

doi:10.12029/gc20230314001

西昆仑东段印支期岩浆活动与锂铍稀有金属成矿关系及找矿前景分析

高景刚^{1,2}, 梁婷^{1,2*}, 凤永刚^{1,2}, 谭细娟^{1,2}, 刘艳荣^{1,2}, 李永³, 赵如意⁴, 周斌^{1,2}, 张建新⁵

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学成矿作用及其动力学实验室, 陕西 西安 710054; 3. 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局地质矿产勘查研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 东华理工大学, 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 5. 中国冶金地质总局西北局, 陕西 西安 710119)

摘要: 【研究目的】通过对西昆仑东段印支期岩浆活动和伟晶岩的年代学、地球化学的综合研究, 探讨印支期岩浆活动与锂铍稀有金属成矿的关系, 为下一步找矿方向提供依据。【研究方法】全面总结研究区的地质背景和典型矿床特征, 对比分析印支期岩浆活动的时代、岩性组合、岩石地球化学和 Hf、Nd、Li 等同位素地球化学特征, 总结印支期岩浆活动与伟晶岩的成因联系。【研究结果】西昆仑东段印支期岩浆活动形成的大红柳滩复式岩体控制了区内伟晶岩的空间分布。石英闪长岩、黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩的岩石地球化学、Hf、Nd 同位素特征显示它们可能不是同源岩浆演化。石榴子石和电气石的矿物地球化学和全岩的 Li 同位素特征指示石榴子石电气石二云母二长花岗岩、含石榴子石电气石白云母伟晶岩和锂辉石钠长石伟晶岩有可能是同源岩浆演化而来。【结论】二云母二长花岗岩、尤其是石榴子石电气石二云母二长花岗岩与稀有金属矿化伟晶岩关系更加密切。阿克塔斯的外围和 509 道班-泉水沟一带是寻找富锂伟晶岩的有利区段。

关键词: 锂铍稀有金属矿床; 印支期岩浆活动; 伟晶岩; 成矿关系; 矿产勘查工程; 西昆仑东段

创新点: 总结西昆仑东段印支期岩浆活动与稀有金属伟晶岩成岩成矿的关系, 为寻找富锂伟晶岩提供资料支撑。

Relationship between Indosinian magmatic activity and Li-Be-rare metal mineralization in the eastern section of West Kunlun and its implications for prospecting

GAO JingGang^{1,2}, LIANG Ting^{1,2}, FENG YongGang^{1,2}, TAN Xijuan^{1,2}, LIU Yanrong^{1,2}, LI Yong³, ZHAO Ruyi⁴, ZHOU Bin^{1,2} and ZHANG Jianxin⁵

(1.School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shanxi, China; 2.Laboratory of Mineralization and Dynamics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shanxi, China; 3.Institute of Geological and Mineral Exploration, Xinjinag Non-ferrous Geological Exploration Bureau, Urumqi 830000, Xinjinag, China; 4.State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 5.Northwest bureau of China metallurgical geology bureau, Xi'an 710119, Shanxi, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] The aim of this paper is to investigate the relationship of Li-Be-rare metal mineralization and Indosinian magmatism in the eastern part of the West Kunlun Orogenic Belt through a comprehensive study of Indosinian magmatic activities, granite chronology, and geochemical characterization. Furthermore, the

基金项目: 本文受国家重点研发计划课题 (2021YFC2901902) 和中国地质调查局地质调查项目 (DD20190379-53)联合资助。

作者简介: 高景刚, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 从事矿床学、矿产勘查的教学和科研工作; E-mail: jggao@chd.edu.cn。

通讯作者: 梁婷, 女, 1967 年生, 教授, 主要从事矿产地质、宝石学的教学与研究工作; E-mail: Liangt@chd.edu.cn。

corresponding metallogenic regularity is summarized, and the exploration prospecting of rare metal pegmatite deposits is given. **[Methods]** Based on the our recent research, the geological details in the eastern part of the West Kunlun Orogenic Belt, including ages, mineral assemblages, geochemical characteristics, isotopic characteristics (Hf, Nd and Li, etc.) of the Indosinian magmas, are summarized and fully compared for the first time. The genetic link between the pegmatite-hosted Li-Be-rare metal mineralization and Indosinian magmatism is investigated. **[Results]** The large composite granite pluton formed in Indosinian period in the eastern part of the West Kunlun Orogenic Belt is mainly composed of quartz diorite, biotite monzogranite and two-mica monzogranite (including garnet tourmaline two-mica monzogranite), which was formed due to partial melting of the crust in a post-collision regime. The reliable chronological data show that there is no age difference between the composite granite (216.7~208.8Ma) and the granitic pegmatites (211.9~208.1Ma), suggesting that they were formed at the same time. The characteristics of minerals (garnet, tourmaline) and Li isotopes indicate that the two-mica monzogranite (garnet tourmaline two-mica monzogranite), garnet-bearing tourmaline muscovite granite pegmatite and spodumene-albite pegmatite were likely derived from the same magma source. **[Conclusions]** Results show that two-mica monzogranite and in particular garnet, tourmaline-bearing two-mica monzogranite exhibit close relationship with the pegmatite-type rare metal deposits. The peripheries of Aktas and the 509 Daoban-Quanshuigou area are favorable section for prospecting lithium-rich pegmatite.

Key words: Li-Be rare metal deposit; Indosinian magmatic activity; pegmatite; metallogenic relationship; mineral exploration engineering; the eastern section of West Kunlun

Highlights: Summarize the relationship between the Indosinian magmatism and rare metal granitic pegmatites mineralization in the eastern part of the West Kunlun Orogenic Belt, which provides guidance for pegmatite-hosted rare metal mineralization prospecting.

About the first author: GAO Jinggang, male, born in 1974, associate professor, engaged in geological survey and metallogenic regularity research; E-mail: jggao@chd.edu.cn.

About the corresponding author: LIANG Ting, female, born in 1967, professor, engaged in mineral exploration and research progress in gemology; E-mail: Liangt@chd.edu.cn

Fund support: Supported by the National Key Research and Development Program of China (No .2021YFC2901902) and project of China Geological Survey (No. DD20190379-53) .

1 引言

花岗伟晶岩按矿物组合和地球化学特征划分为锂-铯-钽 (LCT) 型和铌-钇-氟 (NYF) 型 (Černý and Ercit, 2005), 前者与 S 型花岗岩有关 (Chappell and White, 2001), 后者主要与 A 型花岗岩有关 (Eby, 1990)。多数学者认为 LCT 型伟晶岩是花岗岩结晶分异的产物 (Jahns and Burnham, 1969; Norton, 1983; Černý et al., 1992; London, 1990, 1992, 2008, 2018)。当岩体为复式花岗岩大岩基时, 受控伟晶岩脉可能是多期次的, 伟晶岩环绕主岩体周围可以形成若干个密集区和不同矿化类型的矿床 (邹天人和李庆昌, 2006)。时空关系密切的伟晶岩与花岗岩之间也可能存在时间或者物源的解耦关系 (张辉等, 2019)。因此, 开展伟晶岩与花岗岩的成因关系研究, 对总结稀有金属矿化伟晶岩的成矿规律及找矿方向具有重要作用。

近年, 在西昆仑东段先后发现康西瓦铍矿、喀拉喀锂矿、大红柳滩东锂矿、509 道班西锂铍矿、505 锂矿、507 锂矿、俘虏沟锂矿等多个稀有金属矿化伟晶岩脉群 (王核等, 2017; 李侃等, 2019; 李永等, 2022), 现已成为青藏高原北缘锂成矿省的重要组成部分 (王登红等, 2017)。已有研究成果显示: 伟晶岩和大红柳滩复式岩体具有密切的时空关系, 形成于印支期晚期 (Wang et al., 2020; Zhou et al., 2021; 梁婷等, 2022)。然而, 组成复式岩体的石英闪长岩、黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩的岩石地球化学、Hf、Nd 同位素地球化学特征显示 (魏小鹏等, 2017, 2018; Ding et al., 2019; 梁婷等, 2022), 它们不可能是同源岩浆演化形成, 这使得印支期岩浆活动与受控伟晶岩的关系变得复杂。需要进一步厘清复式岩体的岩性组成,

活动期次以及岩浆演化关系，总结印支期岩浆活动与锂铍稀有金属成矿的关系，可以为下一步找矿提供依据。

2 成矿地质背景

西昆仑造山带北邻塔里木板块，南接喀喇昆仑-羌塘地块，西端以塔什库尔干断裂为界与帕米尔高原毗邻，自北向南划分为铁克里克陆缘地块、秦祁昆造山带、可可西里-巴颜喀拉山断褶带和北羌塘-唐古拉地块等构造单元（图 1a）。西昆仑东段的康西瓦-大红柳滩稀有金属伟晶岩成矿带处于可可西里-巴颜喀拉断褶带西端，呈西窄东宽的楔状体夹持在康西瓦断裂和郭扎错断裂之间。区域内主要出露古元古界康西瓦岩群，二叠系黄羊岭群和三叠系巴颜喀拉山群，三者均呈断层接触关系（图 1b）。康西瓦岩群是 2006 年陕西省地质调查院从前人划定的三叠系克勒青河群中解体出的一套深变质、强变形地层，主要分布在康西瓦断裂南的三十里营房-康西瓦-阿克沙依一带，呈构造岩片状展布，岩性主要有黑云石英片岩、黑云斜长石英片岩、片麻岩和大理岩等（边小卫等，2015）。黄羊岭群分布于郭扎错断裂以北、大红柳滩断裂以东地区，主要为一套细碎屑岩夹少量碳酸盐岩及中基性火山岩，局部地段被印支期花岗岩侵入，与下伏康西瓦岩群和上覆巴颜喀拉山群呈断层接触。巴颜喀拉山群分布于三十里营房-大红柳滩-泉水沟一带，主要为一套分选性差、成分和结构成熟度不高的碎屑岩夹少量碳酸盐岩建造组成，岩性单一，横向变化不大，具深水复理石建造特征。

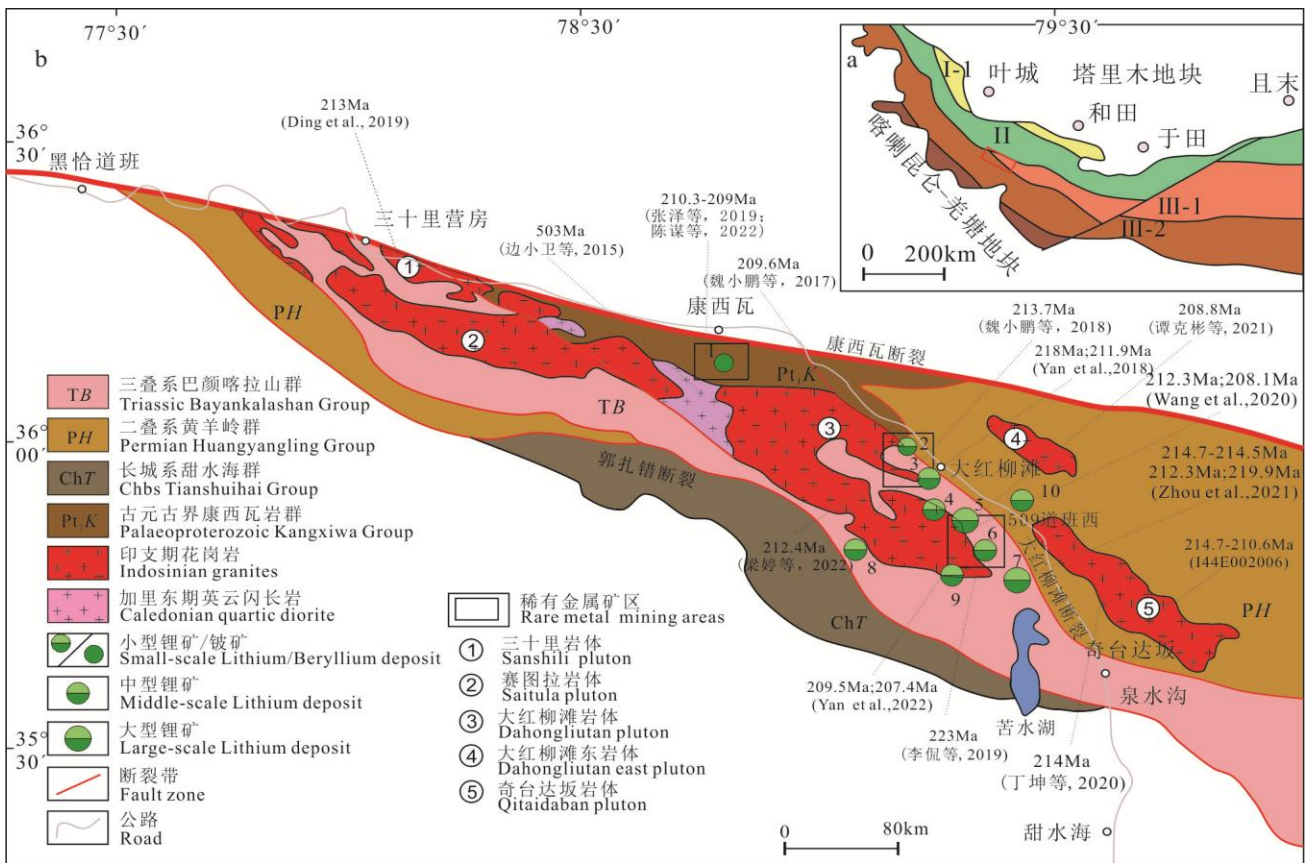


图 1 西昆仑造山带东段地质简图 (a,b 据李侃等，2019)

I-1 铁克里克陆缘地块；II 秦祁昆造山带；III-1 可可西里-巴颜喀拉山断褶带；III-2 北羌塘-唐古拉地块；康西瓦铍矿；2.阿克沙依锂矿；3.阿克塔斯锂矿；4.喀拉喀锂矿；5.509 道班西锂矿；6.505 锂矿；7.507 锂矿；8.俘虏沟南 1 号锂矿；9.俘虏沟南 2 号锂矿；10.大红柳滩东锂矿

Fig. 1 Geological map in eastern part of the West Kunlun Orogenic Belt, Xinjiang (a, b modified after Li et al., 2019)

I-1 Tiekelike block; II Qin-Qi-Kun orogenic belt; III-1 Kekexili-Bayankalashan fault-fold belt; III-2 North Qiangtang-Tanggula block; 1.Kangxiwa Beryllium deposit; 2.Akshayi Lithium deposit; 3.Aktasi Lithium deposit; 4.Kalaka Lithium deposit; 5.Lithium deposit in western 509 Daoban; 6.505 Lithium deposit; 7.507 Lithium deposit; 8. No.1 Lithium deposit in south Fulu ditch; 9.No.2 Lithium deposit in the south Fulu ditch; 10.Lithium deposit in the east Dahongliutan.

侵入岩主要由加里东期英云闪长岩和印支期花岗岩组成。灰色片麻状英云闪长岩分布在康西瓦南 15km 处，锆石 U-Pb 年龄为 $503 \pm 0.7\text{Ma}$ (边小卫等, 2015)，侵入到古元古界康西瓦岩群，南部与巴颜喀拉山群呈断层接触，东西两端被印支期花岗岩侵入。印支期花岗岩主要分布在三十里营房、赛图拉、大红柳滩和奇台达坂一带，是由石英闪长岩、黑云母花岗岩、黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩、二云母二长花岗岩等岩性组成的复式岩体 (乔耿彪等, 2015; 魏小鹏等, 2017, 2018; Ding et al., 2019; Wang et al., 2020; 谭克彬等, 2021; Zhou et al., 2021; 梁婷等, 2022)。数千条伟晶岩脉分布在大红柳滩复式岩体的周围，其中数百条具有不同程度的稀有金属矿化或白云母矿化 (邹天人和李庆昌, 2006; 王核等, 2017; 李侃等, 2019)，形成了康西瓦小型铍矿床，阿克沙依小型锂矿、阿克塔斯中型锂矿、509 道班西大型锂矿床等多个锂铍稀有金属矿区。

3 典型矿区特征

3.1 康西瓦

康西瓦矿区主要分布在康西瓦南-红旗桥一带，东西长 15km，南北宽 10km 左右 (图 2)。出露地层主要为古元古界康西瓦岩群，为一套中、深变质岩系，在研究区仅出露第一、第二和第四岩组，岩性分别为含石榴子石、矽线石、蓝晶石黑云角闪斜长片麻岩，含石榴子石黑云斜长片麻岩和石英片岩 (夹大理岩) (范建强等, 2020)。在矿区的南部出露大面积的花岗岩，岩性为似斑状黑云母花岗岩、中细粒黑云母花岗岩，内蒙古自治区地质测绘院在康西瓦地区开展 1:5 万地质调查工作将岩体时代定为燕山早期，本文根据复式岩体的年龄 (梁婷等, 2022) 和伟晶岩的年龄 (张泽等, 2019; 陈谋等, 2022) 将其划分到印支晚期。区内发现伟晶岩近百条，地表出露的伟晶岩呈脉状，大多数伟晶岩脉沿片理产出。其中康西瓦一号脉为绿柱石白云母伟晶岩，长约 100m，宽 25~30m，矿脉中以中粗粒结构为主，结构单元分布不均匀，主要组成矿物有石英、微斜长石、白云母、钠长石、少量绿柱石、电气石、石榴子石等 (张泽等, 2019)。

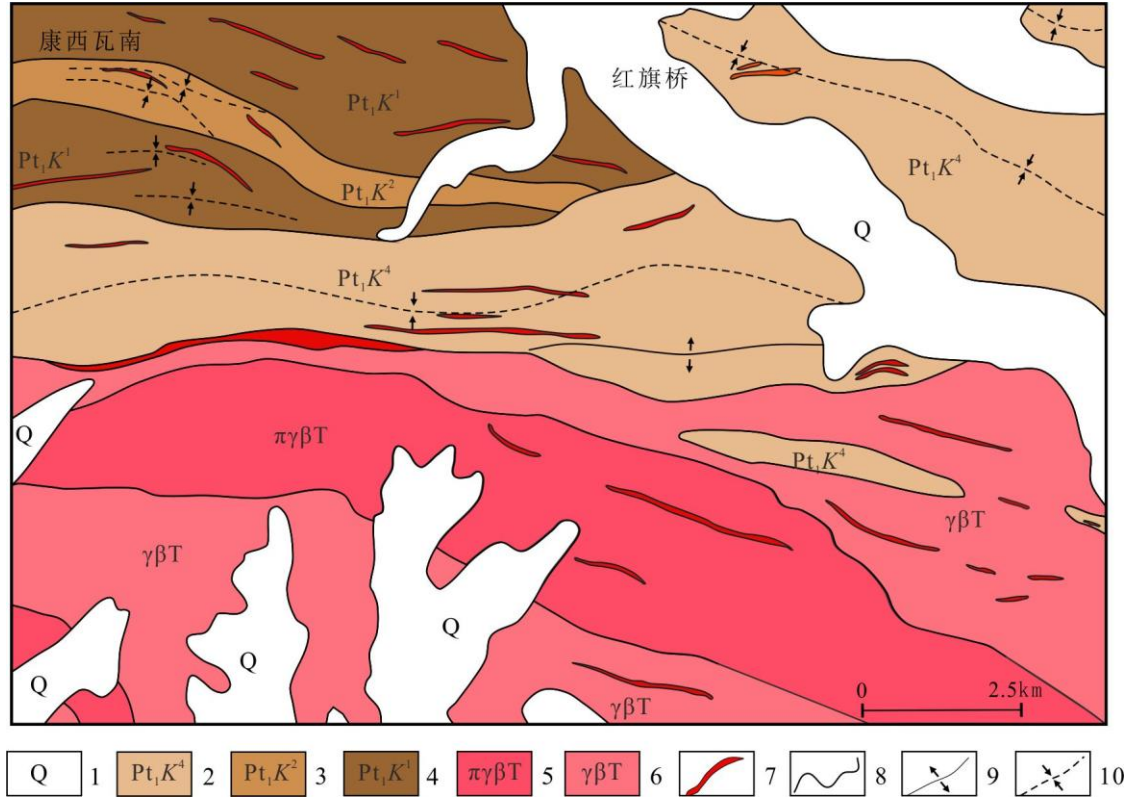


图2 康西瓦矿区地质简图及伟晶岩分布图 (据范建强等, 2020)

- 1.第四系; 2.康西瓦岩群第四岩组; 3.康西瓦岩群第二岩组; 4.康西瓦岩群第一岩组; 5.似斑状黑云母花岗岩; 6.黑云母花岗岩;
7.伟晶岩脉; 8.地质界线; 9.背斜; 10.向斜

Fig.2 Geological map and pegmatite distribution of the Kangxiwa mining area (after Fan et al., 2020)

- 1.Quaternary; 2.The fourth Formation of Kangxiwa Group; 3.The second Formation of Kangxiwa Group; 4.The first Formation of Kangxiwa Group; 5.Porphyrritic biotite granite; 6.Biotite granite; 7.Granite pegmatite dike; 8.Geological boundary; 9.Anticline; 10.Syncline.

3.2 大红柳滩

大红柳滩矿区西起新藏公路 452 公里里程碑处的阿克沙依, 东至 489 公里里程碑处, 是区域内伟晶岩分布最多的地区(图 3a)。目前发现有 7000 多条, 长度一般在几 m ~ 250m 之间, 个别大于 250m; 厚度一般在几米至几十米, 个别可达百米。在空间上分布不均匀, 主要分布在黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩和石榴子石电气石二云母二长花岗岩的内外接触带及其围岩地层中, 脉体成群成带出现, 呈透镜状、串珠状, 板状产出。根据矿物组合划分为微斜长石-石英-白云母(微斜长石型伟晶岩)、绿柱石-白云母-石英-钠长石-微斜长石(白云母型伟晶岩)和锂辉石-钠长石-石英伟晶岩(锂辉石型伟晶岩)三类, 其中锂辉石型伟晶岩主要分布在阿克沙依和阿克塔斯。

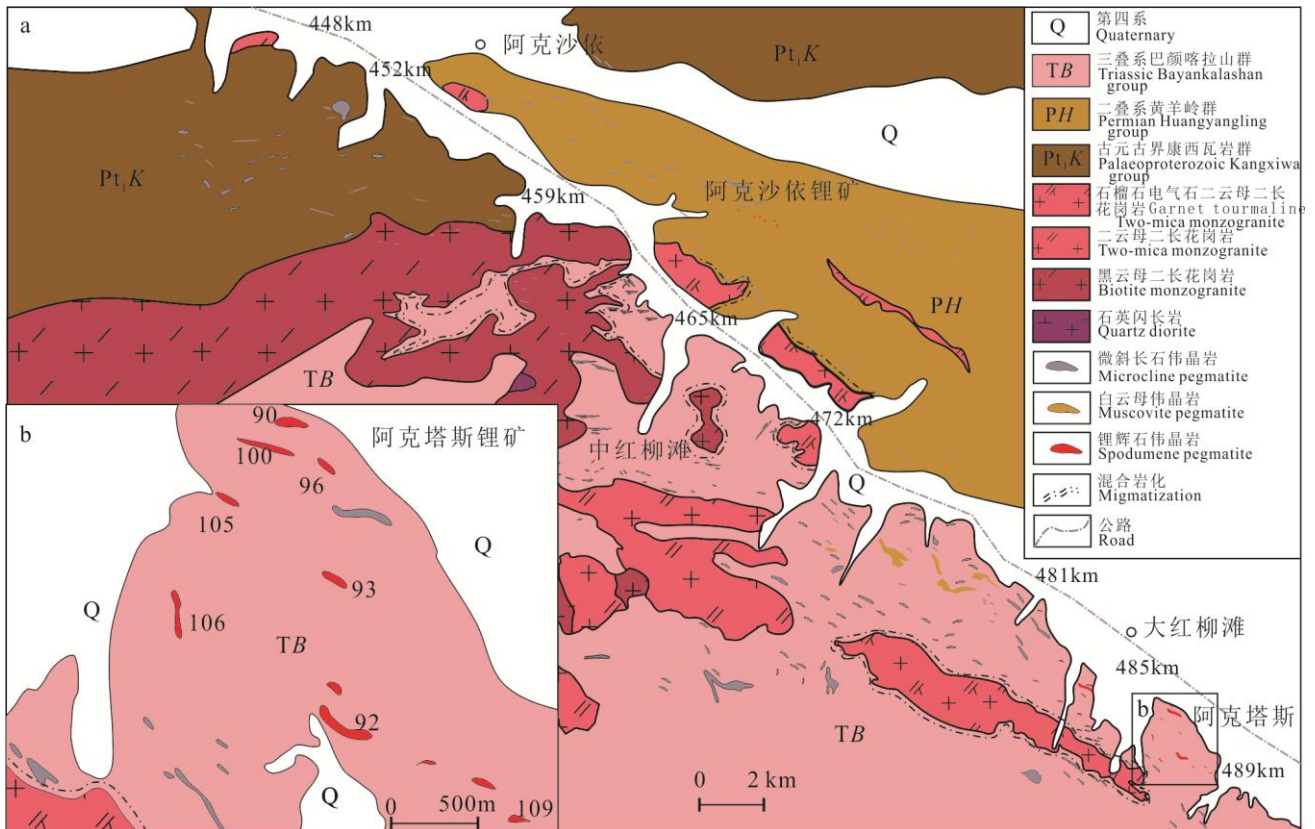


图3 大红柳滩矿区(a)和阿克塔斯锂矿床(b)地质简图及伟晶岩分布图(据新疆地质局第二地质大队, 1981)

Fig. 3 Geological map and pegmatite distribution of the Dahongliutan mining area(a) and Aketasi Lithium deposit(b) (modified after No.2 Geological brigade of Xinjiang Geological Bureau, 1981)

阿克沙依锂矿点位于新藏公路 459km 里程碑处的东沟一带, 产出在黑云母二长花岗岩和石榴子石电气石二云母二长花岗岩的北侧, 已发现的 24 条含锂伟晶岩脉, 一般规模较小(几 m 到 200m, 宽 1 ~ 20m), 形状有板状、不规则的葫芦状和透镜状。阿克塔斯锂矿位于大红柳滩南 2km 处, 伟晶岩分布在二云母二长

花岗岩和石榴子石电气石二云母二长花岗岩外围，自岩体向外围具有微斜长石型伟晶岩、白云母型伟晶岩和锂辉石型伟晶岩分带趋势。已发现 112 号、90 号、91 号、93 号锂辉石伟晶岩脉群主要分布在石榴子石电气石二云母二长花岗岩的外围（图 3b）。

3.3 509 道班西

509 道班西矿区是陕西省地质调查院在大红柳滩一带矿产调查中新发现的锂铍稀有金属矿产地，部分地段与白龙山矿段重叠（王核等，2017），不同单位采用了不同的命名。新疆有色地质勘查开发局将矿区划分为 4 个伟晶岩脉群，已探获 Li_2O 资源量达到百万吨（李永等，2022）。区内出露地层为巴颜喀拉山群的上组下段和中组上段，主体为一套细碎屑岩复理石建造，岩性组合为中-薄层细粒长石石英杂砂岩、泥质粉砂岩，发生低绿片岩相的浅变质作用。西南一带发育规模较大的晚三叠世似斑状中-粗粒二云母二长花岗岩、黑云母二长花岗岩和中-细粒石英闪长岩。二云母二长花岗岩呈长岩株状产出，走向与构造线方向一致，侵位于石英闪长岩、巴颜喀拉山群中组上段，接触界线不规则，大部分倾向北东。岩体内外接触带和巴颜喀拉山群发育大量的伟晶岩脉，石榴子石电气石白云母伟晶岩脉沿裂隙侵入石英闪长岩（谭克彬等，2021），锂辉石伟晶岩脉主要分布在巴颜喀拉山群中组上段（图 4）。

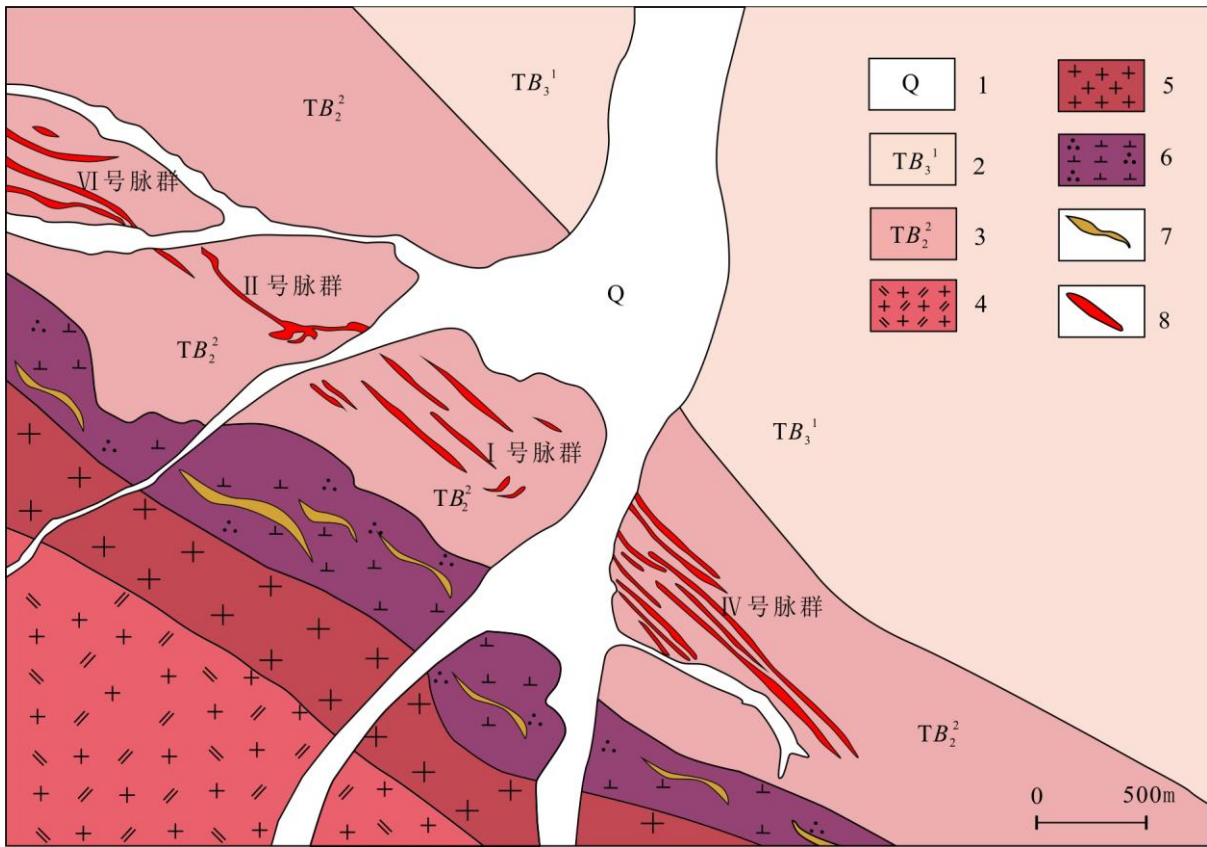


图 4 509 道班西锂矿区地质简图(李永等，2022)

- 1.第四系； 2.巴颜喀拉山群上组下段； 3.巴颜喀拉山群中组上段； 4.晚三叠世石榴子石电气石二云母二长花岗岩； 5.晚三叠世黑云母二长花岗岩； 6.晚三叠世石英闪长岩； 7.石榴子石电气石白云母伟晶岩； 8.锂辉石伟晶岩脉

Fig.4 Geological sketch of lithium mining area in western 509 Daoban (after Li et al., 2022)

- 1.Quaternary; 2. Lower Member of Upper Formation of the Bayankalashan Group; 3.Upper Member of Middle Formation of the Bayankalashan Group; 4.Late Triassic garnet, tourmaline-bearing two-mica monzogranite; 5.Late Triassic biotite monzogranite; 6.Late Triassic quartz diorite; 7. Garnet, tourmaline-bearing muscovite pegmatite; 8.Spodumene pegmatite dike.

4 岩浆活动与稀有金属伟晶岩的关系讨论

4.1 形成时代

西昆仑东段复式岩体和伟晶岩的年龄数据列于表 1。复式岩体的锆石 U-Pb 年龄变化在 216.7~208.8Ma 之间（魏小鹏等, 2017, 2018; Zhou et al., 2021; Ding et al., 2019; Wang et al., 2020; 丁坤等, 2020; 谭克彬等, 2021; 梁婷等, 2022），形成于印支晚期，其中二云母二长花岗岩和石榴石电气石二云母二长花岗岩最晚侵入（209.6~208.8Ma）。伟晶岩的锆石、锡石、铌钽铁矿、独居石的 U-Pb 年龄和白云母的 Ar-Ar 年龄分别为 223~207.4Ma 和 190.1~144.7Ma（表 1），年龄变化范围远远超出一般伟晶岩的冷却结晶时间（London 2018; Müller et al., 2018），这可能与同位素体系的适用条件有关。伟晶岩中的锆石往往出现蜕晶质化和热液蚀变现象，导致 U-Pb 同位素体系重置（Geisler et al., 2003,2007），可能代表同位素体系重置时间；白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素体系的封闭温度（ $350\pm 50\text{ }^\circ\text{C}$, Jäger, 1979）略低于伟晶岩中白云母的形成温度（李杭等, 2019），可能代表了晚期叠加的热事件时间（图 5）；铌钽铁矿 U-Pb 同位素体系的封闭温度为 $500\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ （Parrish,1990, Li et al., 2019），具有极低的普通铅含量，与岩浆-热液阶段的钾长石、石英共生（Černý and Lenton, 1995; Selway et al., 2005），在排除热液蚀变和交代改造等干扰因素外，可以确定铌钽铁矿是伟晶岩的原生矿物，能够代表伟晶岩的主要形成年龄（211.9~208.1Ma, 图 5）。

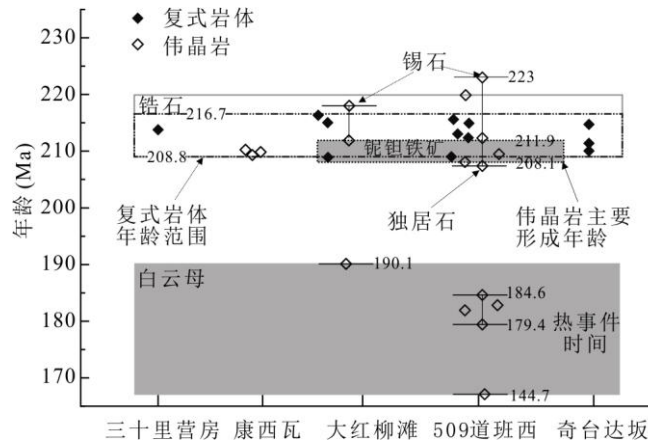


图 5 西昆仑东段伟晶岩与岩体形成时代（据表 1）

Fig. 5 Ages of the pegmatites and granites in eastern part of the West Kunlun Orogenic Belt, Xinjiang (after Table 1)

表 1 西昆仑造山带东段花岗岩、伟晶岩年龄统计表

Table 1 Ages of the granites and pegmatites in eastern part of the West Kunlun Orogenic Belt

矿区	岩性	采位置	测年方法	年龄(Ma)	资料来源
康西瓦	英云闪长岩	康西瓦南	锆石 LA-ICP MS U-Pb	503 \pm 0.7	边小卫等, 2015
	黑云母二长花岗岩	三十里营房东	锆石 LA-ICP MS U-Pb	213 \pm 2.1	Ding et al., 2019
	绿柱石-伟晶岩	1 号脉	锆石 LA-ICP MS U-Pb	209 \pm 4.4	张泽等, 2019
	不含矿伟晶岩	康西瓦南	锆石 LA-ICP MS U-Pb	210.3 \pm 2.3 208.8 \pm 5.5	陈谋等, 2022
大红柳滩	二云母二长花岗岩	大红柳滩西南	锆石 LA-ICP MS U-Pb	209.6 \pm 1.5	魏小鹏等, 2017
	石榴子石电气石二云母二长花岗岩	阿克沙依	锆石 LA-ICP MS U-Pb	207.9~2679.9	梁婷等, 2022
	石榴子石电气石二云母二长花岗岩	大红柳滩	锆石 LA-ICP MS U-Pb		
	二长花岗岩（含石榴子石电气石）	大红柳滩	锆石 SHRIMP U-Pb	220 \pm 2.2~217.4 \pm 2.2	乔耿彪等, 2015
	闪长岩	阿克萨依	锆石 LA-ICP MS U-Pb	216.7 \pm 1.8	魏小鹏等, 2018
	石英闪长岩	俘虏沟	锆石 LA-ICP MS U-Pb	213.7 \pm 2.0	魏小鹏等, 2018

	伟晶岩	90 号脉	白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	190.1	邹天人等, 2006
	伟晶岩	90 号脉	白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	144.7	乔耿彪等, 2020
	伟晶岩	90-1 号脉	铌钽铁矿 U-Pb	211.9 \pm 2.4	
	伟晶岩	90-1 号脉	锡石 U-Pb	218 \pm 2	Yan et al.,2018
	黑云母二长花岗岩	俘虏沟	锆石 LA-ICP MS U-Pb	212.4 \pm 2.2	梁婷等, 2022
	花岗闪长岩	白龙山	锆石 LA-ICP MS U-Pb	212.3 \pm 1.6	Wang et al., 2020
	石英闪长岩	白龙山	锆石 LA-ICP MS U-Pb	214.7 \pm 2.0; 214.5 \pm 2.8	Zhou et al.,2021
	伟晶岩	不含锂 507-509	锆石 LA-ICP MS U-Pb	212.3 \pm 0.9	Zhou et al.,2021
	伟晶岩	含锂 507-509	锆石 LA-ICP MS U-Pb	219.9 \pm 0.7	Zhou et al.,2021
	二云母花岗岩 (含石榴子石电气石)	509 道班西	锆石 LA-ICP MS U-Pb	208.8 \pm 1.7	谭克彬等, 2021
白龙山 (509 道班 西)	伟晶岩	白龙山	独居石 U-Pb	207.4 \pm 0.6	
	伟晶岩	白龙山	铌钽铁矿 U-Pb	209.5 \pm 1.4	Yan et al.,2022
	伟晶岩	509	铌钽铁矿 U-Pb	208.1 \pm 1.5	Wang et al., 2020
	伟晶岩	505	锡石 U-Pb	223 \pm 1	李侃等, 2019
	花岗伟晶岩	I-19 号脉	白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	184.6 \pm 1.8	
	花岗伟晶岩	II-1 号脉	白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	179.4 \pm 1.8	李永等, 2022
	花岗伟晶岩	电气石伟晶岩	白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	182.8 \pm 1.8, 181.9 \pm 1.9	
	黑云母二长花岗岩	513 公里处	锆石 LA-ICP MS U-Pb	214 \pm 1.8	丁坤等, 2020
奇台达坂	英云闪长岩	奇台达坂	锆石 LA-ICP MS U-Pb	214.7 \pm 2.0	新疆西昆仑地区 1:5 万 I44E002006 等四幅 区调报告
	石英闪长岩	奇台达坂	锆石 LA-ICP MS U-Pb	211.3 \pm 3.3	
	花岗闪长岩	奇台达坂	锆石 LA-ICP MS U-Pb	210.6 \pm 2.8	

4.2 地球化学特征

西昆仑东段印支期复式岩体主要由石英闪长岩、黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩 (包括石榴子电气石二云母二长花岗岩) 等组成。Harker 图解显示, 随着 SiO_2 含量的增加, 石英闪长岩 \rightarrow 黑云母二长花岗岩 \rightarrow 二云母二长花岗岩 (石榴子石电气石二云母二长花岗岩) 的 TiO_2 、 Fe_2O_3^T 、 MgO 、 CaO 含量逐渐减少, K_2O 、 Na_2O 等趋向增高, 显示岩浆连续演化。然而, 三者之间存在明显的地球化学演化间断 (图 6), 稀土元素和微量元素地球化学特征也不同, 特别是黑云母二长花岗岩具有显著的 Eu 负异常 (δEu 为 0.50~0.87), 二云母二长花岗岩无明显的 Eu 负异常 (δEu 为 0.81~0.98), 暗示石英闪长岩、黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩可能不是同源岩浆演化的产物。

复式岩体的 Hf、Nd 同位素数据特征见图 7。闪长岩、石英闪长岩、黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩具有不同的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_0$ 比值、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (魏小鹏等, 2018; 丁坤等, 2020; 魏小鹏等, 2017; 梁婷等, 2022), 指示它们有可能来源于不同的源区。石榴子石电气石二云母二长花岗岩具有较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-8.64~-7.81), 采用地壳 Hf-Nd 同位素相关演化公式计算 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -8.30~-7.20 (图 7b, Vervoort et al., 1999), 与二云母二长花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-9.49~-4.47) 具有一致性, 结合 Harker 图解中两者连续的地球化学演化特征 (图 6), 暗示两者同源演化, 是壳源物质部分熔融的产物。

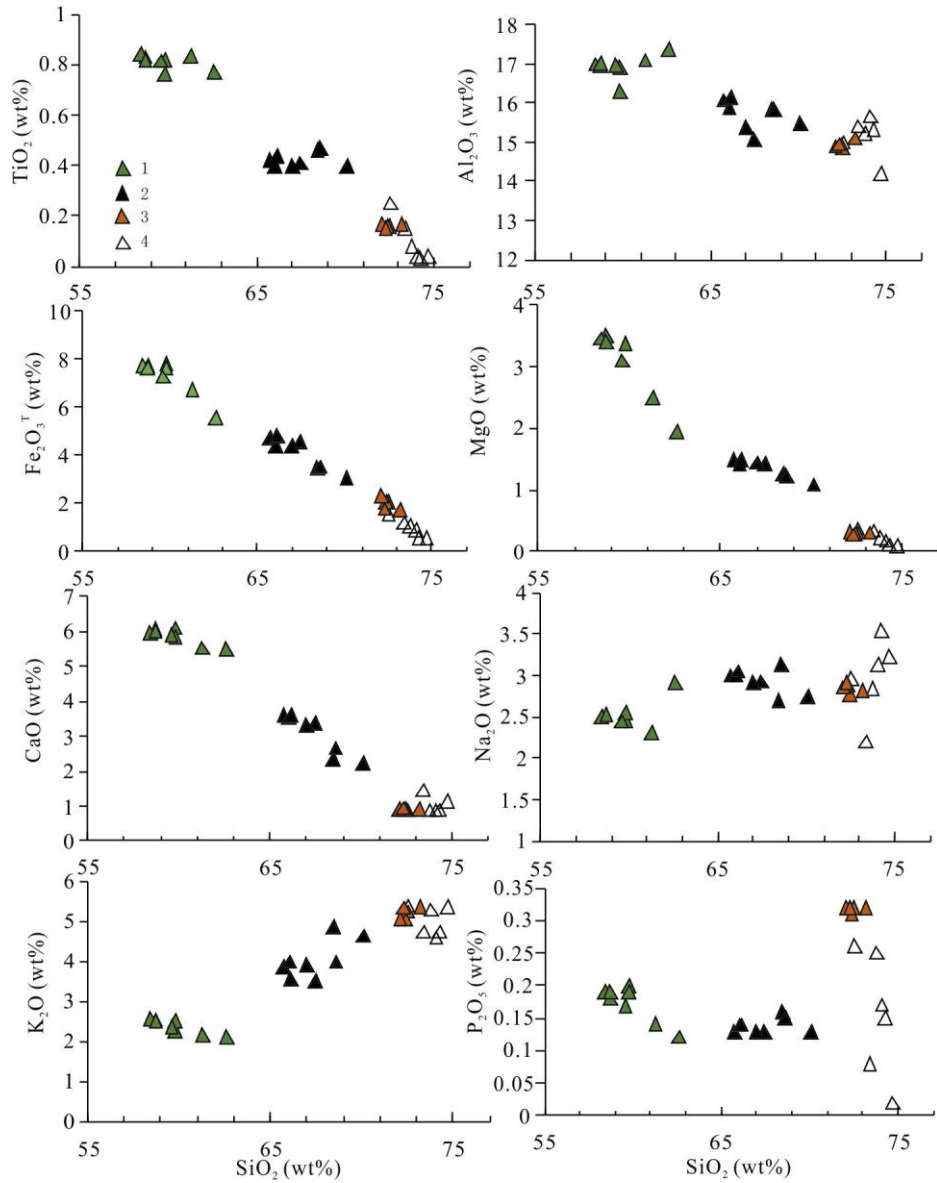


图 6 西昆仑东段复式岩体 Harker 图解（石英闪长岩、黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩数据来源于魏小鹏等，2017, 2018；丁坤等，2020；梁婷等，2022）

1.石英闪长岩；2.黑云母二长花岗岩；3.二云母二长花岗岩；4.石榴子石电气石二云母二长花岗岩

Fig. 6 Harker diagram for the complex massif in eastern part of the West Kunlun Orogenic Belt, Xinjiang (Quartz diorite, biotite monzogranite and two-mica monzogranite values after Wei et al., 2017, 2018 and Ding et al., 2020; Liang et al.,2022)

1. Quartz diorite; 2. Biotite monzogranite; 3. Two-mica monzogranite; 4. Garnet, tourmaline-bearing two-mica monzogranite

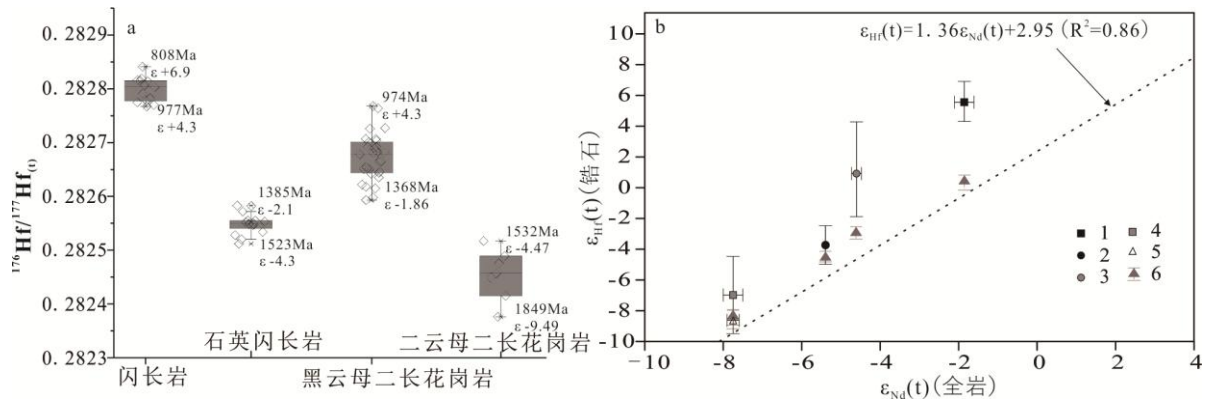


图7 西昆仑东段岩浆岩的Hf、Nd同位素特征(闪长岩、石英闪长岩引自魏小鹏等, 2017,2018; 黑云母二长花岗岩、石榴子石电气石二云母二长花岗岩引自丁坤等 2019, 2020; 梁婷等, 2022; 二云母二长花岗岩引自魏小鹏等 2017)

- 1.闪长岩; 2.石英闪长岩; 3.黑云母二长花岗岩; 4.二云母二长花岗岩; 5.石榴子石电气石二云母二长花岗岩; 6. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算值
- Fig. 7 Hf and Nd Isotopic characteristics of igneous intrusions in eastern part of the West Kunlun Orogenic Belt, Xinjiang(Diorite, quartz diorite, two mica monzogranite values after Wei et al., 2017, 2018; Biotite monzogranite, metasomatism monzogranite values after Ding et al., 2019, 2020; Liang et al., 2022)
- 1.Diorite; 2. Quartz diorite; 3. Biotite monzogranite; 4.Two-mica monzogranite; 5.Garnet, tourmaline-bearing two-mica monzogranite; 6.Calculated $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values

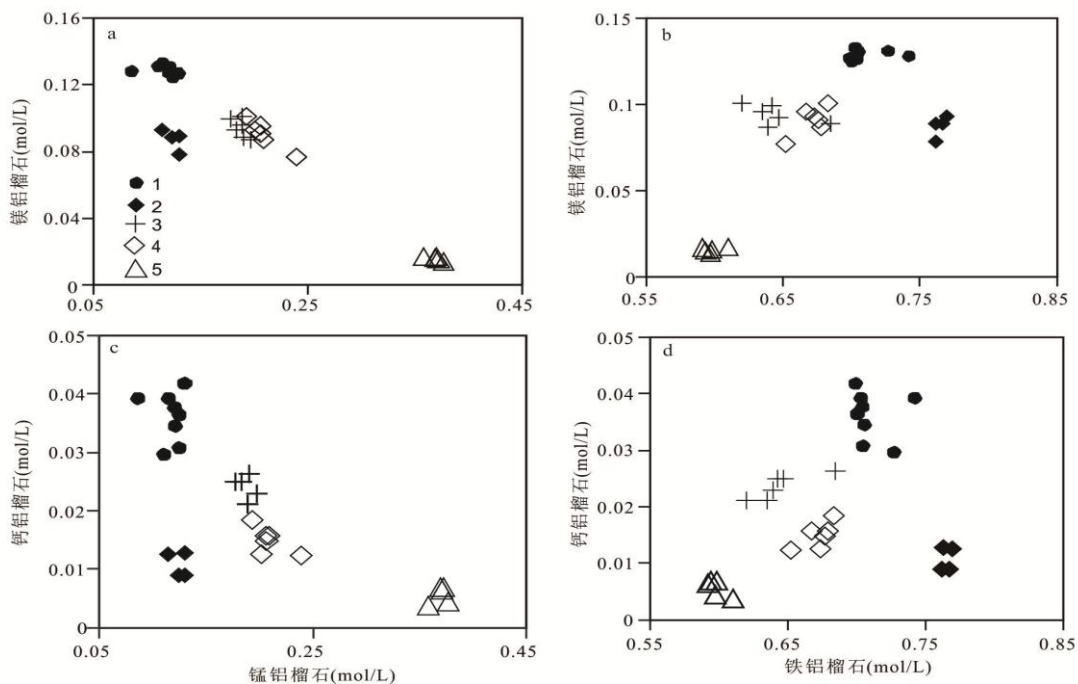


图8 大红柳滩地区花岗岩、伟晶岩及围岩中石榴子石端员组分分类 (梁婷等, 2022)

- 1.石榴子石矽线石二云母片岩; 2.电气石石榴子石浅粒岩; 3.石榴子石二云母二长花岗岩; 4.石榴子石电气石白云母伟晶岩;
5. 锂辉石钠长石伟晶岩

Fig.8 Compositional variation diagram of garnet from the granites, pegmatites, and country rock in the Dahongliutan area (after Liang et al., 2022)

1. Garnet silmanite two-mica schist; 2. Tourmaline garnet leptite; 3. Garnet two-mica monzogranite; 4. Garnet, tourmaline-bearing Muscovite pegmatite; 5. Spodumene albite pegmatite

4.3 石榴子石和电气石特征

4.3.1 石榴子石

石榴子石广泛存在于变质围岩（二云母片岩、浅粒岩）、含石榴子石钠长石伟晶岩和石榴子石电气石二云母二长花岗岩中。电子探针分析结果显示（梁婷等，2022）：（1）变质围岩中变质成因的石榴子石明显富 FeO，贫 MnO，且含石榴子石矽线石二云母片岩中 MgO、CaO 含量相对较高；（2）含石榴子石电气石白云母伟晶岩与含石榴子石二云母二长花岗岩的石榴子石成分相当；（3）锂辉石钠长石伟晶岩的石榴子石相对贫 FeO、MgO、CaO，富 MnO。由图 8 可知从含石榴子石二云母二长花岗岩到含石榴子石电气石白云母伟晶岩再到锂辉石钠长石伟晶岩，锰铝榴石组分会逐渐增多，MnO 富集的趋势显著，这说明岩浆结晶分异程度不断加强（Baldwin and von Knorring, 1983; Whitworth, 1994），指示它们是同源岩浆演化而来。

4.3.2 电气石

电气石广泛分布于花岗岩（黑云母二长花岗岩、石榴子石电气石二云母二长花岗岩）、围岩（二云母石英片岩）和伟晶岩（白云母伟晶岩、电气石钠长石伟晶岩和锂辉石伟晶岩）中。花岗岩中的电气石多为黑色、柱状晶体，粒径大小不一，可见黑色粒状晶体定向分布。变质围岩中的电气石呈黑色，长柱状，可见其切穿片理，其生成晚于区域变质作用。伟晶岩中的电气石主要呈黑色、绿色，在白云母伟晶岩和电气石钠长石伟晶岩中多为黑色晶体；在锂辉石伟晶岩中多呈黑色-墨蓝色、墨绿色，部分锂辉石伟晶岩中可见中心为褐色、边缘为绿色的双色环带的锂电气石。

电气石的电子探针分析结果显示（梁婷等，2022），花岗岩、伟晶岩及围岩中电气石总体上为电气石族中的黑电气石-镁电气石系列。康西瓦矿区绿柱石白云母伟晶岩和石榴子石电气石白云母伟晶岩中的电气石成分与其围岩（二云母石英片岩）、黑云母二长花岗岩相似，偏向镁电气石端员，具有较高的 Mg/(Mg+Fe) 比值。大红柳滩-509 道班西一带的石榴子石电气石伟晶岩、电气石钠长石伟晶岩、锂辉石伟晶岩和石榴子石电气石二云母二长花岗岩中的电气石偏向黑电气石端员。锂辉石伟晶岩中的黑电气石 Mg/(Mg+Fe) 比值极低，与其围岩（二云母石英片岩）有显著差别，无明显矿化的电气石钠长石伟晶岩中的电气石 Mg/(Mg+Fe) 比值介于锂辉石伟晶岩和石榴子石电气石二云母二长花岗岩之间。同时，两类花岗岩中电气石的成分也有所差异，黑云母二长花岗岩中的电气石比石榴子石电气石二云母二长花岗岩中的电气石 Mg/(Mg+Fe) 比值更高（图 9）。

4.4 Li 同位素特征

西昆仑东段花岗岩、伟晶岩和围岩的全岩 $\delta^7\text{Li}$ 值分布特征见图 10。康西瓦白云母伟晶岩的 Li 含量极低（ $4.97\times 10^{-6}\sim 26.71\times 10^{-6}$ ）， $\delta^7\text{Li}$ 值（2‰~25.07‰，平均值为 9.62‰）与样品中白云母的含量呈正相关（梁婷等，2022）。大红柳滩 90 号脉锂辉石伟晶岩（1.97‰~4.63‰，丁坤等，2020）、白龙山贫锂伟晶岩（2.00‰~4.90‰，Fan et al., 2020）和石榴子石电气石二云母二长花岗岩（0.76‰~4.10‰）具有一致的 $\delta^7\text{Li}$ 值， $\delta^7\text{Li}$ 值与 Li 含量相关性不大，可能反映源区的组成（图 10）。白龙山富锂伟晶岩具有相对低的 $\delta^7\text{Li}$ 值（-1.9‰~0.8‰），认为其形成于熔体-流体分离中的富水贫硅酸盐的熔体（超临界流体）体系（Fan et al., 2020），侵入后高冷却速率下形成（Zhou et al., 2021）。锂辉石伟晶岩脉的围岩具有较高的 $\delta^7\text{Li}$ 值（5.28‰~5.48‰）可能与伟晶岩侵入后的锂同位素扩散分馏有关（Wunder et al., 2007; Teng et al., 2006）。大红柳滩 90 号脉锂辉石伟晶岩的锂同位素特征（ $\delta^7\text{Li}$ 值为 1.97‰~4.63‰）与东段白龙山富锂伟晶岩（ $\delta^7\text{Li}$ 值为 -1.9‰~0.8‰）明显不同，可能与 90 号脉伟晶岩富集磷铁锂矿有关（局部含量达 10%~15%，凤永刚等，2019）。在一定的物理化学条件下，花岗岩浆的不混溶作用可以分离出共轭的富挥发分、贫硅熔体和贫挥发分、富硅熔体（Veksler, 2004; 李建康等，2007），且锂同位素在地幔分异和地壳深熔作用过程中不发生明显的分馏（Tomascak et al., 1999; Magna et al., 2010）。因此，综合伟晶岩与二云母二长花岗岩（包括石

榴石电气石二云母二长花岗岩) 密切的空间关系和相近的成岩时代, 矿物地球化学的演化关系以及锂同位素特征, 初步认为伟晶岩的形成与花岗岩浆的不混溶作用有关, F、P 等挥发分组分在富锂伟晶岩的成矿过程中起关键作用 (Barnes et al., 2012)。

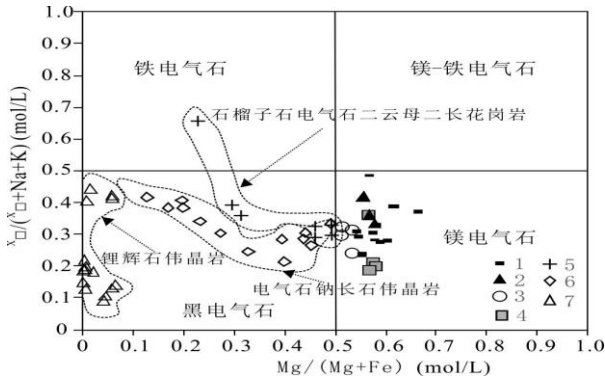


图 9 大红柳滩地区花岗岩、伟晶岩及围岩中电气石的 X 空位与 Mg 摩尔分数分类图 (据梁婷等, 2022)
 1. 康西瓦岩群二云母石英片岩; 2. 康西瓦矿区白云母伟晶岩; 3. 康西瓦矿区绿柱石白云母伟晶岩; 4. 黑云母二长花岗岩; 5. 榴石电气石二云母二长花岗岩; 6. 大红柳滩矿区电气石钠长石伟晶岩; 7. 大红柳滩矿区锂辉石伟晶岩

Fig.9 Composition diagram of tourmaline X vacancy and Mg mole fraction from granite、pegmatite and country rock in the Dahongliutan area(after Liang et al., 2022)

1. Two-mica quartz schist of Kangxiwa Group; 2. Muscovite pegmatite in Kangxiwa mining area; 3. Beryl muscovite pegmatite in Kangxiwa mining area ; 4. Biotite monzogranite; 5. Garnet, tourmaline-bearing two-mica monzogranite; 6. Tourmaline albite pegmatite in Dahongliutan mining area; 7. Spodumene pegmatite in Dahongliutan mining area

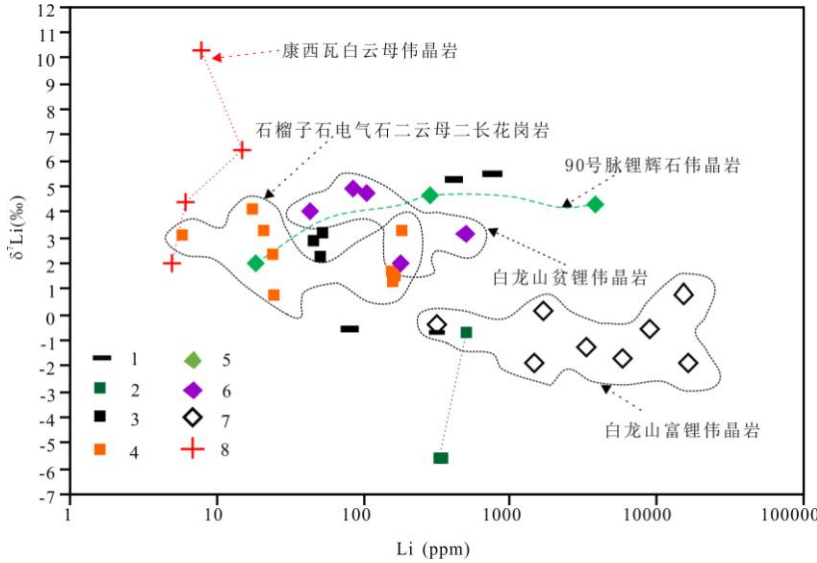


图 10 西昆仑东段不同地质体 $\delta^7\text{Li}$ 变化图解 (数据引自丁坤等 2020; Fan et al., 2020; Zhou et al., 2021; 梁婷等, 2022)
 1. 巴颜喀拉山群; 2. 石英闪长岩; 3. 黑云母二长花岗岩; 4. 榴石电气石二云母二长花岗岩; 5. 90 号脉锂辉石伟晶岩; 6. 白龙山贫锂伟晶岩; 7. 白龙山富锂伟晶岩; 8. 康西瓦矿区白云母伟晶岩

Fig. 10 Discriminant diagram of $\delta^7\text{Li}$ for Different geological body in eastern part of the West Kunlun Orogenic Belt, Xinjiang ($\delta^7\text{Li}$ values after Ding et al., 2020; Fan et al., 2020; Zhou et al., 2021; Liang et al., 2022)

1. Bayankalashan Group; 2. Quartz diorite; 3. Biotite monzogranite; 4. Garnet, tourmaline-bearing two-mica monzogranite; 5. No.90 spodumene pegmatite; 6. Bailongshan lithium-poor pegmatite; 7. Bailongshan Li-rich pegmatite; 8. Muscovite pegmatite in Kangxiwa mining area

5 找矿前景分析

西昆仑东段大红柳滩复式岩体与伟晶岩具有密切的时空关系，围绕大红柳滩复式岩体分布有康西瓦铍矿化区、大红柳滩锂铍矿化区和 509 道班西锂矿化区。复式岩体在不同矿化区具有不同的岩性组合，形成了差异性的稀有金属矿化规律，总体上表现为西段富铍东段富锂的成矿特点。在康西瓦铍矿化区出露似斑状黑云母花岗岩和中细粒黑云母花岗岩，伟晶岩分布在黑云母花岗岩和康西瓦岩群中，其中 1 号含铍伟晶岩脉处于最远端，伟晶岩的矿物地球化学和锂同位素特征与东部锂铍稀有金属伟晶岩显著不同，其成岩成矿机制需进一步研究。在大红柳滩锂铍矿化区内主要出露黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩（局部为石榴子石电气石二云母二长花岗岩），后者与伟晶岩空间关系最为密切，特别是石榴子石电气石二云母二长花岗岩的边缘发育伟晶岩异常体，向远端存在微斜长石型、白云母型和锂辉石型伟晶岩的分带，已发现 90、91、93 号锂辉石伟晶岩脉群。在 509 道班西矿化区出露石英闪长岩、黑云母二长花岗岩和石榴子石电气石二云母二长花岗岩，以石榴子石电气石二云母二长花岗岩为中心向远端可以划分微斜长石型、白云母型和锂辉石型伟晶岩结构分带，已发现 I、II、IV、VI 锂辉石伟晶岩脉群，探获储量达到百万吨。从大红柳滩和 509 道班西两个矿区锂铍稀有金属伟晶岩的空间分布来看，两个矿化区分别位于复式岩体侵末端两个分支边缘，锂辉石型伟晶岩主要分布在距离晚期侵入的二云母二长花岗岩（石榴子石电气石二云母二长花岗岩）边部 1-2km 范围内。因此，大红柳滩复式岩体侵末端的分支延伸方向，同时发育晚期侵入的二云母二长花岗岩，特别是石榴子石电气石二云母二长花岗岩的外围是稀有金属矿化成矿的有利区段，应加强已知矿区稀有金属矿化伟晶岩的深部、覆盖区，以及阿克塔斯锂矿的外围、509 道班至泉水沟一带的找矿勘查。可以通过伟晶岩中的石榴子石、电气石的矿物地球化学分类和锂同位素的 $\delta^7\text{Li}$ 值评判锂铍稀有金属矿化伟晶岩的识别指标。

6 结论

通过对西昆仑造山带东段印支期岩浆活动的时代、岩性变化、岩石地球化学、Hf、Nd、Li 同位素地球化学等成果的综合分析，得出如下认识：

(1) 西昆仑东段印支期岩浆活动与伟晶岩具有密切的时空关系。先后侵入的闪长岩、石英闪长岩、黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩（包括石榴子石电气石二云母二长花岗岩）有可能来自不同的岩浆源区，晚期侵入的二云母二长花岗岩与稀有金属矿化伟晶岩关系最为密切。

(2) 石榴子石和电气石的矿物地球化学、全岩 Li 同位素特征均指示伟晶岩与石榴子石电气石二云母二长花岗岩具有密切的亲缘关系。伟晶岩的形成可能与花岗岩浆的不混溶作用有关，F、P 等挥发分元素对锂铍稀有金属成矿起关键作用。

(3) 副矿物石榴子石、电气石的矿物地球化学和 Li 同位素特征可以作为锂矿化伟晶岩的辅助判别标志。下一步应加强大红柳滩复式岩体侵末端的分支延伸方向，阿克塔斯以东和 509 道班至泉水沟一带的找矿勘查工作。

References

- Baldwin J R and Knorring O V. 1983. Compositional range of Mn-Garnet in zoned granitic pegmatites[J]. *Canadian Mineralogist*, 21:638-688.
- Barnes E M, Weis D and Groat L A. 2012. Significant Li isotope fractionation in geochemically evolved rare element-bearing pegmatites from the Little Nahanni Pegmatite Group, NWT, Canada[J]. *Lithos*, 132-133: 21-36.
- Bian Xiaowei, Cui Jiantang, Wang Juchuan, Zhu Haiping, Zeng Zhicheng, Zhang Ruoyu, Ren Juangang. 2015. Redefinition of the Kangxiwa group in South Kangxiwa area of west Kunlun and its geological significance[J]. *Northwestern Geology*, 48(3):31-38(in Chinese with English abstract).
- Černý P and Ercit T S. 2005. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. *The Mineralogist*, 43(6):2005-2026.

- Černý P and Lenton P G. 1995. The buck and Pegli lithium deposits, southeastern Manitoba: The problem of up dip fractionation in subhorizontal pegmatite sheets[J]. *Economic Geology*, 90(3):658-675.
- Černý P. 1992. Geochemical and petrogenetic features of mineralization in rare-element granitic pegmatites in the light of current research[J]. *Applied Geochemistry*, 7(5):393-416.
- Chappell B W and White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later[J]. *Aust. J. Earth Sci.* 48, 489-499.
- Chen Mou, Wang He, Zhang Xiaoyu, Yan Qinghe, Gao Hao. 2022. Judgment of metallogenic potential of Kangxiwa pegmatite in Xinjiang: Evidence from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Lu-Hf isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(07):2095-2112(in Chinese with English abstract).
- Ding Kun, Liang Ting, Feng Yonggang, Zhang Ze, Ding Liang, Li Kan. 2020. Petrogenesis of Dahongliutan biotite monzogranite in western Kunlun orogen evidence from zircon U-Pb age and Li-Hf isotope[J]. *Northwestern Geology*, 53(01): 24-34(in Chinese with english abstract).
- Ding Kun, Liang Ting, Yang Xiuqing, Zhou Yi, Feng Yonggang, Li Kan, Teng Jiabin, Wang Ruiting. 2019. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of Dahongliutan pluton in Western Kunlun orogenic belt, NW China[J]. *J. Cent. South Univ.*, 26: 3420-3435.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids. A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos* 26, 115-134.
- Fan Jianqiang, Li Chao, Ma Zhimin, Xu Shuyi. 2020. Geologic feature and prospecting potential of Kangxiwa-Hongqiqiao Pb-Zn polymetallic ore in Hetian County, Xinjiang[J]. *Nonferrous metals of Xinjiang*, 6:40-44(in Chinese with English abstract).
- Fan Jingjing, Tang Gongjian, Wei Gangjian, Wang He, Xu Yigang, Wang Qiang, Zhou Jinsheng, Zhang Zhuoying, Huang Tongyu, Wang Zilong. 2020. Lithium isotope fractionation during fluid exsolution: Implications for Li mineralization of the Bailongshan pegmatites in the West Kunlun, NW Tibet[J]. *Lithos*, (352-353): 1-17.
- Feng Yonggang, Wang Yiqian, Zhang Ze, Liang Ting, Zhou Yi, Gao Jinggang, Teng Jiabin. 2019. Geochemistry of triphylite in Dahongliutan lithium pegmatites, Xinjinag: implications for pegmatite evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6):1405-1421.
- Geisler T, Schaltegger U, Tomaschek F. 2007. Re-equilibration of zircon in aqueous fluids and melts[J]. *Elements*, 3(1):43-50.
- Geisler T, Pidgeon RT, Kurtz R, Van Bronswijk W, Schleicher H. 2003. Experimental hydrothermal alteration of partially metamict zircon[J]. *American Mineralogist*, 88:1496-1513.
- Jahns R H and Burnham C W. 1969. Experimental studies of pegmatite genesis:I.A model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites[J]. *Econ.Geol.*, 64: 843-864.
- Jäger E. 1979. Introduction to geochronology[M]/Jäger E and Hunziker H. Lectures in isotope geology. Berlin: Springer-Verlag, 56-76.
- Li Jiankang, Wang Denghong, Zhang Dehui, Fu Xiaofang. 2007. Mineralization mechanism and continental tectonics of pegmatite type deposits in Western Sichuan, China[M]. Beijing: Atomic Energy Press(in Chinese).
- Li Kan, Gao Yongbao, Teng Jiabin, Jin Moushun, Li Wei. 2019. Metallogenic geological characteristics, mineralization age and resource potential of granite-pegmatite-type rare metal deposits in Dahongliutan are, Hetian county, Xinjiang[J]. *Northwestern geology*, 52(04): 206-221(in Chinese with English abstract).
- Li Hang, Hong Tao, Yang Zhiqun, Chen Jianzhong, Ke Qiang, Wang Xuehai, Niu Lei, Xu Xingwang. 2020. Comparative studying on zircon, cassiterite and coltan U-Pb dating and $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ dating of muscovite rare-metal granitic pegmatites: A case study of the northern Tugeman lithium-beryllium deposit in the middle of Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(9) : 2869-2892(in Chinese with English abstract).
- Li Peng, Li Jiankang, Chou Iming, Wang Denghong, Xiong Xin. 2019. Mineralization Epochs of Granitic Rare-Metal Pegmatite Deposits in the Songpan–Ganzê Orogenic Belt and Their Implications for Orogeny[J]. *Minerals*, 9(5):280.
- Li Yong, Wang Wei, Du Xiaofei, Chen Zhengle, Ma Huadong, Qiu Lin, Liu Wei, Zhang Yafang, Huo Hailong. 2022. $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ dating of muscovite of pegmatite type rare metal deposit in western 509 Daoban, Dahongliutan, West Kunlun and its limitation to regional mineralization[J]. *Geology in China*, 1-6(in Chinese with English abstract).
- Liang Ting, Teng Jiabin, Wang Denghong. 2022. Lithium beryllium Rare Metallic Deposits of the Dahongliutan in Xinjiang, China[M]. Geological Publishing House: Beijing, China, p. 284(In Chinese).
- London D, Cerny P, Loomis J L and Pan J J. 1990. Phosphorus in alkali feldspars of rare-element granitic pegmatites[J]. *Can. Mineral*, 28: 771-786.
- London D. 1992. The application of experimental petrology to the genesis and crystallization of granitic pegmatites[J]. *The Canadian Mineralogist*, 30(3): 499-540.
- London D. 2008. Pegmatites[M]. *Can. Mineral. Spec. Pub.* 10:188 -189.
- London D. 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites[J]. *Ore Geology Reviews*, 101:349-383.
- Magna T, Janoušek V, Kohút M, Oberli F and Wiechert U. 2010. Fingerprinting sources of orogenic plutonic rocks from Variscan belt with lithium isotopes and possible link to subduction-related origin of some A-type granites[J]. *Chemical Geology*, 274: 94–107
- Müller A, Spratt J, Thomas R, Williamson B J and Seltmann R. 2018. Alkali-F-rich Albite zones in Evolve NYF pegmatites: The product of melt -melt immiscibility[J]. *The Canadian Mineralogist*, 56(4): 657-687.
- Norton J J. 1983. Sequence of mineral assemblages in differentiated granitic pegmatites[J]. *Economic Geology*, 78: 854-874.
- Parrish R R. 1990. U-Pb dating of monazite and its application to geological problems[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*,

27(11):1431-1450.

- Qiao Gengbiao, Zhang Hande, Wu Yuezhong, Jin Moushun, Du Wei, Zhao Xiaojian, Chen Denghui. 2015. Petrogenesis of the Dahongliutan Monzogranite in western Kunlun: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2830-2846(in Chinese with English abstract).
- Qiao Gengbiao, Wu Yuezhong, Liu Tuo. 2020. Formation age of the Dahongliutan pegmatite type rare metal deposit in Western Kunlun Mountains: Evidence from muscovite $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ isotopic dating[J]. *Geology in China*, 47(5):1591-1593(in Chinese with English abstract).
- Selway J B, Breaks F W and Tindle A G. 2005. A review of rare-element (Li-Cs-Ta) Pegmatite exploration techniques for the Superior Province, Canada, and large worldwide tantalum deposits Explor[J]. *Min. Geol.*, 14: 1-30.
- Tan Kebin, Guo Qiming, Guo Yongming. 2021. Tectonic significance and U-Pb age of granite in 509 Daoban Li-Be deposit, Xinjiang[J]. *Xinjiang non-ferrous metals*, 44(02): 6-10(in Chinese with English abstract).
- Tang Junlin, Ke Qiang, Xu Xingwang, Kang Kai, Li Hang, Tan Kebin, Dong Lianhui, Liu Yangxun. 2022. Magma evolution and mineralization of Longmenshan lithium-beryllium pegmatite in Dahongliutan area, West Kunlun[J]. *Acta Petrologica sinica*, 38(3): 655-675(in Chinese with English abstract).
- Teng Fangzhen, McDonough W F, Rudnick R L and Walker R J. 2006. Diffusion-driven extreme lithium isotopic fractionation in country rocks of the Tin Mountain pegmatite[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.* 243: 701-710.
- Tomascak P B, Tera F, Helz R T and Walker R J. 1999. The absence of lithium isotope fractionation during basalt differentiation: new measurements by multicollector sector ICP-MS[J]. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 63: 907-910.
- Veksler I V. 2004. Liquid immiscibility and its role at the magmatic-hydrothermal transition: A summary of experimental studies[J]. *Chemical Geology*, 210(14): 7-31.
- Vervoort J D, Patchett P J, Blichert-Toft J and Albarede F. 1999. Relationships between Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systems in the global sedimentary system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 168: 79-99.
- Wang Denghong, Liu Lijun, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, Hou Jianglong, Wu Xishun. 2017. Discussion on particularity and prospecting direction of large and super-large spodumene deposits[J]. *Earth Science*, 42(12):2243-2257(in Chinese with English abstract).
- Wang He, Gao Hao, Zhang Xiaoyu, Yan Qinghe, Xu Yigang, Zhou Kailin, Dong Rui and Li Pei. 2020. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li-Rb-(Be) rare metal pegmatite deposit, West Kunlun orogenic belt, NW China[J]. *Lithos*, doi: 10.1016/j.lithos.2020.105449.
- Wang He, Li Pei, Ma Huadong, Zhu Bingyu, Qiu Lin, Zhang Xiaoyu, Dong Rui, Zhou Kailin, Wang Min, Wang Qian, Yan Qinghe, Wei Xiaopeng, He Bin, Lu Hong, Gao Hao. 2017. Discovery of the Bailongshan Superlarge Lithium-Rubidium Deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang, and its Prospecting Implication[J]. *Geotectonica et metallogenia*, 41(06): 1053-1062(in Chinese with English abstract).
- Wei Xiaopeng, Wang He, Hu Jun, Mu Shenglu, Qiu Zengwang, Yan Qinghe, Li Pei. 2017. Geochemistry and geochronology of the Dahongliutan two-mica granite pluton in western Kunlun orogen: Geotectonic implications[J]. *Geochimica*, 46(01): 66-80(in Chinese with English abstract).
- Wei Xiaopeng, Wang He, Zhang Xiaoyu, Dong Rui, Zhu Shibo, Xing Chunhui, Li Pei, Yan Qinghe, Zhou Kailin. 2018. Petrogenesis of Triassic high-Mg diorites in western Kunlun orogen and its tectonic implication[J]. *Geochimica*, 47(04): 363-379(in Chinese with English abstract).
- Whitworth M P and Feely M. 1994. The compositional range of magmatic Mn-garnets in the Galway granite, Connemara, Ireland[J]. *Mineralogical Magazine*, 58:163-168.
- Wunder B, Meixner A, Romer R L, Feenstra A, Schettler G and Heinrich W. 2007. Lithium isotope fractionation between Li-bearing staurolite, Li mica and aqueous fluids: an experimental study[J]. *Chem. Geol.*, 238: 277-290.
- Yan Qinghe, Qiu Zengwang, Wang He, Wang Min, Wei Xiaopeng, Li Pei, Zhang Rongqing, Li Congying, Liu Jianping. 2018. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, West Kunlun, Xinjiang (NW China): Constraints from LA-ICP-MS U-Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite[J]. *Ore Geology Reviews*, 100:561-573.
- Yan Qinghe, Wang He, Chi Guoxiang, Wang Qiang, Hu H, Zhou Kailin, Zhang Xiaoyu. 2022. Recognition of A 600km long late triassic rare metal(Li-Rb-Be-Nb-Ta) pegmatite belt in the western Kunlun orogenic belt, Western China[J]. *Economic Geology*, 117(1): 213-236.
- Zhang Hui, Lü Zhenghang, Tang Yong. 2019. Metallogeny and prospecting model as well as prospecting direction of pegmatite-type rare metal ore deposits in alay orogenic belt, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 792-814 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ze, Liang Ting, Feng Yonggang, Yang Xiuqing, Li Kan, Ding Kun, Wang Yiqian. 2019. Geological feature and chronology study of Kangxiwar Beryl-bearing muscovite pegmatite in West Kunlun Orogen, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 52(1):74-87(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jingsheng, Wang Qiang, Xu Yigang, Cempirk Jan, Wang He, Ma Jinlong, Wei Ggangjian, Huang Tongyu, Zhu Guan hong, Zhang Le. 2021. Geochronology, petrology, and lithium isotope geochemistry of the Bailongshan granite-pegmatite system, northern Tibet: Implications for the ore-forming potential of pegmatites[J]. *Chemical Geology*, 584: 1-13.
- Zou Tianren and Li Qingchang. 2006. Rare and Rare Earth Metallic Deposits in Xinjiang, China[M]. Geological Publishing House: Beijing, China, p. 284(In Chinese).

附中文参考文献

- 边小卫, 崔建堂, 王炬川, 朱海平, 曾志诚, 张若愚, 任娟刚. 2015. 西昆仑康西瓦南一带康西瓦岩群的厘定及其地质意义[J]. 西北地质, 48(3):31-38.
- 陈谋, 王核, 张晓宇, 闫庆贺, 高昊. 2022. 新疆康西瓦伟晶岩的成矿潜力判断: 来自锆石 U-Pb 年代学、地球化学与 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 38(07):2095-2112.
- 丁坤, 梁婷, 周义, 凤永刚, 张泽, 丁亮, 李侃. 2020. 西昆仑大红柳滩黑云母二长花岗岩岩石成因: 来自锆石 U-Pb 年龄及 Li-Hf 同位素的证据[J]. 西北地质, 53(01): 24-34.
- 范建强, 李超, 麻志敏, 徐水易. 2020. 新疆和田县康西瓦-红旗桥一带银铅锌多金属矿成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 新疆有色金属, 6:40-44.
- 凤永刚, 王艺茜, 张泽, 梁婷, 周义, 高景刚, 滕家欣. 2019. 新疆大红柳滩伟晶岩型锂矿床中磷铁锂矿地球化学特征及其对伟晶岩演化的指示意义[J]. 地质学报, 93(6):1405-1421.
- 李建康, 王登红, 张德会, 付小方. 2007. 甲基卡式伟晶岩型矿床的形成机制及大陆动力学背景[M]. 北京: 原子能出版社.
- 李侃, 高永宝, 滕家欣, 金谋顺, 李伟. 2019. 新疆和田县大红柳滩一带伟晶岩型稀有金属矿成矿地质特征、成矿时代及找矿方向[J].西北地质, 52(04): 206-221.
- 李杭, 洪涛, 杨智全, 陈建中, 柯强, 王学海, 牛磊, 徐兴旺. 2019. 稀有金属伟晶岩锆石、锡石与铌钽铁矿 U-Pb 和白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年对比研究-以阿尔金中段吐格曼北锂铍矿床为例[J]. 岩石学报, 36(9): 2869-2892.
- 李永, 王威, 杜晓飞, 陈正乐, 马华东, 邱林, 刘伟, 张雅芳, 霍海龙. 2022. 西昆仑大红柳滩 509 道班西伟晶岩型稀有金属矿白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其对区域成矿的限定[J]. 中国地质, 1-6.
- 梁婷, 滕家欣, 王登红. 2022. 新疆大红柳滩锂铍稀有金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1-262.
- 乔耿彪, 张汉德, 伍跃中, 金谋顺, 杜玮, 赵晓健, 陈登辉. 2015. 西昆仑大红柳滩岩体地质和地球化学特征及对岩石成因的制约[J]. 地质学报, 89(07): 1180-1194.
- 乔耿彪, 伍跃中, 刘拓. 2020. 西昆仑大红柳滩伟晶岩型稀有金属矿的形成时代: 来自白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄的证据[J]. 中国地质, 47(5):1591-1593.
- 谭克彬, 郭岐明, 郭勇明. 2021. 新疆和田 509 道班西锂铍多金属矿床花岗岩 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 新疆有色金属, 44(02): 6-10.
- 唐俊林, 柯强, 徐兴旺, 康凯, 李杭, 谭克彬, 董连慧, 刘洋旭. 2022. 西昆仑大红柳滩地区龙门山锂铍伟晶岩区岩浆演化与成矿作用[J]. 岩石学报, 38(3): 655-675
- 王登红, 刘丽君, 戴鸿章, 刘善宝, 侯江龙, 吴西顺. 2017. 试论国内外大型超大型锂辉石矿床的特殊性与找矿方向[J]. 地球科学, 42(12):2243-2257.
- 王核, 李沛, 马华东, 朱炳玉, 邱林, 张晓宇, 董瑞, 周楷麟, 王敏, 王茜, 闫庆贺, 魏小鹏, 何斌, 卢鸿, 高昊. 2017. 新疆和田县 509 道班西(白龙山)超大型伟晶岩型锂铍多金属矿床的发现及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 41(06): 1053-1062.
- 魏小鹏, 王核, 胡军, 慕生禄, 丘增旺, 闫庆贺, 李沛. 2017. 西昆仑大红柳滩二云母花岗岩地球化学和地质年代学研究及其地质意义[J]. 地球化学, 46(01): 66-80.
- 魏小鹏, 王核, 张晓宇, 董瑞, 朱世波, 邢春辉, 李沛, 闫庆贺, 周楷麟. 2018. 西昆仑东部晚三叠世高镁闪长岩的成因及其地质意义[J]. 地球化学, 47(04): 363-379.
- 张辉, 吕正航, 唐勇. 2019. 新疆阿尔泰造山带中伟晶岩型稀有金属矿床成矿规律、找矿模型及其找矿方向[M]. 矿床地质, 38(4): 792-814.
- 张泽, 梁婷, 凤永刚, 杨秀清, 李侃, 丁坤, 王艺茜. 2019. 新疆西昆仑造山带康西瓦含绿柱石白云母伟晶岩的地质特征与年代学研究[J]. 西北地质, 52(1):74-87.
- 邹天人和李庆昌. 2006. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 34-51.