



引文格式: 陈治忻, 雷如雄, 吴世保, 等. 中亚造山带南缘天河石的成因与致色机理研究[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 42–59. DOI: 10.12401/j.nwg.2025152

Citation: CHEN Zhixin, LEI Ruxiong, WU Shibao, et al. Genesis and Coloration Mechanism of the Amazonite from the Southern Margin of Central Asian Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 42–59. DOI: 10.12401/j.nwg.2025152

中亚造山带南缘天河石的成因与致色机理研究

陈治忻¹, 雷如雄^{1,2,*}, 吴世保¹, 唐国卿¹, 袁宏典¹, 王振华¹, 吴昌志^{1,3}

(1. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 新疆维吾尔自治区地质研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 新疆自然资源与生态环境研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 中亚造山带南缘是全球天河石花岗岩的重要分布区, 发育大量的天河石花岗岩及相关的稀有金属矿床。然而, 目前对于天河石的成因及致色机理还缺乏研究, 制约了对天河石花岗岩成因和相关稀有金属成矿作用(如: Rb、Cs 等)的深入认识。笔者选取中亚造山带南缘 5 个典型的天河石花岗岩型稀有金属矿床(张宝山、将军山、依兰里克、国宝山和石灰窑), 对其中的天河石样品开展了详细的矿物学、X 射线衍射分析、拉曼光谱、紫外-可见光谱以及矿物主量和微量元素分析。研究发现, 天河石矿物学与光谱学特征整体与微斜长石一致, 表明天河石主体晶体结构保持相对稳定; 紫外-可见光谱普遍表现为 248 nm、382 nm 吸收峰及 620~740 nm 宽吸收带, 指示色心吸收与其蓝绿色调密切相关。微量元素结果显示, 天河石中 Rb、Cs、Pb 等元素总体富集。经过综合分析, 笔者提出天河石的蓝绿色调并非由单一元素导致, 而更可能与 Rb 与 Pb 的协同富集有关, 主要与 Pb、Rb 等元素通过类质同象替代其晶格中的 K 离子有关, Rb⁺类质同象替代 K⁺对晶格产生微调, Pb²⁺替代 K⁺因电荷差异更易引发局部缺陷形成色心, 最终导致天河石呈现蓝绿色; 紫外-可见光谱亦显示与色心吸收相关的特征响应。结合前人研究, 本研究认为天河石主要形成于花岗质岩浆高度分异演化的晚期阶段, 其形成与 Rb、Cs 等稀有金属的富集和挥发分(如: F)作用密切相关。天河石可以作为花岗岩体系 Rb 等稀有金属矿化的重要指示矿物之一。

关键词: 矿物学; 天河石; 致色机理; 稀有金属矿化; 中亚造山带

中图分类号: P57

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0042-18

Genesis and Coloration Mechanism of the Amazonite from the Southern Margin of Central Asian Orogenic Belt

CHEN Zhixin¹, LEI Ruxiong^{1,2,*}, WU Shibao¹, TANG Guoqing¹, YUAN Hongdian¹, WANG Zhenhua¹, WU Changzhi^{1,3}

(1. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Geology Institute of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Research Center for Natural Resources and Ecological Environment, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

收稿日期: 2025-11-05; 修回日期: 2025-12-31; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划课题(2022B03015-3)资助。

作者简介: 陈治忻(2000–), 女, 硕士, 矿物学专业。E-mail: czxing0222@163.com。

* 通讯作者: 雷如雄(1987–), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床学研究。E-mail: ruxionglei@chd.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Abstract: The southern margin of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) represents one of the world's most important provinces of amazonite-bearing granites and associated rare-metal deposits. However, the genesis and coloration mechanism of amazonite remain insufficiently constrained, which limits a deeper understanding of the petrogenesis of amazonite granites and the related rare-metal mineralization (e.g., Rb and Cs). In this study, amazonite samples were collected from five representative amazonite granite-type rare-metal deposits along the southern CAOB, namely Zhangbaoshan, Jiangjunshan, Yilanlik, Guobaoshan, and Shihuiyao. Detailed mineralogical and spectroscopic investigations were conducted, including X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy, and UV-Vis spectroscopy, together with major- and trace-element analyses by LA-ICP-MS. The results show that the mineralogical and spectral characteristics of amazonite are overall consistent with those of microcline, indicating that the primary crystal structure remains relatively stable. UV-Vis spectra generally display absorption peaks at 248 nm and 382 nm and a broad absorption band between 620 and 740 nm, suggesting that color-center absorption is closely associated with the blue green hue. Trace-element data reveal systematic enrichment of Rb, Cs, and Pb in amazonite. Integrating these observations, we propose that the blue-green coloration of amazonite is unlikely to be controlled by a single element; instead, it is more plausibly related to the coupled enrichment of Rb and Pb via isomorphous substitution for K in the feldspar lattice. Substitution of Rb^+ for K^+ induces subtle lattice adjustments, whereas substitution of Pb^{2+} for K^+ , owing to charge imbalance, more readily generates localized defects that facilitate the formation of color centers, ultimately producing the characteristic blue green coloration. This interpretation is further supported by the UV-Vis responses linked to color-center absorption. Based on comparisons with previous studies, amazonite in the southern CAOB is inferred to have formed predominantly during the late stage of highly fractionated granitic magmatism, closely associated with the enrichment of rare metals (Rb/Cs) and the role of volatiles (e.g., F). Amazonite is therefore suggested to be a useful indicator mineral for Rb-related rare-metal mineralization in granitic systems.

Keywords: mineralogy; Amazonite; coloration mechanism; rare metal mineralization; Central Asian Orogenic Belt

天河石是微斜长石的蓝绿色变种, 常产于高分异花岗岩及相关伟晶岩体系。由于其独特的颜色、成分与结构特征, 以及与 Rb、Cs 等稀有金属富集/成矿的密切关系。近年来, 对天河石及含天河石花岗岩的关注日益增加 (Ostrooumov, 2005; 顾连兴等, 2007; 吴昌志等, 2021; 余贵民等, 2024)。天河石特殊的标型 (如颜色、成分和结构等) 使其成为花岗岩成因研究和稀有金属矿床找矿勘查的重要指示矿物 (顾连兴等, 2007)。然而, 目前对于天河石的成因还缺乏系统深入的研究, 对于其致色机理还存在诸多争议 (Hofmeister et al., 1985; Julg, 1998; 孟国强等, 2016; 余红军等, 2018; 陈祉卫等, 2024)。早期观点认为天河石致色原因与孔雀石相类似, Cu 元素是天河石致色主要原因 (崔云昊, 1985)。但后续化学成分分析发现天河石 Cu 含量普遍较低, 且其白色与蓝绿色部分 Cu 含量相近, 从而否定了 Cu 致色的观点 (孟国强等, 2016)。也有学者提出天河石中 Rb、Pb、Cs 等元素更为富集, 推测这些元素会对天河石颜色产生一定影响 (Correcher

et al., 2011; 孟国强等, 2016; 余红军等, 2018)。还有观点认为, 天河石是由于 Pb 离子形成电子-空穴色心或与结构水共同作用, 导致天河石产生蓝绿色 (Hofmeister et al., 1985; Julg, 1998; Ostrooumov, 2005)。

中亚造山带是全球最典型的增生型造山带之一, 其长期复杂的构造-岩浆 (流体) 活动为天河石花岗岩 (伟晶岩) 和相关 Rb 等稀有金属矿床的形成提供了独特的地质条件, 中亚造山带南缘发育有全球近一半的天河石花岗岩 (Ostrooumov, 2005), 其中典型的天河石花岗岩相关 Rb 等稀有金属矿床有东天山张宝山超大型 Rb 矿床、国宝山超大型 Rb 矿床、阿勒泰将军山 (方正) 大型 Rb 矿床以及南天山依兰里克 Rb-Nb-Zr 及宝玉石矿床、内蒙古石灰窑超大型 Rb 矿床等 (吴昌志等, 2021)。笔者以中亚造山带南缘 5 个典型矿床天河石为研究对象, 综合开展 X 射线衍射、拉曼光谱、紫外-可见光谱、矿物自动分析及激光剥蚀电感耦合等离子质谱分析等测试, 探讨微量元素赋存与晶体结构变化对天河石颜色的影响, 进而揭示天河石的致色机

理及其成因机制。

1 地质背景

1.1 区域地质概况

中亚造山带(CAOB)位于东欧克拉通、西伯利亚克拉通、塔里木克拉通和华北克拉通之间(图1),是全球显生宙以来大陆增生最为显著的地区,记录了古亚洲洋长期俯冲-增生-碰撞的复杂演化历史(Şengör et al., 1993; Xiao et al., 2003, 2010, 2015; 李锦轶等, 2009; 黄河等, 2024; 吴妍蓉等, 2024)。该造山带是由多个前寒武纪微陆块(如中天山、伊犁、准噶尔等)及其间的增生楔和缝合带经过古生代至中生代早期的多期次拼贴作用而形成的(Windley et al., 2007; Xiao et al., 2010)。中亚造山带南缘构造活动尤为强烈,深大断裂带为花岗质岩浆上涌与侵位提供了通道(董泽义, 2015; Wang et al., 2017),并广泛发育与高分异花岗质岩浆作用相关的稀有金属矿化岩体与矿床,如张宝山超大型 Rb 矿床、国宝山超大型 Rb 矿床、将军山(方正)大型 Rb 矿床以及依兰里克 Rb-Nb-Zr 及宝玉石矿床、石灰窑超大型 Rb 矿床等(Xiao et al., 2015; 吴昌志等, 2021; 杨富全等, 2025)。

1.2 矿床地质特征

1.2.1 张宝山 Rb 矿床

张宝山 Rb 矿床是典型的花岗岩型 Rb 矿床,该矿床位于中亚造山带南缘中天山前寒武纪构造带东北缘,距甘肃与新疆交界处的星星峡镇 NE 方向约 30 km,露头面积约 7 km²(顾连兴等, 2007)。锆石 U-Pb 定年结果显示其形成时代为早—中三叠世(250~240 Ma)(顾连兴等, 2007; Zhi et al., 2021)。岩体具明显垂直分带,自上而下可分为淡色花岗岩带(a带),含天河石花岗岩带(b带),天河石花岗岩带(c带)、含黄玉天河石花岗岩带(d带)和黄玉钠长石花岗岩带(e带)(图2)。矿化主要发育在岩体中上部的天河石花岗岩带(c带)和含黄玉天河石花岗岩带(d带)(图2)。主要矿石矿物为天河石和铁锂云母;脉石矿物包括石英、钠长石、黄玉等。c带岩石呈蓝绿色,具似斑状结构,天河石含量占钾长石一半以上,局部见天河石伟晶岩脉。d带矿物组成与c带相似,但出现黄玉作为特征副矿物(Hu et al., 2024; Jin et al., 2024; Wang et al., 2024)。

1.2.2 国宝山 Rb 矿床

国宝山 Rb 矿床位于中亚造山带南缘中山东段,地处哈密星星峡镇西南约 5 km 处(图3a)。国宝山花

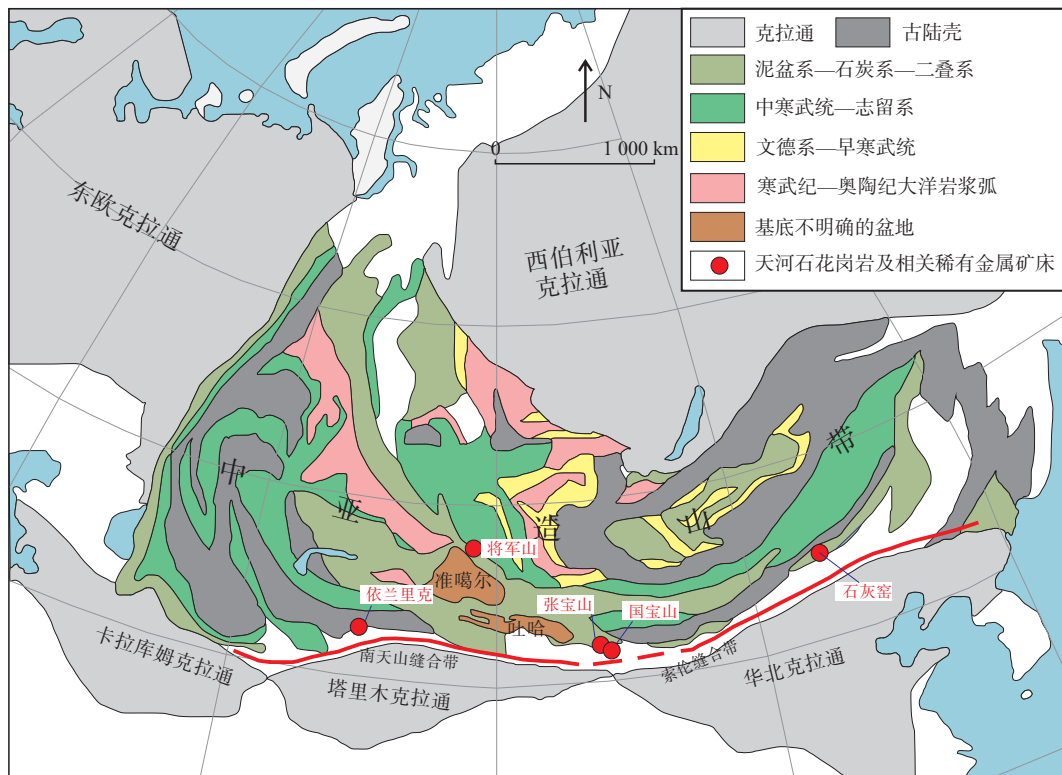


图1 中亚造山带地质简图(据吴昌志等, 2021 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the Central Asian Orogenic Belt

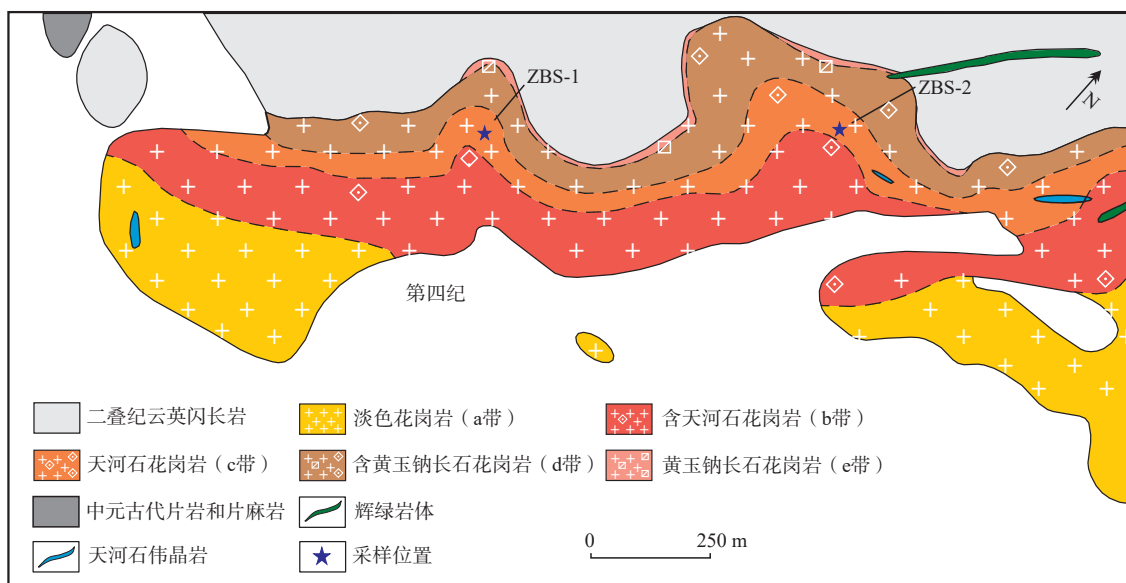


图2 张宝山 Rb 矿地质简图(据 Wang et al., 2024 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Zhangbaoshan Rb deposit

岗岩体呈 NE 向展布, 出露面积约 13 km²(周会武等, 2015), 形成时代为早—中三叠世(240~249 Ma)(贺昕宇, 2019; Chen et al., 2022; Wu et al., 2024)。矿体主要赋存于呈 NE 向展布的天河石花岗岩中, 具有明显的分带特征, 天河石集中出现在岩体东段天河石花岗岩带及含天河石花岗岩带(图 3b)。主要矿石矿物为天河石和铁锂云母, 其中约 71% 的铷资源赋存于天河石中, 脉石矿物有钠长石、石英等(周会武等, 2015)。矿石类型主要包括天河石花岗岩型和伟晶岩型, 矿石普遍具中细粒花岗结构、伟晶结构及块状构造(Chen et al., 2022; Wu et al., 2024)。

1.2.3 将军山(方正)Rb 矿床

将军山(方正)Rb 矿床地处中亚造山带南缘阿尔

泰造山带中部, 距离新疆阿勒泰市 SE 方向约 4 km, 出露面积为 6 km², 矿体主要由天河石花岗岩组成(新疆地质矿产勘查开发局第六地质大队, 2015)。将军山(方正)Rb 矿的成岩成矿时代主要集中在晚二叠世—中三叠世(270 Ma)(Bai et al., 2023)。岩体主要由二云母碱长花岗岩、天河石花岗岩和天河石伟晶岩组成, 主体为二云母碱长花岗岩(图 4; 任刚, 2018; 余贵民等, 2024)。矿床的矿化类型以花岗岩型为主, 有部分伟晶岩型矿化。主要矿石矿物为天河石和铁锂云母, 脉石矿物有石英、钠长石等。矿石构造以块状构造为主, 结构主要为粒状结构(Bai et al., 2023; 余贵民等, 2024)。

1.2.4 石灰窑 Rb-Nb-Ta 矿床

石灰窑 Rb-Nb-Ta 矿床中亚造山带南缘地处兴安

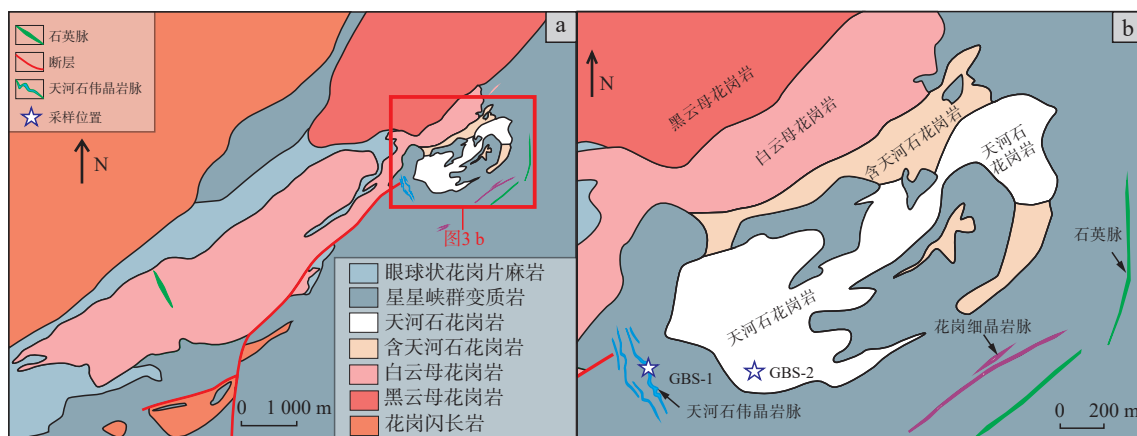


图3 国宝山 Rb 矿地质简图(a)和国宝山 Rb 矿矿体分带图(b)(据吴昌志等, 2021 修改)

Fig. 3 (a) Simplified geological map of the Guobaoshan Rb deposit and (b) ore-body zoning map of the Guobaoshan Rb deposit

造山带南段(Zhou et al., 2016)。含矿岩体主要为燕山期(约 145 Ma)侵入的含天河石花岗岩,主要赋存于受 NE 向断裂控制的 6 个(I-VI)花岗岩体中,其中 II 号和 VI 号岩体为核心,岩性以云英岩化钠长花岗岩和天河石钠长花岗岩为主(图 5;段先哲等, 2016; Duan et al., 2021)。矿床矿化类型为同生浸染型,发育强烈的钠长石化和云英岩化蚀变,主要富 Rb 矿石矿物为天河石和云母族矿物(铁锂云母等)(Zhang et al., 2023; 段振鹏, 2024; Duan et al., 2024; Bai et al., 2025)。

1.2.5 依兰里克 Rb-Nb-Zr 及宝玉石矿床

依兰里克 Rb-Nb-Zr 及宝玉石矿床位于塔里木北

缘-南天山结合构造带(谢明材等, 2020)。该区域以晚石炭世—早二叠世(300~270 Ma)的碱性岩浆活动为特征,依兰里克矿床主要赋存于含矿稀有金属伟晶岩内,类型包括花岗岩型与碱性岩型两种,零散分布在背斜翼部到核部的区域内。矿区内花岗伟晶岩规模最大,主要为黑云母天河石花岗伟晶岩和黑云母花岗伟晶岩,主要矿物包括钾长石、石英、钠长石等(邹天人等, 2002; Yuan et al., 2024)。部分伟晶岩具有明显的成分分带,天河石主要存在于花岗伟晶岩的天河石伟晶岩带,厚度可达上百米(图 6)。花岗伟晶岩和碱性伟晶岩发育显著的 Rb、Nb 和 Zr 矿化(Yuan et al., 2024)。

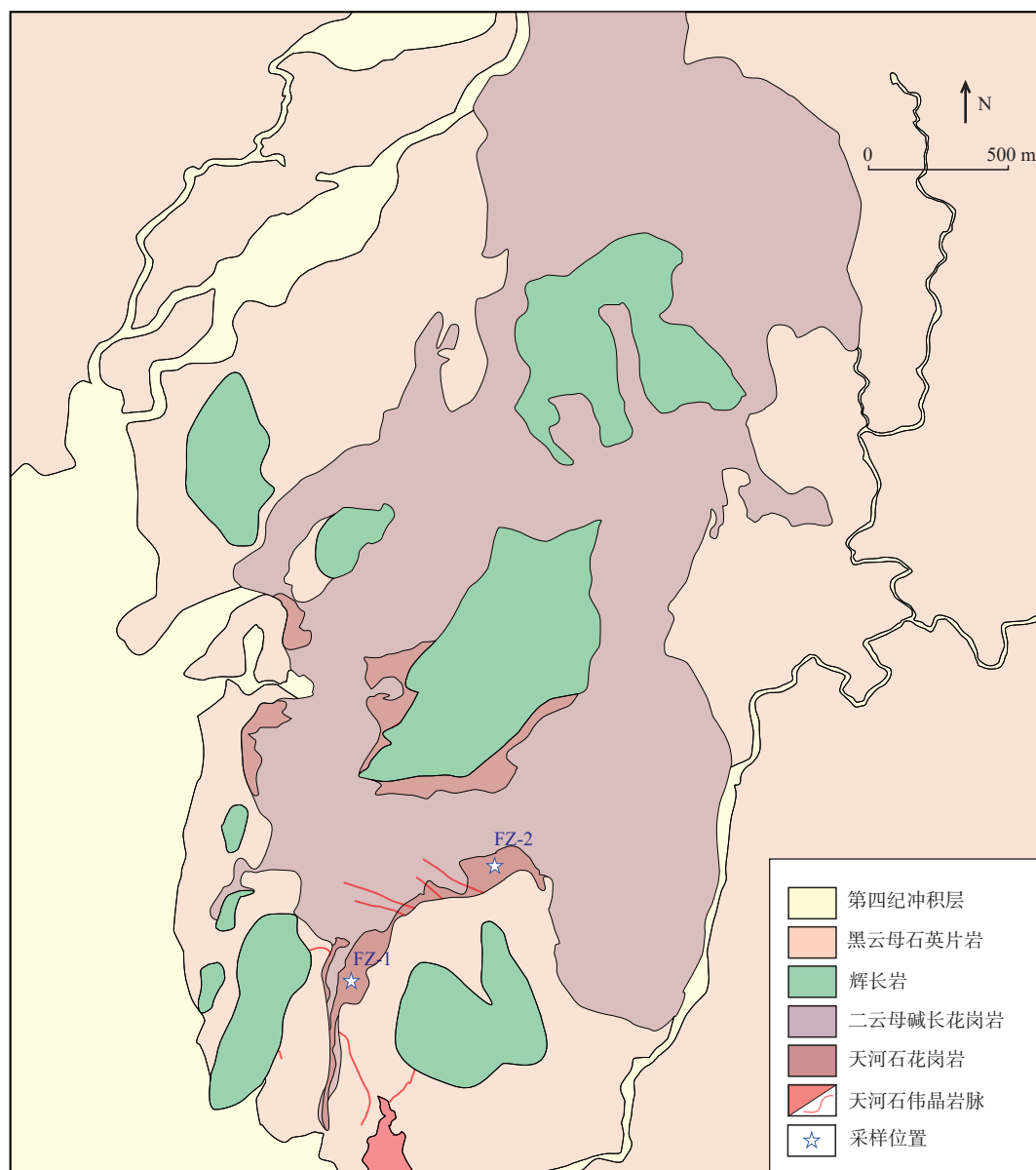


图4 将军山(方正)Rb矿地质简图(据 Bai et al., 2023 修改)

Fig. 4 Simplified geological map of the Jiangjunshan (Fangzheng) Rb deposit

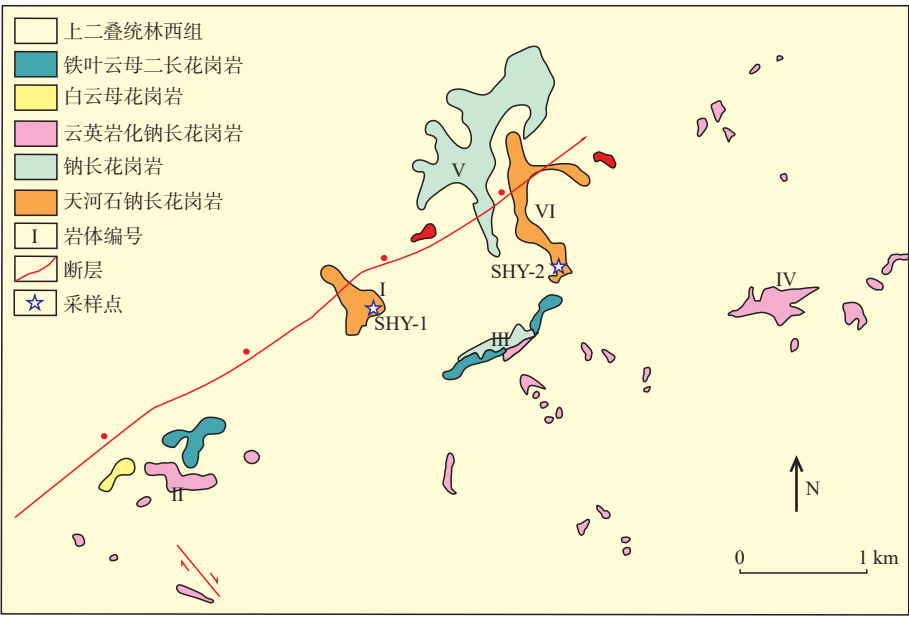


图5 石灰窑 Rb 矿地质简图(据吴昌志等, 2021 修改)

Fig. 5 Simplified geological map of the Shihuiyao Rb deposit

2 样品特征及分析方法

2.1 样品特征

本次研究选取上述 5 个典型矿床的 10 块代表性

天河石样品, 其中 2 块来自国宝山 Rb 矿 (GBS-1, GBS-2), 2 块来自将军山 (方正) Rb 矿 (FZ-1, FZ-2), 2 块来自石灰窑 Rb 矿 (SHY-1, SHY-2), 2 块来自依兰里克 Rb-Nb-Zr 矿 (YL-1, YL-2), 2 块来自张宝山 Rb 矿 (ZBS-1, ZBS-2)。天河石样品呈块状或短柱状, 自形到半自

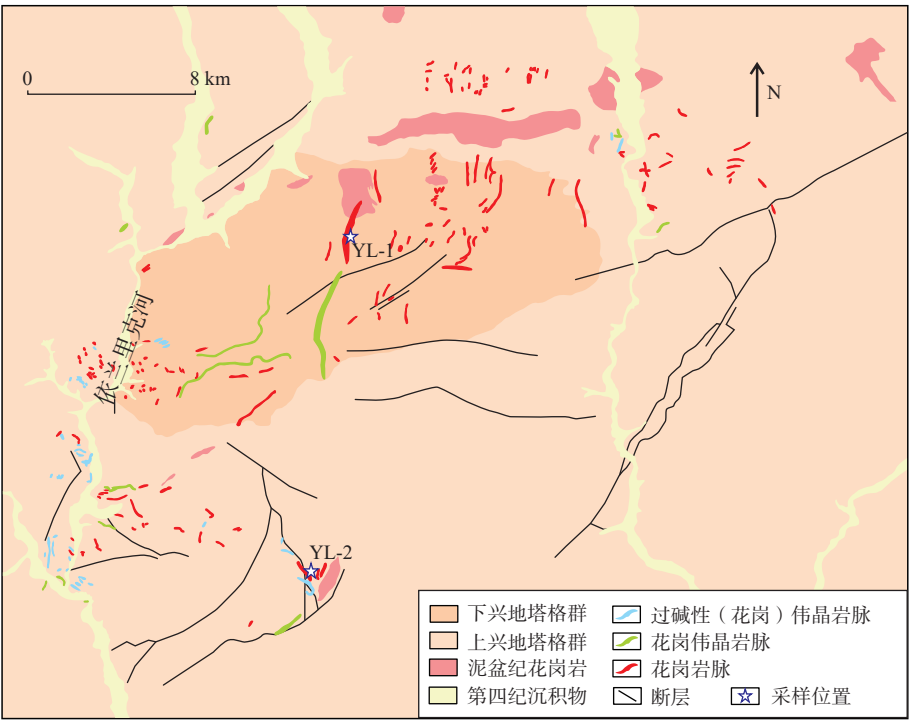


图6 依兰里克 Rb-Nb-Zr 稀土及宝玉石矿床地质简图(据 Yuan et al., 2024 修改)

Fig. 6 Simplified geological map of the Yilanlike Rb-Nb-Zr rare earth gemstone deposit

形,颜色表现为蓝色、绿色及蓝绿色,整体呈蓝白或绿白相间的条带状或网格状构造,在花岗岩中的粒径达0.2~0.5 mm,在伟晶岩中可达20~50 mm(图7a)。

2.2 分析方法

天河石样品的激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成,采用193 nm激光剥蚀系统与Agilent 7700X ICP-MS联用,He(99.999%, 0.8 L/min)为载气。束斑35 μm 、5 Hz、5.9 J/cm²;数据用ICPMSDataCal 10.9处理,NIST SRM 610校正漂移,Si为内标,外标法定量微量元素,RSD与标准物质误差控制。

矿物自动分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成,采用解离分析与点阵扫描模式同步获取BSE与EDS数据。高真空条件下:25 kV、7.3 nA、工作距离15 mm;像素间距3 μm ,用软件TESCAN离线识别矿物相并统计含量与共生关系。

X射线衍射分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。高纯度样品低温球磨制粉($\leq 30^\circ\text{C}$, 320 木)干燥,采用岛津XRD-6100(Cu-K α)粉末衍射仪获取衍射数据(范围 $2\theta=5^\circ\sim 80^\circ$ 。经Jade9物相检索与全谱精修获得晶胞参数等结构信息,用于讨论微量元素进入晶格后的结构特征。

拉曼光谱分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。仪器为HORIBA LabRAMHR 800, 532 nm激发,光斑约5 μm ,测试范围100-2000 cm⁻¹;积分2 s、累计2次。用于物相确认

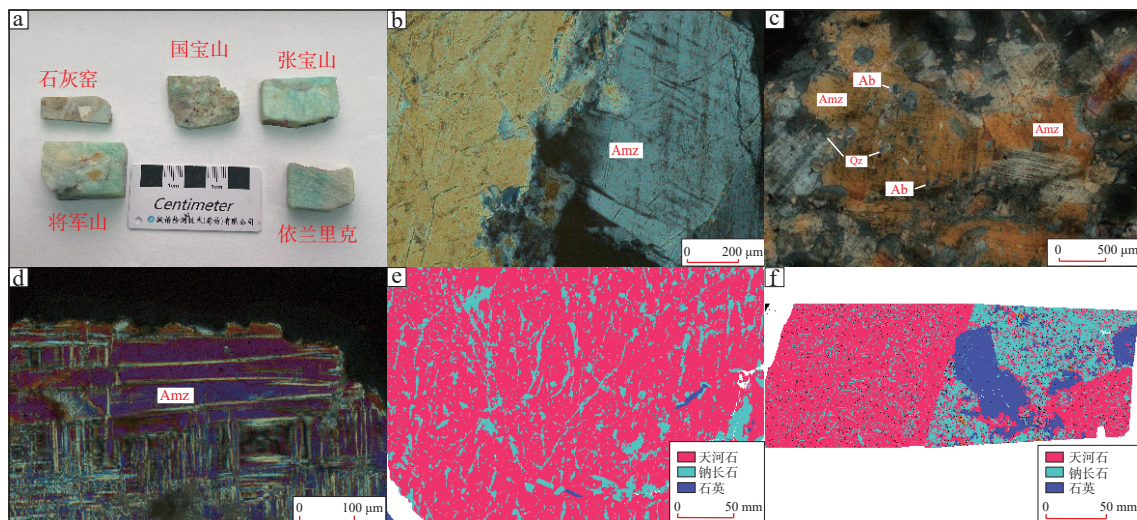
及长石结构特征对比,为致色机理分析提供支撑。

紫外-可见光谱分析在长安大学珠宝实验室完成。仪器为标旗(GEM-3 000)紫外-可见分光光谱仪,测试范围220~850 nm,分辨率0.2 nm,200 nm/min;50 μm 光斑采用积分球方式获取吸收谱。用于识别与颜色相关的吸收带特征,约束天河石致色机制。

3 测试结果

3.1 矿物学特征

来自不同矿床的天河石样品均呈现不同的蓝色、绿色及蓝绿色(图7a)。国宝山矿床中的天河石呈蓝绿-绿色,颜色分布不均,细粒(0.2~0.8 mm),与钠长石、石英和云母等矿物共生(图7b)。张宝山矿床中的天河石呈蓝绿色,粒径约为0.2~0.5 mm,中间夹有较大的石英颗粒以及钠长石条带(图7c)。依兰里克矿床中的天河石呈灰白-浅蓝-蓝色,粒度较细(0.1~0.2 mm),颜色内部较为均匀,表明可见解理面闪光,钠长石呈条带状分布其间(图7d)。将军山矿床的天河石颜色分布不均,呈现浅蓝绿色-蓝绿色,粒度为0.5~5 mm,与钠长石、石英等矿物伴生(图7e)。石灰窑矿床的天河石呈浅蓝绿色,粒度较大(1~5 mm),局部可见伟晶结构,中间可见白色钠长石斑块(图7f)。偏光显微镜显示,所有天河石均发育两组解理,发育典型的格子双晶。天河石成分较为纯净,大部分为微斜长石,小部分钠长石呈条带状分布在天河



a. 天河石手标本图; b. 国宝山天河石镜下图; c. 张宝山天河石镜下图; d. 依兰里克天河石镜下图; e. 将军山天河石矿物图; f. 石灰窑天河石矿物图; Amz. 天河石; Qz. 石英; Ab. 钠长石

图7 天河石手标本和显微图片

Fig. 7 Hand specimen and photomicrographs of amazonite

石中,天河石常与石英等矿物紧密共生。

3.2 矿物化学组成特征

本次研究对选取的天河石进行了 LA-ICP-MS 微量元素分析,除去异常数据点,有效测试点共计 70 个(表 1)。另将其与前人所做的钾长石数据进行对比分析,结果表明天河石的主要化学成分为 SiO_2 (61.1%~69.5%, 平均为 63.7%), Al_2O_3 (12.7%~21.1%, 平均为 18.6%) 以及 K_2O (14.3%~18.9%, 平均为 16.5%), 以及少量的 Na_2O (0.220%~1.33%, 平均为 0.480%), 其他成分质量分数较低。钾长石的主要化学成分为 SiO_2 (62.4%~66.6%, 平均为 64.4%), Al_2O_3 (17.7%~20.7%, 平均为 19.0%), K_2O (9.22%~16.5%, 平均为 13.4%) 以及少量的 Na_2O (0.200%~5.03%, 平均为 2.05%)。长石 Or-Ab-An 三角图解分析表明,天河石 Or 端元组分含量为 81.2~98.2, 平均值为 95.4; Ab 端元组分含量为 1.78~11.5, 平均值为 4.20; An 端元组分含量为 0~7.29, 平均值为 0.39, 属于碱性长石系列。钾长石 Or 端元组分含量为 53.7~98.1, 平均值为 80.5; Ab 端元组分含量为 1.8~44.6, 平均值为 18.8; An 端元组分含量为 0~6.57, 平均值为 0.72。与钾长石相比,天河石具有明显较高的 Or 端元组分和较低的 Ab 端元组

分含量(图 8)。

微量元素方面,天河石中 Rb、Cs、Pb、Ga 的含量普遍较高,且在不同矿床中的变化范围较大(图 9)。具体而言,Rb 的最高含量出现在石灰窑矿床中的天河石中,达 $10\,409\times 10^{-6}$,最低出现在将军山矿床,为 $1\,492\times 10^{-6}$,平均含量为 $4\,265\times 10^{-6}$;而钾长石中 Rb 的平均含量为 403×10^{-6} ,变化范围为 $154\times 10^{-6}\sim 1\,081\times 10^{-6}$ (图 9a)。Pb 的含量在张宝山矿床中最高(699×10^{-6}),将军山最低(10.4×10^{-6}),平均为 221×10^{-6} ;钾长石中 Pb 的平均含量为 67.9×10^{-6} ,介于 $8.05\times 10^{-6}\sim 327\times 10^{-6}$ (图 9b)。Cs 在依兰里克矿床中含量最高($2\,909\times 10^{-6}$),在国宝山矿床中最低(47.3×10^{-6}),平均为 377×10^{-6} ;钾长石中 Cs 的平均含量仅为 3.27×10^{-6} ,变化范围介于 $0.400\times 10^{-6}\sim 10.3\times 10^{-6}$ (图 9c)。Ga 的最高含量出现在石灰窑矿床(76.3×10^{-6}),最低在将军山(10.1×10^{-6}),平均为 41.5×10^{-6} ;钾长石中 Ga 的平均含量为 16.8×10^{-6} ,变化范围为 $8.67\times 10^{-6}\sim 42.3\times 10^{-6}$ (图 9d)。所有天河石的 K/Rb 值均较低(12.2~82.1),反映其结晶自高度演化分异的花岗岩浆;而钾长石的 K/Rb 值较高且变化范围较大(135~947),则反映了其可以形成于岩浆演化较低的阶段(图 9e)。此外,天河石的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值介

表 1 天河石元素含量表

Tab. 1 Element content of amazonite

	国宝山		石灰窑		将军山		依兰里克		张宝山		钾长石	
	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围
	(n=19)		(n=7)		(n=13)		(n=13)		(n=13)		(文献汇编)	
Na_2O	0.418	0.272~0.794	0.525	0.322~0.822	0.621	0.219~1.00	0.428	0.291~0.531	0.444	0.250~1.33	2.33	1.18~5.03
MgO	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl~0.010	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	0.013	0~0.160
Al_2O_3	18.5	16.5~20.3	18.2	17.1~19.1	19.0	17.2~21.1	18.5	12.7~20.6	18.9	16.4~20.5	19.0	17.7~20.7
SiO_2	63.5	61.7~67.0	64.17	62.1~66.7	63.3	61.3~65.6	64.1	61.1~69.5	63.6	62.0~66.8	64.4	62.4~66.6
P_2O_5	0.019	Bdl~0.101	0.023	Bdl~0.052	0.057	Bdl~0.203	0.040	Bdl~0.243	0.043	Bdl~0.296	—	—
K_2O	17.0	15.5~18.9	16.1	14.3~18.9	16.5	14.8~18.8	16.1	14.9~17.4	16.5	14.3~17.7	13.1	9.22~16.5
CaO	0.029	Bdl~0.203	0.022	Bdl~0.08	0.131	Bdl~1.18	0.111	Bdl~0.942	0.121	Bdl~1.53	0.166	0~1.35
TiO_2	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	0.015	Bdl~0.179	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl~0.019	0.008	0~0.010
MnO	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	0.002	0~0.020
FeO	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	0.098	Bdl~1.11	0.035	Bdl~0.213	0.029	Bdl~0.209	0.106	0.040~0.510
Or	96.3	92.9~97.4	95.1	91.6~97.0	94.0	90.2~98.2	95.6	92.1~97.4	95.5	81.2~97.8	80.5	53.7~98.1
Ab	3.61	2.66~7.10	4.791	2.92~8.03	5.39	1.78~9.37	3.86	2.63~4.64	3.90	2.18~11.5	18.8	1.81~44.6
An	0.138	Bdl~0.970	0.113	Bdl~0.40	0.601	Bdl~5.36	0.544	Bdl~4.62	0.577	Bdl~7.29	0.72	0~6.57
Li	0.950	Bdl~5.21	2.84	Bdl~10.4	8.47	Bdl~36.4	49.8	27.0~86.5	4.80	Bdl~39.4	2.85	0.080~14.2
Be	6.53	1.77~10.2	5.35	Bdl~7.38	10.5	1.24~38.0	4.12	Bdl~8.22	6.13	Bdl~16.8	0.979	0.022~11.3

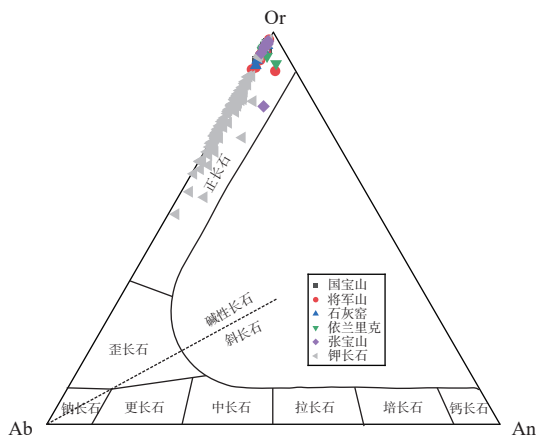
续表 1

	国宝山		石灰窑		将军山		依兰里克		张宝山		钾长石	
	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围
	(n=19)		(n=7)		(n=13)		(n=13)		(n=13)		(文献汇编)	
B	9.54	Bdl~24.3	18.6	11.2~36.1	19.7	Bdl~105	36.5	Bdl~60.6	16.0	Bdl~46.3	—	—
Sc	2.10	0.127~3.64	3.65	2.76~5.66	10.2	Bdl~80.1	4.48	Bdl~17.5	4.13	0.514~13.8	—	—
V	Bdl	Bdl~0.428	Bdl	Bdl~0.18	2.41	Bdl~25.9	0.320	Bdl~1.77	0.128	Bdl~0.827	0.283	0~8.60
Cr	2.23	Bdl~10.1	2.30	Bdl~9.30	30.9	Bdl~310	7.37	Bdl~25.3	210	Bdl~1.55 ×10 ³	19.2	0~563
Co	Bdl	Bdl~0.489	Bdl	Bdl~0.130	0.149	Bdl~0.762	0.490	Bdl~5.35	0.573	Bdl~5.05	0.252	0~1.33
Ni	2.32	Bdl~18.4	1.03	Bdl~3.23	3.16	Bdl~28.5	5.15	Bdl~35.0	8.57	Bdl~57.2	3.94	0~32.8
Cu	1.27	Bdl~7.20	1.04	Bdl~2.86	8.60	Bdl~59.3	1.36	Bdl~7.85	5.31	Bdl~48.8	1.75	0~8.12
Zn	2.50	Bdl~14.1	0.421	Bdl~2.41	10.9	Bdl~48.2	5.39	Bdl~34.4	6.03	Bdl~26.9	5.32	0~47.0
Ga	44.9	39.3~54.9	66.1	52.6~76.3	31.6	10.1~46.9	38.3	13.9~52.7	36.4	15.8~45.9	16.8	8.67~42.3
Rb	4.72 ×10 ³	4.14×10 ³ ~5.34×10 ³	8.19 ×10 ³	6.01×10 ³ ~ 1.04×10 ⁴	2.06 ×10 ³	1.49×10 ³ ~2.64 ×10 ³	4.73 ×10 ³	2.03×10 ³ ~8.39 ×10 ³	3.24 ×10 ³	2.85×10 ³ ~ 4.75×10 ³	403	154×10 ³ ~ 1.08×10 ³
Sr	4.26	0.178~16.2	0.427	0.196~0.850	22.5	Bdl~61.3	11.5	0.676~20.5	0.414	Bdl~2.25	424	15.5×10 ³ ~ 1.88×10 ³
Y	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl~0.106	0.150	Bdl~0.591	0.173	Bdl~2.01	Bdl	Bdl~0.522	0.232	0.006~7.62
Zr	3.10	Bdl~58.4	Bdl	Bdl~0.124	Bdl	Bdl~0.444	0.153	Bdl~1.31	0.142	Bdl~1.15	0.552	0.010~1.61
Nb	Bdl	Bdl~0.100	Bdl	Bdl~0.247	0.665	Bdl~7.57	Bdl	Bdl~0.149	Bdl	Bdl~0.427	—	—
Mo	Bdl	Bdl~0.328	0.126	Bdl~0.563	7.56	Bdl~92.5	Bdl	Bdl~0.590	0.358	Bdl~2.97	1.05	0.009~12.9
Sn	2.15	Bdl~5.59	10.3	3.08~21.5	4.58	Bdl~23.4	1.86	Bdl~10.2	4.26	Bdl~24.3	—	—
Cs	109	47.3~332	136	78.4~250	120	66.9~211	1.42 ×10 ³	316×10 ³ ~2.91 ×10 ³	110	49.7~214	3.27	0.400~10.3
Ba	57.2	31.9~101	2.74	Bdl~7.40	88.2	44.5~142	72.6	3.49~155	2.49	Bdl~10.1	2.83×10 ³	38.0×10 ⁴ ~ 1.64×10 ⁴
La	0.103	Bdl~0.254	Bdl	Bdl~0.167	0.135	Bdl~0.608	0.472	Bdl~1.43	0.724	Bdl~1.33	1.07	0.093~13.7
Ce	0.120	Bdl~0.277	0.191	Bdl~0.360	0.133	Bdl~0.506	Bdl	Bdl~0.193	0.702	Bdl~1.60	1.71	0.200~5.23
Pr	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl~0.38	0.088	0~2.95
Nd	0.147	Bdl~0.778	Bdl	Bdl~0.101	0.298	Bdl~1.86	0.151	Bdl~0.472	0.175	Bdl~1.05	0.832	0~36.8
Sm	0.119	Bdl~0.781	Bdl	Bdl~0.192	5.85	Bdl~74.0	0.191	Bdl~1.13	0.380	Bdl~2.33	0.106	0~2.16
Eu	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl~0.345	0.172	Bdl~1.03	Bdl	Bdl~0.102	0.587	0.050~3.05
Gd	0.138	Bdl~0.461	Bdl	Bdl~0.134	3.31	Bdl~36.5	0.650	Bdl~4.31	0.914	Bdl~5.23	0.070	0~1.85
Tb	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl~0.25	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	0.011	0~0.261
Dy	Bdl	Bdl~0.257	Bdl	Bdl~0.201	0.351	Bdl~1.76	Bdl	Bdl~0.342	0.404	Bdl~3.11	0.066	0~1.64
Ho	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl	0.233	Bdl~2.54	Bdl	Bdl~0.482	Bdl	Bdl~0.383	0.013	0~0.264
Er	Bdl	Bdl~0.109	Bdl	Bdl	0.266	Bdl~2.49	Bdl	Bdl~0.210	Bdl	Bdl~0.473	0.039	0~0.684
Tm	Bdl	bdl	Bdl	Bdl	Bdl	Bdl~0.199	Bdl	Bdl~0.100	Bdl	Bdl~0.214	0.008	0~0.264
Yb	Bdl	Bdl~0.313	Bdl	Bdl~0.275	1.21	Bdl~14.4	0.478	Bdl~2.85	0.677	Bdl~6.80	0.041	0~0.437
Lu	Bdl	bdl	Bdl	Bdl	0.197	Bdl~2.35	Bdl	Bdl~0.160	Bdl	Bdl~0.370	0.010	0.001~0.080
Hf	Bdl	Bdl~0.355	0.141	Bdl~0.536	0.496	Bdl~2.83	Bdl	Bdl~0.712	0.642	Bdl~7.55	—	—
Ta	Bdl	Bdl~0.138	Bdl	Bdl~0.333	Bdl	Bdl~0.301	Bdl	Bdl~0.900	Bdl	Bdl~0.365	—	—

续表 1

国宝山			石灰窑		将军山		依兰里克		张宝山		钾长石			
平均值		范围	平均值		范围	平均值		范围	平均值		范围	平均值		范围
(n=19)			(n=7)		(n=13)		(n=13)		(n=13)		(文献汇编)			
W	Bdl	Bdl~0.235	0.173	Bdl~0.461	0.356	Bdl~1.83	Bdl	Bdl~0.195	0.139	Bdl~0.500	—	—		
Pb	209	103~334	136	79.4~239	263	10.4~403	211	39.0~349	254	22.9~699	67.9	8.05~327		

注: 主量元素含量为%, 微量元素含量为 10^{-6} ; 测试结果“Bdl”代表低于检测下限; 天河石数据按矿床分组(每组2块样品), 表头 n 为该组全部分析点数; 钾长石为文献汇编对比数据, 不同元素有效 n 不同, 均值/范围按可用数据计算。



钾长石数据来自 Moore et al.(2008)、Xu et al.(2017)、陈羽馨等(2025)、张承杰等(2025); 天河石数据按矿床分组显示(每个矿床包含 2 块样品), 各矿床组的分析点数 n 见表 1 表头

图8 天河石及钾长石 Or-Ab-An 三角图解
(赖绍聪等, 2003)

Fig. 8 Or-Ab-An ternary diagram for amazonite and K-feldspar
于 10.8~84.1, 普遍高于钾长石(1.83~13.2)(图 9f)。

3.3 X 射线衍射分析

天河石样品 X 射线衍射图谱(图 10)显示, 所有样品的衍射峰在峰形、位置和强度方面基本相同, 表明其矿物组成和含量较为接近。将天河石的衍射峰与微斜长石的标准卡片(标准卡片号: 76-1239)进行对比后发现, 天河石的主要衍射峰与微斜长石吻合。此外, 少数测点可对应至钠长石标准卡片(标准卡片号: 10-0393), 指示其应为天河石中的钠长石条带。

天河石的 XRD 衍射峰具有较窄的半高宽和尖锐的峰形(图 10), 反映出矿物结晶度较高的特点。物相分析表明, 研究样品主要由微斜长石和钠长石组成, 未检出其他矿物相。主要矿物为微斜长石, 主要衍射峰有 $2\theta=13.641^{\circ}(020)$ 、 $24.041^{\circ}(\bar{2}01)$ 、 $27.427^{\circ}(040)$ 、 $41.744^{\circ}(060)$ 、 $50.534^{\circ}(\bar{2}04)$, 在这些衍射峰中, 以 $2\theta=27.427^{\circ}$ 的(040)的衍射峰最高, 是天河石的特征峰, 其余衍射峰强度相对较弱; 钠长石为次要矿物, 含量

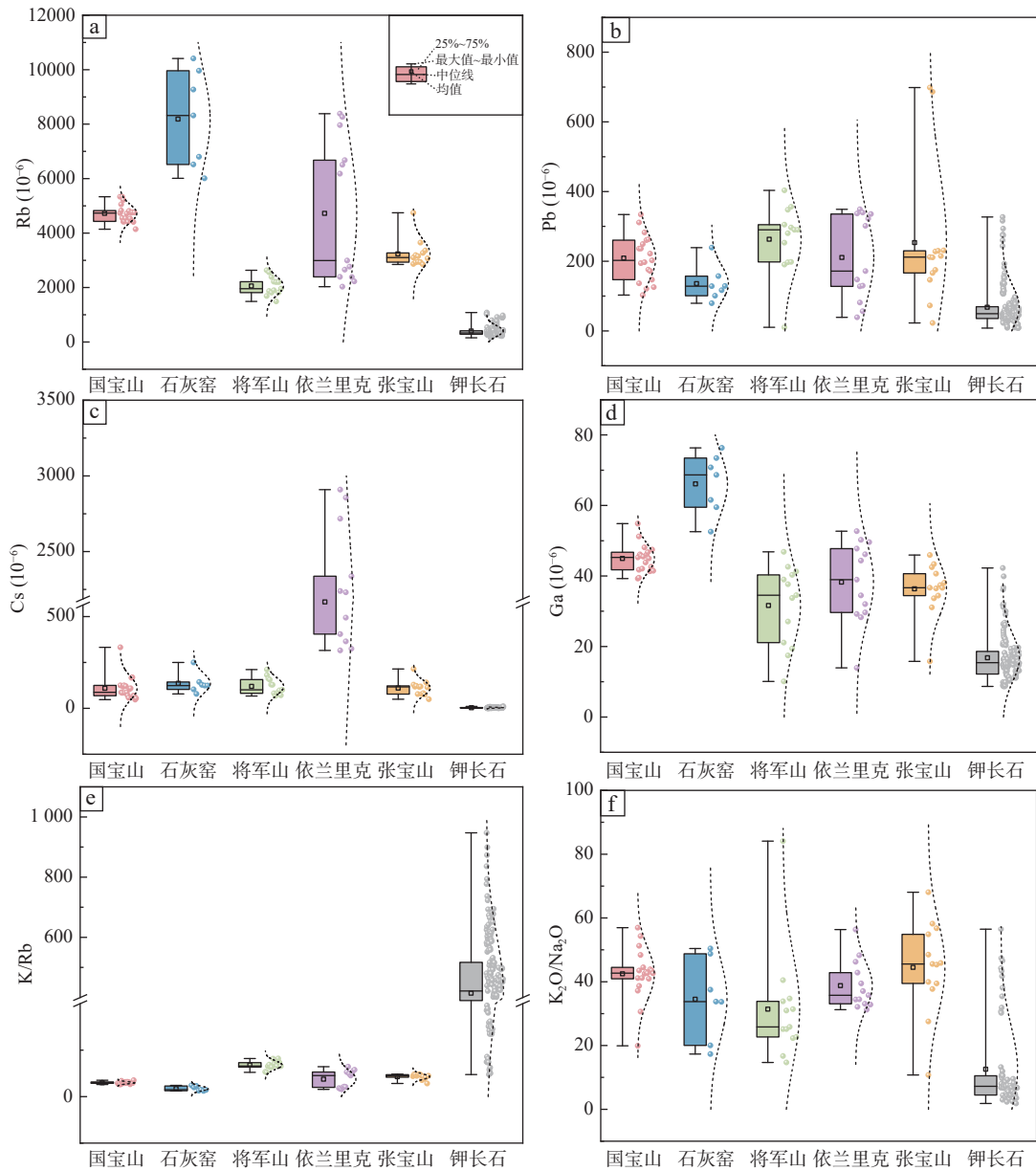
较少, 其对应的衍射峰数量也较为有限。

通过 Jade 软件对天河石 X 射线衍射数据进行计算, 获取 5 个矿床天河石的晶胞参数(表 2)。5 个矿床的天河石样品的晶胞参数与微斜长石标准卡片基本相同, 但有一定范围的波动, 说明天河石矿物组成的稳定性, 晶体结构骨架未发生根本性改变。天河石的晶胞参数中, a 轴长度介于 $8.583\sim 8.615\text{ \AA}$, 平均值为 $8.597\text{ \AA}$, 相较于微斜长石的 $8.573\text{ \AA}$, 略长 $0.024\text{ \AA}$; b 轴长度为 $12.914\sim 12.979\text{ \AA}$, 平均长度达 $12.956\text{ \AA}$, 较微斜长石的 $12.983\text{ \AA}$ 短 $0.027\text{ \AA}$; c 轴长度为 $7.215\sim 7.243\text{ \AA}$, 均值为 $7.228\text{ \AA}$, 比微斜长石的 $7.220\text{ \AA}$ 稍长 $0.008\text{ \AA}$ 。天河石的晶胞体积为 $720.25\sim 725.50\text{ \AA}^3$, 平均为 $722.82\text{ \AA}^3$, 与微斜长石($722.70\text{ \AA}^3$)基本一致, 个别样品体积偏大。a 轴与 c 轴的伸长, 可能与晶格中 K^+ 被更大半径的 Rb^+ 和 Cs^+ 类质同象替代有关。大离子嵌入会撑开沿 a、c 轴方向的晶格间隙, 导致晶轴增长。b 轴的缩短是晶体为维持结构稳定, 对其他方向的晶格变化(a、c 轴伸长)的适应性调整。通过缩短 b 轴平衡晶格张力, 最终使晶胞体积维持与微斜长石保持较小偏差, 保证晶体结构的稳定性。天河石的晶胞角(α 角为 $90.46^{\circ}\sim 90.76^{\circ}$ 、 β 角为 $115.83^{\circ}\sim 116.13^{\circ}$ 、 γ 角为 $87.60^{\circ}\sim 87.77^{\circ}$)均符合三斜晶系“无直角”特征且数值集中, 说明无对称性转变、结构完整性良好。

3.4 拉曼光谱分析

在对天河石样品进行拉曼测试时, 由于其属于非均质体并具有各向异性, 晶体在不同方向上会对散射光产生不同的偏振效应。因此, 即使在同一晶体的不同方向上采集拉曼光谱, 各谱峰之间的相对强度可能有所不同, 但谱峰的相对位置(即峰位)仍保持一致(徐培苍等, 1996)。

本次研究从每块天河石样品中选取一个颜色较鲜艳的点进行测试, 共计 10 个点, 并将其结果与前人所测微斜长石拉曼光谱进行对比。结果表明, 天河石的拉曼峰的峰位主要分布于 3 个区间: <



钾长石数据来自 Xu et al.(2017)、Zhang et al.(2022)、陈羽馨等(2025); 天河石数据按矿床分组显示
(每个矿床包含 2 块样品), 各矿床组的分析点数 n 见表 1 表头

图9 天河石及钾长石微量元素含量及比值变化箱线图

Fig. 9 Box-and-whisker plots showing variations in trace-element concentrations and ratios for amazonite and K-feldspar

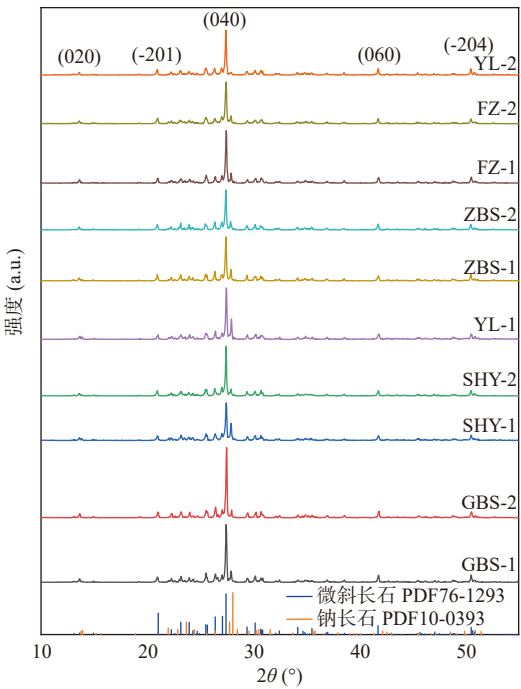
400 cm^{-1} 、 $400\text{ cm}^{-1}\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 、 $800\text{ cm}^{-1}\sim 1\,200\text{ cm}^{-1}$, 具体谱峰位置包括 157 cm^{-1} 、 285 cm^{-1} 、 454 cm^{-1} 、 476 cm^{-1} 、 513 cm^{-1} 、 748 cm^{-1} 、 812 cm^{-1} (图 11)。这些特征峰与微斜长石的拉曼峰位置基本一致, 说明天河石的核心晶体结构与微斜长石一致, 没有发生根本性结构改变, 晶体结构主体仍然保持完整稳定。

3.5 紫外可见光谱分析

可见光的波长范围一般被认定为 $380\sim 780\text{ nm}$

(宇霄等, 2005)。本次研究所测得的所有天河石样品的主要吸收区位于 $200\sim 380\text{ nm}$ 的紫外区和 $570\sim 780\text{ nm}$ 的橙红区(图 12), 因 $200\sim 380\text{ nm}$ 的紫外区人的肉眼无法识别, 所以紫外区对天河石的颜色影响较小; 而 $450\sim 570\text{ nm}$ 的蓝绿区吸收较少, 故与天河石特有的蓝绿色调一致。

5 个矿床中天河石样品的紫外-可见光谱分析表明, 所有样品普遍存在 248 nm 和 382 nm 两个吸收峰



各谱线沿强度方向平移以便对比; 下方为标准卡片: 微斜长石 (PDF#76-1293)与钠长石(PDF#10-0393); GBS.国宝山; ZBS.张宝山; SHY.石灰窑; FZ.将军山(方正); YL.依兰里克

图10 天河石 XRD 衍射图谱
Fig. 10 XRD patterns of amazonite

以及 620~740 nm 一条宽吸收带。此外, 部分样品还检测到其他吸收峰: 284 nm 吸收峰仅出现在石灰窑的样品以及 FZ-1 和 ZBS-1 中; 318 nm 吸收峰则仅见于石灰窑的样品和 ZBS-2 中, 其他样品均未发现这两个

吸收峰。248 nm、284 nm 与处吸收峰通常与天河石中含有的杂质元素的电子跃迁有关(宇霄等, 2005)。620~740 nm 处吸收带是天河石的特征吸收带, 通常认为其源于与 Pb 的相关色心(Hofmeister et al., 1985; Julg, 1998; Ostrooumov, 2005; Correcher et al., 2011)。

4 讨论

4.1 天河石的致色机理探讨

矿物的颜色成因一直是矿物学研究中的热点问题。研究发现, 矿物的致色机理与其微量元素的含量及其赋存状态密切相关。对于天河石的致色机理目前仍存在争议, 有“Cu 致色”“Rb 致色”“Pb 致色”以及“Rb、Cs 等元素共同致色”等不同观点(崔云昊, 1985; Hofmeister et al., 1985; Julg, 1998; 潘兆橹, 1993; Correcher et al., 2011; Ostrooumov, 2015; 孟国强等, 2016; 缪春艳, 2018)。

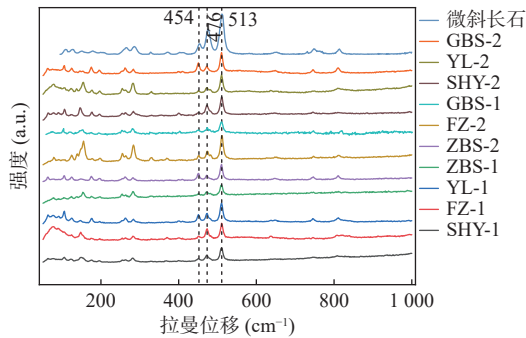
研究发现, 天河石中的微量元素十分丰富, 其中, Rb、Cs、Pb、Ga 等元素的含量较高, Li、Be、B、Co、Zn、Nb 等元素含量较低(表 1)。本次研究所测天河石 Cu 含量普遍较低, 许多样品点未检测出 Cu, 因此不支持 Cu 是天河石的致色元素。进一步对比天河石与钾长石的关键微量元素含量(图 9)。笔者发现, 有显著蓝绿色的天河石其 Rb($1.492\times10^{-6}\sim10.409\times10^{-6}$)、Pb($10.4\times10^{-6}\sim699\times10^{-6}$)、Cs($47.3\times10^{-6}\sim2.908\times10^{-6}$)、Ga($10.1\times10^{-6}\sim76.3\times10^{-6}$)含量整体均明显高于

表 2 天河石晶胞参数表(含微斜长石)

Tab. 2 Unit cell parameters of amazonite (with microcline reference)

晶胞参数 样品	a (Å)	b (Å)	c (Å)	α (°)	β (°)	γ (°)	V (Å ³)
微斜长石	8.573	12.983	7.220	90.65	115.83	87.70	722.70
GBS-1	8.605	12.979	7.230	90.59	115.94	87.77	725.50
GBS-2	8.615	12.914	7.243	90.46	116.13	87.64	722.72
SHY-1	8.592	12.964	7.221	90.68	115.92	87.75	722.91
SHY-2	8.593	12.961	7.215	90.65	115.94	87.63	721.97
ZBS-1	8.587	12.960	7.222	90.65	115.95	87.66	722.07
ZBS-2	8.583	12.962	7.219	90.63	115.94	87.69	721.56
FZ-1	8.603	12.972	7.236	90.76	116.01	87.60	725.02
FZ-2	8.590	12.966	7.228	90.63	116.04	87.66	722.66
YL-1	8.588	12.966	7.224	90.63	115.96	87.67	722.66
YL-2	8.584	12.941	7.217	90.59	115.96	87.76	720.25

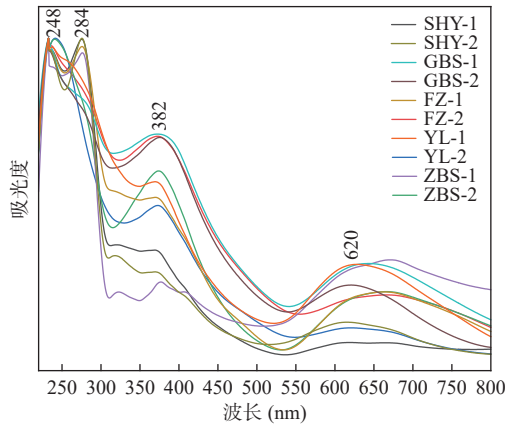
注: 晶胞参数由 XRD 数据在 JADE 9.0 中精修获得; 首行微斜长石参数来自标准卡片(PDF#76-1 239)。



GBS. 国宝山; ZBS. 张宝山; SHY. 石灰窑; FZ. 将军山(方正);
YL. 依兰里克; 各谱线沿强度方向平移以便对比; 微斜长石
光谱数据来自 RRUFF database, Microcline

图11 天河石与微斜长石拉曼光谱图

Fig. 11 Raman spectra of amazonite and microcline



GBS. 国宝山; ZBS. 张宝山; SHY. 石灰窑; FZ. 将军山(方正);
YL. 依兰里克

图12 天河石紫外-可见吸收光谱图

Fig. 12 UV-Vis absorption spectra of amazonite

钾长石的 Rb($154 \times 10^{-6} \sim 1081 \times 10^{-6}$)、Pb($8.05 \times 10^{-6} \sim 327 \times 10^{-6}$)、Cs($0.400 \times 10^{-6} \sim 10.3 \times 10^{-6}$)、Ga($8.67 \times 10^{-6} \sim 42.3 \times 10^{-6}$)。结合已有的研究数据可推断,相对于钾长石,天河石具有更高含量的 Rb、Pb、Cs 及 Ga 等微量元素,暗示这些元素与天河石的形成及致色存在密切关联(Correcher et al., 2011; 孟国强等, 2016; 余红军等, 2018)。

要明确各元素对天河石颜色形成的具体作用,需结合类质同象替代理论,分析这些离子替代 K^+ 的规律及对晶体结构的影响,进而判断各元素在天河石致色过程中的角色。依据类质同象替代理论,在天河石的结晶过程中,半径相近的离子之间容易发生替代。天河石中 Rb^+ 、 Pb^{2+} 、 Cs^+ 等离子对 K^+ 的替代特征及颜色贡献如下: K^+ 的离子半径为 $1.51 \text{ \AA}$, Rb^+ 的离子半径为

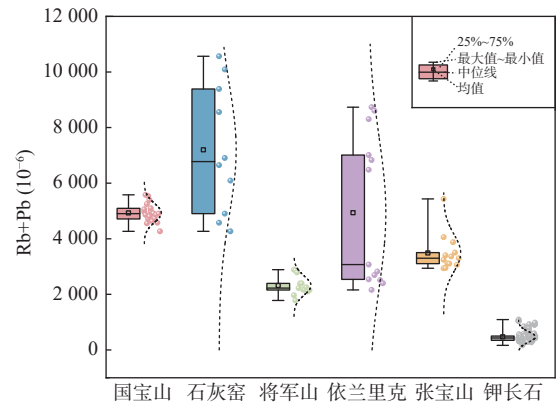
$1.61 \text{ \AA}$, 二者半径差异较小,因此 Rb^+ 可有效替代 K^+ , 由于 Rb^+ 半径略大,替代后会导致晶格产生轻微扩张如 a 轴略偏长,晶胞体积在整体上偏大。这一特征在 XRD 晶胞参数数据(表 2)中得到体现,总体上,各样品晶胞参数与微斜长石标准值($a=8.573 \text{ \AA}$ 、 $b=12.983 \text{ \AA}$ 、 $c=7.220 \text{ \AA}$ 、 $\beta=115.83^\circ$ 、 $V=722.70 \text{ \AA}^3$)接近,变化幅度较小。因此,天河石的结构总体较为稳定,仅局部存在轻微的参数波动,为讨论 Rb、Pb 等元素进入晶格后可能引起的晶格调整与缺陷效应提供依据。其中,部分 Rb 含量较高样品的 a 轴与晶胞体积呈偏大趋势(如 GBS-1: $a=8.605 \text{ \AA}$ 、 $V=725.50 \text{ \AA}^3$; FZ-1: $a=8.603 \text{ \AA}$ 、 $V=725.02 \text{ \AA}^3$; SHY-1/SHY-2: $a=8.592 \sim 8.593 \text{ \AA}$ 、 $V=721.97 \sim 722.91 \text{ \AA}^3$),说明 Rb^+ 进入 K 位后可能引起轻微的晶格扩张,与其类质同象替代特征相符。

Pb^{2+} 的离子半径为 $1.29 \text{ \AA}$, 与 K^+ 半径接近,同样能有效替代 K^+ (Shannon, 1976)。与 Rb^+ 不同的是, Pb^{2+} 进入 K 位后会引入价态差异,更容易造成局部电荷不平衡,从而促使晶体内部形成点缺陷并为色心产生创造条件。将军山矿床天河石 Pb 含量整体较高,但其对应样品 FZ-1 与 FZ-2 的晶胞参数并未出现与 Pb 富集相对应的系统变化(图 9b),仍处于小幅波动范围内(FZ-1: $a=8.603 \text{ \AA}$ 、 $V=725.02 \text{ \AA}^3$; FZ-2: $a=8.590 \text{ \AA}$ 、 $V=722.66 \text{ \AA}^3$; 表 2)。类似地, Pb 含量亦较高的张宝山矿床样品 ZBS-1 与 ZBS-2 晶胞参数同样变化不大(ZBS-1: $a=8.587 \text{ \AA}$ 、 $V=722.07 \text{ \AA}^3$; ZBS-2: $a=8.583 \text{ \AA}$ 、 $V=721.56 \text{ \AA}^3$)。因此, Pb 对致色的关键影响更可能体现在“电荷补偿-缺陷色心”过程上。 Cs^+ 的离子半径为 $1.74 \text{ \AA}$, 比 K^+ 大 15.2%, 虽理论上替代会引发更明显的晶格膨胀,然而天河石 Cs 含量整体高于钾长石(图 9)的同时,依兰里克等 Cs 偏高的天河石晶胞参数未出现相应的大幅变化,指示 Cs 进入晶格(K 位)的量可能有限,因此难以作为致色的主控因素。尽管天河石中的 Ga 含量相对钾长石较高,但 Ga^{3+} 为小半径三价离子,离子半径仅为 $0.62 \text{ \AA}$, 与 K^+ 的半径差异达 $0.89 \text{ \AA}$, 远超类质同象替代的合理范围,难以以类质同象方式进入 K 位替代 K^+ 。且 Ga 含量高的天河石样品晶胞参数整体高度稳定(a 轴范围 $8.573 \sim 8.615 \text{ \AA}$, 体积范围 $720.25 \sim 725.50 \text{ \AA}^3$),即使是 Ga 含量最高的石灰窑样品 SHY-1 ($Ga=76.34 \times 10^{-6}$)与 Ga 含量最低的将军山样品 FZ-2 ($Ga=10.10 \times 10^{-6}$),二者晶胞参数也无显著差异(SHY-1: $a=8.592 \text{ \AA}$ 、 $V=722.91 \text{ \AA}^3$; FZ-2: $a=8.590 \text{ \AA}$ 、 $V=722.66 \text{ \AA}^3$),这表明 Ga^{3+} 未通过晶格替代引发畸变,且 Ga 含量相

对 Rb、Pb、Cs 更低(图 9), 故 Ga^{3+} 难以替代 K^+ , 不是天河石的致色元素。综上所述, Rb^+ 和 Pb^{2+} 的离子半径与 K^+ 的离子半径更为接近, 这些元素更容易在天河石中替代 K^+ 而聚集, 对颜色形成起到关键作用, Cs^+ 可能起到协同因素。

笔者对 5 个矿床天河石的 Rb、Pb 含量进一步分析发现, 尽管天河石的 Rb 和 Pb 含量普遍高于钾长石(Rb 含量平均 403×10^{-6} , Pb 含量平均 67.9×10^{-6}), 但不同矿床的天河石呈现出鲜明的 Rb-Pb 含量规律(图 9): 国宝山矿床天河石的 Rb、Pb 含量均处于中等偏高水平(Rb 4722×10^{-6} , Pb 209×10^{-6}), 证明当两种元素均充足时, 可稳定触发显色效果, 属于“Rb-Pb 双高”均衡富集模式; 将军山矿床天河石呈“高 Pb 低 Rb”特征(Pb 平均为 263×10^{-6} , 5 个矿床中最高; Rb 平均为 2057×10^{-6} , 5 个矿床中最低), 石灰窑矿床则相反, 呈“高 Rb 低 Pb”特征(Rb 平均为 8185×10^{-6} , 5 个矿床中最高; Pb 平均为 136×10^{-6} , 5 个矿床中最低), 呈现出一定的互补关系; 张宝山矿床天河石 Rb 含量(平均为 3235×10^{-6})相对较低, 但 Pb 含量(平均为 254×10^{-6})仅次于将军山, 说明较高 Pb 可弥补 Rb 的相对不足; 依兰里克矿床天河石 Rb 含量(4725×10^{-6})与国宝山相当, Pb 含量(211×10^{-6})处于中等水平, 表明较高 Rb 亦可弥补 Pb 的不足, 这些情况均能稳定形成蓝绿色。综合来看, 无论天河石呈现“高 Pb 低 Rb”“高 Rb 低 Pb”还是“Rb-Pb 双高”特征, 均具备更高的(Rb+Pb)含量(图 13), 暗示天河石的蓝绿色并非由单一元素导致, 而更可能与 Rb 与 Pb 的协同富集有关。

当 Pb^{2+} 替代 K^+ 进入天河石后, 由于 Pb^{2+} 的电荷(+2 价)与 K^+ 的电荷(+1 价)存在显著差异, 当 Pb^{2+} 取代晶格中 K^+ 的位置时, 会打破局部电荷平衡状态; 为缓解这种失衡, 晶体内部会自发形成点缺陷, 为色心的产生创造了条件, 这些点缺陷正是色心的核心构成部分。而 Rb^+ 作为与 K^+ 离子半径($1.51 \text{ \AA}$)相近的大离子亲石元素(Rb^+ 半径 $1.61 \text{ \AA}$), 其类质同象替代虽不直接引发显著的电荷差异(均为+1 价), 但可能会因离子半径的细微差异导致晶格参数(如 a 轴、V 体积)发生微调, 这种晶格框架的轻微形变会进一步促进 Pb 的替代及为电荷失衡提供“结构空间”。色心的本质是离子晶格中能俘获电子或空穴的点缺陷, 在光波入射时, 电子可通过迁移与该缺陷发生作用, 吸收特定波长的光波能量, 最终使晶体呈现特定颜色(李胜荣, 2008)。当可见光照射天河石时, 由 Pb^{2+} 替代引发



钾长石数据来自 Xu et al.(2017)、Zhang et al.(2022)、陈羽馨等(2025); 天河石数据按矿床分组(每矿床 2 块样品), 各组分析点数 n 见表 1 表头

图 13 天河石与钾长石 Rb+Pb 含量变化图

Fig. 13 Variations in Rb + Pb concentrations for amazonite and K-feldspar

的电子色心中的电子会在缺陷能级间发生跃迁, 选择性吸收 $620 \sim 740 \text{ nm}$ 橙红区的光波, 剩余的蓝绿色光反射进入人眼, 这与天河石呈现的 $620 \sim 740 \text{ nm}$ 处的紫外可见吸收特征相一致(Hofmeister et al., 1985; Julg, 1998; Ostrooumov, 2005; Correcher et al., 2011)。此外, 天河石的拉曼光谱分析显示(图 11), 其拉曼特征峰与微斜长石近乎一致, 仅存在因非均质体特性导致的峰强各向异性差异。表明 Rb 和 Pb 对 K 的类质同象替代主要造成晶体局部的晶格缺陷, 并未改变微斜长石整体结构, 为局部缺陷持续发挥作用提供了基础。

综上所述并结合前人研究成果, 笔者认为天河石的蓝绿色调并非由单一元素或简单机制导致, 而是以 Rb 与 Pb 元素协同作用为核心; Rb^+ 通过类质同象替代 K^+ 对晶格产生微调, 并为后续过程提供结构条件, Pb^{2+} 替代 K^+ 时因电荷差异引发局部缺陷并形成色心; 色心电子吸收 $620 \sim 740 \text{ nm}$ 橙红光后, 剩余蓝绿光反射形成特征色调。

4.2 天河石的成因探讨

中亚造山带是全球显生宙新生地壳增生规模最大的多期次增生型造山带之一, 新生地壳的持续增生与古老地壳的再造为区内广泛花岗质岩浆作用及其晚期高分异花岗岩—伟晶岩体系提供了重要物质基础(Xiao et al., 2015)。在后期伸展阶段, 新生地壳发生低程度部分熔融, 不相容元素(如 Rb、Cs、Pb 等)在残余熔体阶段被富集并进入花岗质熔体, 从而为稀有金属富集及富稀有金属矿物的形成创造了条件(Şengör

et al., 1993; 吴昌志等, 2021; 杨富全等, 2025)。

中亚造山带中广泛发育的天河石花岗(伟晶岩)岩代表典型的高分异、富 F 花岗质体系, 天河石常与黄玉、钠长石、石英和白云母等矿物共生, 指示其形成受花岗质岩浆晚期的高度分异演化控制(吴昌志等, 2021)。这类矿物组合通常产出在岩体顶部或边缘岩相带, 以及晚期侵入的小岩株、岩枝或岩脉中, 这些部位也是挥发分和稀有金属元素最终富集的关键部位。随着结晶分异推进, 残余熔体成分逐渐向富硅、富碱方向演变, 在此过程中, 残余熔体不断富集挥发分(如 F、H₂O)及不相容的大离子亲石元素(Rb、Cs、Pb 等)(孔会磊等, 2023), 并不断向岩体顶部或边缘带等晚期阶段部位迁移聚集。在岩浆演化晚期阶段, 熔体中的不断富集的挥发分(如 F、H₂O 等), 一方面可以提高 Rb、Pb、Cs 等元素在熔体或流体中的迁移与分异能力, 另一方面可改变体系的物理化学条件。以 F 为例, 其能显著降低岩浆体系的固相线温度并延长体系结晶分异时间, 从而促进 Rb、Pb、Cs 等在残余熔体中进一步富集, 并有利于天河石等晚期矿物结晶(Villemant et al., 1999; Ballouard et al., 2016)。此时, 残余熔体中高度富集的 Rb、Pb、Cs 等大离子亲石元素, 因其离子半径与 K⁺相近, 可通过类质同象的形式进入较晚结晶的钾长石晶格体系中, 替换部分 K⁺的晶格位置, 导致钾长石化学组分发生显著变化(如 K 占比降低、Rb 与 Pb 含量显著升高), 并可能引起晶格参数的轻微调整(如 a、c 轴略长、b 轴略短), 最终结晶形成天河石。玉等富 F 矿物也伴随着天河石而结晶, 形成天河石花岗(伟晶岩)岩的特征矿物组合(顾连兴等, 2007)。不同矿床天河石的元素组合和含量差异可能指示分异演化程度的不同及晚期流体作用的强弱。

因此, 天河石的形成可视为岩浆分异演化进入晚期阶段的重要标志, 其出现意味着花岗质岩浆经历了充分的分异演化。同时, 天河石作为一种富含 Rb、Cs 等稀有金属元素的矿物, 其分布与含量不仅反映岩浆分异演化程度, 还可以指示稀有金属(如 Li、Rb、Cs、Ta、Nb 等)的富集过程, 是示踪稀有金属成矿作用的重要指示矿物之一。

5 结论

(1)笔者认为天河石的致色机理主要是 Rb、Pb、Cs 元素通过类质同象替代晶格中的 K 离子, 其中 Rb

和 Pb 起主要作用, Rb⁺类质同象替代 K⁺微调晶格, Pb²⁺替代 K⁺因电荷差异引发局部缺陷形成色心, 最终使天河石呈现蓝绿色。

(2)天河石的形成是花岗质岩浆经历高程度分异演化进入晚期阶段的重要标志, 并指示稀有金属元素(如 Rb、Cs)的富集, 是稀有金属成矿作用的重要指示矿物。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 陈羽馨, 彭惠娟, 毛星星, 等. 云南红牛-红山矽卡岩型铜矿床花岗斑岩钾长石巨晶成因及其指示意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2025, 44(1): 147-161.
- CHEN Yuxin, PENG Huijuan, MAO Xingxing, et al. Genesis and indicative significance of K-feldspar megacrysts in the granite porphyry in the Hongniu-Hongshan skarn-type copper deposit, Yunnan province, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2025, 44(1): 147-161.
- 陈祉卫, 袁超, 林正帆, 等. 新疆阿尔泰将军山天河石花岗岩的成因和铷富集机制[J]. 大地构造与成矿学, 2024, 48(6): 1394-1420.
- CHEN Zhiwei, YUAN Chao, LIN Zhengfan, et al. Genesis of the Jiangujianshan Amazonite Granites and the Related Rubidium Enrichment Mechanism in the Chinese Altai, Xinjiang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2024, 48(6): 1394-1420.
- 崔云昊. 天河石颜色之谜[J]. 地球, 1985, (1): 27.
- 董泽义. 华北克拉通东北边界带岩石圈电性结构及其深部流体分布定量研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2015: 1-143.
- DONG Zeyi, Electrical structure and fluid distribution of the lithosphere beneath theNortheastern boundary of the North China Craton[D]. Beijing: Institute of Geology, CEA, 2015: 1-143.
- 段先哲, 时皓, 谭凯旋, 等. 内蒙古石灰窑花岗岩型铌钽铷矿床地质特征及成因[J]. 地质与资源, 2016, 25(1): 32-40.
- DUAN Xianzhe, SHI Hao, TAN Kaixuan, et al. Geology and genesis of hte granitic Niobium-Tantalum-Rubidium deposit in Shihuiyao area, Inner Mongolia[J]. Geology and Resources, 2016, 25(1): 32-40.
- 段振鹏. 大兴安岭南段高分异花岗岩型稀有金属矿床成矿机

- 制——以石灰窑钽铌钽和台莱花钽铌钽矿床为例 [D]. 武汉: 中国地质大学 (武汉), 2024: 1–184.
- DUAN Zhenpeng. Genesis of highly fractionated granite-type rare metal deposit in the southern Great Xing'an Range: Insights from the Shihuiyao Rb-Nb-Ta and Tailaihua Nb-Ta-Be deposits [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2024: 1–184.
- 顾连兴, 吴昌志, 张遵忠, 等. 东疆白石头泉含黄玉天河石花岗岩体的地球化学: 分带和岩浆演化 [J]. 高校地质学报, 2007, 13(2): 207–223.
- GU Lianxing, WU Changzhi, ZHANG Zunzhong, et al. Geochemistry of the Baishitouquan topaz bearing amazonite granite: Zoning and magma evolution [J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(2): 207–223.
- 贺昕宇. 中天山东段国宝山三叠纪高钽天河石花岗岩年代学及岩石地球化学研究 [J]. 矿产勘查, 2019, 10(12): 2899–2905.
- HE Xinyu. Geochronology and geochemistry of Triassic high Rb amazonite granite from Guobaoshan in eastern segment of the middle Tianshan [J]. Mineral Exploration, 2019, 10(12): 2899–2905.
- 黄河, 王涛, 童英, 等. 中国西天山古生代岩浆岩时空架构、源区特征及构造背景 [J]. 西北地质, 2024, 57(6): 25–43.
- HUANG He, WANG Tao, TONG Ying, et al. Spatial and Temporal Framework, Evolution of Magma Sources, and Tectonic Settings of Paleozoic Magmatic Rocks in West Tianshan, China [J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 25–43.
- 孔会磊, 任广利, 李文渊, 等. 西昆仑大红柳滩东含锂辉石花岗岩伟晶岩脉年代学和地球化学特征及其地质意义 [J]. 西北地质, 2023, 56(2): 61–79.
- KONG Huilei, REN Guangli, LI Wenyuan, et al. Geochronology, Geochemistry and Their Geological Significances of Spodumene Pegmatite Veins in the Dahongliutandong Deposit, Western Kunlun, China [J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 61–79.
- 赖绍聪, 刘池阳, 伊海生, 等. 北羌塘新生代火山岩长石矿物激光探针原位测试及其微量元素特征初探 [J]. 地质科学, 2003, 38(4): 539–545.
- LAI Shaocong, LIU Chiyang, YI Haisheng, et al. The in-situ LA-ICP-MS analysis and trace element features for the feldspars from Cenozoic trachy-andesite in north Qiangtang, Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(4): 539–545.
- 李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2009, 39(4): 584–605.
- LI Jinyi, ZHANG Jin, YANG Tiannan, et al. Crustal Tectonic Division and Evolution of the Southern Part of the North Asian Orogenic Region and Its Adjacent Areas [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(4): 584–605.
- 李胜荣. 结晶学与矿物学 [M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1–346.
- 孟国强, 陈美华, 王雅玫. 莫桑比克天河石的宝石学特征 [J]. 宝石和宝石学杂志, 2016, 18(4): 28–32.
- MENG Guoqiang, CHEN Meihua, WANG Yamei. Gemmological Characteristic of Amazonite from Mozambique [J]. Journal of Gems & Gemmology, 2016, 18(4): 28–32.
- 缪春艳. 三个不同产地天河石的宝石学矿物学特征对比研究——中国新疆、莫桑比克、马达加斯加 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2018: 1–62.
- LIAO Chunyan. The Study on Gemmological and Mineralogical Characteristics of Amazonite from Three different Origin: Xinjiang Province, Mozambique, and Madagascar [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018: 1–62.
- 潘兆鲁. 结晶学与矿物学-第3版 [M]. 北京: 地质出版社, 1993, 1–765.
- 任刚. 新疆阿勒泰市方正钽矿地质特征及成因分析 [J]. 新疆有色金属, 2018, 41(2): 60–61, 65.
- 余贵民, 刘堃, 周晋捷, 等. 新疆阿尔泰将军山天河石花岗岩的岩石成因及其对钽成矿的制约 [J]. 岩石学报, 2024, 40(3): 907–926.
- SHE Guimin, LIU Kun, ZHOU Jinjie, et al. Petrogenesis of amazonite granite and its constraints on rubidium mineralization in Jiangujishan, Xinjiang Altai [J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(3): 907–926.
- 吴昌志, 贾力, 雷如雄, 等. 中亚造山带天河石花岗岩及相关钽矿床的主要特征与研究进展 [J]. 岩石学报, 2021, 37(9): 2604–2628.
- WU Changzhi, JIA Li, LEI Ruxiong, et al. Advances and general characteristics of the amazonite granite and related rubidium deposits in Central Asian Orogenic Belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(9): 2604–2628.
- 吴妍蓉, 周海, 赵国春, 等. 中亚造山带南蒙古地区石炭纪—二叠纪岩浆活动及其构造意义 [J]. 西北地质, 2024, 57(3): 11–28.
- WU Yanrong, ZHOU Hai, ZHAO Guochun, et al. Carboniferous-Permian Magmatism of Southern Mongolia, Central Asian Orogenic Belt and Its Tectonic Implications [J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 11–28.
- 谢明材, 苏本勋, 王忠梅, 等. 塔里木北缘与碱性岩有关的稀有—稀土矿床成矿作用研究 [J]. 地质科学, 2020, 55(2): 420–438.

- XIE Mingcai, SU Benxun, WANG Zhongmei, et al. Research on the characteristics of rare and rare earth deposits associated with alkaline rocks in the northern margin of Tarim, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(2): 420–438.
- 新疆地质矿产勘查开发局第六地质大队. 新疆阿勒泰市方正铷矿预查报告[R]. 北京: 全国地质资料馆, 2015, 1–17.
- 徐培苍, 李如璧, 王永强, 等. 地学中的拉曼光谱[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996: 1–176.
- 杨富全, 谷高中, 张忠利, 等. 新疆中亚造山带稀有金属矿地质特征及时空分布规律[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 250–269.
- YANG Fuquan, GU Gaozhong, ZHANG Zhongli, et al. A Review of Geological Characteristics and Time-Space Distribution of Rare Metal Deposits in the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 250–269.
- 余红军, 沈锡田. 天河石的颜色成因探讨[J]. 宝石和宝石学杂志, 2018, 20(2): 38–46.
- YU Hongjun, SHEN Xitian. Discussion of Colour Origin in Amazonite[J]. Journal of Gems & Gemmology, 2018, 20(2): 38–46.
- 宇霄, 徐海松. 颜色信息工程[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005: 1–250.
- 张承杰, 邱添, 熊发挥, 等. 福建德化县茶坑铜-钾长石矿床地质特征、地球化学及成因初探[J]. 地质学报, 2025, 99(6): 2141–2159.
- ZHANG Chengjie, QIU Tian, XIONG Fahui, et al. Geology, geochemistry and metallogenesis of the Chakeng copper-potash feldspar deposit in Dehua County, Fujian Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2025, 99(6): 2141–2159.
- 周会武, 李通国, 张有奎, 等. 甘肃省铷矿地质特征与成矿规律分析[J]. 矿物学报, 2015, 35(1): 73–78.
- ZHOU Huiwu, LI Tongguo, ZHANG Youkui, et al. Research on characteristics and metallogenic regularity of Rb ore in Gansu Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(1): 73–78.
- 邹天人, 徐珏, 陈伟十, 等. 塔里木盆地北缘碱性岩型稀有稀土矿床[J]. 矿床地质, 2002, 21(S1): 845–848.
- ZOU Tianren, XU Yu, CHEN Weishi, et al. Rare and Rare Earth Mineral Deposits Related to Alkaline Rocks on Northern Margin of Tarim Basin, Xinjiang, China[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(S1): 845–848.
- Bai S H, Huang Y, Feng Z J, et al. Granitoid genesis and related rare metal mineralization of the Shihuiyao Rb–Ta–Nb deposit in the Southern Great Xing'an Range, NE China[J]. Gondwana Research, 2025, 140: 264–278.
- Bai S, Lei R X, Brzozowski M J, et al. Constraints on the timing of magmatism and rare-metal mineralization in the Fangzheng Rb deposit, Altai, NW China: Implications for the spatiotemporal controls on rare-metal mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 2023, 157: 105427.
- Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, et al. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition[J]. Geology, 2016, 44(3): 231–234.
- Chen B Y, Wu C Z, Brzozowski M J, et al. Geochronology and tectonic setting of the giant Guobaoshan Rb deposit, Central Tianshan, NW China[J]. Ore Geology Reviews, 2022, 141: 104636.
- Correcher V, Garcia-Guinea J. Study of the luminescence properties of a natural amazonite[J]. Radiation Measurements, 2011, 46(9): 971–974.
- Duan Z, Jiang S Y, Su H M, et al. Beryl as an indicator for elemental behavior during magmatic evolution and metasomatism in the large Shihuiyao Rb-Nb-Ta-Be deposit, Inner Mongolia, NE China[J]. Ore Geology Reviews, 2024, 166: 105940.
- Duan Z P, Jiang S Y, Su H M, et al. Geochronological and geochemical investigations of the granites from the giant Shihuiyao Rb-(Nb-Ta-Be-Li) deposit, Inner Mongolia: Implications for magma source, magmatic evolution, and rare metal mineralization[J]. Lithos, 2021, 400–401: 106415.
- Hofmeister A M, Rossman G R. A spectroscopic study of irradiation coloring of amazonite: structurally hydrous, Pb-bearing feldspar[J]. American Mineralogist, 1985, 70(7–8): 794–804.
- Hu J J, Lei R X, Brzozowski M J, et al. Textures and chemistry of columbite-group minerals record magmatic-hydrothermal processes in the Baishitouquan pluton in the Eastern Tianshan, NW China[J]. Ore Geology Reviews, 2024, 174: 106319.
- Jin X W, Lei R X, Yuan H D, et al. Rb enrichment processes in highly evolved granites: Insights from mica and K-feldspar from the Baishitouquan pluton, Eastern Tianshan[J]. Ore Geology Reviews, 2024, 174: 106301.
- Julg A. A theoretical study of the absorption spectra of Pb⁺ and Pb³⁺ in site K⁺ of microcline: application to the color of amazonite[J]. Physics and Chemistry of Minerals, 1998, 25(3): 229–233.
- Moore J G, Sisson T W. Igneous phenocrystic origin of K-feldspar megacrysts in granitic rocks from the Sierra Nevada batholith[J]. Geosphere, 2008, 4(2): 387.
- Ostrooumov M. Typomorphic features of amazonitic K-feldspar from the Keivy granitic pegmatite (Kola Peninsula Russia)[J]. Schweizerische Mineralogische und Petrologische Mitteilungen, 2005, 85: 89–102.
- Ostrooumov M. Amazonite: mineralogy, crystal chemistry, and typomorphism. [M]. Elsevier, 2015: 1–228.
- Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altai

- tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 299–307.
- Shannon R D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides[J]. *Acta Crystallographica Section A: Crystal Physics, Diffraction, Theoretical and General Crystallography*, 1976, 32(5): 751–767.
- Villemant B, Boudon G. H₂O and halogen (F, Cl, Br) behaviour during shallow magma degassing processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 168(3): 271–286.
- Wang T, Tong Y, Zhang L, et al. Phanerozoic granitoids in the central and eastern parts of Central Asia and their tectonic significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 145: 368–392.
- Wang Z H, Lei R X, Brzozowski M J, et al. Magmatic–hydrothermal evolutionary processes in highly evolved granitic systems: Insights from zircons of the Baishitouquan pluton, NW China[J]. *GSA Bulletin*, 2024, 136(11–12): 4476–4494.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(1): 31–47.
- Wu S B, Lei R X, Brzozowski M J, et al. Rubidium (Rb) enrichment processes in a highly evolved granitic system: Insights from the petrology and geochemistry of the Guobaoshan Rb deposit in eastern Tianshan, NW China[J]. *GSA Bulletin*, 2024, 137(3–4): 1456–1474.
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. *American Journal of Science*, 2010, 310: 1553–1594.
- Xiao W, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 1069.
- Xiao W, Windley B F, Sun S, et al. A Tale of Amalgamation of Three Permo-Triassic Collage Systems in Central Asia: Orogines, Sutures, and Terminal Accretion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 477–507.
- Xu Y M, Jiang S Y. In-situ analysis of trace elements and Sr–Pb isotopes of K-feldspars from Tongshankou Cu–Mo deposit, SE Hubei Province, China: Insights into early potassic alteration of the porphyry mineralization system[J]. *Terra Nova*, 2017, 29(6): 343–355.
- Yuan H D, Lei R X, Brzozowski M J, et al. Multi-stage magmatic–hydrothermal evolution of nepheline pegmatite: Insights from the mineralogy and geochronology of a zircon megacryst from the Yilanlike nepheline pegmatite, South Tianshan[J]. *Ore Geology Reviews*, 2024, 172: 106188.
- Zhang T, Hou Z, Pan X, et al. Cassiterite geochemistry and U–Pb geochronology of the Shihuiyao Rb–(Nb–Ta–Be–Sn) deposit, Northeast China: Implication for ore-forming processes and mineral exploration[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 156: 105393.
- Zhang Y, Gu X, Rusk B, et al. In Situ Trace Elements in Quartz and K-Feldspar from Felsic Igneous Rocks: A Titanium-in-K-Feldspar Geothermometer for Natural Magmatic Systems[J]. *Journal of Petrology*, 2022, 63(11): 1–17.
- Zhi J, Lei R, Chen B, et al. Zircon Genesis and Geochronology for the Zhangbaoshan Super-Large Rubidium Deposit in the Eastern Tianshan, NW China: Implication to Magmatic-Hydrothermal Evolution and Mineralization Processes[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 682720.
- Zhou Z, Che H, Ma X, et al. Magmatic Evolution and Mineralization Process of the Super-Large Shihuiyao Rb–Nb–Ta Deposit, Southern Great Xing’an Range, China. [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2016, 90(6): 2275.