

## 蓝色蛇纹石玉的谱学特征

郑金宇<sup>1</sup>, 刘云贵<sup>2</sup>, 陈涛<sup>1\*</sup>, 陈倩<sup>1</sup>, 李梦阳<sup>1</sup>, 徐行<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(武汉)珠宝学院, 湖北 武汉 430074  
2. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031

**摘要** 近期在玉石市场上出现了一种名为“天青冻”的蓝色蛇纹石玉, 为蛇纹石玉的一个新品种。采用偏光显微镜、扫描电子显微镜、激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪和X射线粉晶衍射仪分析其结构特征、化学和矿物组成, 并采用傅里叶变换红外光谱仪、激光拉曼光谱仪和紫外-可见分光光度计对其谱学特征进行研究。结果表明蛇纹石呈叶片状交织成毛毡状结构, 并含有菱面体状的杂质矿物白云石。同时, X射线衍射谱 2.53 Å( $d_{202}$ ), 1.56 Å( $d_{062}$ )和 1.54 Å( $d_{060}$ )的特征衍射峰以及红外吸收光谱中 3 673, 997 和 641  $\text{cm}^{-1}$ 的特征吸收峰表明其属叶蛇纹石, 1 098 和 1 086  $\text{cm}^{-1}$ 的特征拉曼峰指示了白云石和方解石的存在, 这与其形成于SiO<sub>2</sub>热液交代白云岩的成矿环境相关。化学分析表明蓝色蛇纹石玉中的Fe元素含量较其他常见蛇纹石玉低。紫外可见吸收光谱中Fe<sup>2+</sup>→Fe<sup>3+</sup>电荷转移引起的强630 nm吸收带致其蓝色, Fe<sup>2+</sup>→Fe<sup>3+</sup>电荷转移引起的724 nm弱吸收带会导致其产生绿色调, 而由Fe<sup>2+</sup>和Fe<sup>3+</sup>自旋禁戒跃迁分别导致的537和488 nm弱吸收带对颜色影响较小。

**关键词** 蓝色蛇纹石玉; 天青冻; 谱学特征; 宝石学特征; 矿物学特征

**中图分类号:** P575.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)02-0643-05

## 引言

蛇纹石玉是中国四大名玉之一, 因颜色鲜艳, 质地细腻温润, 易于加工制作成各种珠宝首饰以及玉器摆件而广受国人喜爱。蛇纹石玉常以绿色者为上品, 黄色次之, 颜色成为衡量蛇纹石玉价值的最重要的一个因素。近期一种名为“天青冻”的蓝色蛇纹石玉出现在珠宝玉石市场上, 产地为新疆, 该种蛇纹石玉颜色罕见, 为鲜艳的蓝色, 常带有绿色调, 价格远高于黄绿色蛇纹石玉。其宝石矿物学特征、化学组成以及谱学特征具有较高的科学和经济价值。

蛇纹石是一种含水的层状硅酸盐矿物, 化学式为Mg<sub>6</sub>[Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>8</sub>, 属三八面体型结构, 结构单元层属TO型, 层间域空, 根据其内部结构中四面体片和八面体片的排列方式可将其划分为三个亚种: 叶、利和纤蛇纹石, 蛇纹石多以集合体的形式出现, 常呈致密块状<sup>[1]</sup>。呈黄色的蛇纹石玉是由Fe<sup>3+</sup>在413~442 nm处的d-d晶体场跃迁引起的<sup>[2]</sup>, 绿色是由Fe<sup>2+</sup>→Fe<sup>3+</sup>电荷转移形成以700 nm左右为中心的强

宽吸收带引起的<sup>[3]</sup>。采用常规宝石学特征测试、偏光显微镜观察、扫描电子显微镜(SEM)、激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)、X射线衍射仪(XRD)、傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)、激光拉曼光谱仪(Raman)和紫外-可见分光光度计(UV-Vis)测试并结合前人对黄色和绿色蛇纹石玉的研究成果<sup>[4-5]</sup>, 对蓝色蛇纹石玉的成分特征、谱学特征以及颜色成因等方面进行研究。

## 1 实验部分

扫描电镜测试使用的是场发射扫描电镜FEI Quanta 450 FEG, 加速电压20 kV, 工作距离约10 mm, 取样品新鲜断面喷碳后进行观察。X射线粉末衍射测试使用的是荷兰X'Pert Pro型X射线粉晶衍射仪, 电压40 kV, 电流40 mA, Cu靶, 测试范围3°~65°, 扫描速度0.4°·s<sup>-1</sup>, 扫描步长0.016 7°·s<sup>-1</sup>。红外光谱测试在Thermo Fisher IS5上完成, 采用KBr压片透射法, 扫描次数64次, 分辨率4  $\text{cm}^{-1}$ , 测试范围400~4 000  $\text{cm}^{-1}$ 。拉曼测试在RenishawInvia激光拉

收稿日期: 2020-01-21, 修订日期: 2020-05-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF0215403), 国家自然科学基金项目(41572033)和中国地质大学(武汉)珠宝检测技术创新中心项目(CIGTWZ-2019028)资助

作者简介: 郑金宇, 1996年生, 中国地质大学(武汉)珠宝学院硕士研究生 e-mail: gemfisher@foxmail.com

\* 通讯作者 e-mail: summerjewelry@163.com

曼光谱仪上完成,光源 532 nm,曝光时间 10 s,扫描次数 2,激光强度 50%,光栅 1 200 l·mm<sup>-1</sup>。紫外-可见分光光度计使用的是 PerkinElmer Lambda 650S 双光束紫外-可见分光光度计,测试范围 400~800 nm,分辨率 1 nm。LA-ICP-MS 测试在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,ICP-MS 使用的是 Agilent7700e,激光束斑 44 μm,频率 5 Hz。

### 1.1 样品宝石学特征

挑选具有代表性的 3 块样品(如图 1 所示)进行常规宝石学测试。LS-1 为透明深蓝色,LS-2 为亚透明蓝绿色且含大量白色杂质矿物,LS-3 为透明浅蓝色。折射率均为 1.56(点测),静水称重法测得密度为 2.58~2.59 g·cm<sup>-3</sup>,紫外荧光惰性。宝石显微镜观察未见人工染色迹象。白色点状杂质矿物可与稀盐酸发生反应并有气体生成。

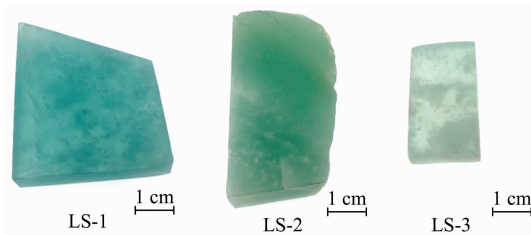


图 1 蓝色蛇纹石玉样品  
Fig. 1 Blue serpentine samples

### 1.2 样品矿物学特征

#### 1.2.1 形貌特征

偏光显微镜下可见基质具蛇纹石特征<sup>[6]</sup>,杂质矿物(白云石)不消光(如图 2)。显微形貌特征显示基体呈叶片状交织成毛毡状结构,晶体排列定向性差,杂质矿物呈菱面体形(如图 3)。经扫描电镜搭载的 EDS 进行化学元素定性测试可知,叶片状矿物仅含有 Mg 和 Si,为蛇纹石;菱面体杂质矿物仅含 Ca 和 Mg,为白云石。

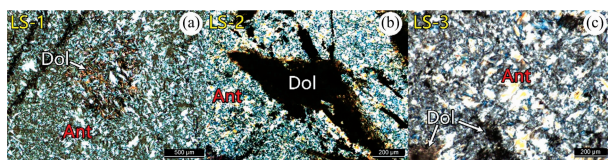


图 2 蓝色蛇纹石玉正交偏光下特征  
Ant: 叶蛇纹石; Dol: 白云石

Fig. 2 Mineral characteristics of blue serpentine under crossed-polarized light

Ant: Antigorite; Dol: Dolomite

#### 1.2.2 化学成分

蛇纹石中主要存在微量元素 Fe<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 对 Mg 元素进行类质同像替代,LA-ICP-MS 测试结果(如表 1)表明产自辽宁岫岩的绿色蛇纹石玉(XY-G)和黄色蛇纹石玉(XY-Y)的 Fe 含量分别为 1.65% 和 0.60%,而蓝色蛇纹石玉的 Fe 含量最高为 0.021%,指示蓝色蛇纹石玉形成于贫铁的环境。且蓝色越浅,Fe 含量越低,指示颜色与 Fe 元素有关。

### 1.3 X 射线粉晶衍射

XRD 可以对高岭石族矿物地开石、高岭石和珍珠陶石

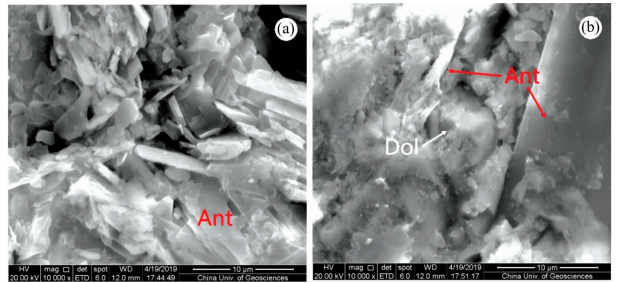


图 3 蓝色蛇纹石玉扫描电镜图像  
(a): 叶片状蛇纹石; (b): 菱面体白云石;  
Ant: 叶蛇纹石; Dol: 白云石

Fig. 3 SEM images of blue serpentine

(a): Scaly serpentine; (b): Rhombohedron dolomite;  
Ant: Antigorite; Dol: Dolomite

表 1 蓝色蛇纹石玉的化学成分

Table 1 The chemical component of Blue serpentine (Wt%)

样品号	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO
LS-1	48.7	51.1	0.047	0.001	0.056	0.021
LS-2	48.9	50.9	0.021	0.001 2	0.042	0.012
LS-3	49.1	50.8	0.013	0.009	0.044	0.009 2
XY-G	46.9	51.0	0.13	0.004 9	0.052	1.65
XY-Y	49.2	49.9	0.13	0.008 1	0.097	0.60

注: 所有测试均未计算矿物中水的含量, Fe 不区分价态

Note: moisture contents are not calculated and the valence states of Fe cations are not distinguished

进行准确区分<sup>[7]</sup>,同样对于区分蛇纹石的不同亚种表现出了优越性。从样品 LS-2 上带有白色杂质矿物的部位进行粉末取样,衍射结果显示(图 4)7.27 和 3.62 Å 的蛇纹石特征衍射峰,2.89 Å 白云石的特征衍射峰,较弱的 7.16 Å 衍射峰。蛇纹石族矿物在  $d_{202}$  和  $d_{060}$  上有明显的区别,叶蛇纹石  $d_{202} > 2.50$  Å,  $d_{060} > 1.52$  Å; 利蛇纹石和纤蛇纹石  $d_{202} < 2.50$  Å,  $d_{060}$  趋向 1.50 Å。  $d_{202} = 2.53$  Å 的中强反射和  $d_{060} = 1.56$  Å,  $d_{062} = 1.54$  Å 的弱反射为叶蛇纹石的特征<sup>[8]</sup>。推测 7.16 Å 为绿泥石  $d_{002}$  的衍射峰<sup>[3]</sup>,可能存在于蛇纹石间隙中,粒径极小,为与蛇纹石同时形成的水热矿物<sup>[8]</sup>。

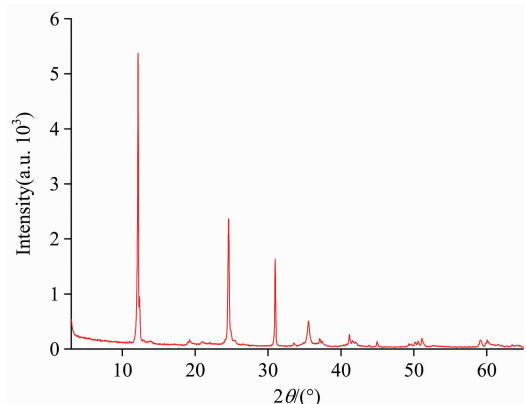


图 4 蓝色蛇纹石玉 X 射线衍射图  
Fig. 4 XRD pattern of blue serpentine

### 1.4 红外光谱

由于蛇纹石不同亚种之间的结构存在差别,测试红外光谱可快速区分其亚种。结果显示红外吸收峰主要集中在三个波段(如图 5):

(1)在  $3\ 600\sim 3\ 700\ \text{cm}^{-1}$  范围内有一个  $3\ 673\ \text{cm}^{-1}$  强吸收峰,由  $\text{OH}^-$  伸缩振动引起的;(2)在  $1\ 100\sim 960\ \text{cm}^{-1}$  范围内,有两个较强的吸收峰: $1\ 082\ \text{cm}^{-1}$  是  $\text{Si}-\text{O}$  始终垂直蛇纹石纤维轴的方向伸缩振动所导致的, $997\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收峰是  $\text{Si}-\text{O}$  在层面内的伸缩振动范围内,对称性较好的叶蛇纹石在此处发生了简并而导致的,对称性较低的纤蛇纹石则具有两个吸收峰;(3) $700\sim 400\ \text{cm}^{-1}$  范围内有四条中至强的吸收峰: $641$  和  $624\ \text{cm}^{-1}$  吸收峰为  $\text{OH}^-$  转动振动引起,其中  $641\ \text{cm}^{-1}$  为叶蛇纹石的特征吸收峰, $567\ \text{cm}^{-1}$  处是蛇纹石矿物中的  $\text{Mg}-\text{O}$  伸缩振动和弯曲振动, $452\ \text{cm}^{-1}$  的振动归属于  $\text{Si}-\text{O}$  的弯曲振动<sup>[8-9]</sup>。

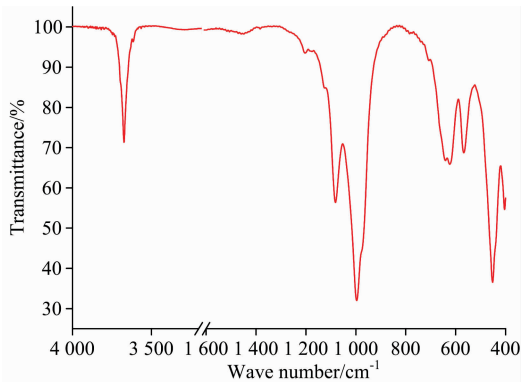


图 5 蓝色蛇纹石玉红外光谱

Fig. 5 FTIR spectra of blue serpentine

### 1.5 拉曼光谱

对蓝色蛇纹石玉基质和杂质矿物进行 Raman 光谱测试,结果(如图 6)显示蛇纹石的特征拉曼谱峰: $1\ 047\ \text{cm}^{-1}$  归属于  $\text{Si}-\text{O}_{\text{nb}}$  ( $\text{O}_{\text{nb}}$  非桥氧)所形成的四面体伸缩振动; $460\ \text{cm}^{-1}$  归属于  $\text{Si}-\text{O}_{\text{br}}-\text{Si}$  ( $\text{O}_{\text{br}}$  桥氧)的弯曲振动; $685$  和  $718\ \text{cm}^{-1}$  归属  $\text{Si}-\text{O}_{\text{nb}}-\text{Si}$  的弯曲振动; $137$ ,  $231$ ,  $334$  和  $376\ \text{cm}^{-1}$  归属于与  $\text{Mg}^{2+}$  参与和骨架有关的振动。 $3\ 665$  和  $3\ 698\ \text{cm}^{-1}$  的拉曼谱峰是  $\text{OH}^-$  伸缩振动导致的<sup>[10]</sup>。

杂质矿物的拉曼图谱可见  $1\ 098$  和  $1\ 086\ \text{cm}^{-1}$  的方解石族矿物的特征拉曼位移峰。在方解石族矿物的拉曼光谱中,随着阳离子半径增大,归属于  $\nu_s$  (对称伸缩振动)的拉曼位移向低波数偏移, $1\ 098$  和  $1\ 086\ \text{cm}^{-1}$  分别归属于白云石和方解石<sup>[11-12]</sup>。 $1\ 098\ \text{cm}^{-1}$  的拉曼强度远大于  $1\ 086\ \text{cm}^{-1}$ ,白色杂质矿物以白云石为主,含极微量的方解石。结合显微形貌特征指示该蓝色蛇纹石玉是由含  $\text{SiO}_2$  的热液交代白云岩形成,方解石是在白云石被交代形成蛇纹石过程中因反应不彻底,  $\text{Ca}$  元素未完全随热液迁移流失而产生的矿物<sup>[13]</sup>。

## 2 结果与讨论

蓝色蛇纹石玉的紫外-可见吸收光谱如图 7(a)所示。样

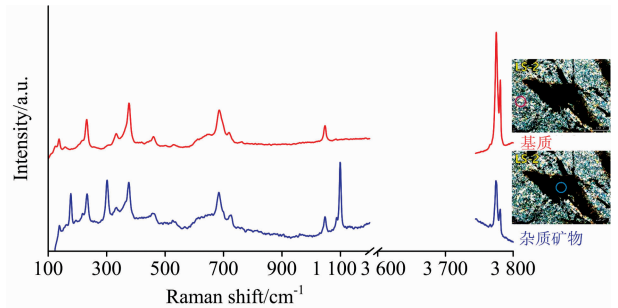


图 6 蓝色蛇纹石玉拉曼光谱

Ant: 叶蛇纹石; Dol: 白云石; Cal: 方解石

Fig. 6 Raman spectra of blue serpentine

Ant: Antigorite; Dol: Dolomite; Cal: Calcite

品具有四个吸收谱带:

(1) $630\ \text{nm}(\nu_1)$  的强宽吸收带: 电子的电荷转移跃迁几率比晶场  $d-d$  跃迁的几率大,因此电荷转移吸收谱具有强且宽的特征。在蛇纹石中,  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  电荷转移谱频率位置在  $13\ 000\sim 16\ 000\ \text{cm}^{-1}$  (约  $769\sim 625\ \text{nm}$ ),因此蓝色蛇纹石玉中  $630\ \text{nm}$  的强宽吸收带为  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  电荷转移光谱,是呈现蓝色的主要原因。

(2) $724\ \text{nm}(\nu_2)$  的弱吸收带: 同属  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  荷移光谱,强度较弱,仅会使样品产生一定程度的绿色色调。

(3) $488\ \text{nm}(\nu_3)$  的弱吸收带:  $\text{Fe}^{3+}$  无自旋允许跃迁, $488\ \text{nm}$  是由  $\text{Fe}^{3+}$  在四面体位置上的自旋禁戒跃迁  ${}^6A_1({}^6S) \rightarrow {}^4T_1({}^4G)$  引起的。

(4) $537\ \text{nm}(\nu_4)$  的弱吸收带:  $\text{Fe}^{2+}$  在可见光范围内有自旋禁戒跃迁,处于  $18\ 000\sim 19\ 000\ \text{cm}^{-1}$  (约  $526\sim 555\ \text{nm}$ ) 范围内,其  ${}^5T_2({}^5D) \rightarrow {}^3T_2({}^3H)$  引起  $537\ \text{nm}$  弱吸收带<sup>[8]</sup>。

对三个样品的吸收光谱进行 Gauss 拟合,计算四个峰面积[如图 7(b)]。以 LS-1, LS-2 和 LS-3 为顺序分析可知,

(1) $\nu_1$ : 峰面积递减,蓝色逐渐变浅,  $\text{Fe}$  元素含量也逐渐下降,指示蓝色与  $\text{Fe}$  元素有关。

(2) $\nu_2$ : LS-1 与 LS-2 样品吸收峰面积相当,但对于 LS-2 样品  $\nu_2$  吸收峰面积占比高,导致其呈现出明显的绿色调。

(3) $\nu_3$  和  $\nu_4$ : 峰面积较低,吸收强度较弱,颜色相对最弱。

绿色蛇纹石的颜色是由  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  引起的  $700\ \text{nm}$  的强宽吸收带所致<sup>[3]</sup>,与其荷移光谱相比,蓝色蛇纹石玉发生蓝移现象(至  $630\ \text{nm}$ ),结合化学成分可知蓝色蛇纹石玉  $\text{Fe}$  含量更低,叶蛇纹石中  $\text{Fe}$  的含量直接影响  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  荷移光谱的吸收频率<sup>[8]</sup>。

## 3 结论

(1)蓝色蛇纹石玉主要组成矿物为叶蛇纹石,呈叶片状,白色杂质矿物主要为白云石,含极少方解石,白云石呈菱面体形。

(2)利用红外光谱可根据  $3\ 673$ ,  $997$  和  $641\ \text{cm}^{-1}$  吸收峰无损且快速地判断叶蛇纹石为蓝色蛇纹石玉的主要组成矿

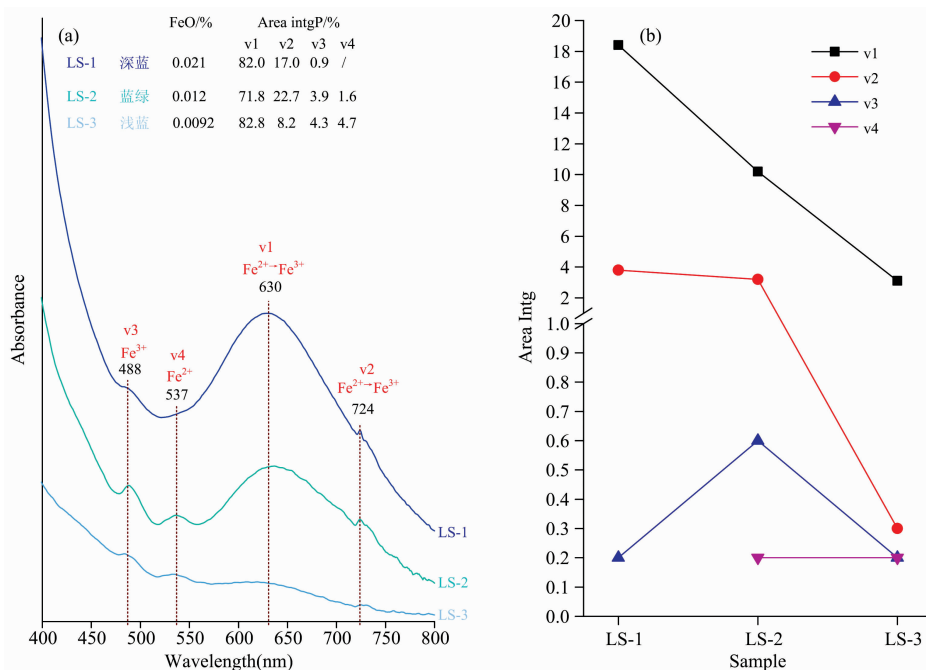


图 7 蓝色蛇纹石玉的紫外-可见吸收光谱及其峰的积分面积计算

(a): 紫外可见吸收光谱; (b): 积分面积计算图

Fig. 7 UV-Vis spectra and integral area of blue serpentine

(a): UV-Vis spectra; (b): Integral area

物; 对白色杂质矿物进行微区拉曼光谱测试可见白云石 ( $1\ 098\ \text{cm}^{-1}$ ) 和方解石 ( $1\ 086\ \text{cm}^{-1}$ ) 的拉曼特征峰。

(3) 蓝色蛇纹石玉的 Fe 含量低, 但  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  电荷转移引起以 630 nm 为中心的强的宽吸收带是其呈现蓝色的主要

原因, 而 724 nm 的弱吸收带导致其出现绿色调。

致谢: 蓝色蛇纹石玉样品由北京朗月荷珠宝文化有限公司提供, 黄色和绿色蛇纹石玉样品由中科院地质与地区物理研究所的马垠策提供, 在此表示感谢!

## References

- [1] ZHAO Shan-rong, BIAN Qiu-juan, WANG Qin-yan(赵珊茸, 边秋娟, 王勤燕). Crystallography and Mineralogy(结晶学与矿物学). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2011. 343.
- [2] YANG Chun, BIAN Zhi-hong, WANG Ya-mei, et al(杨春, 边智虹, 王雅玫, 等). Resources Environment & Engineering(资源环境与工程), 2006, 20(6): 760.
- [3] SU Yu-zhi, YANG Chun, LUO Yuan, et al(苏雨峙, 杨春, 罗源). Journal of Gems and Gemmology(宝石和宝石学杂志), 2015, 17(6): 25.
- [4] Song Yanjun, Zhang Lu. Gems & Gemology, 2015, 51(3): 336.
- [5] WANG Yong-ya, GAN Fu-xi(王永亚, 干福熹). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2012, 32(9): 2305.
- [6] ZHANG Liang-ju(张良钜). Acta Mineralogica Sinica(矿物学报), 2002, 22(2): 137.
- [7] CHEN Tao, LIU Yun-gui, YAO Chun-mao(陈涛, 刘云贵, 姚春茂). Journal of Gems and Gemmology(宝石和宝石学杂志), 2013, 15(3): 18.
- [8] JIANG Shao-ying(江绍英). Serpentine Mineralogy and Performance Testing(蛇纹石矿物学及性能测试). Beijing: Geology Press(北京: 地质出版社), 1987. 45.
- [9] LU Bao-qi, QI Li-jian, XIA Yi-ben(卢保奇, 亓利剑, 夏义本). Journal of the Chinese Ceramic Society(硅酸盐学报), 2005, 33(5): 572.
- [10] DU Guang-peng, LU Bao-qi, PENG Jing, et al(杜广鹏, 卢保奇, 彭景, 等). Journal of East China University of Science and Technology • Natural Science Edition(华东理工大学学报 • 自然科学版), 2018, 44(1): 80.
- [11] HAN Jing-yi, GUO Li-he, CHEN Wei-shi(韩景仪, 郭立鹤, 陈伟十). Mineral Raman Spectrum Atlas(矿物拉曼光谱图集). Beijing: Geology Press(北京: 地质出版社), 2016. 56.
- [12] DU Guang-peng, FAN Jian-liang(杜广鹏, 范建良). Journal of Mineralogy and Petrology(矿物岩石), 2010, 30(4): 32.
- [13] WANG Yong-ya, GU Dong-hong, GAN Fu-xi(王永亚, 顾冬红, 干福熹). Acta Petrologica Et Mineralogica(岩石矿物学杂志), 2011, 30(2): 325.

# Spectroscopic Characteristics of Blue Serpentine

ZHENG Jin-yu<sup>1</sup>, LIU Yun-gui<sup>2</sup>, CHEN Tao<sup>1\*</sup>, CHEN Qian<sup>1</sup>, LI Meng-yang<sup>1</sup>, XU-Xing<sup>1</sup>

1. Gemmological Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

**Abstract** Recently, a new species of serpentine, which color is blue, named “Tian Qing Dong” appeared in jade market. Structure characteristics, chemical and mineral compositions have been investigated with a polarizing microscope, Scanning Electron Microscope, Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry and X-ray powder diffraction spectrometer. Based on these measurements, spectroscopic characteristics are studied by using Fourier Transform Infrared Spectrometer, Raman spectrometer and Ultraviolet-Visible spectrometer. Results show that serpentine is scaly and interlocked into the felt structure. Besides, serpentine contains impurity mineral that is rhombohedron dolomite. Meanwhile, XRD results show characteristics diffraction peaks that are  $2.53 \text{ \AA}(d_{202})$ ,  $1.56 \text{ \AA}(d_{062})$ ,  $1.54 \text{ \AA}(d_{060})$  and FTIR spectrum present characteristics absorb peaks which are  $3673$ ,  $997$ ,  $641 \text{ cm}^{-1}$ , they are confirmed that antigorite is the main mineral. There are  $1098$  and  $1086 \text{ cm}^{-1}$  of characteristics Raman shift exist which are belong to dolomite and calcite, these clues have indicated blue serpentine may be formed after the metasomatism which happened between dolomite and hydrothermal solution which contains  $\text{SiO}_2$ . Chemical analysis shows that the concentration of Fe of blue serpentine is far lower than familiar species. UV-Vis results show that  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  intervalence charge transfer (IVCT) transition generates a strong and broad absorption band which center is about  $630 \text{ nm}$  induce blue color, while  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  IVCT transition also generate a weak absorption band which is  $724 \text{ nm}$  present green color. The spin-forbidden transition of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  have generated  $537$  and  $488 \text{ nm}$ , and both are weak absorption that has not to contribute to present color.

**Keywords** Blue serpentine; Tian Qing Dong; Spectroscopic characteristic; Gemological characteristics; Mineralogical characteristics

(Received Jan. 21, 2020; accepted May 4, 2020)

\* Corresponding author