

文章编号: 0254-5357(2012)05-0788-06

# 广西陆川蛇纹石玉的岩相结构及成矿机理

王永亚<sup>1</sup>, 干福熹<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; 2. 复旦大学, 上海 200433)

**摘要:** 应用外束质子激发 X 射线荧光光谱法、X 射线衍射、激光拉曼光谱、扫描电子显微镜等无损分析技术, 对广西陆川蛇纹石玉的成分、物相和结构进行分析。X 射线衍射结果显示样品的衍射峰主要位于 0.724、0.456、0.362、0.248、0.153 和 0.150 nm 处, 表明陆川蛇纹石玉主要矿物成分是蛇纹石, 同时伴生方解石矿物与蛇纹石形成穿插交织结构。成矿机理分析表明, 陆川蛇纹石玉是由白云质大理岩热液交代作用形成的, 和广东的信宜玉均属于富镁碳酸盐型蛇纹石。拉曼光谱显示叶蛇纹石的特征峰位于 229、376、457、686 和 1046 cm<sup>-1</sup> 处, 纤蛇纹石的特征峰位于 228、345、386、624、690 和 1102 cm<sup>-1</sup> 处, 通过激光拉曼光谱可以快速区分陆川蛇纹石玉中纤蛇纹石和叶蛇纹石两种不同结构的蛇纹石亚种。

**关键词:** 陆川蛇纹石玉; 纤蛇纹石; 岩相结构; 外束质子激发 X 荧光光谱法; X 射线衍射法; 激光拉曼光谱法; 扫描电镜

中图分类号: P578.964; P575.5; P575.2

文献标识码: A

## Mineral Structure and Mineralization Mechanism of Serpentine Jade from Luchuan, Guangxi Province

WANG Yong-ya<sup>1</sup>, GAN Fu-xi<sup>1,2\*</sup>

(1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** The nondestructive analysis techniques of Proton Induced X-ray Emission (PIXE), X-ray Diffraction (XRD), Laser Raman Spectroscopy (LRS) and Scanning Electron Microscopy (SEM) were applied to analyze the chemical composition and mineral structure of serpentine jade from Luchuan, Guangxi Province. The major XRD bands of the samples located at 0.724, 0.456, 0.362, 0.248, 0.153 and 0.150 nm, indicate that the major mineral of Luchuan jade is serpentine. Meanwhile, interpenetration texture was formed between serpentine and associated calcite. Luchuan serpentine jade was formed by hydrothermal metasomatism from dolomitic marble, and both Luchuan Jade and Xinyi Jade belong to Mg-rich carbonate type serpentine. Raman characteristic bands of antigorite located at 229, 376, 457, 686 and 1046 cm<sup>-1</sup> while that of chrysotile occurred at 228, 345, 386, 624, 690 and 1102 cm<sup>-1</sup>. Therefore, the Raman spectroscopy can be used to identify chrysotile and antigorite of the serpentine minerals of Luchuan jade.

**Key words:** Luchuan serpentine jade; chrysotile; mineral structure; Proton Induced X-ray Emission Spectrometry; X-ray Diffraction Analysis; Laser Raman Spectrometry; Scanning Electron Microscopy

收稿日期: 2012-01-10; 接受日期: 2012-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51072208); 中国科学院知识创新工程项目(KJC3.SYW.n12)

作者简介: 王永亚, 博士研究生, 主要从事蛇纹石玉的无损分析研究。E-mail: yayongwang@yahoo.cn。

通讯作者: 干福熹, 中国科学院院士, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 复旦大学教授。

E-mail: fxgan@mail.shcnc.ac.cn。

蛇纹石是一种含水的富镁硅酸盐矿物的总称,蛇纹石类矿物主要有纤蛇纹石、利蛇纹石和叶蛇纹石等。蛇纹石玉是以蛇纹石类矿物为主要组分的矿物集合体,是人类最早认识和利用的玉石品种之一,早在7000年前的新石器文化遗址中就出土了大量的蛇纹石玉器<sup>[1]</sup>。由于在我国以辽宁省岫岩县所产的蛇纹石质玉质量最好、储量最多,因此蛇纹石玉也常称岫玉。此外还有陕西的蓝田玉、广东的信宜玉、广西的陆川玉、四川的会理玉、河南淅川的黑绿玉、青海的祁连玉以及新疆的昆仑玉和蛇绿玉等<sup>[2]</sup>。南方的蛇纹石玉产地相对较少,仅有信宜玉和陆川玉,且信宜玉已经停产,现在广西陆川已经成为南方蛇纹石玉玉石材料的重要产地,但至今鲜有对陆川蛇纹石玉的研究。

陆川蛇纹石玉作为我国南方重要的蛇纹石玉,具有重要的社会经济价值。本文应用外束质子激发X射线荧光光谱(PIXE)、X射线衍射(XRD)、激光拉曼光谱(LRS)、扫描电子显微镜(SEM)等无损分析检测技术,对广西陆川蛇纹石玉进行岩石矿物学分析,总结其无损鉴别特征,为陆川蛇纹石玉的进一步开发奠定理论基础,同时为蛇纹石玉及古代蛇纹石玉器的溯源研究提供有益的数据资料。

## 1 实验部分

### 1.1 样品采集和处理

在广西省玉林市陆川县采集蛇纹石玉样品,编号分别为10LC-1、10LC-2、10LC-3,样品的标本特征见图1。其中10LC-1a和10LC-1b分别代表样品10LC-1的浅黄绿色部位和白色部位;10LC-2a和10LC-2b分别代表样品10LC-2的黄绿色部位和白色部位;10LC-3样品质地较均匀,因此不再分区测试。

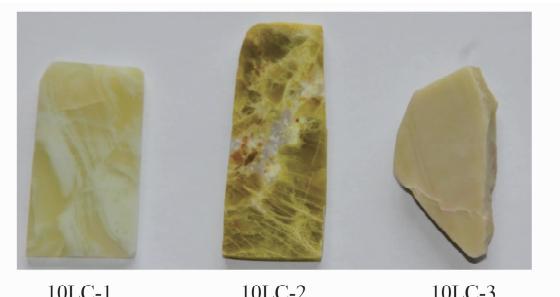


图1 样品照片

Fig. 1 Photographs of the samples

块状样品经抛光、超声波清洗处理后,应用PIXE和拉曼光谱对样品不同颜色的部位分别进行测试。

### 1.2 样品分析测试

PIXE技术分析:在复旦大学现代物理研究所加速器实验室进行,由NEC9SDH-2串联加速器提供能量约为3.0 MeV的高能准直质子束,到达样品表面的实际能量为2.8 MeV,束斑直径1 mm。X射线用Si(Li)探测器测量,系统对Mn的K $\alpha$  X射线(5.9 keV)的能量分辨率(FWHM)为165 eV。原子序数大于11(Na)的元素均可作定量测定;序数小于11的元素因空气对特征X射线的吸收而不准确,实验时在样品至探测器间通以流动氦气,以保证测定Na以上轻元素测量的准确性。PIXE能谱经厚靶计算程序GUPIX解谱,计算得出样品的化学组成。外束PIXE的实验方法详见文献[3]。

X射线衍射分析:采用中国科学院上海光学精密机械研究所的Ultima IV日本理学X射线衍射仪,实验时采用管压40 kV,管流40 mA,激发源采用Cu靶,X射线(Cu K $\alpha_1$ =0.154 06 nm),扫描角度2 $\theta$ 为5°~90°。

激光拉曼光谱分析:采用中国科学院上海光学精密机械研究所的Renishaw Invia型显微共焦激光拉曼光谱仪(英国雷尼绍公司生产),本实验采用的激发光波长为488 nm。

扫描电镜分析:利用中国科学院上海光学精密机械研究所的JSM6360LA扫描电子显微镜(日本电子公司生产)在1000倍下对样品的表面形貌进行观察。

## 2 结果与讨论

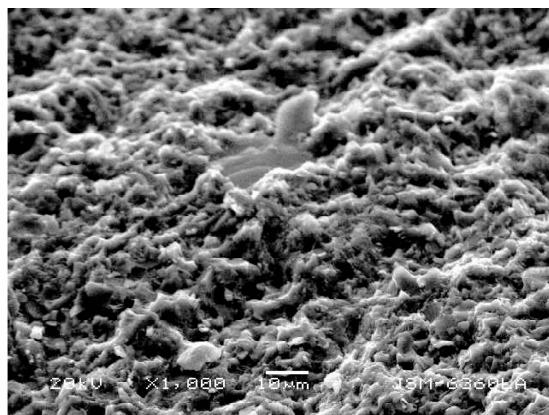
### 2.1 蛇纹石玉的基本形貌特征

样品10LC-1呈玻璃光泽,半透明,其中白色部分和浅黄绿色部分呈现穿插结构;10LC-2蜡状光泽,不透明,黄绿色部分和白色部分也呈现穿插结构;10LC-3蜡状光泽,不透明,黄绿色,质地较均匀。

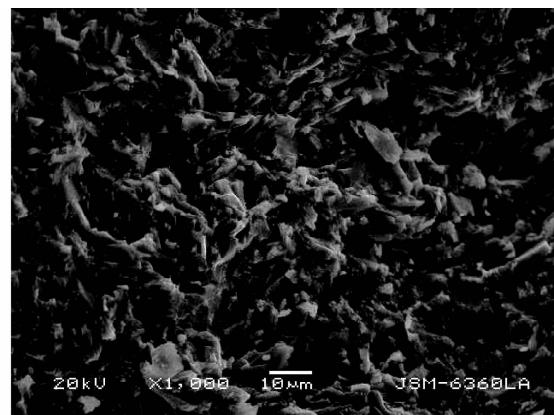
在电子显微镜下,样品10LC-1呈显微隐晶质结构,组成矿物的粒径较小,在10  $\mu\text{m}$ 以下(图2a);10LC-2的晶粒呈板条状或不规则块状,这些晶粒无定向性地紧密结合在一起(图2b)。

### 2.2 蛇纹石玉的化学成分

样品的化学成分测试结果列于表1,样品中水的含量在测试时被忽略,其他元素含量经归一化处理。10LC-1a和10LC-2a主要成分为MgO和



(a) 10LC-1 浅黄绿色部分



(b) 10LC-2 黄绿色部分

图2 样品的SEM照片(二次电子图像)

Fig. 2 Scanning electron microscope photographs of samples (secondary electron image)

$\text{SiO}_2$ , 并含少量  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 10LC-1b、10LC-2b 以及 10LC-3 的主要成分为  $\text{MgO}$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{CaO}$ , 它们也含有少量  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 其他元素含量极少。蛇纹石的主要成分为  $\text{MgO}$  和  $\text{SiO}_2$ , 10LC-1a 及 10LC-2a 主要成分与蛇纹石的主要成分基本吻合, 但  $\text{MgO}$  和  $\text{SiO}_2$  的含量和理论值相比都偏低; 10LC-1b、10LC-2b 及 10LC-3 的主要成分除了  $\text{MgO}$  和  $\text{SiO}_2$ , 还有大量  $\text{CaO}$ 。

### 2.3 蛇纹石玉的物相特征

从块状样品的 X 射线衍射数据(表 2)可以看

出, 样品特征峰出现了位于  $d_{001} = 7.24$ 、 $d_{002} = 3.62$  和  $d_{\bar{1}31} = 2.48$  附近的强峰以及位于  $d_{110} = 4.56$ 、 $d_{152} = 1.53$ 、 $d_{060} = 1.50$  和  $d_{411} = 1.30$  附近的中强峰, 对照 JCPDS 卡片, 样品的主要衍射峰与蛇纹石相吻合; 同时在  $d_{104} = 3.01$  附近出现了方解石的特征峰, 说明样品中不仅含有蛇纹石, 还含有部分方解石。样品 10LC-3 在  $d_{104} = 2.88$  处出现了微弱的白云石特征峰, 说明其中含有少量白云石。不同样品的衍射峰相对强度存在一定变化, 可能与测试条件或晶粒择优取向有关。

表1 样品常量元素 PIXE 分析结果

Table 1 Analytical results of major and minor elements in the samples determined by PIXE technique

样品编号	测试点	$w_{\text{B}}/\%$														
		$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CoO}$	$\text{NiO}$	$\text{CuO}$	$\text{ZnO}$
10LC-1a	浅黄绿色	1.21	46.96	1.46	49.47	0.27	0.07	0.15	0.03	0	0	0.37	0	0	0	0.02
10LC-1b	白色	2.19	43.92	0.35	45.76	0.06	0.04	7.01	0.01	0.02	0	0.48	0	0	0	0
10LC-2a	黄绿色	2.28	46.46	1.01	48.6	0.17	0.02	0.06	0	0.01	0.01	1.37	0	0.01	0	0
10LC-2b	白色	0	18.48	0.14	12.13	0	0	68.83	0	0	0	0.43	0	0	0	0
10LC-3	黄绿色	0.80	40.43	0.80	39.5	0.27	0.19	17.12	0	0.05	0.02	0.61	0	0	0.02	0

注: 蛇纹石的化学式为  $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ , 理论化学组成(质量分数)中  $\text{MgO}$  为 43.0%,  $\text{SiO}_2$  为 44.1%,  $\text{H}_2\text{O}$  为 12.9%。

表2 块状样品的 X 射线衍射数据

Table 2 Data of bulk samples by X-ray diffraction patterns

样品编号	$hkl$	001	110	002	104	104	$\bar{1}31$	$\bar{1}32$	203	152	060	411
10LC-1a	$d$	7.24	4.56	3.62	3.01		2.48	2.14	1.79	1.53	1.50	1.30
	$I$	33.9	30.4	31.6	25.9		100	20.6	7.3	50.3	27.2	19
10LC-2a	$d$	7.11	4.51	3.60	3.00		2.48	2.13	1.78	1.53	1.50	1.30
	$I$	100	19	66.7	17.3		29.6	8.7	5.4	17.9	11.3	6.3
10LC-3	$d$	7.44	4.63	3.68	3.05	2.88	2.53	2.15		1.56	1.54	1.31
	$I$	100	21	73.4	72.5	14.8	32.8	10.5		11.4	20.5	11.5

## 2.4 激光拉曼光谱特征

样品的拉曼光谱如图3所示。在10LC-1a中,样品位于 $228\text{ cm}^{-1}$ 、 $386\text{ cm}^{-1}$ 和 $690\text{ cm}^{-1}$ 的强特征峰以及位于 $346\text{ cm}^{-1}$ 、 $624\text{ cm}^{-1}$ 和 $1102\text{ cm}^{-1}$ 的弱特征峰显示了纤蛇纹石的特征(图3a);位于 $457\text{ cm}^{-1}$ 和 $1047\text{ cm}^{-1}$ 的弱峰则说明其中含有少量叶蛇纹石<sup>[4]</sup>。其中位于 $228\text{ cm}^{-1}$ 的特征峰源自O—H—O基团的振动,当中的一个O为 $[\text{SiO}_4]$ 中的非桥氧O<sub>nb</sub>,H为朝向八面体空隙的羟基中的氢原子;345 $\text{cm}^{-1}$ 处的振动峰由 $[\text{SiO}_4]$ 四面体的弯曲振动引起; $386\text{ cm}^{-1}$ 处的振动峰则对应 $[\text{SiO}_4]$ 四面体的变形振动; $624\text{ cm}^{-1}$ 的拉曼峰归属为OH—Mg—OH的转换模式<sup>[4]</sup>; $690\text{ cm}^{-1}$ 处的拉曼峰由Si—O<sub>b</sub>—Si的对称伸缩振动引起;位于 $1102\text{ cm}^{-1}$ 的强峰则由Si—O<sub>nb</sub>的反对称伸缩振动引起。在叶蛇纹石的振动峰中,位于 $457\text{ cm}^{-1}$ 的峰归属为Si—O弯曲振动<sup>[5]</sup>; $1047\text{ cm}^{-1}$ 的特征峰则由Si—O<sub>b</sub>—Si的反对称伸缩振动引起。位于 $128\text{ cm}^{-1}$ 附近的拉曼峰因为其位置很低,不可能是由基团的内振动产生的,应该来源于基团之间的相对运动。

与10LC-1a相比,10LC-1b除了在 $228$ 、 $346$ 、 $385$ 、 $461$ 、 $621$ 、 $690$ 、 $1047$ 和 $1104\text{ cm}^{-1}$ 处检测到纤蛇纹石和叶蛇纹石的拉曼峰外,还在 $154$ 、 $282$ 和 $1086\text{ cm}^{-1}$ 处发现了方解石的拉曼峰(图3b)。同样10LC-2a出现了位于 $229$ 、 $376$ 、 $686$ 和 $1046\text{ cm}^{-1}$ 的叶蛇纹石特征峰(图3c);在10LC-2b中出现了位于 $229$ 、 $349$ 、 $385$ 、 $619$ 和 $690\text{ cm}^{-1}$ 处的蛇纹石拉曼峰和位于 $1083\text{ cm}^{-1}$ 处的方解石拉曼峰;而在10LC-3中除了出现蛇纹石和方解石的特征峰外,还在 $175$ 、 $297$ 和 $1096\text{ cm}^{-1}$ 处出现白云石的拉曼特征峰(图3e)。这与XRD分析实验结果是吻合的,同时可以看出不同样品的拉曼谱峰存在很大的相似性。

## 3 陆川蛇纹石玉的化学成分及成矿机理探讨

浅黄绿色的10LC-1a和黄绿色的10LC-2a已完全蛇纹石化,其成分基本都是蛇纹石而不含其他成分,根据其成分分析结果按照十八氧原子标准计算的化学式如下(计算时默认水的含量为理论值):

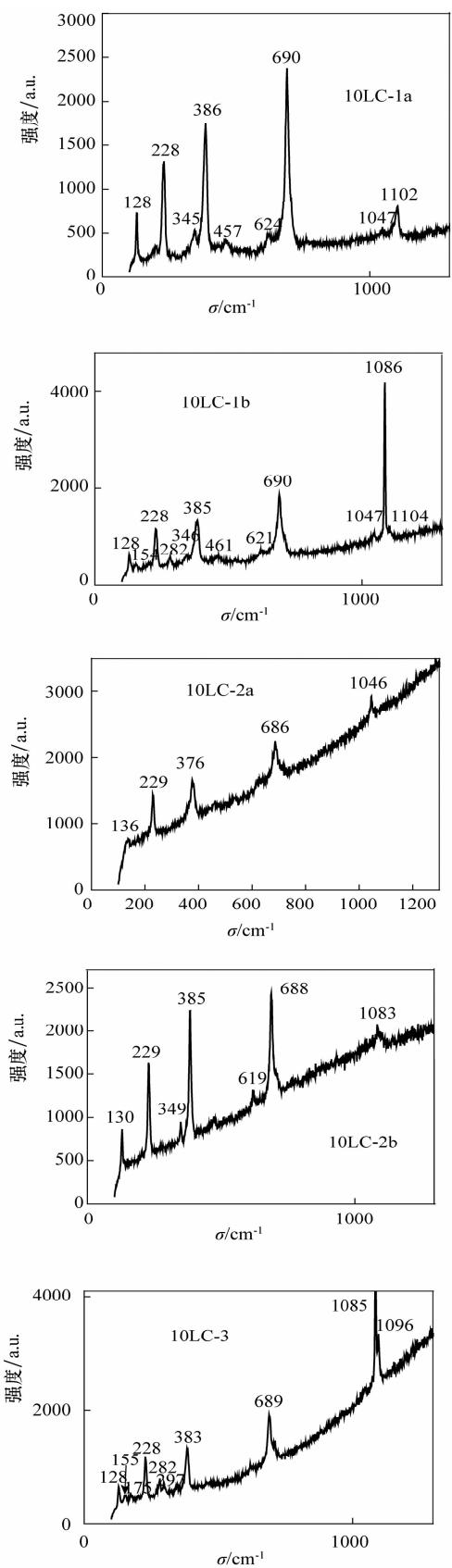
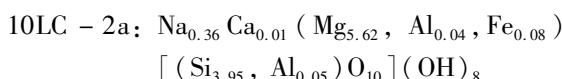
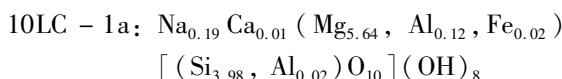
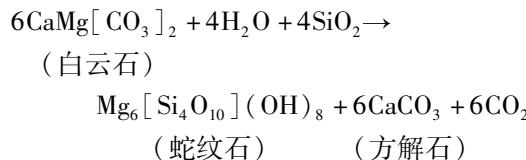


图3 样品的拉曼光谱

Fig. 3 Raman spectra of the samples

由于  $\text{Al}^{3+}$  替代  $[\text{SiO}_4]$  四面体中的  $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  替代八面体中的  $\text{Mg}^{2+}$ ，因此在化学式中引入了  $\text{Al}$ 、 $\text{Fe}$ 。蛇纹石的标准化学式为  $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ ，其  $\text{Mg}$  和  $\text{Si}$  的质量比  $w(\text{Mg})/w(\text{Si}) = 3:2$ ，陆川蛇纹石中  $w(\text{Mg})/w(\text{Si})$  分别为  $2.83:2$ 、 $2.85:2$ ，与标准化学式相比  $\text{Mg}$  的含量偏低，属于富硅贫镁型蛇纹石。 $\text{Fe}$  是蛇纹石的主要致色离子，随着样品 10LC-1a、10LC-3、10LC-2a 黄绿色逐渐加深， $\text{Fe}$  的含量也逐渐增加，说明  $\text{Fe}$  是成蛇纹石的黄绿色重要致色因素。由于蛇纹石的颜色是  $\text{Fe}$  的  $d-d$  电子跃迁与  $\text{Fe}^{2+}-\text{Fe}^{3+}$  电荷转移的综合结果，色种取决于二者的强度比<sup>[6]</sup>，因此陆川蛇纹石玉的呈色机理还需要进一步研究。

由于在陆川蛇纹石玉中，只含蛇纹石的纯净玉石较少，降低了其经济价值，因此属于级别较低的玉石。通过 PIXE 分析结果可以看出，样品 10LC-1b、10LC-2b 和 10LC-3 的化学成分主要是  $\text{MgO}$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{CaO}$ ，含有少量  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，其他元素含量极少。物相分析显示其主要组成矿物为蛇纹石和方解石，10LC-3 还含少量白云石；拉曼光谱结果表明其蛇纹石包含纤蛇纹石和叶蛇纹石，其中的叶蛇纹石应该是纤蛇纹石在低温变质作用下缓慢形成的<sup>[7]</sup>。由于蛇纹石与方解石、白云石形成穿插交织结构，因此矿物的形成过程应该是白云质大理岩在  $\text{SiO}_2$  热液交代作用下使白云石生成蛇纹石。交代作用反应方程式如下<sup>[8]</sup>：



样品 10LC-3 由于交代作用的不完全，因此样品中还残留着少量白云石；样品 10LC-1 和 10LC-2 则形成蛇纹石与方解石的脉状穿插结构，其中残余的方解石是由于  $\text{Ca}$  没有完全随  $\text{SiO}_2$  热液流走。

广东信宜玉和广西陆川玉同属蛇纹石玉，而且二者地理位置相距很近，都处于粤桂两省交界的云开大山地区，因此二者成矿机理应有很大相似性。李娟<sup>[9]</sup>对信宜玉样品进行了岩石矿物学分析，发现信宜玉的主要矿物成分是叶蛇纹石、纤蛇纹石和利蛇纹石，而本研究在陆川玉中未发现利蛇纹石，但也有可能是本研究中样品数量较少，因此未能发现含利蛇纹石的陆川玉样品。关崇荣等研究了信宜玉矿床地质特征，认为信宜玉是富镁质岩石深变质而成，属于富镁质碳酸盐型蛇纹石矿<sup>[10]</sup>，陆川蛇纹石是由

白云质大理岩热液交代作用形成，也属于富镁质碳酸盐型蛇纹石矿。此结论与本文的推断是一致的，但二者的异同还需要对广东信宜玉进一步研究。

#### 4 激光拉曼光谱在蛇纹石玉鉴定中的应用

蛇纹石( $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ )是三八面体式的层状硅酸盐矿物，由“氢氧镁石”八面体片与  $[\text{SiO}_4]$  四面体片的六方网片按 1:1 结合构成结构单元层。由于四面体片的  $[\text{SiO}_4]$  六方网中  $\text{O}-\text{O}$  的平移周期与“氢氧镁石”片中  $\text{O}(\text{OH})-\text{O}(\text{OH})$  的平移周期不同，因而两个基本单位层之间不协调。理想的四面体片中， $b = 0.915 \text{ nm}$ ；理想的八面体片中， $b = 0.945 \text{ nm}$ 。 $a$  轴方向也表现出差异，从而出现了克服这种不协调的三种基本方式，蛇纹石矿物也相应形成三个矿物种，即板状结构的利蛇纹石、管状结构的纤蛇纹石和交替波形弯曲结构的叶蛇纹石<sup>[11]</sup>。三种蛇纹石由于结构的差异，其激光拉曼光谱存在一些区别，因此可以采用拉曼光谱快速鉴定蛇纹石的种类<sup>[12]</sup>。

由拉曼光谱分析结果可以看出，叶蛇纹石的拉曼特征峰位于  $229$ 、 $376$ 、 $457$ 、 $686$  和  $1046 \text{ cm}^{-1}$  处，纤蛇纹石的特征峰位于  $228$ 、 $346$ 、 $386$ 、 $624$ 、 $690$  和  $1102 \text{ cm}^{-1}$  处。Rinaudo 等没有检测到位于  $457 \text{ cm}^{-1}$  的叶蛇纹石特征峰<sup>[4]</sup>，而 Groppo 等观测到该特征峰<sup>[12]</sup>，但却未用于区分叶蛇纹石和纤蛇纹石。而且纤蛇纹石位于  $346 \text{ cm}^{-1}$  处的特征峰在叶蛇纹石的拉曼光谱中未出现，因此可以通过纤蛇纹石位于  $346$ 、 $690$  和  $1102 \text{ cm}^{-1}$  处的特征峰以及叶蛇纹石位于  $457$ 、 $686$  和  $1046 \text{ cm}^{-1}$  处的特征峰来区分二者，而不是仅仅通过位于  $686 \text{ cm}^{-1}$  的  $\text{Si}-\text{O}_b-\text{Si}$  对称伸缩振动和位于  $1047 \text{ cm}^{-1}$  的  $\text{Si}-\text{O}_b-\text{Si}$  反对称伸缩振动来区分二者。

#### 5 结语

无损分析结果表明，广西陆川蛇纹石玉的主要矿物成分是纤蛇纹石和叶蛇纹石，其成矿机理为白云质大理岩的热液交代作用，由于伴生方解石与蛇纹石形成的穿插交织结构，因此降低了其玉石等级。此外通过拉曼光谱可以快速鉴定陆川蛇纹石中两种不同结构的蛇纹石亚种——纤蛇纹石和叶蛇纹石。陆川蛇纹石玉的这些岩石矿物学特征将为陆川蛇纹石玉的开发提供一定的理论基础，并为以后蛇纹石玉的研究提供有益的数据资料，而且由于本文采用的是无损分析方法，因此这些结论可以为古代玉器的分析提供科学依据。

**致谢:**感谢中国科学院上海光学精密机械研究所李青会副研究员提供陆川蛇纹石玉样品。感谢复旦大学承焕生教授在 PIXE 测量中的指导与帮助,感谢马波老师在实验中提供的支持与帮助。

## 6 参考文献

- [1] 王时麒,赵朝红,于光,员雪梅,段体玉. 中国岫岩玉 [M]. 北京:科学出版社,2007: 46–51.
- [2] 邹天人,郭立鹤,於晓晋. 中国主要玉石类型及产地 [J]. 矿床地质,1996, 15(Z1): 79–92.
- [3] Cheng H S, Zhang Z Q, Zhang B, Yang F J. Non-destructive analysis and identification of jade by PIXE [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2004, 219–212: 30–34.
- [4] Rinaudo C, Gastaldi D, Belluso E. Characterization of chrysotile, antigorite and lizardite by FT-Raman spectroscopy [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2003, 41: 883–890.
- [5] Kloporgge J T, Frost R L, Rintoul L. Single crystal Raman microscopic study of the asbestos mineral chrysotile [J]. *Physical Chemistry*, 1999, 1: 2559–2564.
- [6] 罗红宇,王春生,廖尚宜. 宝石中常见过渡金属离子致色的理论解释 [J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 19(6): 177–181.
- [7] Hess H H, Smith R J, Dengo G. Antigorite from the vicinity of Caracas, Venezuela [J]. *American Mineralogist*, 1952, 6: 68–75.
- [8] Vyasa Rao A N, Murty M S. A study of the serpentinisation in the Vempalle dolomitic limestones near Pulivendala, Cuddapah District [J]. *Journal of Earth System Science*, 1980, 1: 17–22.
- [9] 李娟. 南方玉 [J]. 广东有色金属地质, 1999 (1): 49–50.
- [10] 关崇荣,陈宇. 广东省信宜市南方玉矿矿床地质特征 [J]. 西部探矿工程, 2005(12): 152–153.
- [11] 赵珊茸. 结晶学及矿物学 [M]. 北京:高等教育出版社, 2004: 372–374.
- [12] Groppo C, Rinaudo C, Cairo S, Gastaldi D, Compagnoni R. Micro-Raman spectroscopy for a quick and reliable identification of serpentine minerals from ultramafics [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2006, 18: 319–329.

欢迎订阅

欢迎投稿

欢迎刊登广告

《分析试验室》技术期刊

国内统一刊号: CN 11-2017/TF

国际标准刊号: ISSN 1000-0720

国内邮发代号: 82-431

国外代号: M848

国际刊名代码 CODEN: FENSE4

广告经营许可证: 京西工商广字第 0441 号

《分析试验室》是中文核心期刊,月刊,大 16 开,128 页,国内外公开发行。

《分析试验室》1982 年创刊,目前已成为我国著名的分析化学专业刊物。影响遍及冶金、地质、石油化工、环保、药物、食品、农业、商品检验和海关等社会各行业及各学科领域。《分析试验室》以突出创新性和实用性为办刊宗旨,作者来自全国各行业的生产、科研第一线;已被列为全国中文核心期刊、中国科技论文统计用期刊、美国“CA 千种表”中我国化学化工类核心期刊、中国学术期刊(光盘版)和中国期刊网全文数据库等国内外多家检索数据库、文摘收录,影响因子连续多年列化学类前列。本刊常设“研究报告”、“研究简报”、“仪器装置与设备”等栏目。“定期评述”栏目系统发布特邀知名专家学者撰写的国内外分析化学各领域的综合评述,连续跟踪学术发展前沿。“国际会议”栏目每期介绍影响广泛的分析化学领域国际学术交流会议。

2013 年《分析试验室》每期定价 18 元,全年 12 期,216 元。

全国各地邮局征订,邮发代号 82-431。漏订的读者可直接与编辑部联系。

编辑部地址:北京西城区新街口外大街 2 号(邮政编码 100088)

工作电话: 010-82013328

E-mail: analysislab@263.net; ana-info@263.net