



引文格式: 解程皓, 李永, 刘伟, 等. 新疆和田县 509 道班西锂矿地质构造特征及控矿构造研究[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 234–249. DOI: 10.12401/j.nwg.2025001

Citation: XIE Chenghao, LI Yong, LIU Wei, et al. Geological Structural Characteristics and Ore-controlling Structures of the West 509-Daoban Li Deposit, Hetian, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 234–249. DOI: 10.12401/j.nwg.2025001

新疆和田县 509 道班西锂矿地质构造 特征及控矿构造研究

解程皓¹, 李永^{1,2}, 刘伟¹, 李国军¹, 陈正乐³, 王来兴¹, 王彦龙¹

(1. 新疆维吾尔自治区地质研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083;
3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 509 道班西锂矿位于西昆仑-喀喇昆仑山脉东段, 特提斯构造域北缘, 是最近认定的超大型伟晶岩型锂矿。通过对矿区地质构造及控矿构造的研究, 厘清了该矿区的构造特征及构造控矿模式。该矿床出露在三叠系巴彦喀拉山群浅变质碎屑岩中, 处于大红柳滩-郭扎错断裂与奇台达板断裂之间, 矿区内及其周边岩浆岩较发育, 受断裂构造控制, 主构造方向呈 NW-SE 向。结合区域演化事件, 对构造-岩浆控矿模式展开研究发现, 矿体形成、就位及后期改造主要受三期构造控制。①成矿期前: 受二叠纪—三叠纪 NE-SW 向构造挤压应力影响, 地层形成韧性逆冲走滑断层, 为矿体运移就位提供了空间。②成矿期: 晚三叠世末期岩浆岩侵位伴生形成的一系列张裂隙(节理)为含矿岩浆热液运移与矿质富集提供了有利空间, 形成超大型锂矿。③成矿期后, 白垩纪—第四纪受印度洋板块与亚欧板块碰撞影响, 矿区内发育脆性破矿构造, 矿体受到有限破坏。这些认识对矿区外围及深部找矿工作具有重要的指导意义。

关键词: 构造地质; 伟晶岩; 控矿构造; 509 道班西; 西昆仑

中图分类号: P613; P618.71

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0234-16

Geological Structural Characteristics and Ore-controlling Structures of the West 509-Daoban Li Deposit, Hetian, Xinjiang

XIE Chenghao¹, LI Yong^{1,2}, LIU Wei¹, LI Guojun¹, CHEN Zhengle³, WANG Laixing¹, WANG Yanlong¹

(1. Geological and Mineral Prospecting Research Institute of Nonferrous Geological Prospecting Bureau of Xinjiang, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 2. Central South University School of Earth Science and Information Physics, Changsha 410083, Hunan, China;
3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The west 509-Daoban Li deposit is located in the eastern section of the West Kunlun and Karakunlun mountain ranges, at the northern edge of the Tethys tectonic domain, and is a newly identified ultra-large pegmatitic Li deposit. Through the study of the geological structure and ore-control structure of the mine area,

收稿日期: 2023-05-25; 修回日期: 2024-01-27; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金项目“西昆仑-松潘甘孜伟晶岩型锂等大型稀有金属成矿带成矿规律与找矿潜力研究”(92262302)。

作者简介: 解程皓(1991-), 男, 工程师, 主要从事构造地质学及矿产勘查工作。E-mail: 292045101@qq.com。

the tectonic features and ore-control pattern of the mine area have been clarified. The deposit is exposed in the shallow metamorphic clastic rocks of the Triassic Bayankhara Mountain Group, and is located between the Dahongliutan-Guozhazhong Fault and the Qitai Daban Fault, with the magmatic rocks in and around the mine area being more developed and controlled by fracture structures, with the main tectonic direction being NW-SE. Combined with the regional evolutionary events, the study of tectonic-magmatic ore-control model reveals that the formation, seating of the ore body and its later transformation are mainly controlled by three phases of tectonics. ① Pre-Mineralization: The Permian-Triassic NE-SW directional extrusion formed a ductile retrograde slip fault, which provided space for the ore body to be transported into position. ② Ore-forming period: A series of tensional fissures (joints) formed at the end of the Late Triassic with the intrusion of magmatic rocks provided favorable space for hydrothermal transport and mineral enrichment of mineral-bearing magma, resulting in the formation of mega lithium ore. ③ After the metallogenic period, the ore body was limitedly damaged by the impact of the collision between the Indian Ocean plate and the Asian-European plate in the Cretaceous-Quaternary period, and brittle ore-breaking structures were developed in the mine area. These understandings are of great significance in guiding the search for mineralization at the periphery and depth of the mine.

Keywords: tectonic geology; pegmatites; ore control structures; West 509-Daoban; West Kunlun

西昆仑-喀喇昆仑造山带横亘于青藏高原西北缘,塔里木盆地西南缘,东连阿尔金山,西接帕米尔高原,近EW向展布,绵延2000余km,是古亚洲构造域与特提斯构造域结合、转换地带。它经历了原特提斯-中新特提斯时期数次板块开合运动及新生代印度洋板块与亚洲板块碰撞造山的漫长地质改造(Matte et al., 1992,1996; Mattern et al., 2000; Yin et al., 2000; Xiao et al., 2001, 2002a, 2002b, 2005; Wang, 2004; Jiang et al., 2005, 2008, 2013),地质构造复杂,拥有优越的找矿前景(肖序常等, 1990; 潘裕生, 1990,1994; 姜春发等 1992; 肖文交等, 2000; 潘桂棠等, 2001,2002; 李荣社等, 2004,2007, 2008a,2008b; 张传林等, 2007,2019; 计文化等, 2007; 董连慧等, 2010; Zhang et al., 2011; Bershaw et al., 2012)。迄今为止该区已发现铁、铜、铅锌、稀有金属等多类型矿种,例如南华纪的南屏雪山沉积型赤铁矿床(Hu et al., 2016; 胡军等, 2017)、新元古代—早寒武世的赞坎超大型沉积-变质型磁铁矿床(Zhang et al., 2018)、中侏罗统萨岔口、火烧云等大型-超大型铅锌矿床(董连慧等, 2015, 认为的 Sedex 型或是高永宝等, 2019, 认为的热液-围岩交代型, 仍存在一定争议)、中生代早期的伟晶岩型稀有金属矿床,如阿克塔斯、阿克塔斯北、大红柳滩东、大红柳滩南、509道班西、俘虏沟2号、龙门山等(王核等, 2017,2020, 2021; 彭海练等, 2018; 李侃等, 2019, 孔会磊等, 2023)。其中,陕西省地质调查院发现的509道班西伟晶岩型锂矿(彭海练, 2018)目前已探明为超大型伟晶岩型锂矿, Li_2O 资源量超过120万t,具有巨大的经济价值。

西昆仑-喀喇昆仑地区中生代花岗伟晶岩发育,其中以大红柳滩地区最为发育,是新疆重要的花岗伟晶岩型稀有金属成矿带,找矿前景巨大。前人对该地区伟晶岩型矿床已陆续开展了年代学、地球化学、矿物学、矿床成因及遥感等研究(乔耿彪等, 2015, 2020; 王核等, 2017; 彭海练等, 2018; 凤永刚等, 2019; 李侃等, 2019; 金谋顺等, 2019; 史明震等, 2020; Gao et al., 2020; 任广利等, 2022; 唐俊林等, 2022; 李文渊等, 2022, 2023),取得了较为系统的认识。伟晶岩型稀有金属矿主要分布在大红柳滩岩体外围巴彦喀拉山群地层中,一般认为是花岗质岩浆结晶分异所形成。侵位方向受岩体附近NW-SE向裂隙构造控制(李侃, 2019)。锆石U-Pb测年显示大红柳滩岩体形成于217~209 Ma(乔耿彪, 2015, 2020),岩石地球化学显示为高钾钙碱性系列S型花岗岩(李文渊等, 2022)。伟晶岩年龄较之略晚,形成于200.8~179.36 Ma(Liu et al., 2020; 谭克彬等, 2021; 李永等, 2022),同位素示踪显示具有明显的壳缘属性,反映其为下地壳部分熔融形成的S型花岗岩在岩浆演化末期结晶分异所形成(孔会磊等, 2023)。综合年代学、地球化学及区域构造背景,大红柳滩地区的伟晶岩型矿床均形成于甜水海地体与南昆仑地体后碰撞伸展环境(魏小鹏等, 2017; 李文渊等, 2022; 孔会磊等, 2023)。尽管大量的地质、地球化学及遥感解译等证据论证了该区伟晶岩型稀有金属矿与大红柳滩岩体的演化分异相关,并受控于NW-SE方向构造,但由于高原环境恶劣,地表冰川、冻土覆盖严重,其具体受何种构造控制?其空间形态及分布规

律又受到怎样的控制等问题还亟待解决。

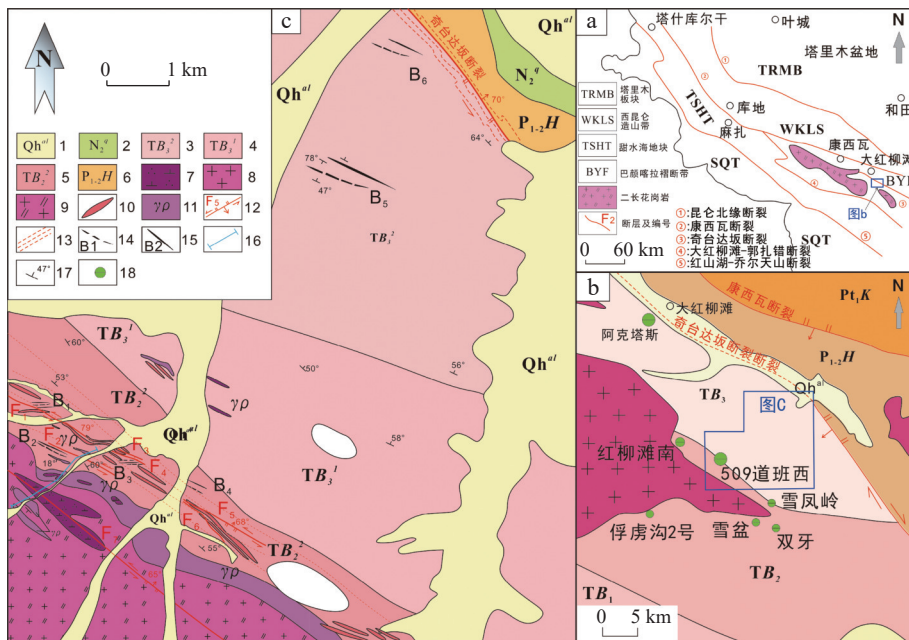
509 道班西锂矿区地处青藏高原西北缘,甜水海地体与南昆仑地体之间褶皱冲断带内(图 1a),经历了自中生代以来复杂的构造演化,包括三叠纪时期古特提斯洋闭合碰撞(张传林等 2005)、晚三叠世末期与俯冲相关的岩浆演化、变质、变形作用(王核等, 2017; 彭海练等, 2018)、白垩纪—新生代与喜马拉雅造山运动相关的构造运动(葛成隆, 2017)使得矿床构造情况较为复杂。长期以来对 509 道班西伟晶岩型锂矿床的研究主要集中在其大地构造属性及外围区域构造特征上,对该矿床的控矿构造行迹、岩浆—构造体系对矿床控制作用及后期破矿构造等研究仍然较薄弱。随着矿区勘查程度的提高,探矿工程的进一步施工,矿区构造样式和构造—岩浆控矿模式也需要进一步研究。

笔者围绕 509 道班西锂矿的岩浆—构造特征,利用钻孔、槽探工程及大比例尺矿区构造填图资料为依据,查明矿区构造变形特征、构造性质,厘清矿区构造序次及对矿体形成的控制及破坏作用,建立岩浆—构造控矿模式,对矿区深部及周边地质找矿工作具有重要参考价值。

1 区域地质特征

509 道班西锂矿属西昆仑大红柳滩铁、铅、锌、铜及稀有金属成矿带内的典型稀有金属矿床,按照 Černý (1991)、Černý 等(2005)的分类,该矿床应属于 LCT 型伟晶岩矿床。区域构造位置处于青藏高原西北缘,甜水海地块东段,巴彦喀拉褶断带内。矿区以北有奇台达坂断裂、康西瓦断裂穿过,以南为大红柳滩—郭扎错断裂(图 1a)。

区域内地层出露有古元古界康西瓦岩群的一套深变质、强变形的灰色二云母石英片岩、黑云母斜长片麻岩等;中元古界长城系赛图拉岩群的一套斜长黑云石英片岩、斜长浅粒岩、混合片麻岩等;中元古界长城系甜水海岩群是一套滨—浅海相碎屑岩夹灰岩、大理岩、硅质岩等;古生界二叠系黄羊岭群是一套浅变质含砾细粒长石岩屑砂岩、变质细粒长石岩屑杂砂岩等;中生界三叠系巴彦喀拉山群是一套浅变质长石岩屑砂岩、长石石英砂岩、泥质粉砂岩、透辉石角岩等,509 道班西锂矿就赋存于该群的上、中组地层中;



- 1.第四系冲洪积相; 2.上新统泉水沟组; 3.巴彦喀拉山群上组上段; 4.巴彦喀拉山群上组下段; 5.巴彦喀拉山群中组上段;
- 6.二叠系黄羊岭群; 7.三叠纪花岗岩伟晶岩; 8.石英闪长岩; 9.三叠系花岗岩; 10.三叠系二云母花岗岩; 11.含锂辉石伟晶岩脉; 12.左旋逆冲断层; 13.劈理; 14.向斜褶皱轴迹; 15.背斜褶皱轴迹; 16.构造剖面位置; 17.产状; 18.锂矿

图1 西昆仑地区大地构造位置图(a.据乔耿彪等, 2020 修改)、大红柳滩区域地质图(b.据王威等, 2022 修改)及

509 道班西锂矿稀有金属矿床地质简图(c.内部资料)

Fig. 1 (a) Geotectonic position in the West Kunlun, (b) regional geological map of Dahongliutan, and (c) geological sketch of the West 509-Daoban Li-Be rare metal deposit

新生界新近系泉水沟组,主要岩性为深褐色粗面岩、辉石安山岩、粗安岩等。

区域上受多条缝合带的汇聚以及康西瓦断裂等区域构造的影响,西昆仑-喀喇昆仑造山带内逆冲走滑作用强烈,构造活动异常频繁,断裂构造较为发育,具多层次、多阶段、多类型特点,形迹十分复杂,岩石类型多样,主体构造线呈NW-SE向。褶皱构造不发育,多为断层牵引导致层间小褶皱,地层主体为单斜产出,产状为 $210^{\circ}\sim 230^{\circ}\angle 50^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 。区内断裂构造主要分NW向和NE向两组,以NW向断裂最为发育,主要有康西瓦断裂、奇台达坂断裂和大红柳滩-郭扎错断裂等。康西瓦断裂为区域性大断裂,控制区域地层及岩浆展布。断层倾向NE,断层带宽数百米-上千米,发育糜棱岩带、强片理化带及角砾岩,具有两期构造活动特征,早期(约200 Ma)为右旋韧性逆冲性质,晚期(约120~130 Ma)为脆性左旋逆冲性质(葛成隆, 2017)。矿区南侧的大红柳滩-郭扎错断裂呈NW-SE向波状展布,断裂带宽约100~200 m,发育有长英质糜棱岩强片理化岩石等,具有两期活动特征,早期主要表现为脆韧性张性走滑正断裂,晚期主要表现为逆冲-走滑性质。该断裂带是巴彦喀拉边缘裂陷带的南界断裂。奇台达坂断裂切穿矿区北部,断裂带宽约为100~200 m,倾向NE,倾角为 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。主要发育长英质糜棱岩、糜棱岩化砂岩等。该断裂具有两期活动的特征,早期主要表现为韧性走滑逆冲,晚期则表现脆性平移走滑性质,是古元古界康西瓦岩群与三叠系巴彦喀拉山群的分界断裂。大红柳滩-郭扎错断裂和奇台达坂断裂控制了矿区内的地层格架和岩浆岩的分布,是区内最重要的稀有金属矿的控矿断裂。

矿区所处区域,岩浆活动十分频繁,主要发育早古生代三十里营房-康西瓦岩浆岩带及中生代的三十里营房-泉水沟岩浆岩带。三十里营房-康西瓦岩浆岩带侵入岩呈带状展布于康西瓦断裂以北,侵入于长城系赛图拉岩群一套中深变质碎屑岩及碳酸盐岩之中,主体组成岩石为灰色中粒黑云母石英闪长岩。三十里营房-泉水沟岩浆岩带广泛分布于奇台达坂断裂南西地区,多为规模巨大的岩基状产出,均为三叠纪侵入岩。主要岩性为二长花岗岩、二云母二长花岗岩、黑云母二长花岗岩、黑云母花岗闪长岩、粒英云闪长岩及黑云母花岗闪长岩等6种,之间均为脉动侵入关系。形成年龄集中在(209.6 $\pm$ 1.5~217.4 $\pm$ 2.2) Ma(乔耿彪等, 2015; 魏小鹏等, 2018; 唐俊林等, 2022)。岩体周

围脉岩较为发育,并具有多期次、多类型的特点,尤其以伟晶岩脉、花岗岩脉及石英脉较为发育,成群密集分布。

2 矿区地质概况

2.1 地层及岩性

矿区主体地层为三叠系巴彦喀拉山群一套陆源碎屑岩,沿NW-SE主构造方向展布,与南侧的晚三叠世二云二长花岗岩体呈侵入接触关系(图1a),是含矿伟晶岩的直接围岩。根据岩性组合可分为中组上段(TB_2^2)的灰黑色变质细粒长石砂岩、变粉砂岩夹透辉石角岩岩性组合;上组下段(TB_3^1)的灰褐色变长石石英砂岩、灰黑色变粉砂岩岩性组合;上组上段(TB_3^1)的浅灰色变长石砂岩、灰黑色变泥质粉砂岩岩性组合。受变质作用影响部分碎屑和胶结物发生变质重结晶,被黑云母、电气石等取代,岩石表面可见绢云母化、绿泥石化蚀变,属区域变质作用,达低绿片岩相。受构造影响,地层中板劈理、次级断层、层间褶皱发育,断裂或挤压构造带附近岩石受动力变质作用改造形成黑云石英片岩。靠近岩体或岩脉等热源的地层在区域变质作用基础上受热变质作用改造,形成透辉石角岩。以矿区北部奇台达坂断裂为界,北东侧出露二叠系黄羊岭群($P_{1-2}H$)的灰褐色含砾变质长石岩屑砂岩、粉砂岩,岩石发生强劈理化、地表露头风化较重,多成土状。黄羊岭群北东向出露少量新近系上新统泉水沟组(N_2q)的粗面岩、辉石安山岩等火山熔岩,角度不整合于黄羊岭群之上。

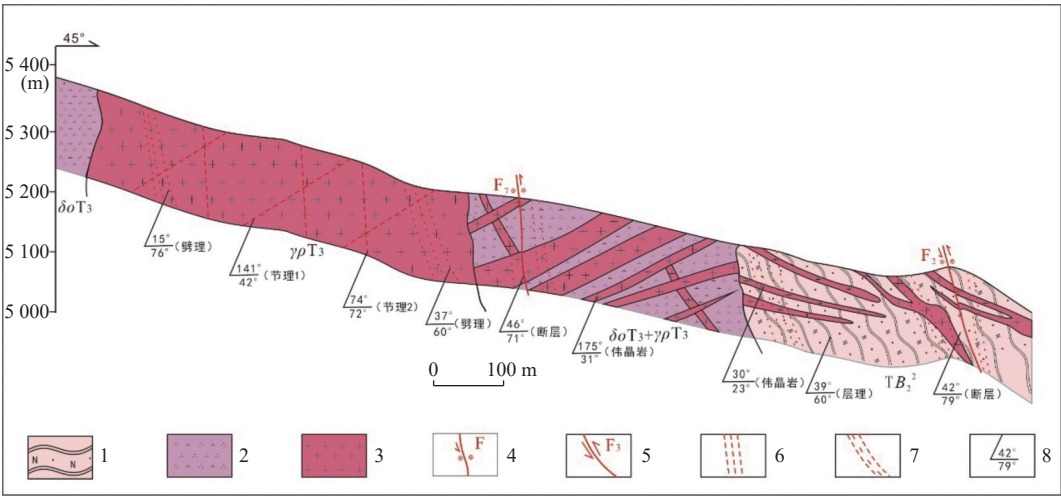
2.2 构造特征

矿区内存在多期构造,以韧性、脆性断裂或次级断裂,层间褶皱,张裂隙、剪裂隙构造为主(图2)。

2.2.1 断层构造特征

矿区断层构造主要为NW-SE走向次级断层,且存在多期活动特征,可见早期NE倾向韧性逆冲走滑性质的断层及后期脆性逆冲走滑性质的断层。

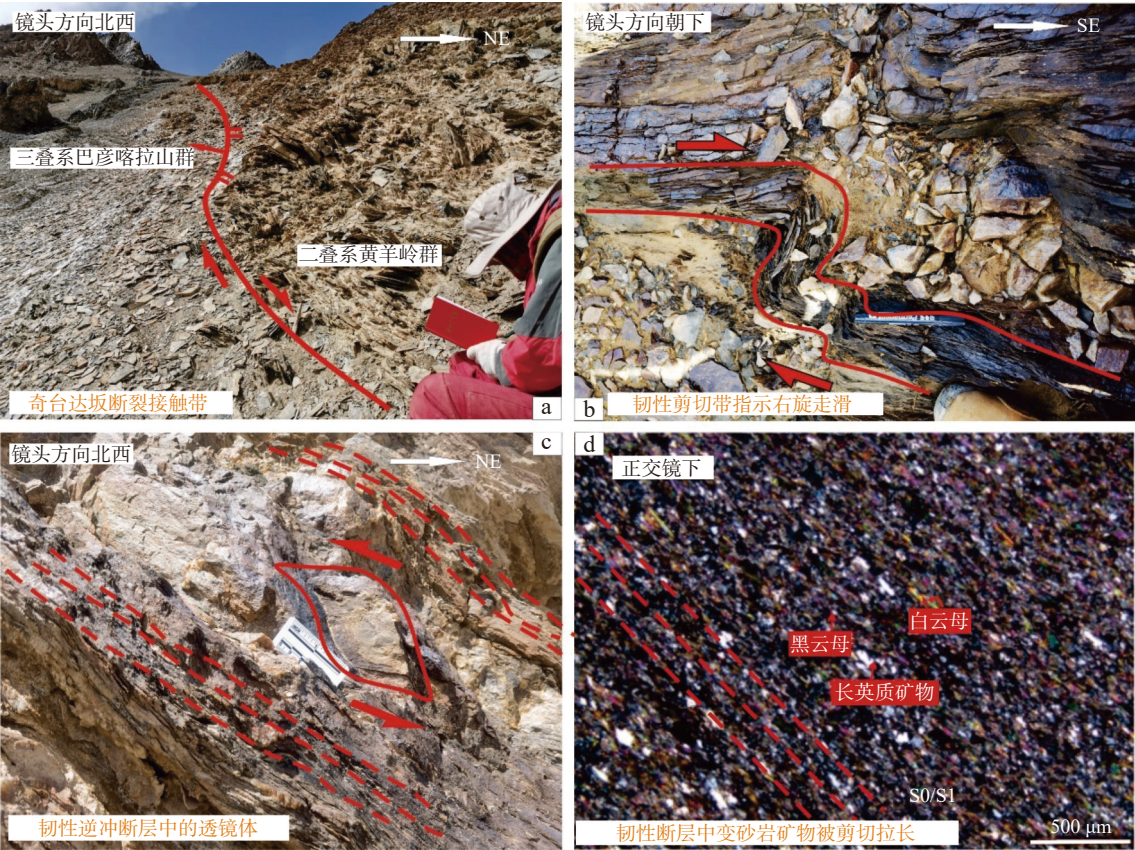
(1)脆性逆冲兼右旋走滑断层。以矿区北部的奇台达坂断裂为例,呈NW-SE向延伸,宽为100~200 m,倾向为NE,倾角为 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。主要发育长英质糜棱岩、糜棱岩化砂岩、碎裂岩及强片理化带(图3a)。依据变形特征分析,该断裂具有两期活动特征,早期特征明显,表现由NE-SW韧性逆冲兼右旋走滑,致使二叠系黄羊岭群逆冲推覆在三叠系巴彦喀拉山群之上。



1.变细粒长石砂岩；2.石英闪长岩；3.花岗伟晶岩；4.右旋走滑断层及编号；
5.逆冲断层及编号；6.裂隙(节理)；7.劈理；8.产状

图2 矿区构造剖面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the tectonic section of the mine area



a.奇台达坂断裂地表地质特征；b.韧性剪切带中的褶皱；c.韧性逆冲断层中的透镜体；d.韧性断层中矿物显微特征

图3 韧性右旋逆冲断层地质特征

Fig. 3 Geological characteristics of ductile retrograde right-slip faults

垂直滑动面可见右旋走滑导致地层发生韧性剪切变形,可见 S 型不对称牵引褶皱、柔皱等构造(图 3b)。晚期表现为断裂带的脆性破碎,地表风化及覆盖较重,

构造特征不明显。
矿区内该期逆冲走滑断层较发育,但由于后期脆性左旋走滑兼逆冲断层的叠加改造,这期构造在露头

尺度观察难度较大,仅在 F_5 、 F_7 断层附近可见较明显的表现(图1c)。其构造运动性质与奇台达坂断裂性质一致。主体走向为NW-SE,倾向为 $20^\circ\sim 50^\circ$,倾角为 $25^\circ\sim 45^\circ$,断距普遍较小,发育糜棱岩化砂岩及强片理化带。糜棱岩化砂岩中长英质细脉、网脉较发育,可见在垂直断层的运动面方向上石英、长石等矿物强烈压扁拉长,石英砂岩形成碎斑或不对称透镜体(图3c),粉砂岩及泥质岩形成强片理化带,片理面呈S型挤压弯曲指示逆冲性质(S-C组构)。通过对断层附近变砂岩镜下观察发现白云母、黑云母及长英质矿物呈现拉长定向的特征(图3d),指示断层为韧性挤压性质。垂直于走滑运动面观察,可见地层发生S型不对称褶皱,指示右旋走滑性质。但在断裂附近花岗伟晶岩脉未见同等构造强度的韧性变形,表明该期构造应在花岗伟晶岩就位之前发生。

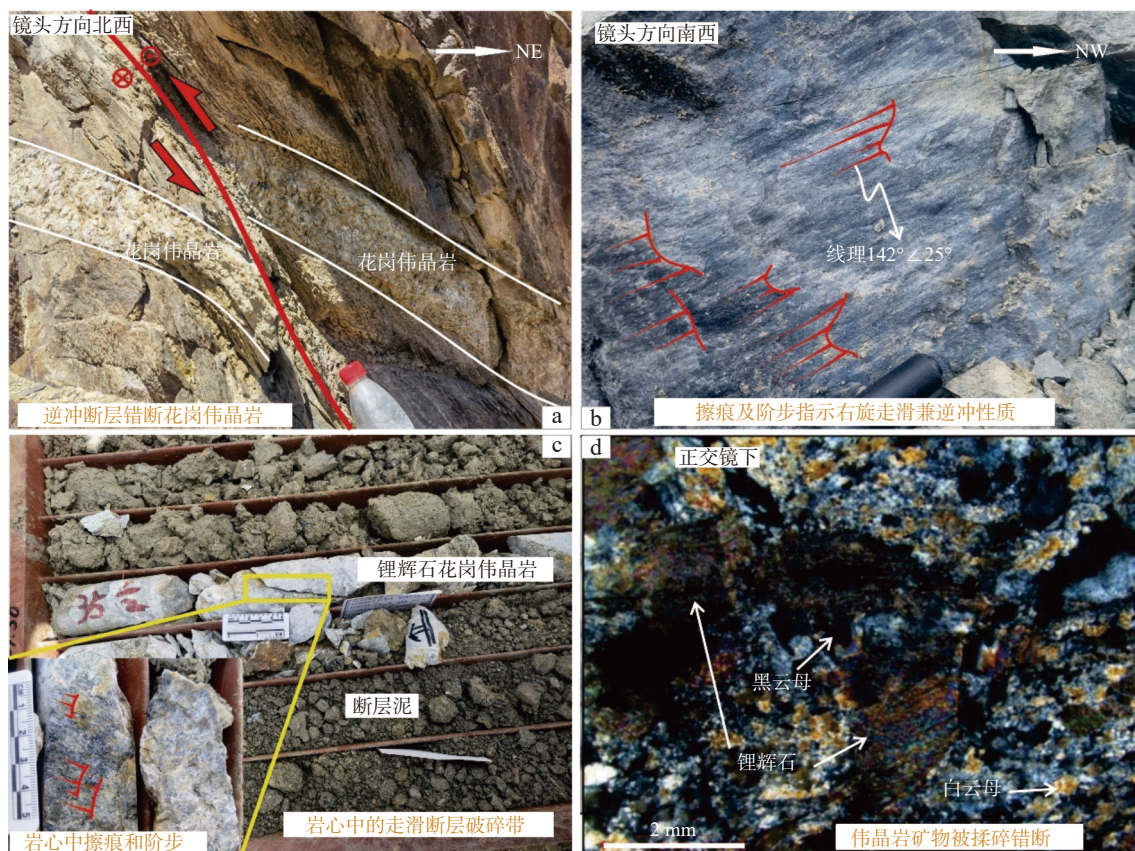
(2)脆性左旋走滑兼逆冲断层。在矿区中 F_1 - F_7 号断层中均可观察到(图1a),为层间次级断裂,以左旋走滑为主兼伴有逆冲性质,断裂面倾向为 $25^\circ\sim 48^\circ$,

倾角为 $62^\circ\sim 79^\circ$ 。断层在变泥质粉砂岩、变粉砂岩等较软弱岩性中构造表现较为明显,发育强片理化带、强劈理化带、碎裂岩等。垂直逆冲滑动面观察地层中伟晶岩脉体被剪切错断(图4a),钻孔中长英质脉体被压扁、错断,但位移量较小,主要表现为破碎(图4b)。垂直断面观察,可见明显擦痕阶步发育,线理产状为 $142^\circ\angle 25^\circ$,指示左旋走滑兼逆冲性质。该期断裂切割破碎了伟晶岩及矿体,岩心中可见断层切穿破碎锂辉石花岗伟晶岩,断面可见擦痕阶步(图4c)。通过对断层附近花岗伟晶岩的镜下观察,可见锂辉石等矿物被揉碎错断。

(2)褶皱构造特征

矿区内主体为NE倾向的单斜地层,受挤压构造影响,地层间发育小型复式褶皱(B_1 - B_6),如S型褶皱、柔皱、勾状褶皱等。

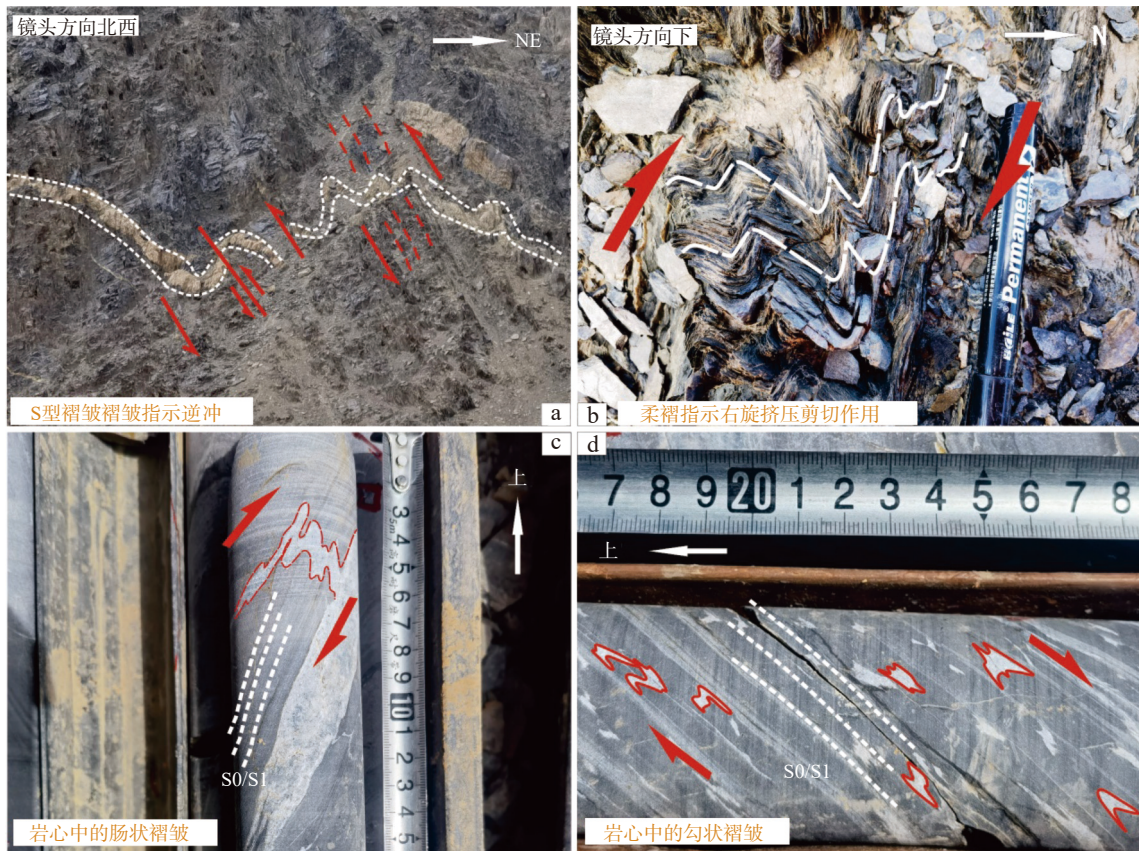
其中,矿区西部 B_2 号及矿区中部 B_4 复式褶皱为露头尺度上较为典型的S型不对称褶皱(图5a),呈斜歪状,长翼倾向为NE,短翼倾向为SW,轴面方向倾向



1.逆冲断层错断伟晶岩脉; 2.逆冲断层的擦痕; 3.岩心中的断层擦痕; 4.显微镜下的破碎矿物

图4 脆性右旋走滑兼逆冲断层构造特征

Fig. 4 Characteristics of brittle right-slip and retrograde fault structure



a. 逆冲断层中的 S 型褶皱; b. 剪切作用下的柔褶; c. 岩心中的柔褶; d. 岩心中的无根褶皱

图5 矿区褶皱构造特征

Fig. 5 Folded tectonic features of the mine area

为 NE, 与地层方向一致。波长为 2~3 m, 波高为 1~3 m, 为韧性逆冲运动所形成的牵引褶皱。

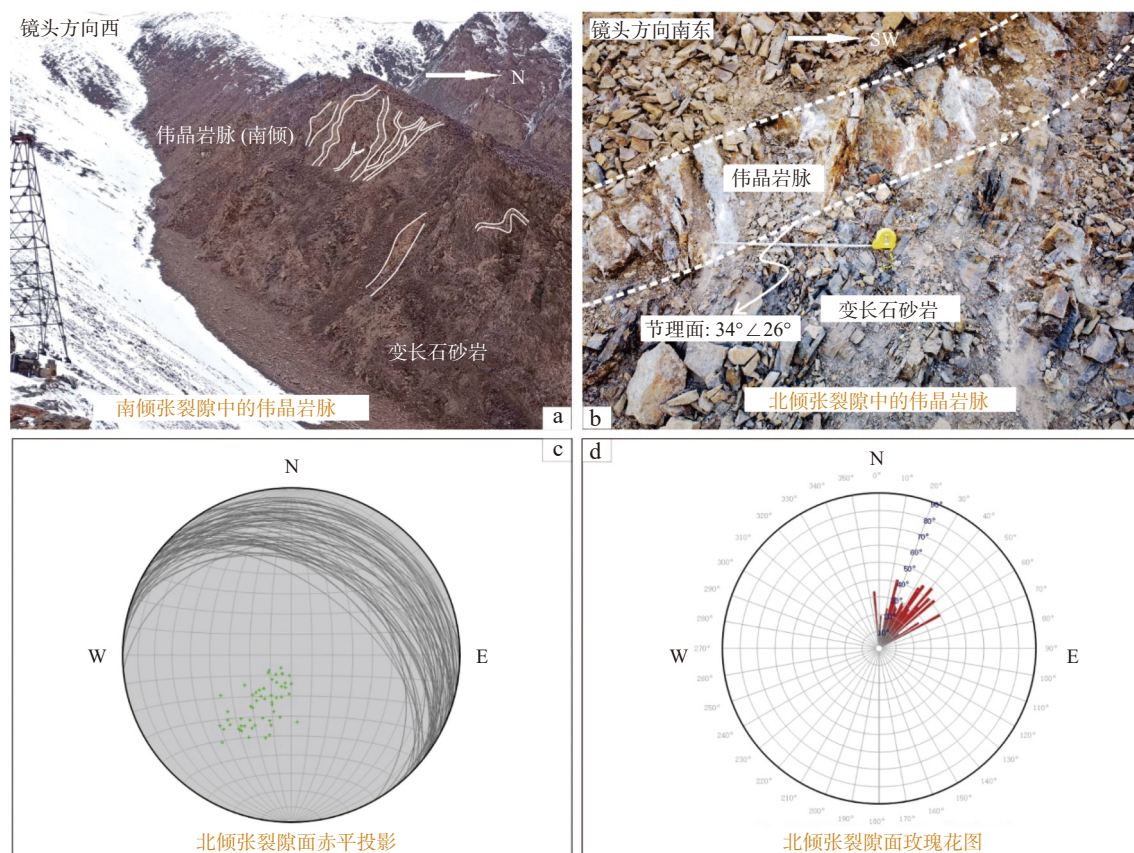
不对称小型柔皱(B_1 、 B_3 、 B_6)为走滑断层运动牵引所致, 地表露头在奇台达坂断层及 F_1 、 F_4 断层附近较发育(图 1c), 其露头特征表现为薄层泥质粉砂岩中不对称连续柔皱, 轴向与断层方向小角度相交, 近 EW 向展布, 褶皱枢纽向东倾伏。根据褶皱较长一翼夹角指示方向为该侧剪切运动方向判断其受右旋剪切作用控制(图 5b)。由于矿区露头覆盖较重, 露头表现有限, 地层岩心中还可更加清晰见到由长英质、碳酸盐岩细脉形成的肠状褶皱(图 5c)、无根勾状褶皱(图 5d)。肠状褶皱为不对称型柔流褶皱, 轴面与层面平行, 两翼紧闭; 无根勾状褶皱表现为轴面平行于层面(片理面), 两翼紧闭且顺层面方向减薄、尖灭; 这些几何特征表现出褶皱明显受顺层面(片理面)的强烈压剪性应力控制。

2.2.2 裂隙(节理)构造特征

(1) 张裂隙: 区内主要的控矿、容矿构造, 控制着区内 95% 以上的含矿伟晶岩脉分布。该期裂隙密集分布

在区内巴彦喀拉山群的变细粒长石砂岩、透辉石角岩中。经统计, 地表出露张裂隙可达 50 余条, 呈 NW-SE 走向延伸。其中靠近矿区南部岩体附近 SW 倾向的张性裂隙较发育, 裂隙蜿蜒延伸, 呈树枝状, 产状不稳定, 多为 $15^\circ \sim 85^\circ$, 沿走向局部有分枝复合及尖灭侧列现象(图 6a), 裂隙宽度为 0.5~3 m 不等, 长度为 30~150 m 不等, 数量上向北快速减少, 其内均充填花岗伟晶岩脉。北倾张性裂隙在矿区中占据主导地位(图 6b), 裂隙面平直, 延伸较远, 裂隙面产状多为 $10^\circ \sim 48^\circ \angle 20^\circ \sim 45^\circ$ (图 6c、图 6d), 长为 40~460 m, 宽为 2~13 m, 最大宽度可达 30 余 m。与地层斜交, 裂隙中充填锂辉石花岗伟晶岩脉。经钻孔验证, 北倾裂隙在倾向上延伸较稳定, 深度超过 300 m。矿区内数条主矿体均受北倾张性裂隙控制。该期张裂隙与矿区南部岩体在空间上关系密切, 其形成与岩体上涌, 底辟地层有直接关联。

(2) 共轭剪裂隙(节理): 矿区内普遍发育, 裂隙面平直, 延伸较稳定。平均产状分别为 $135^\circ \angle 53^\circ$ 和 $70^\circ \angle 68^\circ$ 。裂隙切割地层及花岗伟晶岩脉产生透入性的脆性破坏(图 7a、图 7b), 使其呈网格状破裂, 矿体



a、b.张裂隙中的伟晶岩脉；c.北倾张裂隙的极射赤平投影图；d.北倾张裂隙的玫瑰花状图

图6 矿区张裂隙地质特征

Fig. 6 Geological characteristics of separation fracture in the mine area

有一定的剪切破坏作用,但无明显错位。构造力学分析该组裂隙锐夹角指示的应力方向为近SN向挤压应力,与区内脆性逆冲走滑断裂所受应力方向相同,构造程度相似,应为同期形成的破矿构造。

2.2.3 劈理构造特征

主要发育在粉砂岩、泥质岩的软弱应变带中,倾向多为 $350^{\circ}\sim 35^{\circ}$,中高角度倾角,劈理切割、错断了矿体,对矿体具有透入性的破坏作用,破坏程度有限。构造力学分析,劈理走向与主应力方向垂直,应为近SN向的挤压应力所致,为成矿后期与上述脆性逆冲走后断裂、共轭剪裂隙同期形成的破矿构造。

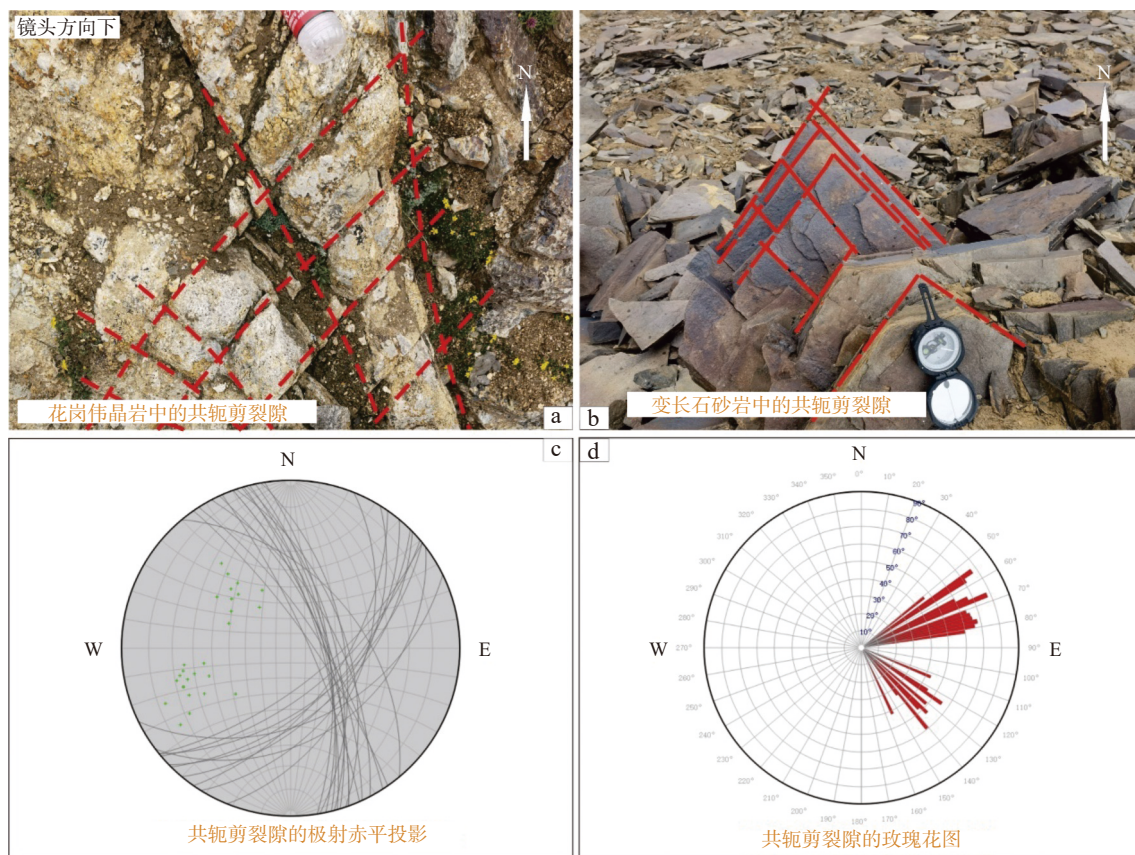
2.3 岩浆岩特征

矿区西南部出露中-细粒二云母二长花岗岩和中-细粒石英闪长岩。其中,二云母二长花岗岩呈长岩株状产出侵入于三叠系巴彦喀拉山群中组上段,走向NW-SE,与主构造方向一致,岩体边界较为平整,局部呈枝杈状,部分岩体内部和边部含有较多不规则状的围岩捕虏体。主要矿物成分为石英、斜长石、钾长石、

黑云母、白云母及少量电气石、石榴子石等。经元素分析表明,二云母二长花岗岩中Li、Be、Rb等稀有元素含量相对较高,呈富集型分布,暗示其能够为稀有金属元素成矿提供物源,应是成矿母岩。石英闪长岩出露面积较小,呈小岩珠形式出露,与二云母二长花岗岩呈脉动侵入接触,被晚期伟晶岩脉沿裂隙侵入。矿物成分主要为斜长石、石英、黑云母及少量角闪石、白云母等。岩体内接触带电气石化、绿泥石化较为发育,外接触带角闪岩化、白云母化、电气石化、硅化相对发育,远离岩体发育酸盐化、褐铁矿化、金云母化及黑云母化。经测定矿区内二云母二长花岗岩、石英闪长岩形成于晚三叠世,锆石年龄为 $209.6\sim 213.7$ Ma (魏小鹏等, 2017, 2018), 同位素示踪显示呈S型花岗岩特征,为古老陆壳物质重熔而成(李文渊等, 2022)。

2.4 伟晶岩脉及矿体特征

矿区内伟晶岩脉群主要岩性为灰白色花岗伟晶岩,由规模大小不一的数百条脉体组成,呈规律性产出。脉群主要位于二云母二长花岗岩外接触带 $200\sim$



a. 花岗伟晶岩中的共轭剪裂隙; b. 变长石砂岩中的共轭剪裂隙; c. 共轭剪裂隙的极射赤平投影; d. 共轭剪裂隙的玫瑰花状图

图7 矿区共轭剪裂隙地质特征

Fig. 7 Geological characteristics of shear fracture in the mine area

1 500 m 范围内, 侵位于三叠纪巴彦喀拉山群之中, 受矿区内 NW-SE 向断层、裂隙构造控制, 脉体呈似层状、脉状、透镜状、囊状、分叉树枝状等, 总体走向 $110^{\circ} \sim 135^{\circ}$ 。经勘查研究发现离岩体近的伟晶岩脉可见电气石及少量绿柱石发育, 未见明显锂辉石矿化。含锂辉石伟晶岩则主要出露在据岩体 400~1 500 m 范围的外接触带上。按照离岩体的远近及含矿性特性, 可分为两带。

(1) 贫矿花岗伟晶岩脉, 主要为灰白色含电气石花岗伟晶岩脉, 靠近岩体 200~400 m 处发育, 岩石呈灰白色, 脉状结构, 块状构造。主要矿物为条纹长石 (约 30%)、石英 (约 35%)、斜长石 (25%~30%)、电气石 (约 3%)、白云母 (约 1%~3%)。

(2) 富 Be 花岗伟晶岩脉, 主要为灰白色绿柱石电气石伟晶岩脉, 脉体主要发育据岩体 400~600 m 处, 呈似层状、脉状结构, 块状构造, 主要矿物为斜长石 (约 35%)、微斜长石 (约 30%)、石英 (约 20%)、白云母 (约 10%)、绿柱石 (约 3%)。

(3) 富 Li 花岗伟晶岩脉 (矿体), 分布在二云母二

长花岗岩外接触带 400~1 500 m 范围内, 地表覆盖较重, 断续出露, 深部钻孔显示其连续性较好, 主体倾向 NE, 局部倾向 SW, 总体呈似层状、脉状、透镜状, 矿体厚度 2~33 m, 长度可达 3 000 余 m。岩性主要为锂辉石花岗伟晶岩, 岩石呈青灰白色, 半自形柱状、他形粒状、巨粒结构, 碎裂状、团块状、条带状、块状构造。主要矿物成分为斜长石 (30%~35%)、石英 (30%~35%)、锂辉石 (10%~20%)、钠长石 (5%~10%)、白云母 (1%~5%)。锂辉石作为主要的成矿矿物之一, 是找矿工作的重点目标。

矿区内贫矿花岗伟晶岩与含矿花岗伟晶岩年龄测试结果显示均在 200.8~179.36 Ma (Liu et al., 2020; 谭克彬等, 2021; 李永等, 2022), 为同期产物, 略晚于二云母二长花岗岩形成时间。

通过对贫矿电气石伟晶岩脉到富 Be、Li 的花岗伟晶岩脉的矿物类型、单矿物成分 (电气石、白云母、长石等) 及 B 同位素对比研究发现在伟晶岩演化过程中高分异、熔-流体混溶作用和钠长石化导致了锂与铍的富集, 与稀有金属成矿密切相关 (Cao et al., 2023;

李文渊等, 2022)。

因此, 笔者认为岩浆演化末期形成富含挥发分的残余岩浆, 沿着先期底辟作用形成的张性裂隙及次级逆冲断裂等有利部位自内而外运移、填充; 随着晚期岩浆热液高度分异、熔-流体相互作用及钠长石化, Li元素被快速分馏, 大量富集成富Li伟晶岩脉。

3 构造-岩浆控矿模式

3.1 构造时序研究

笔者认为根据矿区内断层、褶皱、裂隙及板劈理相互间的切割关系及其与控岩、控矿的关系时序应为: 第一期由北向南的韧性逆冲走滑构造及次级褶皱断层→第二期岩体底辟上涌形成的伸展性构造(张性裂隙构造)→第三期SN向挤压形成的共轭剪裂隙、脆性逆冲走滑断层。

(1) 由北向南韧性逆冲走滑构造。根据前文所述 F_1 、 F_2 、 F_4 断层剪切带内发育的SC组构、层内牵引褶皱、碳酸盐和长英质透镜体可确定其韧性逆冲兼右旋走滑性质。通过观察断层附近钻孔及地表断层周边的花岗伟晶岩脉多为脆性破碎, 未见发生强烈的韧性剪切变形, 且受构造改造程度明显弱于该期构造, 可判定为该构造为伟晶岩脉侵入前就已形成的早期构造。

(2) 容矿、控矿的张裂隙构造。根据前文所述, 探槽及钻孔揭示出矿区南侧靠近岩体范围内存在一系列倾向岩体的张裂隙(图2), 其内均填充伟晶岩脉或矿体。野外露头特征表现为SW倾向, 产状不稳定, 延伸不远, 接触面粗糙不平, 且出现尖灭侧列现象, 尾部常呈树枝分权(图6a), 为典型张裂隙的构造几何特征, 且该组张裂隙在空间位置上与矿区南侧岩体关系密切, 仅围绕岩体附近发育, 且倾向均朝岩体方向, 符合岩体上涌底辟地层所伴生的张裂隙特征。此外经地表勘查及钻孔验证, 矿区内绝大多数伟晶岩脉及矿体的控矿裂隙呈NE倾向、产状稳定、厚度较大可达数十米、向两侧及深部延伸较远、接触面平直, 结合裂隙周边地层强片理化等现象, 表明其具有明显压剪性特征。笔者认为, 该期NE倾向的压剪性构造应为早期次级逆冲断裂挤压剪切所致, 但众所周知压剪性构造容矿空间较小, 很难容纳数十米厚的伟晶岩脉。因此, 北倾裂隙作为地层中的应力薄弱带必然受到岩体底辟上涌的牵拉, 被垂向应力再次拉张, 形成伟晶岩的主要容矿构造。综上所述, 可判定由岩体底辟作

用形成的张裂隙为成矿期形成的中期构造。

(3) 近SN向挤压形成的脆性逆冲走滑断层、共轭剪裂隙及劈理。该期构造在 F_1 - F_7 号断层带内表现明显, 探槽及钻孔揭露的断层带中, 可明显观察到锂辉石花岗伟晶岩被断层切割和错动, 断面可见左旋阶步及擦痕、锂辉石、斜长石等矿物脆性断裂或呈机械性破碎, 局部呈土化或泥状。地层中表现为强烈破碎, 局部呈断层角砾、断层泥(图4)。该期构造破坏矿体及伟晶岩脉, 为成矿后期形成的晚期构造。

3.2 构造活动和区域地质演化的耦合

(1) 古特提斯洋俯冲-消减阶段: 前人大量证据证明, 古特提斯洋在二叠纪—三叠纪之间向北俯冲消减(吴福元, 2020; 吴兆剑, 2020), 中晚三叠世时期古特提斯洋闭合, 北昆仑地体与甜水海地体挤压碰撞, 受NW-SE挤压应力影响发育一系列韧性逆冲走滑断裂, 如麻扎断裂、康西瓦断裂、奇台达坂断裂、大红柳滩-郭扎错断裂等。以奇台达坂为例, 断裂表现为强烈逆冲兼右旋走滑, 使得二叠系黄羊岭群向南西斜冲于三叠系巴彦喀拉山群地层之上, 断裂带内长英质、碳酸盐细脉发育, 受断层牵引褶皱构造强烈, 断层带内主要岩性为云母石英片岩、糜棱岩、千糜岩等动力变质岩。矿区处于甜水海地体北部消减带内, 受矿区北部奇台达坂断裂的控制明显, 次级韧性逆冲走滑断层较发育, 断层带附近发育密集碳酸盐脉、石英网脉, 岩石具强片理化, 断层附近柔褶发育等, 构造特征与奇台达坂断裂构造特征类似, 应为同期构造。

(2) 后碰撞伸展阶段: 晚三叠世, NE-SW向挤压碰撞持续作用, 洋陆碰撞转为陆陆碰撞, 板片俯冲深熔释放流体交代上覆岩石圈地幔, 从而导致岩浆底辟上侵地壳, 区域上进入构造松弛阶段(王威, 2022)。岩浆沿着康西瓦断裂、奇台达坂断裂等深大断裂上侵, 形成三十里营房-泉水沟岩浆岩带(魏小鹏, 2017; 丁坤, 2020)。矿区南侧二云二长花岗岩、石英闪长岩在地理区位上同属于该浆岩带的一部分, 受岩浆底辟作用, 矿区内形成一系列张裂隙。晚三叠世末—早侏罗世, 岩浆演化进入晚期阶段, 富矿残余岩浆热液延张性裂隙运移充填、富集成矿。区内控扩张裂隙应形成于北昆仑地体与甜水海地体后碰撞伸展阶段。

(3) 板内造山阶段: 白垩纪—第四纪, 受印度洋板块与亚欧板块碰撞影响, 包含矿区在内的帕米尔-西昆仑地区发生多期造山运动。前人的大量热年代学数据表明, 在101~125 Ma、60~50 Ma、25~16 Ma、11~

7 Ma、5 Ma 以来至少 5 次快速隆升运动(李海兵等, 2006; 杨经绥等, 2006; Cowgill, 2010; Sobel et al., 2011; Liu et al., 2017)。区域上受到近南北向挤压作用影响, 康西瓦断裂表现为强烈的脆性左旋剪切兼逆冲运动性质(许志琴等, 2007), 通过遥感影像解译发现其至今仍然为一条活断裂, 对第四系地貌仍有较大的错移(葛成隆, 2017)。矿区北部奇台达坂断裂也表现出强烈的脆性挤压破碎, 形成 100~200 m 宽的断层破碎带, 可见断裂内岩石机械性破碎, 呈不规则角砾状, 局部呈土状或泥状。矿区内也存在相似构造特点, 如早期韧性逆冲走滑次级断裂出二次活化, 表现为脆性走滑兼逆冲性质, 切割错断伟晶岩及地层, 局部呈现土状泥状特征、断层两侧可见小型膝折和尖棱褶皱。岩体、伟晶岩及透辉石角岩等能干性较高的岩石中可见共轭

裂隙发育, 软弱地层中可见强片理、劈理化带。因此, 矿区内该期脆性破矿构造可对应区域上板内造山阶段。

3.3 构造-岩浆控矿模式和找矿潜力

3.3.1 构造-岩浆控矿模式讨论

(1) 二叠纪—三叠纪, 随着古特提斯洋向北俯冲消减、陆陆碰撞, 西昆仑地区形成了诸如康西瓦断裂、奇台达坂断裂、大红柳滩-郭扎错断裂等 NW-SE 向走滑推覆构造和受断裂控制的三十里营房-泉水沟岩浆岩带, 奠定了 NW-SE 向主构造样式。509 道班西锂矿整体处于古特提斯域构造-岩浆带内, 受奇台达坂断裂控制矿区类似级逆冲走滑断裂较发育, 这些断层为二云二长花岗岩等中酸性岩浆岩的上升提供了主要通道, 也对后期残余岩浆热液的运移及分异、富集成矿提供了原始通道(图 8)。

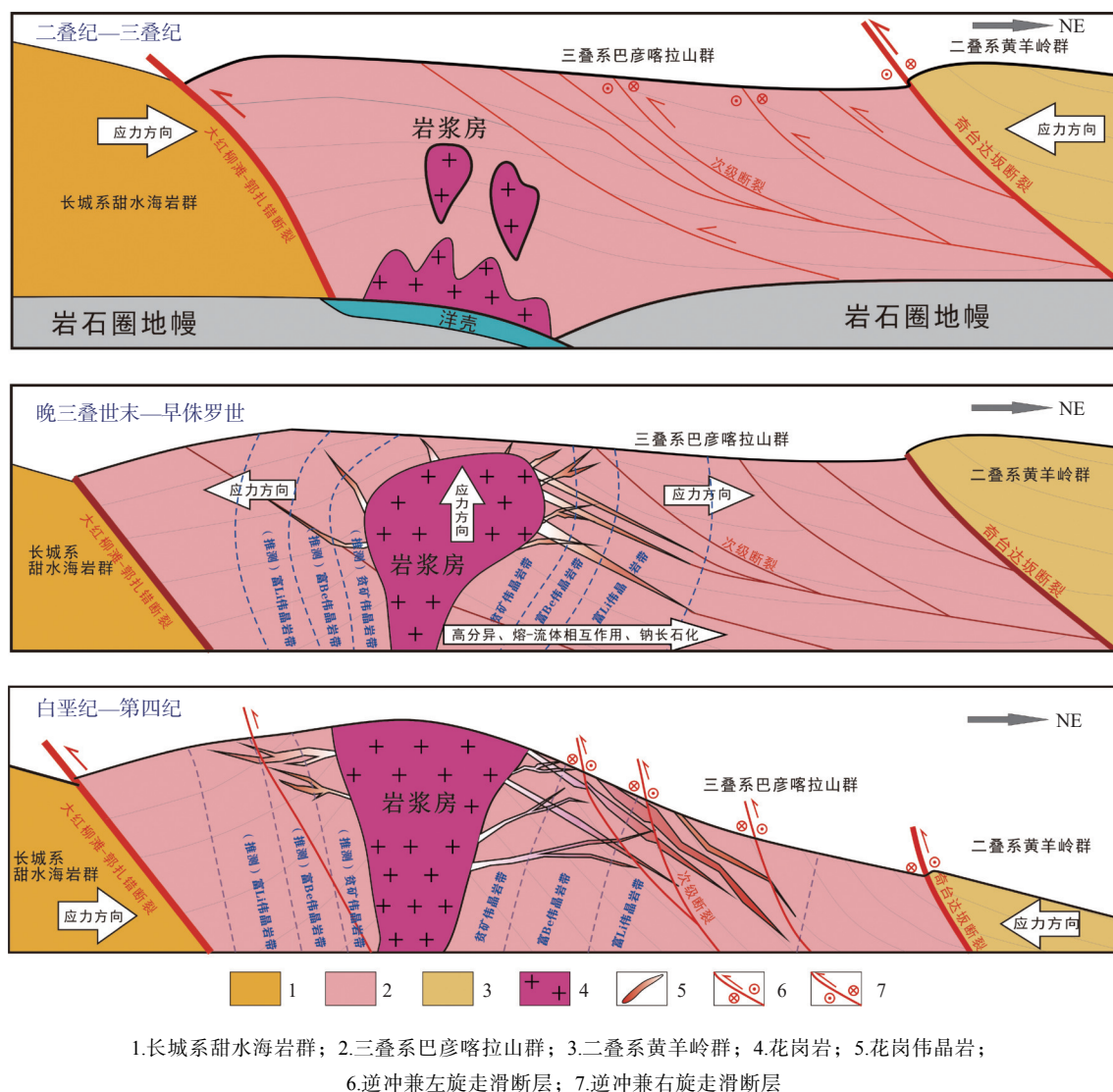


图8 509 道班西锂矿岩浆-构造控矿模式图

Fig. 8 Magma-structural ore control pattern diagram of the West 509-Daoban Li deposit

(2)晚三叠世末—早侏罗世,构造松弛阶段,矿区南侧富含矿质二云二长花岗岩沿NW-SE向断裂通道持续上涌,底辟地层。靠近岩体一侧,上升应力撕裂地层形成一系列面向岩体的南倾张性裂隙,同时也牵拉早期次级断裂形成的贯穿全矿区北倾张性裂隙。岩浆演化后期的含矿残余岩浆热液或伟晶岩熔浆顺张裂隙灌入并向远端运移,随着的伟晶岩演化过程中高分异、熔-流体相互作用,锂等元素在据二云二长花岗岩600~1500 m的中远端富集成矿。

(3)白垩纪—第四纪,随着印度洋板块持续向亚欧板块挤压俯冲,帕米尔—西昆仑地区经历多期构造隆升。康西瓦断裂、奇台达坂断裂等区域断裂发生强烈的脆性左旋剪切逆冲运动。矿区受北部奇台达坂断裂影响,发育次级脆性逆冲走滑断层及伴生膝折、尖棱褶皱构造、共轭剪裂隙。经地表勘查及钻孔验证,该时期构造对矿体产生有限破坏作用,矿体受挤压改造发生短距离错位及弯折,近地表矿体倾角变陡,局部矿体受断层挤压切割发生破碎。

3.3.2 找矿潜力分析

通过分析伟晶岩型矿床中锂矿体的形成和分布与构造-岩浆体系的内在联系,总结构造-岩浆体系在时空关系上对矿体的控制作用,认为伟晶岩型锂矿的形成与矿区内二云母二长花岗岩等中酸性花岗岩的演化分异高度相关,矿体形态受岩体上涌底辟地层所形成的张裂隙及早期韧性逆冲走滑断裂控制,矿体分布则受花岗岩与断裂、张裂隙构造双重控制。基于以上认识,结合矿区及周边的成矿地质特征,可形成一套有效的找矿方法,并对下一步找矿方向作出潜力分析评价。

(1)矿区南侧二云二长花岗岩等中酸性花岗岩与锂矿体在空间和成因上都具有高度相关性,因此以之为目标岩体,沿其侵位方向追索,以其外围具有相似地质特征的区域为有利找矿地段寻找含矿伟晶岩脉是合理的找矿方向。目前,以岩体为线索在509道班西矿区东侧已发现3处锂矿点,分别为岩体北侧的雪凤岭锂矿和岩体南侧的双牙、雪盆锂矿,具有围绕岩体对称分布的特征(图1b)。经初步勘查得出含锂辉石伟晶岩脉共计50余条,矿体最大延伸可达800~1200 m(王核等,2020),矿体围绕岩体外围分布,控矿地层为三叠系巴彦喀拉山群变砂岩、二云母石英片岩,控矿构造为NW-SE向断裂及裂隙构造,与509道班西锂矿成矿条件极为相似。经野外实地踏勘在目标

岩体西南侧与509道班西锂矿床对称区域(据离矿区南西方2~3 km处)依然存在大范围巴彦喀拉山群浅变质陆缘碎屑岩地层。受奇台达坂断裂与大红柳滩—郭扎错断裂影响,其构造环境与509道班西、雪凤岭等矿区构造环境相似,发育大量NW-SE向断层及裂隙构造。因此,可以合理推测该地区具有较大的找矿潜力。但受限于5500~6100 m海拔高度及冰川覆盖,该地区找矿难度大,依然属于探矿空白区。

(2)经地表勘查研究及大量深部钻探验证,区内含矿伟晶岩受南倾与北倾两组构造裂隙控制明显,但南倾控扩张裂隙没有较大的深部找矿潜力,原因如下:①南倾张裂隙由岩体上涌底辟作用形成,产状不稳定,延伸不远,容矿空间有限。②向岩体外接触带(成矿有利部位)方向延伸时,逐渐出露地表向被风化剥蚀严重。③裂隙靠近岩体内接触带时,Li等元素富集较差,故无较大找矿潜力。矿区内北倾含扩张裂隙则具有进一步的深部找矿潜力。原因如下:①该期张裂隙是由早期逆冲断裂基础上二次发育形成,具由产状稳定,延伸较远的特征,故容矿空间较大。②裂隙向岩体外接触带(成矿有利部位)方向延伸时,向地下深部插入,即保证了伟晶岩型矿体完整性,又为残余岩浆热液中的Li元素分馏、富集提供了充足的时间与空间。③通过钻孔验证,北倾构造裂隙的确控制着区内绝大多数锂矿体的产状。因此,可推测在目前已探明矿体北东侧,顺裂隙倾向具有进一步深部找矿空间。

4 结论

(1)新疆和田县509道班西锂矿区内构造演化具有多期性。第一期:受NW-SW向挤压应力影响,二叠纪—三叠纪发育韧性逆冲推覆兼右旋走滑断裂。第二期:晚三叠世—早侏罗世为构造松弛阶段,中酸性岩浆岩底辟侵位形成一系列伸展性拉伸裂隙构造。第三期:受近S-N向挤压应力影响,白垩纪—第四纪发育多期脆性逆冲兼左旋走滑断裂构造。

(2)矿体形成与就位受区内的构造控制,并与矿区南侧二云二长花岗岩有密切空间与成因关系。成矿期前:北倾的韧性逆冲走滑断层为含矿岩浆岩上升提供通道。成矿期:岩浆岩顺区域断裂上涌侵位地层形成穹隆构造,矿区内早期次级逆冲走滑断层及地层受垂向应力牵拉形成张裂隙,为含矿热液的运移及含

矿元素富集提供了有利空间,最终形成超大型锂矿。成矿期后:矿区内逆冲走滑次级断层、小型褶皱及裂隙对矿体产生了有限破坏作用,但并未明显影响矿体连续性。

(3)综合构造、岩浆岩等相关控矿要素特征建立了构造-岩浆岩控矿模式,据此推断下一步找矿方向:①二云二长花岗岩体南西部外围,具有与 509 道班西锂矿相似的构造、岩浆、地层特征,具有较大的找矿潜力。②矿区内受北东倾向裂隙控制的矿体在倾向上仍具有较大的深部找矿空间。

致谢:该研究是在新疆有色地研院对于 509 道班西锂矿勘探的基础上进行的总结与研究,感谢项目组一线地质人员的帮助;感谢审稿专家对本文进行了认真细致的审阅,提出的宝贵修改意见,使文章得到很大提高,在此一并致谢。

参考文献(References):

- 丁坤,梁婷,周义等.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,2020,53(1):24-34.
- DING Kun, LIANG Ting, ZHOU Yi, et al. Petrogenesis of Dahongliutan Biotite Monzogranite in Western Kunlun Orogen: Evidence from Zircon U-Pb Age and Li-Hf Isotope[J]. Northwest Geology, 2020, 53(1): 24-34.
- 董连慧,徐兴旺,范廷宾,等.喀喇昆仑火烧云超大型喷流—沉积成因碳酸盐型 Pb—Zn 矿的发现及区域成矿学意义[J].新疆地质,2015,33(1):41-50.
- DONG Lianhui, XU Xingwang, FAN Tingbin, et al. Discovery of the Huoshaoyun super-large exhalative-sedimentary carbonate Pb-Zn deposit in the western Kunlun area and its great significance for regional metallogeny[J]. Xinjiang Geology, 2015, 33(1): 41-50.
- 董连慧,冯京,刘德权,等.新疆成矿单元划分方案研究[J].新疆地质,2010,28(1):1-15.
- DONG Lianhui, FENG Jing, LIU Dequan, et al. Research for classification of metallogenic unit of Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2010, 28(1): 1-15.
- 凤永刚,王艺茜,张泽,等.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,2019,93(6):1405-1421.
- FENG Yonggang, WANG Yiqian, ZHANG Ze, et al. Geochemistry of triphylite in dahongliutan lithium pegmatites, xinjiang: implications for pegmatite evolution[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1405-1421.
- 高永宝,李侃,滕家欣,等.新疆喀喇昆仑火烧云超大型铅锌矿床矿物学,地球化学及成因[J].西北地质,2019,52(4):152-169.
- GAO Yongbao, LI Kan, TENG Jiaxin, et al. Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Giant Huoshaoyun Zn-Pb Deposit in Karakoram Area, Xinjiang, NW China[J]. Northwest Geology, 2019, 52(4): 152-169.
- 葛成隆,刘栋梁,王世广,等.西昆仑康西瓦断裂带西延特征及其构造意义[J].岩石学报,2017,33(12):3942-3956.
- GE Cenglong, LIU Dongliang, WANG Shiguang, et al. The characteristics and tectonic implications of the western extension of the Karakax fault, West Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(12): 3942-3956.
- 胡军,王核,慕生禄,等.西昆仑甜水海地块南屏雪山早古生代花岗岩地球化学、Hf 同位素特征及其壳幔岩浆作用[J].地质学报,2017,91(6):1192-1207.
- HU Jun, WANG He, MU Shenglu, et al. Geochemistry and Hf isotopic compositions of Early Paleozoic granites Nanpingxueshan from the Tianshuihai terrane, West Kunlun: crust mantle magmatism[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(6): 1192-1207.
- 姜春发,朱松年.构造迁移论概述[J].中国地质科学院院报,1992,13(1):1-14.
- JIANG Chunfa, ZHU Songnian. Introduction to Tectonic Migration Theory[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1992, 13(1): 1-14.
- 潘桂棠,李兴振,王立全,等.青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J].地质通报,2002,21(11):701-707.
- PAN Guitang, LI Xingzeng, WANG Liquan, et al. Preliminary division of tectonic units of the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent regions[J]. Geological Bulletin of china, 2002, 21(11): 701-707.
- 潘桂棠,王立全,李兴振,等.青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置[J].沉积与特提斯地质,2001,21(3):1-26.
- PAN Guitang, WANG Liquan, LI Xingzheng, et al. The tectonic framework and spatial allocation of the archipelagic arc basin systems on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2001, 21(3): 1-26.
- 金谋顺,高永宝,李侃,等.伟晶岩型稀有金属矿的遥感找矿方法——以西昆仑大红柳滩地区为例[J].西北地质,2019,52(4):222-231.
- JIN Moushun, GAO Yongbao, LI Kan, et al. Remote sensing prospecting method for pegmatite type rare metal deposit: taking dahongliutan area in western kunlun for example[J]. Northwest Geology, 2019, 52(4): 222-231.
- 计文化,周辉,李荣社,等.西昆仑新藏公路北段古-中生代多期次构造-热事件年龄确定[J].地球科学,2017,32(5):671-680.
- JI Wenhua, ZHOU Hui, LI Rongshe, et al. The deformation age of Palaeozoic-Mesozoic tectonic along northern part of Xin-Zang road in West Kunlun[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2017, 32(5): 671-680.
- 孔会磊,任广利,李文渊,等.西昆仑大红柳滩东含锂辉石花岗岩伟晶岩脉年代学和地球化学特征及其地质意义[J].西北地质,2023,56(2):61-79.
- KONG Huilei, REN Guangli, LI Wenyuan, et al. Geochronology,

- Geochemistry and Their Geological Significances of Spodumene Pegmatite Veins in the Dahongliutandong Deposit, Western Kunlun, China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 61–79.
- 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 等. 阿尔金断裂带对青藏高原北部生长、隆升的制约[J]. *地学前缘*, 2006, 13(4): 59–79.
- LI Haibing, YANG Jingsui, XU Zhiqin, et al. The constraint of the Altyn Tagh fault system to the growth and rise of the northern Tibetan plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(4): 59–79.
- 李侃, 高永宝, 滕家欣, 等. 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[J]. *西北地质*, 2019, 52(4): 206–221.
- LI Kan, GAO Yongbao, TENG Jiaxin, et al. Metallogenic geological characteristics, mineralization age and resource potential of the granite-pegmatite-type rare metal deposits in Dahongliutan area, Hetian County, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 206–221.
- 李荣社, 计文化, 杨永成. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社, 2008a, 1–400.
- LI Rongshe, JI Wenhua, YANG Yongcheng. Kunlun Mountains and Adjacent Area Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008a, 1–400.
- 李荣社, 徐学义, 计文化. 对中国西部造山带地质研究若干问题的思考[J]. *地质通报*, 2008b, 27(12): 2020–2025.
- LI Rongshe, XU Xueyi, JI Wenhua. Some problems of geological study in the western China orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008b, 27(12): 2020–2025.
- 李荣社, 计文化, 赵振明, 等. 昆仑早古生代造山带研究进展[J]. *地质通报*, 2007, 26(4): 373–382.
- LI Rongshe, JI Wenhua, ZHAO Zhengming, et al. Progress in the study of the Early Paleozoic Kunlun orogenic belt[J]. *Geological*, 2007, 26(4): 373–382.
- 李荣社, 杨永成, 孟勇. 青藏高原1:25万区域地质调查主要成果和进展综述(北区)[J]. *地质通报*, 2004, 23(5–6): 421–426.
- LI Rongshe, YANG Yongcheng, MENG Yong. Main results and progress in 1:250000 regional geological survey of the northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Regional Geology of China*, 2004, 23(5–6): 421–426.
- 李文渊, 高永宝, 张照伟, 等. 镁铁—超镁铁质岩与花岗岩-伟晶岩“小岩体成大矿”对比——以昆仑成矿带夏日哈木和大红柳滩超大型矿床为例[J]. *地质通报*, 2023, 45(5): 1036–1048.
- LI Wenyuan, GAO Yongbao, ZHANG Zhaowei, et al. Comparison of Mafic-ultramafic and Granite-pegmatite "Small Intrusion Forming Large Deposit": Taking Xiarihamu and Dahongliutan Super-large Deposits in Kunlun Metallogenic Belt, China as Examples[J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 45(5): 1036–1048.
- 李文渊, 张照伟, 高永宝, 等. 昆仑古特提斯构造转换与镍钴锰锂关键矿产成矿作用研究[J]. *中国地质*, 2022, 49(5): 1385–1407.
- LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, GAO Yongbao, et al. Tectonic transformation the Kunlun orogen of Paleo-Tethys, North China, and the metallization of critical mineral resource's nickel, cobalt, manganese and lithium[J]. *Geology in China*, 2022, 49(5): 1385–1407.
- 李永, 王威, 杜晓飞, 等. 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定[J]. *中国地质*, 2022, 49(6): 1–6.
- LI Yong, WANG Wei, DU Xiaofei, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 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*, 2022, 49(6): 1–6.
- 彭海练, 贺宁强, 王满仓, 等. 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[J]. *西北地质*, 2018, 51(3): 146–154.
- PENG Hailian, HE Ningqiang, WANG Mancang, et al. Geological characteristics and metallogenic regularity of West Track 509 rare polymetallic deposit in Dahongliutan region, Hetian, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(3): 146–154.
- 潘裕生. 青藏高原第五缝合带的发现与论证[J]. *地球物理学报*, 1994, 37(2): 184–192.
- PAN Yusheng. Discovery and evidence of the fifth suture zone of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1994, 37(2): 184–192.
- 潘裕生. 西昆仑山构造特征与演化[J]. *地质科学*, 1990, (3): 224–232.
- PAN Yusheng. Tectonic features and evolution of the Western Kunlun Mountain region[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1990, (3): 224–232.
- 乔耿彪, 伍跃中, 刘拓. 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*, 2020, 47(5): 1591–1593.
- QIAO Gengbiao, WU Yuezhong, LIU Tuo. 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*, 2020, 47(5): 1591–1593.
- 乔耿彪, 张汉德, 伍跃中, 等. 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*, 2015, 89(7): 1180–1194.
- QIAO Gengbiao, ZHANG Hande, WU Yuezhong, et al. Petrogenesis of the Dahongliutan monzogranite in western Kunlun: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(7): 1180–1194.
- 任广利, 孔会磊, 赵凯东, 等. 新疆喀喇昆仑大红柳滩一带锂矿光谱特征及其找矿指示意义[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 103–114.
- REN Guangli, KONG Huilei, ZHAO Kaidong, et al. Spectral Characteristics and Prospecting Implications of Lithium Deposits in Dahongliutan Area, Karakoram, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 103–114.
- 史明震. 西昆仑大红柳滩地区锂铍多金属矿遥感示矿信息提取以及远景区预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.

- SHI Mingzheng. Remote sensing ore indication information extraction and prospective area prediction of lithium beryllium polymetallic ore in Dahongliutan, West Kunlun[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020.
- 唐俊林, 柯强, 徐兴旺, 等. 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, 2022, 38(3):655-675.
- TANG Junlin, KE Qiang, XU Xingwang, et al. Magma evolution and mineralization of Longmenshan lithium-beryllium pegmatite in Dahongliutan area, West Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(3): 655-675.
- 谭克彬. 新疆大红柳滩一带稀有金属矿产勘查新进展[J]. 世界有色金属, 2021, (14): 98-99.
- TAN Kebin. Progress in rare metal mineral exploration in The large Hongliutan[J]. World Nonferrous Metals, 2021, (14): 98-99.
- 王核, 徐义刚, 闫庆贺, 等. 新疆白龙山伟晶岩型锂矿床研究进展[J]. 地质学报, 2021, 95(10): 3085-3098.
- WANG He, XU Yigang, YAN Qinghe, et al. Research progress on Bailongshan pegmatite type lithium deposit, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(10): 3085-3098.
- 王核, 高昊, 马华东, 等. 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[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(1): 57-68.
- WANG He, GAO Hao, MA Huadong, et al. Geological characteristics and pegmatite vein group zoning of the Xuefengling, Xuepen, and Shuangya lithium deposits in Karakorum, Hetian, Xinjiang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 44(1): 57-68.
- 王核, 李沛, 马华东, 等. 新疆和田县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, 2017, 41(6): 1053-1062.
- WANG He, LI Pei, MA Huadong, et al. Discovery of the Bailongshan superlarge lithium-rubidium deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang, and its prospecting implication[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(6): 1053-1062.
- 王威, 杜晓飞, 刘伟, 等. 西昆仑 509 道班西锂铍稀有金属矿地质特征与成矿时代探讨[J]. 岩石学报, 2022, 38(7): 1967-1980.
- WANG Wei, DU Xiaofei, LIU Wei, et al. Geological characteristic and discussion on metallogenic age of the West 509-Daoban Li-Be rare metal deposit in the West Kunlun Orogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(7): 1967-1980.
- 魏小鹏, 王核, 张晓宇, 等. 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, 2018, 47(4): 363-379.
- WEI Xiaopeng, WANG He, ZHANG Xiaoyu, et al. Petrogenesis of Triassic high-Mg diorites in western Kunlun orogen and its tectonic implication[J]. Geochimica, 2018, 47(4): 363-379.
- 魏小鹏, 王核, 胡军, 等. 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, 2017, 46(1): 66-80.
- WEI Xiaopeng, WANG He, HU Jun, et al. Geochemistry and geochronology of the Dahongliutan two-mica granite pluton in Western Kunlun[J]. Geochimica, 2017, 46(1): 66-80.
- 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1627-1674.
- WU Fuyuan, WAN Bo, ZHAO Liang, et al. Tethyan geodynamics[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(6): 1627-1674.
- 吴兆剑, 韩效忠, 林中湘, 等. 中国北方主要中生代盆地构造沉积气候演化及其成煤、铀意义[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(4): 710-724.
- WU Zhaojian, HAN Xiaozhong, LIN Zhongxiang, et al. Tectonic, sedimentary, and climate evolution of meso-cenozoic basins in North China and its significance of coal accumulation and uranium mineralization[J]. Geotecton Metallog, 2020, 44(4): 710-724.
- 许志琴, 戚学祥, 杨经绥, 等. 西昆仑康西瓦韧性走滑剪切带的两类剪切指向、形成时限及其构造意义[J]. 地质通报, 2007, 26(10): 1252-1261.
- XU Zhiqing, QI Xuexiang, YANG Jinsui, et al. Senses and timings of two kinds of shear in the Kangxiwar strike-slip shear zone, West Kunlun, and their tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(10): 1252-1261.
- 肖文交, 侯泉林, 李继亮, 等. 西昆仑大地构造相解剖及其多岛增生过程[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2000, 43(S1): 22-28.
- XIAO Wenjiao, HOU Quanlin, LI Jiliang, et al. Tectonic facies and the archipelago-accretion process of the West Kunlun, China[J]. Science in China (Series D), 2000, 43(S1): 22-28.
- 肖序常, 李廷栋, 李光岑. 青藏高原的构造演化[J]. 中国地质科学院院报, 1990, 20(1): 123-125.
- XIAO Xuchang, LI Tingdong, LI Guangceng, et al. Tectonic evolution of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1990, 20(1): 123-125.
- 杨经绥, 李海兵. 走滑断裂对超高压变质岩石折返的贡献及青藏高原北部白垩纪隆升之新思考[J]. 地学前缘, 2006, 13(4): 80-90.
- YANG Jingsui, LI Haibin. Contributions of strike-slip faulting to exhumation of ultrahigh pressure metamorphic rocks and the Cretaceous uplift of the northern Qinghai-Tibet plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(4): 80-90.
- 张传林, 马华东, 朱炳玉, 等. 西昆仑—喀喇昆仑造山带构造演化及其成矿效应[J]. 地质论评, 2019, 65(5): 1077-1102.
- ZHANG Chuanlin, MA Huadong, ZHU Binyu, et al. Tectonic evolution of the Western Kunlun-Karakorum Orogenic Belt and its coupling with the mineralization effect[J]. Geological Review, 2019, 65(5): 1077-1102.
- 张传林, 陆松年, 于海锋, 等. 青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 50(6): 825-835.
- ZHANG Chuanlin, LU Songnian, YU Haifeng, et al. Tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt in northern Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb geochronology[J]. Science in China (Series D), 2007, 50(6): 825-835.
- Bershaw J, Garzione C N, Schoenbohm L, et al. Cenozoic evolution

- of the Pamir plateau based on stratigraphy, zircon provenance, and stable isotopes of foreland basin sediments at Oytage (Wuyitake) in the Tarim Basin (west China)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 44: 136–148.
- Cao R, Gao Y B, Chen B, et al. Pegmatite magmatic evolution and rare metal mineralization of the Dahongliutan pegmatite field, Western Kunlun Orogen: Constraints from the B isotopic composition and mineral-chemistry[J]. *International Geology Review*, 2023, 65(7): 1224–1242.
- Cowgill E. Cenozoic right-slip faulting along the eastern margin of the Pamir salient, northwestern China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122(1–2): 145–161.
- Černý P, Erict T S. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2005, 43: 2005–2026.
- Černý P. Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: Is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies?[J]. *Precambrian Research*, 1991, 51: 429–468.
- Gao Y B, Bagas L, Li K, et al. Newly discovered Triassic Li deposits in the Dahongliutan area, NW China: A case study for the detection of Li-bearing pegmatite deposits in rugged terrains using remote-sensing data and images[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 553.
- Hu J, Wang H, Huang C, et al. Geological characteristics and age of the Dahongliutan Fe-ore deposit in the Western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 116: 1–25.
- Jiang Y H, Jia R, Liu Z, et al. Origin of Middle Triassic high-K calc-alkaline granitoids and their potassic microgranular enclaves from the West Kunlun orogen, northwest China: A record of the closure of Paleo-Tethys[J]. *Lithos*, 2013, 156–159: 13–30.
- Jiang Y H, Liao S Y, Yang W Z, et al. An island arc origin of plagiogranites at Oytage, West Kunlun orogen, northwest China: SHRIMP zircon U–Pb chronology, elemental and Sr–Nd–Hf isotopic geochemistry and Paleozoic tectonic implications[J]. *Lithos*, 2008, 106: 323–335.
- Jiang Y H, Ling H F, Jiang S Y, et al. Petrogenesis of a Late Jurassic peraluminous volcanic complex and its high-Mg, potassic, quenched enclaves at Xiangshan, Southeast China[J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46: 1121–1154.
- Liu D L, Li H B, Sun Z M, et al. AFT dating constrains the Cenozoic uplift of the Qimen Tagh Mountains, Northeast Tibetan Plateau, comparison with LA–ICPMS Zircon U–Pb ages[J]. *Gondwana Research*, 2017, 41: 438–450.
- Liu X Q, Zhang C L, Zou H B, et al. Triassic–Jurassic granitoids and pegmatites from western kunlun–pamir syntax: implications for the paleo-tethys evolution at the northern margin of the tibetan plateau[J]. *Lithosphere*, 2020, 1: 1–22.
- Mattern F and Schneider W. Suturing of the Proto- and Paleo-Tethys oceans in the West Kunlun (Xijiang, China)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18: 637–650.
- Matte P, Tapponnier P, Arnaud N, et al. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 142: 311–330.
- Matte P, Tapponnier P, Bourjot L, et al. Tectonics of western Tibet, from the Kunlun to the Karakorum[C]. Kashi: International Symposium on the Karakorum and Kunlun Mountains, 1992: 36.
- Sobel E R, Schoenbohm L M, Chen J, et al. Late Miocene–Pliocene deceleration of dextral slip between Pamir and Tarim: implications for Pamir orogenesis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304: 369–378.
- Wang Z H. Tectonic evolution of the West Kunlun orogenic belt, western China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 24: 153–161.
- Xiao W J, Windley B F, Jian P, et al. Accretionary tectonics of the West Kunlun orogen, China: A Paleozoic Early Mesozoic–long-lived active continental margin with implications for the growth of southern Eurasia[J]. *Journal of Geology*, 2005, 113: 687–705.
- Xiao W J, Windley B F, Chen H L, et al. Carboniferous–Triassic subduction and accretion in the West Kunlun, China: Implications for the collisional and accretionary tectonics of the northern Tibetan plateau[J]. *Geology*, 2002a, 30: 295–298.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Arc–ophiolite obduction in the West Kunlun range (China): Implications for the Palaeozoic evolution of central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 2002b, 159: 517–528.
- Xiao W J, Windley B F, Fang A M, et al. Palaeozoic Early – Mesozoic accretionary tectonics of the Western Kunlun Range, NW China[J]. *Gondwana Research*, 2001, 4(4): 826–827.
- Yin A and Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan–Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 211–280.
- Zhang C L, Zou H B, Ye X T, et al. Tectonic evolution of the NE section of the Pamir Plateau: new evidence from field observations and zircon U–Pb geochronology[J]. *Tectonophysics*, 2018, 723: 27–40.
- Zhang Z, Klemperer S, Bai Z, et al. Crustal structure of the Paleozoic Kunlun orogeny from an active–source seismic profile between Moba and Guide in East Tibet, China[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(4): 994–1007.