

DOI: 10.12401/j.nwg.2023004

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

孔会磊^{1,2}, 任广利¹, 李文渊^{1,*}, 李侃¹, 赵晓健¹, 张江伟¹, 李伟¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘要: 西昆仑地区是中国重要的伟晶岩型锂铍成矿带, 近年来在大红柳滩一带取得重大找矿突破, 已形成大型矿产资源基地。笔者对西昆仑大红柳滩东锂辉石花岗伟晶岩进行了详细的岩相学、年代学和地球化学研究, 能够为本区伟晶岩型锂矿成矿作用研究提供新的依据。利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得大红柳滩东含锂辉石钠长花岗伟晶岩及含锂辉石电气石花岗伟晶岩年龄分别为 (205.2 ± 1.4) Ma 和 (205.0 ± 2.6) Ma, 形成时代为晚三叠世。岩石地球化学研究表明, 大红柳滩东含锂辉石花岗伟晶岩以高 Si、富 Al、富 Na、钙碱质, 高分异, 低 K、Fe、Mg、Ca 和 Ti 为特征, 属强过铝质花岗伟晶岩。岩石明显富集 Rb、U、Nb、Ta、Pb、P、Hf 等元素, 亏损 Ba、Th、La、Ce、Pr、Sr、Nd、Sm、Ti 等元素; 稀土总量较低, $\sum\text{REE}$ 值为 $0.56 \times 10^{-6} \sim 3.34 \times 10^{-6}$, 具有弱-中等的负钕异常, δEu 值为 0.30~0.89。大红柳滩东伟晶岩均具有低且负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-4.6 \sim 0$) 和古老的二阶段 Hf 模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ ($1497 \sim 1208$ Ma), 反映其源岩为古老地壳物质的部分熔融。结合西昆仑地区已有年代学资料和区域地质构造演化特征, 认为大红柳滩一带伟晶岩矿床形成于南昆仑地体与甜水海地体后碰撞背景下。

关键词: 地球化学; 花岗伟晶岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 大红柳滩东; 西昆仑

中图分类号: P618.71; P612

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)02-0061-19

Geochronology, Geochemistry and Their Geological Significances of Spodumene Pegmatite Veins in the Dahongliutandong Deposit, Western Kunlun, China

KONG Huilei^{1,2}, REN Guangli¹, LI Wenyuan^{1,*}, LI Kan¹, ZHAO Xiaojian¹, ZHANG Jiangwei¹, LI Wei¹

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an

710054, Shannxi, China; 2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: West Kunlun is an important pegmatite-type Li-Be metallogenic belt in China. In recent years, a

收稿日期: 2022-10-26; 修回日期: 2023-02-07; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目“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), 第二次青藏高原综合科学考察研究专题“昆仑-阿尔金-柴北缘成矿带战略储备综合评估”(2019QZKK0806), 国家重点研发计划课题“西部锂、铍等战略性金属矿产资源成矿规律与预测评价”(2019YFC0605201)和中国地质调查局项目“西昆仑-阿尔金成矿带铁锰稀有金属矿产地质调查”(DD20230285)联合资助。

作者简介: 孔会磊(1985-), 男, 博士生, 高级工程师, 从事区域成矿及成矿规律研究。E-mail: konghuilei2008@126.com。

* 通讯作者: 李文渊(1962-), 男, 博士, 研究员, 从事岩浆作用矿床及区域成矿研究。E-mail: xalwenyuan@126.com。

great breakthrough in prospecting has been made in Dahongliutan area, and a large mineral resource base has been formed. In this paper, detailed researches on petrography, geochronology and geochemistry of the spodumene granite pegmatites in Dahongliutandong, West Kunlun, can provide a new basis for the study of pegmatite-type lithium mineralization in this area. By using LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, the ages of spodumene-bearing albite pegmatite and spodumene-bearing tourmaline granite pegmatite in the Dahongliutandong are 205.2 ± 1.4 Ma and 205.0 ± 2.6 Ma, respectively, in the Late Triassic. Geochemical study shows that spodumene-bearing granite pegmatites in the Dahongliutandong is characterized by high Si, rich Al, Na, calc-alkali, high differentiation and low K, Fe, Mg, Ca and Ti, and belongs to strongly peraluminous granite pegmatite. The pegmatites are obviously rich in elements such as Rb, U, Nb, Ta, Pb, P, Hf, but depleting in elements such as Ba, Th, La, Ce, Pr, Sr, Nd, Sm and Ti. The total amount of rare earth is low, with $\sum\text{REE}$ of $0.56 \times 10^{-6} \sim 3.34 \times 10^{-6}$, weak-medium negative Eu anomaly and δEu of $0.30 \sim 0.89$. The pegmatites in the Dahongliutandong have low and negative $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values ($-4.6 \sim 0$) and the old two-stage Hf model age T_{DM2} ($1\,497 \sim 1\,208$ Ma), which indicates that their source rocks are from partial melting of ancient crustal materials. Based on the chronological data and the evolution characteristics of regional geological structure in West Kunlun, it is considered that pegmatite deposits in Dahongliutan area were formed in the background of post-collision between South Kunlun terrane and Tianshuihai terrane.

Keywords: geochemistry; granite pegmatites; zircon LA-ICP-MS U-Pb dating; Dahongliutandong; West Kunlun

花岗伟晶岩型锂矿是锂资源的重要来源之一 (Kesler et al., 2012), 是目前矿床学研究的热点, 受到空前的关注和重视 (Černý et al., 2005; Linnen et al., 2012; London, 2018; Ditttrich et al., 2019; 陈衍景等, 2021; 张辉等, 2021; 李建康等, 2021; 蒋少涌等, 2021)。随着关键金属锂的战略作用日益凸显, 近几年中央、地方和企业不断加大投入, 花岗伟晶岩型锂矿床在西昆仑大红柳滩一带 (王核等, 2017, 2021; 李侃等, 2019; 涂其军等, 2019; Yan et al., 2022)、川西松潘-甘孜 (许志琴等, 2018, 2021; Xu et al., 2020; Yan et al., 2020; Fei et al., 2020, 2021)、阿尔金吐格曼 (徐兴旺等, 2019; 李杭等, 2020; Gao et al., 2021)、柴北缘茶卡北山 (王秉璋等, 2020; 李善平等, 2021; Pan et al., 2021)、藏南喜马拉雅 (吴福元等, 2021; 赵俊兴等, 2021; 秦克章等, 2021) 等地区均取得了重大找矿突破, 找矿前景巨大。

大红柳滩一带锂矿床, 主要分布于三叠纪大红柳滩花岗岩基南东端围岩巴颜喀拉群地层中, 已形成大型矿产资源基地。前人研究多集中于白龙山与阿克塔斯, 不同矿区的研究程度极度不均衡, 限制了区域找矿突破。大红柳滩东锂矿是大红柳滩一带近几年新发现的少数产在二叠系黄羊岭群地层中的伟晶岩型锂矿床, 对其伟晶岩成矿地质特征认识的不足严重制约了区域找矿的新突破。因此, 笔者首次对大红柳

滩东锂矿区含锂辉石花岗伟晶岩进行系统的岩相学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究, 以准确厘定该区含矿伟晶岩的形成时代, 探讨其岩石成因与构造背景, 为本区伟晶岩型锂矿成矿作用研究提供新的依据。

1 地质背景

西昆仑地区中生代花岗伟晶岩十分发育, 是中国重要的伟晶岩型锂铍成矿带。西昆仑锂铍稀有金属成矿带中的伟晶岩成群成带集中分布, 自西北往东南主要分为西段的木吉-布伦口地区、中段的塔什库尔干-麻扎地区、东段的康西瓦-泉水沟地区, 构成了一个 600 km 长的稀有金属成矿带 (Yan et al., 2022), 主要分布于甜水海及喀喇昆仑地体中, 其中以东段的康西瓦-大红柳滩一带最为发育, 已发现 7 000 余条伟晶岩脉 (邹天人等, 2006)。木吉-布伦口地区主要有卡拉瓦拉锂铍矿点、肖尔布隆锂铍矿点、霍什塔什锂铍矿点、土曼其铍矿点, 塔什库尔干-麻扎地区主要有达布达尔铍矿点、三素铍矿点 (图 1) (王核等, 2021; Yan et al., 2022)。大中型锂铍矿床主要集中分布于康西瓦-大红柳滩一带, 自 1958 年发现阿克塔斯中型锂矿以来, 该区伟晶岩型锂矿找矿取得重大突破, 陆续发

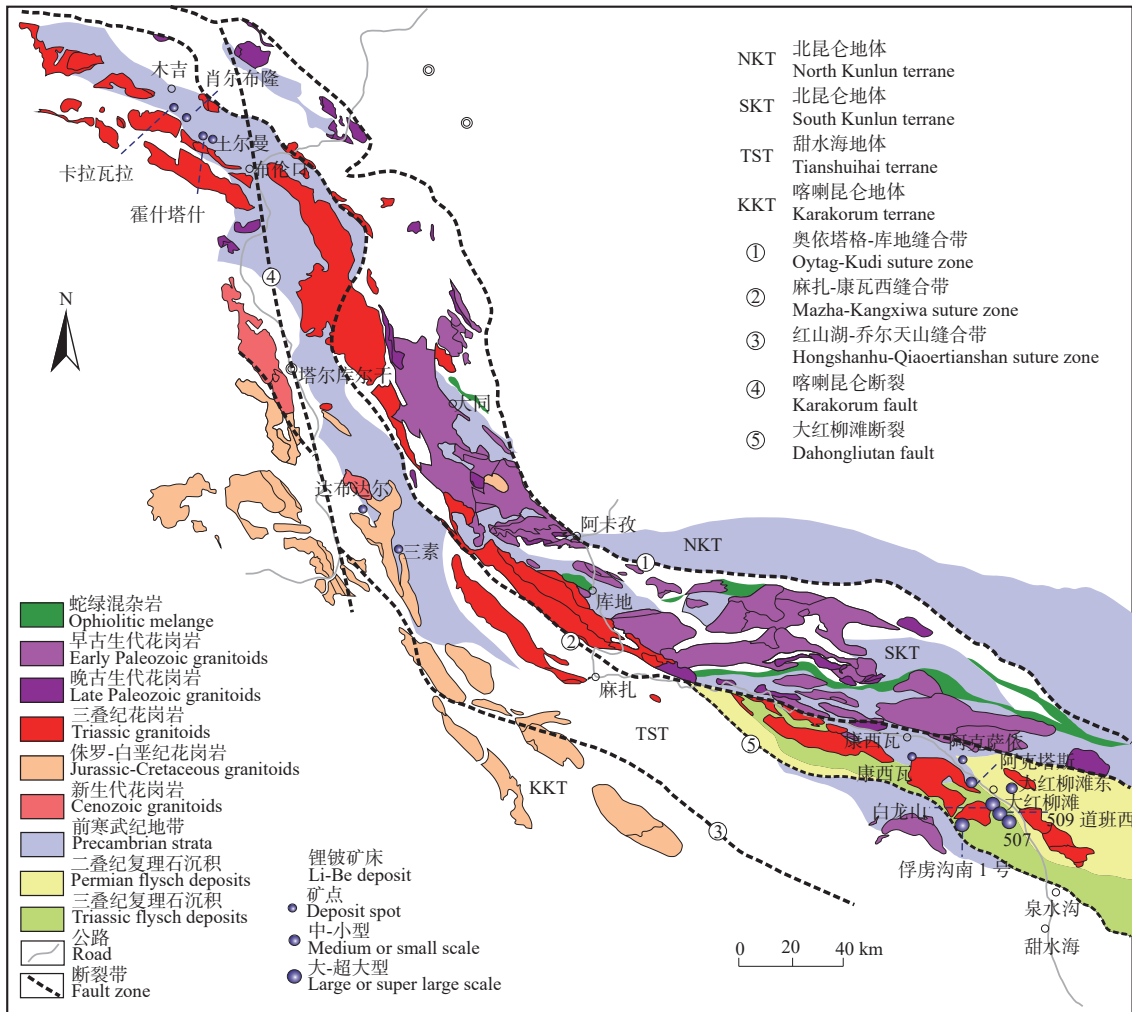


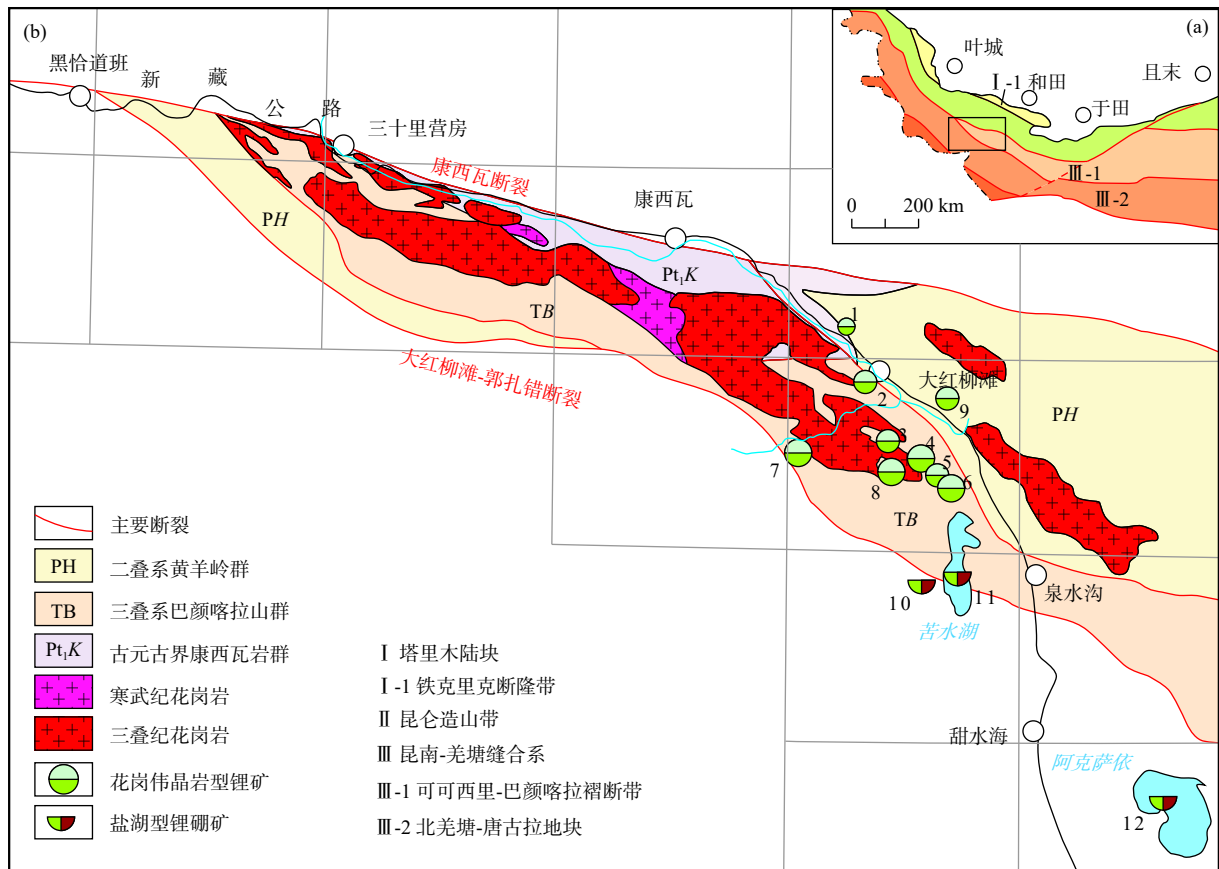
图 1 西昆仑造山带地质简图及锂铍矿床分布图(据王核等, 2021; Yan et al., 2022)

Fig. 1 Simplified geological map and distribution of Li-Be deposits of the Western Kunlun orogenic belt

现了 505 中型锂矿、507 大型锂矿、俘虏沟南 1 号大型锂矿、俘虏沟南 2 号大型锂矿、白龙山超大型锂铷矿床、509 道班西大型锂矿、卡拉喀中型锂矿、大红柳滩东中型锂矿、大红柳滩南大型锂铍矿、康西瓦铍矿点、阿克萨依锂矿点(王核等, 2017; 李侃等, 2019; 涂其军等, 2019)。这些稀有金属矿床(点)均围绕大红柳滩中生代花岗岩基周缘分布, 构成了大红柳滩伟晶岩型锂铍矿田(图 2)。大红柳滩一带累计探获氧化锂资源量约为 250 万 t, 平均品位约为 1.5%, 预测锂资源潜力可达 500 万 t 以上(李文渊等, 2022)。

大红柳滩伟晶岩型锂铍矿田大地构造位置上位于康西瓦古特提斯缝合带南侧的甜水海地体中, 夹持于康西瓦断裂与大红柳滩-郭扎错断裂之间, 为古特提斯洋闭合碰撞后的成矿表现(李文渊等, 2022)。大红柳滩中生代花岗岩基为复式岩体, 东部为黑云母二

长花岗岩、含石榴石(电气石)二长花岗岩, 西南部为二云母花岗岩、黑云母花岗岩和花岗闪长岩, 岩体的形成时代为 220~208.3 Ma(乔耿彪等, 2015; 魏小鹏等, 2017; Ding et al., 2019; Zhang et al., 2019; 丁坤等, 2020; Wang et al., 2020; Zhou et al., 2021; Yan et al., 2022), 主要为高钾钙碱性系列 S 型花岗岩。大红柳滩矿田稀有金属伟晶岩主要呈北西-南东向分布, 规模长几十米至上千米, 宽几米至百余米, 主要分布于围岩三叠系巴颜喀拉山群变质沉积地层中, 少量分布于古元古界康西瓦岩群、二叠系黄羊岭群中(图 2), 花岗岩基中也发育大量的伟晶岩脉, 但多不含矿。前人对大红柳滩稀有金属伟晶岩的成矿时代进行了研究, 获得了一批高质量的成矿年龄, 大多为 223~204 Ma(Yan et al., 2018, 2022; 李侃等, 2019; Wang et al., 2020; Zhou et al., 2021; 滕家欣等, 2021)。含锂辉石伟晶岩中白云母



1.阿克沙依锂矿点；2.阿克塔斯锂矿；3.卡拉喀锂矿；4.509道班西锂矿；5.505锂矿；6.507锂矿；7.俘虏沟南1号锂矿；
8.俘虏沟南2号锂矿；9.大红柳滩东锂矿；10.黄草湖锂硼矿；11.苦水湖锂硼矿；12.阿克萨依湖锂硼矿

图2 大红柳滩一带锂矿床分布图(据李侃等, 2019 修改)

Fig. 2 Distribution map of pegmatite-type lithium deposits in Dahongliutan area

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 197~179 Ma, 可能代表了伟晶岩热液封闭的时代(Gao et al., 2020; 李永等, 2022; 王威等, 2022)。总体上, 伟晶岩稍晚于大红柳滩花岗岩基的形成, 均形成于晚三叠世。

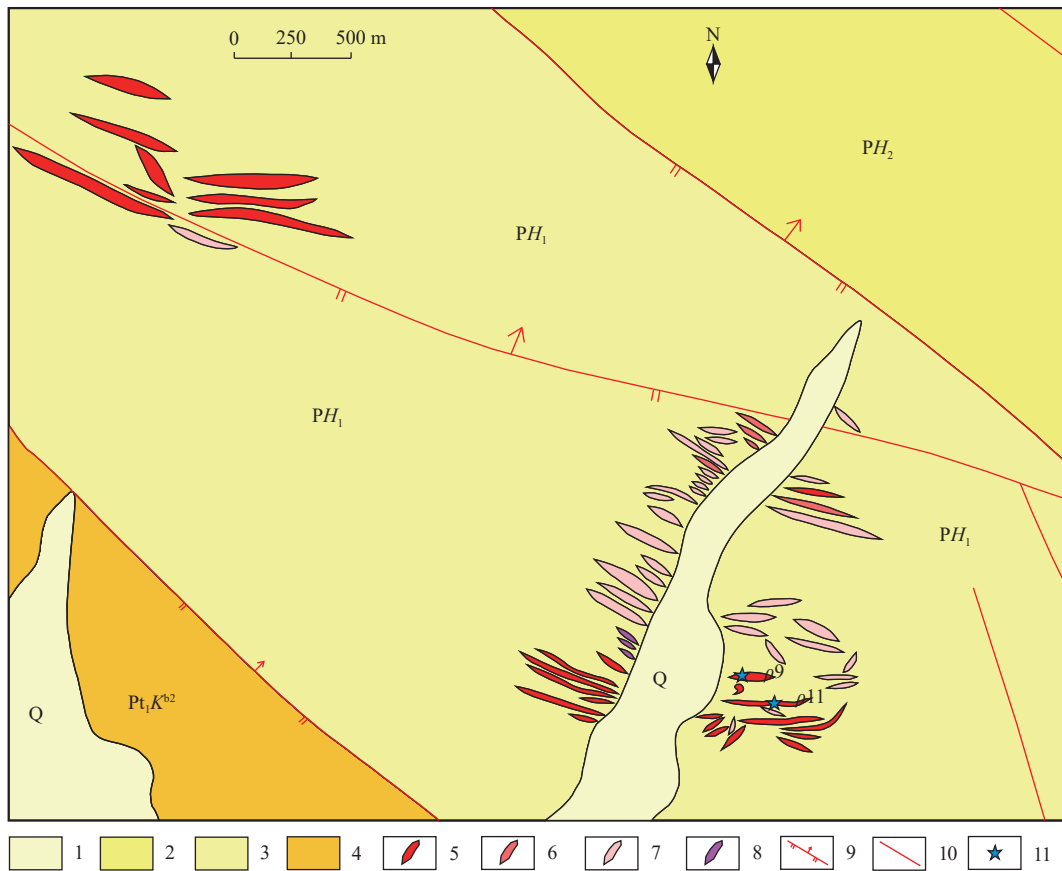
2 矿区地质及伟晶岩特征

含矿脉群产于二叠纪黄羊岭群下组地层内, 为一套浅变质细碎屑岩, 变质程度仅达绿片岩相, 岩性主要为变质长石石英细砂岩, 少量板岩、变粒岩等。黄羊岭群下组地层呈北西-南东向分布, 南侧与康西瓦岩群 B 岩组二段呈断裂接触, 北侧与黄羊岭群中组呈断裂接触。岩石露头风化破碎, 层理发育, 变形强烈, 局部发育强片理化构造。层理产状为 $198^\circ\sim 218^\circ\angle 50^\circ\sim 87^\circ$, 发育背斜褶皱。区内发育花岗伟晶岩脉 63 条(图 3), 其中含锂辉石伟晶岩脉 27 条、含电气石不含矿伟晶岩脉 5 条, 长英质伟晶岩脉 31 条, 以及辉绿岩

脉、石英脉等。

含锂辉石伟晶岩脉露头风化剥蚀强烈, 碎块状, 呈近北西-南东向分布, 地表形态多为脉状、似层状, 脉宽为 1.5~21 m, 长为 10~450 m, 间断不连续出露。主要发育在二叠系黄羊岭群下组地层中, 脉体外接触带围岩发育强片理化, 发育硅化、电气石化。脉体与围岩呈顺层或微斜交侵入接触, 脉体产状为 $182^\circ\sim 210^\circ\angle 53^\circ\sim 78^\circ$, 局部倒转。脉体主要由锂辉石、长石、石英、白云母、电气石等矿物组成。

含电气石不含矿伟晶岩脉宽为 0.5~0.8 m, 长为 1.5~65 m。主要发育在黄羊岭群下组地层中, 围岩岩性为极薄层状变质含石榴石石榴石二云长石石英细砂岩、极薄层状变质含石榴石二云长石石英细砂岩、薄层状变质二云长石石英细砂岩等。脉体与围岩呈斜交或微斜交发育, 脉体岩石呈灰白色, 中粗粒花岗伟晶结构, 块状构造, 矿物组合为石英、长石、白云母、电气石等。脉体表面发育褐铁矿化, 内



1.第四系; 2.二叠系黄羊岭群中组; 3.二叠系黄羊岭群下组; 4.古元古界康西瓦岩群 B 岩组二岩段; 5.锂辉石伟晶岩脉; 6.含电气石不含矿伟晶岩脉; 7.长英质伟晶岩脉; 8.石英脉; 9.正断层; 10.性质不明断层; 11.采样位置

图 3 大红柳滩东锂矿区地质简图

Fig. 3 Simplified geological map of the Dahongliutandong lithium deposit

部发育烟灰色石英条带, 延伸曲折, 宽度小于 10 cm, 干净无矿化。

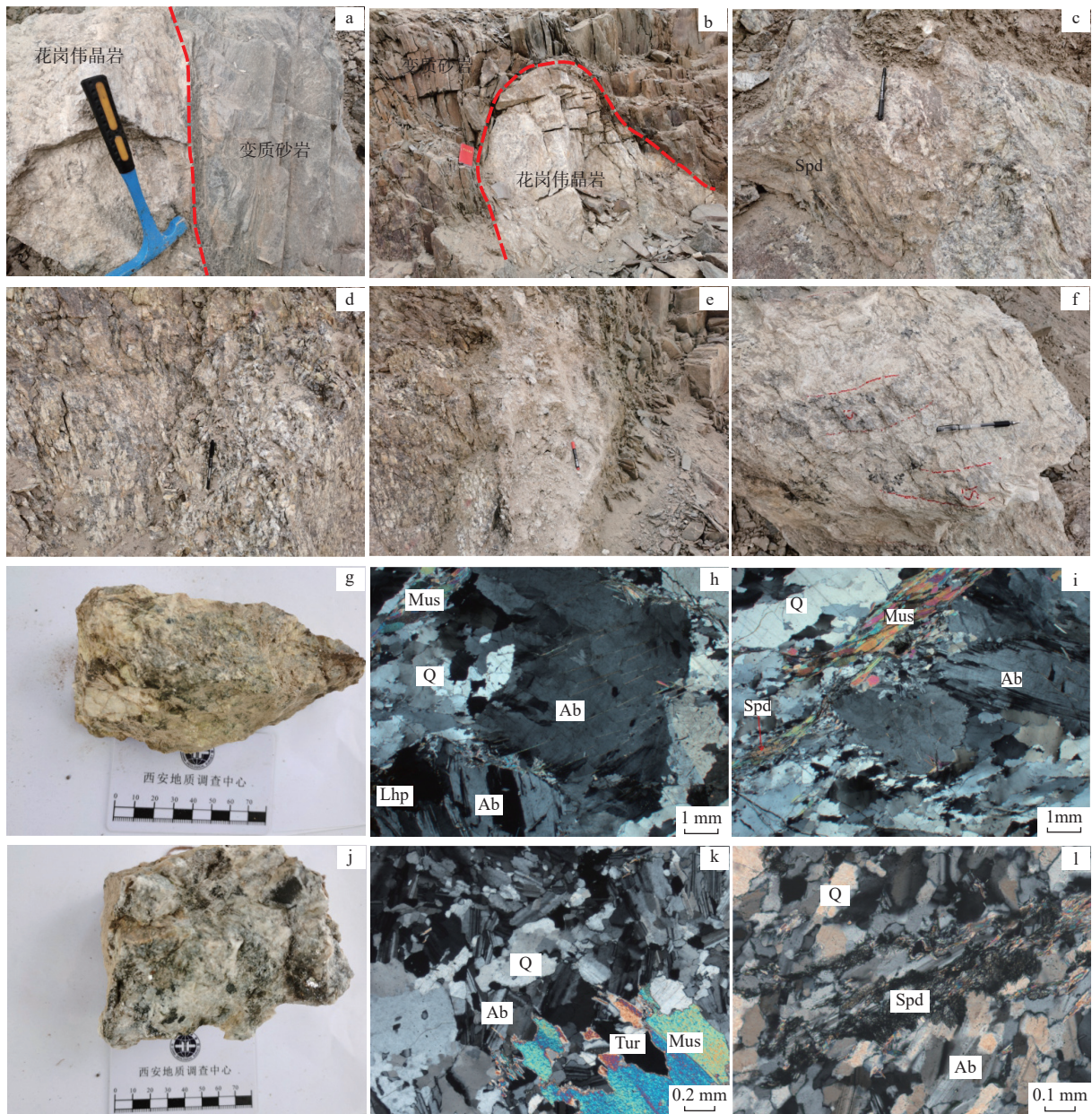
长英质伟晶岩脉宽为 0.3~4 m, 长为 1.2~240 m。主要发育在黄羊岭群下组地层中, 与围岩呈微斜交或顺层理发育。围岩岩石组合为极薄层状变质含十字石榴石二云长石石英细砂岩、薄层状变质含石榴子石黑云长石石英细砂岩、中薄层状变质二云长石石英细砂岩等。脉体岩石呈灰白色, 中细粒花岗伟晶结构, 块状构造, 矿物组合为长石、石英、白云母、电气石。脉体分带性差, 边部见石英条带。

锂矿体具形态多样、成群成带出现、规模较大等特点, 赋存于含锂辉石伟晶岩脉中, 基本达到全岩脉矿化。矿体厚度为 1.5~21 m, 长度为 10~450 m。主矿体呈北西-南东向延伸, 地表形态多为碎裂状、脉状、似层状, 间断不连续出露; 主要发育在二叠系黄羊岭群下组地层中。锂矿体外接触带两侧围岩发育强片理化构造, 发育硅化(图 4f)、绿帘石化、电气石化、红

柱石化等。有的矿体边部内侧发育石英条带, 宽约为 10 cm, 条带表面发育褐铁矿化, 新鲜面干净无矿化。锂矿脉与围岩呈顺层或微斜交侵入接触(图 4a、图 4b), 少数呈断层接触(图 4e), 产状为 $182^\circ \sim 210^\circ \angle 53^\circ \sim 78^\circ$, 局部倒转。

锂矿体风化面呈弱褐黄色, 新鲜面灰白色, 巨晶花岗结构, 块状构造, 主要由锂辉石、长石、石英、白云母、电气石等矿物组成。矿石矿物为锂辉石, 灰白色, 自形板状结构(图 4c)、纤维状结构, 解理发育, 板理交插明显, 板理长轴具定向性(图 4d), 粒度为 $3 \times 8 \text{ mm} \sim 30 \times 190 \text{ mm}$, 含量为 17%~40%; 脉状矿物为长石、石英、白云母、电气石等。

p11 脉宽为 2.5~5m, 长度为 350m, 产状为 $195^\circ \angle 63^\circ$ 。岩性主要为含锂辉石钠长花岗伟晶岩(图 4g~图 4i), 伟晶结构, 块状构造。主要矿物包括钠长石(30%)、白云母(10%)、石英(20%)、锂辉石(38%)及磷锰锂矿(2%)。钠长石粒径约为 0.5~6.0 mm, 呈板状, 具聚片



a、b. 花岗伟晶岩与变质砂岩侵入接触；c. 锂辉石钠长花岗伟晶岩脉；d. 锂辉石定向性明显；e. 花岗伟晶岩脉与围岩之间的断层破碎带；f. 花岗伟晶岩脉中硅化发育；g. 含锂辉石钠长花岗伟晶岩标本；h、i. 含锂辉石钠长花岗伟晶岩正交偏光照片；j. 含锂辉石电气石花岗伟晶岩标本；h、i. 含锂辉石电气石花岗伟晶岩正交偏光照片；Q. 石英；Ab. 钠长石；Mus. 白云母；Tur. 电气石；Spd. 锂辉石；Lhp. 磷锰锂矿

图4 大红柳滩东锂矿典型野外及显微镜下照片

Fig. 4 Typical field photos and microphotographs of the Dahongliutandong lithium deposit

双晶，杂乱分布。白云母粒径约为0.2~2.0 mm，呈鳞片状、片状，集合体呈束状。石英粒径约为0.1~1.0 mm，呈他形粒状，集合体呈团块状。锂辉石呈灰白色，板柱状，板理交错，粒度为0.5×1 cm~7×20 cm。镜下可见少量锂辉石粒径约为0.2~1.0 mm，呈柱状分布于白云母中。磷锰锂矿粒径约为0.2~1.0 mm，呈褐色，呈他形粒状，集合体分布于石英、钠长石粒间。

ρ₉脉宽为16.6m，长度为120m，产状为167°∠76°。

岩性主要为含锂辉石电气石花岗伟晶岩(图4j~图4l)，伟晶结构，块状构造。主要矿物包括钠长石(40%)、石英(24%)、白云母(5%)、电气石(3%)及锂辉石(28%)。钠长石粒径约为0.1~1.0 mm，呈长板状、叶片状，具聚片双晶，杂乱分布。石英粒径约为0.1~4.0 mm，呈他形粒状，分布于钠长石粒间或集合体呈团块状。白云母粒径约为0.5~1.5 mm，呈片状，分布于钠长石粒间。电气石粒径约为0.1~0.7 mm，呈

他形柱粒状, 无色, 应为锂电石, 杂乱分布。锂辉石呈板柱状, 板理无定向性, 粒度为 3×6 cm。镜下可见少量锂辉石呈针柱状, 集合体呈束状, 零星分布。

3 样品采集和测试方法

文中的年龄及地球化学样品分别采自大红柳滩东锂矿区含锂辉石钠长花岗伟晶岩脉($\rho 11$)及含锂辉石电气石花岗伟晶岩脉($\rho 9$)中(图 3), 尽量采集新鲜岩石。含锂辉石钠长花岗伟晶岩脉共采集 1 件测年样品(HXUPb01)、5 件地球化学样品(HX-H3~H5、HX-H8、HX-H10), 含锂辉石电气石花岗伟晶岩脉共采集 1 件测年样品(HXUPb02)、5 件地球化学样品(HX-H13~H17)。

锆石的挑选、制靶在河北省区域地质调查院实验室进行。经过双目镜下仔细挑选表面平整光洁且具不同长宽比例、不同柱锥面特征、不同颜色的锆石颗粒, 再将这些锆石粘在双面胶上, 用无色透明环氧树脂固定, 待环氧树脂固化之后对其表面抛光至锆石中心。在原位分析之前, 通过透反射光和 CL 图像详细研究锆石的晶体形貌和内部结构特征, 选择无明显裂痕及包裹体的锆石进行测年。透反射光、阴极发光照相及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年在中国地质调查局西安地质调查中心岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成, 采用 193 nm ArF 准分子(excimer)激光器的 Geo Las200M 剥蚀系统, ICP-MS 为 Agilent7700, 激光束斑直径为 32 μm , 以 GJ-1 为同位素监控标样, 91500 为年龄标定标样, NIST610 为元素含量标样进行校正, 普通铅校正依据实测 ^{204}Pb 进行校正, 所得锆石同位素比值和年龄数据应用 Glitter(ver4-0, Mac Quarie University)程序进行计算和处理, 年龄计算及谐和图的绘制采用 Ludwig(2003)编写的 Isoplot 程序。

岩石主量元素、稀土元素、微量元素分析在中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成, 其中主元素采用荷兰帕纳科公司 Axios 4.0 kW 顺序式 X 射线荧光光谱仪(XRF)进行分析, 分析精度优于 5%; 稀土和微量元素利用美国热电公司 Series II 型 SX50 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行测定, 分析精度优于 5%~10%。

锆石 Hf 同位素组成分析是基于阴极发光(CL)图像和锆石 U-Pb 定年测试的基础上进行的。锆石

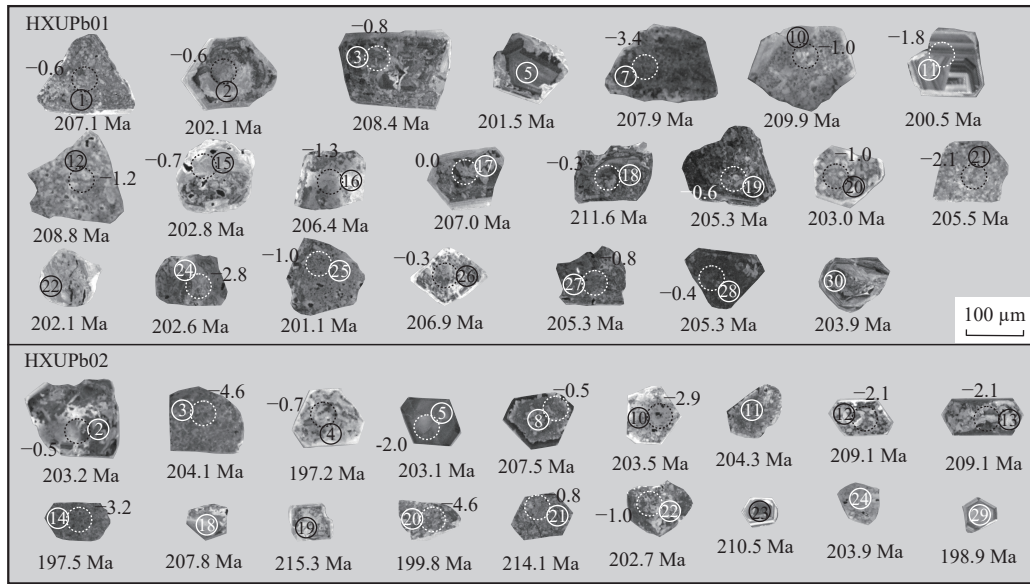
Lu-Hf 同位素原位分析是在中国地质调查局西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成的, 质谱端测试仪器为 Nu Plasma HR 多接杯电感耦合等离子质谱仪(MC-ICP-MS), 激光剥蚀系统为 Geolas 2005 193 nm 准分子激光取样系统。实验条件: 脉冲频率为 8Hz, 能量为 100 mJ, 束斑直径为 44 μm , 激光剥蚀频率为 10 Hz。详尽的分析技术和实验参见 Yuan 等(2008)。用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02669$ (DeBievre et al., 1993)和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.58669$ (Chu et al., 2002)进行同量异位干扰校正计算测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值。在样品测定期间, 获得锆石 91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.2822952 \pm 0.000056$ ($n = 11, 2\sigma$)。 ϵ_{Hf} 的计算采用 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$ (Soderlund et al., 2004), 球粒陨石现今的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$ (Blichert-Toft et al., 1997); Hf 亏损地幔模式年龄(T_{DM1})的计算采用现今的亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$ (Griffin et al., 2000)。采用平均大陆壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ (Griffin et al., 2002)计算锆石 Hf 同位素地壳模式年龄(T_{DM2})。

4 测试结果

4.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学

样品 HXUPb01(含锂辉石钠长花岗伟晶岩)中锆石多为自形或半自形短粗柱状, 粒径长为 100~150 μm , 长宽比为 1:1~2:1。多数锆石颗粒阴极发光图像呈深灰色-暗黑色, 不具核幔结构, 蜕晶化或重结晶现象明显(图 5), 可能受到高 U 含量或残余流体(碱质元素 Li、Rb、Cs 及挥发组分 H_2O 、B、F)的影响。伟晶岩锆石具明显的高 U 特征, 笔者对含锂辉石钠长花岗伟晶岩 30 个测点的锆石进行 U-Pb 定年分析, 22 个有效分析点测试结果(表 1)显示 U 含量($1318.2 \times 10^{-6} \sim 127321.8 \times 10^{-6}$)、Th 含量($4.2 \times 10^{-6} \sim 2755.9 \times 10^{-6}$)和 Th/U 比值(0.001~0.084)。22 个锆石点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中在 200.5~211.6 Ma, 其加权平均年龄为 205.2 ± 1.4 Ma, MSWD = 3.2。22 个锆石点数据较集中, 落在谐和线上及其附近(图 6a)。

样品 HXUPb02(含锂辉石电气石花岗伟晶岩)中锆石多为自形或半自形短粗柱状, 粒径长为 60~150 μm , 长宽比为 1:1~2:1。阴极发光图像显示, 多数锆石颗粒几乎不显示韵律环带, 其内部多呈多孔状、斑杂状, 发光弱且不均匀, 显示热液蚀变锆石的特征,



实线圈代表锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析点位置；虚线圈代表锆石 Hf 同位素分析点位置；

圈内数字代表 U-Pb 分析点号；分析点附近数字代表 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄及 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

图 5 大红柳滩东锂辉石花岗伟晶岩锆石阴极发光照片

Fig. 5 CL images of zircons from Dahongliutandong spodumene pegmatites

经历了蜕晶质化或流体交代作用(图 5)。伟晶岩锆石具明显的高 U 特征,对含锂辉石电气石花岗伟晶岩 30 个测点的锆石进行 U-Pb 定年分析,18 个有效分析点测试结果(表 1)显示 U 含量($1.697.1 \times 10^{-6} \sim 44.470.6 \times 10^{-6}$)、Th 含量($3.2 \times 10^{-6} \sim 1.191.0 \times 10^{-6}$)和 Th/U 值(0.000~0.325),大部分小于 0.01。18 个锆石点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中在 197.2~215.3 Ma,其加权平均年龄为(205.0±2.6)Ma,MSWD = 8.7。18 个锆石点数据较集中,落在谐和线及其附近(图 6c)。

综上所述,2 条伟晶岩脉中的锆石都具有高 U 和蜕晶化的特点,这可能也是导致 2 个年龄 MSWD 较高、部分测试数据谐和度较低的原因。但是,2 件样品中所有测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄并未随 U 含量的变化引起明显的变化,因此认为(205.2±1.4)Ma 与(205.0±2.6)Ma 分别代表了大红柳滩东含锂辉石钠长花岗伟晶岩及含锂辉石电气石花岗伟晶岩的形成时代,即其形成于晚三叠世。

4.2 地球化学

4.2.1 主量元素

大红柳滩东含锂辉石钠长花岗伟晶岩样品的 SiO_2 含量为 72.32%~77.58%,平均为 75.16%,属于酸性岩石; K_2O 含量为 0.73%~1.83%,平均为 1.12%;岩石的全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)含量为 3.18%~7.29%,平均为 5.29%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.17~0.36,平均为 0.28,显示富

钠花岗岩的特征(表 2)。含锂辉石电气石花岗伟晶岩样品 SiO_2 含量为 74.75%~79.68%,平均为 76.98%,属于酸性岩石; K_2O 含量为 0.27%~1.75%,平均为 0.62%;岩石的全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)含量为 4.42%~6.35%,平均为 5.11%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.06~0.38,平均为 0.14,具有富钠花岗岩的特征(表 2)。在 TAS 图解(图 7a)中,大红柳滩东含锂辉石花岗伟晶岩均落在钙碱质花岗岩范围。样品分异指数 DI 为 87.79~93.59,平均为 90.80,分异指数较高,显示岩浆演化的分异程度较高。样品的 Al_2O_3 含量分别为 15.21%~18.24% 和 13.34%~17.33%,铝饱和指数 A/CNK 分别为 1.61~2.85 和 1.52~2.03,均明显大于 1.1。在 A/CNK-A/NK 图解(图 7b)上,样品均落入强过铝质区域。综上所述,大红柳滩东含锂辉石花岗伟晶岩以高 Si、富 Al、富 Na、钙碱质和高分异及低 K、Fe、Mg、Ca 和 Ti 为特征,属强过铝质花岗伟晶岩。

4.2.2 微量和稀土元素

稀土和微量元素分析结果见表 2。原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 8a)显示,大红柳滩东含锂辉石钠长花岗伟晶岩及含锂辉石电气石花岗伟晶岩微量元素配分模式近一致,只是其元素富集和亏损的程度有所不同。微量元素原始地幔标准化配分曲线呈剧烈震荡的“W”型,相对于原始地幔,岩石明显富集 Rb、U、Nb、Ta、Pb、P、Hf 等元素,亏损 Ba、Th、La、

表1 大红柳滩东锂辉石花岗岩伟晶岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

Tab. 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for Dahongliutandong spodumene pegmatites

样品 编号	含量 (10^{-6})				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Pb*	Th	U	Th/U	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ
HXUPb01(含锂辉石钠长花岗岩伟晶岩)																
1	2390.9	2755.9	68709.3	0.040	0.0493	0.0006	0.2218	0.0022	0.0327	0.0003	164.2	26.8	203.4	1.8	207.1	1.7
2	98.9	126.8	2900.4	0.044	0.0519	0.0011	0.2275	0.0046	0.0319	0.0003	279.9	48.9	208.1	3.8	202.1	2.0
3	586.1	51.0	16707.8	0.003	0.0527	0.0006	0.2386	0.0021	0.0329	0.0003	317.0	24.2	217.2	1.7	208.4	1.7
5	192.2	6.2	5682.3	0.001	0.0521	0.0006	0.2277	0.0021	0.0317	0.0003	289.9	25.2	208.3	1.7	201.5	1.6
7	2655.5	192.5	76296.6	0.003	0.0489	0.0006	0.2208	0.0022	0.0328	0.0003	144.0	27.4	202.5	1.8	207.9	1.7
10	70.7	166.5	1983.7	0.084	0.0527	0.0009	0.2400	0.0037	0.0331	0.0003	314.8	38.4	218.4	3.1	209.9	1.9
11	57.3	4.2	1705.4	0.002	0.0517	0.0007	0.2249	0.0025	0.0316	0.0003	272.5	28.8	206.0	2.0	200.5	1.7
12	77.1	7.9	2201.7	0.004	0.0510	0.0006	0.2311	0.0024	0.0329	0.0003	240.9	27.7	211.1	2.0	208.8	1.7
15	103.5	7.4	2998.2	0.002	0.0544	0.0009	0.2392	0.0037	0.0320	0.0003	386.2	37.4	217.8	3.0	202.8	1.8
16	45.8	13.4	1318.2	0.010	0.0513	0.0007	0.2298	0.0027	0.0325	0.0003	254.6	30.9	210.1	2.3	206.4	1.7
17	629.6	60.6	18112.3	0.003	0.0501	0.0006	0.2253	0.0024	0.0326	0.0003	200.9	28.3	206.3	2.0	207.0	1.7
18	263.3	26.9	7326.3	0.004	0.0543	0.0006	0.2494	0.0024	0.0334	0.0003	382.8	25.3	226.1	1.9	211.6	1.7
19	4399.2	1254.7	127321.8	0.010	0.0506	0.0005	0.2255	0.0020	0.0324	0.0003	223.0	24.3	206.5	1.6	205.3	1.7
20	115.3	21.7	3340.8	0.006	0.0552	0.0007	0.2432	0.0024	0.0320	0.0003	419.7	25.9	221.0	2.0	203.0	1.7
21	120.0	55.9	3460.9	0.016	0.0517	0.0009	0.2305	0.0038	0.0324	0.0003	271.0	41.1	210.6	3.2	205.5	1.9
22	464.4	91.6	13671.9	0.007	0.0512	0.0006	0.2245	0.0022	0.0318	0.0003	249.6	26.1	205.6	1.8	202.1	1.7
24	128.0	8.0	3732.4	0.002	0.0539	0.0007	0.2369	0.0024	0.0319	0.0003	365.9	27.0	215.9	2.0	202.6	1.7
25	1440.0	291.9	42465.6	0.007	0.0528	0.0006	0.2305	0.0020	0.0317	0.0003	321.3	23.9	210.6	1.7	201.1	1.6
26	168.2	16.6	4838.9	0.003	0.0522	0.0006	0.2342	0.0022	0.0326	0.0003	291.8	25.4	213.6	1.8	206.9	1.7
27	164.4	18.7	4741.4	0.004	0.0520	0.0011	0.2315	0.0044	0.0324	0.0003	283.9	46.7	211.5	3.7	205.3	2.0
28	272.2	16.5	7818.8	0.002	0.0545	0.0006	0.2430	0.0022	0.0324	0.0003	392.4	24.1	220.9	1.8	205.3	1.7
30	71.9	11.6	2101.6	0.005	0.0513	0.0007	0.2270	0.0026	0.0321	0.0003	254.2	29.7	207.8	2.1	203.9	1.7
HXUPb02(含锂辉石电气石花岗岩伟晶岩)																
2	180.0	27.3	5228.3	0.005	0.0544	0.0006	0.2403	0.0024	0.0320	0.0003	387.5	25.5	218.6	1.9	203.2	1.7
3	244.6	3.2	7122.3	0.000	0.0518	0.0006	0.2298	0.0023	0.0322	0.0003	276.2	26.8	210.0	1.9	204.1	1.7
4	103.9	3.2	3129.5	0.001	0.0525	0.0006	0.2247	0.0022	0.0311	0.0003	305.7	25.6	205.8	1.8	197.2	1.6
5	358.7	52.7	10329.3	0.005	0.0537	0.0009	0.2369	0.0035	0.0320	0.0003	356.2	36.6	215.8	2.9	203.1	1.8
8	1544.6	125.6	44470.6	0.003	0.0482	0.0005	0.2174	0.0020	0.0327	0.0003	108.4	25.6	199.7	1.7	207.5	1.7
10	130.1	32.6	3805.5	0.009	0.0495	0.0006	0.2190	0.0022	0.0321	0.0003	173.3	27.3	201.1	1.9	203.5	1.7
11	367.4	57.6	10581.2	0.005	0.0536	0.0006	0.2380	0.0022	0.0322	0.0003	353.7	24.9	216.7	1.8	204.3	1.7
12	74.9	3.5	2115.0	0.002	0.0534	0.0007	0.2429	0.0028	0.0330	0.0003	347.1	29.1	220.8	2.3	209.1	1.8
13	83.1	4.4	2339.3	0.002	0.0538	0.0007	0.2448	0.0028	0.0330	0.0003	363.5	29.5	222.3	2.3	209.1	1.8
14	126.0	1191.0	3668.3	0.325	0.0546	0.0014	0.2341	0.0055	0.0311	0.0003	394.1	54.8	213.6	4.5	197.5	2.1
18	138.2	295.6	3892.2	0.076	0.0480	0.0012	0.2169	0.0049	0.0328	0.0003	98.6	56.7	199.3	4.1	207.8	2.2
19	61.5	5.2	1697.1	0.003	0.0504	0.0006	0.2362	0.0026	0.0340	0.0003	214.7	28.6	215.3	2.1	215.3	1.8
20	199.3	26.0	5839.1	0.004	0.0550	0.0007	0.2389	0.0025	0.0315	0.0003	413.3	26.7	217.5	2.1	199.8	1.7
21	1250.6	128.4	34010.7	0.004	0.0556	0.0006	0.2587	0.0023	0.0338	0.0003	434.8	23.4	233.6	1.8	214.1	1.7
22	173.6	14.5	5015.0	0.003	0.0556	0.0007	0.2451	0.0027	0.0319	0.0003	437.9	27.9	222.6	2.2	202.7	1.7
23	222.8	8.9	6163.0	0.001	0.0551	0.0008	0.2522	0.0033	0.0332	0.0003	416.1	32.0	228.4	2.7	210.5	1.8
24	176.3	22.9	5071.3	0.005	0.0501	0.0013	0.2222	0.0052	0.0321	0.0004	201.3	56.7	203.7	4.3	203.9	2.2
29	221.1	13.2	6537.8	0.002	0.0526	0.0006	0.2274	0.0021	0.0313	0.0003	312.1	24.6	208.0	1.7	198.9	1.6

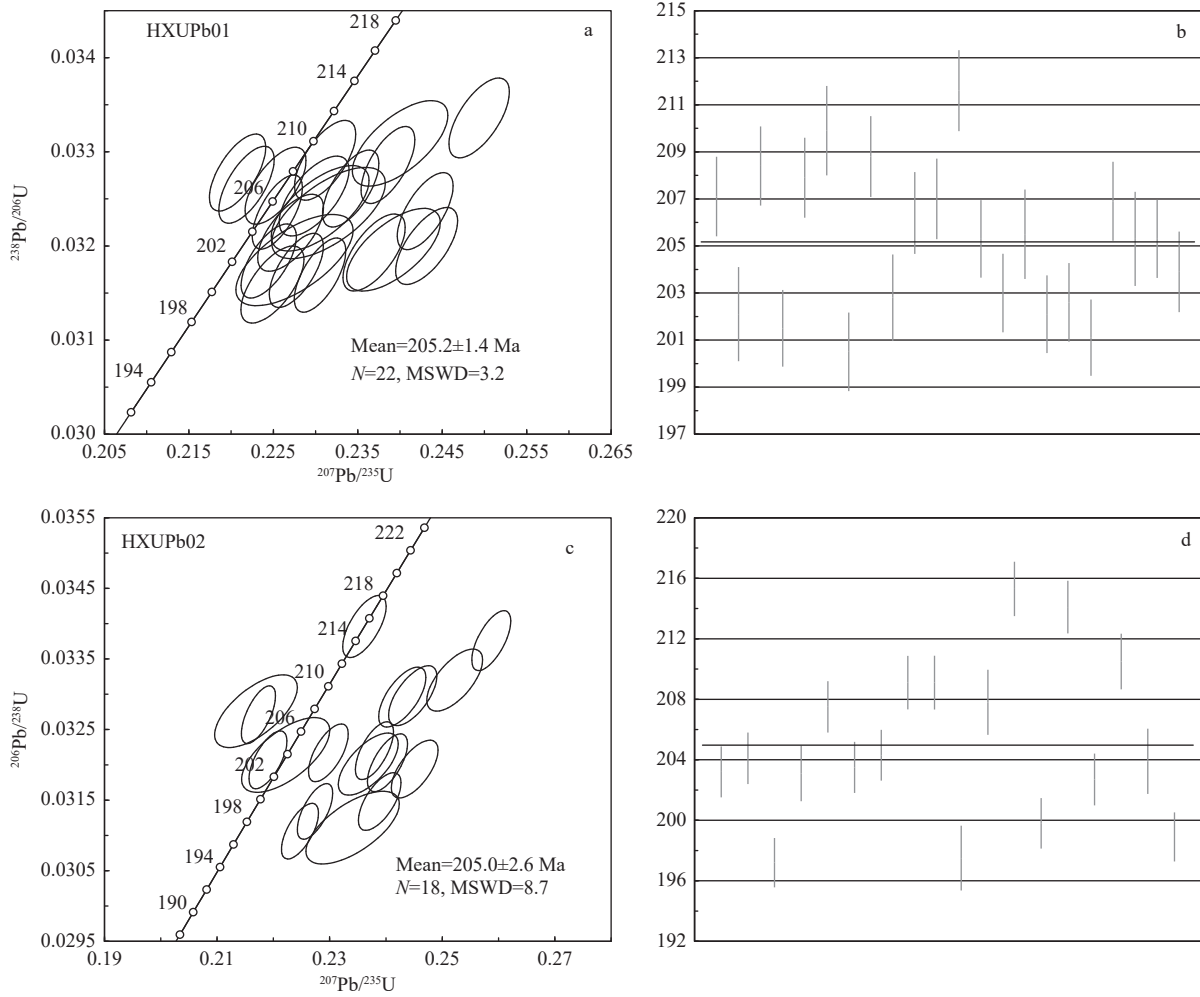


图6 大红柳滩东锂辉石花岗伟晶岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a,c)和加权平均年龄(b,d)

Fig. 6 (a, c) Zircon U-Pb concordia diagram, and (b, d) weighted mean ages diagram from Dahongliutandong spodumene pegmatites

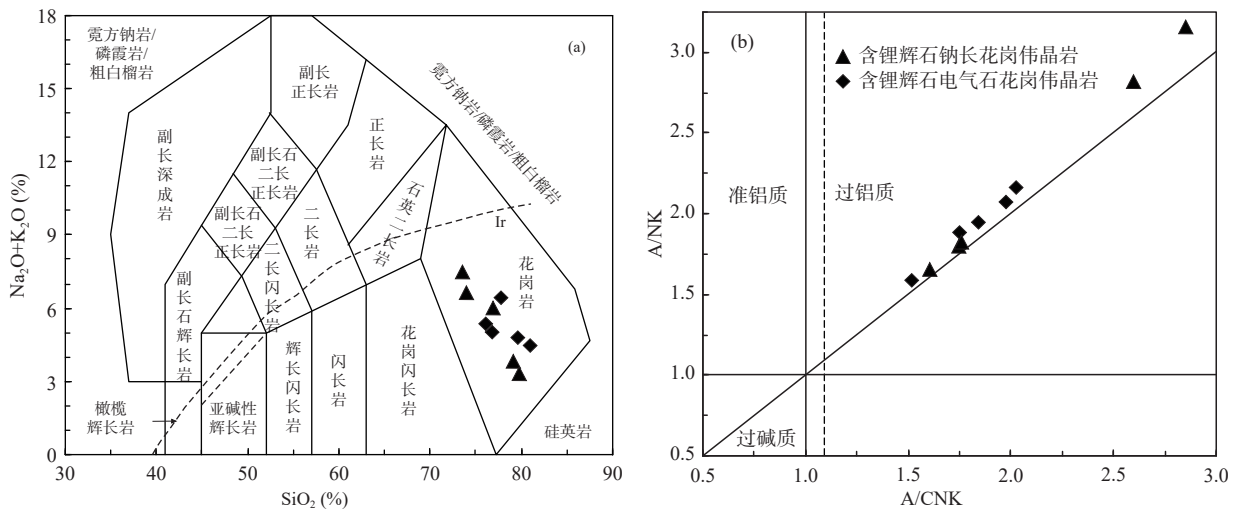


图7 大红柳滩东锂辉石花岗伟晶岩的(K₂O+Na₂O)-SiO₂(a)(据 Middlemost, 1994)及 A/CNK-A/NK 图解(b)(Mania et al., 1989)

Fig. 7 (a) K₂O-SiO₂, and (b) A/CNK-A/NK plots for the Dahongliutandong spodumene pegmatites

表2 大红柳滩东锂辉石花岗伟晶岩主量元素(%)、稀土和微量元素(10^{-6})分析结果Tab. 2 Results of major elements (%), REE and trace elements (10^{-6}) of Dahongliutandong spodumene pegmatites

样品号	HX-H3	HX-H4	HX-H5	HX-H8	HX-H10	HX-H13	HX-H14	HX-H15	HX-H16	HX-H17
岩性	含锂辉石钠长花岗伟晶岩					含锂辉石电气石花岗伟晶岩				
SiO ₂	72.60	72.32	76.00	77.58	77.29	75.25	78.26	76.97	79.68	74.75
TiO ₂	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	18.24	18.10	16.26	15.21	15.45	17.04	14.64	15.01	13.34	17.33
Fe ₂ O ₃	0.05	0.10	0.07	0.24	0.29	0.07	0.01	0.01	0.10	0.01
FeO	0.15	0.12	0.10	0.15	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.20
MnO	0.05	0.06	0.05	0.12	0.12	0.07	0.07	0.05	0.10	0.06
MgO	0.06	0.07	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02
CaO	0.15	0.16	0.14	0.28	0.26	0.28	0.25	0.23	0.30	0.22
Na ₂ O	5.51	5.46	4.76	2.45	2.70	4.62	4.37	4.60	4.10	4.78
K ₂ O	0.94	1.83	1.13	0.73	0.96	0.27	0.29	1.75	0.32	0.47
P ₂ O ₅	0.20	0.12	0.14	0.35	0.37	0.23	0.22	0.24	0.27	0.23
LOI	0.77	1.16	0.73	0.68	0.76	0.39	0.31	0.47	0.44	0.20
Total	98.74	99.52	99.42	97.82	98.34	98.35	98.64	99.45	98.78	98.27
A/CNK	1.76	1.61	1.75	2.85	2.60	2.03	1.84	1.52	1.75	1.98
Sc	4.92	4.15	3.14	2.56	2.14	4.37	3.69	2.48	3.12	4.40
Ga	28.20	30.70	26.00	23.60	25.10	22.00	18.70	16.80	17.60	20.70
W	0.58	0.50	0.44	0.64	0.67	0.51	0.39	0.58	0.38	0.51
Bi	0.40	0.36	0.30	0.56	1.62	0.12	0.32	0.55	0.15	0.15
V	2.04	2.35	1.31	0.69	0.34	0.45	0.23	0.13	0.28	0.75
Li	6 520.00	3 280.00	4 780.00	10 700.00	9 600.00	9 650.00	7 500.00	4 570.00	6 420.00	9 080.00
Be	126.00	40.10	34.60	136.00	126.00	234.00	225.00	238.00	265.00	24.00
B	11.30	14.40	12.20	12.00	12.00	7.72	7.42	11.10	8.33	9.19
Rb	403.00	843.00	476.00	216.00	305.00	80.30	68.50	399.00	81.10	107.00
Cs	31.90	32.70	22.40	13.30	13.30	10.20	10.50	18.30	18.60	4.10
Ba	12.40	15.90	8.78	7.58	3.29	5.72	3.81	5.92	4.33	2.82
Th	0.32	0.65	0.67	0.29	0.25	0.14	0.10	0.10	0.19	0.09
U	11.40	12.90	11.80	4.32	8.56	7.62	3.90	4.55	8.42	2.74
Ta	113.00	97.70	74.70	43.00	29.70	37.20	20.60	21.00	32.00	18.20
Nb	99.20	64.70	58.40	93.20	59.90	82.20	56.80	85.00	85.80	46.60
Pb	7.08	7.56	6.21	6.97	6.67	9.01	9.06	16.90	11.40	8.42
Sr	19.30	16.70	18.00	31.80	26.80	29.00	32.00	42.30	41.10	19.40
Zr	29.70	25.20	28.20	21.20	6.97	9.36	5.86	3.22	28.90	4.33
Hf	4.28	3.59	3.83	2.33	0.96	0.95	0.55	0.32	3.01	0.80
Cu	10.70	12.40	8.06	1.59	1.37	1.77	1.52	1.42	1.25	1.85
Zn	23.40	25.80	27.80	74.10	69.90	25.30	40.20	80.20	72.00	87.10
Sn	>200	>200	108.00	193.00	160.00	178.00	34.50	38.50	>200	41.00
Y	0.76	0.62	0.69	0.60	0.27	0.32	0.30	0.32	0.46	0.12

续表2

样品号	HX-H3	HX-H4	HX-H5	HX-H8	HX-H10	HX-H13	HX-H14	HX-H15	HX-H16	HX-H17
岩性	含锂辉石钠长花岗伟晶岩					含锂辉石电气石花岗伟晶岩				
La	0.54	0.70	0.50	0.28	0.20	0.19	0.16	0.22	0.12	0.14
Ce	0.99	1.32	0.89	0.53	0.35	0.33	0.28	0.37	0.19	0.20
Pr	0.13	0.14	0.10	0.06	0.04	0.04	0.03	0.05	0.02	0.02
Nd	0.48	0.52	0.36	0.20	0.12	0.14	0.12	0.15	0.08	0.07
Sm	0.13	0.17	0.17	0.07	0.05	0.06	0.04	0.05	0.06	0.03
Eu	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
Gd	0.17	0.16	0.18	0.09	0.06	0.07	0.05	0.06	0.07	0.03
Tb	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Dy	0.15	0.14	0.15	0.09	0.06	0.07	0.06	0.06	0.08	0.03
Ho	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Er	0.07	0.05	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01
Tm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Yb	0.05	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01
Lu	0.008	0.007	0.008	0.006	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.002
ΣREE	2.81	3.34	2.54	1.45	0.96	0.98	0.84	1.06	0.71	0.56
LREE/HREE	4.49	6.25	4.06	3.91	4.01	3.53	3.22	4.17	2.00	5.35
La _N /Yb _N	7.31	11.41	8.15	5.74	5.98	5.68	4.41	6.31	3.74	8.37
δEu	0.53	0.50	0.30	0.47	0.45	0.56	0.66	0.78	0.40	0.89
δCe	0.92	1.03	0.98	1.01	0.98	0.96	0.96	0.91	0.87	0.88
La _N /Sm _N	2.68	2.66	1.90	2.58	2.39	2.23	2.52	2.63	1.38	3.01
Gd _N /Yb _N	2.65	3.01	3.38	2.03	1.90	2.27	1.69	2.12	2.45	1.72

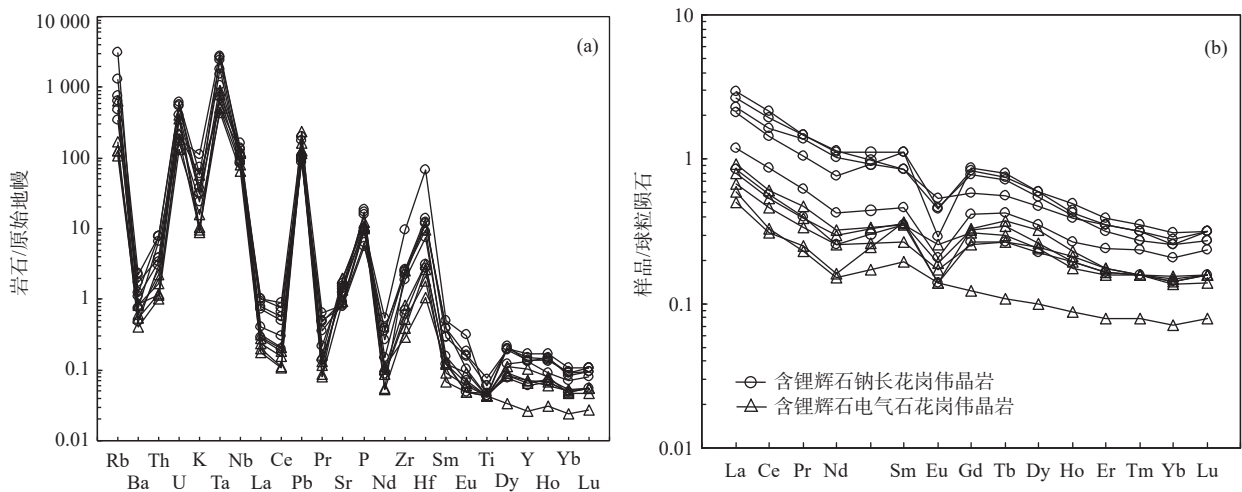


图8 大红柳滩东锂辉石花岗伟晶岩的微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)及稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(b)(标准化数值据 Sun et al., 1989)

Fig. 8 (a) Primitive mantle-normalized trace element patterns, and (b) chondrite-normalized REE patterns for the Dahongliutandong spodumene pegmatites

Ce、Pr、Sr、Nd、Sm、Ti 等元素, 表明为岩浆演化晚期高度分异作用的产物。

在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 8b)上, 各样品配分曲线趋势基本一致, 显示为同源岩浆

演化特点。大红柳滩东含锂辉石钠长花岗伟晶岩稀土总量整体很低,为 $0.96 \times 10^{-6} \sim 3.34 \times 10^{-6}$, 平均为 2.22×10^{-6} , 含锂辉石电气石花岗伟晶岩样品稀土总量总体低于含锂辉石钠长花岗伟晶岩,为 $0.56 \times 10^{-6} \sim 1.06 \times 10^{-6}$, 平均为 0.83×10^{-6} 。多数情况下稀土元素为不相容元素,在岩浆结晶过程中易保存在残余流体相中,对于深部形成的热液流体其稀土总量较低(赵振华, 1997)。含锂辉石钠长花岗伟晶岩轻重稀土比值(LREE/HREE)为 3.91~6.25, 平均为 4.55, 中等富集轻稀土元素; $(La/Yb)_N$ 值为 5.74~11.41, 平均为 7.72, 表明轻重稀土元素之间存在明显分馏作用。 $(La/Sm)_N$ 值为 1.90~2.68, 平均为 2.44, $(Gd/Yb)_N$ 值为 1.90~3.38, 平均为 2.59, 说明轻稀土之间及重稀土之间分异均不明显。 δEu 值为 0.30~0.53, 平均为 0.45, 具有中等负铕异常, 岩浆源区可能与斜长石分离结晶作用有关。含锂辉石电气石花岗伟晶岩 LREE/HREE 值为 2.00~5.35, 平均为 3.65; $(La/Yb)_N$ 值为 3.74~8.37, 平均为 5.70, 也显示轻稀土元素(LREE)强烈富集的右倾式稀土配分型式; $(La/Sm)_N$ 值为 1.38~3.01, 平均为 2.36, $(Gd/Yb)_N$ 值为 1.69~2.45, 具有弱负铕异常; δEu 值为 0.40~0.89, 平均为 0.66。

4.3 锆石原位 Lu-Hf 同位素

锆石 Hf 同位素分析点在同一锆石颗粒的 U-Pb 测试点附近位置(图 5)。结果显示, 大红柳滩东含锂辉石钠长花岗伟晶岩及含锂辉石电气石花岗伟晶岩分析点的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值分别为 0.000 003~0.000 237 和 0.000 019~0.000 819(表 3), 其比值均明显小于 0.002, 表明这些锆石在形成后仅具有较低的放射性成因 Hf 的积累, 因而分析获得的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值能够代表锆石形成时的 Hf 同位素组成(吴福元等, 2007)。含锂辉石钠长花岗伟晶岩 19 个分析点的 $(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$ 的变化范围在 0.282 548~0.282 643 之间(表 3), Hf 同位素成分较均一, 对应的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -3.4~0.0, 平均为 -1.1, 计算得到锆石单阶段 Hf 模式年龄 T_{DM1} 为 796~924 Ma, 平均为 837Ma, 二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 为 1 208~1422Ma, 平均为 1276Ma。含锂辉石电气石花岗伟晶岩 12 个分析点的 $(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$ 值为 0.282 516~0.282 631(表 3); Hf 同位素成分较均一, 对应的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值整体略低于含锂辉石钠长花岗伟晶岩, 为 -4.6~-0.5, 平均为 -2.1; 计算得到锆石单阶段 Hf 模式年龄 T_{DM1} 为 812~966 Ma, 平均为 876Ma, 二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 为 1 237~1 497 Ma, 平均为 1 338 Ma。

5 讨论

5.1 大红柳滩一带伟晶岩年代学研究

首次报道了大红柳滩东含锂辉石钠长花岗伟晶岩及含锂辉石电气石花岗伟晶岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 $(205.2 \pm 1.4)Ma$ 和 $(205.0 \pm 2.6)Ma$, 形成时代为晚三叠世, 属印支晚期岩浆活动的产物。前人对大红柳滩一带花岗伟晶岩的成岩成矿时代已做了较多的研究工作。李侃等(2019)获得 505 锂矿区含锂辉石花岗伟晶岩的锡石 U-Pb 年龄为 $(223 \pm 11)Ma$; Yan 等(2018)获得阿克塔斯 90-1 石英钠长锂辉石伟晶岩脉的锡石及铌铁矿 U-Pb 年龄分别为 $(218 \pm 12)Ma$ 和 $(211.9 \pm 2.4)Ma$; 滕家欣等(2021)获得阿克塔斯 90-1 及 91-4 含锂伟晶岩脉的锆石 U-Pb 年龄分别为 $(209.9 \pm 1.3)Ma$ 和 $(207.5 \pm 0.3)Ma$; Wang 等(2020)获得白龙山含锂辉石伟晶岩的铌钽铁矿 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $(208.1 \pm 1.5)Ma$; Zhou 等(2021)获得白龙山含锂辉石伟晶岩及不含矿伟晶岩的铌钽铁矿 U-Pb 年龄分别为 $(213.9 \pm 0.7)Ma$ 和 $(212.3 \pm 0.9)Ma$; 唐俊林等(2022)获得龙门山锂辉石花岗伟晶岩锡石 U-Pb 年龄及其边部细晶花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $(211.3 \pm 5.0)Ma$ 和 $(209.5 \pm 1.2)Ma$; Yan 等(2022)获得白龙山含锂辉石伟晶岩的独居石 U-Pb 年龄为 $(207.4 \pm 0.6)Ma$, 雪凤岭含锂辉石伟晶岩的铌钽铁矿 U-Pb 年龄为 $(208.4 \pm 1.7)Ma$; 白洪阳等(2022)获得雪凤岭含锂辉石伟晶岩的锡石及铌钽铁矿 U-Pb 年龄分别为 $(208 \pm 15)Ma$ 和 $(208.2 \pm 2.1)Ma$ 。另外, Gao 等(2020)获得阿克塔斯及 509 道班西含锂辉石伟晶岩脉的白云母 Ar-Ar 年龄分别为 $(185 \pm 1)Ma$ 和 $(197 \pm 1)Ma$; 李永等(2022)获得 509 道班西含锂辉石伟晶岩及含电气石伟晶岩的白云母 Ar-Ar 年龄为 185~179 Ma; 王威等(2022)获得 509 道班西含锂辉石伟晶岩的白云母 Ar-Ar 年龄为 188 Ma。综上所述, 大红柳滩稀有金属伟晶岩的成矿时代为 223~205 Ma。大红柳滩含锂辉石伟晶岩中白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为 197~179 Ma, 可能代表了伟晶岩热液封闭的时代。

5.2 大红柳滩东伟晶岩岩石成因

大红柳滩东稀有金属花岗伟晶岩富 Li、Rb、Cs、Be, 铝饱和指数 A/CNK=1.52~2.85, 均大于 1.1, 指示了所有样品具有强过铝质特征(图 7b)。按照 Černý(1992)对花岗伟晶岩的分类, 应属于 LCT 型伟

表3 大红柳滩东锂辉石花岗伟晶岩锆石 Lu-Hf 同位素组成

Tab. 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of Dahongliutandong spodumene pegmatites

测点号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
HXUPb01(含锂辉石钠长花岗伟晶岩)											
1	207.1	0.001 632	0.000 032	0.282 626	0.000 010	0.282 626	-0.6	0.4	820	1 247	-1.00
2	202.1	0.004 044	0.000 080	0.282 629	0.000 012	0.282 629	-0.6	0.4	816	1 243	-1.00
3	208.4	0.001 964	0.000 039	0.282 620	0.000 010	0.282 620	-0.8	0.3	828	1 260	-1.00
7	207.9	0.003 916	0.000 064	0.282 548	0.000 012	0.282 548	-3.4	0.4	924	1 422	-1.00
10	209.9	0.002 892	0.000 060	0.282 613	0.000 008	0.282 613	-1.0	0.3	838	1 275	-1.00
11	200.5	0.000 092	0.000 003	0.282 598	0.000 006	0.282 598	-1.8	0.2	856	1 314	-1.00
12	208.8	0.003 062	0.000 061	0.282 609	0.000 010	0.282 609	-1.2	0.3	843	1 284	-1.00
15	202.8	0.001 188	0.000 025	0.282 626	0.000 009	0.282 626	-0.7	0.3	820	1 250	-1.00
16	206.4	0.002 045	0.000 043	0.282 607	0.000 010	0.282 607	-1.3	0.4	845	1 290	-1.00
17	207.0	0.000 484	0.000 010	0.282 643	0.000 013	0.282 643	0.0	0.5	796	1 208	-1.00
18	211.6	0.002 014	0.000 040	0.282 632	0.000 013	0.282 632	-0.3	0.4	812	1 230	-1.00
19	205.3	0.001 206	0.000 021	0.282 627	0.000 012	0.282 627	-0.6	0.4	819	1 247	-1.00
20	203.0	0.008 771	0.000 185	0.282 620	0.000 014	0.282 619	-1.0	0.5	831	1 266	-0.99
21	205.5	0.006 352	0.000 124	0.282 586	0.000 014	0.282 586	-2.1	0.5	875	1 339	-1.00
24	202.6	0.000 481	0.000 009	0.282 567	0.000 010	0.282 567	-2.8	0.3	897	1 382	-1.00
25	201.1	0.012 967	0.000 237	0.282 618	0.000 018	0.282 618	-1.0	0.6	834	1 270	-0.99
26	206.9	0.001 770	0.000 034	0.282 634	0.000 010	0.282 634	-0.3	0.4	809	1 229	-1.00
27	205.3	0.001 362	0.000 024	0.282 622	0.000 009	0.282 622	-0.8	0.3	824	1 256	-1.00
28	205.3	0.000 782	0.000 013	0.282 632	0.000 012	0.282 632	-0.4	0.4	811	1 235	-1.00
HXUPb02(含锂辉石电气石花岗伟晶岩)											
2	203.2	0.000 954	0.000 022	0.282 631	0.000 010	0.282 631	-0.5	0.4	812	1 237	-1.00
3	204.1	0.001 893	0.000 019	0.282 516	0.000 013	0.282 516	-4.6	0.5	966	1 496	-1.00
4	197.2	0.024 472	0.000 819	0.282 632	0.000 013	0.282 629	-0.7	0.5	828	1 247	-0.98
5	203.1	0.004 587	0.000 089	0.282 589	0.000 011	0.282 589	-2.0	0.4	870	1 333	-1.00
8	207.5	0.000 570	0.000 025	0.282 629	0.000 017	0.282 629	-0.5	0.6	815	1 239	-1.00
10	203.5	0.004 761	0.000 138	0.282 563	0.000 012	0.282 563	-2.9	0.4	905	1 391	-1.00
12	209.1	0.003 349	0.000 096	0.282 584	0.000 014	0.282 584	-2.1	0.5	877	1 340	-1.00
13	209.1	0.007 375	0.000 195	0.282 584	0.000 014	0.282 584	-2.1	0.5	879	1 340	-0.99
14	197.5	0.036 880	0.000 802	0.282 562	0.000 019	0.282 559	-3.2	0.7	922	1 403	-0.98
20	199.8	0.005 263	0.000 061	0.282 517	0.000 015	0.282 517	-4.6	0.5	965	1 497	-1.00
21	214.1	0.009 715	0.000 244	0.282 617	0.000 021	0.282 616	-0.8	0.7	836	1 265	-0.99
22	202.7	0.009 710	0.000 293	0.282 619	0.000 014	0.282 618	-1.0	0.5	834	1 268	-0.99

注: 1. $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10\,000 \times \{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1\}$;

2. $T_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln\{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$;

3. $T_{\text{DM2}} = T_{\text{DM}} - (T_{\text{DM}} - t) \times [(f_{\text{cc}} - f_s)/(f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}})]$, $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1]$;

4. $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s$ 为样品测量值; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} = 0.033\,2$; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} = 0.282\,772$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$; $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} = 0.015$; $f_{\text{cc}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; $f_s = f_{\text{Lu/Hf}} \cdot f_{\text{DM}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; t 为锆石结晶年龄。

晶岩。目前一般认为花岗伟晶岩岩浆为花岗质岩浆结晶分异形成的富水残余岩浆(London, 1986, 2005; London et al., 2002; Simmons et al., 2008; Černý et al., 2012)。大红柳滩中生代花岗岩基为复式岩体, 岩体的形成时代为220~208.3 Ma(乔耿彪等, 2015; 魏小鹏等, 2017; Ding et al., 2019; Zhang et al., 2019; 丁坤等, 2020; Wang et al., 2020; Zhou et al., 2021; Yan et al., 2022), 主要为高钾钙碱性系列S型花岗岩。总体上, 伟晶岩稍晚于大红柳滩花岗岩基的形成, 均形成于晚三叠世。大红柳滩东含锂辉石花岗伟晶岩以高Si、富Al、富Na、钙碱质和高分异及低K、Fe、Mg、Ca和Ti为特征, 显示出明显的壳源属性。

由于伟晶岩的特殊性和高度分异, 仅通过全岩地球化学很难判断源区的性质, 而锆石Hf同位素在示踪岩浆岩源区方面具有明显优势(吴福元等, 2007)。大红柳滩东伟晶岩均具有低且负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-4.6~0)和古老的二阶段Hf模式年龄 T_{DM2} (1497~1208 Ma), 与大红柳滩二云母花岗岩($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=-9.49\sim-4.47$, $T_{\text{DM2}}=1849\sim1532$ Ma)(魏小鹏等, 2017)及石英闪长岩($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=-8.4\sim 0$, $T_{\text{DM2}}=1733\sim1209$ Ma)(未发表数据)的Hf同位素组成相近, 反映其源岩为古老地壳物质的部分熔融。因此推测大红柳滩东伟晶岩的形成过程如下: 下地壳物质的部分熔融形成了大红柳滩S型花岗岩, 岩浆结晶作用的末期形成富含挥发分的残余岩浆或伟晶岩熔体, 在岩体的内部或外接触带的裂隙、节理等有利部位充填, 从而形成大红柳滩花岗伟晶岩。

5.3 构造背景

伟晶岩脉往往形成于造山过程的相对稳定期(李建康等, 2007)。Černý(1992)认为LCT型伟晶岩一般产于造山晚期、后造山期和非造山期。西昆仑地区印支期花岗岩主要分布于南昆仑地块及甜水海地块的康西瓦断裂两侧(梁婷等, 2021)。一般认为西昆仑晚三叠世花岗岩带与古特提斯洋闭合有关。Jiang等(2013)通过对玉其卡帕、慕斯塔格、塔尔3个岩体及其中的暗色包体进行研究, 认为在338~251 Ma, 古特提斯洋向北发生俯冲消减; 大约243 Ma, 南昆仑地体与甜水海地体发生碰撞, 古特提斯洋最终闭合; 在234~227 Ma, 标志着后碰撞构造阶段的开始, 发生岩石圈拆沉作用, 形成高钾钙碱性花岗岩石。康磊等(2012)获得慕斯塔格岩体的锆石U-Pb年龄为(231.4±0.7) Ma, 认为慕斯塔格岩体应是从挤压的主碰撞期向

伸展后碰撞期转换的产物; 陈海云等(2014)对上其木干岩体进行了研究, 获得二长花岗岩的锆石U-Pb年龄为(225.4±1.9) Ma, 认为其形成于后碰撞伸展阶段; Zhang等(2019)获得大红柳滩二云母花岗岩的SIMS锆石U-Pb年龄为(217.5±2.8) Ma, 形成于后碰撞环境, 认为南昆仑地体与甜水海地体碰撞发生于250~240 Ma, 后碰撞构造岩浆活动发生于240~200 Ma; 鲁浩等(2022)获得温泉-胜利达坂一带花岗岩的形成时代为(203.3±1.4) Ma, 为后碰撞造山阶段的产物; 张宇等(2020)获得独尖山二云母二长花岗岩的形成时代为(227.1±1.5) Ma和(219.9±1.2) Ma, 认为其形成于后碰撞构造背景。

综上所述, 笔者认为西昆仑古特提斯洋在约230 Ma以后进入了后碰撞伸展阶段, 并至少持续至200 Ma。大红柳滩稀有金属伟晶岩的成矿时代为223~205 Ma, 与西昆仑造山带后碰撞伸展时限一致, 也符合前人关于伟晶岩矿床与造山过程的结论。因此, 我们认为大红柳滩一带伟晶岩矿床, 包括大红柳滩东锂矿, 均形成于南昆仑地体与甜水海地体后碰撞伸展背景下。

6 结论

(1) 大红柳滩东含锂辉石花岗伟晶岩以高硅、富Al、富Na、钙碱质和高分异及低K、Fe、Mg、Ca和Ti为特征, 属强过铝质花岗伟晶岩。岩石明显富集Rb、U、Nb、Ta、Pb、P、Hf等元素, 亏损Ba、Th、La、Ce、Pr、Sr、Nd、Sm、Ti等元素; 稀土总量较低, ΣREE 为 $0.96\times 10^{-6}\sim 3.34\times 10^{-6}$, 具有弱-中等的负铕异常, δEu 值为0.30~0.89。

(2) 首次获得大红柳滩东含锂辉石钠长花岗伟晶岩及含锂辉石电气石花岗伟晶岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄分别为(205.2±1.4) Ma和(205.0±2.6) Ma, 形成时代为晚三叠世, 属印支晚期岩浆活动的产物。

(3) 大红柳滩东伟晶岩均具有低且负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-4.6~0)和古老的二阶段Hf模式年龄 T_{DM2} (1497~1208 Ma), 反映其源岩为古老地壳物质的部分熔融。

(4) 综合西昆仑地区已有年代学资料和区域地质构造演化特征, 认为大红柳滩一带伟晶岩矿床形成于南昆仑地体与甜水海地体后碰撞伸展背景下。

致谢: 野外工作过程中得到新疆地矿局第三地质大队及和谐矿业大红柳滩东项目组的大力支持,

锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素测试及数据处理得到自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室汪双双高级工程师、靳梦琪工程师的热心帮助, 文稿修改过程中审稿专家提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- 白洪阳, 王核, 闫庆贺, 等. 新疆西昆仑雪凤岭锂矿床铌钽铁矿、锡石年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2022, 38(7): 2139–2152.
- BAI Hongyang, WANG He, YAN Qinghe, et al. Columbite-tantalite and cassiterite ages of Xuefengling lithium deposit in West Kunlun, Xinjiang and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(7): 2139–2152.
- 陈海云, 孙妍, 包平, 等. 西昆仑上其木干岩体岩石成因及地质意义——地球化学及 U-Pb 年代学证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(4): 657–670.
- CHEN Haiyun, SUN Yan, BAO Ping, et al. Petrogenesis and geological significance of Shangqimugan plutons in Western Kunlun: Evidence from geochemistry and U-Pb chronology[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2014, 33(4): 657–670.
- 陈衍景, 薛莅治, 王孝磊, 等. 世界伟晶岩型锂矿床地质研究进展[J]. *地质学报*, 2021, 95(10): 2971–2995.
- CHEN Yanjing, XUE Lizhi, WANG Xiaolei, et al. Progress in geological study of pegmatite-type lithium deposits in the world[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(10): 2971–2995.
- 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 the Dahongliutan biotite monzogranite in western Kunlun orogen: Evidence from zircon U-Pb age and Li-Hf isotope[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(1): 24–34.
- 蒋少涌, 王春龙, 张璐, 等. 伟晶岩型锂矿中矿物原位微区元素和同位素示踪与定年研究进展[J]. *地质学报*, 2021, 95(10): 3017–3038.
- JIANG Shaoyong, WANG Chunlong, ZHANG Lu, et al. In situ trace element tracing and isotopic dating of pegmatite type lithium deposits: an overview[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(10): 3017–3038.
- 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 西昆仑慕士塔格岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年: 对古特提斯碰撞时限的制约[J]. *地质论评*, 2012, 58(4): 763–774.
- KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, et al. LA-ICP-MS U-Pb dating of the zircon from Muztagata pluton in Western Kunlun Orogenic Belt: Constraints on the time of Paleotethys' collision[J]. *Geological Review*, 2012, 58(4): 763–774.
- 李杭, 洪涛, 杨智全, 等. 稀有金属花岗伟晶岩锆石、锡石与铌钽铁矿 U-Pb 和白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年对比研究——以阿尔金中段吐格曼北锂铍矿床为例[J]. *岩石学报*, 2020, 36(9): 2869–2892.
- LI Hang, HONG Tao, YANG Zhiqian, et al. Comparative studying on zircon, cassiterite and coltan U-Pb dating and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of muscovite rare-metal granitic pegmatites: A case study of the northern Tugeman lithium-beryllium deposit in the middle of Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(9): 2869–2892.
- 李建康, 李鹏, 严清高, 等. 中国花岗伟晶岩的研究历程及发展态势[J]. *地质学报*, 2021, 95(10): 2996–3016.
- LI Jiankang, LI Peng, YAN Qinggao, et al. History of granitic pegmatite research in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(10): 2996–3016.
- 李建康, 王登红, 张德会, 等. 川西典型伟晶岩型矿床的形成机制及大陆动力学背景[M]. 北京: 原子能出版社, 2007, 72–122.
- LI Jiankang, WANG Denghong, ZHANG Dehui, et al. Mineralization Mechanism and Continental Geodynamic of Pegmatite Type Deposits in Western Sichuan, China[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2007, 72–122.
- 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 Jiabin, 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.
- 李善平, 潘彤, 王秉璋, 等. 柴达木盆地北缘锑墨格山含绿柱石花岗伟晶岩特征及构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(3): 608–619.
- LI Shanping, PAN Tong, WANG Bingzhang, et al. Characteristics and tectonic significance of beryl-bearing pegmatites in Qiemoge Mountain, northern margin of Qaidam Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(3): 608–619.
- 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 of the Kunlun Paleo-Tethyan orogenic belt and related mineralization of critical mineral resources of 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 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[J]. *中国地质*, 2022, 49(6): 2031–2033.
- LI Yong, WANG Wei, DU Xiaofei, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar 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[J]. *Geology in China*, 2022, 49(6): 2031–2033.
- 梁婷, 滕家欣, 王登红, 等. 新疆大红柳滩锂铍稀有金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2021, 1–262.
- LIANG Ting, TENG Jiabin, WANG Denghong, et al. Li-Be Rare Metal Deposit in Dahongliutan, Xinjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021, 1–262.
- 鲁浩, 刘欢, 胡峰, 等. 西昆仑造山带东段中生代碰撞造山事件的记录: 来自新疆温泉-胜利达坂一带三叠纪侵入岩年代学、地球化学的证据[J/OL]. *现代地质*. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.022>.
- LU Hao, LIU Huan, HU Feng, et al. Records of Mesozoic collision orogenic events on the eastern part of the West Kunlun Orogenic Belt: Evidence from the chronology and geochemistry of Triassic intrusive rocks in Wenquan-Shenglidaban area, Xinjiang[J/OL]. *Geoscience*. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2022.022>.
- 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.
- 秦克章, 赵俊兴, 何畅通, 等. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩型锂矿的发现及意义[J]. *岩石学报*, 2021, 37(11): 3277–3286.
- QIN Kezhang, ZHAO Junxing, HE Changtong, et al. Discovery of the Qiongjiagang giant lithium pegmatite deposit in Himalaya, Tibet, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(11): 3277–3286.
- 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.
- 滕家欣, 高永宝, 贺永康, 等. 西昆仑锰锂铅锌铁区域成矿规律与资源潜力[M]. 北京: 地质出版社, 2021, 1–420.
- TENG Jiabin, GAO Yongbao, HE Yongkang, et al. Metallogenic Regularity and Resource Potential of Manganese, Lithium, Lead, Zinc and Iron in West Kunlun[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021, 1–420.
- 涂其军, 韩琼, 李平, 等. 西昆仑大红柳滩一带锂辉石矿基本特征和勘查新进展[J]. *地质学报*, 2019, 93(11): 2862–2873.
- TU Qijun, HAN Qiong, LI Ping, et al. Basic characteristics and exploitation progress of the spodumene ore deposit in the Dahongliutan area, West Kunlun[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(11): 2862–2873.
- 王秉璋, 韩杰, 谢祥镭, 等. 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[J]. *大地构造与成矿学*, 2020, 44(1): 69–79.
- WANG Bingzhang, HAN Jie, XIE Xianglei, et al. Discovery of the indosinian (Beryl-bearing) spodumene pegmatitic dike swarm in the Chakabeishan area in the northeastern margin of the Tibetan plateau: implications for Li-Be mineralization[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020, 44(1): 69–79.
- 王核, 李沛, 马华东, 等. 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[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, 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 orogen: Geotectonic implications[J]. *Geochimica*, 2017, 46(1): 66–80.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185–220.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 185–220.
- 吴福元, 王汝成, 刘小驰, 等. 喜马拉雅稀有金属成矿作用研究的新突破[J]. *岩石学报*, 2021, 37(11): 3261–3276.
- WU Fuyuan, WANG Rucheng, LIU Xiaochi, et al. New breakthroughs in the studies of Himalayan rare-metal mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(11): 3261–3276.
- 徐兴旺, 李杭, 石福品, 等. 阿尔金中段吐鲁曼地区花岗伟晶岩型稀有金属成矿特征与找矿预测[J]. *岩石学报*, 2019, 35(11): 3303–3316.
- XU Xingwang, LI Hang, SHI Fupin, et al. Metallogenic characterist-

- ics and prospecting of granitic pegmatite-type rare metal deposits in the Tugeman area, middle part of Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(11): 3303–3316.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 等. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景[J]. *地质学报*, 2018, 92(6): 1091–1106.
- XU Zhiqin, WANG Rucheng, ZHAO Zhongbao, et al. On the Structural Backgrounds of the Large-scale "Hard-rock Type" Lithium Ore Belts in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(6): 1091–1106.
- 许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 等. 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[J]. *地质学报*, 2021, 95(10): 2937–2954.
- XU Zhiqin, ZHU Wenbin, ZHENG Bihai, et al. New energy strategy for lithium resource and the continental dynamics research—celebrating the centenary of the School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(10): 2937–2954.
- 张辉, 吕正航, 唐勇. LCT 型伟晶岩及其锂矿床成因概述[J]. *地质学报*, 2021, 95(10): 2955–2970.
- ZHANG Hui, LV Zhenghang, TANG Yong. A review of LCT pegmatite and its lithium ore genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(10): 2955–2970.
- 张宇, 唐名鹰, 何玉良, 等. 新疆西昆仑独尖山地区二云母二长花岗岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素特征[J/OL]. *中国地质*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201019.1317.002.html>.
- ZHANG Yu, TANG Mingying, HE Yuliang, et al. Geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotopic characteristics of two-mica monzonites in Dujianshan area of Western Kunlun, Xinjiang[J/OL]. *Geology in China*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201019.1317.002.html>.
- 赵俊兴, 何畅通, 秦克章, 等. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩锂矿的形成时代、源区特征及分异特征[J]. *岩石学报*, 2021, 37(11): 3325–3347.
- ZHAO Junxing, HE Changtong, QIN Kezhang, et al. Geochronology, source features and the characteristics of the fractional crystallization in pegmatite at the Qiongiagang giant pegmatite-type lithium deposit, Himalaya, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(11): 3325–3347.
- 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997, 113–138.
- ZHAO Zhenhua. Principle of Trace Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1997, 113–138.
- 邹天人, 李庆昌. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2006, 1–284.
- ZOU Tianren, LI Qingchang. Rare and Rare Earth Metallic Deposits in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006, 1–284.
- Blichert-Toft J, Albarède F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1–2): 243–258.
- Černý P, Ercit T S. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2005, 43: 2005–2026.
- Černý P, London D, Novak M. Granitic pegmatites as reflections of their sources[J]. *Elements*, 2012, 8: 257–261.
- Černý P. Geochemical and petrogenetic features of mineralization in rare-element granitic pegmatites in the light of current research[J]. *Applied Geochemistry*, 1992, 7: 393–416.
- Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2002, 17: 1567–1574.
- DeBievre P, Taylor P D P. Table of the isotopic compositions of the elements[J]. *International Journal of Mass Spectrometry Ion Processes*, 1993, 123: 149–166.
- Ding K, Liang T, Yang X Q, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of Dahongliutan pluton in Western Kunlun orogenic belt, NW China[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26: 3420–3435.
- Dittrich T, Seifert T, Schulz B, et al. Archean Rare-Metal Pegmatites in Zimbabwe and Western Australia: Geology and Metallogeny of Pollucite Mineralisations[M]. Switzerland: Springer, 2019, 1–125.
- Fei G C, Menuge J F, Chen C S, et al. Evolution of pegmatite ore-forming fluid: The Lijiagou spodumene pegmatites in the Songpan-Garze Fold Belt, southwestern Sichuan province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 139: 104441.
- Fei G C, Menuge J F, Li Y Q, et al. Petrogenesis of the Lijiagou spodumene pegmatites in Songpan-Garze Fold Belt, West Sichuan, China: Evidence from geochemistry, zircon, cassiterite and coltan U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions[J]. *Lithos*, 2020, 364–365: 105555.
- Gao Y B, Bagas L, Li K, et al. Newly discovered Triassic lithium deposits in the Dahongliutan area, Northwest China: A case study for the detection of lithium-bearing pegmatite deposits in rugged terrains using remote-sensing data and images[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 591966.
- Gao Y B, Zhao X M, Bagas L, et al. Newly discovered Ordovician Li-Be deposits at Tugeman in the Altyn-Tagh Orogen, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 139: 104515.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 133–147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 2002, 61(3–4): 237–269.
- Jiang Y H, Jia R Y, Liu Z, et al. 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[J]. *Lithos*, 2013, 156 – 159: 13–30.
- Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, et al. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 48: 55–69.
- Linnen R L, Lichtervelde M V, Cerny P. Granitic pegmatites as sources of strategic metals[J]. *Elements*, 2012, 8(4): 275–280.
- London D, Evensen J M. Beryllium in silicic magmas and the origin of beryl-bearing pegmatites[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 50(1): 445–486.
- London D. Granitic pegmatites: an assessment of current concepts and directions for the future[J]. *Lithos*, 2005, 80: 281–303.
- London D. Ore-forming processes within granitic pegmatites[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 101: 349–383.
- London D. The magmatic-hydrothermal transition in the Tanco rare-element pegmatite: evidence from fluid inclusions and phase equilibrium experiments[J]. *American Mineralogist*, 1986, 71: 376–395.
- Ludwig K R. Users Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 25-32.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101: 635–643.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3/4): 215–224.
- Pan T, Ding Q F, Zhou X, et al. Columbite-tantalite group mineral U-Pb geochronology of Chaqiabeishan Li-rich granitic pegmatites in the Quanji Massif, NW China: Implications for the genesis and emplacement ages of pegmatites[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 8: 606951.
- Simmons W B, Webber K L. Pegmatite genesis: State of the art[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2008, 20(4): 421–438.
- Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219: 311–324.
- Sun S S and McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and process[C]//Saunders A D, Norry M J(eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- Wang H, Gao H, Zhang X Y, et al. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li-Rb-(Be) rare-metal pegmatite deposit, West Kunlun orogenic belt, NW China[J]. *Lithos*, 2020, 360 – 361: 105449.
- Xu Z Q, Fu X F, Wang R C, et al. Generation of lithium-bearing pegmatite deposits within the Songpan-Ganze orogenic belt, East Tibet[J]. *Lithos*, 2020, 354-355: 105281.
- Yan Q G, Li J K, Li X J, et al. Source of the Zhawulong granitic pegmatite-type lithium deposit in the Songpan-Ganzê orogenic belt, Western Sichuan, China: Constrants from Sr-Nd-Hf isotopes and petrochemistry[J]. *Lithos*, 2020, 378 – 379: 105828.
- Yan Q H, Qiu Z W, Wang H, et al. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, West Kunlun, Xinjiang (NW China): constraints from LA-ICP-MS U-Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 100: 561–573.
- Yan Q H, Wang H, Chi G X, et al. Recognition of a 600-km-long Late Triassic rare-metal (Li-Rb-Be-Nb-Ta) pegmatite belt in the Western Kunlun orogenic belt[J]. *Economic Geology*, 2022, 117(1): 213–236.
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 100–118.
- Zhang Q C, Liu Y, Wu Z H, et al. Late Triassic granites from the northwestern margin of the Tibetan Plateau, the Dahongliutan example: Petrogenesis and tectonic implications for the evolution of the Kangxiwa Palaeo-Tethys[J]. *International Geology Review*, 2019, 61(2): 175–194.
- Zhou J S, Wang Q, Xu Y G, et al. Geochronology, petrology, and lithium isotope geochemistry of the Bailongshan granite-pegmatite system, northern Tibet: Implications for the ore-forming potential of pegmatites[J]. *Chemical Geology*, 2021, 584: 120484.