有金属光泽的矿物的成分与锐钛矿的成分符合；红色浸染部分的成分数据中除一定量的  $SiO_2$  与  $Al_2O_3$  在测试中进入探针测试区域，其他成分主要为 Fe 元素。这些次要或杂质矿物的成分测试均与拉曼光谱确定的矿物一致。

表 2 善伯石中白色部分与基质部分的电子探针测试结果

Table 2 EPMA analyses of matrix and white part in Shanbo Stone samples

$w_B/\%$

| 测试点                            | SB3-B-2 | SB4-B12-1 | SB5-B9-1 | SB3-T6-1 | SB4-T-2 | SB5-T7-1 | SB3-P-1 | SB3-P-2 | SB2-A-2 | SB3-A-1 | SB5-A-1 | SB5-H-1 |
|--------------------------------|---------|-----------|----------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| SiO <sub>2</sub>               | 48.02   | 47.81     | 50.04    | 50.33    | 47.46   | 49.36    | 70.49   | 68.34   | 6.11    | 0.15    | 0.21    | 14.24   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.01    | -         | 0.01     | -        | -       | -        | 0.01    | 0.00    | 86.72   | 97.64   | 98.09   | 0.04    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 38.92   | 39.06     | 38.94    | 39.61    | 38.13   | 38.71    | 28.12   | 28.98   | 5.40    | 0.14    | 0.15    | 10.92   |
| TFeO                           | 0.08    | 0.17      | 0.09     | 0.13     | 0.13    | 0.05     | 0.09    | 0.10    | 0.46    | 0.43    | 0.80    | 65.64   |
| MnO                            | 0.01    | -         | -        | 0.00     | -       | 0.01     | 0.01    | 0.03    | 0.01    | 0.01    | 0.03    | -       |
| MgO                            | -       | 0.00      | 0.00     | -        | 0.00    | 0.02     | 0.00    | 0.01    | -       | 0.01    | 0.01    | 0       |
| CaO                            | 0.01    | 0.01      | 0.02     | 0.00     | 0.00    | 0.01     | 0.04    | 0.01    | 0.01    | -       | 0.01    | -       |
| Na <sub>2</sub> O              | -       | 0.05      | 0.01     | 0.03     | 0.06    | 0.03     | 0.11    | 0.06    | -       | 0.01    | -       | 0.06    |
| K <sub>2</sub> O               | 0.03    | 0.06      | 0.01     | 0.01     | 0.05    | 0.01     | 0.03    | 0.04    | 0.01    | 0.01    | 0.00    | -       |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.04    | 0.03      | 0.02     | 0.02     | 0.03    | -        | 0.03    | 0.01    | 0.02    | -       | -       | -       |
| Total                          | 87.12   | 87.19     | 89.14    | 90.13    | 85.86   | 88.20    | 98.93   | 97.58   | 98.74   | 98.41   | 99.30   | 90.90   |
| 主要矿物名称                         | 高岭石     | 高岭石       | 高岭石      | 高岭石      | 高岭石     | 高岭石      | 叶蜡石     | 叶蜡石     | 锐钛矿     | 锐钛矿     | 锐钛矿     | 赤铁矿     |

B—样品的白色部分；J—样品的基质部分；T—样品的透明部分；P—叶蜡石为主要成分；A—锐钛矿为主要成分；H—赤铁矿为主要成分。

对于透明部分与基质部分，其化学成分和矿物组成一样。通过放大图像可以看到，在样品 SB-3 上两部分集合体形态有明显差异 (图 12)。透明区域的矿物集合体颗粒细小，呈现较均匀的质地，集合体颗粒之间的空隙也较小；而在基质部分则明显可见集合体颗粒较大，呈团状，相应地，集合体颗粒之间的空隙也较大。样品 SB-5 同样表现出这种差异，表明矿物集合体颗粒大小的不同会引起善伯石透明部分与基质部分的质地和透明度差异。

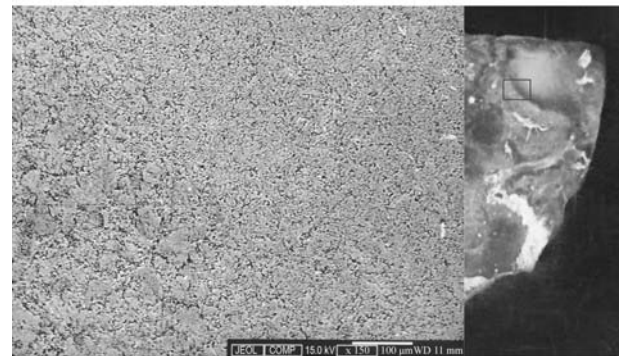


图 12 善伯石 SB-3 基质与透明部分的集合体颗粒像及对应样品位置

Fig. 12 Image of matrix and transparent part in SB-3 and its corresponding mineral aggregates

### 3 结论

善伯石白色“花生糕”主要为锐钛矿微晶聚集在高岭石基底中形成。大量锐钛矿杂质矿物呈极细小



的浸染状,分布于基底高岭石族矿物中,因而呈现善伯石中的斑点或团块状的白色“花生糕”以及其他形态的白色部分。善伯石中红色“花生糕”为赤铁矿等铁质氧化物聚集在基底矿物中形成。含铁矿物经后期浸染作用,围绕石英颗粒或高岭石族矿物颗粒呈现善伯石中团块状红色“花生糕”以及脉状红色部分。

同时,在某些善伯石的“花生糕”部分分布有石英及叶蜡石。当善伯石中锐钛矿颗粒结晶较大、发育较好时,形成肉眼下反光较强的细小闪光点,即俗称的“金沙”,其分布极为分散,散布于善伯石基底中;锐钛矿作为善伯石中的杂质矿物出现,指示了善伯石形成的低温条件。善伯石中较为透明部分相比基质部分,矿物集合体颗粒较小,集合体间间隙较小,是使其质地更为细腻透明的原因之一。

## References

- Balan E, Lazzeri M, Saitta A M, *et al.* 2005. First-principles study of OH-stretching modes in kaolinite, dickite, and nacrite[J]. *American Mineralogist*, 90(1): 50 ~ 60.
- Dong Jinkun. 2008. Mineralogical Study and Original Analysis of the Agalmatolite Deposits in Fujian, East China[D]. China University of Geosciences (Beijing), 18 ~ 43(in Chinese).
- Gu Zhiping. 2006. Appreciation of artistic conception sculpture in Shoushan Duling stone[J]. *Collection*, 6(12): 111(in Chinese).
- Liu Weidong, Jiang Guojian, Xu Jiayue, *et al.* 2009. A study of the composition and classification of Shoushan Stone by XRD method[J]. *Journal of Shanghai Institute of Technology(Natural Science)*, 9(3): 175 ~ 178(in Chinese).
- Liu Yungui and Chen Tao. 2012. Infrared and Raman spectra study on Tianhuang[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(8): 2 143 ~ 2 146(in Chinese).
- Liu Yungui, Chen Tao, Han Wen, *et al.* 2013. A study of color and Luobowen of Tianhuang stone[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(4): 549 ~ 556(in Chinese with English abstract).
- Ta Na, Shi Zhiming, Chen Dandan, *et al.* 2013. Various analyses of phase transformation from titania gel to anatase crystals[J]. *Journal of Gems and Gemology*, 42(11): 2 212 ~ 2 216(in Chinese).
- Tang Deping and Zheng Zongtan. 1999. The study of the mineral constitution and the gemology research for Shoushan Stone[J]. *Journal of Gems and Gemology*, 1(4): 28 ~ 36(in Chinese).
- Tang Deping, Yao Chunmao and Xie Xiaojian. 2005. Gemology of some new varieties of Shoushan Stone[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 7(4): 1 ~ 6(in Chinese).
- Tang Yingying and Tang Deping. 2008. Study on clarity of Shoushan Stone [J]. *Journal of Gems& Gemmology*, 10(1): 9 ~ 14(in Chinese).
- Wang Sen, He Guangwu, Li Kuo, *et al.* 2017. Mineral features and genesis of bauxite deposits in central and southern Shanxi Province[J]. *Coal Geology and Exploration*, 45(1): 20 ~ 25(in Chinese).
- Wilson M J. 1987. A Handbook of Determinative Methods in Clay Mineralogy[M]. Blackie, 275.
- Ye Shaobo. 2012. China Seal Stone “Jin Shi” Awards 2011[M]. Beijing: Geological Publishing House, 30 ~ 31(in Chinese).
- Zhang Beili. 2006. Systematic Gemmology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 465 ~ 470(in Chinese).
- Zhao Shanrong. 2011. Crystallography and Mineralogy[M]. Beijing: Higher Education Publishing House, 371 ~ 371(in Chinese).
- Zhao Xingyuan and Zhang Youyu. 1990. Analysis of Clay Minerals and Clay Minerals[M]. China Ocean Press, 209(in Chinese).
- Zou Tianren, Xu Haiming, Wang Jun, *et al.* 2010. A brief introduction to various types of Shoushan Stone[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(S1): 8 ~ 14(in Chinese).

## 附中文参考文献

- 董晋琨. 2008. 福建寿山石矿床的矿物学研究和成因分析[D]. 中国地质大学(北京), 18 ~ 43.
- 顾志平. 2006. 寿山杜陵石薄意雕赏析[J]. *收藏*, 6(12): 111.
- 刘卫东, 江国健, 徐家跃, 等. 2009. 寿山石矿物组成及其分类的 XRD 研究[J]. *上海应用技术学院学报(自然科学版)*, 9(3): 175 ~ 178.
- 刘云贵, 陈涛. 2012. 田黄的红外与拉曼光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 32(8): 2 143 ~ 2 146.
- 刘云贵, 陈涛, 韩文, 等. 2013. 田黄颜色及萝卜纹研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(4): 549 ~ 556.
- 塔娜, 史志铭, 陈丹丹, 等. 2013. 二氧化钛凝胶向锐钛矿转变的相变过程研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 42(11): 2 212 ~ 2 216.
- 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.
- 汤德平, 郑宗坦. 1999. 寿山石的矿物组成与宝石学研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 1(4): 28 ~ 36.
- 汤颖莹, 汤德平. 2008. 寿山石透明度的研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 10(1): 9 ~ 14.
- 王森, 何广武, 李阔, 等. 2017. 晋中南地区铝土矿矿物特征及其成因[J]. *煤田地质与勘探*, 45(1): 20 ~ 25.
- 叶少波. 2012. 中国印金石奖 2011 年[M]. 北京: 地质出版社, 30 ~ 31.
- 张蓓莉. 2006. 系统宝石学[M]. 北京: 地质出版社, 465 ~ 470.
- 赵珊茸. 2011. 结晶学及矿物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 371 ~ 372.
- 赵杏媛, 张有瑜. 1990. 粘土矿物与粘土矿物分析[M]. 海洋出版社, 209.
- 邹天人, 徐海明, 王军, 等. 2010. 寿山石的品种简介[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(S1): 8 ~ 14.