

王核,马华东,张嵩等. 2023. 新疆阿尔金地区黄龙岭超大型伟晶岩型锂矿床的发现及找矿意义. 岩石学报,39(11): 3307-3318, doi: 10.18654/1000-0569/2023.11.06

# 新疆阿尔金地区黄龙岭超大型伟晶岩型锂矿床的发现及找矿意义\*

王核<sup>1,2,3,4</sup> 马华东<sup>3</sup> 张嵩<sup>1,2</sup> 杜晓飞<sup>3</sup> 黄亮<sup>1,2</sup> 蔡铭泽<sup>1,2</sup> 陈根文<sup>1,4</sup> 朱炳玉<sup>3</sup> 王强<sup>1</sup>  
王堃宇<sup>1,2</sup> 邢春辉<sup>3</sup> 王威<sup>3</sup> 邱林<sup>3</sup> 沈明宏<sup>1,2</sup>

WANG He<sup>1,2,3,4</sup>, MA HuaDong<sup>3</sup>, ZHANG Song<sup>1,2</sup>, DU XiaoFei<sup>3</sup>, HUANG Liang<sup>1,2</sup>, CAI MingZe<sup>1,2</sup>, CHEN GengWen<sup>1,4</sup>, ZHU BingYu<sup>3</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>, WANG KunYu<sup>1,2</sup>, XING ChunHui<sup>3</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>, QIU Lin<sup>3</sup> and SHEN MingHong<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所,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,乌鲁木齐 830000

4. 中国科学院地球化学研究所,贵阳 550002

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

4. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2023-9-26 收稿, 2023-10-13 改回.

Wang H, Ma HD, Zhang S, Du XF, Huang L, Cai MZ, Chen GW, Zhu BY, Wang Q, Wang KY, Xing CH, Wang W, Qiu L and Shen MH. 2023. Discovery of the Huanglongling giant lithium pegmatite deposit in Altyn Tagh, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 39(11): 3307-3318, doi: 10.18654/1000-0569/2023.11.06

**Abstract** The Altyn Tagh orogenic belt is located in the northern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau, and is bounded by the Qaidam block, the Qilian-Kunlun orogenic belt and the Tarim block, and is a composite orogenic belt formed by subduction collision/accretion of the Tethys Ocean. Granitic pegmatites are well developed in the Altyn Tagh orogenic belt. A number of medium-scaled lithium deposits have been discovered in the pegmatites since 2018, such as Washixia South, Chadake, Tugeman, Ayak, Kumusaiyi, Shaliangxi and Tashidaban, making the belt a new prospecting area for pegmatite-type lithium deposits in China. Recently, a new pegmatite-type lithium deposit is discovered in the Huanglongling region, east of the Kumudaban region in the Ruoqiang County, Xinjiang. The deposit is hosted in a swarm of pegmatite veins with spodumene, which extend more than 4500m in length and more than 1000m in width. Sixteen ore bodies have been found in the pegmatite veins, and they range in length from 370m to 4230m and from 1.2m to 40.85m in thickness. The ores have an average grade of  $\text{Li}_2\text{O}$  being 1.26% ~ 3.60%. The potential resources of the deposit are estimated to be ca. 1,860,800 tons of  $\text{Li}_2\text{O}$ , associated with ca. 49,500 tons of BeO and ca. 118,500 tons of  $\text{Rb}_2\text{O}$ , which can be taken as a prospecting area and potentially giant lithium deposit. This discovery is a breakthrough in the exploration of rare metals in the Altyn Tagh orogenic belt.

**Key words** Huanglongling lithium deposit; Pegmatite; Prospecting implication; Altyn Tagh; Xinjiang

**摘要** 阿尔金造山带位于青藏高原北缘,处于柴达木地块、祁连-昆仑造山带及塔里木地块之间,是由原特提斯洋俯冲碰撞/增生造山作用所形成的复合型造山带。阿尔金地区花岗伟晶岩相当发育,2018年以来,在这些花岗伟晶岩中陆续发现了瓦石峡南锂矿、恰达克锂矿、吐格曼锂铍矿、阿亚克锂矿、库木萨依锂矿、沙梁西锂矿、塔什达坂锂矿等一批中型矿床,使该地

\* 本文受国家重点研发计划专项项目(2021YFC2901904-4)和中国科学院前瞻战略科技先导专项“低碳能源金属矿产(锂、稀土、钴、镍、铜)找矿增储与高效提取”联合资助。

第一作者简介:王核,男,1966年生,研究员,博士生导师,矿床学专业,E-mail: wanghe@gig.ac.cn

区也成为了我国伟晶岩型锂矿的找矿新区带。研究团队通过多次野外勘查、系统取样与室内化验分析,确认在新疆若羌县库木达坂东的黄龙岭地区发现了一处超大型花岗伟晶岩型锂多金属矿床。初步圈定出一条长大于4500m、宽大于1000m的含锂辉石矿伟晶岩脉群;在该伟晶岩群内圈出16个矿体,各矿体长约370~4230m,厚1.2~40.85m,  $\text{Li}_2\text{O}$  平均品位1.26%~3.60%。初步估算矿区潜在  $\text{Li}_2\text{O}$  资源量为186.08万t,伴生4.95万t BeO和11.85万t  $\text{Rb}_2\text{O}$ ,达到超大型远景规模,有望成为一个世界级的巨型锂矿床。黄龙岭超大型锂矿的发现,实现了阿尔金地区稀有金属矿产找矿的重大突破,该地区有望成为我国一个新的重要锂资源基地。

**关键词** 黄龙岭锂矿床;伟晶岩;找矿意义;阿尔金;新疆  
**中图法分类号** P588.131; P618.71

随着新能源汽车、储能技术及可控核聚变技术的迅速发展,锂在新能源领域受到高度关注,被誉为“21世纪的能源金属”、“绿色能源金属”和“白色石油”,是国家发展新能源资源战略的重心(李建康等, 2014; Li *et al.*, 2019; 刘丽君等, 2017; 王登红等, 2018; 翟明国等, 2019; 王核等, 2021, 2023)。我国是锂资源消费大国,锂原料长期依赖大量进口,随着“逆全球化”趋势愈发明显,我国的锂资源供应面临严重威胁。因而锂等稀有金属战略性低碳矿产资源储备关系到我国的能源安全和环境安全,也关系到我国的经济安全和国防安全。对于国内供应能力不足、境外资源获取风险增加的现状,急需通过科技创新在国内圈定新的锂资源基地,切实提高锂资源的自主供应能力。

近年来我国伟晶岩型锂矿找矿取得多处突破(付小方等, 2015; 王秉璋等, 2020; 秦克章等, 2021; 王核等, 2017, 2020),其中川西甲基卡-西昆仑白龙山锂矿带构成了全球最为瞩目的古特提斯巨型锂成矿带(王核等, 2022)。

阿尔金地区花岗伟晶岩相当发育,近年来陆续发现了瓦石峡南锂矿、恰达克锂矿、吐格曼锂矿、阿亚克(吐格曼北)锂矿、库木萨依锂矿、沙梁西锂矿、塔什达坂锂矿等一批中型锂矿床(徐兴旺等, 2019; Gao *et al.*, 2021; 张焕等, 2022; 王核等, 2022年),成为我国伟晶岩型锂矿床的找矿新区带。最近,我们在距离库木达坂东10km的黄龙岭一带发现了十余条规模较大的含锂辉石矿化的伟晶岩脉群,并开展了地质调查、填图和地表取样工作,初步圈定出长大于4500m、宽大于1000m的含锂辉石矿伟晶岩脉群;在该伟晶岩群内圈定出16个矿体,长390~4230m,厚1.2~40.85m,  $\text{Li}_2\text{O}$  平均品位1.26%~3.60%。初步估算矿区潜在资源量为186.08万t  $\text{Li}_2\text{O}$ 、4.95万t BeO和11.85万t  $\text{Rb}_2\text{O}$ ,达到超大型( $\text{Li}_2\text{O}$  > 50万t)远景规模。黄龙岭锂矿床是项目团队继发现西昆仑白龙山超大型锂矿床后,发现的又一个超大型矿床。

## 1 成矿地质背景

阿尔金造山带位于青藏高原北缘,处于柴达木地块、祁连山造山带及塔里木板块之间,是由原特提斯洋俯冲碰撞/增生造山作用所形成的复合型造山带(Liu *et al.*, 2012; Cao *et al.*, 2019; Hong *et al.*, 2021)。由北向南可划分为红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带、阿中地块、江嘎萨依-巴什瓦克高

压变质增生杂岩带和阿帕-芒崖蛇绿混杂岩带等4个构造单元。

稀有金属矿产主要分布在阿中地块,该地块主要发育新太古-古元古界阿尔金岩群角闪岩相变质岩、长城系巴什库干岩群高绿片岩相变质岩、蓟县系-青白口系塔昔达坂群、索尔库里群绿片岩相碎屑岩、碳酸盐岩和中-上奥陶统环形山组碳酸盐岩。古生代是阿尔金构造带岩浆活动的鼎盛时期,在阿中地块发育了大量基性-中性-酸性复式侵入岩,这些岩体总体呈东西向带状分布,自北向南依次为苏勒克萨依基性岩体、库木达坂岩体(群)、苏吾什杰岩体(群)、帕夏拉依档岩体(群)和清水泉基性岩体。区域地质构造较为复杂,混合岩化强烈。

阿中地块矿产类型丰富,以铁、铜、镍、金、稀有金属、萤石、石英岩、煤、云母、石膏、石棉、白云岩、玉石(蛇纹石玉)为主,发育卡尔哈尔超大型萤石矿床、皮亚孜达坂大型萤石矿床、托盖里克超大型石英岩矿床、康图盖大型石英岩矿床、巴什瓦克大型石棉矿床、塔什达坂大型白云岩矿床以及沙梁西中型铁矿等。

阿尔金地区锂等稀有金属矿产在2018年之前,研究和勘查程度非常低。1958~1959年,新疆地质局库巴队五分队在阿尔金和阿牙克库木湖一带开展了1:100万地质矿产普查工作,对东云母矿、西云母矿和帕夏拉依档云母矿点进行了检查;1974年,新疆地矿局第三地质大队二分队在若羌瓦什峡及且末哈达里克进行了白云母及玉石矿点检查工作,检查瓦什峡白云母矿脉4条,提交了《新疆若羌瓦什峡及且末哈达里克白云母玉石矿点检查简报》。2018年,河南省地质矿产勘查开发局第二地质勘查院完成了“新疆阿尔金北缘拜什托格拉克一带1:5万J45E011012、J45E011013、J45E011014三幅区域地质矿产调查”项目,发现了瓦石峡南(拖盖勒克、沙梁沟)中型锂矿床(何鹏, 2021);2019年,新疆地质矿产勘查开发局第三地质大队完成了新疆地质勘查基金项目“新疆若羌县吐格曼一带伟晶岩型稀有金属矿及红柱石矿、石墨矿预查”项目,发现了吐格曼小型锂矿床及阿亚克(吐格曼北)中型锂矿床。2020年以来,恰达克、库木萨依、沙梁西、塔木切(塔什达坂北)、塔什达坂(李鹏霄等, 2022)等一批中型锂矿床相继被发现(图1)。对于阿尔金锂矿的研究,主要是徐兴旺研究团队对吐格曼一带的稀有金属矿床的成矿特征、成岩成矿年龄、成矿机制等进行了初步研

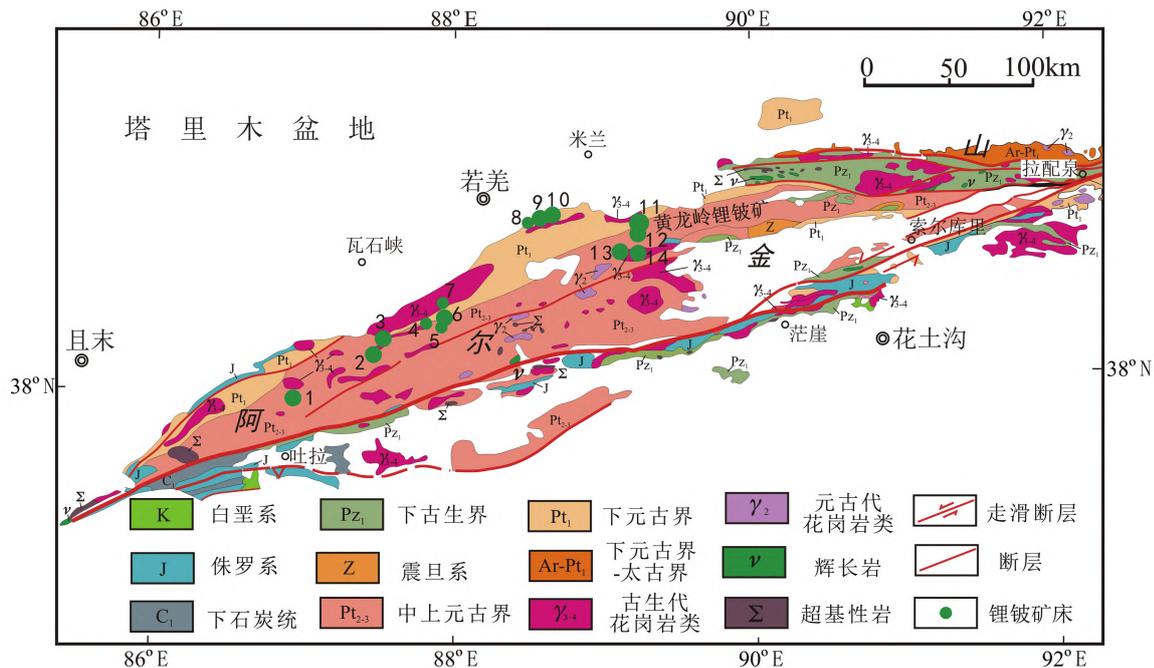


图1 阿尔金造山带地质简图与锂铍矿床分布(据王小凤等, 2004)

1-江嘎萨依锂矿;2-瓦石峡南锂矿;3-恰达克锂矿;4-瓦南1区锂矿;5-吐格曼锂铍矿;6-阿亚克锂矿;7-康吐盖锂矿;8-库木萨依西锂矿;9-库木萨依锂矿;10-沙梁西锂矿;11-黄龙岭锂矿;12-塔木切锂矿;13-塔什达坂锂矿;14-塔什达坂东锂矿

Fig. 1 Simplified geological map of the Altyn Tagh orogenic belt in NW China (after Wang *et al.*, 2004)

1-Jianggasayi lithium deposit; 2-Washixianan lithium deposit; 3-Qiadake lithium deposit; 4-Wanan 1 lithium deposit; 5-Tugeman lithium deposit; 6-Ayake lithium deposit; 7-Kangtugai lithium deposit; 8-Kumusayxi lithium deposit; 9-Kumusayi lithium deposit; 10-Shaliangxi lithium deposit; 11-Huanglongling lithium deposit; 12-Tamuqie lithium deposit; 13-Tashidaban lithium deposit; 14-Tashidabandong lithium deposit

究(徐兴旺等, 2019, 2020; 李杭等, 2020, 2022; Hong *et al.*, 2021)。

## 2 黄龙岭伟晶岩型锂矿床的发现及矿床地质特征

黄龙岭超大型锂矿床位于库木达坂东 10km 处(图 2), 行政区划隶属于若羌县。2021 年底,我们在沙梁西发现了锂矿化伟晶岩脉,目前通过勘探已达中型规模,在沙梁西锂矿以西相关勘查单位也相继发现了库木萨依锂矿床和库木萨依西锂矿床。这几个锂矿床均位于库木达坂花岗岩岩体群的北部。根据伟晶岩脉对称分带找矿模式(王核等, 2020), 我们预测在库木达坂花岗岩岩体群的南部应有望找到新的锂矿床。

库木达坂花岗岩岩体群由 7 个侵入体组成,出露面积约 125km<sup>2</sup>,呈北东东向展布,该岩体群的锂异常在整个阿尔金造山带中规模最大、异常值最高,最高异常值点可达 252 × 10<sup>-6</sup>。黄龙岭超大型锂矿床位于库木达坂花岗岩岩体群的南部高值点以西及高值点处,在其南翻过高山断崖出露一个中型锂矿床——塔木切锂矿床。该矿床的矿体向南高处伟晶岩脉变宽,锂辉石晶体变粗大且品位变富,推测山脊北部的高值点处是找矿的有利区带。

我们对黄龙岭一带进行详细的野外地质调查,开展了野外地质填图和剖面测量取样,确定黄龙岭为一处新的超大型锂矿床,这也是在阿尔金造山带中发现的首例超大型锂矿床。

### 2.1 矿区地质

矿区主要呈一单斜构造,矿区内各种岩石中片理和节理均比较发育,常出现紧闭小褶皱。出露地层主要为中元古界长城系巴什库尔干岩群(ChB)变质岩和第四系(Q)冲积物。巴什库尔干岩群以片岩、变粒岩类为主夹大理岩,地层产状倾向 125°~145°,倾角一般在 35°~55°之间。矿区范围内未见花岗岩,矿区以北 2km 出露库木达坂早古生代花岗岩岩体,主要由细粒黑云二长花岗岩和中粒黑云二长花岗岩组成,含细粒角闪黑云石英闪长岩包体。

矿区内出露数十条花岗伟晶岩岩脉,其中含矿花岗伟晶岩脉有 16 余条,脉体走向主要呈北东-南西向,主含矿伟晶岩脉长大于 4270m,宽 18.3~45m,其他伟晶岩脉长度介于 370~2980m 之间,宽度介于 1.2~25m 之间(图 3)。

含矿花岗伟晶岩脉多顺层侵入地层中,与围岩之间界线清楚,倾角一般在 35°~55°之间,同一岩脉之顶底板产状基本一致。伟晶岩形态一般呈较规则的板状、似层状或脉状,局部具膨胀收缩现象。含矿伟晶岩脉主要由石英、锂辉石和

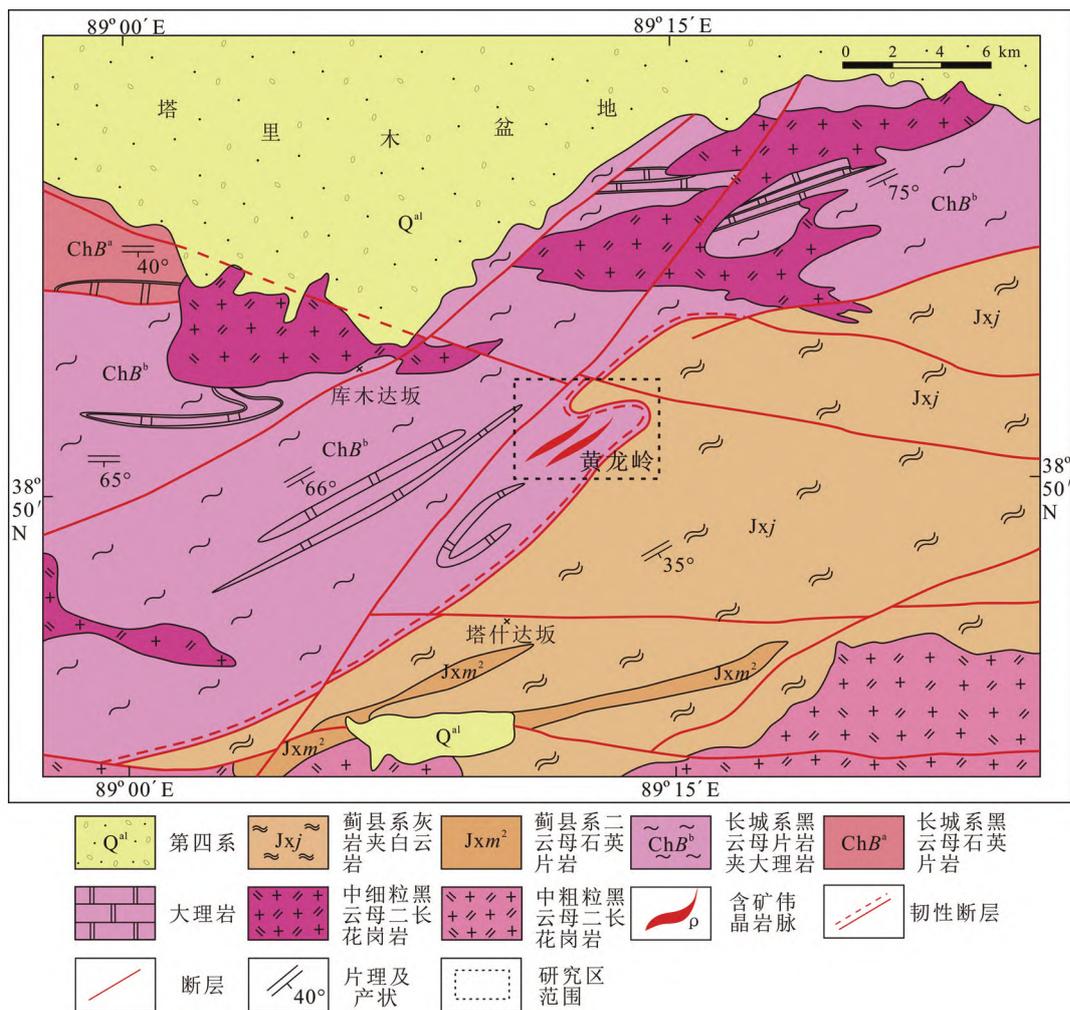


图2 阿尔金山库木达坂一带的地质简图和黄龙岭锂矿床的位置

Fig. 2 A sketched geological map of the Kumudaban area in the Altyn Tagh orogenic belt

长石组成,其次为白云母、锂云母、电气石等,局部偶见极少量的绿柱石。

矿区内区域变质作用普遍发育,岩石结晶程度较高,主要变质矿物组合有黑云母+石英+斜长石+白云母+(石榴石),夕线石+石榴石+黑云母+斜长石+石英,方解石+黑云母+石英+斜长石,黑云母+白云石+方解石,角闪石+斜长石+黑云母,角闪石+透辉石+斜长石+绿帘石,变质达高绿片岩相。

## 2.2 矿体地质特征

矿区主要出露一条长约4500m,宽度约1000m的含锂辉石伟晶岩脉群(图3),总体产状表现为 $125^{\circ} \sim 145^{\circ} \angle 41^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 。通过大比例尺填图,目前在该伟晶岩脉群中圈出1条规模巨大的矿体,标记为Li-1(图4a),并在Li-1矿体南北两侧,圈定了十余条规模不等的锂矿体,其中Li-1、Li-2(图4b)矿体规模较大。16条矿体的主要特征描述如下:

Li-1号矿体从西向东贯穿整个矿区,呈北东东-南西西

向。地表出露长约4270m,横亘于整个山崖(图4c),宽度18.3~45m,平均厚度27.76m,呈厚板状、层状,延伸稳定(图4c), $\text{Li}_2\text{O}$ 品位0.4%~5.53%。

Li-2号矿体与Li-1号矿体平行,地表出露长约2980m,宽度9.9~24m,平均厚度13.63m,呈厚板状、层状,延伸稳定, $\text{Li}_2\text{O}$ 品位0.4%~3.74%。

Li-3号矿体:位于矿区北部。地表出露长约370m,厚度1.70m,似层状展布, $\text{Li}_2\text{O}$ 品位3.80%。

Li-4号矿体位于Li-2号矿体北,与Li-2号矿体平行。地表出露长约1280m,平均厚度2.83m,呈厚板状、层状,延伸稳定, $\text{Li}_2\text{O}$ 品位2.14%

Li-5号、Li-6号、Li-7号矿体、Li-8号矿体出露于Li-1和Li-2矿体之间,出露长约520~1290m,厚度1.20~3.30m,似层状、脉状展布, $\text{Li}_2\text{O}$ 品位0.95%~2.61%。Li-5号、Li-6号向西与Li-7号矿体合成1条矿体。

Li-9号、Li-10号、Li-11号矿体位于Li-1矿体南侧,向西尖灭成1条矿体,矿体出露长约530~1280m,厚度1.80~

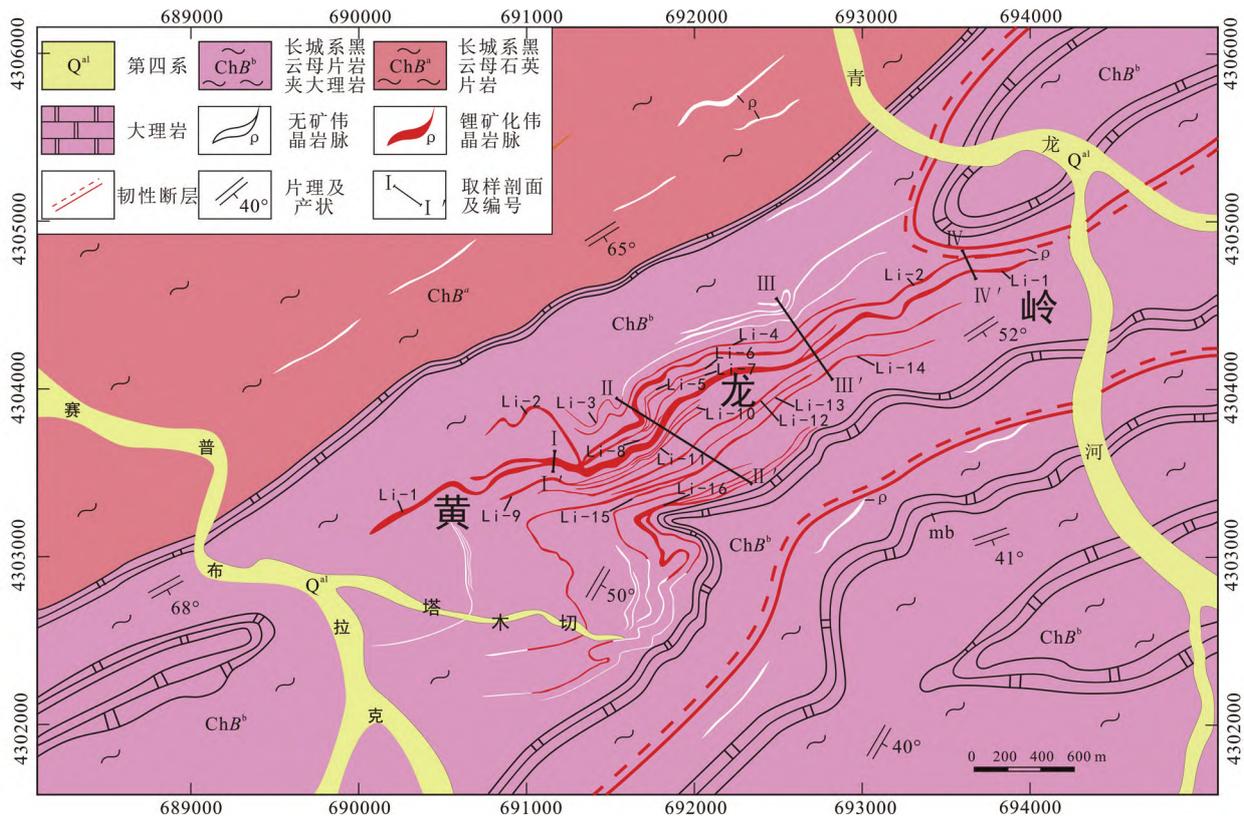


图3 阿尔金山黄龙岭锂矿床主要矿体地质简图

Fig. 3 A sketched geological map showing major ore bodies of the Huanglongling lithium deposit in the Altyn Tagh orogenic belt

4. 60m, 似层状、脉状展布,  $\text{Li}_2\text{O}$  品位 2.25% ~ 3.37%。

Li-12 号矿体: 位于断崖处, 呈北东东-南西西向展布。地表出露长约 2540m, 宽度 2.1 ~ 5.9m, 平均厚度 4.05m, 呈厚板状、层状延伸,  $\text{Li}_2\text{O}$  品位 2.18% ~ 3.81%。

Li-13 号矿体: 位于断崖处, 与 Li-12 号矿体平行, 矿体地表出露长约 1420m, 厚度 1.7m, 似层状、脉状延伸,  $\text{Li}_2\text{O}$  品位 2.44%。

Li-14 号矿体: 位于断崖处, 与 Li-12 号矿体平行, 呈北东东-南西西向。地表出露长约 2460m, 宽度 5.0 ~ 8.8m, 平均厚度 6.90m, 呈厚板状、层状, 延伸稳定,  $\text{Li}_2\text{O}$  品位 1.01% ~ 4.75%。

Li-15 号矿体: 位于山脊处, 呈北东东-南西西向。矿体地表出露长约 880m, 宽度 0.6 ~ 1.5m, 平均厚度 1.10m, 矿化顺地层产状沿自然山坡呈板状延深超过 350m, 350m 后矿化较弱, 出现绿柱石、锂电气石,  $\text{Li}_2\text{O}$  品位 1.81% ~ 4.11%。

Li-16 号矿体: 位于山脊处, 呈北东东-南西西向。矿体地表出露长约 1210m, 宽度 2.1 ~ 7.6m, 平均厚度 4.80m, 矿化顺地层产状沿自然山坡呈板状延深超过 400m, 400m 后矿化较弱,  $\text{Li}_2\text{O}$  品位 3.03% ~ 5.27%。

含矿伟晶岩脉内部分带相对简单(图 4d), 边部为细晶岩带, 由石英组成, 中部为石英-锂辉石带(图 4e), 局部见石英核。主要造岩矿物为石英、锂辉石和长石, 其次为白云母、

锂云母、电气石等, 局部偶见绿柱石。锂辉石呈淡灰白色, 含量一般 30% ~ 45%, 多呈粗大的板状晶体穿插于石英中(图 4f), 晶体粒度小者一般在 5 ~ 10cm × 20cm 之间, 大者达 30 ~ 40cm × 80cm(图 4g), 一些锂辉石中含有石英包裹体; 石英含量 50% ~ 70%; 长石主要为钠长石, 含量 5% ~ 8%; 白云母含量 3%, 其次见有少量锂电气石、绿柱石(图 4h)。

矿石主要发育粗粒伟晶结构、细晶结构、环状反西瓜皮结构等。其中以粗粒结构含矿性最好。粗粒伟晶结构中锂辉石粒度介于 10 ~ 20cm 之间, 局部可见锂电气石。细晶结构中主要由细粒至隐晶质石英组成, 矿物粒度介于 0.5 ~ 1cm 之间, 含少量细粒锂辉石和白云母。彩色电气石呈环状反西瓜皮结构, 外红里绿(图 4i)。

矿石构造较简单, 最常见的构造为条带状构造、块状构造。

### 3 测试方法

本次工作对 4 条主干剖面的含锂辉石伟晶岩脉进行了系统采样(图 5), 主要采用刻线样, 样长 2m, 共采集成矿元素化学分析样品 140 件, 样品分析结果见表 1。化学样品分析测试由新疆有色地质勘查局测试中心完成, 样品秤入聚四氟乙烯坩埚里, 定量加入硝酸-氢氟酸-硫酸-高氯酸混酸, 在电



图4 黄龙岭锂矿床野外照片

(a) 黄龙岭锂矿床中西段含矿伟晶岩远景; (b) 呈龙形的 Li-2 矿体; (c) 主矿体 Li-1 远景; (d) 简单分带的锂辉石伟晶岩脉; (e) 含矿伟晶岩内部结构带, 边部细晶石英岩带, 中间石英-锂辉石带; (f) Li-1 矿体富含粗大锂辉石伟晶岩; (g) Li-12 矿体巨晶板状锂辉石; (h) 伟晶岩中含绿柱石; (i) 反西瓜皮结构的彩色电气石

Fig. 4 Photos of the outcrops of the Huanglongling lithium deposit

(a) the prospect of mineralized pegmatite in the middle-western area of Huanglongling lithium deposit; (b) dragon-shaped Li-2 ore body; (c) Li-1 prospect of main ore body; (d) spodumene coexists with quartz; Simple zoning of spodumene pegmatite dikes; (e) the internal structure zone of ore-bearing pegmatite, the fine-grained quartzite zone at the edge and the quartz-spodumene zone in the middle; (f) Li-1 ore body is rich in coarse spodumene pegmatite; (g) Li-12 ore body megacryst plate spodumene; (h) beryl is contained in pegmatite; (i) colored tourmaline with anti-watermelon peel structure

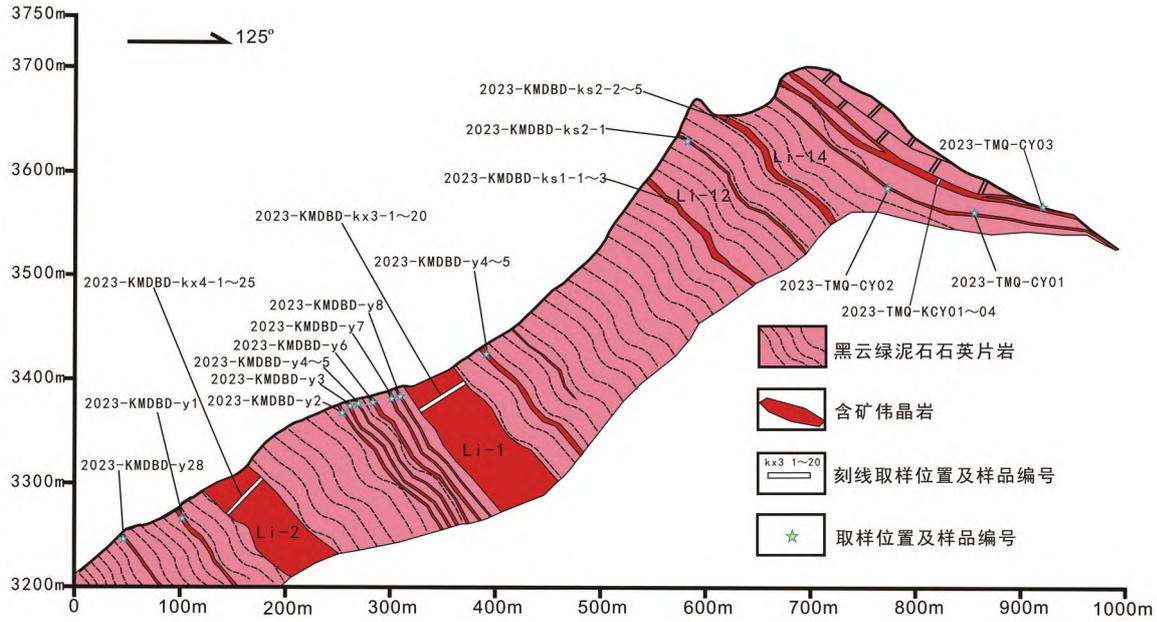


图5 阿尔金山黄龙岭锂矿床 II - II ' 典型剖面图

Fig.5 Typical profile of II - II ' of Huanglongling lithium deposit in Altyn Tagh

表1 黄龙岭锂矿床矿体化学分析结果一览表 (wt%)

Table 1 The schedule of chemical analysis results (wt%) of ore bodies in the Huanglongling lithium deposit

矿体编号	长度(m)	厚度(m)	控制样品编号	Li <sub>2</sub> O	BeO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Rb <sub>2</sub> O	Cs <sub>2</sub> O
Li-1	4270	27.76	2023KMDBD-kx3-1	1.98	0.056	0.016	0.006	0.095	0.008
			2023KMDBD-kx3-2	1.96	0.085	0.026	0.005	0.18	0.019
			2023KMDBD-kx3-3	0.90	0.044	0.016	0.017	0.11	0.015
			2023KMDBD-kx3-4	0.18	0.004	0.002	<0.001	0.029	0.037
			2023KMDBD-kx3-5	0.89	0.035	0.011	0.003	0.080	0.006
			2023KMDBD-kx3-6	1.36	0.047	0.005	0.004	0.043	0.005
			2023KMDBD-kx3-7	1.95	0.054	0.001	<0.001	0.085	0.009
			2023KMDBD-kx3-8	1.79	0.025	0.015	0.007	0.066	0.004
			2023KMDBD-kx3-9	0.47	0.001	0.001	<0.001	0.48	0.022
			2023KMDBD-kx3-10	0.70	0.002	0.019	0.004	0.046	0.004
			2023KMDBD-kx3-11	0.36	0.006	0.005	0.005	0.072	0.018
			2023KMDBD-kx3-12	1.23	0.021	0.016	0.008	0.11	0.006
			2023KMDBD-kx3-13	2.20	0.006	0.003	0.002	0.074	0.010
			2023KMDBD-kx3-14	2.62	0.046	0.002	<0.001	0.042	0.005
			2023KMDBD-kx3-15	1.68	0.048	0.005	0.001	0.10	0.006
			2023KMDBD-kx3-16	2.29	0.064	0.004	<0.001	0.055	0.006
			2023KMDBD-kx3-17	1.56	0.018	0.002	<0.001	0.057	0.006
			2023KMDBD-kx3-18	3.84	0.046	0.002	<0.001	0.016	0.003
			2023KMDBD-kx3-19	3.89	0.041	0.012	0.004	0.015	0.002
			2023KMDBD-kx3-20	2.36	0.023	0.015	0.006	0.058	0.005
23-KMDBD-KX-6-1	3.24	0.03	0.006	0.001	0.076	0.004			
23-KMDBD-KX-6-2	0.33	0.089	0.015	<0.001	0.33	0.017			
23-KMDBD-KX-6-3	1.81	0.051	0.011	<0.001	0.17	0.01			
23-KMDBD-KX-6-4	2.40	0.014	0.006	0.002	0.18	0.012			
23-KMDBD-KX-6-5	2.36	0.044	0.012	0.001	0.12	0.007			
23-KMDBD-KX-6-6	2.42	0.033	0.005	<0.001	0.13	0.008			
23-KMDBD-KX-6-7	2.81	0.031	0.007	0.002	0.091	0.006			
23-KMDBD-KX-6-8	2.60	0.055	0.012	0.002	0.15	0.012			
23-KMDBD-KX-6-9	2.53	0.031	0.007	0.002	0.14	0.008			

续表 1

Continued Table 1

矿体编号	长度(m)	厚度(m)	控制样品编号	Li <sub>2</sub> O	BeO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Rb <sub>2</sub> O	Cs <sub>2</sub> O
Li-1	4270	27.76	23-KMDBD-KX-6-10	5.53	0.10	0.02	0.003	0.06	0.01
			23-KMDBD-KX-6-11	2.98	0.062	0.014	<0.001	0.044	0.004
			23-KMDBD-KX-6-12	2.12	0.037	0.008	0.002	0.10	0.01
			23-KMDBD-KX-6-13	2.06	0.045	0.01	0.001	0.11	0.009
			23-KMDBD-KX-6-14	2.50	0.087	0.015	0.001	0.18	0.013
			23-KMDBD-KX-6-15	0.97	0.28	0.011	0.012	0.29	0.045
			23-KMDBD-KX-6-16	2.34	0.039	0.009	<0.001	0.09	0.007
			23-KMDBD-KX-6-17	0.11	0.038	0.01	<0.001	0.24	0.016
			23-KMDBD-KX-6-18	0.76	0.087	0.016	0.002	0.081	0.01
			23-KMDBD-KX-6-19	0.59	0.091	0.012	0.001	0.14	0.015
			23-KMDBD-KX-6-20	0.52	0.091	0.012	0.001	0.10	0.015
			23-KMDBD-y25-1	1.14	0.026	0.01	0.002	0.24	0.019
			23-KMDBD-y25-2	3.41	0.049	0.004	0.001	0.11	0.008
			23-KMDBD-y25-3	2.87	0.015	0.009	0.002	0.10	0.006
			23-KMDBD-y25-4	3.16	0.05	0.01	0.002	0.03	0.003
			23-KMDBD-y25-5	0.75	0.039	0.005	0.001	0.25	0.016
			23-KMDBD-y25-6	0.87	0.042	0.006	0.001	0.25	0.038
			23-KMDBD-y25-7	1.73	0.056	0.007	0.001	0.14	0.01
			23-KMDBD-y25-8	0.59	0.14	0.001	<0.001	0.18	0.012
			23-KMDBD-y25-9	0.30	0.03	0.005	0.002	0.25	0.012
23-KMDBD-y16	1.69	0.015	0.001	<0.001	0.029	0.002			
Li-2	2980	13.63	23-KMDBD-KX4-1	0.35	0.001	0.002	<0.001	0.082	0.040
			23-KMDBD-KX4-2	1.38	0.041	0.039	0.012	0.10	0.009
			23-KMDBD-KX4-3	1.09	0.058	0.050	0.019	0.050	0.006
			23-KMDBD-KX4-4	0.35	0.002	0.004	<0.001	0.043	0.035
			23-KMDBD-KX4-5	0.31	0.001	0.002	<0.001	0.038	0.025
			23-KMDBD-KX4-6	0.99	0.10	0.016	0.003	0.17	0.012
			23-KMDBD-KX4-7	0.088	0.002	<0.001	<0.001	0.53	0.027
			23-KMDBD-KX4-8	0.11	0.005	0.001	<0.001	0.54	0.026
			23-KMDBD-KX4-9	2.14	0.070	0.014	0.003	0.054	0.005
			23-KMDBD-KX4-10	1.88	0.039	0.010	0.008	0.017	0.002
			23-KMDBD-KX4-11	3.74	0.061	0.018	0.008	0.016	0.004
			23-KMDBD-KX4-12	2.98	0.034	0.006	0.002	0.041	0.004
			23-KMDBD-KX4-13	2.40	0.087	0.003	0.001	0.016	0.005
			23-KMDBD-KX4-14	0.88	0.002	0.006	0.002	0.029	0.002
			23-KMDBD-KX4-15	1.10	0.36	0.004	0.002	0.54	0.085
			23-KMDBD-KX4-16	2.80	0.003	<0.001	<0.001	0.27	0.018
			23-KMDBD-KX4-17	1.69	0.062	0.013	0.003	0.13	0.012
			23-KMDBD-KX4-18	0.11	0.085	0.026	0.003	0.010	0.004
			23-KMDBD-KX4-19	1.57	0.034	0.018	0.003	0.018	0.003
			23-KMDBD-KX4-20	0.75	0.093	0.027	0.004	0.044	0.007
			23-KMDBD-KX4-21	2.17	0.029	0.018	0.006	0.030	0.005
			23-KMDBD-KX4-22	3.04	0.029	0.008	0.003	0.093	0.010
			23-KMDBD-KX4-23	1.78	0.033	0.011	0.006	0.20	0.020
			23-KMDBD-KX4-24	1.41	0.029	0.008	0.002	0.26	0.022
			23-KMDBD-KX4-25	0.17	0.001	0.002	<0.001	0.025	0.006
			23-KMDBD-y24-1	1.61	0.042	0.004	0.003	0.15	0.008
			23-KMDBD-y24-2	1.09	0.032	0.01	0.004	0.003	<0.001
			23-KMDBD-y24-3	1.78	0.16	0.007	0.002	0.064	0.008
23-KMDBD-y24-4	3.62	0.093	0.004	0.001	0.018	0.004			
23-KMDBD-y24-5	3.29	0.013	0.004	0.002	0.029	0.002			
23-KMDBD-h3	0.68	0.016	0.003	<0.001	0.091	0.008			
23-KMDBD-y12	1.93	0.094	0.016	0.007	0.085	0.016			
23-KMDBD-y13	2.10	0.041	0.005	0.001	0.036	0.004			
Li-3	370	1.70	23-KMDBD-y28	3.80	0.004	0.002	0.002	0.049	0.008
Li-4	1820	2.83	23-KMDBD-y1	2.92	0.018	0.013	0.002	0.046	0.014
			23-KMDBD-y23-1	1.70	0.066	0.006	0.001	0.051	0.004
			23-KMDBD-y23-2	1.79	0.044	0.01	0.001	0.14	0.006

续表 1

Continued Table 1

矿体编号	长度(m)	厚度(m)	控制样品编号	Li <sub>2</sub> O	BeO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Rb <sub>2</sub> O	Cs <sub>2</sub> O
Li-5	560	1.30	23-KMDBD-y2	2.38	0.009	0.006	0.002	0.022	
			23-KMDBD-y14	1.38	0.066	0.014	0.003	0.024	
Li-6	550	1.20	23-KMDBD-y3	0.95	0.054	0.014	0.002	0.056	0.005
Li-7	1290	3.30	23-KMDBD-y4	0.76	0.065	0.007	<0.001	0.22	0.017
			23-KMDBD-y5	3.56	0.042	0.009	0.002	0.042	0.004
Li-8	520	1.80	23-KMDBD-y6	1.49	0.012	0.010	0.002	0.073	0.005
			23-KMDBD-y15	3.73	0.054	0.012	0.002	0.11	0.018
Li-9	890	2.10	23-KMDBD-y7	2.25	0.057	0.012	0.002	0.12	0.027
Li-10	530	1.80	23-KMDBD-y8	2.51	0.015	0.011	<0.001	0.090	0.013
Li-11	1280	4.60	23-KMDBD-y9	1.73	0.050	0.013	0.002	0.098	0.018
			23-KMDBD-y10	5.01	0.020	0.012	0.004	0.033	0.010
Li-12	2540	4.05	23-KMDBD-ks1-1	2.18	0.084	0.012	0.002	0.12	0.016
			23-KMDBD-ks1-2	3.81	0.007	0.016	0.002	0.055	0.005
			23-KMDBD-ks1-3	2.92	0.044	0.012	0.002	0.11	0.018
			23-KMDBD-y26	2.16	0.004	0.002	0.001	0.68	0.13
Li-13	1420	1.7	23-KMDBD-ks2-1	2.44	0.060	0.010	0.003	0.045	0.014
			23-KMDBD-ks2-2	2.73	0.061	0.012	0.004	0.053	0.018
			23-KMDBD-ks2-3	4.75	0.054	0.010	0.003	0.034	0.012
			23-KMDBD-ks2-4	2.02	0.12	0.006	0.003	0.098	0.055
			23-KMDBD-ks2-5	1.01	0.062	0.008	0.004	0.21	0.034
			23-KMDBD-y27	3.44	0.002	0.006	0.003	0.11	0.058
			23-TSDB-CHW-y1-1	3.98	0.060	0.033	0.008	0.003	0.006
			23-TSDB-CHW-y1-2	1.32	0.039	0.23	0.010	0.002	0.025
			23-TSDB-CHW-y2-1	1.21	0.002	0.089	0.005	0.001	0.036
			23-TSDB-CHW-y2-2	0.76	0.044	0.38	0.002	0.002	0.042
			23-TSDB-CHW-y3-1	2.79	0.026	0.051	0.009	<0.001	0.006
			23-TSDB-CHW-y3-2	2.22	0.11	0.13	0.007	0.001	0.015
			23-TSDB-CHW-y3-3	1.74	0.031	0.34	0.008	0.002	0.044
			23-TSDB-CHW-y3-4	1.46	0.022	0.094	0.013	0.007	0.021
23-TSDB-CHW-y3-5	1.39	0.60	0.061	0.012	0.008	0.079			
23-TSDB-CHW-y3-6	1.20	0.013	0.058	0.017	0.004	0.014			
23-TSDB-CHW-y4-1	0.52	0.034	0.14	0.012	0.005	0.016			
Li-15	880	1.2	23-TMQ-CY01	1.81	0.007	0.006	0.005	0.21	0.056
			23-TMQ-CY02	4.11	0.003	0.017	0.008	0.21	0.066
Li-16	1210	4.8	23-TMQ-CY03	5.27	0.13	0.007	0.033	0.18	0.080
			23-TMQ-CY04	2.98	0.25	0.59	0.014	0.010	0.18
			23-TMQ-CY05	3.27	0.003	0.088	0.003	0.002	0.021
			23-TMQ-CY06	1.86	0.004	0.34	0.006	0.003	0.051
			23-TMQ-CY07	1.73	0.004	0.15	0.003	0.002	0.030
			23-TMQ-CY08	1.45	0.004	0.59	0.012	0.008	0.20
			23-TMQ-CY09	2.10	0.027	0.83	0.009	0.010	0.23
			23-TMQ-CY10	1.90	0.015	0.41	0.008	0.002	0.075
			23-TMQ-KCY01	4.12	0.024	0.002	0.001	0.11	0.027
			23-TMQ-KCY02	3.65	0.17	0.003	0.010	0.34	0.18
23-TMQ-KCY03	3.57	0.053	0.004	0.009	0.19	0.071			
23-TMQ-KCY04	3.03	0.13	0.006	0.002	0.21	0.051			
ρ1	680	3.90	23-KMDBD-y18-1	0.025	0.0004	0.006	<0.001	0.001	0.001
			23-KMDBD-y19-1	0.012	0.0001	0.002	<0.001	<0.001	0.0003
ρ2	1290	4.60	23-KMDBD-y20-1	0.054	0.043	0.076	0.006	0.003	0.006
			23-KMDBD-y20-2	0.083	0.029	0.070	0.006	0.002	0.005
ρ3	1820	6.20	23-KMDBD-y21-1	0.051	0.002	0.35	<0.001	<0.001	0.014
			23-KMDBD-y21-2	0.48	0.056	0.034	0.010	0.004	0.007
			23-KMDBD-y21-3	0.088	0.019	0.11	0.005	0.002	0.008

表2 黄龙岭锂矿床资源量预测一览表

Table 2 Resource estimate of the Hauanglongling lithium deposit

矿体	长度(m)	厚度(m)	延深(m)	比重( $\text{t}/\text{m}^3$ )	平均品位(%)			预测资源量(万 t)		
					$\text{Li}_2\text{O}$	BeO	$\text{Rb}_2\text{O}$	$\text{Li}_2\text{O}$	BeO	$\text{Rb}_2\text{O}$
Li-1	2770	27.76	300	2.7	1.82	0.05	0.13	113.36	3.11	8.10
Li-2	2610	13.63	300	2.7	1.54	0.053	0.12	44.38	1.53	3.46
Li-4	1060	2.83	300	2.7	2.13	—	—	6.25	—	—
Li-12	930	4.05	300	2.7	2.76	—	0.096	8.42	—	0.29
Li-14	930	6.90	300	2.7	2.63	0.06	—	13.67	0.31	—
合计								186.08	4.95	11.85

热板上加热消解完全,冷却,制成2%王水介质的溶液,用电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞世尔 Xseries II型)测定Li、Be、Nb、Ta、Rb、Cs的含量。如果Li、Be含量较高,制成10%王水介质的溶液,用电感耦合等离子体光谱仪(美国赛默飞世尔 iCAP6300 Radial)测定其含量。样品测试完成后,副样送10%进行了外检,外检结果在误差范围内。

#### 4 黄龙岭伟晶岩型锂矿床潜在资源估算

我们对16条锂矿体进行了系统采样,并对至少2条以上采样控制线的矿体预测了潜在资源量(表2)。

通过对位于含矿伟晶岩脉群最上部山脊处的Li-15、Li-16矿体产状及侧伏的研究,发现这2个矿体呈板状向北倾,由于南北向自然山坡的切割,可以观测到2个矿体沿倾伏方向的延深超过350~400m。本次预测的Li-1、Li-2、Li-4、Li-12、Li-14等矿体,相对Li-15、Li-16矿体更稳定,延深均按300m估算,是相对保守且合理的深度。

(1) Li-1矿体:经地表4条连续刻线控制矿体长度2770m,取样分析获得的矿石品位如下(表1): $\text{Li}_2\text{O}$ 含量为0.4%~5.53%,平均品位1.82%;BeO含量为0.03%~0.28%,平均品位0.05%,达到伴生工业品位; $\text{Rb}_2\text{O}$ 含量为0.04%~0.49%,平均品位0.13%,达到工业品位; $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 含量为0.001%~0.026%,平均品位0.008%; $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 含量为0.001%~0.017%,平均品位0.003%,( $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Ta}_2\text{O}_5$ )平均品位0.011且 $\text{Ta}_2\text{O}_5 < \text{Nb}_2\text{O}_5$ ,未达到伴生工业品位; $\text{Cs}_2\text{O}$ 含量为0.003%~0.038%,平均品位0.012%,未达伴生工业品位。我们按矿体长2770m、延深300m估算,预测潜在资源量为113.36万t  $\text{Li}_2\text{O}$ 、3.11万t BeO和8.10万t  $\text{Rb}_2\text{O}$ 。

(2) Li-2矿体经地表3条连续刻线控制矿体长度2610m,取样分析  $\text{Li}_2\text{O}$  品位0.4%~3.74%,平均品位1.54%;BeO品位0.03%~0.36%,平均品位0.053%,达到伴生工业品位; $\text{Rb}_2\text{O}$ 品位0.04%~0.54%,平均品位0.12%,达到工业品位;( $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Ta}_2\text{O}_5$ )平均品位0.015%,且 $\text{Ta}_2\text{O}_5 < \text{Nb}_2\text{O}_5$ ,未达到伴生工业品位; $\text{Cs}_2\text{O}$ 平均品位0.014%,未达到伴生工业品位。按矿体长2610m,延深300m估算,预测潜在资源的量  $\text{Li}_2\text{O}$  为44.38万t,BeO为1.53万

t,  $\text{Rb}_2\text{O}$  为3.46万t。

(3) Li-4矿体:经地表3条连续刻线控制矿体长度1060m,取样分析  $\text{Li}_2\text{O}$  品位0.4%~3.74%,平均品位2.13%,BeO、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Rb}_2\text{O}$ 、 $\text{Cs}_2\text{O}$ 均达不到伴生工业品位。按矿体长1060m,延深300m估算,预测潜在资源的量  $\text{Li}_2\text{O}$  为6.25万t。

(4) Li-12矿体:经地表2条连续刻线控制矿体长度930m,取样分析  $\text{Li}_2\text{O}$  品位2.16%~3.81%,平均品位2.76%; $\text{Rb}_2\text{O}$ 品位0.055%~0.12%,平均品位0.096%,达到工业品位;BeO、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Cs}_2\text{O}$ 均达不到伴生工业品位。按矿体长930m,延深300m估算,预测潜在资源的量  $\text{Li}_2\text{O}$  为8.42万t,  $\text{Rb}_2\text{O}$  为0.29万t。

(5) Li-14矿体:经地表2条连续刻线控制矿体长度930m,取样分析  $\text{Li}_2\text{O}$  品位1.01%~4.75%,平均品位2.63%;BeO品位0.054%~0.12%,平均品位0.06%,达到工业品位; $\text{Rb}_2\text{O}$ 、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Cs}_2\text{O}$ 均达不到伴生工业品位。按矿体长930m,延深300m估算,预测潜在资源的量  $\text{Li}_2\text{O}$  为13.67万t, BeO为0.31万t。

本次工作仅对Li-1号、Li-2号、Li-4号、Li-12号、Li-14号矿体进行了潜在资源的初步估算,计  $\text{Li}_2\text{O}$  为186.08万t, BeO为4.95万t,  $\text{Rb}_2\text{O}$  为11.85万t(表2),达到超大型远景规模。

#### 5 黄龙岭超大型锂矿床发现的意义

我国大型-超大型伟晶岩型锂矿主要集中产出在白龙山-甲基卡古特提斯锂矿带和喜马拉雅锂矿带(Wang *et al.*, 2020; 秦克章等, 2021; Yan *et al.*, 2022)。阿尔金地区近年来找到了一批中小型锂矿床,但大型-超大型锂矿找矿尚未突破。黄龙岭超大型锂矿床的发现,对阿尔金-柴达木北缘寻找相同类型的矿床提供了借鉴,围绕库木达坂花岗岩岩体群以及苏吾什杰岩体群可能是阿尔金地区今后寻找大型锂矿床的有利区带,也证实了“伟晶岩脉对称分带”找矿模式在阿尔金一带具有理论指导意义。这一发现将有助于破解若羌县全国最大年产12万t碳酸锂项目“无米下锅”的困局,助力打造千亿产值的新材料产业基地。

## 6 结论

(1) 在新疆若羌县阿尔金山黄龙岭地区新发现了一处超大型伟晶岩型锂矿床。圈定出一条长大于 4500m、宽大于 1000m 的含锂辉石矿伟晶岩脉群;初步估算矿区潜在资源量为 186.08 万 t  $\text{Li}_2\text{O}$ 、4.95 万 t  $\text{BeO}$  和 11.85 万 t  $\text{Rb}_2\text{O}$ 。

(2) 黄龙岭花岗伟晶岩型锂矿床规模大,该矿床的发现是阿尔金山地区稀有金属矿产找矿的重大突破。围绕着库木达坂花岗岩岩体群以及苏吾什杰岩体群进一步找矿勘查是阿尔金山地区今后寻找大矿的有利区带。

**致谢** 野外工作得到若羌县人民政府刘兴中、若羌县自然资源局刘智育、赵新杰等的大力支持和帮助;论文撰写过程中得到了申萍研究员、王焰研究员、俞良军博士的悉心帮助,使文章得以完善;化验测试由新疆有色地质勘查局测试中心张华琴等完成;在此一并致以诚挚的谢意。

## References

- Cao YT, Liu L, Wang C, Kang L, Li D, Yang WQ and Zhu XH. 2019. Timing and nature of the partial melting processes during the exhumation of the garnet-bearing biotite gneiss in the southern Altyn Tagh HP/UHP belt, western China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170: 274 – 293
- Fu XF, Yuan LP, Wang DH, Hou LW, Pan M, Hao XF, Liang B and Tang Y. 2015. Mineralization characteristics and prospecting model of newly discovered X03 rare metal vein in Jiajika ore field, Sichuan. *Mineral Deposits*, 34(6): 1172 – 1186 (in Chinese with English abstract)
- Gao YB, Zhao XM, Bagas L, Wang YL, Jin MS, Zhang JW, Lu L, Gao YJ, Yan ZQ, Teng JX and Yang ZQ. 2021. Newly discovered Ordovician Li-Be deposits at Tugeman in the Altyn-Tagh Orogen, NW China. *Ore Geology Reviews*, 139: 104515
- He P. 2021. New achievements on regional geological survey of three 1 : 50000 sheets of Bextograk in North Altyn-Tagh, Xinjiang. *China Mining Magazine*, 30(Suppl. 1): 255 – 259 (in Chinese)
- Hong T, Zhai MG, Xu XW, Li H, Wu C, Ma YC, Niu L, Ke Q and Wang C. 2021. Tourmaline and quartz in the igneous and metamorphic rocks of the Tashisayi granitic batholith, Altyn Tagh, northwestern China: Geochemical variability constraints on metallogenesis. *Lithos*, 400 – 401: 106358
- Li H, Hong T, Yang ZQ, Chen JZ, Ke Q, Wang XH, Niu L and Xu XW. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 36(9): 2869 – 2892 (in Chinese with English abstract)
- Li H, Hong T, Yang ZQ, Liu SK, Wang XH, Ma YC, Niu L and Xu XW. 2022. Multi-stage magmatism-mineralization and tectonic setting of the North Tugeman granitic pegmatite lithium-beryllium deposit in the middle of Altyn Tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 38(10): 3085 – 3103 (in Chinese with English abstract)
- Li JK, Liu XF and Wang DH. 2014. The metallogenetic regularity of lithium deposit in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269 – 2283 (in Chinese with English abstract)
- Li JK, Li P, Wang DH and Li XJ. 2019. A review of niobium and tantalum metallogenetic regularity in China. *Chinese Science Bulletin*, 64(15): 1545 – 1566 (in Chinese with English abstract)
- Li PX, Fan MJ, Ma YF, Wang Q, Guo XN and Song ZY. 2022. Progress in regional geological and mineral survey of 1 : 50000 in Altyn Tashidaban area, Xinjiang. *Geological Survey of China*, 9(6): 17 – 22 (in Chinese with English abstract)
- Liu L, Wang C, Cao YT, Chen DL, Kang L, Yang WQ and Zhu XH. 2012. Geochronology of multi-stage metamorphic events: Constraints on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the South Altyn, NW China. *Lithos*, 136 – 139: 10 – 26
- Liu LJ, Wang DH, Liu XF, Li JK, Dai HZ and Yan WD. 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)
- Qin KZ, Zhao JX, He CT and Shi RZ. 2021. Discovery of the Qongjiagang giant lithium pegmatite deposit in Himalaya, Tibet, China. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3277 – 3286 (in Chinese with English abstract)
- Wang BZ, Han J, Xie XL, Chen J, Wang T, Xue WW, Bai ZH and Li SP. 2020. Discovery of the Indosinian (beryl-bearing) spodumene pegmatitic dike swarm in the Chakaibeishan area in the northeastern margin of the Tibetan Plateau: Implications for Li-Be mineralization. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(1): 69 – 79 (in Chinese with English abstract)
- Wang DH, Sun Y, Liu XF, Tian SH, Dai JJ, Liu LJ and Ma SC. 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 H, Li P, Ma HD, Zhu BY, Qiu L, Zhang XY, Dong R, Zhou KL, Wang M, Wang Q, Yan QH, Wei XP, He B, Lu H and Gao H. 2017. Discovery of the Bailongshan superlarge lithium-rubidium deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang, and its prospecting implication. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(6): 1053 – 1062 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Gao H, Zhang XY, Yan QH, Xu YG, Zhou KL, Dong R and Li P. 2020. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li-Rb-(Be) rare-metal pegmatite deposit, West Kunlun orogenic belt, NW China. *Lithos*, 360 – 361: 105449
- Wang H, Gao H, Ma HD, Zhu BY, Xing CH, Zhou KL, Zhu BZ, Wang ZH, Wang M, Dong R, Yan QH and Zhang XY. 2020. Geological characteristics and pegmatite vein group zoning of the Xuefengling, Xuepen, and Shuangya lithium deposits in Karakorum, Hetian, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(1): 57 – 68 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Xu YG, Yan QH and Zhang XY. 2021. Research progress on Bailongshan pegmatite type lithium deposit, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3085 – 3098 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Huang L, Bai HY, Wang KY, Wang ZH, Gao H, Zhou JS, Qing Y and Wang Y. 2022. Types, distribution, development and utilization of lithium mineral resources in China: Review and perspective. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(5): 848 – 866 (in Chinese with English abstract)
- Wang H, Huang L, Ma HD, Li Y, Wang W, Xiao F, Bai HY and Wang KY. 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 XF, Chen XH, Chen ZL, Chen BL, Wang LQ, Yang F and Wang KZ. 2004. The Metallogenic Geologic Conditions and Prospecting Prediction in Altyn Tagh Area. Geological Publishing House, 1 – 463 (in Chinese with English abstract)
- Xu XW, Li H, Shi FP, Yao FJ, Chen JZ, Yang ZQ, Hong T and Ke Q. 2019. Metallogenetic characteristics and prospecting of granitic pegmatite-type rare metal deposits in the Tugeman area, middle part of Altyn Tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 35(11): 3303 – 3316 (in Chinese with English abstract)
- Xu XW, Hong T, Li H, Niu L, Ke Q, Chen JZ, Liu SK and Zhai MG. 2020. Concept of high-temperature granite-pegmatite Li-Be

metallogenic system with a primary study in the middle Altyn-Tagh. Acta Petrologica Sinica, 36(12): 3572 – 3592 (in Chinese with English abstract)

- Yan QH, Wang H, Chi GX, Wang Q, Hu H, Zhou KL and Zhang XY. 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
- Zhai MG, Wu FY, Hu RZ, Jiang SY, Li WC, Wang RC, Wang DH, Qi T, Qin KZ and Wen HJ. 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 33(2): 106 – 111 (in Chinese with English abstract)
- Zhang H, He P, Lu XZ, He XT and Liu X. 2022. Discovery and significance of rare and rare earth metal deposits in the south of Washixia, northern margin of Altun. Modern Mining, 38(1): 34 – 36, 87 (in Chinese)

#### 附中文参考文献

- 付小方, 袁茵平, 王登红, 侯立玮, 潘蒙, 郝雪峰, 梁斌, 唐屹. 2015. 四川甲基卡矿田新三号稀有金属矿脉的成矿特征与勘查模型. 矿床地质, 34(6): 1172 – 1186
- 何鹏. 2021. 新疆阿尔金北缘拜什托格拉克一带1:5万三幅区域地质矿产调查新进展. 中国矿业, 30(增1): 255 – 259
- 李杭, 洪涛, 杨智全, 陈建中, 柯强, 王学海, 牛磊, 徐兴旺. 2020. 稀有金属花岗伟晶岩锆石、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. 岩石学报, 36(9): 2869 – 2892
- 李杭, 洪涛, 杨智全, 刘善科, 王学海, 马垠策, 牛磊, 徐兴旺. 2022. 阿尔金中段吐格曼北花岗伟晶岩型锂铍矿床多阶段岩浆-成矿作用. 岩石学报, 38(10): 3085 – 3103
- 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
- 李建康, 李鹏, 王登红, 李兴杰. 2019. 中国铌钽矿成矿规律. 科学通报, 64(15): 1545 – 1566
- 李鹏霄, 范天甲, 马雁飞, 王启, 郭晓南, 孙中原. 2022. 新疆阿尔金塔什达坂地区1:5万区域地质矿产调查进展. 中国地质调查, 9(6): 17 – 22
- 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、分布特点及勘查开发现状. 中国地质, 44(2): 263 – 278
- 秦克章, 赵俊兴, 何畅通, 施睿哲. 2021. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩型锂矿的发现及意义. 岩石学报, 37(11): 3277 – 3286
- 王秉璋, 韩杰, 谢祥镭, 陈静, 王涛, 薛万文, 白宗海, 李善平. 2020. 青藏高原东北缘茶卡北山印支期(含绿柱石)锂辉石伟晶岩脉群的发现及 Li-Be 成矿意义. 大地构造与成矿学, 44(1): 69 – 79
- 王登红, 孙艳, 刘喜方, 田世洪, 代晶晶, 刘丽君, 马圣钊. 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铍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, 黄亮, 白洪阳, 王莹宇, 王振宏, 高昊, 周金胜, 秦艳, 王焰. 2022. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状: 评述和展望. 大地构造与成矿学, 46(5): 848 – 866
- 王核, 黄亮, 马华东, 李永, 王威, 肖飞, 白洪阳, 王莹宇. 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
- 王小凤, 陈宣华, 陈正乐, 陈柏林, 王连庆, 杨风, 王克卓. 2004. 阿尔金地区成矿地质条件与远景预测. 北京: 地质出版社, 1 – 463
- 徐兴旺, 李杭, 石福品, 姚佛军, 陈建中, 杨智全, 洪涛, 柯强. 2019. 阿尔金中段吐格曼地区花岗伟晶岩型稀有金属成矿特征与找矿预测. 岩石学报, 35(11): 3303 – 3316
- 徐兴旺, 洪涛, 李杭, 牛磊, 柯强, 陈建中, 刘善科, 翟明国. 2020. 初论高温花岗岩-伟晶岩锂铍成矿系统: 以阿尔金中段地区为例. 岩石学报, 36(12): 3572 – 3592
- 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
- 张焕, 何鹏, 芦西战, 贺晓天, 刘晓. 2022. 阿尔金北缘瓦石峡南部稀有金属、稀土矿点的发现及意义. 现代矿业, 38(1): 34 – 36, 87