

西昆仑-喀喇昆仑造山带锂矿成矿特征 与成矿规律初探

王核^{1,2,3,4)}, 王堃宇^{1,2)}, 高昊^{1,2)}, 魏小鹏^{1,2)}, 龙雨兵^{1,2)}, 黄亮^{1,2)},
张晓宇^{1,2)}, 张嵩^{1,2)}, 蔡铭泽^{1,2)}, 沈明宏^{1,2)}

- 1) 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州, 510640; 2) 中国科学院大学, 北京, 100049;
3) 新疆自然资源与生态环境研究中心, 新疆乌鲁木齐, 830000;
4) 中国科学院地球化学研究所, 贵州贵阳, 550002

内容提要:西昆仑-喀喇昆仑造山带中生代花岗伟晶岩相当发育, 主要分布于麻扎-康西瓦缝合带以南的喀喇昆仑造山带, 构成了西自木吉-塔什库尔干, 东到大红柳滩长达 600 km 的喀喇昆仑稀有金属成矿带。通过多年的研究, 本文对西昆仑-喀喇昆仑造山带 37 处稀有金属矿床(点)进行了全面系统的梳理, 认为喀喇昆仑-喀喇昆仑造山带表现为“西东东锂”的格局, 稀有金属成矿年龄集中 213~206 Ma。将喀喇昆仑造山带稀有金属成矿带划分为木吉-塔什库尔干稀有金属成矿亚带、赛图拉-大红柳滩稀有金属成矿亚带, 从西向东可划定 4 个矿化集中区: 木吉-布伦口稀有金属集中区、塔什库尔干-塔吐鲁沟稀有金属矿化集中区、康西瓦稀有金属矿化集中区、大红柳滩-白龙山稀有金属矿化集中区。同时, 认为西昆仑-喀喇昆仑造山带西段下一阶段的找矿可放在西合休南锂铍找矿远景区、阿然保泰铍找矿远景区、木吉西锂铍找矿远景区。

关键词:西昆仑-喀喇昆仑造山带; 锂等稀有金属; 成矿特征; 成矿规律

新能源产业是新质生产力的重要组成部分, 也是支撑和推动国家新质生产力形成的能源资源基础。随着国家能源绿色低碳转型和“碳达峰和碳中和”国家重大战略目标的逐步推进, 国家对低碳能源和可控核聚变技术产品的需求达到了前所未有的高度(王核等, 2023)。作为一种紧缺战略性关键金属矿产资源, 锂(Li)具有优异的储能功能, 在动力电池、航空航天燃料等领域发挥了关键作用(李健康等, 2014; Li Jiankang et al., 2015; 刘丽君等, 2017; 许志琴等, 2018, 2021; 翟明国等, 2019); 同时, Li 还具有极其重要的生能功能, 是可控核聚变技术不可或缺的物质基础(王登红等, 2018)。因此, Li 被称为 21 世纪的“绿色能源金属”和“白色石油”, 已成为保障我国新能源高质量发展的核心战略金属资源。

近年来, 在西昆仑-喀喇昆仑造山带发现了一系列的伟晶岩型锂铍稀有金属矿床, 例如: 白龙山、雪凤岭、509 道班西、俘虏沟 1 号、霍什塔什等, 构成了长达 600 km 的西昆仑-喀喇昆仑稀有金属成矿带(王核等, 2017, 2020, 2023; 彭海练等, 2018; 李侃等, 2019; Wang He et al., 2020)。对西昆仑造山带锂矿的研究主要集中在伟晶岩与花岗岩的成岩成矿年代学及其岩浆演化分析(Yan Qinghe et al., 2018, 2022; Wang He et al., 2020; Zhou Jinsheng et al., 2021; 唐俊林等, 2022; 李永等, 2022; 王核等, 2023; 孔会磊等, 2023; Zhao Hui et al., 2024)、白龙山锂矿的矿物学、同位素示踪成矿过程(Xing Changming et al., 2020; Yin Rong et al., 2020; Fan Jingjing et al., 2020; Zhou Jinsheng et al., 2021; Zhang Xiaoyu et al., 2022)、成矿后构造变形分析

注: 本文为中国科学院战略性先导专项(编号 XDA0430102)、第二次青藏高原综合科学考察项目(编号 2019QZKK0802)联合资助的成果。
收稿日期: 2024-05-07; 改回日期: 2024-05-15; 网络发表日期: 2024-05-29; 责任编辑: 蔡志慧。
作者简介: 王核, 男, 1966 年生。研究员, 博士生导师, 主要从事成矿预测方面研究。E-mail: wanghe@gig.ac.cn。

引用本文: 王核, 王堃宇, 高昊, 魏小鹏, 龙雨兵, 黄亮, 张晓宇, 张嵩, 蔡铭泽, 沈明宏. 2024. 西昆仑-喀喇昆仑造山带锂矿成矿特征与成矿规律初探. 地质学报, 98(5): 1421~1439, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024215.
Wang He, Wang Kunyu, Gao Hao, Wei Xiaopeng, Long Yubing, Huang Liang, Zhang Xiaoyu, Zhang Song, Cai Mingze, Shen Minghong. 2024. Geological characteristics and metallogenic regularity of the lithium deposit in West Kunlun-Karakoram orogenic belts, Xinjiang. Acta Geologica Sinica, 98(5): 1421~1439.

(霍海龙等, 2024) 及成矿规律初步分析(王核等, 2023) 等方面, 但对整个在西昆仑-喀喇昆仑造山带的锂等稀有金属成矿特征和成矿规律研究十分薄弱, 影响了下一步找矿的部署, 亟需加强锂稀有金属成矿规律和预测方面的研究。本文对西昆仑-喀喇昆仑造山带的主要矿集区的成矿特征、成矿时空分布规律进行了研究, 并探讨了锂等稀有金属矿床的找矿方向。

1 成矿地质背景

西昆仑-喀喇昆仑造山带位于青藏高原西北缘, 是古亚洲构造域和古特提斯构造域的交汇部位(潘裕生, 1994; Pan Yusheng et al., 1996; 潘裕生等, 2000; 姜春发等, 2000; Xiao Wenjiao et al., 2002, 2003; 计文化等, 2004, 2011; Jiang Yaohui et al., 2013; Zhang Chuanlin et al., 2018), 以麻扎-康西瓦缝合带为界, 北为西昆仑造山带, 南为喀喇昆仑造山带。西昆仑造山带包括北昆仑地体、南昆仑地体, 喀喇昆仑造山带由甜水海地体和喀喇昆仑地体组成(Yan Qinghe et al., 2018, 2022; 张传林等, 2019; Wang He et al., 2020; 吴福元等, 2020)。西昆仑-喀喇昆仑造山带经历了完整的原特提斯到古特提斯构造演化(Yuan Chao et al., 2005; Xiao Wenjiao et al., 2005; Wang Jian et al., 2017), 期间发育了元古宙、早古生代、晚古生代、三叠纪、侏罗纪—白垩纪以及新生代 6 个岩浆侵入期, 花岗岩类是主要岩性, 大多是加里东期、印支期和燕山期的, 其中, 三叠纪是西昆仑造山带构造岩浆活动的发育阶段, 在西昆仑-喀喇昆仑造山带形成了一条西起帕米尔高原, 东到奇台达坂连续的花岗岩带, 绵延数百千米, 侵位时间主要集中在中—晚三叠世(234~210 Ma), 广泛发育 I 型花岗岩, 并有少量的同期 S 型花岗岩和高镁闪长岩(Jiang Yaohui et al., 2013; 魏小鹏等, 2018; Yan Qinghe et al., 2022), 其中与稀有金属相关的 S 型花岗岩主要分布在木吉的木吉西岩体、卡拉瓦拉岩体和大红柳滩一带大红柳滩岩体、俘虏沟岩体(图 1)。

西昆仑-喀喇昆仑造山带中生代花岗伟晶岩相当发育, 主要分布于麻扎-康西瓦缝合带以南的喀喇昆仑造山带, 花岗伟晶岩中产出含白云母和锂铍(铌钽)稀有金属矿床。

西部的木吉—布伦口地区和塔什库尔干—塔吐鲁沟地区的稀有金属工作程度较低, 1961~1962 年新疆地质局喀什地质大队对木吉一带的肖尔布龙 3

号脉进行了初步检查, 发现了多达上千条伟晶岩脉, 其中含矿伟晶岩脉有 30 余条, 同时还在花岗岩中发现有铌钽矿化线索, 未对其进行评价; 1960~1961 年新疆地质局喀什地质大队对塔吐鲁沟的三素白云母矿进行评价, 提交储量白云母 7662 t, 氧化铍 13.73 t; 1964 年非金属公司 201 队对塔吐鲁沟的穹图卡依云母矿点进行了评价; 1967 新疆地矿局第二地质大队在塔什库尔干县热土坎的伟晶岩分布区进行了 1:5 万地质和矿产调查; 1980~1985 年新疆地勘局喀什地质二大队在西昆仑造山带开展 1:50 万地质调查, 对木吉—布伦口一带的霍什喀什锂矿、塔什库尔干一带的木林场白云母矿和三素锂矿等进行了调查。2015~2016 年, 新疆地矿局第二地质大队开展《新疆阿克陶县布伦口北铜、金、稀有金属矿调查评价报告》工作(新疆地矿局第二地质大队, 2018^①), 在肖尔布龙工区圈出 289 条伟晶岩脉, 对其中 82 条伟晶岩脉进行评价, 新发现两条含锂铍伟晶岩脉。2018~2021 年中国科学院广州地球化学研究所(2021)^②开展《和田南部喀喇昆仑稀有金属成矿带成矿规律研究》工作, 在木吉一带发现浪达坂铍矿。

东部的大红柳滩—白龙山稀有金属矿集区研究程度较高, 已发现 7000 多条伟晶岩。1958~1961 年新疆地勘局和田地质大队先后在大红柳滩一带进行了 1:5 万地质路线调查、1:2.5 万地质简测和 1/1 万地形地质测量, 在大红柳滩、阿克沙依沟、阿哈兰干均发现较多锂辉石伟晶岩脉; 1990~1993 年, 新疆地矿局第十地质大队(1994)^③编有《和田地区 1:50 万铜、金、宝石、稀有金属成矿预测报告》将康西瓦—大红柳滩一带划为稀有金属成矿带; 1996~1998 年, 新疆地矿局第十地质大队对大红柳滩 90 号、91 号锂辉石伟晶岩矿脉进行地表试开采; 2000 年新疆地矿局第十地质大队对 90、91、93 号锂辉石伟晶岩矿脉进行了选矿试验和伴生稀有元素分析; 2002~2003 年, 新疆地矿局第二区调队对大红柳滩一带的伟晶岩型铌钽矿进行了专项普查; 新疆有色矿业技术有限公司(2006)^④完成《新疆和田县大红柳滩锂辉石矿普查报告》, 获得 Li_2O 储量 2969 t, 2012 年, 山东冶金地勘局对大红柳滩锂辉石矿进行勘查工作, 探获资源量(Li_2O)8.77 万 t, 达到中型规模。2017 年以来在大红柳滩一带先后发现了白龙山超大型伟晶岩型锂多金属矿(王核等, 2017, 2021, 2023; Wang He et al., 2020)、509 道班西锂矿(彭海练等, 2018)、俘虏沟 1 号锂矿(李侃等, 2019)、

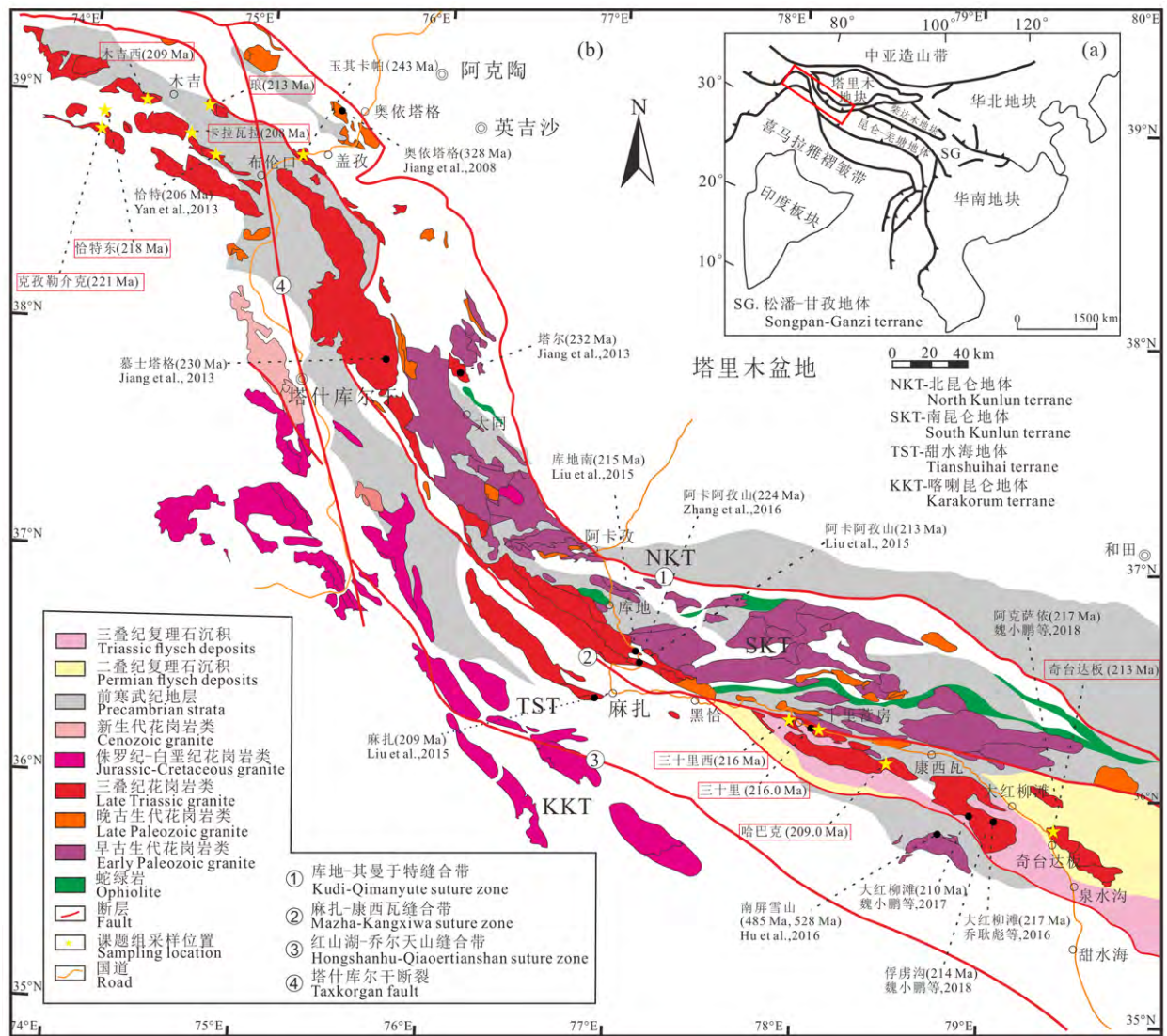


图 1 西昆仑造山带花岗岩时空分布图 (据魏小鹏等, 2018)

Fig. 1 Spatiotemporal distribution map of granite in the West Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China (after Wei Xiaopeng et al., 2018)

雪凤岭锂矿(王核等, 2020)、双牙-雪盆锂矿、冰舟锂矿、白龙山南锂矿、大红柳滩东锂矿(王核等, 2023)等。目前,新疆昆仑蓝钻矿业开发有限责任公司委托新疆有色地勘局矿产勘查研究院对白龙山—509道班西一带锂矿(509道班西探矿权)开展勘探,该探矿权内的一期和二期勘探获得 Li_2O 资源量已超过 120 万 t,已成为亚洲最大的单体锂矿床。

2 矿集区划分及其地质特征

2.1 矿化集中区划分

根据现有的矿床、矿点、矿化点(带)的地质特征(包括含矿地层岩性、构造、岩浆岩、变质作用、火山作用等)、含矿地层的构造属性、大地构造位置、区域

物化探特征(包括异常面积、展布方向、浓集中心、异常强度等)等进行综合分析、评价,同时也考虑到矿(化)带内已有矿床的规模因素,在喀喇昆仑造山带划分出木吉-塔什库尔干和赛图拉-大红柳滩 2 个稀有金属成矿亚带,4 个矿化集中区。

沿康西瓦大断裂控制的印支期花岗岩带,木吉-塔什库尔干稀有金属成矿亚带从西向东可划定木吉-布伦口稀有金属矿化集中区、塔什库尔干-塔吐鲁沟稀有金属矿化集中区;赛图拉-大红柳滩稀有金属成矿亚带可分为康西瓦稀有金属矿化集中区、大红柳滩-白龙山稀有金属矿化集中区(图 2)。其各个矿化集中区的地质特征如表 1。

本文共统计了 37 处稀有金属矿床(点),各矿床(点)主要地质特征见表 2。

表 1 研究区矿化集中区分布特征表

Table 1 Distribution characteristics of mineralization concentration areas in Karakoram, Xinjiang

成矿带	矿化集中区及编号	赋矿地层	成矿元素	典型矿床
木吉-塔什库 尔干稀有金 属成矿亚带	木吉-布伦口稀有金属矿化集中区(I-1)	古元古界布伦阔勒 岩群	Be、Li、Nb、Ta、 白云母	肖尔布龙 3 号脉锂铍矿点、霍什塔什锂铍 矿点
	塔什库尔干-塔吐鲁沟稀有金属 矿化集中区(I-2)	古元古界布伦阔勒 岩群	Be、Li、白云母	阿然保泰铍矿点、达布达尔绿柱石(祖母 绿)矿、牧林场白云母矿、三素铍-白云母矿
赛图拉-大红 柳滩稀有金 属成矿亚带	康西瓦稀有金属矿化集中区 (II-1)	古元古界康西瓦群	Be、白云母	康西瓦铍-白云母矿
	大红柳滩-白龙山稀有金属矿化 集中区(II-2)	三叠系巴颜喀拉群、 古元古界康西瓦群	Li、Be、Nb、Ta、 Rb、Sn、白云母	大红柳滩锂矿、白龙山锂矿、509 道班西锂 矿、龙门山锂矿

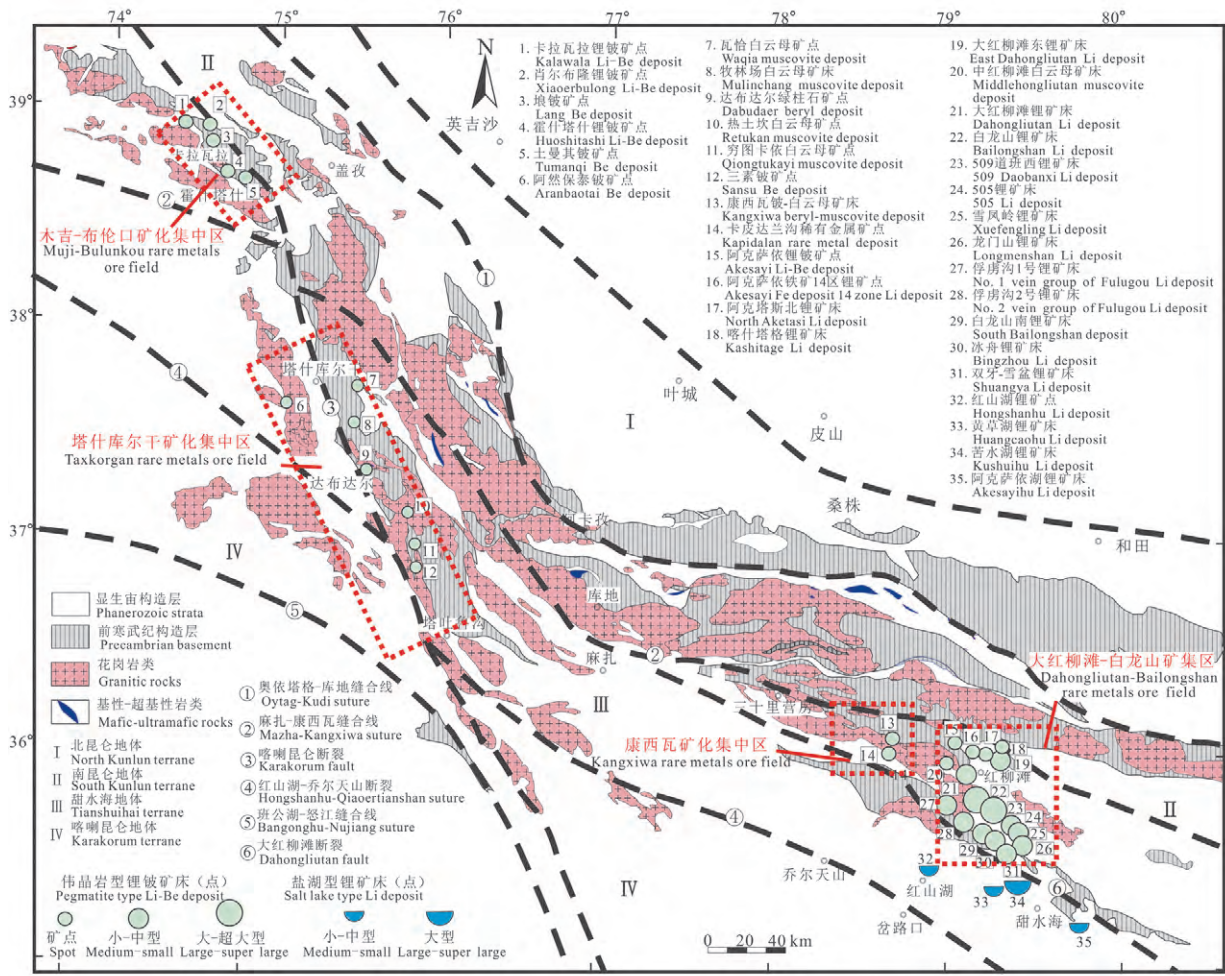


图 2 西昆仑构造单元划分与稀有金属分布图(据王核等, 2023)

Fig 2 Simplified geological map of the western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China (after Wang He et al., 2023)

2.2 木吉-布伦口稀有金属矿化集中区(I-1)

远景区处于帕米尔高原腹地,位于阿克陶县木吉乡东南至布伦口乡土曼其一带。地理坐标:东经 74°28'—74°55';北纬 38°43'—38°58';面积约 900 km²。矿区交通相对便利,由喀什沿 314 国道西南行至 160 km 到达布伦口乡,再往西行可达木吉乡。远景区内出露地层为古元古界布伦阔勒群(Pt₁B),

该套地层主要为一套中深变质碎屑岩建造,其岩性主要为黑云母石英片岩、石英岩、(红柱石、矽线石)云母片岩及斜长片岩等。总体呈北西-南东向展布,大体上北东部走向北西-南东向,发育有大量的伟晶岩脉,部分含有稀有金属矿产。矿集区南部中-酸性岩浆主要为印支期二长花岗岩及英云闪长岩体,西部为卡拉瓦拉二云母花岗岩,成岩年龄为 207.5

表 2 喀喇昆仑稀有金属矿床(点)一览表

Table 2 Summary table of the rare metal deposits (sites) in Karakoram, Xinjiang

成矿亚带	矿集区(矿化远景区)	编号	矿产名称	地质特征	成因类型, 规模	成矿年龄
木吉-塔什库勒干塔沟稀有金属成矿亚带	木吉-布伦口稀有金属矿化集中区	1	卡拉瓦拉稀有金属矿点	赋矿层位古元古界布伦阔勒岩群,由 10 号、11 号、12 号、13 号、2 号、6 号等矿脉组成,矿化弱,其中 2 号脉已开采(新疆地矿局第二地质大队,2018 ^①)	矿化点 伟晶岩型	205.0±1.2 Ma(本文,钨钼铁矿 U-Pb);204.6±0.7 Ma(本文;锆石 U-Pb)
		2	肖尔布隆 3 号脉钨矿点	赋矿层位古元古界布伦阔勒岩群,3 号含矿伟晶岩脉形状为透镜状,中部膨胀变大,脉长 42.5 m,宽 2.5~8.0 m,平均 5.9 m, Li ₂ O 一般在 1.58%~2.96%之间,大部分矿体已采空(新疆地矿局第二地质大队,2018 ^①)	矿点 伟晶岩型	204.7±1.8 Ma(王核等,2022;钨钼铁矿 U-Pb);204.8±0.7 Ma(王核等,2022;锆石 U-Pb)
		3	琅敏矿点	赋矿层位古元古界布伦阔勒岩群,见 1 条长 110 m,宽 3 m 的含绿柱石伟晶岩脉,伟晶岩脉中含绿柱石较普遍,拣块样 BeO 品位 0.24%(笔者 2019 年新发现)	矿点 伟晶岩型	206.7±1.0 Ma(本文;锆石 U-Pb)
		4	霍什塔什锂辉石矿	赋矿层位古元古界布伦阔勒岩群,含矿伟晶岩脉长约 64 m,平均约 6 m 左右,矿化主要为白云母、绿柱石、锂辉石等,BeO 平均品位 0.053%(新疆地矿局第二地质大队,2018 ^①)	矿点 伟晶岩型	205.7±2.7 Ma(Yan Qinghe et al.,2022;钨钼铁矿 U-Pb);205.0±1.2 Ma(本文;钨钼铁矿 U-Pb)
		5	土曼其敏矿点	赋矿层位古元古界布伦阔勒岩群,土曼其一带发现 3 条含绿柱石的伟晶岩脉,规模较大,一般长 300~500 m,宽 5~25 m,拣块样 BeO 品位 0.072%(笔者 2019 年新发现)	矿点 伟晶岩型	205.6±0.8 Ma(本文;锆石 U-Pb)
		6	阿然保泰敏矿点	赋矿层位古元古界布伦阔勒岩群,见石英-长石-白云母伟晶岩脉,含绿柱石,拣块样 BeO 品位 0.76%(笔者 2019 年新发现)	矿化点 伟晶岩型	189.3±2.8 Ma(吴玉峰等,2013;花岗岩中锆石 U-Pb)
	塔什库勒干塔沟稀有金属矿化集中区	7	班迪尔-瓦恰白云母矿点	赋矿层位古元古界布伦阔勒岩群,在瓦恰河与塔什库勒干河夹持部位,发现 300 余条伟晶岩脉,有 13 条含白云母伟晶岩,单脉长 10~100 m,宽 0.5~30 m(中国科学院广州地球化学研究所,2021 ^②)	矿点 伟晶岩型	206.4±2.0 Ma(Yan Qinghe et al.,2022)
		8	牧林场云母矿	古元古界布伦阔勒岩群斜长石英片岩及绢云石英片岩中的白云母花岗岩伟晶岩脉中,出露长约 400 m,宽 2.5~16 m,共有三个矿体,长约 60~350 m,厚约 5.5~7 m。见白云母、黑云母(中国科学院广州地球化学研究所,2021 ^②)	小型 伟晶岩型	204.8±0.7 Ma(Wang Wei et al.,2023;锆石 U-Pb)
		9	达布达尔绿柱石矿	赋矿层位古元古界布伦阔勒岩群,含矿脉达 12 处,一般较小。含绿柱石的矿脉地表出露长为 3~28 m,厚为 0.2~1.6 m;最厚者 2 m,长 30 m(中国科学院广州地球化学研究所,2021 ^②)	小型 热液交代型	
		10	热土坎白云母矿	位于马尔洋乡南东约 51 km 处,古元古界布伦阔勒岩群变质岩中发现 6 条花岗岩伟晶岩脉,5 条含矿。单矿脉长 20~100 m,宽 1~5 m。云母面积 6~20 cm ² ,最大 350 cm ² 。含矿率 50~150 kg/m ³ 。储量 202 t(河南省地质调查院,2004 ^③)	中型 伟晶岩型	
		11	穹图卡依云母矿点	含矿伟晶岩脉主要分布于古元古界布伦阔勒群黑云石英片岩、角闪石英片岩中。伟晶岩脉多分布于黑云母或二云母花岗岩外接触带。发现 38 条伟晶岩脉,长 30~60 m,宽 1~2 m,最大长 680 m,宽 8 m。伴生绿柱石(建筑工程部非金属矿地质公司 201 队,1964 ^④)	矿点 伟晶岩型	
		12	三素敏云母矿	伟晶岩脉侵入于古元古界布伦阔勒群黑云石英片岩中。白云母矿脉 14 条,长 25~200 m,宽 1~10 m,矿化较好 10 条,长 50~160 m,宽 4~10 m,绿柱石矿脉 3 条,其他与白云母伴生,最大长 680 m,宽 8 m,伴生绿柱石(新疆地质局喀什大队六分队,1960 ^⑤)	小型 伟晶岩型	

续表 2

成矿亚带	矿集区(矿化远景区)	编号	矿产名称	地质特征	成因类型, 规模	成矿年龄
塞图拉-大红柳滩稀有金属成矿亚带	康西瓦稀有金属矿化集中区	13	康西瓦白云母稀有金属矿	含矿伟晶岩脉主要分布于古元古界康西瓦群含石榴子石二云石英片岩、角闪斜长片麻岩。发现 676 条伟晶岩脉, 其中白云母脉 3 条, 另有 6 条绿柱石矿化脉(新疆地矿局第二地质大队, 1967 ^①)	云母矿中型, 伟晶岩型	209.0±4.4 Ma(张泽等, 2019)
		14	卡皮达兰沟稀有金属矿点	伟晶岩脉, 走向约 300°, 宽约 2 m, 露头长约 30 m, 矿脉主要由斜长石、石英、锂云母(15%~20%)、云母、电气石及少量其他矿物组成(新疆地质调查院, 2015 ^②)	矿点, 伟晶岩型	
		15	阿克萨依锂矿点	含矿伟晶岩脉主要分布于古元古界康西瓦群含石榴子石二云石英片岩、角闪斜长片麻岩。合计见 12 条锂辉石矿脉、1 条白云母锂辉石矿脉、1 条白云母绿柱石矿化脉、35 条白云母矿化脉(王核等, 2023)	矿点, 伟晶岩型	
		16	阿克萨依铁矿 14 区锂矿点	含矿伟晶岩脉主要分布于古元古界康西瓦群含石榴子石红柱石二云石英片岩。见 1 条的含锂辉石伟晶岩矿化脉, 宽约 4~8 m, 长 500~700 m, 向东延至大红柳滩北锂矿(王核等, 2023)	矿点, 伟晶岩型	
		17	阿克塔斯北(大红柳滩北)锂矿	矿体主要赋存于三叠系巴颜喀拉群, 主要见锂铍矿体 4 条, 铍矿体 2 条。矿体地表断续出露长 100~1200 m, 真厚度 1.02~7.44 m, Li ₂ O 平均品位 1.05%~2.06%, BeO 平均品位 0.044%~0.062%(新疆维吾尔自治区有色地质勘查局地质矿产勘查研究院, 2021 ^③)	中型, 伟晶岩型	206.2±1.2 Ma(王核等, 2023; 铍钼铁矿 U-Pb)
		18	喀什塔格锂矿	见 6 条含锂辉石伟晶岩脉, 其顶底板围岩皆为含十字石、石榴子石二云石英片岩(王核等, 2023)	小型, 伟晶岩型	
		19	大红柳滩东锂矿	见 5 个矿体赋存于花岗岩伟晶岩中, 其顶底板围岩皆为含十字石、石榴子石二云石英片岩, 长 90~420 m, 矿体厚度 4~14 m。Li 品位 0.55%~2.02%(王核等, 2023)	中型, 伟晶岩型	204.8±0.7 Ma(孔会磊等, 2023; 锆石 U-Pb)
		20	中红柳滩白云母矿	新藏公路 474 km 喀拉喀什河南岸, 矿体主要赋存于元古宇康西瓦群, 白云母伟晶岩脉主要 22 条长 15~50 m 有 4 条, 50~100 m 有 7 条, 大于 100 m 有 11 条, 宽度 3~15 m 不等(中国科学院广州地球化学研究所, 2021 ^④)	中型, 伟晶岩型	
		21	大红柳滩(阿克塔斯)锂矿	矿体主要赋存于三叠系巴颜喀拉群, 分为 90 与 91 号两个矿脉群, 其中 90 号脉群中分布有 6 条矿体, 而 91 号脉群中分布有 4 条矿体, 大部分样品 Li ₂ O 品位>1%, 单样最高品位可达 3.20%(中国科学院广州地球化学研究所, 2021 ^⑤)	中型, 伟晶岩型	211.9±2.4 Ma(Yan Qinghe et al., 2018; 铍钼铁矿 U-Pb); 195±2 Ma(Zhao Hui et al., 2024; 锡石 U-Pb)
		22	浮虏沟北锂矿	含矿伟晶岩脉主要分布于古元古界康西瓦群含石榴子石红柱石二云石英片岩。见 1 条的含锂辉石伟晶岩矿脉, 断续出露>2300 m, 主要见 3 条石英锂辉石矿脉(新疆维吾尔自治区有色地质勘查局地质矿产勘查研究院, 2021 ^⑥)	矿床, 小型	
		23	阿克塔斯南(喀拉卡北)锂矿	矿体主要赋存于三叠系巴颜喀拉群, 见 5 条锂铍矿体, 矿体地表出露长 40~550 m, 厚 1.05~7.05 m, Li ₂ O 平均品位 1.44~2.52%, BeO 平均品位 0.041%~0.067%(新疆维吾尔自治区有色地质勘查局地质矿产勘查研究院, 2021 ^⑦)	小型, 伟晶岩型	
		24	阿合栏杆钼矿	钼矿体位于碱长花岗岩斑岩体内, 长 163 m, 厚 64.07 m, Rb ₂ O 平均品位 0.157%, Nb ₂ O ₅ 平均品位 0.019%(王核等, 2023)	矿点, 伟晶岩型/花岗岩型	
		25	阿合栏杆锂矿	见 2 条含锂伟晶岩脉, 脉长约 80~100 m, 宽约 1.82~4 m。矿体 Li ₂ O 平均品位为 0.9%~1.8%(王核等, 2023)	矿点, 伟晶岩型	
	26	浮虏沟 1 号脉群锂矿	见 10 条含锂伟晶岩脉, 单矿体地表出露厚度为 0.8~17.8 m, 长度为 260~2400 m, Li ₂ O 平均品位为 1.19%~3.87%(李佩等, 2019; Feng Jin et al., 2021)	中型, 伟晶岩型	207.0±1.2 Ma(本文; 铍钼铁矿 U-Pb)	

续表 2

成矿亚带	矿集区(矿化远景区)	编号	矿产名称	地质特征	成因类型, 规模	成矿年龄
赛图拉-大红柳滩稀有金属成矿亚带	大红柳滩-白龙山矿集区白龙山矿田	27	俘虏沟 2 号脉群锂矿	见 7 条含锂伟晶岩脉,产于巴喀喀拉群长石英细粒变砂岩夹石榴子石长石英砂岩中。含矿伟晶岩脉长约 120~1100 m,宽约 2.2~12 m。矿体 Li_2O 平均品位为 0.9%~2.6%(李侃等, 2019)	小型, 伟晶岩型	
		28	白龙山锂(大红柳滩南、喀拉喀、盘龙、雪龙山 1 号区)矿	出露一条长约 8250 m, 宽度 46~165 m 的含锂辉石伟晶岩脉带,可划分出 5 个矿化区段,地表出露锂多金属矿体 47 条, Li_2O 平均品位为 1.13%~3.06%,铍矿体 5 条(王核等, 2017; Feng Jin et al., 2021)	超大型, 伟晶岩型	208.1±1.5 Ma (Wang He et al., 2020; 钮钜铁矿 U-Pb); 208.3±1.5 Ma (Yan Qinghe et al., 2022; 钮钜铁矿 U-Pb); 212.3±0.9 Ma (Zhou Jinsheng et al., 2021; 钮钜铁矿 U-Pb)
		29	白龙山北(503)锂矿	位于 509 道山西矿床北,见 3 条含锂辉石伟晶岩脉,长 20~80 m,厚 2.3~2.9 m,取样 Li_2O 品位为 2.15%(王核等, 2023)	矿点, 伟晶岩型	211~204 Ma (Wang et al., 2020; Yan Qinghe et al., 2022; 钮钜铁矿 U-Pb)
		30	509 道班西锂矿	地表出露 13 条矿体及数量众多的伟晶岩透视镜,钻孔圈定隐伏矿体锂(铷)矿体 45 条,铍矿体 4 条。矿体长 160~750 m,斜深 37.4~335 m,平均厚度 1.07~11.26 m, Li_2O 平均品位 0.85%~2.93%(彭海练等, 2018)	超大型, 伟晶岩型	
		31	505(509 道班西 3 区)锂矿	锂辉石花岗伟晶岩脉(隐伏矿体 60 条),长 196~672 m,控制锂(铷)矿体长 81~160 m,厚 1.03~24.28 m, Li_2O 品位 1.09%~4.67%,平均品位 2.29%;铍矿体 2 条,长 160 m,厚 2.98~4.47 m, BeO 平均品位 0.089%~0.090%(李侃等, 2019)	超大型, 伟晶岩型	
		32	白龙山东南锂矿	见 8 条含矿伟晶岩脉,长 30~300 m,宽 2~25 m,品位 0.94%~3.41%(王核等, 2023)	中小型, 伟晶岩型	
		33	冰舟锂矿	发现 5 条含矿伟晶岩脉,主要是含锂、氧化锂品位 0.96%~2.46%(王核等, 2023)	中小型, 伟晶岩型	
		34	雪风岭(509 道班西 4 区、507)锂矿	由 3 个含矿伟晶岩脉群共计 47 条锂多金属矿体组成,矿体长 32~360 m,厚 0.9~8 m,走向 110°~120°,倾向 49°~78°(王核等, 2020)	大型, 伟晶岩型	210~208 Ma (白洪阳等, 2022; Bai Hongyang et al., 2023; 钮钜铁矿 U-Pb)
		35	雪盆锂矿	雪盆矿区 3 条锂矿,长 800~1200 m,厚 4~8 m,向西合成一个矿体,厚 12~20 m。 Li_2O 平均品位为 2.24%(王核等, 2020)	大型, 伟晶岩型	
		36	双牙锂矿	主矿体,长 850 m,厚 12 m,出露最宽处近 100 m; Li_2O 品位为 1.96%(王核等, 2020)	大型, 伟晶岩型	
		37	龙门山锂矿	围岩为片状变质砂岩、长石英砂岩、岩屑砂岩。含矿伟晶岩脉 18 条,呈脉状、似层状,走向 111°~141°,倾向北东,倾向 62°~78°,长 90~1170 m, Li_2O 平均品位 0.57%~1.83%, BeO 平均品位 0.033%~0.051%(冯京等, 2021)	大型, 伟晶岩型	211.3±5.0 Ma (唐俊林等, 2022; 锡石 U-Pb)

±1.1 Ma(王核等,2022),1:50 万化探成果在带内也圈定了大面积与铍、锂、铌钽元素矿化有关的异常,这些异常不仅范围大,而且具有强度高、分带清晰的特征,显示了该带良好的找矿前景。

区内已发现的矿点有肖尔布龙锂(铍)矿点(王核等,2022)、霍什塔什锂(铍)矿点、卡拉瓦拉锂(铍)矿点、垠铍矿点、土曼其铍矿点,稀有金属成矿年龄集中在 205~204 Ma。本文重点介绍霍什塔什锂(铍)矿点、卡拉瓦拉锂(铍)矿点。

2.2.1 霍什塔什锂铍矿点

位于阿陶县布伦口乡北西的霍什塔什一带,地理坐标:东经 74°49′;北纬 38°49′。矿区出露地层为布伦阔勒群的黑云母石英片岩、石英岩、(红柱石、砂线石)云母片岩及斜长片岩等。

1 号脉产在含红柱石黑云母片岩中,沿片岩的片理呈透镜状的层间体产出(图 3),延长 180 余米,厚 10~20 m,中间形成膨胀体,分带性良好,上盘脉倾角产状 50°~70°,平均 50°,下盘脉倾角 60°~80°,平均 62°,由此可知岩体向下有变大的可能,脉的走向为 NW-SE。

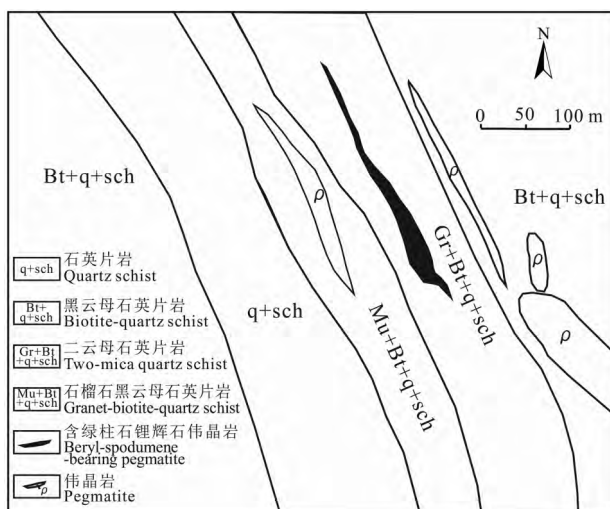


图 3 霍什塔什锂铍矿点地质简图
(据新疆地矿局第二地质大队,2018^①)

Fig 3 Geologic map of Huoshitash lithium beryllium deposit
(after No. 2 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang, 2018^①)

伟晶岩脉内部分带性好,从外向内可分为 7 个内部结构带:① 花岗状伟晶岩带,为伟晶岩的最外带,厚 1~3 cm,在脉的上盘较厚,下盘薄,呈断续的带状分布;② 细晶岩带,呈细粒状结构,成分由石英、微斜长石组成,分布在脉的上盘脉,多呈带状分布;③ 粗粒伟晶岩由石英、长石、白云母组成,呈粗

粒结构分布在脉的下盘和细晶岩带呈过渡变化关系;④ 小块体伟晶岩带,其中石英、微斜长石呈块体状结构,位于粗粒伟晶岩带内,再围绕块体微斜长石带、石英锂辉石带的周围,局部地方发生钠长石化现象;⑤ 块体微斜长石带,由巨块的微斜长石单矿物组成,已经受了不同程度的糖粒状钠长石化;⑥ 石英-锂辉石带,其中锂辉石晶体粗大(2 m×0.6 m),特别在块体石英、块体状长石带接触处锂辉石较富集;⑦ 块体状石英带,由单矿物的石英巨块组成,分布于伟晶岩的中央部分。

在石英锂辉石带中,锂辉石呈淡绿色的柱状体,解理发育,风化后表面上常有一些氧化锰的物质。锂辉石的晶体一般 0.2~0.5 m,最大可达 0.6~2 m,矿带长 50 m,平均宽约 4 m,氧化锂平均含量:1.96%~2.24%。两条铍矿体,视厚 1.2~5.5 m 之间,BeO 品位 0.035%~0.069%之间,平均品位 0.053%。矿石矿物主要为锂辉石、绿柱石,少量白云母及铌、钽矿物(新疆地矿局第二地质大队,2018^①)。

2.2.2 卡拉瓦拉锂铍矿点

位于阿克陶县布伦口乡北西的卡拉瓦拉一带,地理坐标:东经 74°30′,北纬 38°56′,矿区地层有古元古界布伦阔勒群,主要为红柱石黑云母斜长片岩、红柱石黑云母石英片岩、石榴黑云母石英片岩、黑云母石英片岩、石英岩、二云母片岩等(图 4)。

伟晶岩脉密程度与红柱石的富集有密切的关系,区内西部因红柱石很少,伟晶岩脉数量亦大为减少。花岗伟晶岩脉大部分均为细粒花岗岩状,长英岩状结构和中粒及中粒准文象结构伟晶岩。具膨胀的岩脉中可见到中粗粒准文象结构和巢状的小块体伟晶岩,极个别有不规则的石英核,一般岩脉仅具有 1~2 个带,少数具有 3 个带。后期细-微晶黑色电气石化和轻微钠长石化现象较普遍,除 10、11、12、13、2、6 号及其他个别岩脉具有或多或少的稀有金属矿化外,其他均未见矿化。

10 号脉出露宽约 50 m,长约 200 m,呈不规则脉状,主要分带有细粒和中细粒伟晶岩带、中粒伟晶岩带、中粗粒及中粗粒准文象结构伟晶岩带、小块体伟晶岩带、块体微斜长石带、石英-白云母集合体和叶钠长石-石英-锂辉石-锂云母矿巢。叶钠长石-石英-锂辉石-锂云母矿巢分布于脉体中部,除大矿巢外,尚有 15 处小矿巢。矿巢呈透镜体,中部厚约 5 m,长 15~20 m 或更大些。组成矿物均为石英锂辉石、叶钠长石、残余微斜长石、锂云母等,矿物种类繁

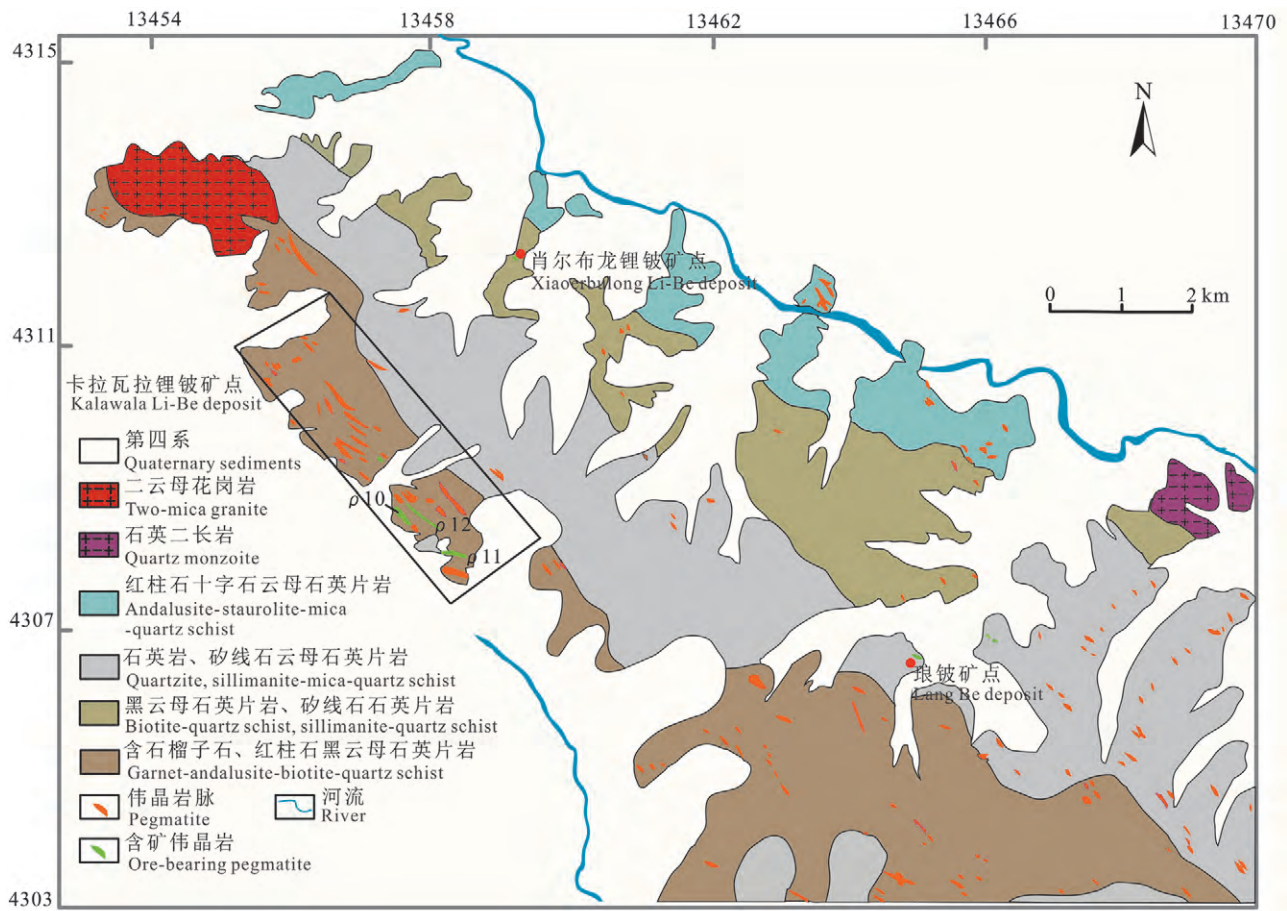


图 4 卡拉瓦拉锂铍矿点地质简图(据新疆地矿局第二地质大队,2018^①)

Fig. 4 Geologic map of Kalawala lithium beryllium deposit (after No. 2 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang, 2018^①)

多,石英有 2~3 期,锂辉石为板状晶体,最大达 60 cm×40 cm×20 cm,有的为肘状,可能系沿裂隙形成。

为进一步评价 10 号伟晶岩脉的成矿潜力,对矿脉进行了连续捡块采样,样长为 5 m。结果显示,伟晶岩脉 Li₂O 含量仅有一个样品为 1.127%,其余均小于 0.05%。11 号脉 Li₂O 平均品位 0.194%;12 号脉 Li₂O 平均品位 0.169%;13 号脉 Li₂O 平均品位 0.204%。BeO 均未达到边界品位。

2.3 塔什库尔干-塔吐鲁沟稀有金属矿化集中区(I-2)

地理坐标:东经 75°00'—76°20',北纬 36°38'—37°40',面积约 3000 km²。

区内出露地层主要为古元古界布伦阔勒群、志留系温泉沟群及中二叠统。中一酸性岩浆主要为燕山期二长花岗岩、英云闪长岩体及喜山期碱性花岗岩。区内已发现的矿点有达布达尔绿柱石矿点、牧林场白云母矿床、阿然保泰铍矿化点、卡拉其古钨矿

点等。1:50 万化探成果在阿然保泰、卡拉其古沟西段圈定了较好的铍异常,这些异常集中,而且具有强度高、分带清晰的特征,显示了该带良好的找矿前景。

2.3.1 牧林场白云母矿床

牧林场白云母矿床位于巴扎达西提牧林场内,距塔什库尔干塔吉克自治县县城 28 km,位于塔什库尔干河东岸,地理坐标:北纬 37°39'54",东经 75°22'08"。

矿体主要分布于古元古界布伦阔勒群黑云斜长石英片岩及绢云石英片岩中的白云母花岗伟晶岩脉中,脉体断续出露长约 400 m,宽 2.5~16 m,呈不规则脉状,走向 100°~115°,倾向 190°~205°,倾角 60°~80°。伟晶岩呈灰白色脉状、透镜状展布,与围岩片理化产状一致。共分布有三个矿体,呈近北西向西向带状展布,Ⅰ号矿体呈不规则透镜状,长约 80 m,宽约 4.3~11 m,矿体平均厚度 5.49 m,沿片理贯入,接触面呈弯曲状;Ⅱ号矿体呈不规则脉状,长

约 60 m, 宽 3~8 m, 矿体平均厚度 6.89 m; III 号矿体断续长约 350 m, 宽约 5~15 m, 最宽达 16 m。

伟晶岩脉中一中粗粒结构, 块状构造, 矿物组成以微斜长石、斜长石、石英为主, 次为黑云母, 白云母。白云母呈不均匀全脉矿化, 矿石主要有白云母-石英集合体组成, 少量黑云母, 呈斑杂状构造, 白云母为淡茶色, 叠板状晶体, 厚 0.3~16 mm, 剥分性好, 弹性一般, 见少量黑、白云母连晶。白云母轮廓面积 4~20 cm²。

2.3.2 三素铍白云母矿床

三素铍白云母矿床位于叶城县西南(直线距离)152 km。属塔什库尔干县达布达尔乡热斯卡木村, 叶尔羌河东岸, 距新藏公路约 50 km, 地理坐标: 东经 76°10'30", 北纬 36°56'30"。

矿区地层为古元古界布伦纳勒群, 主要岩性为砂线石黑云母石英片岩、红柱石砂线石黑云母石英片岩以及含石榴子石红柱石黑云母斜长片岩。区内主要为印支期黑云母花岗岩及白云母花岗岩。矿区发现伟晶岩脉 196 条, 长百米至数百米, 宽数十厘米至数十米。主要矿化为白云母及绿柱石, 前者多为全脉矿化, 后者则是巢状分布。其中白云母矿脉 14 条, 长 25~200 m, 宽 1~10 m, 矿化较好 10 条, 长 50~160 m, 宽 4~10 m, 以脉状及透镜状为主, 多数是南西倾斜, 集中分布于矿区中央, 白云母矿脉中白

云母工业原料出成率 20%~25%, 伴生 BeO 品位 0.01%~0.20%; 绿柱石矿脉主要有 3 条, BeO 品位 0.059%~0.21%, 其他是呈伴生矿物产出, 规模常较白云母矿脉小, 以脉状为主。储量白云母 7662 t, 氧化铍 13.73 t。

2.4 康西瓦白云母、铍稀有金属矿化集中区(II-1)

地理坐标: 东经 78°38'—78°46'; 北纬 36°07'—36°12', 面积约 600 km²。

地层为古元古界康西瓦岩群的灰色黑云母斜长片麻岩、角闪黑云母斜长片麻岩夹薄层大理岩、石榴斜长变粒岩。区内发育印支期黑云母二长花岗岩。

区内已发现的矿点有康西瓦白云母铍矿床及数百条伟晶岩脉。1:50 万化探成果在带内也圈定了一条面积较大的北西向铍异常和一处北西向的铍异常, 显示了该带良好的找矿前景。

发现 676 条伟晶岩脉, 含矿伟晶岩脉 104 条, 其中白云母矿脉 3 条, 白云母矿化脉 95 条, 6 条绿柱石矿化脉(图 5)。

1 号脉(m-1)长 71 m, 宽 5~7 m, 最宽 20 m。白云母伟晶岩矿脉的产出主要受片理控制, 裂隙型白云母主要赋存于细粒结构、中粗粒结构内的裂隙中, 通常与黑云母连晶、叠晶。白云母在中粗粒结构中的片度较大, 一般 4~30 cm², 最大可达 65 m²。交代型白云母主要产于白云母石英集合体内或其边

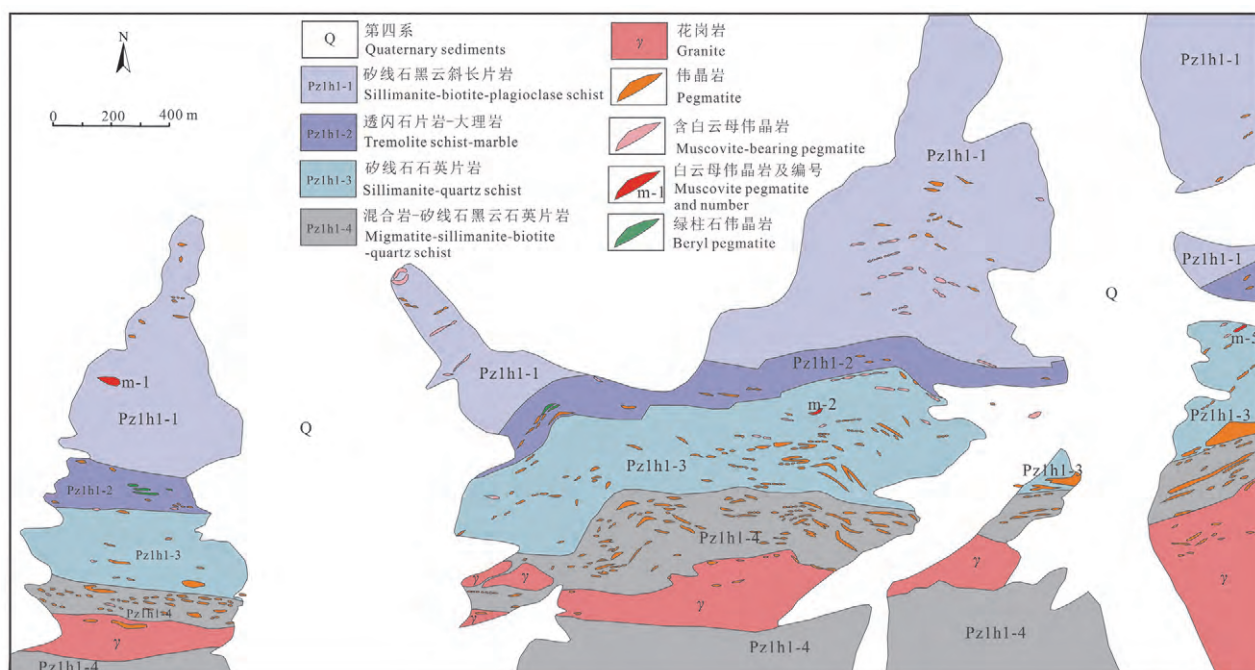


图 5 康西瓦铍-白云母矿地质简图(据新疆地矿局地质二大队, 1967^①)

Fig 5 Geologic map of Kangxiwa beryllium muscovite deposit (after No. 2 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang, 1967^①)

缘邻近处,在细粒结构中交代形成的白云母数量少片度小。在中粗粒结构中交代形成的白云母较富集,片度大,一般 $30\sim 100\text{ m}^2$,最大者达 $33\text{ cm}\times 47\text{ cm}$ 。迭板厚 $1\sim 3\text{ cm}$,最厚 13 cm 。该脉的工业原料云母出成率可达 75% 。已开采。

5号脉(m-5)长 540 m ,宽 11.5 m 。白云母呈带状矿化,矿带位于伟晶岩上盘附近,矿体在地表出露小,向下变宽。工业云母主要赋存于中-粗准文象结构中的交代集合体及裂隙中。裂隙型云母淡茶色,迭板状,厚 $1\sim 3\text{ cm}$,面积 $6\sim 50\text{ cm}^2$;交代型云母呈淡茶色,迭板状,厚度 $0.5\sim 2\text{ cm}$ 。轮廓面积 $4\sim 20\text{ cm}^2$ 。片度较大,质地坚硬,剥分性好,弹性强。

2.5 大红柳滩-白龙山稀有金属矿化集中区(II-2)

地理坐标:东经: $79^{\circ}00'\sim 79^{\circ}20'$,北纬 $35^{\circ}46'\sim 36^{\circ}10'$,面积近 1200 km^2 。赋矿主要地层为三叠系巴颜喀拉群,该岩群主要为一套厚度巨大的类复理石砂岩、粉砂岩、片岩、板岩组成的浅变质碎屑岩沉积建造。成矿元素以Li为主,伴生Rb、Be、Nb、Ta、Sn等元素。1:50万化探成果在带内也圈定了大面积与锂、铍、铌钽元素矿化有关的异常,这些异常不仅范围大,而且具有强度高、分带清晰的特征,显示了该带良好的找矿前景,也是喀喇昆仑成矿带最好的稀有金属产出区。

矿集区锂矿床、矿点围绕大红柳滩花岗岩体、俘虻沟花岗岩体外侧分布,主要可划分4个矿化带:大红柳滩北稀有金属矿化伟晶岩脉群带、大红柳滩南稀有金属矿化伟晶岩脉群带、白龙山-雪凤岭锂矿化伟晶岩脉群带、俘虻沟-双牙锂矿化伟晶岩脉群带(图6),其中白龙山-雪凤岭锂矿化伟晶岩脉群带长约 18 km ,俘虻沟-双牙锂矿化伟晶岩脉群带长约 25 km ,南北2个带呈对称分带,俘虻沟-双牙锂矿化伟晶岩脉群带显示了巨大的找矿潜力,是下一步找矿的重要地段(王核等,2023)。

目前在白龙山-大红柳滩一带可圈定417条含锂铍矿伟晶岩脉,其中大红柳滩矿田38条(大红柳滩锂矿17条、阿克塔斯北锂矿6条、大红柳滩东锂矿5条、喀什塔格锂矿6条、俘虻沟北3条、阿克萨依14区1条);白龙山矿田379条(白龙山锂矿-509道班西锂矿2区共发现含矿伟晶岩脉166条;505锂矿98条、雪凤岭锂矿47条、阿克塔斯南锂矿5条、白龙山北锂矿点4条、阿合栏杆锂矿点2条、白龙山南锂矿8条、冰舟锂矿5条、雪盆锂矿3条、双牙锂矿5条、龙门山锂矿18条、俘虻沟1号脉锂矿10条,俘虻沟2号脉锂矿点8条)。

3 喀喇昆仑稀有金属成矿带成矿规律

通过对区域地质环境,矿床分布规律的总结,认为矿产在空间上分布受大地构造单元、地球化学场、构造、岩相古地理环境、岩浆活动等因素的控制。不同矿床的控矿因素表现有不同的特征,不同的地质单元对产出的矿床类型表现出专属性,总的来讲有以下几点。

3.1 稀有金属控矿条件

3.1.1 大地构造单元控矿

西昆仑-喀喇昆仑造山带属于特提斯构造域中,一级构造单元控制着成矿带的分布;次级构造单元控制着成矿亚带(矿段)的分布。

研究区被康西瓦大断裂分为两大构造单元,北为西昆仑造山带,南为喀喇昆仑造山带,二者具有明显不同的成矿特征。研究区内西昆仑构造带主要分布着早古生代玉石矿化;喀喇昆仑构造带在研究区内主要是受甜水海群、布伦阔勒群、赛图拉群变质岩系控制的早古生代沉积变质型铁矿化以及中生代岩浆作用有关的伟晶岩稀有金属矿、层控+热液改造型铅锌矿等。

结合新疆自治区潜力评价项目《新疆成矿单元划分方案研究》的划分方案,调查区属于喀喇昆仑(陆缘盆地)RM(rare metal,稀有金属)-Fe-Pb-Zn-Cu矿带,前人提出的划分意见如下:

I级:特提斯成矿域。

II级:喀喇昆仑-巴颜喀拉-松潘成矿省。

III级:喀喇昆仑-南巴颜喀拉-雅江 RM-Fe-Pb-Zn-Sb-Hg-Au-Cu-Zn-水晶成矿带。

IV级:喀喇昆仑 RM-Fe-Pb-Zn-Cu矿带。喀喇昆仑 RM-Fe-Pb-Zn-Cu矿带可分为东西2个亚带:木吉-塔什库尔干铍稀有金属成矿亚带、谢依拉-大红柳滩锂稀有金属成矿亚带。

3.1.2 构造控矿特征

Černý et al. (1985) 和 Partington (1990) 注意到构造在伟晶岩型稀有金属矿床形成中扮演了重要作用,并且认为前寒武纪数量少但规模大的稀有金属伟晶岩矿床是受构造控制的;Černý (1991) 进一步认为全球伟晶岩形成于地质历史的构造-岩浆循环中,一般与造山过程有关联;Zagorsky et al. (2014) 则通过对中亚褶皱带中含锂为主的大型锂辉石伟晶岩矿田的地球动力学背景研究,认为大型锂辉石伟晶岩矿田与大陆岩石圈伸展背景密切相关,其产出背景不是发生在经历过构造-岩浆活动

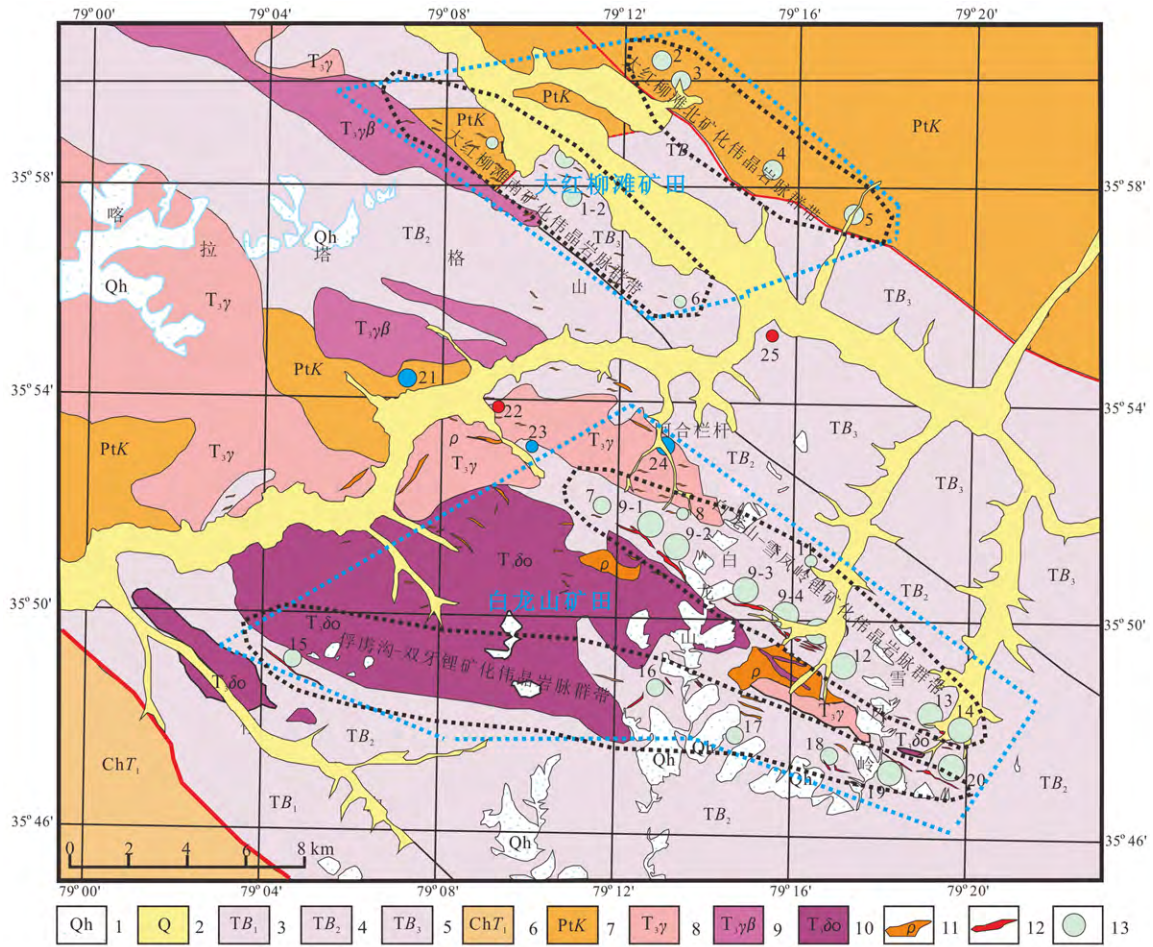


图6 大红柳滩-白龙山矿集区地质及锂矿床分布简图(据王核等, 2023)

Fig. 6 Map of geology and lithium deposits in Dahongliutan-Bailongshan ore concentration area (after Wang He et al., 2023)

1—第四系冰川及冰碛物; 2—第四系冲洪积物; 3—三叠系巴颜喀拉群第一岩性段; 4—三叠系巴颜喀拉群第二岩性段; 5—三叠系巴颜喀拉群第三岩性段; 6—新元古界长城系甜水海群; 7—古元古界康西瓦岩群; 8—二云母花岗岩; 9—黑云母花岗岩; 10—石英闪长岩; 11—伟晶岩; 12—锂铍矿体; 13—锂矿床(点)及编号(1-1—大红柳滩锂矿90号脉群; 1-2—大红柳滩锂矿91号脉群; 1-3—大红柳滩锂矿102号脉群; 2—阿克苏依东锂矿; 3—阿克塔斯北锂矿; 4—喀什塔格锂矿; 5—大红柳滩东锂矿; 6—俘虏沟北锂矿; 7—阿克塔斯南锂矿; 8—阿合栏杆锂矿; 9-1—白龙山锂矿1号脉群; 9-2—白龙山锂矿2号脉群; 9-3—白龙山锂矿3号脉群; 9-4—白龙山锂矿4号脉群; 10—509道班西锂矿; 11—白龙山北(503)锂矿; 12—505锂矿; 13—雪凤岭锂矿; 14—龙门山锂矿; 15—俘虏沟1号脉群锂矿; 16—俘虏沟2号脉群锂矿; 17—白龙山东南锂矿; 18—冰舟锂矿; 19—雪盆锂矿; 20—双牙锂矿; 21—百利铅银矿; 22—俘虏沟铁矿点; 23—四川矿业沟铅银矿; 24—阿合栏杆铅银矿; 25—俘虏沟口铁矿点)

1—Quaternary glaciers and moraines; 2—Quaternary rushed to proluvial; 3—the first lithologic member of the Triassic Bayan Har Group; 4—the second lithologic member of the Triassic Triassic Bayan Har Group; 5—the third lithologic member of the Triassic Bayan Har Group; 6—Neoproterozoic Changcheng System Tianshuihai Group; 7—Paleoproterozoic Kangxiwa Group; 8—mica granite; 9—biotite granite; 10—quartz diorite; 11—pegmatite; 12—Li-Be orebody; 13—lithium deposit (spot) and number (1-1—Na 90 vein group of Dahongliutan lithium deposit; 1-2—Na 91 vein group of Dahongliutan lithium deposit; 1-3—Na 102 vein group of Dahongliutan lithium deposit; 2—East Akesay lithium deposit; 3—North Aketashi lithium deposit; 4—East Kashitage lithium deposit; 5—East Dahongliutan lithium deposit; 6—north Fulugou lithium deposit; 7—south Aketashi lithium deposit; 8—Ahe Langan lithium deposit; 9-1—Na 1 vein group of Bailongshan lithium deposit; 9-2—Na 2 vein group of Bailongshan lithium deposit; 9-3—Na 3 vein group of Bailongshan lithium deposit; 9-4—Na 4 vein group of Bailongshan lithium deposit; 10—509 Daobanxi lithium deposit; 11—north Bailongshan (503) lithium deposit; 12—505 lithium deposit; 13—Xuefengling lithium deposit; 14—Longmenshan lithium deposit; 15—Na 1 vein group of Fulugou lithium deposit; 16—Na 2 vein group of Fulugou lithium deposit; 17—Bailongshan South lithium deposit; 18—Bingzhou lithium deposit; 19—Xuepeng Lithium deposit; 20—Shuangya lithium deposit; 21—Baili lead and silver deposit; 22—Fulugou iron deposit; 23—Sichuankuangyegou lead and silver deposit; 24—Ahelang lead and silver deposit; 25—Fulugoukou iron deposit)

的断陷构造的长期活动深大断裂边缘,就是发生在剪切和拉张位错的后碰撞区域。

研究区康西瓦大断裂早期主要表现为韧性剪切变形,晚期主要表现为脆性变形,形成一系列的断层束,控制了三叠纪花岗岩和伟晶岩的分布,特别是康西瓦断裂带南侧发育次级剪切构造带中的强片理化带中伟晶岩脉发育。同时大红柳滩地区的大红柳滩-俘虏沟岩体形成岩浆热穹隆构造,伟晶岩型锂矿多产于穹隆构造花岗岩的两翼。

总之,研究区构造与稀有金属成矿的关系:片理、次级断裂及裂隙控制了区内伟晶岩脉的分布,对稀有金属矿产起着决定性作用。

3.1.3 地层控矿特征

地层和岩性建造对矿床的形成和产出具有重要的控制作用,特别是对于同生沉积和同生层控矿床显得尤为明显,喀喇昆仑地区主要体现在沉积变质型铁矿、层控碳酸盐型矿床,而伟晶岩型稀有金属矿床层位控制也比较明显。

Li、Be、Rb、Cs、Sn 元素在调查区分布较集中,高背景主要分布在古元古界布伦阔勒岩群、古元古界康西瓦岩群和三叠系巴颜喀拉山群中发育的花岗伟晶岩中。受康西瓦大断裂带和三叠纪花岗岩带的联合控制,锂稀有金属矿化主要集中在大红柳滩-白龙山花岗岩穹隆南北两侧的地层中。含矿伟晶岩主要产于古元古界布伦阔勒岩群、古元古界康西瓦岩群和三叠系巴颜喀拉山群的片岩中。其中,中生界三叠系巴颜喀拉群其 Li 的背景值 44×10^{-6} ,是大陆地壳的 2.2 倍,在该层位中主要为石英-锂辉石伟晶岩脉,产在距岩体 500~2000 m 片理化带或断层破碎带中,大多数为全脉锂矿化;古元古界布伦阔勒岩群的含矿伟晶岩脉远离岩体外接触带约 2000 m,具结构分带,主要为白云母-锂辉石-绿柱石矿脉;古元古界康西瓦岩群的含矿伟晶岩脉远离岩体。

3.1.4 岩浆岩控矿特征

中生代岩浆侵入活动主要分布在喀喇昆仑成矿带,是稀有金属成矿的高峰期,主要为中酸性岩浆岩与伟晶岩铍锂铌钽铷钶等成矿关系较为明显。通过研究认为围绕着白龙山成矿母体花岗岩,岩体北部存在含黑色电气石伟晶岩脉群-块体石英长石伟晶岩脉群-含白云母伟晶岩脉群-含矿伟晶岩脉群-石英脉群,岩体南部同样会出现对称分带的伟晶岩脉群,表现为“伟晶岩脉对称分带模式”,对指导白龙山-雪凤岭一带找矿具有重要意义(王核等, 2020),也

先后在南对称带发现了双牙、雪盆、冰舟和白龙山南锂矿床。

3.2 稀有金属成矿带划分

研究区成矿区带划分主要根据现有的矿床、矿点、矿化点(带)的地质特征(包括含矿地层岩性、构造、岩浆岩、变质作用等)、含矿地层的构造属性、大地构造位置、区域物化探特征(包括异常面积、展布方向、浓集中心、异常强度等)等进行综合分析、评价,同时也考虑到矿(化)带内已有矿床的规模因素。

喀喇昆仑稀有金属成矿带:可分为东西 2 个亚带:木吉-塔什库尔干铍稀有金属成矿亚带、赛图拉-大红柳滩锂稀有金属成矿亚带。

3.2.1 木吉-塔什库尔干铍稀有金属成矿亚带

木吉-塔什库尔干稀有金属成矿亚带位于喀喇昆仑稀有金属成矿带的西段,西起木吉西的乌赤别力克山口,经木吉-布伦口-塔什库尔干,东到塔吐鲁沟-麻扎达拉一带,呈 NWW 向带状展布,长约 370 km,宽 30~70 km。稀有金属以铍矿为主,次为锂、铌钽、钨锡。区内地层主要是古元古界布伦阔勒群的沉积建造,在伟晶岩出露区的地层已变质为结晶片岩和混合岩化。区内断裂发育,以 NW 向和 NWW 向为主,次有近 EW 向、SN 向。印支期云英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和石英闪长岩广泛出露。花岗伟晶岩与这些花岗岩体有成因联系,常沿这些岩体的外接触带呈带状分布,有时分布在花岗岩体顶部或褶皱背斜轴部或其两翼。伟晶岩脉主要产于离母岩较远的红柱石线黑云片岩、黑云石英片岩、黑云斜长片麻岩中,已发现花岗伟晶岩脉近 2000 余条。木吉-布伦口一带 1000 余条,其中白云母伟晶岩脉 16 条,含铍伟晶岩脉 7 条,含锂、铌钽伟晶岩脉 8 条;班迪尔-瓦恰-马尔洋一带 400 余条,其中含白云母及稀有金属伟晶岩脉 13 条;塔什库尔干一带(阿然保泰-达布达尔)近 200 余条,其中含白云母伟晶岩脉 3 条,含绿柱石脉 12 条;塔吐鲁沟-麻扎一带近 300 余条,其中含白云母伟晶岩脉 28 条,含绿柱石伟晶岩脉 4 条。已发现霍什塔什铍矿点、肖尔布隆 3 号脉铍矿点、卡拉瓦拉铍矿化点、牧林场白云母矿点、达布达尔绿柱石矿点、三素白云母矿床及土曼其铌钽矿化点等。本矿带除稀有金属花岗伟晶岩外,在叶城县阿哈拉干沟黑云母片麻岩中发育有含绿柱石石英脉,为在西昆仑寻找热液型铍矿提供了线索。

3.2.2 赛图拉-大红柳滩锂稀有金属成矿亚带

赛图拉-大红柳滩稀有金属成矿亚带位于喀喇

昆仑稀有金属成矿带的东段,西起位于皮山县南的赛图拉一带,经三十里营房—康西瓦,到田县南的大红柳滩东一带的泉水沟,呈 NWW 向带状展布,长约 210 km,宽 20~70 km。稀有金属以锂矿为主,次为铍、铷、铯、钽、锡。区内地层主要是三叠纪的沉积建造,在伟晶岩出露区的地层已变质为结晶片岩和混合岩化。区内断裂发育,以 NW 向和 NWW 向为主,次有近 EW 向、SN 向。印支期花岗岩广泛出露,主要岩性为二云母花岗岩、二长花岗岩、黑云母花岗岩、石英闪长岩、花岗闪长岩。花岗伟晶岩与这些花岗岩体有成因联系,常沿这些岩体的外接触带呈带状分布,有时分布在花岗岩体顶部或褶皱背斜轴部或其两翼。已发现花岗伟晶岩脉 7000 余条,其中含锂辉石矿脉 429 条,主要产于离母岩较远的红柱矽线黑云片岩、黑云石英片岩、黑云斜长片麻岩及透辉石变粒岩中,其中白龙山—大红柳滩一带可圈定 417 条含锂铍矿伟晶岩脉,阿克萨依锂矿点发现 12 条含锂伟晶岩脉,康西瓦矿化集中区见 6 条含铍伟晶岩脉。

总之,赛图拉-大红柳滩稀有金属成矿亚带是西昆仑花岗伟晶岩带中成矿条件最好,锂、铍、铷、钽最有找矿潜力的一个成矿亚带。

3.3 稀有金属成矿规律特征

3.3.1 “西铍东锂”、成带分布、分段集中的规律

受康西瓦大断裂带和三叠纪花岗岩带的联合控制,本区的稀有金属矿化具有北西成带分布、“西铍东锂”的特征,并分段集中的一般规律性,显示了成矿作用的非均一性。由 NW 至 SE 分为:木吉-塔什

库尔干铍稀有金属成矿亚带、赛图拉-大红柳滩锂稀有金属成矿亚带。锂稀有金属矿化主要集中分布于喀喇昆仑大红柳滩花岗岩穹隆南北两侧巴颜喀拉群地层中。铍稀有金属矿化主要分布在恰特变质-花岗岩北侧的肖尔布龙一带布伦阔勒群中。

3.3.2 成矿时控性

西昆仑-喀喇昆仑地区由于晚古生代末地壳的强烈拉张,形成古特提斯洋,晚三叠世末,古特提斯洋消减闭合,使北羌塘-甜水海地块拼贴于秦祁昆造山系南缘,形成了与印支期—燕山期岩浆活动有关的稀有金属。

喀喇昆仑造山带主要产出白云母型伟晶岩(牧场为代表)、白云母稀有金属型伟晶岩(三素为代表)和稀有金属伟晶岩(白龙山为代表)。根据课题组的年龄数据,这些矿化伟晶岩的形成年龄为 213~206 Ma,与三叠纪花岗岩年龄接近(王核等, 2023; Yan Qinghe et al., 2022)。

3.3.3 构造-岩浆-层位“三位一体”控矿规律

研究区伟晶岩稀有金属矿床的成矿控矿因素较多,但可以总结存在最重要的三个要素:① 构造控制,次级断裂间的韧性剪切带控制了区内花岗伟晶岩脉的分布形态,也控制稀有金属矿分布,表现在含矿伟晶岩脉群主要发育在片理化带中,有些受层间断层控制(图 7a),在白云母伟晶岩脉带与石英脉之间为锂辉石伟晶岩脉发育的地段;② 受晚三叠纪岩浆侵入活动控制,主要为中酸性岩浆岩与伟晶岩铍锂铷钽铯等成矿关系较为明显,稀有金属成矿年龄与中酸性花岗岩成岩年龄一致,在白龙山矿田,含

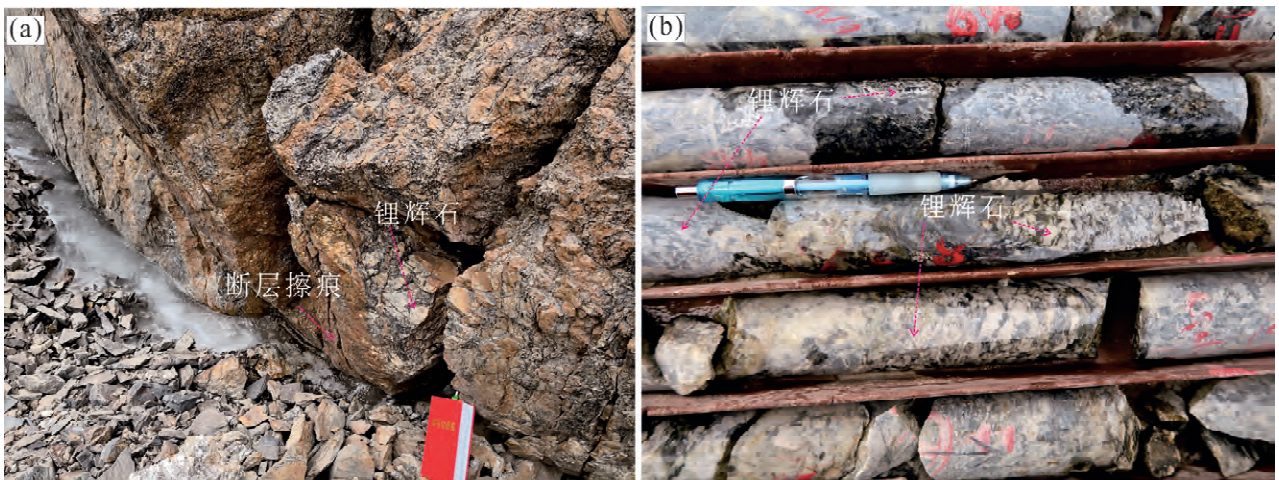


图7 白龙山锂矿全脉矿化

Fig 7 Whole vein mineralization of lithium ore body in Bailongshan lithium deposit

(a)—全脉锂矿化伟晶岩受断层控制;(b)—钻孔全脉锂矿化的岩芯

(a)—the whole vein lithium mineralization pegmatite is controlled by faults; (b)—core of drilling full vein lithium mineralization

矿伟晶岩脉围绕印支期(214~210 Ma)花岗岩体呈南北对称分带的特点,距花岗岩 0.5~2 km;③ 锂矿集中分布在巴颜喀拉群。通过对大红柳滩一带典型矿床解剖发现,大红柳滩矿床产于距离岩体 500~1000 m 的巴颜喀拉群中,木吉一带的卡拉瓦拉矿点产于距离岩体 2000 m 的布伦阔勒群中。

稀有金属矿产与中生代岩浆岩具有耦合关系,成矿的母岩为 218~210 Ma 的中酸性岩浆岩(二长花岗岩、黑云母花岗岩等)演化后期分异的含锂稀有金属伟晶岩脉沿着韧性剪切带的薄弱地段就位成矿,成矿空间为距离中酸性岩体 500~2000 m 的巴颜喀拉群(或布伦阔勒群)中,符合构造-岩浆-层位“三位一体”控矿规律。

3.3.4 锂辉石伟晶岩脉多为全脉矿化

研究区的含锂辉石伟晶岩主要为 2 类,一类为全脉锂辉石矿化的伟晶岩,主要矿物石英、锂辉石为

主,少量的钠长石、白云母,全脉锂辉石矿化的伟晶岩一般呈脉状、脉群带分布,如在在白龙山矿田的白龙山锂矿、509 道班西锂矿、505 锂矿、雪凤岭锂矿中的含矿伟晶岩大部分均为全脉锂辉石矿化,没有明显的内部结构带,这类锂辉石伟晶岩脉一般品位高、成规模,往往一个脉群带就可达到大型锂矿的规模。另一类具有明显的内部结构带的伟晶岩,以木吉一带的锂矿点为代表,如肖尔布隆锂矿点的伟晶岩脉从外向内可分为四个结构带:黑色电气石细晶岩带、中—粗粒伟晶岩带、叶钠长石-白云母-石英带、叶钠长石-石英-锂辉石带(王核等, 2022)。

4 稀有金属成矿预测

近年来,西昆仑-喀喇昆仑造山带东段的大红柳滩-白龙山矿集区找矿已实现了极为重大的突破,目前已寻找到 20 余处稀有金属矿产地,超大型矿床 3

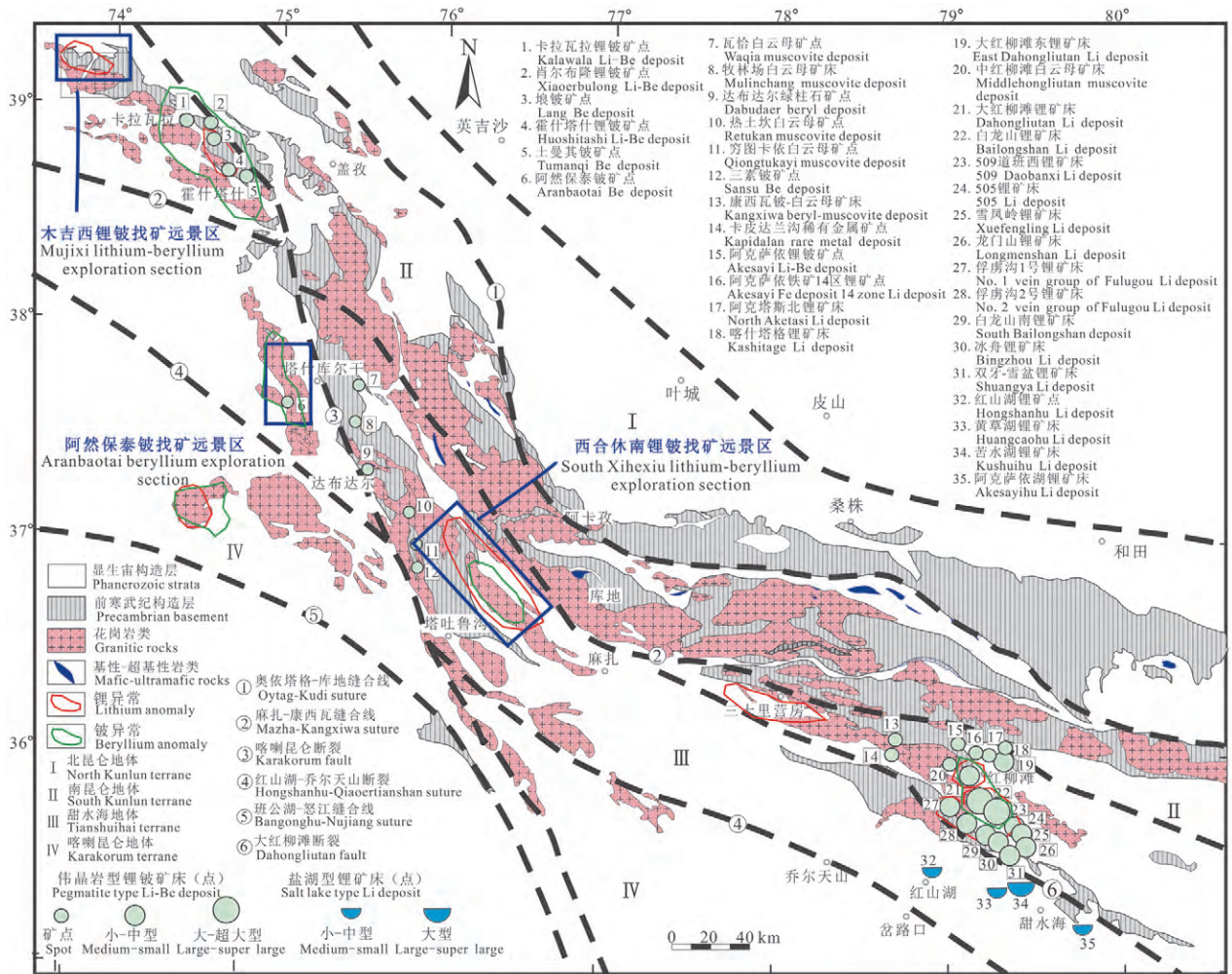


图 8 西昆仑造山带稀有金属预测图(据王核等, 2023)

Fig 8 Predicted map of rare metal in the western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China (after Wang He et al., 2023)

处(白龙山锂矿床、509 道班西锂矿床、505 锂矿床)、中一大型锂矿 8 处(雪凤岭锂矿床、龙门山锂矿床、大红柳滩锂矿床、阿克塔什北锂矿床、大红柳滩东锂矿床、俘虏沟 1 号锂矿床、双牙锂矿床、雪盆锂矿床),已经成为世界级的锂资源基地,今后的找矿工作应围绕着矿区的深边部进行找矿预测。

西昆仑-喀喇昆仑造山带西段的找矿突破地段和选区应根据构造-岩浆-层位“三位一体”控矿的思想,重点围绕 S 型花岗岩并出露有布伦阔勒群层位,并有较好的化探异常区段,本文认为下一阶段的找矿可放在西合休南锂铍找矿远景区、阿然保泰铍找矿远景区、木吉西锂铍找矿远景区(图 8)。西合休南锂铍找矿远景区为塔吐鲁沟北的锂、铍化探异常、西南有三素铍矿点。阿然保泰铍找矿远景区 1:50 万铍的化探异常强度高,我们在这一带也发现了含绿柱石的伟晶岩脉,BeO 品位可达 0.76%,进一步工作有望实现铍矿找矿的突破。木吉西锂铍找矿远景区 1:50 万锂的化探异常强度高,木吉西花岗岩为晚三叠世 S 型花岗岩,成岩年龄 209 Ma,与大红柳滩岩体年代一致,是有利的找矿区段。

5 结论

(1)喀喇昆仑稀有金属成矿带可划分出木吉-塔什库尔干稀有金属成矿亚带和赛图拉-大红柳滩稀有金属成矿亚带,从西向东可划定 4 个矿化集中区:木吉-布伦口稀有金属集中区、塔什库尔干-塔吐鲁沟稀有金属矿化集中区、康西瓦稀有金属矿化集中区、大红柳滩-白龙山稀有金属矿集区。

(2)喀喇昆仑-喀喇昆仑造山带表现为“西铍东锂”的格局,稀有金属成矿年龄集中 213~206 Ma。

(3)西昆仑-喀喇昆仑造山带西段下一阶段的找矿可放在西合休南锂铍找矿远景区、阿然保泰铍找矿远景区、木吉西锂铍找矿远景区。

注 释

- ① 新疆地矿局第二地质大队. 2018. 新疆阿克陶县布伦口北铜、金、稀有金属矿调查评价报告.
- ② 中国科学院广州地球化学研究所. 2021. 和田南部喀喇昆仑稀有金属成矿带成矿规律研究.
- ③ 新疆地矿局第十地质大队. 1994. 和田地区 1:50 万铜、金、宝石、稀有金属成矿预测报告.
- ④ 新疆有色矿业技术有限公司. 2006. 新疆和田县大红柳滩锂辉石矿普查报告.
- ⑤ 河南省地质调查院. 2004. 25 万区域地质调查报告克克吐鲁克幅、塔什库尔干塔吉克自治县幅.
- ⑥ 建筑工程部非金属矿地质公司西北分公司 201 队. 1964. 新疆塔

什库尔干县穹图卡白云母矿区踏勘简报.

- ⑦ 新疆地质局喀什大队六分队. 1960. 新疆叶城县三素云母矿初步勘探中间报告及一九六一年普查勘探设计.
- ⑧ 新疆地质局第二地质大队. 1967. 新疆皮山县康西瓦白云母矿区一号矿脉初步勘探地质报告.
- ⑨ 新疆维吾尔自治区地质调查院. 2015. 新疆和田地区康西瓦一大红柳滩地区矿产地质调查报告(1:50000).
- ⑩ 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局地质矿产勘查研究院. 2021. 新疆和田县大红柳滩北-阿克塔斯铍、钽铌矿普查项目报告.

References

- Bai Hongyang, Wang He, Yan Qinghe, Wang Saimeng, Wang Zhenhong, Zhang Xiaoyu, Gao Hao, Qin Yan. 2022. Columbite-tantalite and cassiterite ages of Xuefengling lithium deposit and their geological significance in West Kunlun, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 2139~2152 (in Chinese with English abstract).
- Bai Hongyang, Wang He, Zhang Xiaoyu, Zhu Bingyu, Wang Kunyu, Huang Liang. 2023. The origin of Xuefengling rare metal pegmatites and implications for ore prospecting in West Kunlun Orogen, China. *Ore Geology Reviews*, 163: 105784.
- Černý P. 1991. Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatitic deposits. *Geoscience Canada*, 18: 49~67.
- Černý P, Ercit T S. 1985. Some recent advances in the mineralogy and geochemistry of Nb and Ta in rare-element granitic pegmatites. *Bulletin de Minéralogie*, 108(3): 499~532.
- Fan Jingjing, Tang Gongjian, Wei Gangjian, Wang He, Xu Yigang, Wang Qiang, Zhou Jinsheng, Zhuo-Ying Zhang, 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. *Lithos*, 352~353: 105236.
- Feng Jing, Jia Hongxu, Xu Shiqi, Chen Jianzhong, Tan Kebin, Wang Houfang, Zhang Peng. 2021. Prospecting model of pegmatite type lithium beryllium deposit in Dahongliutan ore concentration area of West Kunlun and its geological implications. *Xinjiang Geology*, 39(3): 410~417 (in Chinese with English abstract).
- Huo Hailong, Chen Zhengle, Zhang Qing, Wang Yong, Ma Huadong, Wang Wei, Zhang Wengao, Li Yong, Han Fengbin, Du Xiaofei, Min Zhuang, Meng Xiangpeng. 2024. Quartz deformation characteristics, deformation temperature, and their constraints on pegmatites of the 509 Daobanxi lithium deposit in the West Kunlun area, Xinjiang. *Journal of Geomechanics*, 30(1): 72~87 (in Chinese with English abstract).
- Ji Wenhua, Han Fanglin, Wang Juchuan, Zhang Junliang. 2004. Composition and geochemistry of the Subashi ophiolitic mélange in the West Kunlun and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 23(12): 1196~1201 (in Chinese with English abstract).
- Ji Wenhua, Li Rongshe, Chen Shoujian, He Shiping, Zhao Zhenming, Bian Xiaowei, Zhu Haiping, Cui Jigang, Ren Juangang. 2011. The discovery of Palaeoproterozoic volcanic rocks in the Bulunkuoler Group from the Tianshuihai massif in Xinjiang of Northwest China and its geological significance. *Science China Earth Sciences*, 54(1): 61~72 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Chunfa, Wang Zonqi, Li Jinyi. 2000. *Opening-closing Tectonics of the Central Orogenic Belt*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Jiang Yaohui, Jia Ruya, Liu Zheng, Liao Shiyong, Zhao Peng, Zhou Qing. 2013. Origin of Middle Triassic high-K calc-alkaline granitoids and their potassic microgranular enclaves from the western Kunlun Orogen, Northwest China: A record of the closure of Paleo-Tethys. *Lithos*, 156~159: 13~30.

- Li Jiankang, Liu Xifang, Wang Denghong. 2014. The metallogenetic regularity of lithium deposit in China. *Acta Geologica Sinica*, 88 (12): 2269~2282 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Zou Tianren, Liu Xifang, Wang Denghong, Ding Xin. 2015. The metallogenetic regularities of lithium deposits in China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 89 (2): 652~670.
- Li Kan, Gao Yongbao, Teng Jiaxin, Jin Muoshun, Li Wei. 2019. Metallogenic geological characteristics, mineralization age and resource potential of the granite-pegmatite-type rare metal deposits in Dahongliutan area, Hetian County, Xinjiang. *Northwestern Geology*, 52 (4): 206~211 (in Chinese with English abstract).
- 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 the west 509 Daoban Li-Be rare metal deposit in the West Kunlun orogenic belt and its limitation to regional mineralization. *Geology in China*, 49(6): 2031~2033 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Wang Denghong, Liu Xifang, Li Jiankang, Dai Hongzhang, Yan Weidong. 2017. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine. *Geology in China*, 44 (2): 263~278 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zheng, Jiang Yaohui, Jia Ruya, Zhao Peng, Zhou Qing. 2015. Origin of Late Triassic high-K calc-alkaline granitoids and their potassic microgranular enclaves from the western Tibet Plateau, northwest China: implications for Paleo-Tethys evolution. *Gondwana Research*, 27: 326~341.
- Kong Huilei, Ren Guangli, Li Wenyuan¹, Li Kan, Zhao Xiaojian, Zhang Jiangwei, Li Wei. 2023. Geochronology, geochemistry and their geological significances of spodumene pegmatite veins in the Dahongliutandong deposit, western Kunlun, China. *Northwestern Geology*, 56(2): 61~79 (in Chinese with English abstract).
- Pan Yusheng. 1994. Discovery and evidence of the fifth suture zone of Qinghai-Xizang plateau. *Acta Geophysica Sinica*, 37(2): 184~192 (in Chinese with English abstract).
- Pan Yusheng, Zhang Yuquan, Chen Tingen. 1996. Feature and evolution of the Early Paleozoic geology in Kunlun Mts. *Science in China (Series D)*, 26: 302~307.
- Pan Yusheng, Wen Shixuan, Sun Dongli. 2000. *Geological Evolution of the Karakorum-Kunlun Mountains*. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Partington G A. 1990. Environment and structural controls on the intrusion of the giant rare metal Greenbushes pegmatite, Western Australia. *Economic Geology*, 85(3): 437~456.
- Peng Hailian, He Ningqiang, Wang Mancang, Du Biao, Li Wujie, Liu Youqi. 2018. Geological Characteristics and metallogenetic regularity of west track 509 rare polymetallic deposit in Dahongliutan region, Hetian, Xinjiang. *Northwestern Geology*, 51(3): 146~154 (in Chinese with English abstract).
- Tang Junlin, Ke Qiang, Xu Xingwang, Kang Kai, Li Hang, Tan Kebin, Dong Lianhui, Liu Yangjun. 2022. Magma evolution and mineralization of Longmenshan lithium-beryllium pegmatite in Dahongliutan area, West Kunlun. *Acta Petrologica Sinica*, 38 (3): 655~675 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Sun Yan, Liu Xifang, Tian Shihong, Dai Jingjing, Liu Lijun, Ma Shengchao. 2018. Deep exploration technology and prospecting direction for lithium energy metal. *Geological Survey of China*, 5(1): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Wang He, Li Pei, Ma Huadong, Zhu Bingyu, Qiu Lin, Zhang Xiaoyu, Dong Rui, Zhou Kailin, Wang Ming, Wang Qian, Yan Qinghe, Wei Xiaopeng, Gao Hao. 2017. Discovery and its prospecting implication of Bailongshan Superlarge lithium-rubidium deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(6): 1053~1062 (in Chinese with English abstract).
- Wang He, Gao Hao, Ma Huadong, Zhu Bingyu, Xin Chunhui, Zhou Kailin, Zhu Baozhang, Wang Zhenghong, Wang Ming, Dong Rui, Yan Qinghe, Zhang Xiaoyu. 2020. Preliminary study on geological characteristics and pegmatite vein group zoning of Xuefengling lithium deposit, Xuepen lithium deposit, Shuangya lithium deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 44 (1): 57~68 (in Chinese with English abstract).
- Wang He, Gao Hao, Zhang Xiaoyu, Yan Qinghe, Xu Yigang, Zhou Kailin, Dong Rui, Li Pei. 2020. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li-Rb-(Be) rare-metal pegmatite deposit, West Kunlun orogenic belt, NW China. *Lithos*, 360: 105449.
- Wang He, Xu Yigang, Yan Qinghe, Zhang Xiaoyu. 2021. Research progress of Bailongshan pegmatite type lithium deposit, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 95 (10): 3085~3098 (in Chinese with English abstract).
- Wang He, Gao Hao, Wang Saimeng, Yan Qinghe, Wang Zhenhong, Huang Liang, Qin Yan. 2022. Zircon and columbite-tantalite U-Pb geochronology of Li-Be rare metal pegmatite and its geological significance in Muji area, West Kunlun, China. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 1937~1951 (in Chinese with English abstract).
- Wang He, Huang Liang, Ma Huadong, Li Yong, Wang Wei, Xiao Fei, Bai Hongyang, Wang Kunyu. 2023. Geological characteristics and metallogenetic regularity of lithium deposits in Dahongliutan-Bailongshan area, West Kunlun, China. *Acta Petrologica Sinica*, 39(7): 1931~1949 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Hattori K, Liu Jianguo, Song Yue, Gao Yongbao, Zhang Han. 2017. Shoshonitic- and adakitic magmatism of the Early Paleozoic age in the Western Kunlun orogenic belt, NW China: Implications for the early evolution of the northwestern Tibetan plateau. *Lithos*, 286-287: 345-362.
- Wang Wei, Ma Huadong, Wang Jiaxin, Zhu Bingyu, Liu Xianjun. 2021. Age of the rare metal (rare earth metals) bearing pegmatite and carbonatite in Tashikorgan, Xinjiang: Implications for rare metal mineralization in the Pamir Syntax. *Geological Review*, 67 (42): 1119~1128 (in Chinese with English abstract).
- Wei Xiaopeng, Wang He, Hu Jun, Mu Shenglu, Li Pei, Qiu Zengwang, Yan Qinghe. 2017. Geochemistry and geochronology of Dahongliutan two-mica granite pluton, Western Kunlun orogen; Implication for tectonic. *Geochimica*, 46(1): 66~80 (in Chinese with English abstract).
- Wei Xiaopeng, Wang He, Zhang Xiaoyu, Dong Rui, Zhu Shibo, Li Pei, Yan Qinhe, Zhou Kailin. 2018. Petrogenesis of Triassic high-Mg diorites in the Western Kunlun Orogen and its tectonic implication. *Geochimica*, 47 (4): 363~379 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Wan Bo, Zhao Liang, Xiao Wenjiao, Zhu Rixiang. 2020. Tethyan geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 36 (6): 1627~1674 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yufeng, Wang He, Huang Chaoyang, Hu Jun, Liu Jianping, Ren Guangli. 2013. Geochemistry and geochronology of the Kalaguorum porphyry Cu-mineralized intrusions, Karakorum Mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 205~216 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Chen Hanlin, Zhang Guocheng, Li Jiliang. 2002. Carboniferous-Triassic subduction and accretion in the western Kunlun, China: Implications for the collisional and accretionary tectonics of the northern Tibetan Plateau. *Geology*, 30(4): 295~298.
- Xiao Wenjiao, Han Fanglin, Windley B F, Yuan Chao, Zhou Hui, Li Jiliang. 2003. Multiple accretionary orogenesis and episodic growth of continents: Insights from the Western Kunlun range, central Asia. *International Geology Review*, 45(4): 303~328.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Liu Dunyi, Jian Ping, Liu Chuanzhou, Yuan Cao, Sun Min. 2005. Accretionary tectonics of the Western Kunlun Orogen, China: A Palaeozoic-early Mesozoic,

- long lived active continental margin with implications for the growth of southern Eurasia. *Journal of Geology*, 113: 687~705.
- Xing Changming, Wang Christina Yan, Wang He. 2020. Magmatic-hydrothermal processes recorded by muscovite and columbite-group minerals from the Bailongshan rare-element pegmatites in the West Kunlun-Karakorum orogenic belt, NW China. *Lithos*, 364~365: 105507.
- Xu Zhiqin, Wang Rucheng, Zhao Zhongbao, Fu Xiaofang. 2018. On the structural background of the large-scale "hard-rock type" lithium ore belts in China. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 1091~1106(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Zhu Wenbin, Zheng Bihai, Shu Liangshu, Li Guangwei, Che Xudong, Qin Yulong. 2021. New energy strategy for lithium resource and the continental dynamics research—Celebrating the centenary of the School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 2937~2954(in Chinese with English abstract).
- 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. *Ore Geology Reviews*, 100: 561~573.
- Yan Qinghe, Wang He, Chi Guoxiang, Wang Qiang, Hu Huan, Zhou Kailin Zhang Xiaoyu. 2022. Recognition of a 600-km-long Late Triassic rare-metal (Li-Rb-Be-Nb-Ta) pegmatite belt in the Western Kunlun orogenic belt, western China. *Economic Geology*, 117(1): 213~236.
- Yin Rong, Huang Xiaolong, Xu Yigang, Wang Rucheng, Wang He, Yuan Chao, Ma Qiang, Sun Xiaoming, Chen Linli. 2020. Mineralogical constraints on the magmatic-hydrothermal evolution of rare-elements deposits in the Bailongshan granitic pegmatites, Xinjiang, NW China. *Lithos*, 352~353: 105208.
- Yuan Chao, Sun Min, Zhou Meifu, Xiao Wenjiao, Zhou Hui. 2005. Geochemistry and petrogenesis of the Yishak Volcanic sequence, Kudi ophiolite, West Kunlun (NW China): implications for the magmatic evolution in a subduction zone environment. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 150, 195~211.
- Zagorsky V Y, Vladimirov A G, Makagon V M, Kuznetsova L G, Smirnov S Z, D'yachkov B A, Annikova I Y, Shokalsky S P, Uvarov A N. 2014. Large fields of spodumene pegmatites in the settings of rifting and postcollisional shear-pull-apart dislocations of continental lithosphere. *Russian Geology and Geophysics*, 55(2): 237~251.
- Zhai Mingguo, Wu Fuyuan, Hu Ruizhong, Jiang Shaoyong, Li Wenchang, Wang Rucheng, Wang Denghong, Qi Tao, Qin Kezhang, Wen Hanjie. 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues. *Science Foundation in China*, 2: 106~111(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chuanlin, Zou Haibo, Ye Xiantao, Chen Xiangyan. 2018. Tectonic evolution of the NE section of the Pamir Plateau: New evidence from field observations and zircon U-Pb geochronology. *Tectonophysics*, 723: 27~40.
- Zhang Chuanlin, Ma Hadong, Zhu Binyu, Ye Xiantao, Qiu Lin, Zhao Haixiang, Liu Xiaoqiang, Ding Teng, Wang Qian, Hao Xiaosu. 2019. Tectonic evolution of the Western Kunlun-Karakorum orogenic belt and its coupling with the mineralization effect. *Geological Review*, 65(5): 1077~1102(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoyu, Wang He, Yan Qinghe. 2022. Garnet geochemical compositions of the Bailongshan lithium polymetallic deposit in Xinjiang Province: Implications for magmatic-hydrothermal evolution. *Ore Geology Reviews*, 150: 105178.
- Zhang Yu, Niu Yaoling, Hu Yan, Liu Jinju, Ye Lei, Kong Juanjuan, Duan Meng. 2016. The syncollisional granitoid magmatism and continental crust growth in the West Kunlun Orogen, China—Evidence from geochronology and geochemistry of the Arkarz pluton. *Lithos*, 245: 191~204.
- Zhang Ze, Liang Ting, Feng Yonggang, Yang Xiuqing, Li Kan, Ding Kun. 2019. Geological feature and chronology study of Kangxiwar beryl-bearing muscovite pegmatite in Western Kunlun orogen, Xinjiang. *Northwestern Geology*, 52(1): 75~88(in Chinese with English abstract).
- Zhao Hui, Chen Bin, Zheng Beiqi, Yang Qian. 2024. Petrogenesis of Mesozoic pegmatites in the Dahongliutan Li-mineralized belt (Western Kunlun, NW China). *Journal of Asian Earth Sciences*, 264: 106076.
- Zhou Jinsheng, Wang Qiang, Xu Yigang, Cempirek J, Wang He, Ma Jinlong, Wei Gangjian, Huang Tongyu, Zhu Guanhong, 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. *Chemical Geology*, 584: 120484.

参 考 文 献

- 白洪阳, 王核, 闫庆贺, 王赛蒙, 王振宏, 张晓宇, 高昊, 秦艳. 2022. 新疆西昆仑雪凤岭锂矿床钽铁矿、锡石年龄及其地质意义. *岩石学报*, 38(7): 2139~2152.
- 冯京, 贾红旭, 徐仕琪, 陈建中, 谭克彬, 王厚方, 张朋. 2021. 西昆仑大红柳滩矿集区伟晶岩型锂铍矿床找矿模型及意义. *新疆地质*, 39(3): 410~417.
- 霍海龙, 陈正乐, 张青, 王永, 马华东, 王威, 张文高, 李永, 韩凤彬, 杜晓飞, 闵壮, 孟祥鹏. 2024. 新疆西昆仑 509 道班西锂矿伟晶岩石英变形特征、温度及其对伟晶岩就位的约束. *地质力学学报*, 30(1): 72~87.
- 计文化, 韩芳林, 王炬川, 张俊量. 2004. 西昆仑于田南部苏巴什蛇绿混杂岩的组成、地球化学特征及地质意义. *地质通报*, 23(12): 1196~1201.
- 计文化, 李荣社, 陈守建, 何世平, 赵振明, 边小卫, 朱海平, 崔继岗, 任绢刚. 2011. 甜水海地块古元古代火山岩的发现及其地质意义. *中国科学: 地球科学*, 41(9): 1268~1280.
- 姜春发, 王宗起, 李锦轶. 2000. 中央造山带开合构造. 北京: 地质出版社.
- 李建康, 刘喜方, 王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要. *地质学报*, 88(12): 2269~2283.
- 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花岗伟晶岩型稀有金属矿成矿地质特征、成矿时代及找矿方向. *西北地质*, 52(4): 206~221.
- 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 509 道班西锂铍稀有金属矿白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年及对区域成矿的限定. *中国地质*, 49(6): 2031~2033.
- 刘丽君, 王登红, 刘喜方, 李建康, 代鸿章, 闫卫东. 2017. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查发现现状. *中国地质*, 44(2): 263~278.
- 孔会磊, 任广利, 李文渊, 李侃, 赵晓健, 张江伟, 李伟. 2023. 西昆仑大红柳滩东含锂辉石花岗伟晶岩脉年代学和地球化学特征及其地质意义. *西北地质*, 56(2): 61~79.
- 潘裕生. 1994. 青藏高原第五缝合带的发现与论证. *地球物理学报*, 37(2): 184~192.
- 潘裕生, 文世宣, 孙东立等. 2000. 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化. 北京: 科学出版社.
- 彭海练, 贺宁强, 王满仓, 杜彪, 李武杰, 刘幼骥. 2018. 新疆和田县大红柳滩地区 509 道班西稀有金属矿地质特征与成矿规律探讨. *西北地质*, 51(3): 146~154.
- 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. *岩石学报*, 38(3): 655~675.
- 王登红, 孙艳, 刘喜方, 田世洪, 代晶晶, 刘丽君, 马圣钞. 2018. 锂能源金属矿产深部探测技术与找矿方向. *中国地质调查*, 5(1): 1~9.
- 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

- 白龙山超大型伟晶岩型锂铷多金属矿床的发现及其意义. 大地构造与成矿学, 41(6): 1053~1062.
- 王核, 高昊, 马华东, 朱炳玉, 邢春辉, 周楷麟, 朱宝彰, 王振宏, 王敏, 董瑞, 闫庆贺, 张晓宇. 2020. 新疆和田县雪风岭锂矿床、雪盆锂矿床和双牙锂矿床地质特征及伟晶岩脉群分带初步研究. 大地构造与成矿学, 44(1): 57~68.
- 王核, 徐义刚, 闫庆贺, 张晓宇. 2021. 新疆白龙山伟晶岩型锂矿床研究进展. 地质学报, 95(10): 3085~3098.
- 王核, 高昊, 闫庆贺, 王赛蒙, 王振宏, 张晓宇, 秦艳. 2022. 西昆仑木吉地区锂铍稀有金属伟晶岩锆石及铷钽铁矿 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. 岩石学报, 38(7): 1927~1951.
- 王核, 黄亮, 马华东, 李永, 王威, 肖飞, 白洪阳, 王堃宇. 2023. 西昆仑大红柳滩-白龙山矿集区锂矿成矿特征与成矿规律初探. 岩石学报, 39(7): 1931~1949.
- 王威, 马华东, 王家鑫, 朱炳玉, 柳献军. 2021. 新疆塔什库勒干县含稀有金属伟晶岩碳酸岩的时代——对帕米尔构造结稀有金属成矿作用的启示. 地质论评, 67(42): 1119~1128.
- 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. 地球化学, 46(1): 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. 地球化学, 47(4): 363~379.
- 吴福元, 万博, 赵亮, 肖文交, 朱日祥. 2020. 特提斯地球动力学. 岩石学报, 36(6): 1627~1674.
- 吴玉峰, 王核, 黄朝阳, 胡军, 刘建平, 任广利. 2013. 新疆喀喇昆仑喀拉果如木铜矿成矿岩体地球化学和锆石年代学. 岩石学报, 29(1): 205~216.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 付小方. 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景. 地质学报, 92(6): 1091~1106.
- 许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 舒良树, 李广伟, 车旭东, 秦宇龙. 2021. 新能源锂矿战略与大陆动力学研究——纪念南京大学地球科学与工程学院 100 周年华诞. 地质学报, 95(10): 2937~2954.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. 中国科学基金, 33(2): 106~111.
- 张传林, 马华东, 朱炳玉, 叶现韬, 邱林, 赵海香, 刘晓强, 丁腾, 王倩, 郝晓妹. 2019. 西昆仑—喀喇昆仑造山带构造演化及其成矿效应. 地质论评, 65(5): 1077~1102.
- 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. 西北地质, 52(1): 75~88.

Geological characteristics and metallogenic regularity of the lithium deposit in West Kunlun-Karakoram orogenic belts, Xinjiang

WANG He^{*1,2,3,4}, WANG Kunyu^{1,2}, GAO Hao^{1,2}, WEI Xiaopeng^{1,2}, LONG Yubing^{1,2}, HUANG Liang^{1,2}, ZHANG Xiaoyu^{1,2}, ZHANG Song^{1,2}, CAI Mingze^{1,2}, SHEN Minghong^{1,2}

1) Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3) The Research Center Resource and Environment of Xinjiang, Urumqi, Xinjiang 830000, China;

4) Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China

*Corresponding author: wanghe@gig.ac.cn

Abstract

The Mesozoic granitic pegmatites of the West Kunlun-Karakoram orogenic belt are remarkably well-developed, mainly distributed within the Karakoram orogenic belt. This belt, located south of the Maza Kangxiwa suture zone, stretches for an impressive 600 km from Muji Taxkorgan in the west to Dahongliutan in the east, forming a significant Karakoram rare metal mineralization belt. This study presents a comprehensive and systematic analysis of 37 rare metal deposits hosted within the West Kunlun-Karakoram orogenic belt. The Karakoram orogenic belt exhibits a striking spatial pattern, with beryllium deposits dominating the west and lithium deposits concentrated in the east. The age of rare metal mineralization in this region is primarily clustered between 213 and 206 Ma. The Karakoram orogenic belt can be subdivided into two distinct sub-belts: the Muji-Taxkorgan rare metal mineralization sub-belt and the Saitura-Dahongliutan rare metal mineralization sub-belt. From west to east, four rare metal mineralization concentration areas can be identified: Muji-Bolunkou, Tashkurgan-Tatulugou, Kangxiwa, and Dahongliutan-Bailongshan. This research suggests that the next stage of mineral exploration in the western section of the West Kunlun-Karakoram region can be focused on the Xihexiu South lithium beryllium exploration section, the Aranbaotai beryllium exploration section, and the Mujixi lithium beryllium exploration section.

Key words: West Kunlun-Karakoram orogenic belts; lithium ore deposit; metallogenic characteristics; metallogenic regularity