

南流江玉的宝石矿物学特征及致色成因

周正林

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年3月19日; 录用日期: 2026年5月7日; 发布日期: 2026年5月15日

摘要

南流江玉是产自广西合浦南流江流域的特色石英质玉石, 主要分为带红色环带的微透明品种和草花状纹理不透明品种, 近年来凭借其独特的外观备受收藏界关注。本文采用偏光显微镜、折射仪、偏光显微镜、傅里叶变换红外光谱仪、激光拉曼光谱仪及紫外-可见光光谱仪等测试方法对南流江玉的矿物组成及致色成因开展研究。研究表明, 南流江玉的矿物为 α -石英, 有少量赤铁矿和针铁矿, 整体呈致密块状构造。为了进一步研究其矿物组成和致色成因, 对其微观结构进行观察, 两类样品的石英颗粒形态存在显著差异, 其中红色环带型样品的石英呈纤维状结构, 纤维长度为30~300 μm ; 草花型样品的石英则呈粒状等粒结构, 晶粒大小为10~100 μm 。红外光谱显示1184 cm^{-1} 、1105 cm^{-1} 、796 cm^{-1} 、779 cm^{-1} 、688 cm^{-1} 、533 cm^{-1} 、478 cm^{-1} 等特征吸收峰与 α -石英的标准特征峰高度吻合。激光拉曼光谱分析表明, 红色环带型样品在498 cm^{-1} 处出现赤铁矿($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)的特征峰, 同时在237 cm^{-1} 、405 cm^{-1} 处检测到针铁矿($\alpha\text{-FeOOH}$)的特征峰, 证实其由赤铁矿与针铁矿共同致色; 草花形样品则在238 cm^{-1} 、545 cm^{-1} 、683 cm^{-1} 出现特征峰, 其致色矿物以针铁矿与纤铁矿($\gamma\text{-FeOOH}$)为主, 赤铁矿($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)为次要致色矿物。紫外-可见光光谱显示, 所有样品均在380 nm、450 nm处出现 Fe^{3+} 的特征吸收峰, 证实了铁离子为南流江玉的核心致色离子。本文系统阐明了南流江玉的宝石矿物学特征与致色机制, 其属典型的矿物致色型石英质玉, 不同外观类型样品的致色矿物组合及微观结构存在显著分异。

关键词

南流江玉, 石英质玉, 宝石矿物学特征, 致色成因, 铁氧化物

Gemological and Mineralogical Characteristics and Coloration Mechanism of Nanliujiang Jade

Zhenglin Zhou

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

Received: March 19, 2026; accepted: May 7, 2026; published: May 15, 2026

文章引用: 周正林. 南流江玉的宝石矿物学特征及致色成因[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(5): 661-669.
DOI: 10.12677/ag.2026.165060

Abstract

Nanliujiang jade is a characteristic siliceous jade produced in the Nanliujiang River basin of Hepu, Guangxi Zhuang Autonomous Region, which is mainly divided into two varieties: a slightly transparent type with red zonal bands and an opaque type with flower-like textures. It has attracted wide attention from the collection circle in recent years due to its unique appearance. In this study, polarizing microscopy, refractometry, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), laser Raman spectroscopy, and UV-visible spectroscopy were employed to investigate the mineral composition and chromogenic genesis of Nanliujiang jade. The results show that the mineral component of Nanliujiang jade is α -quartz, with minor amounts of hematite and goethite, and the jade exhibits a compact massive structure as a whole. Further microstructural observations for in-depth study of its mineral composition and chromogenic genesis reveal significant differences in the morphological characteristics of quartz grains between the two varieties. Quartz in the red zonal band type presents a fibrous structure with fiber lengths ranging from 30 to 300 μm , while that in the flower-like type shows a granular equigranular structure with grain sizes of 10 to 100 μm . FTIR spectroscopy displays characteristic absorption peaks at 1184 cm^{-1} , 1105 cm^{-1} , 796 cm^{-1} , 779 cm^{-1} , 688 cm^{-1} , 533 cm^{-1} and 478 cm^{-1} , which are highly consistent with the standard characteristic peaks of α -quartz. Laser Raman spectroscopy analysis indicates that the red zonal band type shows a characteristic peak of hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) at 498 cm^{-1} , and simultaneously detects characteristic peaks of goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) at 237 cm^{-1} and 405 cm^{-1} , confirming that this variety is jointly colored by hematite and goethite. For the flower-like type, characteristic peaks are observed at 238 cm^{-1} , 545 cm^{-1} and 683 cm^{-1} ; its main chromogenic minerals are goethite and lepidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$), with hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) as the secondary chromogenic mineral. UV-visible spectroscopy shows that all samples present characteristic absorption peaks of Fe^{3+} at 380 nm and 450 nm, verifying that iron ions are the core chromogenic ions of Nanliujiang jade. This study systematically clarifies the gemmological and mineralogical characteristics as well as the chromogenic mechanism of Nanliujiang jade. It is confirmed that Nanliujiang jade is a typical mineral-colored siliceous jade, and there are significant differences in the chromogenic mineral assemblages and microstructures among samples with different appearance types.

Keywords

Nanliujiang Jade, Quartzose Jade, Gemological and Mineralogical Characteristics, Coloration Mechanism, Iron Oxides

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

中华玉文化的发展脉络绵延不绝，消费者对玉石的审美也随时代发展不断变化，随着玉石品类的不断增多，为消费者提供了更多的选择。南流江玉主要产于广西北部湾南流江流域的合浦及博白段，是一种具有独特外观的隐晶石英质玉石。南流江玉色彩丰富，结构细腻，有红色带状和草花状纹理独特，已成为地方特色的宝玉石资源，近年来逐渐受到收藏界与市场的关注[1][2]。依据前人研究发现石英质玉的致色成因可归纳为矿物致色、元素致色及矿物-元素联合致色三种类型[3]-[5]。国内典型石英质玉的致色均围绕这三类成因展开，例如，盐源彩玉的颜色由赤铁矿、针铁矿与 Cu^{2+} 、 Mn^{3+} 共同作用形成[5]；辽宁战国红玛瑙主要由针铁矿、赤铁矿单一或混合致色，致色矿物常沿纤维状石英定向排列，形成规则的

环带构造[4];南红玛瑙则以赤铁矿为主要致色矿物,赤铁矿呈微粒状或隐晶质形式分布于石英颗粒之间,颜色深浅与赤铁矿含量呈正相关关系[3][6]。南流江玉的市场价值稳步提升,但其矿物学特征的系统研究仍较为欠缺,现有研究仅对其硬度、折射率、结构等基础宝石学性质进行了初步探讨[1][2],相比之下,南流江玉作为产自广西的特色石英质玉,其致色矿物组合和微观结构特征与上述品种既存在共性,又具有独特之处,但迄今缺乏系统性的对比研究,这也成为制约其标准化鉴定与产业化发展的关键因素。

本文以典型南流江玉样品为研究对象,综合运用红外光谱仪、激光拉曼光谱、紫外-可见吸收光谱等分析测试方法对其矿物学特征、颜色成因进行研究,以期为南流江玉的鉴定提供科学的依据,为其质量评价提供理论指导。

2. 样品与测试方法

2.1. 样品描述

本文选取产自广西合浦县南流江流域的南流江玉原石样品 5 块,根据其不同外观特征的不同可分为两类如图 1 所示:红色环带型南流江玉(样品 Z-1、Z-3)和草花包裹体型南流江玉(样品 Z-2、Z-4、Z-5)。样品经切割、磨平、抛光后制备成测试标本,其中 4 块样品磨制为 0.03 mm 光薄片用于岩相学观察。

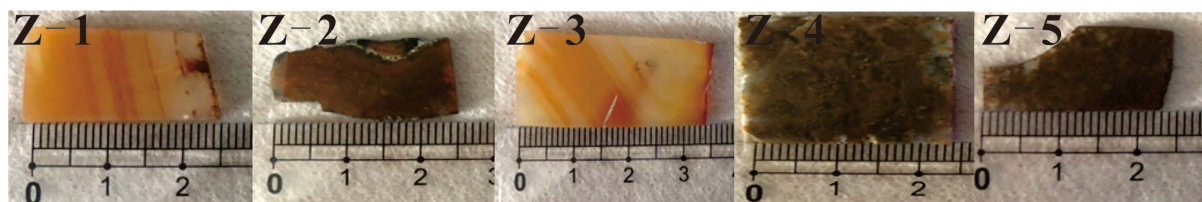


Figure 1. Appearance characteristics of the sample

图 1. 样品的外观特征

图(Z-1, Z-3)为红色环带的南流江玉,其中 Z-1 外表有红褐色皮,皮下面有红色侵入的条带,红白相间的环带,有一条带状的裂痕隔开,环带颜色深浅不一,整体呈现玻璃光泽,透明;Z-3 样品表皮呈现红褐色,内有一斜片状的断裂带,整体颜色呈现红白相间,呈现玻璃光泽,透明。图(Z-2, Z-4, Z-5)草花包裹体型,其中 Z-2 黑色的表皮,表皮有凹坑,内部呈现出黄褐色,表面还可以通过放大镜看到内部有黑色的团块,还有细小的不连续的小玛瑙环带。Z-4 样品有白色围岩,内部黄褐色草花包体,也有黑色的团状物,整体颜色呈现黄褐色,半透明。Z-5 玛瑙整体呈现棕褐色,里面有密密麻麻的草花包裹体,呈现出半透明。

2.2. 测试方法

常规宝石学测试在桂林理工大学宝石鉴定实验室完成,使用折射仪、静水力学天平、偏光仪、紫外荧光灯等设备,测试环境温度 24℃。

岩相学分析采用桂林理工大学隐伏金属矿产勘查实验室的 LINKAM32THSG600 型偏光显微镜,配备 Nikon 照相系统,在单偏光和正交偏光下观察样品矿物组成、结构构造及致色矿物分布。红外光谱测试采用桂林理工大学珠宝检测中心的 BRUKER TENSOR27 型傅里叶变换红外光谱仪,反射法测试,扫描范围 400~4000 cm^{-1} ,分辨率 4 cm^{-1} ,扫描时间 32 s。激光拉曼光谱测试采用桂林理工大学隐伏金属矿产勘查实验室的 Renishaw in via 型拉曼光谱仪,激发光源为 514 nm 氩离子激光,功率 100 mW,光谱分辨率 1 cm^{-1} ,扫描时间 10 s。紫外-可见光光谱测试采用 GEM-3000 型珠宝检测仪,反射法测试,波长范围 240~980 nm,扫描速度中速,采样间隔 0.5 nm。

3. 结果与讨论

3.1. 宝石学特征

南流江玉样品的外观特征如图 1 所示。原石呈致密块状构造，部分样品表面发育薄层表皮或围岩物质。呈透明度为透明至半透明，光泽为玻璃光泽至油脂光泽。红色环带型样品(Z-1, Z-3)可见明显的红色条带构造，颜色呈浸染状分布，沿裂隙颜色由深变浅；草花型样品(Z-2, Z-4, Z-5)内部发育黄褐色至棕黑色的草花状包裹体，包裹体形态多样，呈絮状、团块状、条带状分布。

南流江玉的宝石学参数测试结果如表 1 所示。样品折射率为 1.540~1.543，相对密度为 2.591~2.648，偏光仪下呈全亮，紫外荧光下长、短波均呈惰性，分光镜下未检测到特征吸收光谱。根据前人研究[2]，南流江玉的摩氏硬度为 6~7。

Table 1. Gemological characteristics table of Nanlijiang jade

表 1. 南流江玉宝石学特征

样品编号	折射率	相对密度	偏光性	荧光
Z-1	1.541	2.5915	全亮	惰性
Z-2	1.541	2.6024	全亮	惰性
Z-3	1.541	2.5916	全亮	惰性
Z-4	1.543	2.5936	全亮	惰性
Z-5	1.540	2.6476	全亮	惰性

3.2. 岩相学特征

偏光显微镜下观察如图 2 所示，南流江玉的主要矿物成分为 α -石英，呈隐晶质集合体。红色环带型样品(Z-1, Z-3)中，石英呈纤维状结构(图 2(a)和图 2(b))，纤维长 30~300 μm ，呈定向排列。纤维状石英颗粒间分布着红色、黄色的条带状矿物，主要为赤铁矿和针铁矿。致色矿物颗粒极为细小，在 100 倍偏光显微镜下难以分辨单个矿物颗粒。

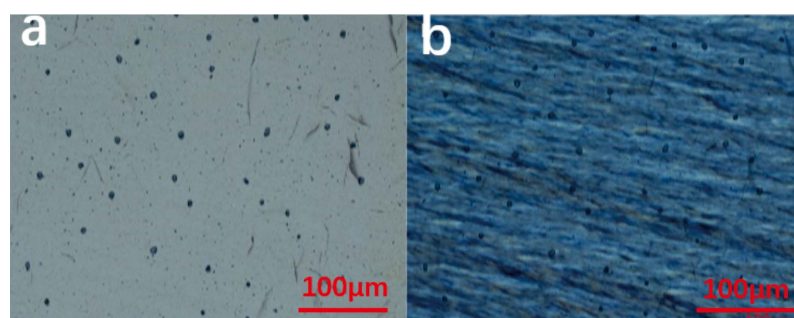


Figure 2. Petrographic characteristics of zoned Nanlijiang jade

图 2. 环带状南流江玉岩相学特征

草花型样品(Z-1, Z-2, Z-4)中，石英呈粒状等粒结构(图 3(b))，石英颗粒大小为 10~100 μm ，无解理，一轴晶正光性，单偏光下正低凸起，正交偏光下干涉色为 I 级黄白。致色矿物呈块状、条带状、团块状分布于石英颗粒间(图 3(c))，单偏光下呈黄褐色至棕黑色，正交偏光下不透明。反射光下可观察到致色矿物的形貌特征：赤铁矿呈黄褐色块状、条带状集合体(图 3(a)和图 3(d))所示。

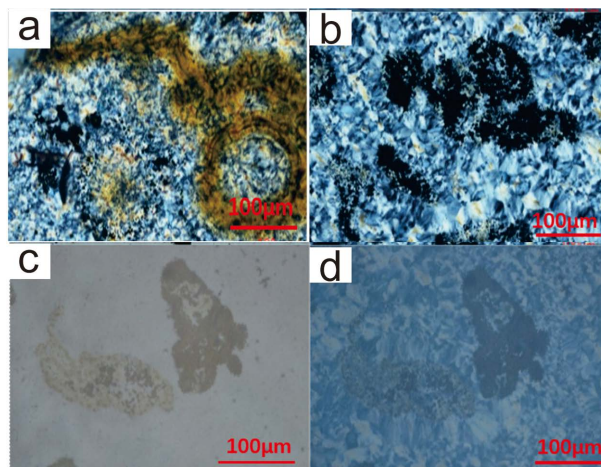


Figure 3. Petrographic characteristics of Caohua Nanlijiang jade
图 3. 草花南流江玉岩相学特征

3.3. 物相分析

3.3.1. 红外光谱分析

对六块南流江玉样品不同颜色区域的进行红外吸收光谱测试,红色环带样品中Z-1为红色环带区域,Z-3为白色区域、Z-4(1)为浅黄色。在草花型样品中,Z-2为棕褐色区域、Z-4为黄褐色区域、Z-5为白色区域。其红外吸收光谱特征基本一致如图4所示。样品的主要吸收峰位于 1184 cm^{-1} 、 1105 cm^{-1} 、 796 cm^{-1} 、 779 cm^{-1} 、 688 cm^{-1} 、 533 cm^{-1} 、 478 cm^{-1} 附近,与 α -石英的标准红外光谱峰高度一致[7][8],表明南流江玉的主要矿物成分为 α -石英,与偏光显微镜观察结果一致。

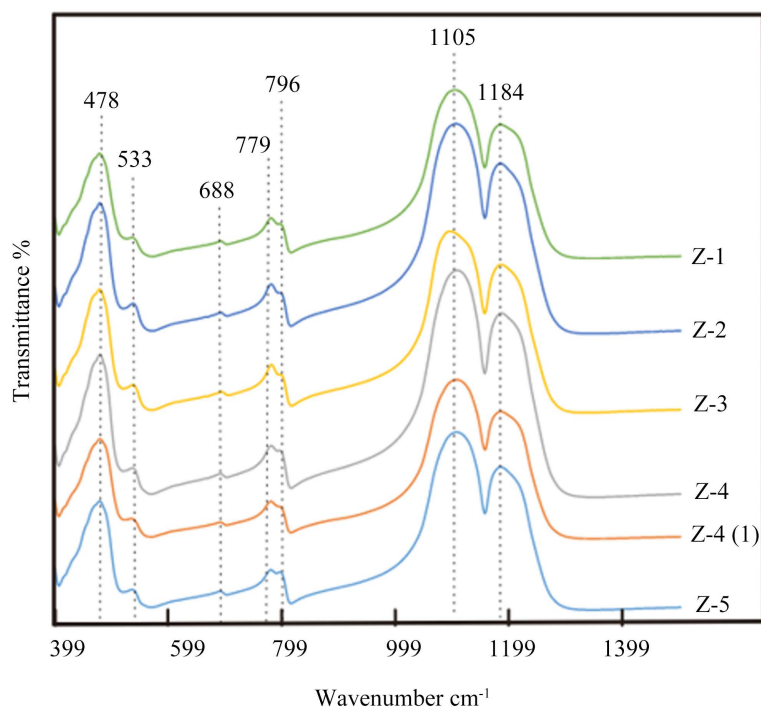


Figure 4. Comparison table of sample Raman spectra and mineral reference values
图 4. 样品红外光谱图

高频区 1184 cm^{-1} 和 1105 cm^{-1} 处的吸收峰归属于 Si-O-Si 非对称伸缩振动引起, 这是石英质玉红外光谱中最强的吸收带, 峰形较窄表明样品结晶度较好[9]。中频区 796 cm^{-1} 和 779 cm^{-1} 处的吸收峰归属于 Si-O-Si 对称伸缩振动, 两峰分裂不明显, 这是隐晶质玉髓的典型特征[10]。低频区 533 cm^{-1} 和 478 cm^{-1} 处的吸收峰归属于 O-Si-O 弯曲振动。

3.3.2. 激光拉曼光谱实验分析

对南流江玉样品进行 20 个点激光拉曼光谱测试, 选取有代表性分析如红色环带样品中 L-4 (红) 为红色环带区域, L-1 (红) 为浅黄色区域。在草花型样品中, L-2 (草花) 为棕褐色区域、L-3 (草花) 为黄褐色区域、L-5 (草花) 为深棕褐色区域。结果如表 2 所示, 这六块南流江玉样品中, 主要的矿物为 α -石英, 其特征峰位及矿物归属见表 2 所有样品均在 121 cm^{-1} 、 206 cm^{-1} 、 463 cm^{-1} 附近出现 α -石英的拉曼位移峰, 其中 463 cm^{-1} 为 α -石英最强特征峰[11], 证实主要矿物成分为石英。

Table 2. System resulting data of standard experiment

表 2. 样品拉曼光谱与矿物参考值对比表

样品测试编号	石英	赤铁矿	纤铁矿	针铁矿
参考值	129, 209, 265, 393, 468, 513, 698, 782 800, 1080, 1170	225, 247, 293, 298 413, 498, 612, 660 1318	245, 373, 493, 522 650, 719, 1303	247, 300, 386, 483 549, 685, 993
L-5 (草花)	127, 206, 263, 463	298	350	387
L-2 (草花)	125, 206, 396, 461, 801	297, 500	238	545, 683, 992
L-3 (草花)	123, 206, 396, 461, 801	297, 500	240	545, 681, 990
L-1 (红)	128, 209, 462	498, 405		246, 405
L-4 (红)	130, 208, 464, 796	297, 500		388, 549

红色环带型样品的拉曼光谱图 5 (L-1, L-4) 显示, 除了在 462 cm^{-1} 出现石英峰外, 还在 498 cm^{-1} 附近发现了赤铁矿特征峰、在 246 cm^{-1} 和 405 cm^{-1} 处发现了针铁矿特征峰, 两者共同表明红色环带由赤铁矿和针铁矿共同致色。对于草花型样品的拉曼光谱分析(L-2, L-5, L-3)来说, 样品 L-2 在 297 cm^{-1} 、 500 cm^{-1} 发现赤铁矿特征峰、在 238 cm^{-1} 处发现了纤铁矿特征峰以及在 545 cm^{-1} 、 683 cm^{-1} 、 992 cm^{-1} 处发现了针铁矿的特征峰。L-5 样品在 298 cm^{-1} 发现了赤铁矿, 在 387 cm^{-1} 发现针铁矿特征峰, 350 cm^{-1} 的特征峰属于纤铁矿。样品 L-3 在 297 、 500 cm^{-1} 的特征峰归属于赤铁矿, 在 240 cm^{-1} 发现纤铁矿, 在 545 、 681 cm^{-1} 发现了针铁矿的特征峰。同时, 有部分样品在 502 cm^{-1} 附近出现斜硅石的特征峰[12]。L-4 所打的点在红色区域颜色较深处, L-1 所打的点位于浅黄色区域, 如图 5 所示在 L-4 的 498 cm^{-1} 附近的赤铁矿峰高于 Z-1 附近的赤铁矿峰, 反映中心区域赤铁矿的相对富集。

3.3.3. 紫外 - 可见光光谱分析

南流江玉样品的紫外 - 可见光反射光谱如图 6 所示。其中 ZL-1、ZL-3 为红色环带状南流江玉, 其红色与深红色部位在 380 nm 、 433 nm 、 540 nm 处出现特征吸收峰, 这些峰位归属于 Fe^{3+} 的晶体场跃迁, 对应 ${}^6\text{A}_1 \rightarrow {}^4\text{E}(\text{D})$ 、 ${}^6\text{A}_1 \rightarrow {}^4\text{T}_2(\text{D})$ 及 ${}^6\text{A}_1\text{g} \rightarrow {}^4\text{E}_1{}^4\text{Ag}$ 跃迁类型[13], 而 540 nm 附近的吸收峰, 则与 Fe^{2+} - Fe^{3+} 离子对的电荷转移作用相关[14]。证实铁离子是南流江玉的核心致色离子。结合偏光显微镜下观察到的红褐色矿物, 红色环带的南流江玉的样品的红色与深红色由赤铁矿致色。

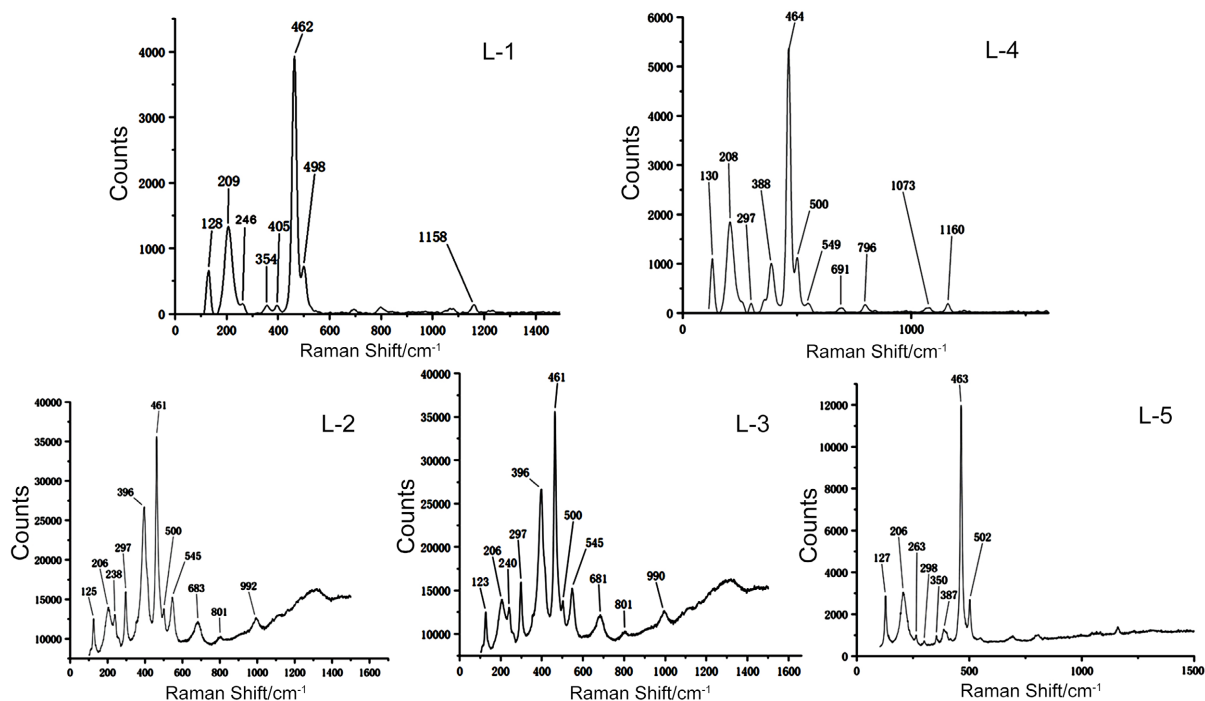


Figure 5. Raman spectra of samples
图 5. 样品拉曼光谱图

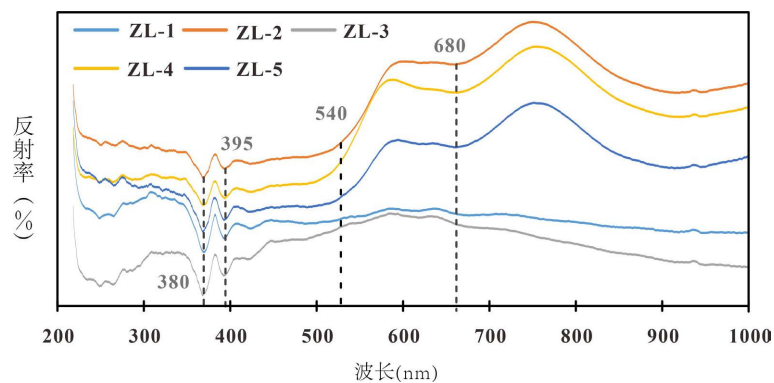


Figure 6. UV-vis spectrum of the sample
图 6. 样品紫外可见光谱图

对于 ZL-2、ZL-4、ZL-5 草花型南流江玉而言，其 380 nm、433 nm 处的吸收峰由次要致色矿物赤铁矿引起，680 nm 处的吸收峰则为草花型南流江玉中针铁矿的特征峰，这一特征与 Sherman 等[15]对含铁氧化物/氢氧化物光谱特征的经典研究结论一致，该研究明确指出，针铁矿中 Fe^{3+} 的 d-d 电子跃迁存在 650~700 nm 处出现低能量端的特征吸收区间，此区间的跃迁对应 ${}^6\text{A}_1 \rightarrow {}^4\text{T}_1(\text{G})$ 跃迁模式，也是针铁矿区别于其他氧化物的核心光谱标志。

3.4. 颜色成因分析及讨论

综合上述测试结果，南流江玉的颜色成因可归纳为：红色环带型样品(Z-1, Z-3)由赤铁矿和针铁矿共同致色，赤铁矿呈红色，针铁矿呈黄褐色，二者含量比例控制红色条带的深浅变化，赤铁矿占比较高时红色偏深，针铁矿占比高时红色偏浅偏黄。在显微镜下观察可见，红色环带型样品致色矿物以微细颗粒

形式赋存于纤维状石英颗粒间隙, 形成浸染状红色条带。草花型样品的颜色成因较为复杂, 不同样品的致色矿物组合存在差异, 其中 Z-2 样品中棕褐色由棕褐色针铁矿和褐色赤铁矿联合致色, 针铁矿以集合体形式存在时呈现棕黑色, 形成样品中的黑色条带, 赤铁矿形成褐色区域。Z-5 样品的深棕褐色由针铁矿致色, 针铁矿包裹体呈深棕褐色[16]。根据显微镜观察可见深棕褐色区域存在少量由赤铁矿形成的黄褐色区域。Z-4 样品黄褐色由针铁矿致色, 少量赤铁矿在内部形成红褐色斑点, 其包裹体颜色的深浅变化与针铁矿和石英的比例有关。草花型南流江玉中虽检出纤铁矿, 但该矿物在常温常压下稳定性差、易向针铁矿转化[17], 因此草花型南流江玉整体仍以针铁矿和赤铁矿为致色矿物。紫外-可见光光谱证实铁离子是南流江玉的核心致色离子, 拉曼光谱进一步明确了铁氧化物的具体矿物种类及其组合关系。

南流江玉作为石英质玉的重要地方品种, 其颜色成因与国内知名石英质玉相比兼具共性与特色。与南红玛瑙[3][6]相比, 红色环带型样品虽同样以赤铁矿为致色矿物, 但针铁矿的参与使红色调更丰富, 呈现出深浅变化的条带特征, 赤铁矿以微细颗粒形式赋存于纤维状石英颗粒间隙, 与南红玛瑙相似; 与辽宁战国红玛瑙[4][18]相比, 草花型样品致色矿物组成更复杂, 针铁矿、纤铁矿、赤铁矿三者共存, 以包裹体形式出现, 形成独特的棕褐色草花状图案。纤铁矿在常温常压下不稳定, 易向针铁矿转化[17], 本文中 Z-2、Z-3、Z-5 样品中纤铁矿与针铁矿同时检出, 暗示南流江玉形成过程经历了复杂的成矿环境演化, 或存在局部微环境得以保存纤铁矿, 这一现象有待深入研究。南流江玉的微观结构特征与致色矿物分布高度相关, 红色环带型样品中石英呈纤维状结构, 致色矿物沿纤维定向排列, 形成规则条带构造; 草花型样品中石英呈粒状结构, 致色矿物以团块状、絮状不规则分布, 形成典型草花图案, 这种结构-颜色结合关系, 直观反映了成矿过程中硅质胶体沉淀受到铁质浸染的影响。

南流江盆地受北流-合浦深断裂及“X”型共轭断裂控制、成型于白垩纪的地堑式或半地堑式盆地, 以断块运动与差异升降为主要构造特征[19][20]。基于此区域地质背景, 推测南流江玉的差异性成因可能受控于成矿流体与结晶环境的不同。红色环带型形成于早期相对稳定的热液环境, 纤维状石英沿定向方向缓慢结晶, 后期富铁热液沿石英间隙渗透浸染, 形成规则的红色环带构造。草花型则形成于晚期流体活动性增强、结晶空间受限的环境中, 粒状石英快速结晶, 与多期次富铁流体的叠加导致针铁矿、纤铁矿、赤铁矿等多种铁氧化物沉淀, 形成复杂的草花状图案。在 Z-2、Z-5 样品中的纤铁矿, 暗示南流江玉形成后经历了快速埋藏或局部封闭的保存条件。上述这一假说有待后续通过流体包裹体测温、同位素示踪等方法进一步验证。

4. 结论

1) 南流江玉为隐晶质石英质玉, 主要矿物成分为 α -石英, 呈致密块状构造, 折射率 1.540~1.543, 相对密度 2.591~2.648, 摩氏硬度 6~7, 紫外荧光下呈惰性。红色环带型样品中石英呈纤维长 30~300 μm 的纤维状结构, 草花型样品中石英呈晶粒大小 10~100 μm 的粒状等粒结构。

2) 红外光谱显示南流江玉具有 1184、1105、796、779、688、533、478 cm^{-1} 等 α -石英特征吸收峰, 796 cm^{-1} 和 779 cm^{-1} 分裂不明显, 为隐晶质玉髓的典型特征。

3) 南流江玉的颜色为典型矿物致色, 铁离子是其核心致色离子。其中红色环带型样品以赤铁矿为主致色矿物, 针铁矿辅助致色, 让红色调更具层次与丰富度; 草花型样品则以针铁矿为主致色矿物, 赤铁矿为次要致色矿物, 部分样品还留存有少量纤铁矿, 不同样品的致色矿物组合存在细微差异。

参考文献

- [1] 谢姗姗. 广西地方玉的宝石学特征及其开发前景[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2017, 34(4): 132-136.
- [2] 谢姗姗. 南流江玉硬度测试研究[J]. 大众科技, 2017, 19(5): 135-136+157.

- [3] 傅秋莹. 凉山州南红玛瑙致色元素与成矿环境的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [4] 何雪梅, 谢天琪, 王时麒, 等. 辽宁阜新“战国红”玛瑙的宝石学特征及颜色成因[C]/国土资源部珠宝玉石首饰管理中心, 中国珠宝玉石首饰行业协会. 珠宝与科技——中国珠宝首饰学术交流会论文集(2015). 北京: 国土资源部珠宝玉石首饰管理中心, 2015: 190-194.
- [5] 路玮. 盐源彩玉的宝石矿物学特征及颜色成因[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [6] 熊见竹. 四川凉山州南红玛瑙的宝石矿物学特征研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- [7] 法默. 矿物的红外光谱[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [8] 闻轲. 矿物红外光谱学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
- [9] 曲洛萱, 杨力乙, 刘钊, 等. “雀仔石”的宝石矿物学特征研究[J/OL]. 矿物岩石, 1-13. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=8kKd7LBMH3zWeZQyWQ_AWoBYY4BeNepXWfj3ZxUn3-5ZCi54q3W3xMwc77IYUDNSg_gF7_NAfa4xeYzI1VzAKpdh6dFJpAhHXtnLWC8Rr4UUYDbbA-KwdYo4Hz5D9FVMapbV_ZQeMk_JmZ-fGTBFg2d8OP-WRUYZshBqaWBvUQo=&uniplatform=NZKPT, 2026-03-18.
- [10] 罗跃平, 王春生. 应用红外镜面反射法区别显晶质石英岩和隐晶质玉髓[C]/国土资源部珠宝玉石首饰管理中心, 中国珠宝玉石首饰行业协会. 珠宝与科技——中国珠宝首饰学术交流会论文集(2015). 北京: 国土资源部珠宝玉石首饰管理中心, 2015: 187-189.
- [11] de Faria, D.L.A., Venâncio Silva, S. and de Oliveira, M.T. (1997) Raman Microspectroscopy of Some Iron Oxides and Oxyhydroxides. *Journal of Raman Spectroscopy*, **28**, 873-878. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-4555\(199711\)28:11<873::aid-jrs177>3.0.co;2-b](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4555(199711)28:11<873::aid-jrs177>3.0.co;2-b)
- [12] Götzte, J., Nasdala, L., Kleeberg, R. and Wenzel, M. (1998) Occurrence and Distribution of “Moganite” in Agate/Chalcedony: A Combined Micro-Raman, Rietveld, and Cathodoluminescence Study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **133**, 96-105. <https://doi.org/10.1007/s004100050440>
- [13] 李贺, 祖恩东, 于杰, 等. 含铁宝石的紫外-可见光光谱特征研究与计算[J]. 广西轻工业, 2009, 25(11): 12-13+22.
- [14] Rossman, G.R. (1988) Chapter 7. OPTICAL Spectroscopy. In: *Spectroscopic Methods in Mineralogy and Geology*, De Gruyter, 207-254. <https://doi.org/10.1515/9781501508974-009>
- [15] Sherman, D.M. (1985) Electronic Spectra of Fe³⁺ Oxides and Oxide Hydroxides in the Near IR to Near UV. *American Mineralogist*, **70**, 1262-1274.
- [16] 谢天琪. 辽宁阜新“战国红”玛瑙致色机理及结构成因研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [17] 李源. 有色水晶的热处理及呈色机理研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2008.
- [18] Cornell, R.M. and Schwertmann, U. (2003) The Iron Oxides. Wiley. <https://doi.org/10.1002/3527602097>
- [19] 钟新基. 南流江盆地的形成机制[J]. 热带地理, 1989(3): 233-242.
- [20] 吴少斌, 欧业成, 卢进林, 等. 广西合浦盆地地热资源及其开发利用初步评价[J]. 桂林工学院学报, 2005(2): 155-160.