

海纹石的宝石学特征及致色机理研究

张曼

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年4月29日; 录用日期: 2026年6月11日; 发布日期: 2026年7月8日

摘要

海纹石是一种仅产于多米尼加的稀有宝石, 属于含铜的针钠钙石, 其外观以蓝色与白色交织而成的典型“龟背纹”为特征, 颜色主要呈现为天蓝色、浅蓝色、蓝绿色及乳白色。为探究其宝石学特征及致色机理, 文章综合采用常规宝石学仪器及大型测试设备(包括紫外-可见分光光度计、傅里叶变换红外吸收光谱仪、X射线荧光光谱仪及激光拉曼光谱仪)进行分析。结果表明: 海纹石的颜色主要受铜离子控制, 其浓度直接决定了蓝色调的深浅; 铁离子影响蓝色的呈现, 钒离子主导绿色色调, 而蓝绿色调则是由铜离子与钒离子共同作用所致; 此外, 锰离子对海纹石颜色也有一定贡献。

关键词

海纹石, 致色机理, 宝石学特征, 颜色

Study on the Gemological Characteristics and Color-Causing Mechanism of Larimar

Man Zhang

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: April 29, 2026; accepted: June 11, 2026; published: July 8, 2026

Abstract

Larimar is a rare gemstone exclusively mined in the Dominican Republic. It is a copper-bearing variety of pectolite, typically characterized by a distinctive “tortoiseshell” pattern composed of alternating blue and white bands, with colors ranging from sky blue and light blue to bluish-green and milky white. To investigate its gemmological characteristics and color genesis, this study employed conventional

gemological testing together with advanced analytical techniques, including ultraviolet-visible (UV-Vis) spectrophotometry, Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, X-ray fluorescence (XRF) spectrometry, and laser Raman spectroscopy. The results indicate that the color of larimar is primarily controlled by copper ions (Cu^{2+}), whose concentration directly determines the intensity of the blue hue. Iron ions (Fe^{3+}) influence the blue coloration, while vanadium ions ($\text{V}^{4+}/\text{V}^{5+}$) are mainly responsible for the greenish tint. The bluish-green color results from the combined effect of copper and vanadium ions. In addition, manganese ions (Mn^{2+}) also contribute to the coloration of larimar.

Keywords

Larimar, Color-Causing Mechanism, Gemological Characteristics, Color

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海纹石，是一种独特的宝石，因其深邃、清澈、浪漫、优美的特性而广受喜爱[1]。由于含有微量元素，其外观呈现天蓝色，并伴有不规则的块状纹理，形成独特的龟背花纹，呈现出深浅不一的蓝色调。海纹石以天蓝色与乳白色交织、形似“龟背纹”者价格最优，但并非仅有天蓝色，还包括浅蓝、蓝绿、乳白等多种颜色[2]。从目前的资料与信息来看，海纹石的矿物组成及宝石学特征已有较为系统的研究，部分学者亦针对商业价值较高的天蓝色海纹石开展了微量元素分析[3]-[5]，但关于浅蓝色、蓝绿色、蓝白色等其他蓝色色调的致色机理，目前仍缺乏深入探讨。因此，本文针对海纹石的宝石学特征和致色机理进行研究，通过常规宝石学仪器和大型仪器测试，分析总结出不同蓝色色调海纹石的致色机理。

2. 海纹石的基本宝石学特征

本研究的海纹石样品以蓝色至蓝白色调为主，透明度介于透明至不透明之间，表面具有典型的玻璃光泽。在色泽较深的蓝色区域，可见白色脉状、块状斑点以及放射状斑纹分布，局部区域还伴有红褐色杂质。所有样品依次编号为：AL-1、AL-2、AL-3、AL-4、AL-5、AL-6。

图 1 显示了不同颜色海纹石的特征：AL-1：蓝绿色。表面呈玻璃光泽，整体呈块状，棱角明显，透明程度由半透明向不透明过渡。颜色呈蓝绿色 - 深蓝色且颜色分界明显，可以清晰观察到深蓝色区域主要集中在样品的一侧边缘，且夹杂着白色的条带纹。样品表面存在不规则裂隙，且裂缝处分布着呈树枝状的黄褐色杂质；AL-2：样品整体为颜色浓度不同的深蓝色。抛光面为玻璃光泽，整体呈块状，不透明，棱角不明显，样品表面大部分都分布着白色细斑点且边界清晰；AL-3：蓝白色。抛光面整体为玻璃光泽，部分区域出现丝绢光泽，呈块状，棱角不明显，透明度相对较好。在样品的边缘一侧有两条定向发育的裂隙；AL-4：天蓝色。表面具有玻璃光泽，呈块状，透明度较差，棱角不明显。其表面分布着许多清晰的蓝白相间纹理，蓝色部分在白色基底中呈放射状展开，构成了海纹石典型的“龟背纹”特征；AL-5：白色。抛光面呈现玻璃光泽，呈块状，透明度较差，棱角不明显。表面分布着许多大小不一的细小透明颗粒，且裂隙较为发育；AL-6：颜色由无色向蓝色过渡，且色带分界明显。抛光面具有玻璃光泽，呈块状，透明度在六个样品中最佳，棱角不明显。样品一侧边缘浸染有不规则的黄褐色

杂质，并伴有鳞片状白色斑点分布。

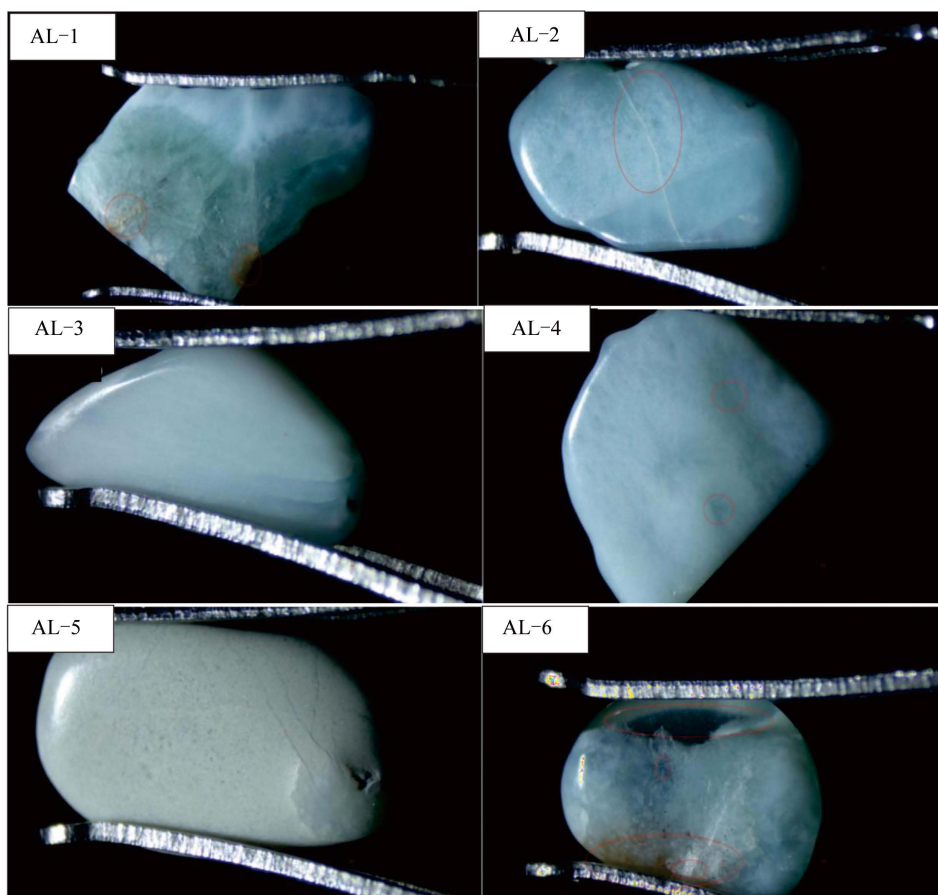


Figure 1. Larimar samples with different colors
图 1. 不同颜色的海纹石样品

Table 1. Basic gemmological characteristics of larimar
表 1. 海纹石的基本宝石学特征

编号	颜色	光泽	透明度	折射率	相对密度
样品 1	蓝绿色	玻璃光泽	半透明 - 不透明	1.61	2.741
样品 2	深蓝色	玻璃光泽	不透明	1.60	2.882
样品 3	蓝白色	玻璃光泽 - 丝绸光泽	半透明 - 不透明	1.60	2.750
样品 4	蓝色	玻璃光泽	不透明	1.62	2.785
样品 5	白色	玻璃光泽	不透明	1.61	2.743
样品 6	无色 - 蓝色	玻璃光泽	透明 - 不透明	1.62	2.776

海纹石样品的颜色分别呈现蓝绿色、深蓝色、蓝白色、天蓝色、白色、无色 - 蓝色。在蓝色较深的区域，清晰可见白色脉状、放射状斑纹及块状斑块穿插其间，构成了典型的“龟背纹”结构。该结构的主要特征为：白色区域在蓝色基底中呈放射状展开。海纹石的折射率一般为 1.60~1.62，表面通常呈现玻璃光泽，局部可见丝绸光泽；相对密度普遍在 2.74~2.90 之间。在紫外光照射下，海纹石在长波紫外光下普遍

呈现微弱的蓝白色荧光；但在短波紫外光照射下表现出明显差异——蓝色调区域无荧光反应，而白色调区域则发出红色荧光。这表明海纹石在吸收或反射特定波长光线时具有显著的选择性。由此推测，海纹石的蓝色调越深，其致色元素含量越高，且该致色元素在紫外荧光灯下呈惰性。此外，海纹石的摩氏硬度约为 5~6，本次测试所得的各项宝石学特征与前人研究结果基本一致[6]。综上所述为表 1。

3. 海纹石的谱学特征分析

本次谱学特征实验、红外光谱实验、拉曼光谱实验，以及 X 射线荧光光谱仪测试，均在滇西应用技术大学珠宝学院珠宝质检中心的大型仪器宝石实验室完成。1) 谱学特征实验：采用的设备型号为 GEM-3000 紫外-可见光光谱仪(Ultraviolet-Visible Spectrometer)，测试条件为室温 20℃~25℃，湿度 < 65%。主要使用反射法分别对海纹石样品 AL-1、AL-2、AL-3、AL-4、AL-5、AL-6 进行测试。该光谱图横坐标代表波长，单位为 cm^{-1} ，区间为 200 cm^{-1} ~ 1000 cm^{-1} ，纵坐标代表反射率，区域为 0%~100%。2) 红外光谱实验：采用的设备型号为 Nicolet is5 傅里叶红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectrometer)，测试条件为室温 20℃~25℃，湿度 < 65%，扫描范围为 400 cm^{-1} ~ 4000 cm^{-1} ，分辨率为 8 cm^{-1} ，扫描次数为 8 s，校正为 Kramers-Kronig，增益为 1。使用反射法作为测试方法，将样品 AL-1、AL-2、AL-3、AL-4、AL-5、AL-6 颜色显著的点位进行多次傅里叶红外光谱测试，以便准确分析海纹石的组成成分是否会影响到海纹石的颜色。该光谱图横坐标代表波长，单位为 cm^{-1} ，区间为 0 cm^{-1} ~ 4000 cm^{-1} ，纵坐标代表反射率，区域为 0%~1.0%。3) 拉曼光谱实验：仪器为激光拉曼光谱仪，仪器型号为 zolix 300i，激光器为 532 nm、785 nm，扫描范围为 100 cm^{-1} ~ 1000 cm^{-1} 。该光谱图横坐标表示波长，区域为 0 cm^{-1} ~ 1000 cm^{-1} ，纵坐标表示吸收强度，区域为 0~20,000。实验挑选了 6 颗具有明显颜色差异的海纹石样品(AL-1, AL-2, AL-3, AL-4, AL-5, AL-6)，分别选取各样品颜色特征最显著的点位进行测试，以分析其物质组成成分。4) X 射线荧光光谱仪测试：仪器型号为 ARLQuantX，在正常大气环境下进行。测试过程设置了 Low Zc、Mid Za、Mid Zb 和 Mid Zc 四种模式，单次扫描时间为 100 秒。实验同样针对上述 6 颗颜色各异的海纹石样品，利用四种模式分别对其不同颜色区域进行了元素分析。结果表明，四种模式下检测出的元素种类并无显著差异。为保证数据的准确性与可读性，最终选取六颗样品在 Mid Zb 模式下获取的、谱峰清晰明确的测试结果进行深入研究，以此准确判定海纹石的基体元素组成，并探讨影响其颜色差异的微量元素。

3.1. 紫外-可见光分光光度计测试

如图 2 所示，海纹石样品 AL-1、AL-2、AL-3 和 AL-4 在 697 nm 处表现出最明显的吸收特征，并在 500~800 nm 范围内呈现宽吸收带。由于该波段涵盖了可见光谱中的黄光与红光区域，根据颜色互补原理，这四颗样品因对黄、红光产生选择性吸收，整体呈现出蓝色。相比之下，AL-5 和 AL-6 样品在 400~800 nm 可见光范围内的吸收峰整体趋势较为一致，未见强烈的吸收特征。其中，AL-6 仅在 600~800 nm 范围内存在一条微弱的宽吸收带。由于 400~800 nm 覆盖了从紫、蓝、绿到黄、橙、红的整个可见光谱，结合颜色互补原理推断，AL-5 样品应呈现白色；而 AL-6 样品则因对长波段的微弱吸收，呈现出带有蓝色调的白色或近无色状态。

海纹石的蓝色与以 Cu 为主的过渡金属元素相关[7]-[9]。Cu²⁺的致色机制是其外层 3d 轨道电子跃迁产生光的吸收所致，Cu²⁺外层的 3d 轨道在[SiO₄]⁴⁻中的影响下发生能级分裂，分裂成两个轨道，Cu²⁺外层的 9 个价电子分布在这些能级分裂的轨道上，其对应的电子跃迁在可见光区域只对应一处明显的吸收，对应的光子能量为 1.94 eV [10]。据相关研究，海纹石最强吸收峰一般出现在 641 nm 左右，此峰对应光子能量为 1.94 eV，主要为 Cu²⁺致色[11]。但在蓝绿色-蓝色调的样品(AL-1, AL-2, AL-3, AL-4)的海纹石测试中，样品大部分多在 500 nm~700 nm 附近，但吸收强度最明显的峰谱分布在 650 nm~690 nm，蓝绿

色、蓝白色、蓝色样品也会在 697 nm 附近出现强吸收。蓝绿色 - 蓝色的样品(AL-1, AL-2, AL-3, AL-4)位于 500 nm~700 nm 处也有相应的吸收峰, 所对应的光子能量都普遍小于 1.94 eV。根据相关研究 Fe、V、Cr、Mn 等元素, 光子能量小于 1.94 eV [11]-[13]因此认为海纹石的蓝绿色 - 蓝色除了 Cu 元素的影响外, 还有其他微量元素如: Fe、V、Cr、Mn 等元素对海纹石的不同颜色也会造成影响[14]。

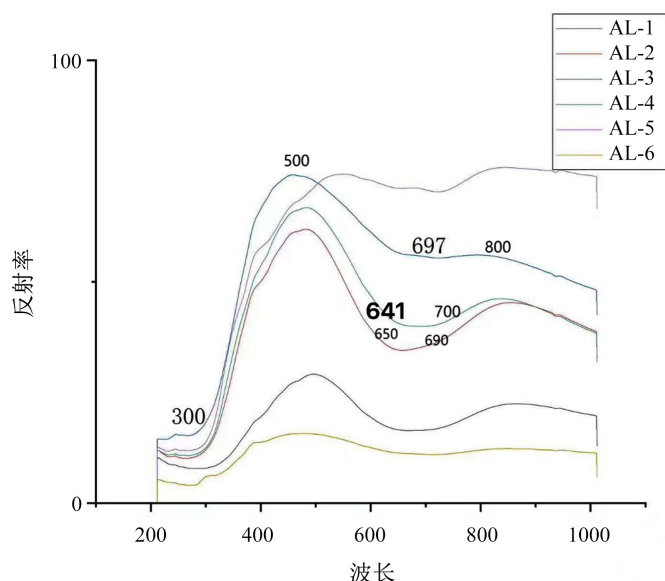


Figure 2. UV-V is absorption spectra of larimar samples with different colors
图 2. 不同颜色海纹石紫外 - 可见吸收光谱特征

3.2. 傅里叶红外光谱测试

测试结果如图 3 所示, 海纹石蓝色调样品(AL-1, AL-2, AL-3, AL-4, AL-6)在 410 cm^{-1} 、 472 cm^{-1} 、 510 cm^{-1} 、 678 cm^{-1} 、 923 cm^{-1} 、 963 cm^{-1} 、 993 cm^{-1} 和 1057 cm^{-1} 处出现较为明显的红外吸收峰, 而白色(AL-5)以及无色 - 蓝色(AL-6)海纹石样品在 410 cm^{-1} 、 1484 cm^{-1} 、 642 cm^{-1} 、 679 cm^{-1} 、 883 cm^{-1} 、 928 cm^{-1} 、 962 cm^{-1} 、 987 cm^{-1} 和 1062 cm^{-1} 出现明显的振动吸收峰。其中 AL-1、AL-2、AL-3、AL-4、AL-6 的红外移动吸收峰位的吸收强度在 1090 cm^{-1} 和 1500 cm^{-1} 范围内差异较大, 而在 400 cm^{-1} 和 4000 cm^{-1} 范围内却高度相似没有表现出太大差别。AL-1、AL-2、AL-3、AL-4、AL-6 在 1380 cm^{-1} 出现较弱的吸收峰, 其中 AL-5、AL-6 部分还在 1500 cm^{-1} 处有小宽吸收带。AL-2 在 1055 cm^{-1} 和 932 cm^{-1} 处均表现出明显的吸收峰, 且整体呈现出具有特定规律的吸收强度递减形态。AL-3 在 912 cm^{-1} 、 1050 cm^{-1} 、 990 cm^{-1} 附近也表现出相似的强度递减规律。相比之下, AL-2 和 AL-3 在上述吸收峰处的强度较其他海纹石样品偏弱。尽管它们的谱图整体轮廓十分相似, 但吸收强度的差异间接表明两者在内部结构上存在微妙区别。此外, AL-5 的光谱特征较为特殊, 仅在 470 cm^{-1} 、 1380 cm^{-1} 、 1500 cm^{-1} 、 2919 cm^{-1} 处具有明显的吸收峰, 而在其他波数范围内的吸收强度均十分微弱。

根据 Hammer 的理论计算[3] [10], 海纹石在 1100 cm^{-1} 和 1400 cm^{-1} 附近的吸收峰是由 OH 基团的弯曲振动引起的。在 900 cm^{-1} ~ 1100 cm^{-1} 波数区间内, Si-O-Si 键的非对称伸缩振动导致了该区域的吸收; 而在 500 cm^{-1} ~ 700 cm^{-1} 区间, 吸收带则源于 Si-O-Si 键的对称伸缩振动。此外, 400 cm^{-1} ~ 500 cm^{-1} 范围内的吸收峰是由 Si-O-Si 键的弯曲振动所形成的。海纹石白色部分的吸收峰出现在 710 cm^{-1} 、 883 cm^{-1} 处, 这是由方解石中 O-C-O 键的弯曲振动引起的; 而在 1380 cm^{-1} 、 1500 cm^{-1} 附近出现的吸收峰, 则是由方

解石中 C-O 键的不对称伸缩振动引起的[11] [15]。将本次实验所测数据与参考资料对比可知,海纹石在 473 cm^{-1} 、 648 cm^{-1} 、 932 cm^{-1} 、 1065 cm^{-1} 、 1090 cm^{-1} 处的吸收峰是由 Si-O-Si 键的振动引起的,这证实了海纹石的主要成分为硅酸盐;而 1380 cm^{-1} 、 1500 cm^{-1} 处的吸收峰则确证了方解石的存在。进一步对 AL-1 至 AL-5 样品的测试数据进行分析发现,AL-1 和 AL-2 的光谱中几乎不存在由方解石引起的吸收峰;相比之下,AL-3 和 AL-5 的光谱中均出现了 710 cm^{-1} 和 1380 cm^{-1} 附近的吸收峰,表明其中含有方解石。由此可以推测,海纹石中方解石含量的多少,可能会对其蓝色的深浅产生影响。

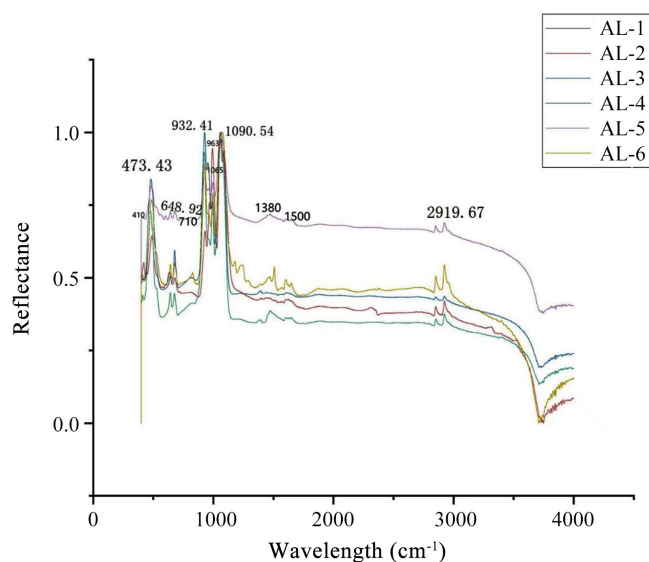


Figure 3. Fourier-transform infrared (FTIR) spectra of larimar samples of different colors
图 3. 不同颜色海纹石样品的傅里叶红外光谱图

3.3. 激光拉曼光谱测试

测试结果如图 4 所示,蓝色调的海纹石样品(AL-1, AL-2, AL-3, AL-4, AL-6)和白色海纹石样品(AL-5)展现的拉曼吸收峰有所差别。白色海纹石(AL-5)在光特定的波段下(如 650 cm^{-1} 、 720 cm^{-1} 、 973 cm^{-1} 、 1024 cm^{-1}),呈现出显著的拉曼吸收峰,而蓝色样品(AL-1, AL-2, AL-3, AL-4, AL-6)在 650 cm^{-1} 、 975 cm^{-1} 、 1024 cm^{-1} 等位置出现较明显的拉曼吸收峰,表明了海纹石蓝色和白色部分是由曲振不同的矿物组成,这与傅里叶红外可见光光谱分析结果是一致的。所测海纹石样品普遍在 650 cm^{-1} 、 973 cm^{-1} 、 1024 cm^{-1} 左右出现较强的吸收。其中, 973 cm^{-1} 和 1024 cm^{-1} 的吸收峰是由针钠钙矿物中具有 Si-O 的伸缩振动所致; 650 cm^{-1} 位置的吸收峰则是由针钠钙石中 Si-O-Si 的弯曲振动造成;在 1086 cm^{-1} 附近的拉曼散射峰,是由方解石中 C-O 键的对称伸缩振动引起的,这也表明了海纹石白色部分含有方解石成分。

综合以上分析可知,海纹石在拉曼光谱中的大部分吸收峰是由 Si-O-Si 键的振动引起的。结合杨满珍的研究[16],海纹石(针钠钙石)的化学式为 $\text{NaCa}_2[\text{Si}_3\text{O}_8(\text{OH})]$,再辅以红外光谱数据的印证,充分证明了海纹石是一种硅酸盐矿物。此外,AL-5 的吸收峰是由 C-O 引起的,证明了白色海纹石中含有方解石的存在。另一方面,根据李海波的研究,拉曼光谱中谱峰的尖锐程度与矿物的结晶程度密切相关:谱带越窄、吸收峰越尖锐,表明矿物的结晶程度越完全。在本次所选的海纹石样品中,拉曼光谱普遍呈现出明显且狭窄的吸收峰;这些峰值异常尖锐且集中,表明其内部针钠钙石的结晶程度十分紧密。

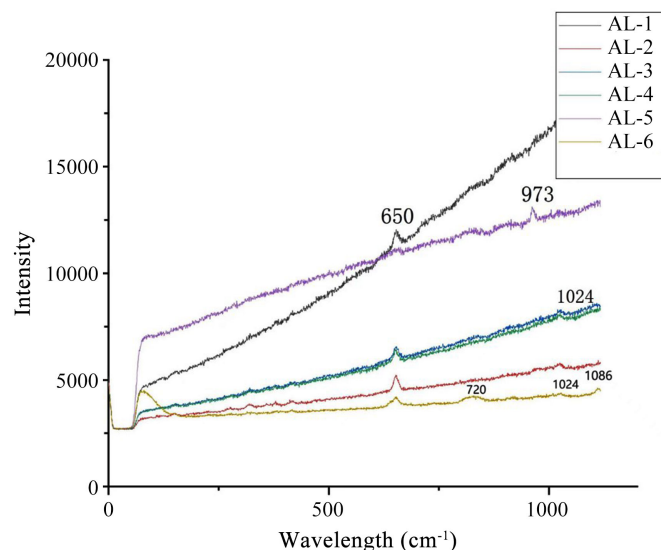


Figure 4. Laser Raman spectroscopic characteristics of larimar samples exhibiting different colors
图 4. 不同颜色海纹石的激光拉曼特征

3.4. X-射线荧光光谱测试

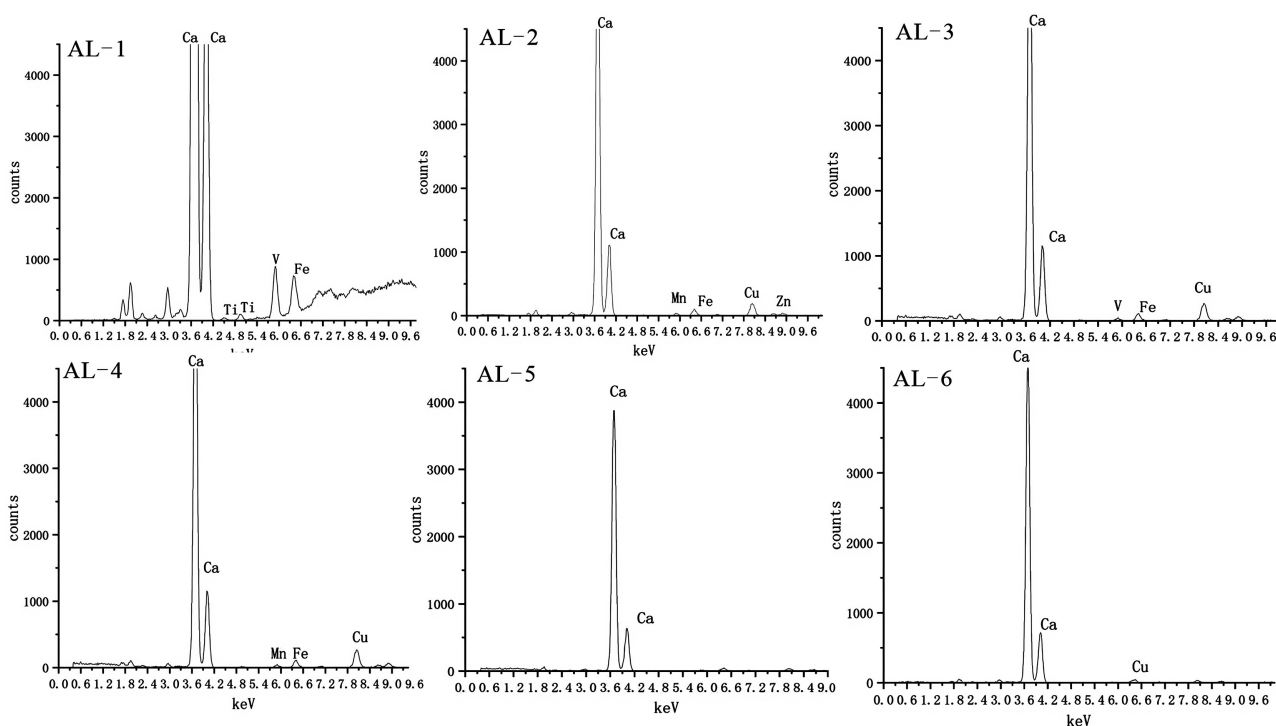


Figure 5. X-ray fluorescence (XRF) spectra of larimar samples showing different colors
图 5. 不同颜色海纹石 X-射线荧光光谱特征

测试结果如图 5 所示, 可知海纹石中除含有大量的 Ca、Si 等主量元素外, 还含有 Mn、Fe、Ti、V 等微量元素[17]。由于海纹石的主要矿物成分为针钠钙石, 因此 Ca 和 Si 元素的含量显著偏高。综合分析蓝色调明显的样品(AL-2、AL-3、AL-4、AL-6)的谱图可以发现, 这些样品中均有 Cu 元素的参与。结合紫

外-可见吸收光谱的实验结果,可以推测 Cu 元素是导致海纹石呈现蓝色的主要原因。值得注意的是,AL-3 样品中的 Cu 元素含量低于 AL-2,但其蓝色深度却不及 AL-2,由此推测 Cu 元素含量的多少会直接影响海纹石蓝色的深浅;同时,结合拉曼光谱数据可知,方解石含量的多少也会对海纹石蓝色的浓度产生影响。对于 AL-1 样品,除 Ca、Si 等主量元素外,还含有少量的 Ti、V、Mn、Fe 等微量元素。根据石桂华的研究,Fe 含量的变化会影响宝石蓝色的深浅、色度与浓度[18];高洁的研究也证实,Fe³⁺可导致宝石颜色在蓝、绿、黄等色调之间发生转变[19]。结合本次紫外-可见吸收光谱的实验结果与前人研究,推测海纹石的蓝绿色调可能是由 V 和 Fe 共同致色的。此外,白色海纹石样品 AL-5 中除主量元素外,未检出其他明显的微量元素。结合紫外-可见吸收光谱与拉曼光谱的测试结果,可判定其白色部分主要由方解石构成。另外,韩颖慧等人的研究表明,当锰以类质同像取代钙时,会在针钠钙石晶格中形成针钠锰石,并使矿物呈现粉红色[15][20]。因此, Mn 元素的存在同样可能会对针钠钙石的颜色产生影响[21]。

4. 结论

1) 海纹石的透明度介于半透明至不透明之间,透明度较差。表面呈现出玻璃光泽。其常规物理参数如下:折射率通常在 1.60~1.62 之间,密度约为 2.74~2.90 g/cm³,莫氏硬度为 4.5~5。在紫外荧光测试中,短波紫外光下,蓝色调明显的海纹石通常无荧光反应;而在长波紫外光下,无论颜色深浅,均会呈现出微弱且均匀的蓝白色荧光。

2) 在紫外-可见吸收光谱的 500~800 nm 范围内,海纹石的蓝色部分呈现出较宽的吸收带;而蓝绿色海纹石在 500~700 nm 区间内同样存在吸收峰。由于该区间吸收峰对应的光子能量通常小于 1.94 eV (Cu),表明除了铜元素外,铁元素、钒元素、铬元素、锰元素等微量元素也会对海纹石的颜色也会造成影响。海纹石最终呈现出来的颜色是这些元素彼此间复杂相互作用的残余颜色。

3) 海纹石实质上是一种硅酸盐矿物。傅里叶红外光谱与激光拉曼光谱的测试结果表明,其大部分主要吸收峰是由 Si-O-Si 键的振动引起的,这证实了海纹石的主要化学成分为 SiO₂、Na₂O 和 CaO。此外,光谱中出现的由 C-O 键振动引起的吸收峰,进一步证明了海纹石的白色部分含有方解石成分。

4) 海纹石中铜、钒是其产生蓝绿色调的主要成分。X 射线荧光光谱分析表明,钙和硅是海纹石中含量最高的主量元素,而铜和钒则是导致其颜色深浅不一的重要因素。其中,铜元素的含量主要决定了海纹石蓝色的深浅;随着钒元素含量的增加,海纹石的绿色调逐渐增强。在铜与钒的共同作用下,海纹石呈现出多样的蓝-绿色相。此外,铁元素对海纹石的颜色也有一定影响;当锰以类质同像形式取代钙时,会使矿物呈现粉红色,表明锰元素对海纹石颜色也有一定的影响。

参考文献

- [1] Lizzadro, J. (1987) The Interesting Story of a New Blue Gemmaterial Called Larimar. Lizzadro Museum, 13-14.
- [2] 马志飞. 海纹石——将大海捧在手心[J]. 北方人, 2018(3): 48-49.
- [3] Hammer, V.M.F., Libowitzky, E. and Rossman, G.R. (1998) Single-Crystal IR Spectroscopy of Very Strong Hydrogen Bonds in Pectolite, NaCa₂[Si₃O₈(OH)], and Serandite, NaMn₂[Si₃O₈(oh)]. *American Mineralogist*, **83**, 569-576.
- [4] 郑晨, 尹作为, 殷科, 等. “海纹石”的矿物学及谱学特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(7): 1977-1981.
- [5] 汪建明. 一种稀少的宝石——蓝色针钠钙石[J]. 地质学刊, 2010, 34(3): 295-299.
- [6] 谢意红. 多米尼加蓝色宝石 Larimar 的宝石学研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2010, 12(2): 7-10+59.
- [7] Bencini, A., Benelli, C., Caneschi, A., Carlin, R.L., Dei, A. and Gatteschi, D. (1985) Crystal and Molecular Structure of and Magnetic Coupling in Two Complexes Containing Gadolinium(III) and Copper(II) Ions. *Journal of the American Chemical Society*, **107**, 8128-8136. <https://doi.org/10.1021/ja00312a054>
- [8] 佟景贵, 张娜. 新型宝石品种——拉力玛(Larimar) [J]. 中国宝玉石, 2010(3): 111-113.
- [9] 彭立华, 秦善. 海纹石的宝玉石矿物学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(S2): 55-60.

-
- [10] Arakcheeva, A., Pattison, P., Meisser, N., Chapuis, G., Pekov, I.V. and Thélin, P. (2007) New Insight into the Pectolite-Serandite Series: A Single Crystal Diffraction Study of $\text{Na}(\text{Ca}_{1.73}\text{Mn}_{0.27})[\text{HSi}_3\text{O}_9]$ at 293 and 100 K. *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, **222**, 696-704. <https://doi.org/10.1524/zkri.2007.222.12.696>
- [11] 孙逸天. 蓝色调海纹石成分与颜色的关系[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [12] Kruger, F.J. (1980) The Occurrence of Cebollite in Kimberlite and Included Zeolitized Crustal Xenoliths. *Mineralogical Magazine*, **43**, 583-586. <https://doi.org/10.1180/minmag.1980.043.329.04>
- [13] 朱政源, 董凌峰, 于航, 等. 海绿石的成因与应用[J]. 科技创新与应用, 2015(33): 16-18.
- [14] Zhou, D., Lu, T. and Zhang, J. (2021) Study on the Correlation between Trace Elements and Colorimetric Parameters of Natural Blue Sapphire. *Color Research & Application*, **47**, 691-696. <https://doi.org/10.1002/col.22755>
- [15] 韩颖慧. 多米尼加海纹石宝石矿物学特征及致色原因研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [16] 杨满珍. 几种蓝色宝玉石材料的宝石学特征对比研究[J]. 中国宝玉石, 2018(3): 116-119.
- [17] 姜涛, 郑娅娜. 浅谈如何应对 X 射线荧光光谱检测中产生的射线危害[J]. 中国战略新兴产业, 2018(20): 156.
- [18] 石桂华. 天然与合成品红、蓝宝石的鉴别特征[J]. 矿床地质, 1996, 15(S1): 120-121.
- [19] 高洁. 绿松石呈色机理实验与论证[J]. 超硬材料工程, 2008, 20(1): 58-62.
- [20] 方蝶. 锰原子和一价离子高激发态能级的超精细结构常数研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [21] 蔡元峰, 等. Mn^{2+} 和 Fe^{3+} 的致色作用: 来自意大利白垩纪远洋红色灰岩的启示[J]. 地质学报, 2008, 82(1): 133-138.