

新疆瓦石峡南锂铍矿地质特征以及 磷灰石对成矿的指示

王国庆^{1,2)}, 梁 婷^{1,2)*}, 刘艳荣^{1,2)*}, 杨智全³⁾, 张 朋³⁾,
王登红⁴⁾, 凤永刚^{1,2)}, 高景刚^{1,2)}, 谭细娟^{1,2)}

1) 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054;

2) 西安市关键金属成矿与高效利用重点实验室, 陕西西安 710054;

3) 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队, 新疆库尔勒 841000;

4) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

摘 要: 新疆阿尔金地区近几年在稀有金属找矿方面取得了重大突破, 新发现了瓦石峡南、阿亚克、吐格曼、稀长沟等多个稀有金属矿床。瓦石峡南锂铍矿位于阿尔金成矿带的西段, 由新疆地质矿产局第三地质大队于 2020 年发现, 共圈定伟晶岩脉 20 余条, 含稀有金属花岗伟晶岩脉 9 条, 现阶段勘查和研究程度较低。本文以矿区 $\rho 9$ 号脉含锂花岗伟晶岩脉中的磷灰石为研究对象, 通过开展矿物学和地球化学特征分析, 探讨其对花岗伟晶岩成矿的指示作用。显微镜和背散射图像观察显示, 磷灰石可分为岩浆期和热液期两个期次。电子探针和 LA-ICP-MS 分析表明矿脉中磷灰石主要为氟-羟基磷灰石, 地球化学特征指示 $\rho 9$ 号脉含锂花岗伟晶岩源于地壳物质部分熔融, 是具有 S 型花岗岩特征的富磷花岗伟晶岩(平均 $P_2O_5 > 0.42\%$ 的高分异过铝质花岗岩), 形成于低氧逸度的还原环境。通过探讨矿区花岗质岩浆的来源、成岩环境以及磷灰石对成矿的指示, 推测瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉含锂花岗伟晶岩的富磷特征是因为富磷过铝质岩浆体系对稀有金属的富集起到了促进作用。

关键词: 瓦石峡南; 磷灰石; 花岗伟晶岩; S 型花岗岩

中图分类号: P595 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.110601

Geological Characteristics of Li-Be Deposit in the Southern Washixia, Xinjiang and the Indication of Apatite on Mineralization

WANG Guoqing^{1,2)}, LIANG Ting^{1,2)*}, LIU Yanrong^{1,2)*}, YANG Zhiquan³⁾, ZHANG Peng³⁾,
WANG Denghong⁴⁾, FENG Yonggang^{1,2)}, GAO Jinggang^{1,2)}, TAN Xijuan^{1,2)}

1) School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054;

2) Xi'an Key Laboratory for Mineralization and Efficient Utilization of Critical Metals, Xi'an, Shaanxi 710054;

3) The Third Geological Branch, Xinjiang Geological and Mineral Bureau, Kuerle, Xinjiang 841000;

4) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: In recent years, significant breakthroughs have been made in rare metal prospecting in the Altyn Tagh of Xinjiang Province, leading to the discovery of new rare metal deposits such as southern Washixia, Ayak, Tugeman, and Xichanggou. The southern Washixia lithium-beryllium deposit is located in the western section of the Altyn Tagh metallogenic belt and was discovered by the Third Geological Brigade of the Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources in 2020. More than 20 pegmatite veins have been identified, including 9 rare

本文由国家重点研发计划“战略性矿产资源开发利用”专项“我国西部伟晶岩型锂等稀有金属成矿规律与勘查技术”项目(编号: 2021YFC2901902)和中国地质调查局“中国矿产地质志”项目(编号: DD20221695)联合资助。

收稿日期: 2024-08-05; 改回日期: 2024-10-20; 网络首发日期: 2024-11-07。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 王国庆, 男, 2000 年生。硕士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: 1372153885@qq.com。

*通信作者: 梁婷, 女, 1967 年生。博士, 教授。主要从事矿床地质、成矿规律等教学与研究工作。E-mail: Liangt@chd.edu.cn。

刘艳荣, 女, 1978 年生。博士, 高级实验师。主要从事流体包裹体、矿床成因等研究工作。E-mail: fwjlyr@chd.edu.cn。

metal granite pegmatite veins. At present, the level of exploration and research is relatively low. In this paper, apatite in the Li-bearing granite pegmatite vein of $\rho 9$ in mining area is taken as the research object, and the indicative role of apatite in the mineralization of granite pegmatite is discussed through mineralogical and geochemical analysis. Through microscope and backscattered electron image observations, apatite can be divided into two stages: magmatic stage and hydrothermal stage. Electron probe and in situ LA-ICP-MS analyses confirm that the apatite in the veins is mainly fluoro-hydroxyapatite. The geochemical characteristics indicate that the $\rho 9$ Li-bearing granite pegmatite originates from the reducing magma of partial melting of crustal materials and is a P-rich granite pegmatite (highly differentiated peraluminous granite with an average $P_2O_5 > 0.42\%$) with characteristics of S-type granite, formed in a reducing environment with low oxygen fugacity. By exploring the source and evolution process of granite magma in the mining area, as well as its indications for mineralization, it is speculated that the P-rich characteristics of the lithium-bearing granite pegmatite in the $\rho 9$ vein of southern Washixia is due to the P-rich peraluminous magmatic system that promotes the enrichment of rare metals.

Key words: southern Washixia; apatite; granite pegmatite; S-type granite

随着战略性新兴产业的快速发展, 锂、铍、铌、钽、铯、铷等稀有金属在国民经济发展及国防安全等方面起着极为关键的作用(翟明国等, 2019; 张辉等, 2021; 郑范博等, 2021)。其中锂主要应用在电器电子工业、冶金业、原子能工业、航空业等方面(李建康等, 2014; Linnen et al., 2014; 刘丽君等, 2017; Nassar, 2017; Kaeter et al., 2018; 王登红等, 2018; 翟明国等, 2019; 王核等, 2021, 2022)。伟晶岩型锂矿由于规模大、品位高、易开发等特点成为锂等稀有金属的主要来源之一(朱汇派等, 2023)。

近年来, 阿尔金稀有金属花岗伟晶岩成矿带在稀有金属找矿中取得了巨大突破, 相继发现了吐格曼、吐格曼北、瓦石峡南、阿亚克、塔什达坂、库木萨依、稀长沟等伟晶岩型锂铍矿床(点)(徐兴旺等, 2019; Gao et al., 2021; 王核等, 2022; 张焕等, 2022), 显示出阿尔金地区较大的稀有金属成矿潜力。然而, 该地区现阶段的勘查程度仍较低, 投入的勘查工作有限。其中瓦石峡南锂铍矿床位于阿尔金成矿带的西段, 是新疆地质矿产局第三地质大队 2020 年发现的, 矿区共圈定含矿伟晶岩脉 9 条。由于该地区处于高海拔、深切割、厚覆盖的特殊地貌景观区, 交通极为不便, 勘查工作仍处于普查阶段。瓦石峡南、稀长沟和吐格曼北三个锂(铍)矿床, 深边部还有厚大矿体未进行控制, 矿床资源量仍有极大增长空间(张朋等, 2023)。

有关阿尔金地区锂-铍矿, 近几年开展了一些年代学和成矿地质特征的研究工作(徐兴旺等, 2019; Gao et al., 2021; 代鸿章等, 2023; Li et al., 2023; 张朋等, 2023)。研究显示, 吐格曼与吐格曼北花岗伟晶岩型锂铍矿床形成于 470~460 Ma(徐兴旺等, 2020; 张朋等, 2023), 与之相伴的黑云母花岗岩年龄为 480~470 Ma(徐兴旺等, 2020); 作者团队采用 LA-ICP-MS 技术获得瓦石峡南锂辉石型花岗伟晶岩和锂云母型花岗伟晶岩铌钽铁矿的 U-Pb 年龄分

别为 (450.6 ± 5.6) Ma 和 (413.2 ± 4.9) Ma(另文待发); 利用锂云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年, 获得 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 (402.18 ± 3.95) Ma(代鸿章等, 2023)。以上成果显示阿尔金锂-铍稀有金属形成于早古生代晚期—晚古生代早期, 对应俯冲-碰撞构造背景的多期岩浆-构造演化阶段(徐兴旺等, 2019; 张朋等, 2024), 具有良好的稀有金属成矿条件与巨大的找矿潜力(张朋等, 2024)。

已有研究表明, 与稀有金属 Li、Be、Nb、Ta、W、Sn 等成矿有密切关系的过铝质岩石常以富磷为特征(MacDonald et al., 1985; Raimbault et al., 1998; Broska et al., 2004; 唐勇等, 2008; 吕正航等, 2018)。磷灰石是一种六方晶系的钙磷酸盐矿物(Hughes et al., 2015), 可以在各类岩浆岩中产出, 是岩浆岩中广为发育的副矿物之一(Piccoli et al., 2002; Webster et al., 2015; O'Sullivan et al., 2020), 其晶体化学式一般为 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})_2$, 元素周期表中一半以上的长寿命元素均可进入磷灰石晶格(Pan et al., 2002; Piccoli et al., 2002; Hughes et al., 2015; 詹琼窑等, 2022)。作为一种重要的富磷矿物相, 磷灰石内富含 Fe、Mn、Mg、Sr、REEs、Th、U 等元素, 这些元素主要通过类质同象替换的方式进入其晶格中, 元素浓度与岩浆成分、岩浆分异程度和氧逸度等密切相关(周宝全等, 2022)。基于以上, 本文在瓦石峡南锂铍稀有金属伟晶岩地质特征研究基础上, 以磷灰石为研究对象, 通过对其开展详细的矿物学和地球化学成分分析, 探讨岩浆来源、成矿环境及演化过程中磷对锂富集成矿的制约。

1 区域地质概况

阿尔金地区位于青藏高原北缘、柴达木地块、塔里木地块以及祁连昆仑造山带之间, 由阿北地块、红柳沟—拉配泉蛇绿混杂岩带、阿中地块、江嘎萨依—巴什瓦克高压带和阿帕—芒崖蛇绿混杂岩带组成(Gao et al., 2021)(图 1)。

区域出露地层有新太古界—古元古界阿尔金岩群, 长城系巴什库尔干岩群, 蓟县系木孜萨依组和金雁山组, 青白口系乱石山组、冰沟南组和小泉达坂组。地层发生不同程度的变质作用, 其中中等-深变质岩主要分布于阿尔金岩群和巴什库尔干岩群, 轻微-中浅变质岩主要分布于蓟县系和青白口系; 早古生代地层主要分布于阿中断裂和阿南断裂之间; 晚古生代零星分布于阿南断裂附近。区域断裂发育, 阿中断裂与阿南断裂近平行。阿南断裂连续平直延伸, 总体走向 75° , 与约马克其—库兰勒格断裂之间存在 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的夹角。区域经历了多期造山作用, 构造混杂岩比较发育。由于强烈的构造作用, 在伸展滑脱、逆冲和走滑剪切等作用下, 岩石遭受了强烈的变形、变质作用改造。多期造山作用诱发了频繁、强烈、多期次的构造-岩浆活动, 新元古代、早古生代、晚古生代、中生代等均有规模不等的岩浆侵入, 岩性以中酸性侵入岩为主体, 分布广泛。主要以岩基、岩株、局部为岩脉、岩墙等形式沿阿尔金山呈北东向带状展布(图 1)。

2 矿区地质特征

瓦石峡南花岗伟晶岩型锂铍矿位于阿中地块南部, 矿区出露的地层主要是元古界阿尔金岩群(Pt₁A.)和第四系。阿尔金岩群在区内可分为片岩段和大理岩段, 以片岩段为主, 片岩段的主要岩性有二云母石英片岩、含石榴石二云母石英片岩、十字石二云母石英片岩及少量石英岩(王成辉等, 2022)。大理岩段为一套变质碳酸盐岩, 岩性主要为白云质大理岩及大理岩。现阶段发现的花岗伟晶岩型锂矿体大部分都产于片岩段中, 仅有少部分产于大理岩段中。区内地层片理较发育, 走向大致在 NEE-SEE 向之间变化, 局部可见小揉皱构造。断层出露较少, 仅可见少量小规模断层, 断层内局部有宽度 $10\text{ cm}\pm$ 的断层角砾岩; 第四系有风积砂土和洪积物两种类型。风积砂土在区内分布面积较大, 主要分布于山脊及山西坡, 厚度大小不一; 洪积物主要沿托盖勒克萨依河谷分布, 为砾石、砂土混合堆积, 堆积厚度最大可大于 $10\sim 15\text{ m}$ 。其中风积砂土对

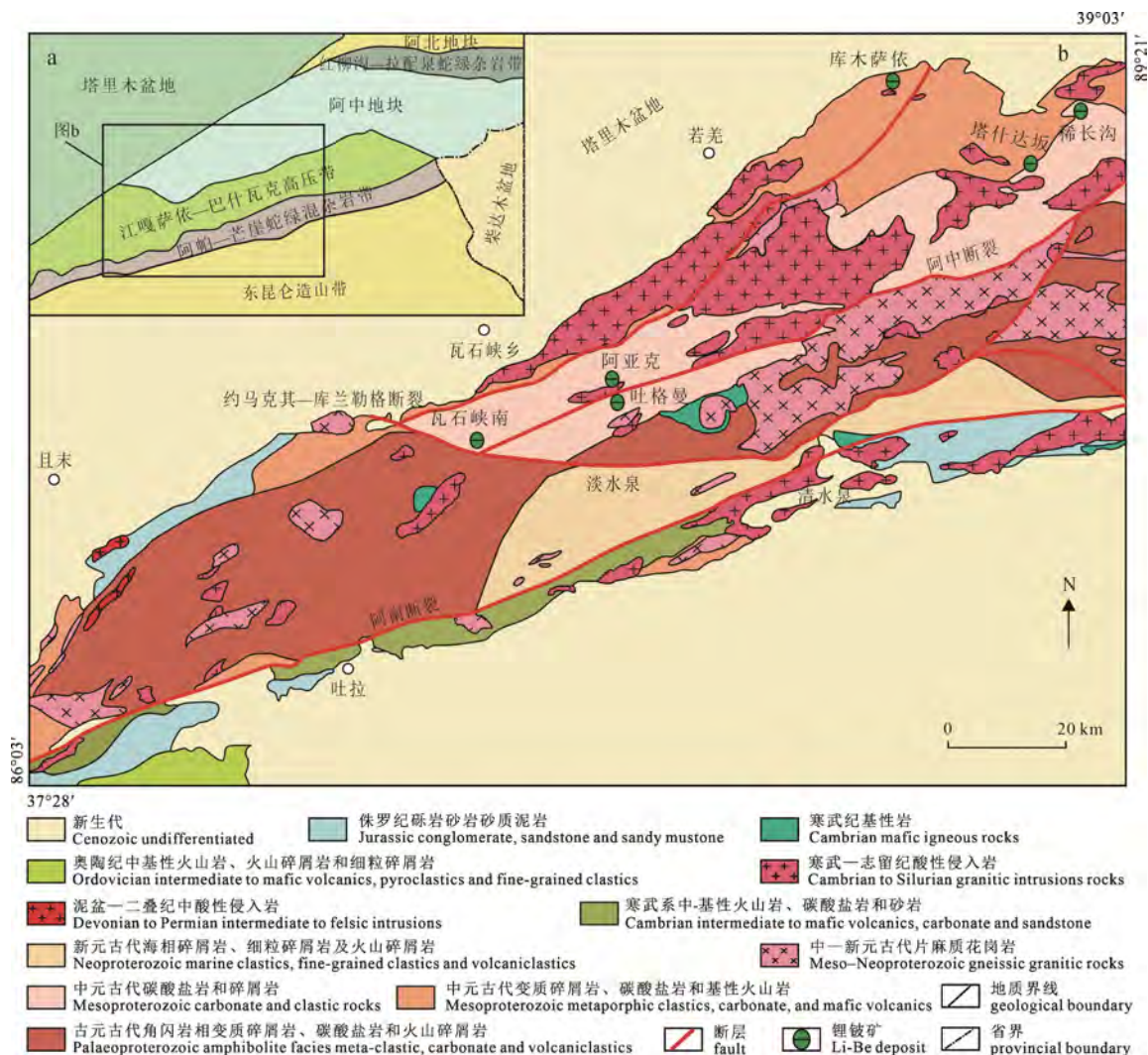


图 1 阿尔金大地构造位置图(a)及区域地质图(b)(据 Gao et al., 2021)

Fig. 1 Tectonic location map (a) and regional geological map (b) of the Altyn Tagh (from Gao et al., 2021)

研究区工作影响较大,地质界线大多被其覆盖。由于研究区覆盖较强,目前尚未发现出露的花岗岩岩体。徐兴旺等(2020)认为瓦石峡南锂矿在空间分布上以托巴二云母花岗岩为中心向北东与向西分带分布,矿床的形成可能与托巴二云母花岗岩有关或者与其同期的花岗岩有关,并构成一个完整的成矿系统。

区内圈出 20 余条伟晶岩脉(张朋等, 2024), 根据矿物共生组合, 分为白云母微斜长石钠长石伟晶岩、电气石钠长石伟晶岩、锂辉石-白云母伟晶岩和锂云母-钠长石伟晶岩。其中锂辉石-白云母伟晶岩、锂云母-钠长石伟晶岩是区内主要含矿花岗伟晶岩, 共圈出 9 条脉体, 含矿岩脉地表出露长 50~700 m 不等, 宽 1.5~32 m, 主要产于阿尔金岩群片岩段的(含石榴石)二云母石英片岩中, 脉体规模大小不一, 多呈透镜状、脉状延伸, 地表矿物分带现象不明显。以托盖勒克萨依沟为界, 进一步将 9 条含矿脉体划分为两个矿化集中区, 在托盖勒克萨依沟以南, 以锂云母-钠长石伟晶岩为主, 代表性的矿脉为 $\rho 3$ 号脉, 走向近 EW 向, 总体倾向南, 地表局部北倾, 倾角较陡; 托盖勒克萨依沟以北, 以锂辉石-白云母伟

晶岩脉为主, 代表性矿脉为 $\rho 9$ 号脉, 走向主要呈 NE-SW 向, 倾向 NW 向, 倾角 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ (图 2)。两条主要矿脉的产出地质特征如下:

$\rho 3$ 号伟晶岩脉, 产于古元古界阿尔金岩群片岩组(含石榴石)二云母石英片岩中, 为目前区内最大的 1 条矿脉(图 3a), 与围岩的界限截然, 脉形态相对简单, 东段有分枝复合, 东段出露长约 475 m, 西段出露长约 250 m, 中部被第四系风积砂覆盖, 推测总长度约 1 300 m, 宽 2~35 m, 延深 220 m。伟晶岩脉内部分带结构不明显(图 3b)。通过地表及钻孔样品观察, 发现锂云母主要集中在脉体中部, 从边部到核部锂云母含量呈现升高的趋势。花岗伟晶岩手标本呈淡紫红色, 主要组成矿物有石英、钠长石、锂云母、白云母。其中石英呈粒状, 粒径在 0.4~1.5 cm, 含量 30%~35%; 钠长石呈板粒状, 粒径在 0.3~2 cm, 含量 15%~20%; 锂云母呈现两种形态: 一是呈鳞片状分布于石英、钠长石等矿物粒间, 二是呈片状与石英、钠长石等矿物共生(图 3c), 粒径为 0.01~3 cm, 含量 15%~20%; 白云母呈片状, 粒径为 0.1~1 cm, 含量 20%~25%(图 3d); 次要矿物有黄玉、微斜长石、绿柱石、萤石等; 副矿物有锆石、铌锰矿、细晶石等。

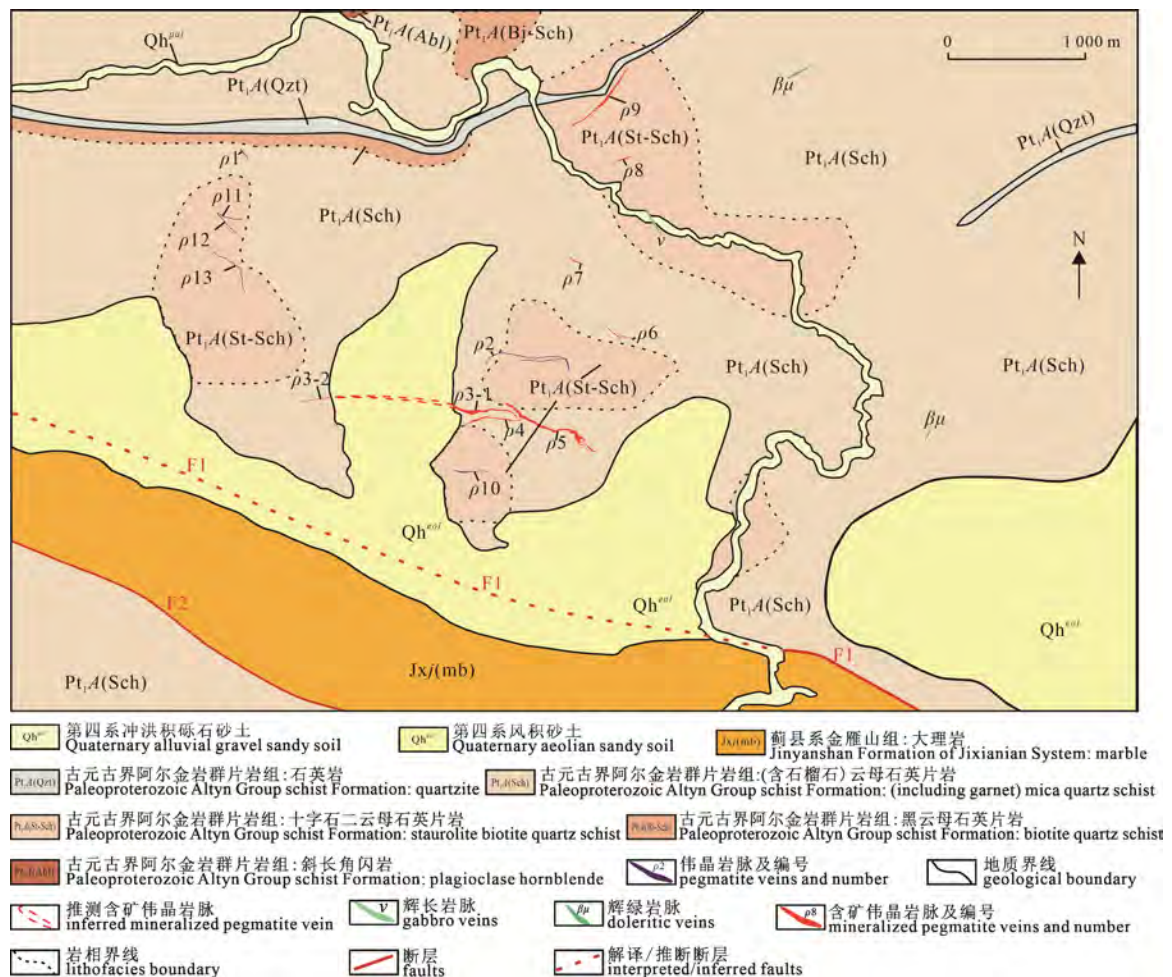
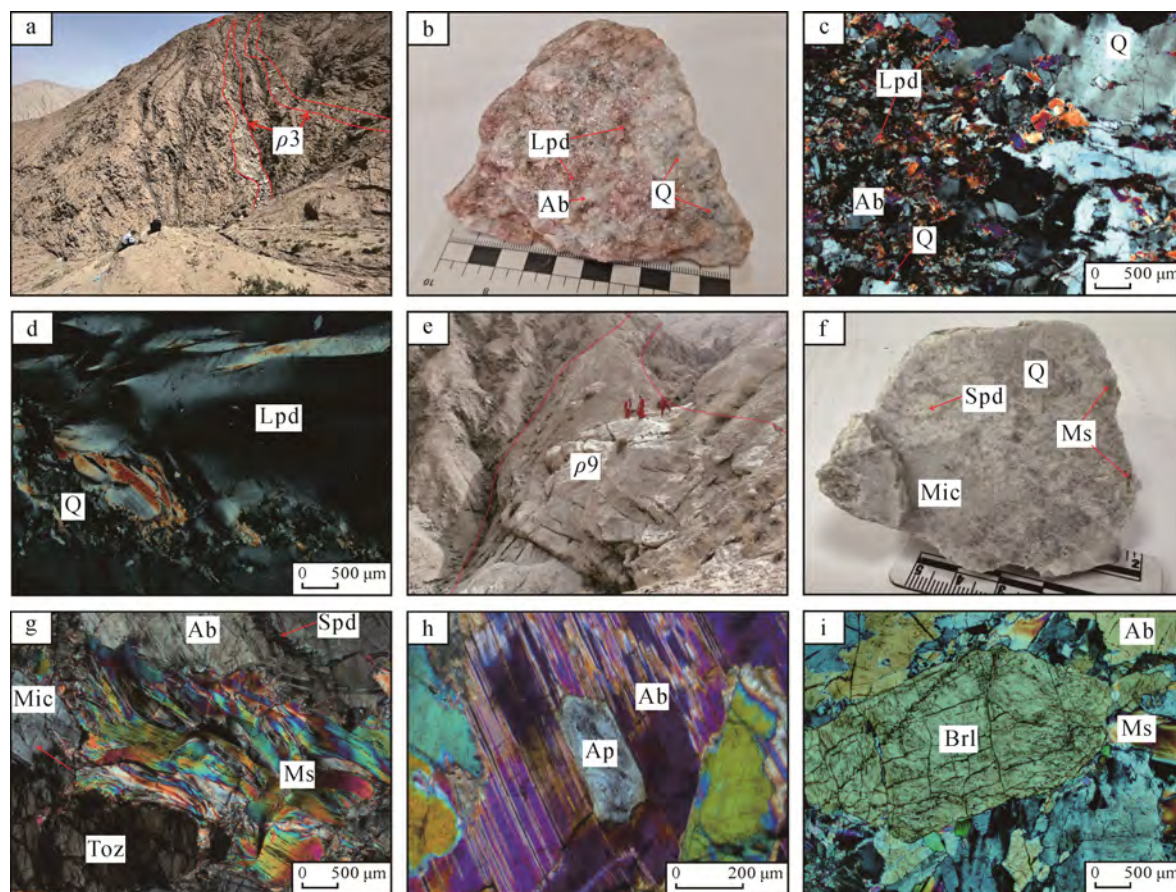


图 2 瓦石峡南矿区地质图(据张朋等, 2024 修改)

Fig. 2 Geological map of the southern Washixia deposit (modified from ZHANG et al., 2024)



a—瓦石峡南 ρ_3 号花岗伟晶岩脉地表产状; b—瓦石峡南 ρ_3 号脉锂云母-钠长石伟晶岩样品; c—瓦石峡南 ρ_3 号脉鳞片状锂云母与钠长石-石英共生关系, 正交偏光; d—瓦石峡南 ρ_3 号脉中的片状锂云母, 正交偏光; e—瓦石峡南 ρ_9 号花岗伟晶岩地表产状; f—瓦石峡南 ρ_9 号脉伟晶岩样品; g—瓦石峡南 ρ_9 号脉锂辉石、白云母、黄玉共生, 正交偏光; h—瓦石峡南 ρ_9 号脉中钠长石包裹自形磷灰石; i—瓦石峡南 ρ_9 号脉中自形绿柱石与白云母、钠长石、石英等共生; Spd—锂辉石; Q—石英; Ms—白云母; Lpd—锂云母; Ab—钠长石; Mic—微斜长石; Toz—黄玉; Ap—磷灰石; Brl—绿柱石。

a—surface occurrence of ρ_3 granite pegmatite vein in southern Washixia; b—pegmatite sample of lepidolite-albite from the ρ_3 vein of southern Washixia, orthogonal polarization; c—the symbiotic relationship between scaly lepidolite and albite-quartz in the ρ_3 vein of southern Washixia; d—large particles of flake lepidolite in the ρ_3 vein of southern Washixia, orthogonal polarization; e—surface occurrence of ρ_9 granite-pegmatite in southern Washixia; f—the pegmatite sample of the ρ_9 vein from southern Washixia; g—the symbiosis of spodumene, muscovite and topaz of the ρ_9 vein in the southern Washixia, orthogonal polarization; h—idiomorphic apatite is associated with muscovite, albite and quartz in ρ_9 vein of southern Washixia; i—idiomorphic beryl is associated with muscovite, albite and quartz in ρ_9 vein of southern Washixia; Spd—spodumene; Q—quartz; Ms—muscovite; Lpd—Lepidolite; Ab—albite; Mic—microcline; Toz—topaz; Ap—apatite; Brl—beryl.

图3 阿尔金地区瓦石峡南 ρ_3 、 ρ_9 号脉地表、手标本及显微镜镜下照片

Fig. 3 Surface of ρ_3 and ρ_9 , hand specimen and microscopic photos from the southern Washixia in Altyn Tagh

ρ_9 号脉产于古元古界阿尔金岩群片岩组含十字石二云母石英片岩中, 为锂辉石-白云母花岗伟晶岩(图 3e, f)。矿体地表出露长约 650 m, 宽 2~11.5 m。通过 ρ_9 号脉钻孔岩心观察, 发现该脉体锂辉石主要集中在脉体上部, 深部的钻孔样品(孔深 > 110 m)几乎不含锂辉石。花岗伟晶岩呈灰白色, 主要矿物有石英、钠长石、微斜长石、锂辉石。其中石英呈粒状, 粒径为 0.5~2 cm, 含量 30%~35%; 钠长石呈板粒状, 粒径为 0.2~1 cm, 含量 15%~20%; 锂辉石呈短柱状, 粒径为 0.5~3 cm, 含量 20%~25%; 微斜长石呈板状, 粒径为 0.2~1 cm, 含量 10%~15%; 白云母呈片状, 粒径为 0.1~0.5 cm, 含量 15%~20%; 次要矿物有磷锂铝石、绿柱石(图 3i)等; 副矿物有磷灰石(图 3h)、黄玉(图 3g)等。与 ρ_3 号脉相比, ρ_9 号脉中磷灰石比较发育, 是本文研究的主要对象。

3 样品的采集及分析方法

通过野外地质调研及室内手标本和显微镜镜下观察, ρ_3 、 ρ_9 号矿脉的矿物组合明显不同, 属于伟晶岩不同演化阶段的产物。 ρ_3 号脉锂矿石矿物主要为锂云母, 全岩 P_2O_5 含量为 0.05%, 副矿物中很少见到磷灰石, ρ_9 号矿的主要锂矿物为锂辉石、磷锂铝石, 全岩 P_2O_5 含量为 1.22%(另文待发), 副矿物中磷灰石相对较为富集。本文研究样品主要采自 ρ_9 号脉。

磷酸盐矿物的背散射成像、主量元素(EPMA)以及微量元素分析(LA-ICP-MS), 均在长安大学成矿作用及其动力学实验室完成。将样品磨制成 50 μm 厚度的探针片, 镀碳后, 使用 FEI Quanta 650 环境扫描电镜(ESEM), 观察磷酸盐矿物的内部结

构和相关矿物组合, 并进行背散射成像。测试时加速电流和加速电压分别为 98~102 nA 和 20 kV。磷灰石的主量元素分析在 JEOL JXA-iHP200F 型电子探针上完成, 测试条件为: 加速电压 15 kV, 电子束流 10 nA, 束斑直径 1 μm , 所分析元素的 X 光谱线及相应标样如下: NaK α (钠长石)、SiK α (石英)、SrK α (天青石)、ClK α (石盐)、CaK α (磷灰石)、PK α (磷灰石)、BaK α 、SK α (重晶石)、YK α (YP_5O_{14})、KK α (钾长石)、LaK α ($\text{LaP}_5\text{O}_{14}$)、CeK α ($\text{CeP}_5\text{O}_{14}$)、PrK α ($\text{PrP}_5\text{O}_{14}$)、NdK α ($\text{NdP}_5\text{O}_{14}$)、ThK α (钍石)、UK α (氧化铀)、FK α (黄玉)、AlK α (刚玉)、MgK α (橄榄石)、FeK α (磁铁矿)、TiK α (红钛锰矿)、MnK α (红钛锰矿)、CrK α (尖晶石)。测试数据进行 ZAF 校正, 主元素分析误差小于 1%。

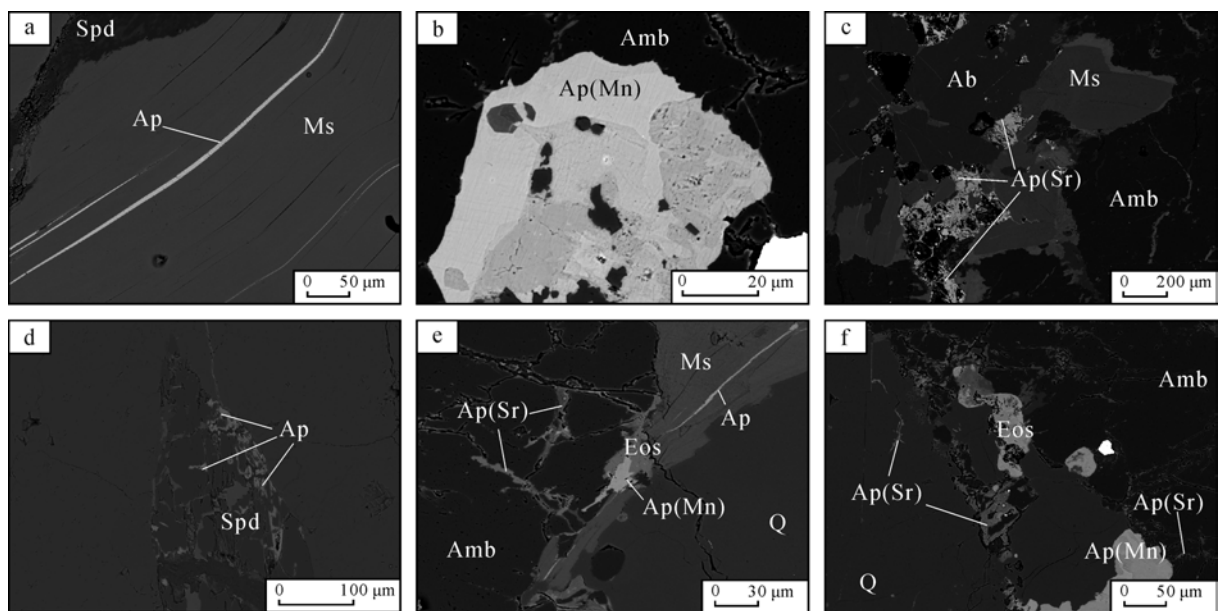
微量元素分析(LA-ICP-MS)采用美国 Photon Machines 公司 193 nm 气态准分子激光剥蚀系统联接安捷伦 7700E 型四级杆等离子体质谱仪。激光剥蚀系统采用氦气作载气、氩气为补偿气调节灵敏度, 氦气流量 0.87 L/min, 激光频率 8 Hz, 束斑直径 40 μm , 单脉冲能量 4.9 J/cm², 单次测量时间 50 s, 背景测量时间 30 s。分析步骤为先测试 2 次标样 NIST 610, 之后每分析 8 次磷灰石样品, 重复测试 2 次标样 NIST 610, 使用 NIST 610 和 NIST 612 分别作为主要外标和次要外标, 以 Si(探针数据)作为

内标, 进行磷灰石微量元素含量计算。测试数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu et al., 2008, 2010a)完成, 详细的仪器操作条件和数据处理方法见 Liu et al.(2008, 2010a, b)。

4 分析结果

4.1 磷灰石产出特征

通过 $\rho 9$ 号脉伟晶岩中磷灰石的显微镜下照片及背散射电子图像(图 3h, 图 4a~f)观察磷灰石的产出特征及其与主要矿物之间的相互交代、穿插关系, 将 $\rho 9$ 号脉中产出的磷灰石分为岩浆期和热液期。其中岩浆期磷灰石呈自形、半自形粒状产出, 粒径为 50~200 μm 。被钠长石、白云母、磷铝锂石、锂辉石等矿物包裹或产于矿物的粒间(图 3h); 热液期磷灰石为伟晶岩热液期交代作用的产物, 可分为两类, 第一类多呈脉状沿白云母的解理面分布(图 4a), 粒径为 1~20 μm 。第二类则呈它形粒状交代锂辉石和白云母等, 沿锂辉石、磷铝锂石、白云母、钠长石的边缘或裂隙产出(图 4b~f), 粒径为 50~300 μm 不等, 根据电子探针分析, 第二类磷灰石进一步分为含锶磷灰石(SrO 含量平均 11.19%)和含锰磷灰石(MnO 含量平均 9.72%)。



a—沿白云母解理面充填的脉状磷灰石; b—磷铝锂石中的含锰磷灰石(较暗部位 Mn 含量偏少);

c—交代白云母边缘的含锶磷灰石; d—充填在锂辉石裂隙中的脉状磷灰石; e—含锰磷灰石交代白云母以及脉状磷灰石;

f—含锰磷灰石交代磷铝锂石以及含锶磷灰石; Ap—磷灰石; Ab—钠长石; Ms—白云母;

Q—石英; Spd—锂辉石; Amb—磷铝锂石; Eos—磷铝锰石。

a—vein shaped apatite filled along the cleavage surface of muscovite; b—manganese-containing apatite in amblygonite(less Mn content in darker areas); c—explain the strontium containing apatite at the edge of muscovite; d—vein shaped apatite filled in spodumene crevices; e—manganese containing apatite replaces muscovite and vein shaped apatite; f—amblygonite and strontium containing apatite replaced by manganese containing apatite; Ap—apatite; Ab—albite; Ms—muscovite; Q—quartz; Spd—spodumene; Amb—amblygonite; Eos—eosphorite.

图 4 瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉花岗伟晶岩中磷灰石显微镜下照片及扫描电镜下背散射照片

Fig. 4 Microscopical photos and SEM backscattering photos of apatite in granite-pegmatite of $\rho 9$ vein in southern Washixia

4.2 磷灰石主量元素组成

利用电子探针分析磷灰石的主要化学成分(表1)。结果显示, 岩浆期产出的磷灰石化学成分较为均匀, 分析样品中 P_2O_5 为 40.45%~42.15%、平均 41.43%, CaO 为 53.57%~55.91%、平均 54.19%, F 为 1.98%~4.61%、平均 3.61%, MnO 为 0.89%~2.01%、平均 1.67%, FeO 为 0~0.24%、平均 0.14%, SrO 为 0~0.01%、平均 0.003%, 根据 F 和 Cl 的成分计算获

得 OH^- 为 0~1.56%; 热液期磷灰石不同的产出状态, 化学成分呈现有明显区别。第一类以脉状产出的磷灰石中, P_2O_5 为 39.43%~41.50%、平均 40.58%, CaO 为 54.11%~55.87%、平均 55.11%, F 为 0.03%~2.25%、平均 0.74%, MnO 为 0.38%~1.28%、平均 0.74%, FeO 为 0.07%~0.35%、平均 0.19%, SrO 为 0.08%~0.42%、平均 0.20%, 根据 F 和 Cl 的成分计算获得 OH^- 为 1.31%~3.2%; 第二类交代早期矿物

表 1 瓦石峡南 $\rho 9$ 号花岗伟晶岩中的磷灰石电子探针分析结果
Table 1 Electron probe analysis results of apatite in south Washixia $\rho 9$ granite pegmatitic

样品号	w _B /%														
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SrO	F	Cl	OH ⁻	总量
岩浆期磷灰石															
WSXIX-2-13	0.04	0.25	0.06	0.13	1.74	0.01	53.57	0.07	0.00	40.48	0.00	4.33	0.00	0.00	100.68
WSXIX-2-14	0.09	0.00	0.07	0.13	1.36	0.01	55.48	0.03	0.01	41.47	0.00	2.35	0.00	1.24	102.24
WSXIX-2-15	0.15	0.07	0.04	0.10	1.70	0.01	53.77	0.02	0.01	41.64	0.00	3.41	0.00	0.34	101.26
WSXIX-2-16	0.18	0.00	0.04	0.10	1.59	0.00	54.16	0.00	0.01	40.59	0.00	3.59	0.02	0.17	100.45
WSXIX-2-17	0.18	0.00	0.04	0.17	1.45	0.01	54.09	0.03	0.02	40.85	0.00	4.61	0.00	0.00	101.45
WSXIX-2-18	0.16	0.00	0.07	0.15	1.82	0.00	53.69	0.01	0.00	41.71	0.00	4.14	0.00	0.00	101.75
WSXIX-2-19	0.09	0.14	0.03	0.24	2.01	0.00	54.59	0.04	0.01	41.99	0.02	2.84	0.00	0.82	102.82
WSXIX-1-2-2	0.03	0.00	0.04	0.02	1.52	0.00	54.63	0.00	0.00	42.15	0.00	2.45	0.00	1.16	102.00
WSXIX-1-2-4	0.08	0.00	0.03	0.06	1.42	0.02	55.31	0.01	0.00	41.77	0.01	2.35	0.01	1.24	102.31
WSXIX-1-2-8	0.15	0.21	0.01	0.08	1.66	0.00	53.71	0.04	0.01	41.34	0.00	3.71	0.03	0.07	101.02
WSXIX-1-2-10	0.31	0.00	0.01	0.00	1.09	0.01	54.77	0.05	0.00	41.90	0.01	3.65	0.02	0.12	101.94
WSXIX-1-2-11	0.08	0.00	0.04	0.03	1.54	0.02	55.91	0.01	0.00	40.45	0.00	1.98	0.00	1.56	101.62
WSXIX-1-2-39	0.11	0.00	0.05	0.05	0.89	0.00	55.78	0.05	0.00	41.32	0.00	2.37	0.00	1.23	101.85
WSXIX-1-2-40	0.12	0.09	0.06	0.07	1.00	0.00	54.65	0.05	0.00	41.08	0.00	2.45	0.00	1.16	100.73
平均值	0.13	0.05	0.04	0.10	1.49	0.01	54.58	0.03	0.01	41.34	0.00	3.16	0.01	0.65	101.58
热液期磷灰石															
第一类脉状产出磷灰石															
WSXIX-1-1-13	0.06	0.00	0.10	0.13	0.76	0.00	55.72	0.06	0.20	41.50	0.08	1.00	0.03	2.38	102.02
WSXIX-1-1-14	0.14	0.00	0.14	0.20	0.38	0.00	55.87	0.06	0.22	41.50	0.13	2.25	0.03	1.31	102.23
WSXIX-1-1-16	0.11	0.00	0.14	0.20	0.45	0.00	55.68	0.12	0.28	41.26	0.24	0.41	0.32	2.76	101.97
WSXIX-1-1-52	0.08	0.02	0.08	0.35	0.80	0.00	55.18	0.09	0.16	41.49	0.15	0.13	0.19	3.06	101.78
WSXIX-1-2-1	0.17	0.00	0.15	0.17	1.28	0.14	54.11	0.34	0.32	40.61	0.42	0.03	0.06	3.20	101.00
WSXIX-1-2-6	0.41	0.00	0.43	0.17	0.44	0.03	54.86	0.87	0.44	40.18	0.14	0.78	0.06	2.56	101.37
WSXIX-1-2-7	0.47	0.18	0.43	0.07	1.06	0.13	54.35	0.51	0.43	39.43	0.21	0.59	0.02	2.74	100.62
平均值	0.21	0.03	0.21	0.18	0.74	0.04	55.11	0.29	0.29	40.85	0.20	0.74	0.10	2.57	101.57
第二类含锶磷灰石															
WSXIX-2-4	0.00	0.00	0.00	0.06	0.43	0.00	44.72	0.01	0.01	39.51	13.64	2.66	0.00	0.98	102.02
WSXIX-2-5	0.23	0.00	0.14	0.09	1.17	0.03	45.10	0.29	0.02	39.66	11.82	2.43	0.03	1.16	102.17
WSXIX-2-9	0.03	0.14	0.07	0.00	0.67	0.02	46.63	0.05	0.00	39.45	11.37	2.11	0.00	1.45	101.99
WSXIX-2-10	0.00	0.00	0.04	0.11	1.26	0.01	45.06	0.11	0.03	38.79	12.66	3.65	0.04	0.11	101.87
WSXIX-2-11	0.13	0.00	0.07	0.11	1.44	0.01	49.44	0.05	0.00	38.94	7.94	2.78	0.04	0.86	101.81
WSXIX-2-31	0.00	0.00	0.03	0.00	0.56	0.01	45.65	0.01	0.03	38.04	13.70	1.08	0.00	2.33	101.44
WSXIX-2-33	0.20	0.00	0.09	0.11	1.16	0.01	48.81	0.54	0.01	38.47	7.23	1.66	0.00	1.83	100.12
平均值	0.08	0.02	0.06	0.07	0.96	0.01	46.49	0.15	0.01	38.98	11.19	2.34	0.02	1.25	101.63
第二类含锰磷灰石															
WSXIX-1-1-23	0.00	0.00	0.13	1.41	11.47	0.01	42.37	0.26	0.00	39.69	0.37	0.00	0.16	3.18	99.05
WSXIX-1-1-24	0.00	0.13	0.25	1.69	10.94	0.00	42.68	0.34	0.01	39.66	0.36	0.00	0.19	3.17	99.42
WSXIX-1-1-25	0.01	0.00	0.07	0.99	9.94	0.00	42.86	0.25	0.00	39.94	0.70	1.51	0.05	1.94	98.26
WSXIX-1-1-26	0.00	0.02	0.04	3.68	8.77	0.00	41.47	0.28	0.01	39.59	0.42	0.00	0.31	3.19	97.78
WSXIX-1-1-30	0.00	0.05	0.04	0.79	9.40	0.01	44.00	0.26	0.00	40.23	0.97	1.69	0.05	1.78	99.27
WSXIX-1-1-38	0.00	0.00	0.05	1.56	7.81	0.03	45.54	0.41	0.00	39.81	0.41	0.68	0.10	2.63	99.03
平均值	0.00	0.03	0.10	1.69	9.72	0.01	43.15	0.30	0.00	39.82	0.54	0.65	0.14	2.65	98.80

以它形粒状产出的磷灰石, 根据化学成分有含铍磷灰石和含锰磷灰石。其中, 含铍磷灰石的 P_2O_5 含量为 38.04%~39.66%、平均 38.98%, CaO 为 44.72%~49.44%、平均 46.49%, F 为 1.08%~3.65%、平均 2.34%, MnO 为 0.43%~1.44%、平均 0.95%, FeO 为 0~0.11%、平均 0.07%, SrO 为 7.23%~13.70%、平均 11.19%, 根据 F 和 Cl 的成分, 计算获得 OH^- 含量为 0.11%~2.33%; 含锰磷灰石中 P_2O_5 为 39.59%~40.23%、平均 39.82%, CaO 为 41.47%~45.54%、平均 43.15%, F 为 0~1.69%、平均 0.65%, MnO 为 7.81%~11.47%、平均 9.72%, FeO 为 0.79%~3.68%、平均 1.69%, SrO 为 0.36%~0.97%、平均 0.54%, 根据 F 和 Cl 的成分计算获得 OH^- 含量为 1.78%~3.19%。根据电子探针化学成分分析结果计算, 阳离子数取平均值, 得出岩浆期磷灰石化学式为 $Ca_{9.9}(PO_4)_{5.93}F_{1.69}OH_{0.44}$; 热液期第一类脉状磷灰石化学式为 $Ca_{10.28}(PO_4)_{6.02}F_{0.4}Cl_{0.03}OH_{1.63}$; 第二类含铍磷灰石化学式为 $Ca_{8.96}Sr_{1.17}(PO_4)_{5.94}F_{1.33}OH_{0.68}$; 热液期含锰磷灰石化学式为 $Ca_{8.44}Mn_{1.5}Fe_{0.26}(PO_4)_{6.15}F_{0.37}Cl_{0.04}OH_{1.68}$ 。

磷灰石的阴离子主要是 OH^- 、 Cl^- 以及 F^- , 在不同的演化环境下阴离子的占比会出现很大区别, 利用 OH^- - Cl^- - F^- 阴离子占比三相图(图 5), 确定岩浆期磷灰石为氟磷灰石; 热液期磷灰石主要为氟-羟基磷灰石。结合该地区富含萤石、黄玉等富 F 矿物, 推测是 F 熔体影响的结果。图 4b 中含锰磷灰石背散射图像呈现出明显的明暗变化, 测试结果显示随着 Mn 含量增加, 背散射图像的亮度也随之提高, 这与 Mn 元素原子序数较高, 产生的背散射电子更多

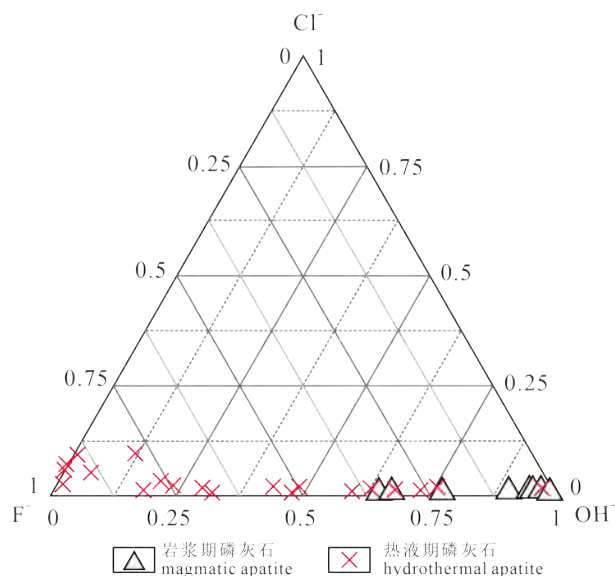


图 5 瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉花岗伟晶岩中磷灰石阴离子占比三相图

Fig. 5 Three-phase diagram of apatite anion proportion in granite-pegmatite of $\rho 9$ vein in southern Washixia

有关。在对含铍磷灰石进行主量元素分析时, 发现了一些其他的含铍磷酸盐矿物, 如磷铍铝石、含铍磷铝钙石等, 结合分析数据发现, 热液期的第一类脉状磷灰石和第二类含锰磷灰石 Sr 含量都高于标准磷灰石, 推测是热液期含铍流体影响的结果。

从背散射图片(图 4a~f)可见, 热液期的第二类含铍磷灰石和含锰磷灰石可交代锂辉石、白云母、磷铝锂石等矿物。且第一类脉状磷灰石被含锰磷灰石穿切, 含铍磷灰石被含锰磷灰石交代。据此, 对 9 号脉中磷灰石形成顺序划分为: 岩浆期磷灰石(自形→半自形)→热液期磷灰石(第一类脉状→第二类它形粒状(含铍磷灰石→含锰磷灰石))。

4.3 磷灰石微量元素组成

由于热液期磷灰石的粒径微小, 均小于 $30 \mu m$, 采用 LA-ICP-MS 技术暂无法获得其准确的微量元素含量, 故仅对 $\rho 9$ 号花岗伟晶岩脉中的岩浆期磷灰石进行原位微量元素测试。测试元素包括 Li 、 Be 、 Ga 、 Sr 、 Y 、 REE 等 51 种元素, 大多数元素低于检测限, 获得的有效数据见表 2。

结果显示, 岩浆期磷灰石 Sr 含量为 $6.37 \times 10^{-6} \sim 1.045.44 \times 10^{-6}$ 、平均为 136.57×10^{-6} , 这与电子探针分析结果是接近的; Li 含量为 $15.92 \times 10^{-6} \sim 807.6 \times 10^{-6}$ 、平均为 89.22×10^{-6} ; Be 含量为 $0 \sim 7.33 \times 10^{-6}$ 、平均为 2.84×10^{-6} ; Ga 含量为 $0.25 \times 10^{-6} \sim 2.21 \times 10^{-6}$ 、平均为 0.77×10^{-6} ; Y 含量为 $110.38 \times 10^{-6} \sim 1.267.29 \times 10^{-6}$ 、平均为 544.14×10^{-6} ; ΣREE 为 $219.41 \times 10^{-6} \sim 2.088.04 \times 10^{-6}$ 、平均为 667.9×10^{-6} , $\Sigma HREE$ 为 $65.29 \times 10^{-6} \sim 990.00 \times 10^{-6}$ 、平均为 338.51×10^{-6} , $\Sigma LREE$ 为 $100.94 \times 10^{-6} \sim 1.098.03 \times 10^{-6}$ 、平均为 329.39×10^{-6} , $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 为 $0.32 \sim 2.36$ 、平均为 1.20 , δCe 为 $0.96 \sim 1.14$ 、平均为 1.06 , δEu 为 $0.0003 \sim 0.0106$ 、平均为 0.0033 。稀土元素球粒陨石标准化配分模式呈海鸥型, 具强烈负铕异常, 这与大多数岩浆期磷灰石的配分曲线是一致的, 富集中稀土也指示研究区伟晶岩属于 LCT 型, 具 S 型花岗岩特征。强烈的负铕异常显示花岗岩伟晶岩的熔体可能经历了强烈的斜长石分离结晶, 导致熔体亏损铕; 也可能与岩浆所处的氧化还原环境有关, 在还原条件下, 岩浆中 Eu^{2+} 和 Ce^{3+} 含量较高, 且 Ce^{3+} 比 Eu^{2+} 优先进入磷灰石晶格, 导致磷灰石的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线通常呈现强烈的负 Eu 异常(图 6)。

5 讨论

5.1 磷灰石对岩浆源区的指示

含稀有元素伟晶岩通常分为 LCT 型伟晶岩(富含 Li - Cs - Ta)和 NYF 型伟晶岩(富含 Nb - Y - F)两种

表 2 瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉花岗伟晶岩中磷灰石微量元素含量及相关参数
Table 2 Apatite trace element content and related parameters in granite-pegmatite of $\rho 9$ vein in southern Washixia

样品号	$w_B/10^{-6}$												
	Li	Be	Ga	Sr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb
WSXIX-1-1-1	40.41	0.00	1.99	18.19	1 040.17	113.77	307.74	42.32	168.47	296.04	0.07	379.53	104.79
WSXIX-1-1-2	35.54	0.14	2.21	33.52	1 267.29	141.77	380.77	51.86	196.04	327.56	0.04	399.24	114.04
WSXIX-1-1-4	32.45	1.24	0.29	17.19	110.38	36.93	67.74	7.10	17.92	24.34	0.08	22.00	7.01
WSXIX-1-1-5	25.73	3.44	0.66	318.75	220.94	59.97	117.82	11.49	33.40	47.24	0.10	50.51	15.17
WSXIX-1-1-6	21.78	2.71	0.48	51.84	228.90	54.35	106.79	11.26	34.80	45.46	0.07	49.22	15.99
WSXIX-1-1-7	23.90	3.22	0.66	27.20	215.75	55.93	111.73	11.63	34.61	47.31	0.10	48.36	14.42
WSXIX-1-1-8	15.92	3.41	0.53	43.49	232.93	61.14	119.76	12.30	36.81	50.97	0.08	53.84	16.74
WSXIX-1-2-1	45.11	1.84	0.37	15.55	280.69	26.74	55.72	5.73	15.72	29.26	0.05	50.02	19.04
WSXIX-1-2-2	32.23	0.87	0.30	37.28	248.57	24.05	49.81	5.17	14.73	24.76	0.02	43.16	17.14
WSXIX-1-2-3	807.60	5.38	1.48	1 045.44	210.80	20.67	41.81	4.22	13.21	20.97	0.06	37.52	14.58
WSXIX-1-2-4	37.09	5.20	0.26	33.38	832.37	29.92	71.89	7.77	26.85	53.82	0.02	121.04	50.92
WSXIX-1-2-5	99.33	6.20	0.36	19.20	1 160.44	28.27	65.13	7.43	24.57	62.89	0.02	168.63	70.23
WSXIX-1-2-6	49.77	7.33	0.41	33.64	1137.09	59.21	153.72	18.23	58.54	115.35	0.03	213.46	81.28
WSXIX-2-1	34.85	0.33	0.69	54.75	456.08	59.47	152.13	19.35	69.33	95.14	0.05	118.57	36.06
WSXIX-2-2	54.13	1.66	0.47	429.29	424.39	58.50	148.58	17.71	63.39	82.51	0.01	100.94	31.42
WSXIX-2-3	71.72	0.84	0.25	6.37	350.14	22.62	47.82	5.33	16.12	30.13	0.05	55.73	23.00

样品号	$w_B/10^{-6}$									$\Sigma LREE/\Sigma HREE$	δCe	δEu
	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\Sigma LREE$	$\Sigma HREE$	ΣREE			
WSXIX-1-1-1	354.72	18.52	22.05	2.65	15.61	0.99	928.39	898.86	1 827.27	1.03	1.09	0.000 6
WSXIX-1-1-2	403.21	21.44	28.10	3.41	19.28	1.28	1 098.03	990.00	2 088.04	1.11	1.09	0.000 3
WSXIX-1-1-4	28.87	1.52	2.16	0.40	3.14	0.20	154.12	65.29	219.41	2.36	0.96	0.010 6
WSXIX-1-1-5	56.93	3.17	4.85	0.67	4.74	0.28	270.02	136.33	406.34	1.98	1.03	0.006 3
WSXIX-1-1-6	59.83	3.27	4.67	0.71	5.07	0.41	252.73	139.18	391.90	1.82	1.00	0.004 5
WSXIX-1-1-7	55.80	3.11	4.49	0.65	4.75	0.33	261.32	131.91	393.22	1.98	1.02	0.006 4
WSXIX-1-1-8	62.70	3.45	5.06	0.70	4.89	0.36	281.05	147.75	428.80	1.90	1.01	0.004 7
WSXIX-1-2-1	77.07	3.87	4.57	0.52	3.44	0.20	133.22	158.73	291.95	0.84	1.05	0.004 0
WSXIX-1-2-2	67.20	3.67	4.26	0.50	2.73	0.17	118.55	138.84	257.37	0.85	1.04	0.001 9
WSXIX-1-2-3	59.37	2.96	3.49	0.39	2.55	0.16	100.94	121.01	221.96	0.83	1.04	0.006 5
WSXIX-1-2-4	212.45	11.50	14.25	1.81	8.94	0.46	190.26	421.37	611.64	0.45	1.13	0.000 8
WSXIX-1-2-5	307.06	15.85	18.03	1.95	11.36	0.50	188.32	593.61	781.92	0.32	1.08	0.000 6
WSXIX-1-2-6	320.54	16.60	18.27	2.14	11.40	0.56	405.07	664.25	1 069.33	0.61	1.14	0.000 6
WSXIX-2-1	138.40	8.28	12.19	1.76	12.12	0.87	395.46	328.24	723.72	1.20	1.09	0.001 4
WSXIX-2-2	125.13	7.45	11.54	1.46	11.51	0.77	370.70	290.22	660.92	1.28	1.12	0.000 3
WSXIX-2-3	93.07	4.63	6.53	0.87	6.28	0.46	122.06	190.57	312.64	0.64	1.03	0.003 7

类型(Černý et al., 2005, 2012)。LCT 型伟晶岩通常与变质沉积物组成的俯冲陆壳部分熔融导致过铝质

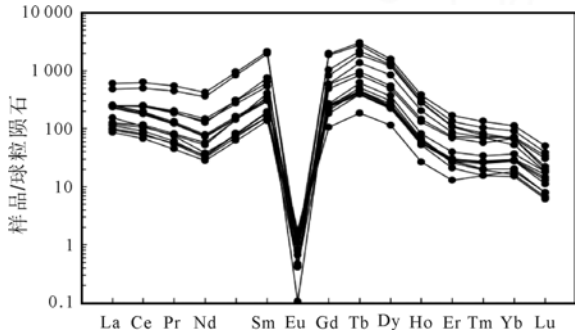


图 6 瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉中磷灰石球粒陨石标准化稀土元素配分模式图

Fig. 6 Standardized rare earth element partition pattern of apatite chondrite in the $\rho 9$ vein of southern Washixia

S 型花岗岩侵位有关, 通常涉及高级变质地体改造或剥露的深部大陆地壳。除了富集 Li、Cs、Ta 特征元素外, 也富集 Be、Rb、Ga、Nb、Sn、B、P 和 F(London, 2018); 而 NYF 型伟晶岩则来源于大陆地壳和地幔熔融的 A 型花岗岩(Černý et al., 2005, 2012), Christiansen et al.(2008)认为其来源于上地幔部分熔融熔体的直接分异、减薄岩石圈之下的玄武岩重熔或下地壳片麻岩的部分熔融。瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉花岗伟晶岩全岩的成分分析显示, Li 含量在 $3\ 622\times 10^{-6}\sim 14\ 639\times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 $10\ 044\times 10^{-6}$ (另文待发), 结合矿物组合显示其属于 LCT 型伟晶岩。

磷灰石中稀土元素含量可以用于推断母岩类型与岩浆源区(Belousova et al., 2001; 朱笑青等,

2004)。朱笑青等(2004)根据已知成因磷灰石的稀土元素成分绘制了“ $\Sigma\text{La-Nd}-\Sigma\text{Sm-Ho}-\Sigma\text{Er-Lu}$ 三角图”, 根据 $\Sigma\text{La-Nd}$ 、 $\Sigma\text{Sm-Ho}$ 、 $\Sigma\text{Er-Lu}$ 的百分比关系划分出三个区域, 分别表示成岩成矿物质的主要来源地幔(M)、壳幔混合(M-C)及地壳(C)。利用该图可见瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉磷灰石落在壳源区(图 7)。

结晶于不同性质花岗质岩浆中的磷灰石常表现出明显的地球化学差异, 因此其地球化学特征对花岗岩成因类型判别有重要指示意义(Sha et al., 1999; Belousova et al., 2001; Hsieh et al., 2008; Chen et al., 2011; Zhang et al., 2020)。在磷灰石地球化学对花岗岩源区的指示图中(图 8), 磷灰石样品主要落在“S 型花岗岩”区内, 与稀土元素判别结果一致, 显示瓦石峡南花岗伟晶岩应属于 S 型花岗岩岩浆分异的产物(张晓兵等, 2022)。

5.2 磷灰石对成岩环境的指示

磷灰石中 Eu、Ce 的含量可以指示岩浆的氧化状态(Drake, 1975; Streck et al., 1998; Sha et al., 1999; Imai, 2003; Cao et al., 2012; Pan et al., 2016)。在磷灰

石中, Eu^{3+} 和 Ce^{3+} 的离子半径与 Ca^{2+} 更接近, 相较于 Eu^{2+} 和 Ce^{4+} 优先以类质同象方式替换 Ca^{2+} 进入磷灰石晶格(Shannon, 1976; Cao et al., 2012)。在氧化条件

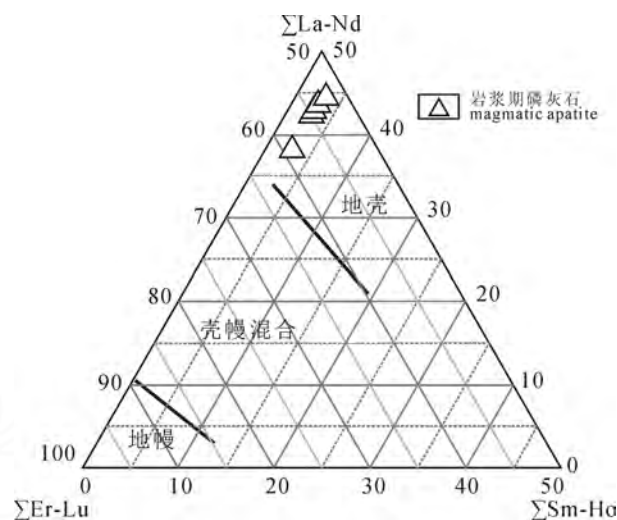
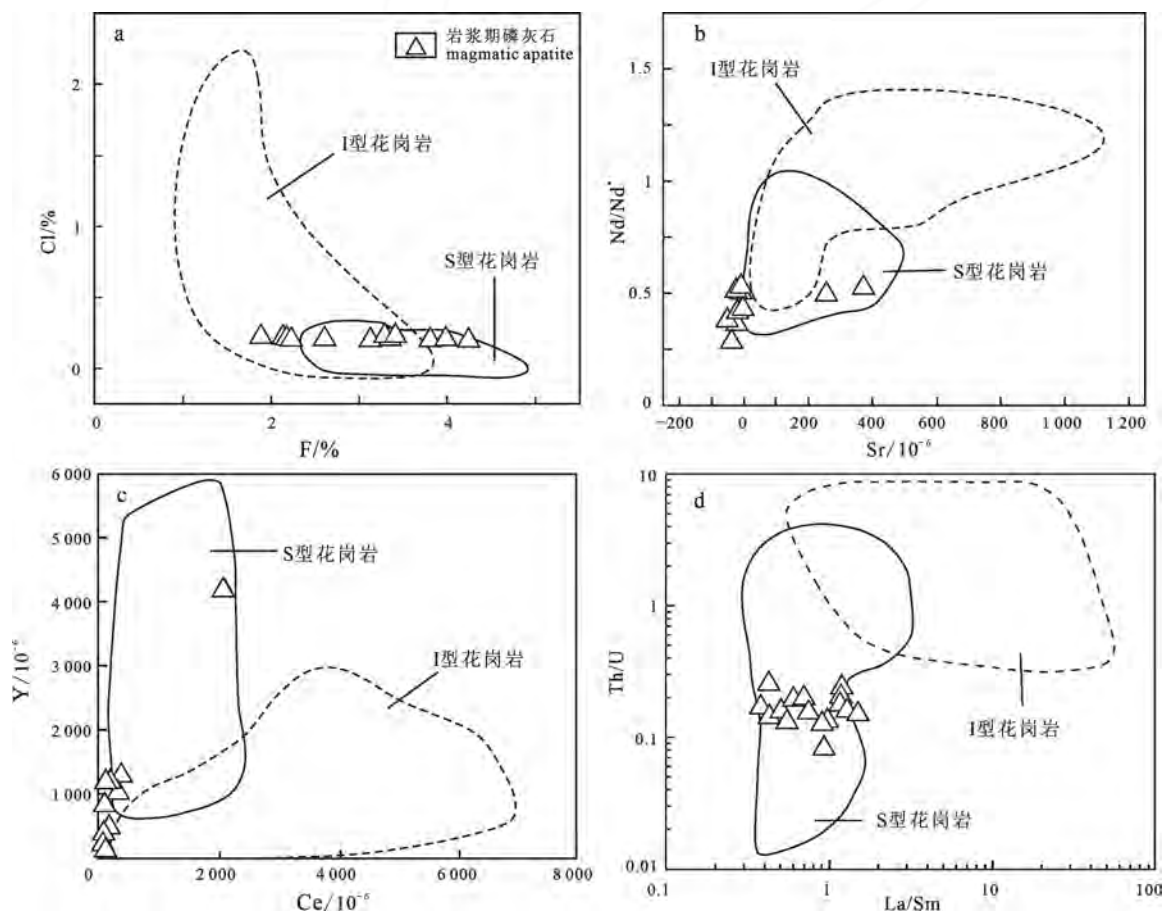


图 7 瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉花岗伟晶岩中的磷灰石稀土元素三角图(据朱笑青等, 2004)

Fig 7 Triangulation diagram of rare earth elements in apatite in granite pegmatite of $\rho 9$ vein in southern Washixia (from ZHU et al., 2004)



图解 a、b 中 I 和 S 型花岗岩磷灰石的数据统计于 Sha et al., 1999; Belousova et al., 2001; Hsieh et al., 2008; Chu et al., 2009; Laurent et al., 2017; Zhang et al., 2020; 图 c、d 的判别图引用 Laurent et al., 2017。

The data of type I and S granite apatite in the diagram a and b were collected in Sha et al., 1999; Belousova et al., 2001; Hsieh et al., 2008; Chu et al., 2009; Laurent et al., 2017; Zhang et al., 2020; discriminant graph of c and d were from Laurent et al., 2017.

图 8 磷灰石地球化学对花岗岩源区的指示图

Fig. 8 Apatite geochemistry as an indicator of granite source

下, Eu^{2+} 和 Ce^{3+} 分别转变为 Eu^{3+} 和 Ce^{4+} 。如果岩石的整体组成、温度和可能的压力保持稳定, 那么在低氧逸度条件下会产生高的 $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ 和 $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$, 及低的 Eu^{3+} 含量(Sha et al., 1999; Belousova et al., 2002; Chu et al., 2009; 曹亮等, 2023)。因此, 在低氧逸度条件下, 磷灰石结晶会产生强烈的负 Eu 异常(Cao et al., 2012)。

岩浆演化过程中伴随着氧逸度的变化。一般来说, Eu 和 Ce 是两种差异较大的元素, 在氧化状态发生变化的条件下, 在磷灰石中显示相反的分配特征(韩丽等, 2016; 严清高等, 2022): 还原条件下, 岩浆中 Eu^{2+} 和 Ce^{3+} 含量较高, 且 Ce^{3+} 比 Eu^{2+} 优先进入磷灰石晶格, 导致磷灰石的稀土元素球粒陨石标准化配分曲线通常呈现强烈的负 Eu 异常和正 Ce 异常; 反之在氧化条件下, 其稀土元素配分曲线常呈现正 Eu 异常和负 Ce 异常。

Cao et al.(2012)对哈萨克斯坦中部的花岗岩中磷灰石进行氧逸度分析, 认为在磷灰石中 Eu 异常比 Ce 异常更能反映岩浆的氧化还原状态, 并据此识别出氧化状态、中等氧化状态以及中等还原状态三种具有不同氧化还原状态的磷灰石(图 9)。在此研究基础上, 前人通过对磷灰石 Eu、Ce 异常进行研究, 进一步证明这对判别岩浆演化的氧化还原条件非常有效。例如湘东南多金属成矿省与 Cu-Pb-Zn 矿化有关的花岗闪长斑岩中的磷灰石表现出高 δEu 低 δCe 特征, 指示其形成于相对氧化环境, 而与 W-Sn 矿床相关的花岗岩具有低 δEu 高 δCe 特征, 则指示中度氧化至还原环境(Ding et al., 2015)。Pan et al.(2016)对三江地区四种花岗岩体的氧逸度测试结果进行分析, 认为 δEu 和 δCe 负相关受岩浆氧化状态的影响, 通过 $\delta\text{Ce}/\delta\text{Eu}$ 指示该地区花岗岩主要是中度氧化环境-氧化环境。Chen et al.(2018)研究了

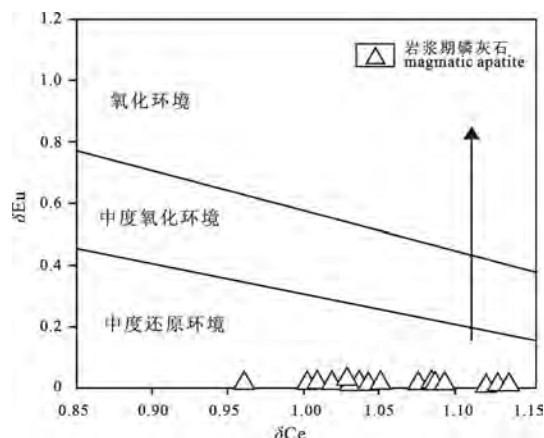


图 9 瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉花岗伟晶岩中磷灰石氧逸度范围投点(据 Cao et al., 2012)

Fig. 9 Apatite oxygen fugacity range in granite pegmatite of $\rho 9$ vein in southern Washixia (from Cao et al., 2012)

鹿鸣斑岩钼矿床的磷灰石, 指出花岗斑岩中磷灰石的 δEu 和 δCe 值也呈负相关, 并且磷灰石中的强负 δEu 表明花岗斑岩的岩浆可能处于相对还原状态。对南岭侏罗纪花岗岩体磷灰石的氧逸度研究结果表明较高的岩浆氧逸度有利于 Cu-Pb-Zn 矿床的形成, 而还原性岩浆与 W 矿床的形成密切相关(Yang et al., 2018)。Yang et al.(2020)对东秦岭栾川花岗岩中的磷灰石氧逸度分析发现, 该地区火神山岩体和老君山岩体指示中度氧化状态, 指出 δEu 和 δCe 可以作为潜在的找矿标志。陈小翠等(2023)对云南腾冲小龙河锡矿床中的磷灰石氧逸度分析显示该地区磷灰石全部落在低氧逸度的 Sn 矿床有关花岗岩区域, 指示与 Sn 成矿有关的花岗岩具有低氧逸度、还原性的特征。

瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉花岗伟晶岩中的磷灰石具负 δEu 和正 δCe (图 6), 在磷灰石氧逸度范围投点图中, 样品均落在低氧逸度、中度还原环境区域(图 9)(Cao et al., 2012), 因此初步认为这些花岗伟晶岩由具还原性质的岩浆形成, 而这些岩浆通常是由地壳物质部分熔融产生的(Zhu et al., 2009; Yao et al., 2014)。同时岩浆期磷灰石富集稀土的特性, 对于瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉花岗伟晶岩中磷灰石负 δEu , 推测主要有两个原因: 一是在还原环境中 Eu^{3+} 和 Ce^{4+} 分别转变为 Eu^{2+} 和 Ce^{3+} , 而因为 Ce^{3+} 离子半径更接近 Ca^{2+} , 所以优先进入磷灰石晶格, 就造成了 Eu 的亏损, 进而显示强烈的负 δEu ; 二是花岗伟晶岩的熔体可能经历了强烈的斜长石分离结晶, 导致熔体中 Eu 的亏损。

5.3 磷灰石对成矿的指示

Roda-Robles et al.(2022)通过分析中伊比利亚地区过铝质花岗岩、伟晶岩以及热液脉中磷灰石的微量元素含量变化规律, 将磷灰石所在岩体分为富磷伟晶岩、富锂伟晶岩以及贫矿伟晶岩, 其中富磷伟晶岩为平均 $\text{P}_2\text{O}_5 > 0.42\%$ 的高分异过铝质花岗岩。唐勇等(2008)通过对富磷岩体的全岩主量元素分析, 提出大多数富磷岩体的 P_2O_5 含量在 $0.2\% \sim 0.8\%$ 之间。通过对瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉花岗伟晶岩中的磷灰石进行成分分析, 发现磷灰石投点主要集中在富磷伟晶岩区域(图 10)。结合花岗伟晶岩矿物组合中存在磷铝锂石、磷锆铝石、磷锰铝石、含锶磷铝钙石等矿物、及全岩主量数据显示的 P_2O_5 平均值 1.22% (另文待发), 可以初步认为 $\rho 9$ 号脉花岗伟晶岩具有富磷特征。

唐勇等(2008)统计了国内外多个典型富磷岩体的主量、微量以及稀土元素含量, 提出了富磷过铝质岩浆体系的成矿效应: ①泥质岩的深熔作用之初产生的熔体的 ASI(铝饱和指数)很高, 磷灰石在

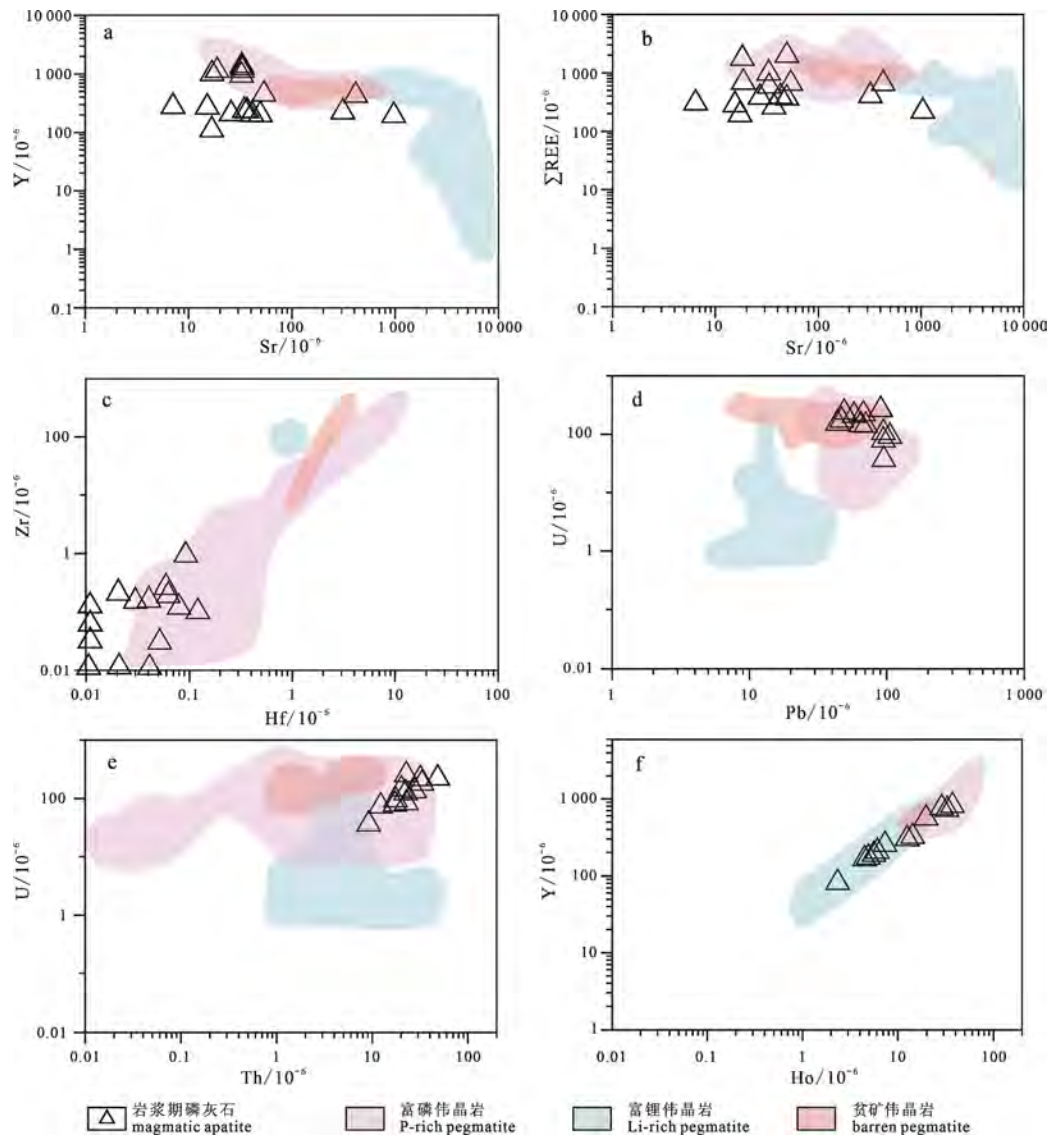


图 10 瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉花岗伟晶岩类型判定(底图来自 Roda-Robles et al., 2022)

Fig. 10 Classification of granite pegmatite of $\rho 9$ vein in southern Washixia (from Roda-Robles et al., 2022)

此熔体中的溶解度非常大。熔体中的磷会降低熔体的聚合度,使副矿物锆石、独居石和铌钽矿物在富磷高 ASI 的熔体中的溶解度增大,初始岩浆中高场强元素和稀有元素增加,为以后的成矿提供了充足的物质来源;②磷等挥发分降低了过铝质岩浆的液相线和固相线温度,拉长了岩浆结晶时间,有利于岩浆分离结晶作用的充分进行。熔体黏度的降低,不但加快了物质组分的扩散速率,而且减小了熔体与热液之间的性状差异,增大岩浆-热液阶段的演化尺度,从而有利于稀有金属的成矿;③由于高场强元素和不相容元素与磷有亲和性,促使 W、Sn、Be、Nb、Ta、Zr、REE 等在熔体相中富集;随着岩浆分异演化的进行,残余熔体相中因各组分浓度增大最终导致绿柱石、锆石、锡石、铌钽等矿物饱和结晶,形成有经济意义的稀有金属矿床。所以磷既能促进源区副矿物的溶解,又能延长岩浆体系的演化尺度,并且由于稀有金属和磷之间的亲和性,可

促使稀有金属在残余熔体相中富集,从而可导致形成有经济意义的富磷花岗岩型或伟晶岩型的稀有金属矿床。Tang et al.(2013)对新疆阿尔泰地区伟晶岩脉的主量元素测定,提出 P_2O_5 含量 0.1%分界值是区分伟晶岩中富矿和贫矿的标志。吕正航等(2018)、Tang et al.(2013)通过统计分析,进一步验证了这一找矿指标,指出贫瘠伟晶岩磷含量较低,复杂矿化伟晶岩磷含量较高,绝大多数简单矿化和复杂矿化伟晶岩都显示了高磷($P_2O_5 > 0.10\%$)特征。瓦石峡南 $\rho 9$ 号脉含锂花岗伟晶岩显示富磷特征(全岩 P_2O_5 平均 1.22%),因此我们认为富磷过铝质岩浆体系可为稀有金属的富集起到促进作用。

6 结论

(1)瓦石峡南锂矿中含矿伟晶岩主要有锂云母钠长石花岗伟晶岩和锂辉石白云母花岗伟晶岩两种类型。

(2)以锂辉石-白云母为主要组成的 $\rho 9$ 号脉花岗伟晶岩中磷灰石分为岩浆期和热液期两个期次。岩浆期主要为氟磷灰石,热液期则以氟-羟基磷灰石为主。

(3)磷灰石主、微量元素成分特征指示瓦石峡南 $\rho 9$ 号锂矿脉产于由地壳物质部分熔融具有还原性质的岩浆,是具有S型花岗岩分异特征的富磷花岗伟晶岩,形成于低氧逸度的还原环境中。

(4)富磷过铝质岩浆体系可为稀有金属的富集起到促进作用。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program (No. 2021YFC2901902), and China Geological Survey (No. DD20221695).

参考文献:

- 曹亮, 许国锋, 刘磊, 等, 2023. 湘南宝山地区燕山期成矿花岗岩岩浆作用研究[J]. 岩石学报, 39(3): 886-909.
- 代鸿章, 刘善宝, 王登红, 等, 2023. 新疆阿尔金稀有金属成矿带探获首例工业规模砂锂沟锂矿[J]. 中国地质, 50(4): 1283-1284.
- 韩丽, 黄小龙, 李洁, 等, 2016. 江西大湖塘钨矿花岗岩的磷灰石特征及其氧逸度变化指示[J]. 岩石学报, 32(3): 746-758.
- 李建康, 刘喜方, 王登红, 2014. 中国锂矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2269-2283.
- 刘丽君, 王登红, 刘喜方, 等, 2017. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质, 44(2): 263-278.
- 吕正航, 张辉, 唐勇, 等, 2018. 新疆阿尔泰不同矿化类型伟晶岩中磷的分布特征及其找矿指示[J]. 矿物岩石地球化学通报, 37(2): 260-270.
- 唐勇, 张辉, 刘丛强, 2008. 富磷过铝质岩浆岩的地球化学特征及成矿效应[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(S1): 145-146.
- 王成辉, 王登红, 刘善宝, 等, 2022. 战略新兴矿产调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查, 9(5): 1-14.
- 王登红, 孙艳, 刘喜方, 等, 2018. 锂能源金属矿产深部探测技术与找矿方向[J]. 中国地质调查, 5(1): 1-9.
- 王核, 黄亮, 白洪阳, 等, 2022. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状: 评述和展望[J]. 大地构造与成矿学, 46(5): 848-866.
- 王核, 徐义刚, 闫庆贺, 等, 2021. 新疆白龙山伟晶岩型锂矿床研究进展[J]. 地质学报, 95(10): 3085-3098.
- 徐兴旺, 洪涛, 李杭, 等, 2020. 初论高温花岗岩-伟晶岩锂铍成矿系统: 以阿尔金中段地区为例[J]. 岩石学报, 36(12): 3572-3592.
- 徐兴旺, 李杭, 石福品, 等, 2019. 阿尔金中段吐格曼地区花岗伟晶岩型稀有金属成矿特征与找矿预测[J]. 岩石学报, 35(11): 3303-3316.
- 严清高, 李建康, 李超, 等, 2022. 川西扎乌龙-青海草陇花岗伟晶岩型稀有金属矿床磷灰石地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 38(2): 341-360.
- 詹琮窑, 朱弟成, 王青, 等, 2022. 磷灰石中一些关键元素的分配行为及意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 41(6): 1087-1099.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等, 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 33(2): 106-111.
- 张焕, 何鹏, 芦西战, 等, 2022. 阿尔金北缘瓦石峡南部稀有金属、稀土矿点的发现及意义[J]. 现代矿业, 38(1): 34-36, 87.

张辉, 吕正航, 唐勇, 2021. LCT型伟晶岩及其锂矿床成因概述[J]. 地质学报, 95(10): 2955-2970.

张朋, 刘豹, 杨晓飞, 等, 2024. 新疆阿尔金西段瓦石峡南锂铍稀有金属成矿背景与勘查进展[J]. 中国地质调查, 11(3): 17-24.

张朋, 王敬国, 刘兴忠, 等, 2023. 阿尔金地区伟晶岩型稀有金属矿勘查进展及找矿前景分析[C]//第十届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集, 080677.

张晓兵, 郭锋, 张博, 2022. 福建漳州花岗闪长岩成因: 来自磷灰石地球化学的约束[J]. 地球化学, 51(5): 585-597.

郑范博, 王国光, 倪培, 2021. 花岗伟晶岩型稀有金属矿床流体成矿机制研究进展[J]. 地质力学学报, 27(4): 596-613.

周宝全, 孙金凤, 杨进辉, 2022. 花岗岩类岩石成因的磷灰石微区地球化学和同位素示踪[J]. 岩石学报, 38(12): 3853-3867.

朱汇派, 费光春, 谭华, 等, 2023. 四川可尔因矿田党坝伟晶岩型稀有金属矿床中带伟晶岩地质特征及成矿时代[J]. 矿物岩石地球化学通报, 42(2): 350-359.

朱笑青, 王中刚, 黄艳, 等, 2004. 磷灰石的稀土组成及其示踪意义[J]. 稀土, 25(5): 41-45, 63.

References:

- BELOUSOVA E A, WALTERS S, GRIFFIN W L, et al., 2001. Trace-element signatures of apatites in granitoids from the Mt Isa Inlier, northwestern Queensland[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 48(4): 603-619.
- BELOUSOVA E A, GRIFFIN W L, O'REILLY S Y, et al., 2002. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: Trace-element compositions and their relationship to host rock type[J]. Journal of Geochemical Exploration, 76(1): 45-69.
- BROSKA I, WILLIAMS C T, UHER P, et al., 2004. The geochemistry of phosphorus in different granite suites of the Western Carpathians, Slovakia: The role of apatite and P-bearing feldspar[J]. Chemical Geology, 205(1-2): 1-15.
- CAO Liang, XU Guofeng, LIU Lei, et al., 2023. Study on Yanshanian metallogenic granitoids magmatism in Baoshan deposit, southern Hunan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(3): 886-909(in Chinese with English abstract).
- CAO Mingjian, LI Guangming, QIN Kezhong, et al., 2012. Major and trace element characteristics of apatites in granitoids from central Kazakhstan: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. Resource Geology, 62(1): 63-83.
- ČERNÝ P, ERCIT T S, 2005. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. The Canadian Mineralogist, 43(6): 2005-2026.
- ČERNÝ P, LONDON D, NOVÁK M, 2012. Granitic pegmatites as reflections of their sources[J]. Elements, 8(4): 289-294.
- CHEN Chenghong, HSIEH P S, LEE C Y, et al., 2011. Two Episodes of the Indosinian Thermal Event on the South China Block: Constraints from LA-ICPMS U-Pb Zircon and Electron Microprobe Monazite Ages of the Darongshan S-Type Granitic Suite[J]. Gondwana Research, 19(4): 1008-1023.
- CHEN Lei, ZHANG Yong, 2018. In situ major-, trace-elements and Sr-Nd isotopic compositions of apatite from the Luming porphyry Mo deposit, NE China: Constraints on the petrogenetic-metallogenic features[J]. Ore Geology Reviews, 94: 93-103.
- CHRISTIANSEN E H, MCCURRY M, 2008. Contrasting origins of Cenozoic silicic volcanic rocks from the western Cordillera of the United States[J]. Bulletin of Volcanology, 70(3): 251-267.

- CHU Meifei, WANG Kuolung, GRIFFIN W L, et al., 2009. Apatite Composition: Tracing Petrogenetic Processes in Transhimalayan Granitoids[J]. *Journal of Petrology*, 50(10): 1829-1855.
- DAI Hongzhang, LIU Shanbao, WANG Denghong, et al., 2023. The first industrial scale Shaligou lithium deposit was discovered in Altun rare metal metallogenic belt, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 50(4): 1283-1284(in Chinese).
- DING Teng, MA Dongsheng, LU Jianjun, et al., 2015. Apatite in granitoids related to polymetallic mineral deposits in southeastern Hunan Province, Shi-Hang zone, China: Implications for petrogenesis and metallogenesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 69: 104-117.
- DRAKE M J, 1975. The oxidation state of europium as an indicator of oxygen fugacity[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39: 55-64.
- GAO Yongbao, ZHAO Xinmin, BAGAS L, et al., 2021. Newly discovered Ordovician Li-Be deposits at Tugeman in the Altyn-Tagh Orogen NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104515.
- HAN Li, HUANG Xiaolong, LI Jie, et al., 2016. Oxygen fugacity variation recorded in apatite of the granite in the Dahutang tungsten deposit, Jiangxi Province, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 746-758(in Chinese with English abstract).
- HSIEH P S, CHEN Chenghong, YANG Huajin, et al., 2008. Petrogenesis of the Nanling Mountains granites from South China: Constraints from systematic apatite geochemistry and whole-rock geochemical and Sr-Nd isotope compositions[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(5/6): 428-451.
- HUGHES J M, RAKOVAN J F, 2015. Structurally robust, chemically diverse: Apatite and apatite supergroup minerals[J]. *Elements*, 11(3): 165-170.
- IMAI A, 2004. Variation of Cl and SO₃ contents of microphenocrystic apatite in intermediate to silicic igneous rocks of Cenozoic Japanese island arcs: implications for porphyry Cu metallogenesis in the Western Pacific Island arcs[J]. *Resource Geology*, 54(3): 357-372.
- KAETER D, BARROS R, MENUGE J F, et al., 2018. The magmatic-hydrothermal transition in rare-element pegmatites from Southeast Ireland: LA-ICP-MS chemical mapping of muscovite and columbite-tantalite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 240: 98-130.
- LAURENT O, ZEH A, GERDES A, et al., 2017. How do granitoid magmas mix with each other? Insights from textures, trace element and Sr-Nd isotopic composition of apatite and titanite from the Matok pluton (South Africa)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172(9): 80.
- LI Hang, HONG Tao, LIU Shanke, et al., 2023. Characteristics of Early Paleozoic granite-pegmatite and associated lithium-beryllium mineralization in the Tugeman area, Altun orogenic system, Northwestern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 160: 105603.
- LI Jiankang, LIU Xifang, WANG Denghong, 2014. The Metallogenetic Regularity of Lithium Deposit in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269-2283(in Chinese with English abstract).
- LINNEN R, TRUEMAN D L, BURT R, 2014. Tantalum and niobium[J]. *Critical metals handbook*, 361-384.
- LIU Lijun, WANG Denghong, LIU Xifang, et al., 2017. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine[J]. *Geology in China*, 44(2): 263-278(in Chinese with English abstract).
- LIU Yongsheng, HU Zhaochu, GAO Shan, et al., 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1): 34-43.
- LIU Yongsheng, GAO Shan, HU Zhaochu, et al., 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571.
- LIU Yongsheng, HU Zhaochu, ZONG Keqing, et al., 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535-1546.
- LONDON D, 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites[J]. *Ore Geology Reviews*, 101: 349-383.
- LÜ Zhenghang, ZHANG Hui, TANG Yong, et al., 2018. The Distribution of Phosphorous in Various Types of Pegmatites from Altai, Xinjiang and Its Implication[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(2): 260-270(in Chinese with English abstract).
- MACDONALD M A, CLARKE D B, 1985. The petrology, geochemistry, and economic potential of the Musquodoboit batholith, Nova Scotia[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22(11): 1633-1642.
- NASSAR N T, 2017. Shifts and trends in the global anthropogenic stocks and flows of tantalum[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 125: 233-250.
- O'SULLIVAN G, CHEW D, KENNY G, et al., 2020. The trace element composition of apatite and its application to detrital provenance studies[J]. *Earth-Science Reviews*, 201: 103044.
- PAN Lichuan, HU Ruizhong, WANG Xinsong, et al., 2016. Apatite trace element and halogen compositions as petrogenetic-metallogenic indicators: Examples from four granite plutons in the Sanjiang region, SW China[J]. *Lithos*, 254-255: 118-130.
- PAN Yuanming, FLEET M E, 2002. Compositions of the apatite-group minerals: Substitution mechanisms and controlling factors[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1): 13-49.
- PICCOLI P M, CANDELA P A, 2002. Apatite in igneous systems[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1): 255-292.
- RAIMBAULT L, BUROL L, 1998. The Richemont rhyolite dike, massif central, France: a subvocalic equivalent of rare-metal granite[J]. *The Canadian Mineralogist*, 36: 265-282.
- RODA-ROBLES E, GIL-CRESPO P P, PESQUERA A, et al., 2022. Compositional variations in apatite and petrogenetic significance: Examples from peraluminous granites and related pegmatites and hydrothermal veins from the central Iberian zone (Spain and Portugal)[J]. *Minerals*, 12(11): 1401.
- SHA Liankun, CHAPPELL B W, 1999. Apatite chemical composition, determined by electron microprobe and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(22): 3861-3881.
- SHANNON R D, 1976. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides[J]. *Acta Crystallographica Section A*, 32(5): 751-767.
- STRECK M J, DILLES J H, 1998. Sulfur evolution of oxidized arc magmas as recorded in apatite from a porphyry copper batholith[J]. *Geology*, 26: 523-526.
- TANG Yong, ZHANG Hui, LIU Congqiang, 2008. Geochemical

- characteristics and ore-forming effects of phosphorus rich peraluminous magmatic rocks[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(S1): 145-146(in Chinese with English abstract).
- TANG Yong, ZHANG Hui, SU Guizhen, 2013. Phosphorus in alkali feldspars as an indicator for prospecting for pegmatite-type rare-metal ore deposits in Altay, NW China[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 13(1): 3-10.
- WANG Chenghui, WANG Denghong, LIU Shanbao, et al., 2022. Progresses and main achievements on strategic emerging minerals survey project[J]. *Geological Survey of China*, 9(5): 1-14(in Chinese with English abstract).
- WANG Denghong, SUN Yan, LIU Xifang, et al., 2018. Deep exploration technology and prospecting direction for lithium energy metal[J]. *Geological Survey of China*, 5(1): 1-9(in Chinese with English abstract).
- WANG He, XU Yigang, YAN Qinghe, et al., 2021. Research progress on Bailongshan pegmatite type lithium deposit, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3085-3098(in Chinese with English abstract).
- WANG He, HUANG Liang, BAI Hongyang, et al., 2022. Types, Distribution, Development and Utilization of Lithium Mineral Resources in China: Review and Perspective[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(5): 848-866(in Chinese with English abstract).
- WEBSTER J D, PICCOLI P M, 2015. Magmatic apatite: A powerful, yet deceptive, mineral[J]. *Elements*, 11(3): 177-182.
- XU Xingwang, LI Hang, SHI Fupin, et al., 2019. Metallogenic characteristics and prospecting of granitic pegmatite-type rare metal deposits in the Tugeman area, middle part of Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(11): 3303-3316(in Chinese with English abstract).
- XU Xingwang, HONG Tao, LI Hang, et al., 2020. Concept of high-temperature granite pegmatite Li-Be metallogenic system with a primary study in the middle Altyn-Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(12): 3572-3592(in Chinese with English abstract).
- YAN Qinggao, LI Jiankang, LI Chao, et al., 2022. The geochemical characteristics and their geological significance of apatite from the Zhawulong-Caolong granitic pegmatite-hosted rare metal deposit in Sichuan and Qinghai provinces, West China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(2): 341-360(in Chinese with English abstract).
- YANG Fan, SANTOSH M, GLORIE S, et al., 2020. Apatite geochronology and chemistry of Luanchuan granitoids in the East Qinling Orogen, China: Implications for petrogenesis, metallogenesis and exploration[J]. *Lithos*, 378-379: 105797.
- YANG Jiehua, KANG Lifang, PENG Jiantang, et al., 2018. In-situ elemental and isotopic compositions of apatite and zircon from the Shuikoushan and Xihuashan granitic plutons: Implication for Jurassic granitoid-related Cu-Pb-Zn and W mineralization in the Nanling Range, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 93: 382-403.
- YAO Yuan, CHEN Jun, LU Jianjun, et al., 2014. Geology and genesis of the Hehuaping magnesian skarn-type cassiterite-sulfide deposit, Hunan Province, Southern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 58: 163-184.
- ZHAI Mingguo, WU Fuyuan, HU Ruizhong, et al., 2019. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 106-111(in Chinese with English abstract).
- ZHAN Qiongyao, ZHU Dicheng, WANG Qing, et al., 2022. Partitioning Behaviors of Some Key Elements in Apatite and Their Implications[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41(6): 1087-1099(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Huan, HE Peng, LU Xizhan, et al., 2022. Discovery and Significance of Rare and Rare Earth Metal Deposits in the South of Washixia, Northern Margin of Altun[J]. *Modern Mining*, 38(1): 34-36, 87(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hui, LÜ Zhenghang, TANG Yong, 2021. A review of LCT pegmatite and its lithium ore genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 2955-2970(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Peng, WANG Jingguo, LIU Xingzhong, et al., 2023. Exploration progress and prospecting prospects analysis of pegmatite type rare metal deposits in the Altyn Tagh region[C]//Collection of abstracts from the 10th National Symposium on Metallogenic Theory and Exploration Methods, 080677(in Chinese).
- ZHANG Peng, LIU Bao, YANG Xiaofei, et al., 2024. Metallogenic background and exploration progress of the southern Waishixia lithium-beryllium rare metal deposit in the western Altyn Tagh of Xinjiang Province[J]. *Geological Survey of China*, 11(3): 17-24(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiaobing, GUO Feng, ZHANG Bo, et al., 2020. Magmatic evolution and post-crystallization hydrothermal activity in the Early Cretaceous Pingtan intrusive complex, SE China: Records from apatite geochemistry[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 175(4): 35.
- ZHANG Xiaobing, GUO Feng, ZHANG Bo, 2022. Petrogenesis of granodiorite in Zhangzhou, Fujian Province: Constraints from apatite geochemistry[J]. *Geochimica*, 51(5): 585-597(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Fanbo, WANG Guoguang, NI Pei, 2021. Research progress on the fluid metallogenic mechanism of granitic pegmatite-type rare metal deposits[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(4): 596-613(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Baoquan, SUN Jinfeng, YANG Jinhui, 2022. In-situ apatite geochemical and isotopic insights into the petrogenesis of granitoids[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(12): 3853-3867(in Chinese with English abstract).
- ZHU Huipai, FEI Guangchun, TAN Hua, et al., 2023. Geological characteristics and metallogenic age of pegmatites in the central zone of the Dangba pegmatite-type rare-metal deposit in the Ke'eryin ore field, Sichuan province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 42(2): 350-359(in Chinese with English abstract).
- ZHU Xiaoqing, WANG Zhonggang, HUANG Yan, et al., 2004. REE content and distribution in apatite and its geological tracing significance[J]. *Chinese Rare Earths*, 25(5): 41-45, 63(in Chinese with English abstract).
- ZHU Jinchu, WANG Rucheng, ZHANG Peihua, et al., 2009. Zircon U-Pb geochronological framework of Qitianling granite batholith, middle part of Nanling Range, South China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(9): 1279-1294.