

引用格式: 唐文春, 段威, 邹林, 等, 2022. 川西可尔因地区伟晶岩型锂矿地球化学指标定位矿体的方法 [J]. 地质力学学报, 28 (5): 765–792. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20222812](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20222812)

Citation: TANG W C, DUAN W, ZOU L, et al., 2022. A method for locating ore bodies by geochemical indexes of pegmatite-type lithium deposits in the Ke'eryin area, western Sichuan, China[J]. Journal of Geomechanics, 28 (5): 765–792. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20222812](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20222812)

川西可尔因地区伟晶岩型锂矿地球化学指标定位矿体的方法

唐文春¹, 段威^{1,2}, 邹林^{1,2}, 杨贵兵¹, 张伟^{1,2}, 熊观^{1,2}

TANG Wenchun¹, DUAN Wei^{1,2}, ZOU Lin^{1,2}, YANG Guibing¹, ZHANG Wei^{1,2}, XIONG Guan^{1,2}

1. 四川省地质矿产勘查开发局化探队, 四川 德阳 618000;

2. 四川省深地地质勘查有限公司, 四川 德阳 618000

1. *Geochemistry Exploration Team of Sichuan Bureau of Geology and Minerals Resources, Deyang 618000, Sichuan, China;*

2. *Sichuan Deep Resource Geological Exploration Co., Ltd., Deyang 618000, Sichuan, China*

A method for locating ore bodies by geochemical indexes of pegmatite-type lithium deposits in the Ke'eryin area, western Sichuan, China

Abstract: The Ke'eryin area in Sichuan province is one of the large rare metal ore concentration areas in the Songpan–Garze metallogenic belt. Numerous granite pegmatite dikes spread around the Ke'eryin mass. However, locating rare metal dikes in such a large pegmatite field has always been one of the challenges in this region. This paper summarized the geochemical element distribution in the Ke'eryin pegmatite and put forward geochemical indexes, e.g., characteristic element indexes, indicator indexes and grade indexes, to locate rare metal ore in the Ke'eryin area based on a systematic petrogeochemical analysis of two-mica granite, pegmatite microcline albite granite, different pegmatite types and typical deposits. Characteristic element indexes include Li, B, Sn, Rb, Be, Nb and Ta, etc. Indicator indexes for lateral variation are Cs, Tl, F, Zr, Y and Σ REE elements as well as values, e.g., TiO_2/Ta , Zr/Hf , Ta/Zr , Nb/Ta , K/Na , etc., while indicator indexes for vertical variation include B, U, Zr, Be, Sn, Rb, Sr, Ba, Tl and In, etc. The variation in these indexes can be used to locate rare-metal-mineralized pegmatite, indicating ore bodies in a deep basin. Grade indexes are aluminum saturation index (A/CNK , A/NK) and rittmann index (σ), etc. Li ore grade is positively correlated with aluminum saturation but is negatively correlated with alkalinity. Grade index variation is a good indicator of lithium enrichment in ore bodies.

Keywords: geochemical indexes; pegmatite; lithium deposits; orebody location; Ke'eryin area

摘 要: 可尔因地区是松潘-甘孜成矿带的大型稀有金属矿集区之一, 围绕可尔因岩体分布了大量花岗伟晶岩脉, 如何在数百平方千米伟晶岩田中定位稀有金属矿脉一直是该区伟晶岩型锂稀有金属矿找矿难点之一。通过对可尔因岩体二云母花岗岩、伟晶相微斜钠长花岗岩、不同类型伟晶岩及典型矿床开展系统的岩石地球化学分析, 总结了可尔因地区伟晶岩地球化学元素空间分布和变化规律, 提出了寻找锂矿的特征元素指标、指示指标和品位指标等地球化学指标。特征元素指标包括 Li、B、Sn、Rb、Be、Nb、Ta 等元素; 平面指示指标包括 Cs、Tl、F、Zr、Y、 Σ REE 等元素及 TiO_2/Ta 、 Zr/Hf 、 Ta/Zr 、 Nb/Ta 、 K/Na 等值; 垂向指示指标包括 B、U、Zr、Be、Sn、Rb、Sr、Ba、Tl、In 等元素。通过特征元素指标及指示指标的值和变化规律, 可辅助定位稀有金属矿化伟晶岩位置, 指示矿体深部延伸情况。品位指标主要包括铝

基金项目: 四川省地矿局科技计划项目 (SCDKKJXM-2018002); 四川省地矿局化探队自筹科研专项 (HT-KY-2022-003)

This research is financially supported by the Science and Technology Planning Project of the Sichuan Bureau of Geology and Minerals Resources (Grant SCDKKJXM-2018002) and Sichuan Geology and Mineral Bureau Geochemical Exploration Team Self-funded Scientific Research Special (Grant HT-KY-2022-003)

第一作者简介: 唐文春 (1965—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事地质矿产勘查研究工作。E-mail: 1649500727@qq.com

通讯作者: 段威 (1988—), 男, 高级工程师, 从事地质矿产勘查工作。E-mail: 316463467@qq.com

收稿日期: 2022-06-20; 修回日期: 2022-09-15; 责任编辑: 王婧

饱和指数 (A/CNK、A/NK)、里特曼指数 (σ)、K+Na 和 K/Na 值等, Li 品位与铝饱和度呈正相关、与碱度呈负相关, 品位指标的变化趋势指示了矿体中锂的富集部位。

关键词: 地球化学指标; 伟晶岩; 锂矿; 矿体定位; 可尔因

中图分类号: P618.71; P59 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 05-0765-28

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222812

0 引言

利用地球化学指标定位矿体是指通过发现与成矿相关的地球化学元素组合、含量及其他特征指标等以确定成矿作用发生区域、定位矿体空间位置。苏联时期已提出成矿指示元素的概念, 指分布在各类自然物质中可以作为寻找矿床的标志性微量元素异常 (Beus and Grigorian, 1977)。在矿床勘查地球化学中, 其主要体现为特定矿床矿石中富集的微量元素, 以及与矿化相伴的典型微量元素 (张德会, 2020)。

热液矿床因热液流体与围岩易发生物质传递和交换, 形成较大范围的热液蚀变, 从而形成围绕矿床分布的矿物和元素异常“晕”, 通过对“晕”的研究, 可以定位矿体的空间位置。原生晕是围绕着矿体形成的某些元素 (通常是成矿元素及其伴生元素) 含量增高的地段, 原生晕找矿方法即通过研究矿体及其周围岩石的原生晕特征及规律进行找矿的地球化学方法 (刘崇民, 2006; 卿成实等, 2011)。自 20 世纪 50 年代以来, 中国开展了丰富的原生晕地球化学找矿理论和方法的研究, 涉及 Cu、Pb、Zn、Au、Ag、W、Mo、Sn 等多种矿种, 成矿类型包含有矽卡岩型、热液型、斑岩型和层控型等, 这在找矿勘查中发挥了重要的作用, 尤其是在寻找隐伏矿方面更具优势 (刘崇民和马生明, 2007)。由于各种矿物结晶温度不同造成了金属元素的沉淀分带, 矿床元素原生分带与矿石分带具有一致性, 邵跃 (1997) 据此提出了热液矿床原生晕元素垂直分带序列模型, 并将矿床周围的热液渗滤晕分成前缘、尾部、毗邻和侧面四个部分。根据热液矿床成矿成晕具多期多阶段叠加的特点, 原生晕找矿法逐渐发展出原生叠加晕找矿法 (李惠, 1993; 李惠等, 1999a, 1999b)。随着对热液矿床成矿成晕往往受构造控制等认识的深入, 原生叠加晕找矿法进一步发展出构造叠加晕找矿法, 在 Au、Ag、Cu 等矿种深部找矿工作中取得了显著的效果 (李惠等, 2003,

2008, 2010, 2013; 任良良等, 2019; 王斌等, 2021)。

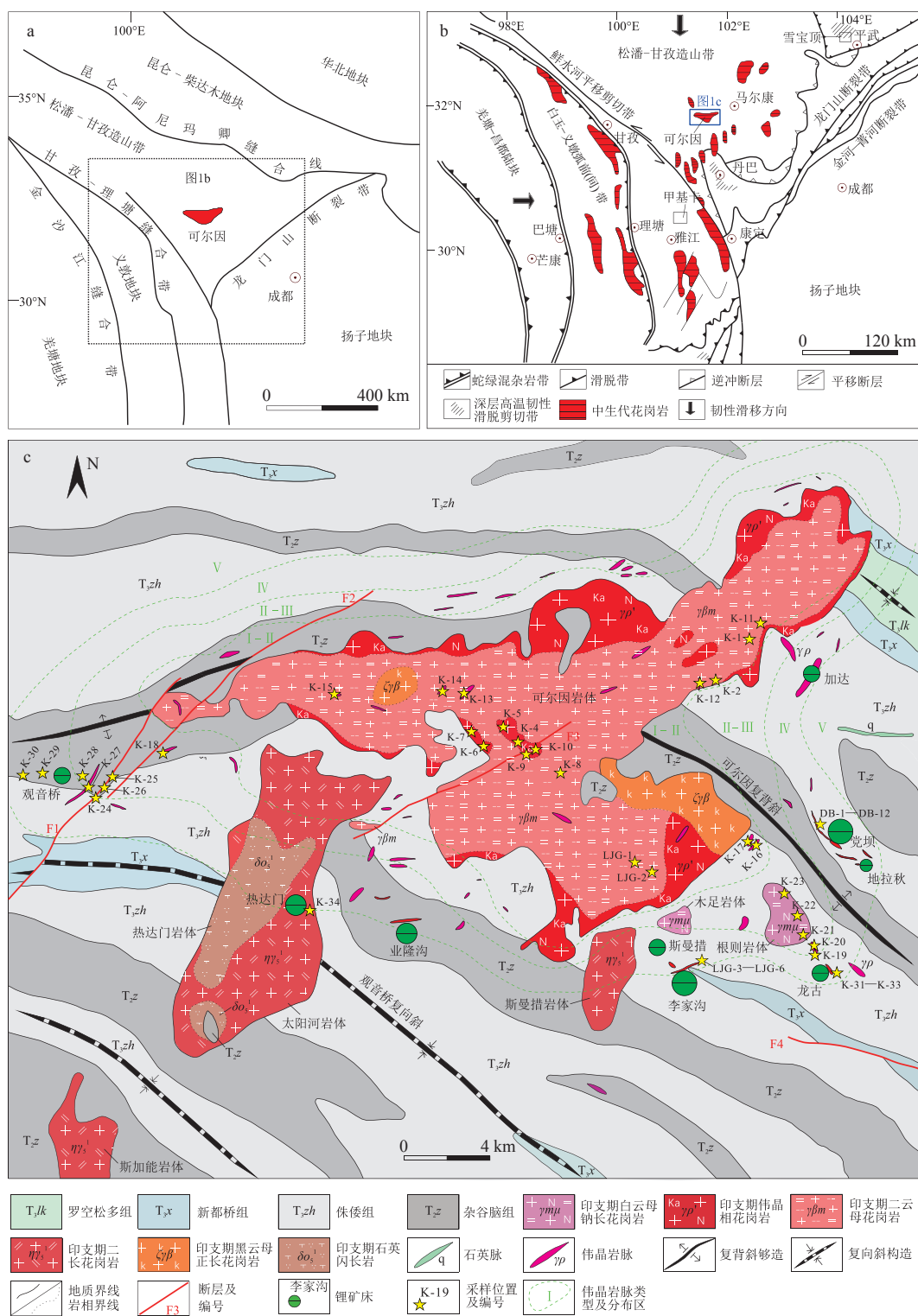
伟晶岩型稀有金属矿床由于形成伟晶岩脉的物质在围岩中迁移距离短、与围岩物质交换不活跃, 且伟晶岩脉分布范围广且分散、数量多、埋藏条件复杂等原因, 传统的热液矿床原生晕找矿方法难以适用, 导致岩石地球化学勘查方法在寻找伟晶岩型稀有金属矿床工作中尚未开展系统有效的研究和应用。虽然通过水系和土壤测量等次生晕异常测量方法对寻找伟晶岩型稀有金属矿床有一定指示作用 (罗伟等, 2018; 范堡程等, 2022), 但在找矿工作中存在环境影响大、异常不明显、定位不准、易漏矿等现实问题。作者所在团队在川西可尔因地区开展了稀有金属矿找矿勘查工作, 初步总结了该地区伟晶岩型稀有金属矿定位矿体的岩石地球化学指标, 希望对同类型稀有金属矿找矿勘查工作中定位矿体起到借鉴作用。

1 区域地质概况

1.1 区域地质背景

川西可尔因地区位于中国青藏高原东缘的松潘-甘孜造山带中部造山带主体的马尔康被动陆缘中央褶皱推覆带, 北侧以昆仑-阿尼玛卿缝合线与华北陆块相隔, 西侧通过甘孜-理塘缝合带和金沙江缝合带与义敦陆块和羌塘-昌都陆块毗邻, 东南缘与龙门山断裂带与扬子陆块相连 (图 1a、1b; Pullen et al., 2008; 许志琴等, 2018)。松潘-甘孜造山带是古特提斯洋关闭期间华北陆块、羌塘-昌都陆块及扬子陆块汇聚、碰撞等相互作用的结果, 印支期造山运动期间广褒洋盆的最终闭合导致三叠纪增生造山带的生长 (Roger et al., 2010; Xu et al., 2019)。

区域地层主要出露三叠系西康群等以浊积岩岩石为主的巨厚复理石沉积建造, 岩层具有典型的浊积岩韵律, 大量缺失侏罗纪及其后的地层, 显示了造山带在三叠纪后抬升成陆, 遭受了长时间的剥蚀 (许志琴等, 1992; 刘祥等, 2021)。区域地层普遍具低绿片岩相区域低温动力变质作用, 岩性以灰色一



a—可尔因地区构造位置图; b—松潘-甘孜造山带地质简图; c—可尔因地区区域地质矿产简图

图1 可尔因地区构造位置图及区域地质矿产简图 (a、b据李建康等, 2006; Fei et al., 2020 修改; c据古城会, 2014 修改)

Fig. 1 Tectonic location map and regional geology and mineral resources diagram of the Ke'eryin area (a,b modified from Li et al., 2006; Fei et al., 2020; c modified from Gu, 2014)

(a) Tectonic location map of the Ke'eryin area; (b) Geological sketchmap of the Songpan-Garze orogenic belt; (c) Regional geology and mineral resources diagram of the Ke'eryin area

深灰色变质长英质砂岩、变质粉砂岩、粉砂质板岩、绢云母板岩、千枚岩及片岩等为主。变质岩经历了类似巴罗式变质作用, 峰期变质温、压条件为 550~620 °C 和 700~800 MPa (Zhao et al., 2019)。

1.2 可尔因花岗伟晶岩

可尔因地区岩浆活动以印支-燕山期的中酸性岩浆侵入为主, 出露大小岩体(株)30 余个, 均侵入三叠系西康群中, 岩体的长轴方向多与区域应力构造裂隙方向大体一致, 以白湾乡为中心出露的可尔因复式岩是其主体, 出露面积约 188 km², 其他岩体散布在可尔因复式岩体周缘, 如太阳河岩体、根则岩体、斯曼措岩体等(图 1c)。

可尔因复式花岗岩体, 是由具有演化关系的多期多阶段的一系列酸性或偏碱性侵入体组成, 属于 Li-F 多阶段花岗岩侵入体。可尔因岩体主要由 S 型过铝质中粗粒花岗岩构成, 被认为是松潘-甘孜变质沉积岩在角闪岩相环境下深度 20 km 以上部分熔融, 于 209~239 Ma 期间侵位形成的 (Deschamps et al., 2017)。可尔因岩体东部的黑云钾长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 188~230 Ma (Roger et al., 2004; Deschamps., 2017), 二云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 209~231 Ma (Deschamps et al., 2017; Fei et al., 2020), 根则、木足白云母钠长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 217 Ma (Fei et al., 2020)。可尔因岩体东南的热达门石英闪长岩体锆石 U-Pb 年龄为 202~239 Ma (Deschamps et al., 2017; 岳相元等, 2019), 太阳河黑云二长花岗岩体年龄为 180~229 Ma (李建康等, 2006; 王子平等, 2018; 马圣钊等, 2019)。热达门-太阳河岩体被认为与可尔因岩体成因不同, Deschamps et al. (2017) 认为该岩体以 I 型高钾钙碱性闪长岩和正长闪长岩为主, 由榴辉岩相条件下的地幔楔部分熔融形成。岳相元等 (2019) 认为热达门-太阳河岩体是在碰撞造山环境下, 由岩浆上涌诱发下地壳物质的部分熔融而形成的。因此, 虽然热达门-太阳河岩体与可尔因岩体在空间上和时间上相近, 但二者相互作用有限。

李建康 (2006) 认为, 可尔因花岗岩体及内部的伟晶岩自早至晚阶段, 其地球化学成分具有结晶分异的特征, 岩体内部和围岩中的伟晶岩脉是花岗岩结晶残余岩浆演化的产物。许志琴等 (2018) 认为, 松潘-甘孜造山带锂矿的形成与三叠纪“片麻岩穹隆”形成过程密切相关, 在片麻岩穹隆形成过程中, 有利于富锂伟晶岩(含其他稀有元素)形成, 从而导

致锂富集, 含锂伟晶岩是在片麻岩穹隆形成期间侵位的 (Xu et al., 2019, 2020; 郑艺龙等, 2021)。

1.3 典型矿床特征

(1) 党坝锂矿

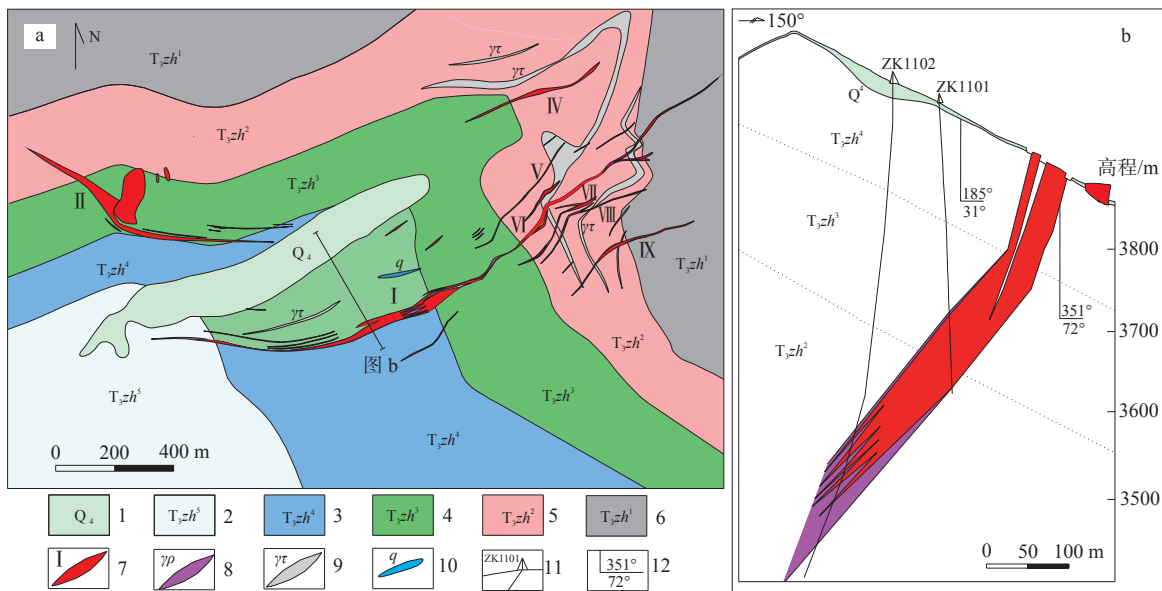
党坝锂矿位于可尔因岩体东部, 可尔因稀有金属伟晶岩脉东南密集区北侧, 已查明资源储量达超大型锂矿床规模(图 1c)。矿区出露三叠系杂谷脑组(T₂z)、侏倭组(T₃zh), 褶皱构造及节理裂隙较发育, 与锂辉石矿体密切相关的为北西-南东向的裂隙, 主矿体产于高尔达向斜核部, 向斜呈北西-南东向展布, 长约 3 km, 轴面向南西倾斜, 两翼倾角 25°~40°, 核部地层为侏倭组三段, 翼部为侏倭组四段地层。矿区内共发现花岗伟晶岩脉 83 条, 发育锂矿化的 24 条, 具有工业价值的 17 条, 脉长 30~3000 m, 厚 1.0~57.76 m。其中, VIII 号主矿体位于矿区北部, 呈北西-南东向展布, 地表出露长度 3340 m, 倾向延深最大超过 720 m(图 2a、2b)。矿体最薄 1.14 m、最厚 66.84 m, 平均 29.88 m, Li₂O 品位 1.00%~1.52%, 平均 1.33%。

矿石具有微晶-巨晶结构、交替结构和压碎结构, 块状构造、条带状构造、斑杂状构造和浸染状构造。矿石矿物主要为锂辉石, 其次为锂云母; 脉石矿物主要有石英、微斜长石、钠-更长石。锂辉石常呈他形或半自形状晶体产出, 锂辉石在矿石中与石英、长石紧密相嵌, 相互交错, 锂辉石长轴方向沿矿体厚度方向定向排列特征明显。伴生有益组分及平均含量分别为: Nb₂O₅ (0.009%)、Ta₂O₅ (0.004%)、BeO (0.04%)、Rb₂O (0.11%)、Sn (0.04%)。

(2) 李家沟锂矿

李家沟锂矿位于可尔因岩体南东部, 可尔因稀有金属伟晶岩脉东南密集区南侧, 是超大型伟晶岩型锂矿床(图 1c)。出露的主要地层为三叠系侏倭组(T₃zh), 地层总体向南缓倾。矿区发现并控制的锂矿体总共有 15 条, I 号矿体是李家沟矿床主矿体, 呈脉状产出, 地表出露长 2060 m, 倾向上最大控制斜深 470 m(图 3a、3b), 锂资源量约占李家沟锂辉石矿床总量的 70%。矿体厚 15~30 m, 其中, 最厚 124.15 m, 平均 29.62 m; 品位 1.00%~2.54%, 平均 1.32%。矿体形态以规则脉状、大脉状为主, 少数呈透镜状、似层状, 由于不同组节理裂隙发生相交和贯通, 使得部分脉体局部地段出现分支现象(图 3a)。

矿石具有微晶-巨晶结构、压碎结构、交替结构, 块状构造、条带状构造、斑杂状构造和浸染状



1—第四系；2—三叠系侏倭组五段；3—三叠系侏倭组四段；4—三叠系侏倭组三段；5—三叠系侏倭组二段；6—三叠系侏倭组一段；7—矿体及编号；8—伟晶岩；9—细晶岩；10—石英脉；11—钻孔；12—产状

a—李家沟锂矿床地质简图；b—李家沟锂矿床典型剖面图

图3 李家沟锂矿床地质简图及典型剖面图

Fig. 3 Simplified geological map and typical section of the Lijiagou lithium deposits

(a) Simplified geological map of the Lijiagou lithium deposits; (b) Typical section of the Lijiagou lithium deposits

1—Quaternary; 2—5th part of Triassic Zhuwo Formation; 3—4th part of Triassic Zhuwo Formation; 4—3rd part of Triassic Zhuwo Formation; 5—2nd part of Triassic Zhuwo Formation; 6—1st part of Triassic Zhuwo Formation; 7—Orebody and its serial number; 8—Pegmatite; 9—Haplite; 10—Quartz vein; 11—Drilling; 12—Occurrence

云母)钠长石型伟晶岩(V类),矿物组成总体表现为钾长石(微斜长石)、电气石减少,钠长石、锂辉石增多。伟晶相微斜钠长花岗岩粒度变化较大,特征与二云母花岗岩明显不同(图4d、4e)。I—III类伟晶岩以较多电气石为主要特征(图4f—4h),I类伟晶岩以较大的电气石、黑云母晶体为特征(图4i、4j),但分布极不均匀,IV类伟晶岩以柱状、粒状锂辉石为标志(图4k、4l)。

2.1 伟晶岩空间分布规律

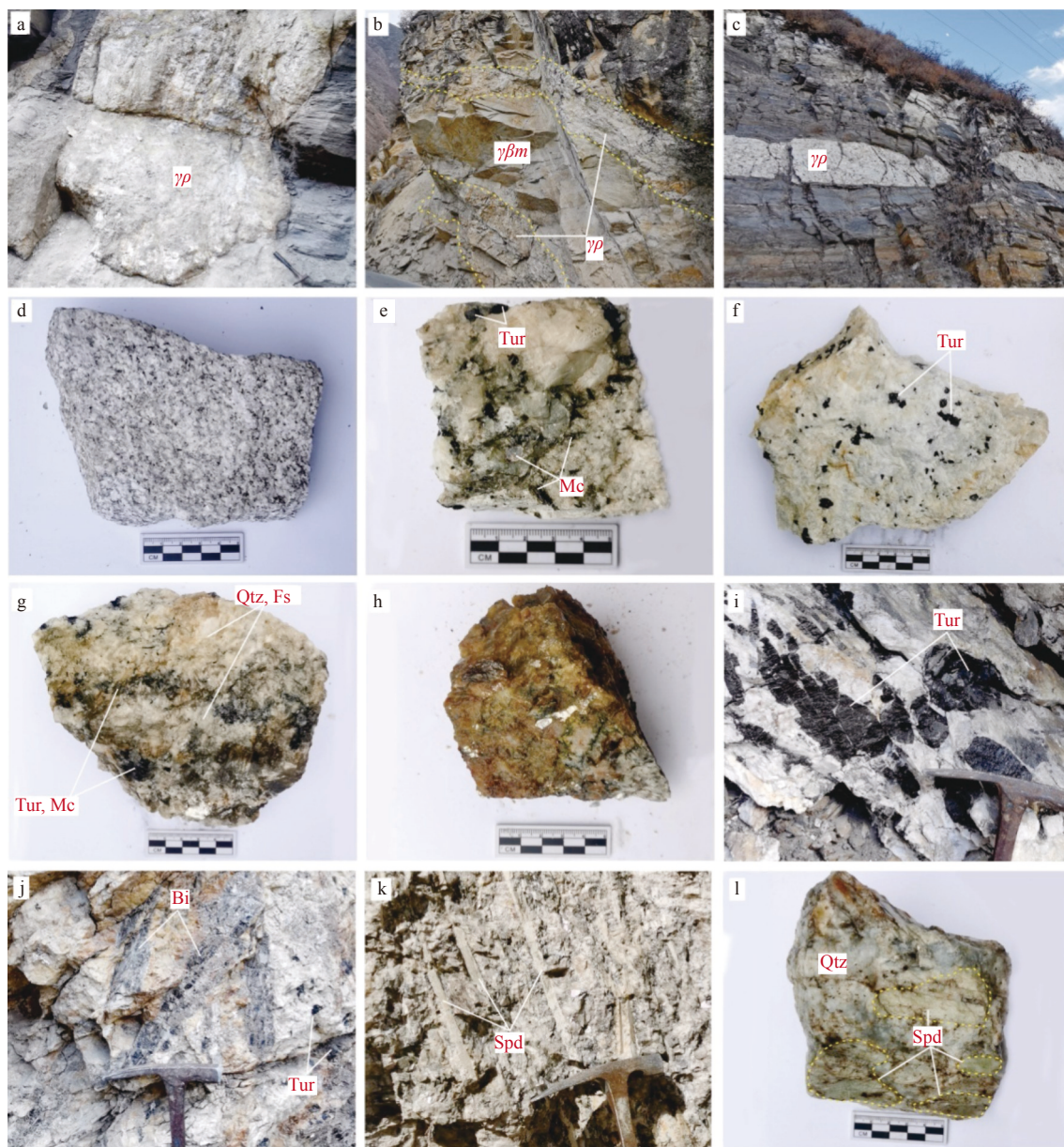
不同类型的伟晶岩围绕可尔因岩体周缘及顶部大致呈同心球状分带分布,岩体顶部被剥蚀后,伟晶岩在平面上大致呈同心圆状环绕可尔因岩体分布,文章将从水平上和垂向上描述其分带特征。

水平分带特征:不同类型的伟晶岩分布于距可尔因岩体不同距离的区域,伟晶相微斜钠长花岗岩主要分布于二云母花岗岩边缘,或呈岩株状侵入二云母花岗岩体内。自二云母花岗岩向外,(电气石)微斜长石型伟晶岩(I类)大致分布于岩体内及距岩体0~800 m区域,(电气石)微斜长石钠长石型伟晶岩(II类)大致分布于距岩体800~1500 m区域,

(电气石)钠长石型伟晶岩(III类)大致分布于距岩体1500~2300 m区域,锂辉石钠长石型伟晶岩(IV类)大致分布于距岩体2300~5000 m区域,细粒(锂云母)钠长石型伟晶岩(V类)大致分布于距岩体5000 m之外(图1)。需要说明的是,并不是所有伟晶岩都严格按上述区域分布,同一区域内可能存在2~3种类型的伟晶岩。

垂直分带特征:可尔因地区地形切割强烈,在同一水平分带区域内,由于不同标高距深部岩体的距离不同,可见不同类型的伟晶岩。如党坝锂辉石矿区,大金河北岸谷底(海拔2250 m)地层中紧邻二云母花岗岩的伟晶岩为I类,随着海拔上升,离岩体距离增大,至2700 m左右出现II类伟晶岩,至3300 m出现III类伟晶岩,至3650 m开始出现IV类含矿伟晶岩直至4150 m(古城会,2014)。

从伟晶岩的分带特征和分布特征看(图1c),含矿伟晶岩的空间位置与节理裂隙发育程度及二云母花岗岩体的距离有关,同时还与岩浆流动速度(黏度)及温压条件等多种因素有关(孙文礼,2021)。一般来说,靠近母岩的区域含锂伟晶岩往往赋存于



岩石矿物代号: γp —伟晶岩; $\gamma\beta m$ —二云母花岗岩; Bi—黑云母; Fs—长石; Mc—云母; Qtz—石英; Spd—锂辉石; Tur—电气石

a—伟晶岩脉顺裂隙侵入侏倭组; b—伟晶岩脉侵入二云母花岗岩体; c—伟晶岩大脉分支脉体顺层侵入侏倭组, 并被挤压呈石香肠状; d—二云母花岗岩; e—伟晶相微斜钠长花岗岩; f—(电气石)微斜长石型伟晶岩(I类伟晶岩); g—(电气石)微斜长石钠长石型伟晶岩(II类伟晶岩); h—(电气石)钠长石型伟晶岩(III类伟晶岩); i—(电气石)微斜长石型伟晶岩(I类伟晶岩)中的巨大电气石晶体; j—(电气石)微斜长石型伟晶岩(I类伟晶岩)中的黑云母; k—矿体中的柱状锂辉石; l—锂辉石钠长石型伟晶岩(IV类伟晶岩)

图4 可尔因地区伟晶岩野外及手标本照片

Fig. 4 Typical field and hand specimen photographs of the pegmatite in the Ke'eryin area

(a) Pegmatite vein invaded the Zhuwo Formation along the fissures; (b) Pegmatite vein invaded the two-mica granite body; (c) Branch vein of the pegmatite main vein concordantly intruded the Zhuwo Formation, and been pressed as boudinage structures; (d) Two-mica granite; (e) Pegmatite microcline albite granite; (f) (Tourmaline) microcline pegmatite (I type pegmatite); (g) (Tourmaline) microcline albite pegmatite (II type pegmatite); (h) (Tourmaline) albite pegmatite (III type pegmatite); (i) (Tourmaline) giant tourmaline crystals in microcline pegmatite (I type pegmatite); (j) (Tourmaline) biotite in microcline pegmatite (I type pegmatite); (k) Columnar spodumene in ore body; (l) Spodumene albite pegmatite (IV type pegmatite)

Rock and mineral code: γp —Pegmatite; $\gamma\beta m$ —Two-mica granite; Bi—Biotite; Fs—Feldspar; Mc—Mica; Qtz—Quartz; Spd—Spodumene; Tur—Tourmaline

海拔较高处, 远离母岩的区域含锂伟晶岩海拔逐渐降低。党坝锂矿主矿体离母岩平距约为 3 km, 矿化海拔为 3450~4150 m; 李家沟锂矿主矿体离母岩平距约为 3.3 km, 矿化海拔为 3500~4000 m; 龙古锂矿床在阿拉伯村一带离母岩平距达 8 km, 见矿海拔仅为 1860~2477 m, 远低于其他矿床。

2.2 伟晶岩与构造的关系

伟晶岩脉的形态和规模主要受可尔因岩体周围地层中节理裂隙的控制, 岩体周围的三叠系地层发育两期节理裂隙系统: 其一为北西—南东向节理裂隙系统, 这一组节理裂隙是地层褶皱形成的; 其二为岩浆穹隆形成的围绕可尔因岩体呈近同心圆状及放射状分布的节理裂隙系统, 两期节理裂隙系统叠加形成了复杂的构造裂隙系统。通过统计, 单条伟晶岩脉主要受控于其中一组特别发育的节理裂隙, 如李家沟锂矿体主要受控于北东—南西向节理, 党坝主矿体受控于北西—南东向节理。一般规模较小的伟晶岩脉(20~100 m)赋存于 1~2 条相邻并贯通的节理裂隙中, 规模中等的伟晶岩脉(100~500 m)赋存于 3~5 条相邻并贯通的节理裂隙中, 规模大的伟晶岩脉(>500 m)赋存于 6 条以上相邻并贯通的节理裂隙中, 伟晶岩大脉往往伴随中小型伟晶岩脉群。在倾向上, 伟晶岩往往贯通一组小角度相交的共轭节理, 导致矿体及伟晶岩脉在倾向上呈现陡、缓倾交替的现象(图 2b)。

可尔因岩体南、北两侧以北西—南东走向、倾向北东和南西两组节理最为发育, 其走向与三叠系地层相近; 可尔因岩体南东—东侧的节理产状较复杂, 这可能是围岩褶皱形成的节理裂隙与岩浆穹隆形成的节理裂隙间产状大角度相交所致(图 1c)。这些节理裂隙系统更复杂的区域更易形成密集且数量庞大的伟晶岩脉群, 也更容易贯通形成伟晶岩大脉。如李家沟、党坝矿区位于可尔因岩体南东—东侧, 该区位于岩浆穹隆节理与区域褶皱构造节理大角度交叉的部位, 易形成含矿伟晶岩大脉和超大规模锂矿床。而可尔因岩体南侧的热达门、业隆沟等矿区, 褶皱构造与岩浆穹隆形成的节理裂隙交角小(以北西—南东向为主), 形成的伟晶岩脉相对细长, 以似层状为主, 延伸稳定, 锂矿床的规模一般为大型。因此, 岩浆穹隆和区域褶皱构造应力大角度交叉的位置, 是形成厚大伟晶岩矿脉的有利位置(可尔因岩体南东—东侧及北东侧), 是寻找大型—超大型稀有金属矿床的有利位置; 岩浆穹隆和区域

褶皱构造应力方向相近的区域(可尔因岩体南、北两侧及西侧), 是寻找矿脉细长但延伸稳定的中—大型锂矿床的有利区域。

2.3 伟晶岩的形成机理

在印支晚期—燕山早期, 随着地槽的回返, 同碰撞花岗岩(S型花岗岩)岩浆伴随大量富含稀有金属元素的酸性岩浆在雅江—甲基卡以及金川—可尔因一带侵入(岳相元等, 2019)。随着花岗岩岩浆的结晶分异作用和气运作用的发展, 岩浆房中的岩浆逐渐演变为富 Li-F 的花岗岩岩浆, 最终在岩浆房内形成富 Li、Na、Sn、B、Be、Rb、Nb、Ta、F 及挥发份的伟晶岩岩浆。当构造平静时, 伟晶岩岩浆在早期岩体内及周缘形成伟晶相微斜钠长花岗岩, 当岩浆系统平衡由于构造活动关系而受到破坏时, 富含挥发份的伟晶岩岩浆离开岩浆房进入构造裂隙系统, 沿着构造裂隙上升、充填, 形成贯入伟晶岩。伟晶岩脉的穿切现象表明: 伟晶岩的形成不是一次完成的, 而是不同成分的含矿熔体流由岩浆源断续按一定时间间隔脉动贯入的。另外, 二云母花岗岩与伟晶岩的微量元素分布特征具有较明显的不同, 稀土总量显著降低, 这可能与岩浆演化过程中, 二云母花岗岩与伟晶岩之间发生了液态不混溶作用有关(廖芝华等, 2019)。

早期从岩浆源析出富含钾的熔体, 由这种熔体形成微斜长石型伟晶岩; 随着钾的消耗, 继而溢出富含钾、钠的熔体, 从而形成微斜长石钠长石型伟晶岩。随着岩浆成分逐渐向富含钠和锂的方向变化, 且挥发份增多, 于是便先后出现特殊的钠和钠—锂岩浆, 相应地形成钠长石型、锂辉石钠长石型和锂云母钠长石型伟晶岩。由于后期熔体中富含挥发份, 在远离岩体空间产出, 形成了围绕可尔因岩体呈环带分布的不同类型伟晶岩脉群。同时, 伟晶岩熔体侵入到相对封闭的裂隙系统中, 随着温度、压力的逐渐降低, 而产生结晶分异作用, 形成了同一条伟晶岩脉, 发育不同类型的伟晶岩。微斜长石伟晶岩(300~400 ℃, 以近 400 ℃ 为主)、钠长石伟晶岩(300~400 ℃, 以近 300 ℃ 为主)、锂辉石钠长石伟晶岩(200~300 ℃)的流体包裹体均一温度逐渐降低(李建康, 2006), 李家沟矿床锂矿体石英和锂辉石包裹体研究显示其结晶温度较低(199.6~257.3 ℃)(Fei et al., 2018), 因此, 锂往往在脉体上部富集。

3 伟晶岩地球化学特征

3.1 采样及分析测试

对可尔因岩体的二云母花岗岩、伟晶相微斜长花岗岩及5个类型伟晶岩进行了较系统的采样分析,共采集样品52件,采样位置见图1c。其中,K-1—K-34样品采集于地表新鲜岩石样品,DB-1—DB-11样品为党坝矿床钻孔化学分析样副样,LJG-1—LJG-6样品采集于李家沟矿床坑道新鲜未风化的矿石,除化学分析副样外均采用多点采样组合为一个样品,减少伟晶岩中矿物不均匀的影响。主量、微量、稀土元素分析测试在四川省地矿局化探队测试中心完成。岩石主量元素氧化物数据采用等离子体光谱法(Li_2O)、容量法(FeO)、重量法(LOI)和X射线荧光光谱法(其他主量元素氧化物)测定,微量和稀土元素分析采用原子荧光光谱法(As、Sb、Hg)、原子发射光谱法(Sn、B)、离子选择性电极法(F)、X-射线荧光光谱法(Zr)及等离子体质谱法ICP-MS(其他微量、稀土元素)测定。

3.2 样品岩相学特征

二云母花岗岩:细一中粒花岗结构,主要矿物成分为酸性斜长石(15%~35%)、石英(20%~30%)、钾长石(38%~60%)、黑云母及白云母(约5%)和少量石榴石。酸性斜长石及钾长石呈半自形粒状,大小约0.3~1.2 mm,表面具针状、鳞片状绢云母化,可见钾长石被酸性斜长石、石英交代,边缘、裂纹、解理处见针状、纤维状白云母交代(图5a)。黑云母具褪色现象及白云母化。

伟晶相微斜钠长花岗岩:分布于二云母花岗岩内部及边缘,部分与伟晶岩特征相似,具粗粒—伟晶结构,主要矿物成分为石英(20%)、钠长石(50%~69%)、微斜长石(5%~20%)、黑云母及白云母(1%~6%)、电气石(0~5%)。钠长石呈自形板状及半自形粒状,大小约0.8~15 mm,局部蚀变形成绢云母。微斜长石呈半自形粒状,大小约0.4~9 mm,部分被钠长石交代(图5b)。黑云母具蚀变褪色及白云母化,见粒状石榴石。

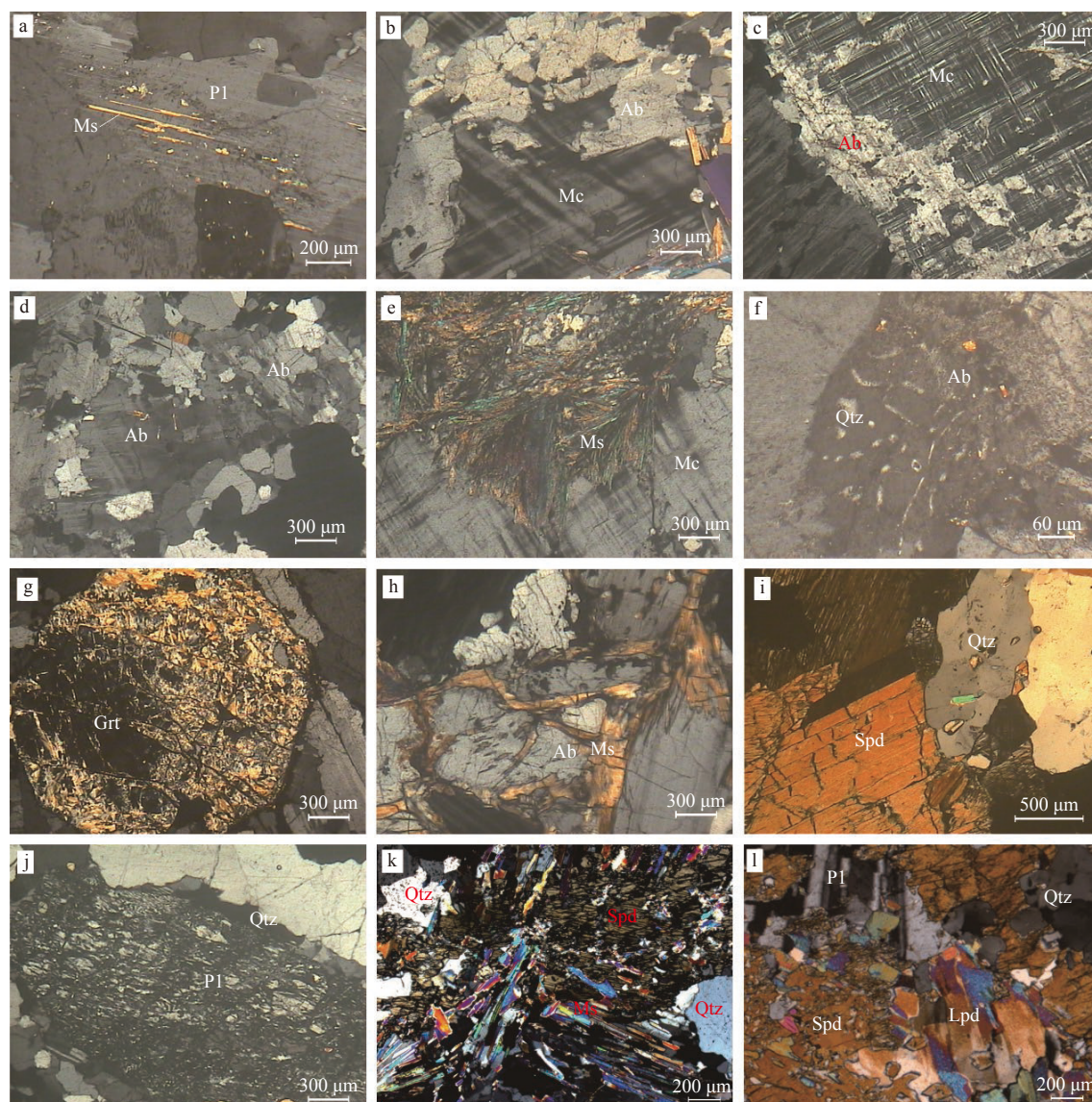
(电气石)微斜长石型伟晶岩(I类伟晶岩):以巨大电气石、黑云母及长石晶体为识别特征。主要矿物成分为微斜长石(71%)、石英(20%)、钠长石(0~8%)、电气石(1%~10%)。微斜长石呈半自形粒状,大小约4~100 mm,局部可见钠长石交代微斜

长石(图5c)。石英呈半自形粒状。电气石分布不均匀,粒度一般5~30 mm,局部可见长5~20 cm、粗1~5 cm的柱状电气石及长20~50 cm的带状黑云母(图4i、4j)。

(电气石)微斜长石钠长石型伟晶岩(II类伟晶岩):少见巨大电气石、云母晶体,主要矿物成分为钠长石(50%~63%)、钾长石(8%~10%)、石英(20%~35%)、电气石(1%~5%)、白云母(3%)及少量石榴石。钠长石呈自形板状、半自形粒状,大小为1~11 mm,晚期叶钠长石呈集合体交代早期钠长石(图5d)。微斜长石呈半自形粒状,大小约2~12 mm,可见钠长石、白云母呈集合体交代微斜长石(图5e),石英交代长石形成蠕英结构(图5f)。电气石呈柱状、粒状及不规则状,大小0.1~50 mm不等。石榴石多被绢云母交代(图5g)。

(电气石)钠长石型伟晶岩(III类伟晶岩):电气石、云母晶体相对较小,少见3 cm以上晶体,且含量相对I、II类伟晶岩减少,局部偶见锂辉石出现。主要矿物成分为钠长石(57%~64%)、微斜长石(0~5%)、石英(20%~30%)、白云母(2%~7%)、电气石(1%~5%)。钠长石具有二世特征,叶钠长石呈集合体交代早期钠长石。白云母呈板状、条状分布于长石、石英颗粒间,部分呈束状、放射状集合体分布在后期构造裂隙中(图5h)。电气石呈柱状、粒状及不规则状,大小约0.1~30 mm,分布于石英、长石颗粒间。

锂辉石钠长石型伟晶岩(IV类伟晶岩):以板柱状锂辉石为特征。同一伟晶岩脉中下部锂辉石晶体粗大且锂辉石晶体长轴方向性不明显;上部锂辉石晶体细长或细密,锂辉石晶体长轴与伟晶岩脉的厚度方向一致。主要矿物成分为锂辉石(10%~15%)、石英(20%~32%)、钠长石(40%~59%)、微斜长石(0~15%)、白云母及锂云母(3%~7%),锡石、绿柱石、黄铁矿、磁铁矿、钛铁矿、磷灰石、榍石、铌钽矿物等副矿物含量共约2%。锂辉石是主要矿石矿物,多为密集产出的板状、柱状,部分锂辉石呈细粒状(图5i)。锂辉石部分分布于脉石矿物间,有些则与石英细粒组成集合体沿裂隙充填,有的被显微鳞片状白云母或石英交代仅剩锂辉石晶体假像(图5j、5k)。锂辉石粒度相差较为悬殊,粗大的柱状锂辉石晶体的长径在5~20 cm,横断面2~5 cm,细粒锂辉石颗粒一般仅1~5 mm。锂云母



矿物代号: Ab—钠长石; Grt—石榴子石; Lpd—锂云母; Ms—白云母; Pl—斜长石; Qtz—石英; Spd—锂辉石; Tur—电气石

a—白云母沿斜长石聚片双晶纹处交代; b、c—钠长石交代微斜长石使其边缘呈锯齿状; d—叶钠长石呈集合体交代早期钠长石; e—白云母呈集合体交代微斜长石使其边缘呈港湾状; f—石英交代钠长石形成蠕英结构; g—石榴石绢云母化; h—白云母沿钠长石边缘及裂纹处交代; i—呈柱粒状锂辉石; j—斜长石、石英交代使锂辉石仅存假象; k—锂辉石裂隙和边缘被云母、石英等交代; l—锂云母分布在锂辉石、长石颗粒间

图5 可尔因花岗岩及伟晶岩显微照片(正交偏光)

Fig. 5 Microscope photographs of the Ke'eryin granite and pegmatite using cross-polarized light

(a) Muscovite metasomatized plagioclase along multiple twin; (b and c) Albite metasomatized microplagioclase leading to its jagged edge; (d) Cleavelandite appearing aggregate structure metasomatized inchoate albite; (e) Muscovite appearing aggregate structure metasomatized microcline leading to its embayed edge; (f) Quartz metasomatized albite forming myrmekitic texture; (g) Garnetization and sericitization; (h) Muscovite metasomatized albite along albite's edges and fissures; (i) Short columnar spodumene; (j) Plagioclase, quartz metasomatized to spodumene making it only exist pseudomorphic; (k) Fissures and edges of spodumene metasomatized by mica and quartz; (l) Lepidolite distributed among spodumene and feldspar particles

Mineral code: Ab—Albite; Grt—Garnet; Lpd—Lepidolite; Ms—Muscovite; Pl—Plagioclase; Qtz—Quartz; Spd—Spodumene; Tur—Tourmaline

呈无色片状、板状,局部可见被长石、石英交代,较均匀分布于石英、长石颗粒间。

细粒(锂云母)钠长石型伟晶岩(V类伟晶岩): 粒度总体较其他类型伟晶岩细,局部也可见较大长

石和石英晶体。主要矿物成分为钠长石(51%)、石英(35%)、微斜长石(0~10%)、白云母和锂云母(3%~6%)、电气石(1%)组成。钠长石呈自形板状及半自形粒状,大小为0.3~2 mm。微斜长石含量变化较大,呈半自形粒状,大小为1.5~8 mm,局部可见钠长石、白云母交代。石英呈无色半自形粒

状,大小为0.3~4 mm。锂云母呈无色片状、板状,大小为0.2~0.8 mm,分布在锂辉石、长石颗粒间(图 5I)。

3.3 主量元素

样品主量元素分析结果见表 1,平均值见表 2。结果显示,可尔因岩体及伟晶岩样品高 Si、富 Al、

表 1 可尔因花岗岩及伟晶岩主量元素分析结果

Table 1 Major elements analysis results of the Ke'eryin granite and pegmatite

岩性	送样编号	w/×10 ⁻²															A/NK	A/CNK	σ
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Li ₂ O	MnO	LOI	TOL				
二云母花岗岩	K-1	70.86	14.92	0.15	1.08	3.18	5.18	0.35	1.31	0.23	0.16	0.02	0.03	1.41	98.88	1.78	1.54	2.51	
	K-2	71.52	15.15	0.23	0.51	3.44	4.26	0.12	0.69	0.08	0.18	0.05	0.03	1.91	98.18	1.97	1.81	2.08	
	K-3	72.59	13.99	0.23	1.07	2.71	5.78	0.26	0.82	0.23	0.15	<0.02	0.02	1.59	99.43	1.65	1.50	2.44	
	LJG-1	67.52	16.35	0.19	2.21	2.78	5.54	0.75	2.81	0.37	0.13	0.04	0.04	1.23	99.96	1.97	1.47	2.82	
	LJG-2	74.73	13.75	0.09	0.77	3.51	4.59	0.21	0.80	0.09	0.16	0.02	0.02	1.26	100.00	1.70	1.54	2.07	
伟晶相微斜钠长花岗岩	K-4	73.08	14.78	0.37	0.20	4.33	4.10	0.10	0.84	0.05	0.16	<0.02	0.01	0.69	98.69	1.75	1.60	2.36	
	K-5	69.99	16.17	0.59	0.22	5.14	4.41	<0.05	0.88	0.01	0.20	<0.02	0.16	0.55	98.34	1.69	1.55	3.38	
	K-6	71.84	14.84	0.64	0.25	2.86	5.88	0.15	0.62	0.06	0.33	<0.02	0.05	0.88	98.40	1.70	1.59	2.65	
	K-7	74.91	13.37	0.18	0.25	3.01	6.11	<0.05	0.41	0.04	0.20	<0.02	0.01	0.62	99.11	1.47	1.40	2.61	
	K-8	74.52	13.87	0.15	0.33	3.88	4.16	<0.05	0.92	0.05	0.18	<0.02	0.01	1.20	99.27	1.73	1.55	2.05	
	K-9	74.30	13.33	<0.10	1.16	3.01	5.11	0.22	0.54	0.11	0.20	<0.02	0.02	1.44	99.44	1.64	1.54	2.10	
	K-10	74.42	14.09	<0.10	0.76	3.66	4.56	0.11	0.76	0.06	0.16	0.03	0.01	1.30	99.92	1.71	1.57	2.15	
Ⅰ类伟晶岩	K-11	70.16	15.81	<0.10	0.35	2.56	8.78	0.05	0.49	0.03	0.34	<0.02	0.01	1.68	100.27	1.39	1.34	4.74	
	K-12	72.22	15.23	0.58	0.24	4.45	4.21	0.11	0.61	0.06	0.30	0.03	0.01	1.39	99.43	1.76	1.64	2.57	
	K-13	76.86	12.66	<0.10	0.47	4.04	2.96	<0.05	0.43	0.03	0.26	<0.02	0.08	1.34	99.12	1.81	1.70	1.45	
	K-14	78.30	11.56	0.87	0.40	2.10	3.06	0.27	0.37	0.12	0.08	<0.02	0.02	1.63	98.77	2.24	2.09	0.76	
	K-15	74.83	13.71	0.46	0.33	3.65	3.65	0.09	0.66	0.11	0.23	<0.02	0.02	1.66	99.39	1.88	1.73	1.67	
	K-16	72.21	14.98	0.34	1.08	3.29	4.65	0.18	0.41	0.10	0.18	0.07	0.03	0.94	98.45	1.89	1.79	2.16	
	K-17	72.69	15.25	0.12	0.25	6.23	1.35	<0.05	0.84	0.03	0.14	<0.02	0.01	0.71	97.62	2.01	1.81	1.94	
Ⅱ类伟晶岩	K-18	72.44	14.94	0.16	0.25	4.97	4.25	<0.05	0.19	0.02	0.17	0.02	0.17	1.11	98.69	1.62	1.59	2.89	
	K-19	77.34	12.02	<0.10	0.54	5.10	1.34	<0.05	0.43	0.03	0.30	0.02	0.03	0.95	98.10	1.87	1.75	1.21	
	K-20	72.96	14.49	0.55	0.16	3.56	5.24	<0.05	0.23	0.02	0.19	0.03	0.03	0.84	98.27	1.65	1.61	2.58	
	K-21	73.16	14.24	1.47	0.29	4.86	1.75	0.10	0.48	0.05	0.18	0.02	0.17	0.75	97.51	2.16	2.01	1.44	
	K-22	72.65	14.82	1.20	0.72	4.58	2.18	0.20	0.50	0.09	0.12	0.06	0.08	0.76	97.97	2.19	2.04	1.54	
	K-23	72.89	14.71	0.57	0.18	4.62	3.54	<0.05	0.62	0.03	0.30	0.02	0.05	0.77	98.31	1.80	1.67	2.23	
Ⅲ类伟晶岩	K-24	73.82	14.90	0.84	0.29	5.34	1.39	<0.05	0.31	0.03	0.12	0.05	0.11	1.15	98.34	2.21	2.12	1.47	
	K-25	74.65	14.15	0.73	0.18	4.40	2.61	<0.05	0.21	0.03	0.43	0.19	0.16	1.67	99.40	2.02	1.96	1.55	
	K-26	71.61	15.10	<0.10	0.51	4.77	4.71	<0.05	0.25	0.03	0.24	0.12	0.19	1.41	98.94	1.59	1.55	3.14	
	K-27	73.41	14.26	0.12	0.16	3.76	6.16	<0.05	0.18	0.02	0.10	0.02	0.08	1.11	99.38	1.44	1.41	3.24	
	K-28	73.20	15.07	1.27	0.25	2.08	3.89	0.07	0.18	0.04	0.43	0.10	0.19	3.10	99.87	2.52	2.45	1.18	
	DB-10	74.57	14.61	0.22	0.33	5.56	2.89	<0.05	0.24	0.02	0.18	0.14	0.36	0.58	99.69	1.73	1.68	2.26	
	DB-11	73.61	15.17	0.20	0.22	5.82	2.96	<0.05	0.32	0.02	0.22	0.14	0.10	0.85	99.62	1.73	1.67	2.52	
	DB-12	73.68	14.86	0.43	0.47	5.05	3.15	<0.05	0.33	0.02	0.24	0.06	0.23	0.81	99.33	1.81	1.74	2.19	

续表 1

岩性	送样编号	w/ $\times 10^{-2}$														A/NK	A/CNK	σ
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Li ₂ O	MnO	LOI	TOL			
IV类伟晶岩	K-29	69.96	18.34	0.14	0.22	4.36	1.56	<0.05	0.31	0.03	0.21	1.01	0.13	2.49	98.76	3.10	2.94	1.30
	K-30	73.61	16.81	<0.10	0.33	3.03	1.72	<0.05	0.21	0.02	0.18	1.27	0.14	1.25	98.57	3.54	3.39	0.74
	DB-1	75.66	15.99	<0.05	0.22	3.08	1.71	<0.05	0.13	0.02	0.13	2.30	0.09	0.74	100.07	3.34	3.25	0.70
	DB-2	73.35	16.14	<0.05	0.25	3.56	3.09	<0.05	0.22	0.02	0.19	1.57	0.12	1.10	99.60	2.43	2.35	1.46
	DB-3	74.20	16.19	<0.05	0.33	3.83	1.91	<0.05	0.18	0.02	0.18	1.89	0.15	0.91	99.78	2.82	2.74	1.05
	DB-4	74.42	15.78	0.10	0.22	3.54	2.17	<0.05	0.21	0.03	0.19	1.74	0.11	1.07	99.58	2.76	2.67	1.04
	DB-5	74.24	15.98	<0.05	0.22	3.63	2.83	<0.05	0.15	0.02	0.18	1.75	0.10	0.79	99.88	2.48	2.42	1.33
	DB-6	68.09	17.34	0.74	0.43	3.73	3.58	0.49	1.71	0.10	0.27	1.45	0.36	1.61	99.89	2.37	1.92	2.13
	DB-7	74.46	13.90	0.70	0.29	3.87	2.83	<0.05	0.34	0.02	0.98	0.89	0.47	0.91	99.66	2.07	1.97	1.43
	DB-8	74.87	15.96	<0.05	0.22	3.27	1.99	<0.05	0.17	0.02	0.16	2.19	0.22	0.56	99.64	3.03	2.94	0.87
	DB-9	73.78	15.84	0.10	0.11	4.73	3.01	<0.05	0.16	0.02	0.15	0.90	0.09	0.71	99.60	2.05	2.01	1.95
	LJG-3	73.76	17.17	0.15	0.31	3.08	0.86	0.11	0.39	0.01	0.26	0.00	0.09	1.67	100.25	4.36	3.97	0.50
	LJG-4	67.83	17.51	0.03	0.21	3.59	8.73	0.15	0.20	0.02	0.50	0.00	0.14	1.06	100.36	1.42	1.40	6.11
	LJG-5	72.20	18.08	0.42	0.15	2.79	0.96	0.13	0.24	0.03	0.18	0.00	0.25	1.42	99.81	4.82	4.53	0.48
	LJG-6	71.62	16.21	0.07	0.15	2.99	6.69	0.10	0.18	0.02	0.28	0.00	0.07	1.03	100.32	1.67	1.64	3.27
V类伟晶岩	K-31	70.08	17.49	0.10	0.11	6.66	4.01	<0.05	0.61	0.02	0.59	0.05	0.04	0.54	100.31	1.64	1.55	4.21
	K-32	69.99	17.70	0.05	0.11	6.63	4.01	0.07	0.35	0.02	0.33	0.05	0.02	0.25	99.58	1.66	1.61	4.20
	K-33	72.96	16.79	0.09	0.14	6.59	1.70	0.05	0.24	0.02	0.20	0.05	0.02	1.08	99.95	2.03	1.97	2.29
	K-34	66.20	18.52	0.10	0.24	5.52	2.82	0.13	2.49	0.03	1.87	<0.05	0.16	1.85	99.93	2.22	1.71	2.99

注: σ 为里特曼指数, $\sigma=(K_2O+Na_2O)/(SiO_2-43)$, $A/NK=Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$, $A/CNK=Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$

富碱, 样品 SiO₂ 含量为 66.20%~78.30%, 平均含量 72.86%, 二云母花岗岩体及第 V 类伟晶岩 SiO₂ 含量略低。岩体及伟晶岩 Al₂O₃ 的含量为 11.56%~18.52%, 平均含量 15.29%, 其中, 第 IV、V 类伟晶岩含量相对较高, 平均含量分别为 16.48%、17.62%, Al₂O₃ 含量随 SiO₂ 含量增加而降低(图 6a)。二云母花岗岩及伟晶相微斜钠长花岗岩总体富 K 贫 Na, K₂O 平均含量 5.07%、Na₂O 平均含量 3.12%; 而伟晶岩总体富 Na 贫 K, 各类伟晶岩 K₂O 平均含量 2.91%~4.09%、Na₂O 平均含量 3.54%~6.35%。全碱含量(K₂O+Na₂O)、CaO、TiO₂ 含量及里特曼指数 σ 均与 SiO₂ 含量呈负相关(图 6b—6e)。

铝饱和指数(A/CNK)是 Shand(1947)在关于喷出岩的研究中提出来的, 对于长英质岩类型划分及其成矿作用具有重要参考作用(桑隆康和马昌前, 2012), 细晶岩-伟晶岩-云英岩型 Sn-W-U-Mo-Cu 和 Be-B-Li-P 多金属矿与过铝质长英质岩密切相关(Clarke, 1992), 中国岭南地区许多大型 U、W、稀有金属、REE 矿床都与强过铝质花岗岩有关(周新民, 2007)。由于花岗伟晶岩与花岗岩在矿物成

分上相似, 铝饱和指数 A/CNK 也被用于描述伟晶岩铝饱和程度, 如西藏喜马拉雅普斯拉伟晶岩(A/CNK=1.0~1.6)、新疆阿尔泰地区伟晶岩(A/CNK=1.04~1.09)、湘东幕埠山地区伟晶岩(A/CNK=1.04~2.26)和四川甲基卡伟晶岩(A/CNK=1.02~2.65)均具过铝质特征(李鹏等, 2019; 李贤芳等, 2020; 刘涛等, 2020; Liu et al., 2020)。为便于对比二云母花岗岩体和伟晶岩的铝饱和度及其与锂含量的关系, 本次计算了样品的铝饱和指数, 结果显示二云母花岗岩 A/CNK 值为 1.47~1.81, 伟晶相微斜钠长花岗岩 A/CNK 值为 1.40~1.60, 伟晶岩 A/CNK 值为 1.34~4.53, 所有样品均为过铝质花岗岩。由表 1、表 2 可知, 自二云母花岗岩→伟晶相微斜钠长花岗岩→I→II→III→IV→IV 类伟晶岩的 A/CNK 平均值逐渐升高, 至 V 类降低, 其中, IV 类含矿伟晶岩 A/CNK 值最高, 值为 1.40~4.53(平均值 2.68)。这表明研究区二云母花岗岩到伟晶岩演化过程中, 过铝程度随分异作用而增强。

矿石样品中, Li₂O 含量随全碱含量(K₂O+Na₂O)及里特曼指数 σ 升高而明显降低(图 6f、6g), 随

表 2 可尔因花岗岩和不同类型伟晶岩主量、微量及稀土元素分析结果平均值

Table 2 Average analysis results of major elements, trace elements and REEs in Ke'erlyn granite and pegmatite of different types

岩性	样品数量	主量元素平均含量w/×10 ⁻²														特征值			微量元素平均含量w/×10 ⁻⁶				
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Li ₂ O	MnO	LOI	TOL	A/NK	A/CNK	σ	Li	Sn	B	Ga	
二云母花岗岩	5	71.44	14.83	0.18	1.13	3.12	5.07	0.34	1.29	0.20	0.16	0.02	0.03	1.48	99.28	1.81	1.57	2.38	133.39	8.76	28.62	23.82	
伟晶相花岗岩	7	73.29	14.35	0.39	0.45	3.70	4.90	0.14	0.71	0.06	0.20	0.03	0.04	0.95	99.02	1.67	1.54	2.47	64.31	6.70	33.30	19.93	
I类伟晶岩	7	73.90	14.17	0.47	0.45	3.76	4.09	0.14	0.54	0.07	0.22	0.05	0.03	1.34	99.01	1.85	1.73	2.18	101.27	15.12	614.11	24.93	
II类伟晶岩	6	73.62	14.20	0.74	0.37	4.49	3.20	0.15	0.43	0.04	0.21	0.03	0.08	0.93	98.27	1.88	1.77	2.01	138.62	27.61	1032.21	22.90	
III类伟晶岩	8	73.57	14.76	0.54	0.30	4.60	3.47	0.07	0.25	0.03	0.25	0.10	0.17	1.33	99.32	1.88	1.82	2.19	469.70	104.06	278.37	34.71	
IV类伟晶岩	15	72.80	16.48	0.27	0.24	3.54	2.91	0.20	0.32	0.03	0.27	1.58	0.17	1.15	99.72	2.82	2.68	1.62	7326.95	522.35	15.94	31.45	
V类伟晶岩	4	69.81	17.62	0.09	0.15	6.35	3.13	0.09	0.92	0.02	0.75	0.05	0.06	0.93	99.94	1.89	1.71	3.42	22.54	285.26	14.43	26.90	
岩性	样品数量	微量元素平均含量w/×10 ⁻⁶														特征值							
		Be	Rb	Co	Cs	U	Th	Sr	Ba	Nb	Ta	Zr	Hf	Y	Sc	Cd	Tl	F	Nb/Ta	Ta/Zr	Zr/Hf	Ti ₂ O/Ta	
二云母花岗岩	5	6.04	325.92	13.27	15.73	7.92	16.81	135.33	571.01	15.54	1.82	104.39	2.16	15.27	3.86	0.06	1.34	733.01	9.78	0.03	63.80	1094.71	
伟晶相花岗岩	7	5.59	286.31	12.52	10.54	2.85	4.23	37.70	62.00	12.78	1.03	14.67	0.94	10.99	5.83	0.08	1.16	319.45	12.67	0.08	16.22	548.33	
I类伟晶岩	7	34.81	344.69	16.03	16.14	2.31	3.05	33.42	50.41	25.26	2.85	10.72	0.89	7.48	4.46	0.08	1.68	455.50	8.63	0.27	13.31	242.14	
II类伟晶岩	6	49.51	577.80	13.82	47.07	2.62	2.51	14.95	39.07	27.46	7.05	19.49	1.05	7.75	3.42	0.17	2.90	545.30	5.16	0.47	16.16	59.81	
III类伟晶岩	8	143.11	939.61	9.76	72.26	6.18	1.63	8.89	44.04	67.70	26.55	16.45	1.35	3.33	1.77	1.83	3.85	1091.46	3.80	1.69	12.75	9.67	
IV类伟晶岩	15	143.98	1090.21	3.60	76.61	3.89	3.65	14.44	37.94	72.41	48.40	14.05	1.54	1.42	1.24	1.16	4.93	827.47	1.98	4.16	9.58	5.31	
V类伟晶岩	4	122.25	1133.00	0.65	67.85	5.86	2.40	61.19	87.06	69.55	187.12	24.28	3.09	3.11	2.55	0.75	4.14	814.43	0.39	7.73	8.20	1.21	
岩性	样品数量	稀土元素平均含量w/×10 ⁻⁶														特征值							
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	LREE/HREE	δEu	δCe		
二云母花岗岩	5	39.43	90.25	8.57	32.79	6.68	0.93	5.07	0.72	2.88	0.51	1.29	0.17	0.94	0.14	190.27	178.54	11.73	14.40	0.45	1.12		
伟晶相花岗岩	7	7.39	18.93	1.63	5.19	1.49	0.26	1.34	0.29	1.71	0.29	0.81	0.15	0.90	0.13	40.52	34.89	5.63	7.26	0.55	1.28		
I类伟晶岩	7	5.45	13.41	1.14	3.77	1.02	0.21	0.93	0.20	1.22	0.21	0.55	0.10	0.52	0.07	28.79	25.00	3.79	6.85	0.69	1.25		
II类伟晶岩	6	4.87	12.83	1.02	3.25	0.97	0.12	0.85	0.19	1.16	0.19	0.52	0.10	0.62	0.09	26.78	23.06	3.72	6.79	0.50	1.43		
III类伟晶岩	8	3.14	8.89	0.65	2.19	0.49	0.11	0.45	0.09	0.54	0.10	0.28	0.05	0.30	0.05	17.33	15.47	1.86	8.35	0.73	1.62		
IV类伟晶岩	15	1.69	4.48	0.33	1.09	0.23	0.08	0.21	0.04	0.25	0.05	0.14	0.03	0.14	0.03	8.79	7.90	0.89	9.47	1.55	1.59		
V类伟晶岩	4	2.76	6.45	0.59	2.07	0.41	0.12	0.41	0.08	0.49	0.10	0.28	0.05	0.29	0.04	14.13	12.40	1.73	7.58	0.82	1.13		

σ: 为里特曼指数, σ=(K₂O+Na₂O)⁷/(SiO₂-43), A/NK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O), A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)

注: σ 为里特曼指数, $\sigma = (K_2O + Na_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$, $A/NK = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$, $A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$

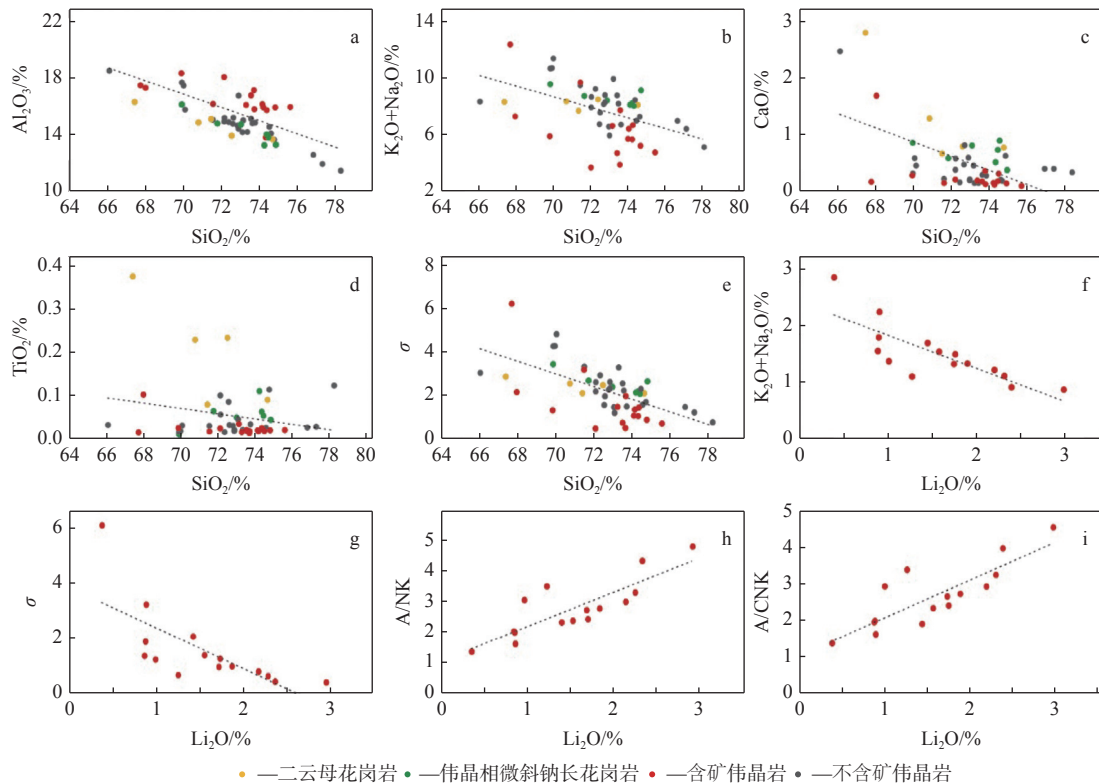


图6 可尔因花岗岩体和伟晶岩主量元素及特征值协变图

Fig. 6 Covariance diagram of major elements and eigenvalues from the Ke'eryin granite body and pegmatite

A/CNK 及 A/NK 值升高而明显升高 (图 6h、6i)。可以发现, 矿体 Li_2O 品位与铝饱和度成正相关, 与碱度呈负相关。

3.4 微量元素

样品微量元素分析结果见表 3, 平均值见表 2。据样品微量元素蛛网图 (图 7) 可见, 二云母花岗岩、伟晶相微斜钠长花岗岩与各类伟晶岩均呈右倾, 表明熔体不相容元素富集。伟晶相微斜钠长花岗岩和伟晶岩的微量元素曲线形态一致, 均富集 Rb、K、Ta、P、Hf, 亏损 Ba、Th、Sr、Nd、Sm、Ti, 且富集或亏损程度自伟晶相微斜钠长花岗岩 $\rightarrow \text{I} \rightarrow \text{II} \rightarrow \text{III} \rightarrow \text{IV} \rightarrow \text{V}$ 类伟晶岩逐渐增强 (图 7h), 熔体相容元素含量逐渐降低, 特别是 III、V 类伟晶岩的熔体相容元素含量明显低于其他类型伟晶岩和可尔因岩体 (图 7e—7g)。矿体样品不相容元素曲线分布紧密, 相容元素曲线相对分散, 表明相容元素分布不均匀 (图 7f)。二云母花岗岩各元素富集、亏损程度多弱于伟晶岩, P 呈负异常, Nd、Sm 为正异常, 与伟晶岩明显不同。总体显示了伟晶岩不同分带具有连续分异的特点, 但伟晶岩与二云母花岗岩之间部分微量元素具有突变的特征。

(1) 平面变化

二云母花岗岩的 Li 平均含量 133.39×10^{-6} , 伟晶相微斜钠长花岗岩中 Li 平均含量仅 64.31×10^{-6} , 进入伟晶岩后, Li 含量逐渐升高, 至 IV 类含矿伟晶岩后达到 7326.95×10^{-6} , 随后的 V 类伟晶岩 Li 含量降至最低, 仅 22.54×10^{-6} (勘查中部分 V 类伟晶岩局部可见锂矿化)。相似的变化规律还体现在 Sn、Be、Rb、Nb 等元素。B 主要集中于伟晶岩 I—III 类伟晶岩, IV、V 类伟晶岩含量明显降低, 这与电气石等硼矿物分布范围一致, 在找矿过程中可以作为标志确定矿体部位及剥蚀程度。从表 2、图 8 可知, 自二云母花岗岩 $\rightarrow$ 伟晶相微斜钠长花岗岩 $\rightarrow \text{I} \rightarrow \text{II} \rightarrow \text{III} \rightarrow \text{IV} \rightarrow \text{V}$ 类伟晶岩全岩地球化学元素含量及比值存在规律性变化: K、B、Co、Th、Sr、Ba、Y、Nb/Ta、 TiO_2/Ta 、 ΣREE 、 ΣLREE 、 ΣHREE 总体降低; 而 Li、Na、Sn、Be、Rb、Cs、Nb、Ta、Cd、Tl、F、Zr、Zr/Hf、Na/K 总体升高, 其中, Li、Sn、Be、Nb 等元素至 V 类伟晶岩后含量降低。

(2) 垂向变化

据党坝锂矿床钻孔工程统计表明: 锂矿体品位总体具上高下低的特征, Li 品位 1.4% 以上的矿体多位于海拔 3750 m 以上, 向深部延伸品位总体相对降低, 李家沟矿床具有类似特征。通过对党坝锂矿床

Table 3 Trace element analysis results of the Ke'erlyn granite and pegmatite

岩性	送样 编号	w/×10 ⁻⁶																				Nb/Ta	Zr/Hf	Ta/Zr	Ti ₂ O/Ta		
		Li	Sn	B	Ga	Be	Rb	Co	Ni	Cs	U	Th	Sr	Ba	Nb	Ta	Zr	Hf	Y	Sc	Cd					Tl	F
二云母花岗岩	K-1	92.49	9.41	4.43	25.64	7.15	305	14.74	4.01	14.17	1.91	24.22	140.48	607.94	10.26	1.11	130.62	0.96	12.80	3.63	0.07	0.70	1178	9.25	136.47	0.01	2040.60
	K-2	242.88	15.72	39.44	30.76	9.19	443	12.21	3.71	24.54	3.53	8.71	44.74	166.05	20.79	2.88	48.54	1.73	13.06	4.11	0.06	1.67	1076	7.21	28.11	0.06	274.68
	K-3	71.19	5.85	3.93	24.51	3.94	333	12.88	3.39	10.11	3.19	40.11	96.25	437.08	12.76	0.95	143.49	1.48	15.21	3.84	0.06	1.63	471	13.4	96.64	0.01	2432.14
	LJG-1	167.00	5.21	34.50	19.70	4.31	260			13.50	20.80	8.01	335.00	1486.00	13.30	1.08	141.00	4.32	17.10				660	12.3	32.64	0.01	3425.93
	LJG-2	93.40	7.59	60.80	18.50	5.60	289			16.30	10.20	2.99	60.20	158.00	20.60	3.08	58.30	2.32	18.20				280	6.69	25.13	0.05	292.21
	K-4	55.50	6.39	61.35	17.96	4.51	226	13.48	3.84	10.32	1.93	2.95	33.46	55.92	12.81	0.79	10.00	0.65	4.36	3.37	0.09	0.97	289	16.15	15.35	0.08	627.73
伟晶相微斜钠长花岗岩	K-5	21.62	8.04	38.08	18.84	6.10	246	11.76	3.43	10.07	3.29	4.02	31.19	59.72	4.32	0.35	21.44	0.84	15.55	6.38	0.20	0.96	517	12.30	25.47	0.02	341.11
	K-6	54.62	8.24	19.68	22.78	4.48	336	9.36	3.59	11.23	1.47	2.94	31.76	84.98	16.23	1.04	14.20	0.72	18.04	7.90	0.09	1.15	151	15.67	19.73	0.07	622.29
	K-7	74.02	5.78	13.65	18.54	4.10	403	14.72	3.92	15.48	1.55	4.68	23.36	44.97	13.80	1.06	10.00	0.88	14.03	9.50	0.04	1.23	342	13.02	11.43	0.11	421.69
	K-8	39.03	8.18	5.98	19.25	6.58	242	13.00	3.50	7.86	5.72	4.81	62.08	62.74	11.57	1.20	13.41	1.12	10.26	3.96	0.07	1.08	507	9.63	12.00	0.09	444.72
	K-9	57.51	4.53	80.30	21.92	3.55	291	13.05	4.15	10.23	2.94	4.56	35.75	49.50	17.85	1.60	10.00	1.29	4.72	5.90	0.05	1.56	185	11.1	7.78	0.16	685.03
	K-10	147.85	5.72	14.06	20.23	9.84	262	12.28	3.57	8.59	3.08	5.64	46.29	76.18	12.90	1.20	23.63	1.08	10.20	3.78	0.03	1.17	246	10.8	21.78	0.05	525.61
	K-11	49.81	7.83	16.36	21.20	4.57	543	14.08	3.90	18.93	0.85	0.83	37.06	87.59	11.25	1.49	10.00	0.48	8.07	2.50	0.04	3.01	353	7.56	20.83	0.15	211.14
	K-12	145.04	15.90	1199.00	26.67	11.11	441	13.72	3.88	19.47	1.70	2.92	20.15	38.12	20.54	2.62	10.00	1.08	9.12	3.28	0.07	2.37	442	7.85	9.23	0.26	215.40
	K-13	34.92	20.11	72.71	22.91	10.30	317	18.32	3.25	21.85	2.32	4.51	11.86	22.55	16.07	3.71	12.68	1.13	3.42	1.94	0.02	1.51	379	4.33	11.18	0.29	72.81
	K-14	77.93	14.21	1939.00	24.75	182.36	273	19.85	3.44	11.95	4.52	3.41	34.19	61.47	16.38	1.34	10.00	1.18	6.01	5.80	0.04	1.39	704	12.2	8.46	0.13	912.56
K-15	65.97	15.51	7.71	26.10	5.03	276	13.93	3.93	15.10	3.36	4.40	51.64	70.60	13.41	1.29	12.35	1.00	9.93	8.81	0.22	1.18	609	10.4	12.29	0.10	878.58	
I类伟晶岩	K-16	302.86	28.73	818.00	29.89	17.04	458	14.44	3.66	19.80	2.56	3.34	21.97	33.18	85.89	7.41	10.00	0.77	10.25	4.84	0.15	1.94	285	11.6	12.96	0.74	134.85
	K-17	32.38	3.53	246.00	22.99	13.26	105	17.89	3.76	5.84	0.85	1.95	57.08	39.34	13.27	2.07	10.00	0.55	5.59	4.04	0.05	0.40	416	6.40	18.21	0.21	156.88
	K-18	146.61	97.04	28.23	26.22	51.57	1947	11.11	3.27	134.25	2.07	1.30	15.39	85.97	29.35	13.26	10.00	0.77	2.92	1.16	<0.02	10.24	403	2.21	12.96	1.33	12.46
	K-19	91.66	9.90	942.00	18.13	105.70	206	13.52	4.20	40.72	3.46	3.85	9.44	22.74	25.97	5.07	10.00	0.94	8.17	5.19	0.18	1.09	507	5.13	10.69	0.51	56.58
II类伟晶岩	K-20	135.27	13.07	1225.00	20.30	65.56	583	13.13	3.28	26.99	0.92	1.47	5.44	48.56	19.02	2.73	10.00	0.72	2.22	1.62	0.05	2.69	336	6.96	13.92	0.27	70.53
	K-21	114.32	11.50	2424.00	23.19	67.01	224	14.08	3.48	27.37	6.71	2.54	10.97	11.82	43.18	16.00	68.60	2.08	15.03	2.79	0.55	1.19	487	2.70	32.90	0.23	28.44
	K-22	272.21	37.85	1829.00	26.48	14.35	337	16.91	4.21	56.75	1.35	3.52	18.63	27.31	29.90	4.65	11.83	1.10	10.19	6.22	0.09	1.51	1040	6.43	10.79	0.39	183.41
	K-23	109.03	8.78	163.14	21.07	7.57	402	11.99	3.75	27.24	1.54	1.86	11.40	26.69	19.55	4.79	15.30	0.82	8.22	2.50	0.05	1.90	589	4.08	18.58	0.31	64.41

续表 3

岩性	送样 编号	w/×10 ⁻⁶																Nb/Ta				Zr/Hf	Ta/Zr	Ti ₂ O/Ta			
		Li	Sn	B	Ga	Be	Rb	Co	Ni	Cs	U	Th	Sr	Ba	Nb	Ta	Zr	Hf	Y	Sc	Cd	Tl	F				
Ⅲ类伟晶岩	K-24	224.8	53.81	1393.00	37.87	189.32	396	9.76	3.48	19.46	0.96	0.90	4.51	25.06	86.90	10.51	14.23	1.13	2.36	1.76	0.33	1.51	847	8.27	12.61	0.74	32.50
	K-25	867.9	111.48	197.70	45.47	135.55	968	13.53	3.81	127.95	11.39	1.07	5.83	27.80	70.16	14.24	24.63	1.10	2.51	1.63	0.24	4.68	1510	4.93	22.49	0.58	18.54
	K-26	535.0	103.82	45.82	36.59	106.23	1575	14.37	4.45	196.48	1.60	2.03	17.41	70.74	42.37	15.29	12.93	0.98	6.44	3.01	0.74	7.81	923	2.77	13.19	1.18	19.91
	K-27	90.5	217.52	143.39	31.84	119.81	1352	13.89	4.36	82.47	0.88	3.07	18.66	112.59	41.11	13.95	10.00	1.10	4.75	2.69	<0.02	6.08	299	2.95	9.13	1.39	15.56
	K-28	464.3	148.42	170.78	58.13	84.08	1330	24.81	5.02	46.98	8.73	2.36	7.89	42.97	94.72	19.25	10.00	0.71	3.99	3.55	<0.02	5.22	2191	4.92	14.04	1.92	18.26
	DB-10	633.5	70.35	8.39	22.50	207.80	674	0.74	3.29	39.92	9.58	1.41	4.53	18.22	63.61	74.90	27.69	2.36	2.13	0.53	6.10	1.68	951	0.85	11.72	2.71	2.52
	DB-11	653.6	76.58	7.88	23.99	192.30	651	0.48	4.13	36.86	9.20	1.57	8.49	33.15	102.03	53.65	12.02	1.62	1.90	0.54	0.66	1.89	533	1.90	7.44	4.46	3.67
	DB-12	287.9	50.54	260.00	21.29	109.80	572	0.51	3.39	27.98	7.07	0.64	3.81	21.76	40.71	10.63	20.10	1.77	2.52	0.41	2.89	1.96	1478	3.83	11.34	0.53	17.88
	K-29	4702.9	967.32	8.16	45.43	122.21	783	19.16	4.20	52.79	3.03	4.35	26.84	33.65	73.64	16.59	17.13	1.38	6.89	4.34	<0.02	3.57	583	4.44	12.46	0.97	15.52
	K-30	5911.7	713.71	14.07	45.00	135.57	862	14.53	3.69	46.70	3.99	2.16	20.94	50.39	66.44	34.22	26.94	1.94	3.00	2.22	<0.02	4.59	233	1.94	13.91	1.27	6.20
	DB-1	10700.4	507.84	11.19	26.40	105.70	692	0.41	3.52	45.21	2.95	1.28	7.18	22.16	59.91	87.55	10.00	1.09	0.96	0.47	1.58	3.41	591	0.68	9.16	8.76	2.44
	DB-2	7313.0	450.24	9.40	27.09	128.90	1362	0.27	3.49	50.66	1.87	1.41	32.25	67.99	46.36	34.88	10.00	2.56	0.62	3.24	1.41	7.20	599	1.33	3.90	3.49	4.73
DB-3	8778.2	389.71	21.03	28.43	118.95	828	0.70	3.23	38.69	4.89	0.92	6.96	31.83	68.09	42.64	10.00	1.42	1.00	0.59	1.13	3.70	709	1.60	7.05	4.26	4.77	
DB-4	8077.2	478.71	15.54	26.25	177.50	894	0.41	4.74	46.25	5.67	1.88	6.62	47.82	74.02	101.48	32.99	2.96	1.10	0.57	1.48	4.10	1471	0.73	11.16	3.08	2.50	
DB-5	8147.3	803.01	14.52	26.47	204.50	1260	0.24	3.46	57.10	5.82	0.86	4.21	63.24	62.59	73.74	10.00	1.04	0.09	0.14	0.80	6.76	1345	0.85	9.62	7.37	2.53	
DB-6	6712.5	274.73	24.09	28.54	164.80	1463	2.27	6.53	149.68	3.10	1.99	44.50	111.66	63.90	79.00	31.37	2.07	3.06	1.15	0.90	8.71	172	0.81	15.17	2.52	12.88	
DB-7	4125.3	110.89	25.84	26.86	278.20	1013	0.32	3.65	33.62	7.06	0.69	4.65	40.01	57.13	31.04	10.00	0.71	0.54	0.15	1.37	5.24	192	1.84	14.01	3.10	7.42	
DB-8	10185.1	444.22	7.55	29.00	151.95	906	0.43	3.71	36.99	7.75	1.62	3.81	33.67	75.09	67.22	11.73	1.32	0.59	0.30	1.03	5.10	580	1.12	8.90	5.73	3.08	
DB-9	4172.8	292.83	13.46	22.70	229.60	848	0.87	6.55	52.02	7.74	0.95	12.45	46.94	64.36	48.78	10.00	2.12	1.44	0.52	0.79	1.83	997	1.32	4.73	4.88	3.73	
LJG-3	11125.0	803.00	29.30	47.30	144.00	294			33.90	0.38	2.93	23.40	3.19	152.00	31.30	10.20	0.73	0.45				2490	4.86	13.97	3.07	4.47	
LJG-4	1866.0	272.00	15.80	23.90	89.40	2643			293.00	2.17	10.90	3.89	4.09	18.00	21.20	4.02	1.59	0.31				490	0.85	2.53	5.27	7.55	
LJG-5	13855.0	906.00	18.70	43.40	54.20	348			72.50	1.14	17.60	9.64	5.32	108.00	29.60	12.00	0.87	0.73				1270	3.65	13.79	2.47	8.45	
LJG-6	4232.0	421.00	10.40	25.00	54.20	2158			140.00	0.84	5.18	9.32	7.11	96.70	26.70	4.32	1.30	0.52				690	3.62	3.32	6.18	6.74	
K-31	22.2	142.78	3.07	25.32	105.00	1295	0.93	6.25	42.99	1.42	1.06	85.37	85.26	62.51	139.12	16.82	1.63	1.48	0.53	0.60	4.75	353	0.45	10.35	8.27	1.38	
K-32	15.9	330.94	8.64	25.72	153.00	1420	0.49	4.24	103.57	1.61	1.70	20.05	71.72	65.43	254.11	30.06	3.90	1.76	0.58	0.48	4.75	1178	0.26	7.71	8.45	0.67	
K-33	10.5	535.18	13.67	29.23	114.00	644	0.55	3.90	60.43	16.60	2.46	38.95	59.79	71.27	174.74	23.44	3.40	4.72	1.74	1.01	2.52	1283	0.41	6.90	7.45	1.24	
K-34	41.6	132.15	32.35	27.32	117.00	1173	0.64	3.63	64.41	3.82	4.37	100.41	131.47	79.00	180.53	26.79	3.42	4.50	7.34	0.90	4.52	444	0.44	7.83	6.74	1.81	

注: LJG-3—LJG-6等6件样品为2014年测试,未测试Co、Ni、Se、Cd、Tl等元素,由于时间间隔较久现已无法补充分析,缺失的元素不影响本次地球化学指标总结

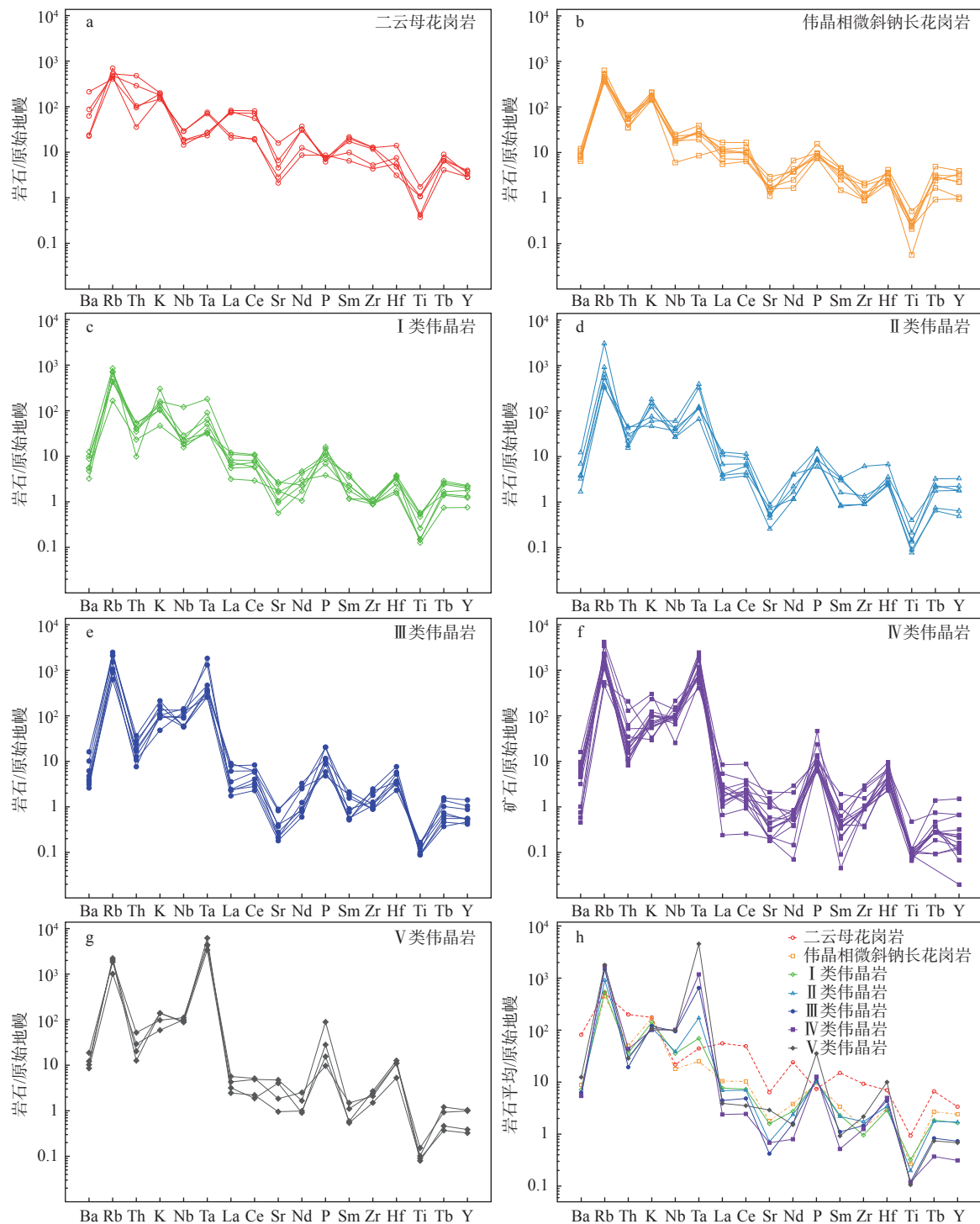
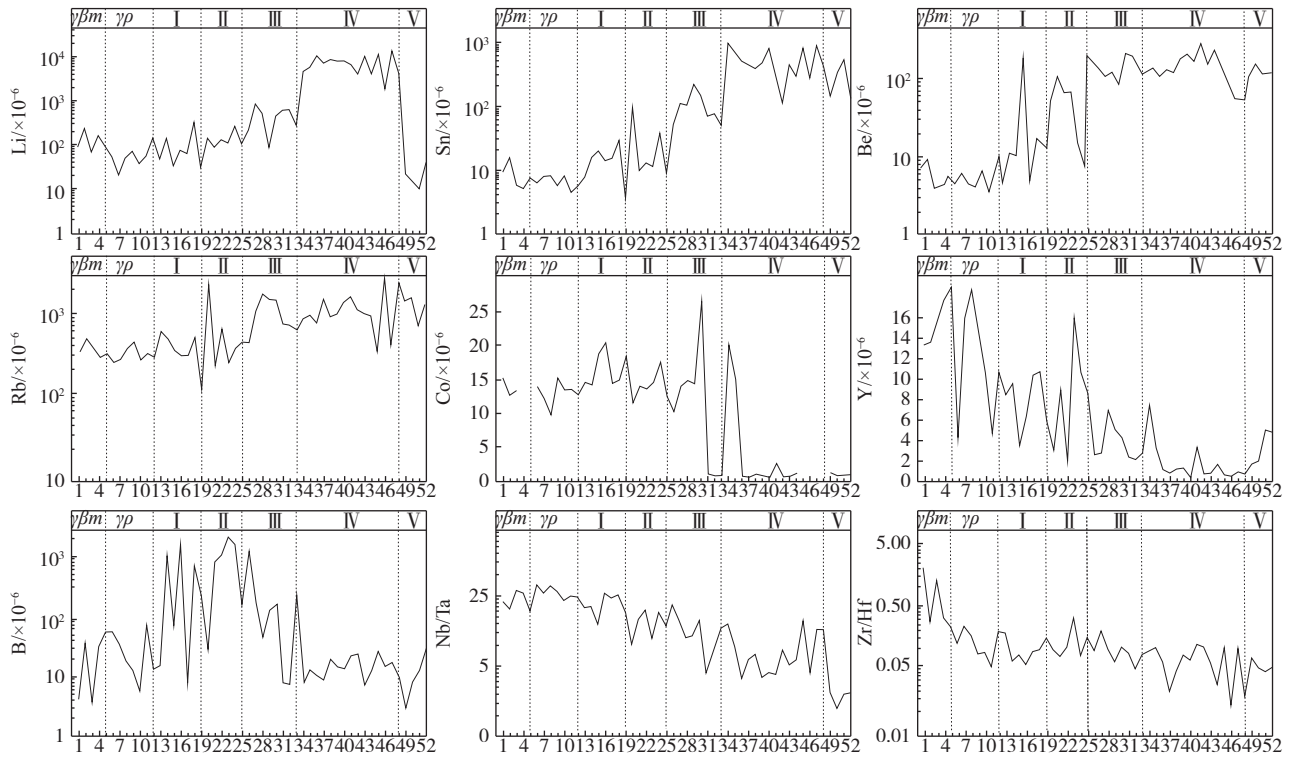


图 7 样品的原始地幔标准化微量元素蛛网图 (原始地幔标准值据引自 [McDonough, 1992](#))

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams (primitive mantle normalization date according to [McDonough, 1992](#))

P11 剖面不同高程的矿体采样分析 (图 9, 表 3), 结果表明随着矿体自地表向深部延伸, Sn、Rb、In、Sr、Ba、Tl 等元素含量总体逐渐降低, 至海拔 3500 m 以下 Li 矿化减弱而含量明显降低, U 随矿体向深部延伸含量升高。随着矿体向深部延伸至锂辉石减少, Li 含量降低, 较多电气石出现, B 含量明显升

高, 标志着含矿伟晶岩由 IV 类向 III 类变化。垂向上, 细粒 (锂云母) 钠长石型伟晶岩 (V 类) 向锂辉石钠长石伟晶岩 (IV 类) 延伸, 呈现 Li、Sn、B、Be、Rb、Nb 等元素含量升高的特征; 锂辉石钠长石伟晶岩 (IV 类) 向 (电气石) 钠长石型伟晶岩 (III 类) 延伸, 呈现 Li、Sn、Rb、In、Sr、Ba、Tl 含量降低, U、B、Zr 含



$\gamma\beta m$ —二云母花岗岩； γp —伟晶相微斜钠长花岗岩；I—(电气石)微斜长石型伟晶岩脉；II—(电气石)微斜长石钠长石型伟晶岩脉；III—(电气石)钠长石型伟晶岩脉；IV—锂辉石钠长石型伟晶岩脉；V—细粒(锂云母)钠长石型伟晶岩脉；横坐标序号：1—5为二云母花岗岩($\gamma\beta m$)，6—12为伟晶相花岗岩，13—19为I类伟晶岩，20—25为II类伟晶岩，26—33为III类伟晶岩，34—48为IV类伟晶岩，49—52为V类伟晶岩，对应样品分析结果见表3。

图8 可尔因花岗岩体和伟晶岩微量元素含量曲线图

Fig. 8 Trace element content curve of the Ke'eryin granite and pegmatite

$\gamma\beta m$ —Two-mica granite; γp —Pegmatite microclinal albite granite; I—(tourmaline) microclinal pegmatite vein; II—(tourmaline) microclinal albite pegmatite vein; III—(tourmaline) albite pegmatite vein; IV—spodumene/albite pegmatite vein; V—fine-grained (lepidolite) albite pegmatite vein

Abscissa number: 1—5 represent two-mica granite($\gamma\beta m$), 6—12 represent pegmatite granite, 13—19 represent I type pegmatite, 20—25 represent II type pegmatite, 26—33 represent III type pegmatite, 34—48 represent IV type pegmatite, 49—52 represent V type pegmatite; See Table 3 for the analysis results of corresponding samples

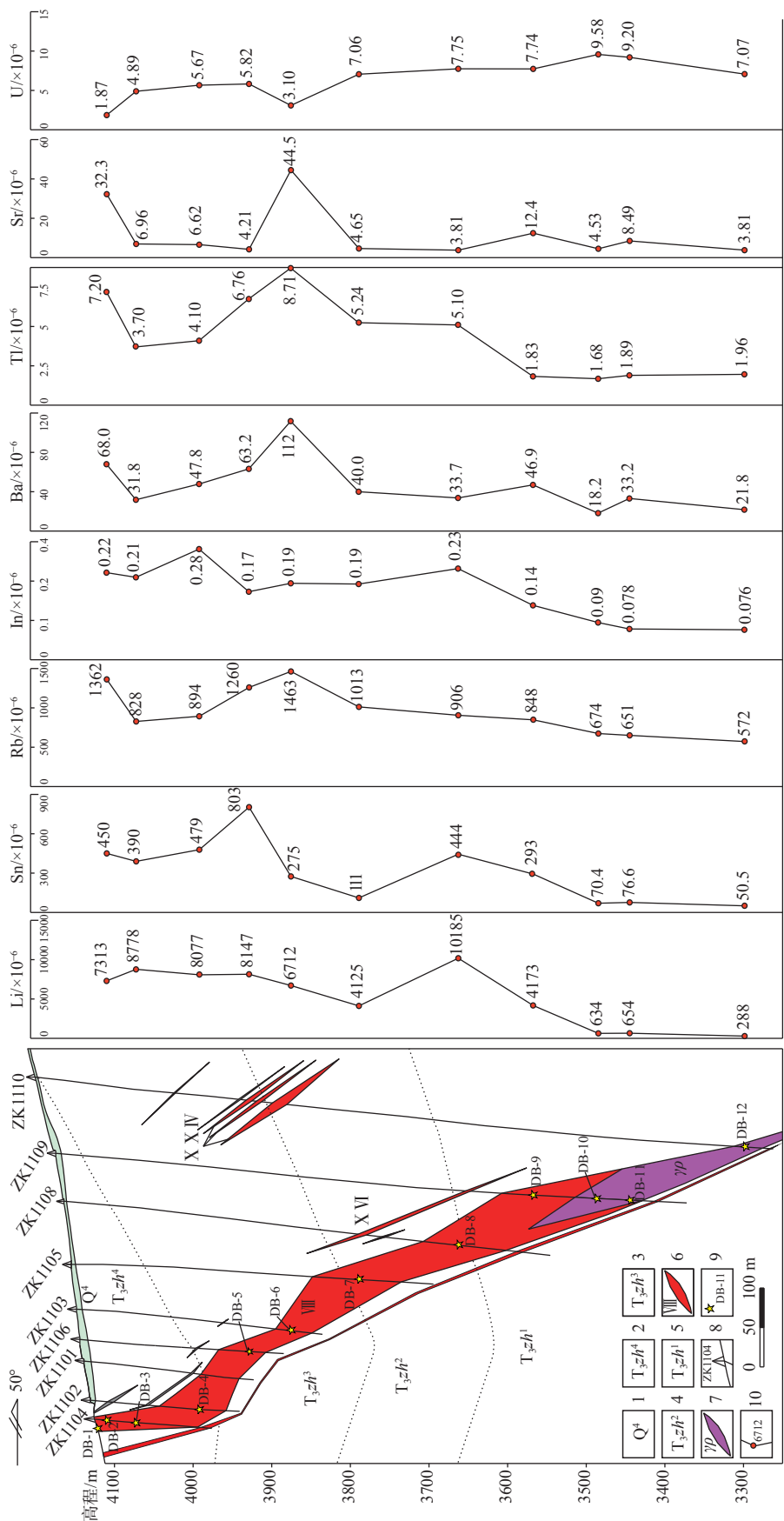
量升高的规律。

3.5 稀土元素

二云母花岗岩稀土总量(ΣREE)为 $76.9 \times 10^{-6} \sim 287 \times 10^{-6}$ (平均 190.27×10^{-6})；伟晶相微斜钠长花岗岩 ΣREE 明显降低，为 $21.0 \times 10^{-6} \sim 63.4 \times 10^{-6}$ (平均 40.52×10^{-6})；伟晶岩 ΣREE 进一步降低，I—V类伟晶岩 ΣREE 平均值分别为 28.79×10^{-6} 、 26.78×10^{-6} 、 17.33×10^{-6} 、 8.79×10^{-6} 、 14.13×10^{-6} (表2, 表4)。表明自二云母花岗岩→伟晶相微斜钠长花岗岩→伟晶岩的 ΣREE 逐渐降低；伟晶岩中，I—V类伟晶岩同样具 ΣREE 逐渐降低的趋势，其中，IV类伟晶岩最低。二云母花岗岩 LREE/HREE 均值为 14.40，伟晶相微斜钠长花岗岩及各带伟晶岩 LREE/HREE 平均为 6.79~9.47，表明轻重稀土分异强烈。在球粒陨石标

准化稀土元素分配图解中，二云母花岗岩稀土元素分配曲线呈右倾，轻、重稀土均较陡 (图 10a)。伟晶相微斜钠长花岗岩及各类伟晶岩的稀土元素分配曲线均呈右倾，轻稀土较陡、重稀土平缓 (图 10b—10g)，属轻稀土富集型。

样品大多具 Ce 正异常，部分具弱负异常，二云母花岗岩 δCe 均值为 1.12、伟晶相微斜钠长花岗岩 δCe 均值为 1.28，I—V类伟晶岩 δCe 均值分别为 1.25、1.43、1.62、1.59、1.13，矿体 Ce 异常变化较大，总体具正异常。样品大多具 Eu 负异常，自二云母花岗岩→伟晶相微斜钠长花岗岩→伟晶岩，Eu 负异常总体逐渐减弱 (图 10h)。IV类含矿伟晶岩 Eu 异常变化较大：其中李家沟矿区矿石样品 δEu 为 1.05~2.35，均为正异常；党坝矿区矿石样品 δEu 为



1—第四系; 2—侏倭组四段; 3—侏倭组三段; 4—侏倭组二段; 5—侏倭组一段; 6—矿体及编号; 7—伟晶岩; 8—钻孔; 9—采样位置及编号; 10—元素含量曲线

图 9 党坝锂矿床 P11 剖面微量元素含量变化曲线图

Fig. 9 Trace element content curve of the P11 section from the Dangba lithium deposit

1—Quaternary; 2—4th part of Triassic Zhuwo Formation; 3—3rd part of Triassic Zhuwo Formation; 4—2nd part of Triassic Zhuwo Formation; 5—1st part of Triassic Zhuwo Formation; 6—Orebody and its serial number; 7—Pegmatite; 8—Drilling; 9—Sampling place and its number; 10—Element content curve

0.68~7.57, 平均 1.64, 变化较大。矿体球粒陨石标准化稀土元素分配曲线分布较分散(图 10f), 稀土元素含量变化大, 这可能是由于含矿伟晶岩中矿物分布不均, 且不同矿物中稀土元素含量差异较大而导致的。

表 4 可尔因花岗岩及伟晶岩稀土元素分析结果

Table 4 Rare-earth element analysis results of the Ke'eryin granite and pegmatite

岩性	送样 编号	$w/\times 10^{-6}$														ΣREE	LREE/HREE	δEu	δCe
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
二云母花岗岩	K-1	52.20	130.44	10.37	42.25	7.66	0.88	5.83	0.70	2.69	0.40	1.10	0.14	0.70	0.10	255.10	20.88	0.39	1.27
	K-2	14.64	36.05	3.42	11.80	2.88	0.31	2.47	0.44	2.33	0.38	0.98	0.17	0.91	0.14	76.93	8.84	0.35	1.19
	K-3	58.50	148.24	12.37	42.39	9.57	0.81	7.33	0.97	3.88	0.55	1.30	0.13	0.64	0.09	286.57	18.25	0.28	1.26
	LJG-1	54.90	102.00	12.50	50.40	8.91	2.10	6.05	0.79	3.18	0.61	1.59	0.22	1.30	0.21	244.76	16.55	0.83	0.90
	LJG-2	16.90	34.50	4.21	17.10	4.38	0.55	3.68	0.71	2.34	0.62	1.49	0.20	1.14	0.17	87.99	7.50	0.41	0.96
伟晶相微斜 钠长花岗岩	K-4	3.92	11.71	0.82	2.26	0.66	0.11	0.52	0.10	0.44	0.07	0.17	0.03	0.16	0.02	20.98	12.89	0.56	1.50
	K-5	8.44	23.15	1.77	5.24	1.31	0.26	1.16	0.26	1.93	0.43	1.46	0.35	2.45	0.38	48.54	4.76	0.63	1.37
	K-6	6.81	18.68	1.60	5.17	2.02	0.25	1.96	0.53	3.07	0.47	1.14	0.20	1.08	0.15	43.15	4.02	0.38	1.32
	K-7	11.66	30.37	2.82	9.12	2.00	0.43	1.78	0.34	2.01	0.38	1.07	0.19	1.04	0.15	63.43	8.11	0.68	1.24
	K-8	7.51	17.61	1.55	5.17	1.58	0.29	1.51	0.31	1.79	0.29	0.74	0.13	0.68	0.10	39.25	6.07	0.57	1.18
	K-9	5.15	12.88	1.05	3.42	1.13	0.21	0.92	0.18	0.93	0.13	0.31	0.05	0.26	0.04	26.68	8.46	0.61	1.27
	K-10	8.24	18.13	1.79	5.96	1.77	0.23	1.52	0.32	1.81	0.29	0.75	0.12	0.64	0.09	41.63	6.51	0.42	1.09
I 类伟晶岩	K-11	2.24	5.35	0.44	1.44	0.52	0.16	0.56	0.18	1.21	0.19	0.44	0.07	0.31	0.04	13.15	3.38	0.90	1.22
	K-12	5.22	10.65	1.08	3.17	1.01	0.25	1.08	0.26	1.75	0.28	0.71	0.12	0.59	0.08	26.30	4.40	0.73	1.03
	K-13	3.89	10.63	0.71	2.35	0.52	0.08	0.44	0.08	0.49	0.09	0.28	0.06	0.42	0.06	20.07	9.45	0.50	1.43
	K-14	5.89	14.58	1.16	4.12	1.00	0.25	0.87	0.16	0.92	0.17	0.48	0.08	0.44	0.06	30.20	8.50	0.80	1.27
	K-15	8.56	20.02	1.84	6.41	1.56	0.31	1.38	0.28	1.62	0.29	0.79	0.14	0.76	0.11	44.05	7.20	0.63	1.16
	K-16	7.84	19.02	1.75	5.77	1.75	0.19	1.45	0.31	1.73	0.27	0.71	0.12	0.70	0.10	41.69	6.73	0.35	1.19
	K-17	4.47	13.65	1.03	3.16	0.78	0.23	0.70	0.15	0.86	0.15	0.41	0.07	0.41	0.06	26.08	8.28	0.93	1.47
II 类伟晶岩	K-18	2.75	8.02	0.52	1.61	0.36	0.09	0.36	0.08	0.43	0.07	0.20	0.04	0.20	0.03	14.76	9.47	0.76	1.51
	K-19	7.60	17.09	1.61	5.45	1.52	0.19	1.24	0.25	1.36	0.23	0.64	0.12	0.65	0.10	38.06	7.29	0.41	1.12
	K-20	2.30	6.94	0.47	1.58	0.38	0.08	0.33	0.07	0.46	0.08	0.26	0.05	0.31	0.04	13.35	7.34	0.68	1.52
	K-21	4.79	12.71	1.06	3.02	1.48	0.04	1.22	0.35	2.09	0.30	0.76	0.18	1.17	0.16	29.32	3.71	0.09	1.30
	K-22	8.89	20.76	1.81	5.56	1.33	0.25	1.23	0.23	1.41	0.25	0.69	0.13	0.73	0.11	43.42	8.08	0.59	1.18
	K-23	2.88	11.44	0.67	2.27	0.72	0.11	0.72	0.19	1.22	0.21	0.55	0.10	0.63	0.09	21.76	4.87	0.46	1.91
III 类伟晶岩	K-24	2.52	10.59	0.51	1.70	0.40	0.12	0.38	0.08	0.45	0.07	0.22	0.04	0.22	0.04	17.35	10.57	0.93	2.13
	K-25	1.62	6.04	0.38	1.24	0.34	0.05	0.29	0.07	0.39	0.06	0.18	0.03	0.20	0.03	10.92	7.74	0.48	1.79
	K-26	6.38	11.24	1.40	4.49	0.94	0.16	0.84	0.17	0.95	0.17	0.50	0.08	0.47	0.07	27.82	7.56	0.54	0.86
	K-27	5.66	15.20	1.06	3.61	0.81	0.19	0.78	0.15	0.91	0.18	0.53	0.09	0.52	0.08	29.77	8.19	0.72	1.40
	K-28	4.31	11.30	0.94	3.42	0.69	0.14	0.61	0.11	0.64	0.12	0.33	0.06	0.33	0.05	23.05	9.24	0.65	1.29
	DB-10	1.68	5.16	0.32	1.07	0.23	0.08	0.22	0.04	0.29	0.06	0.17	0.03	0.23	0.04	9.62	7.91	1.07	1.59
	DB-11	1.71	7.43	0.35	1.14	0.25	0.08	0.25	0.05	0.32	0.06	0.16	0.03	0.20	0.03	12.06	9.96	0.97	2.19
	DB-12	1.24	4.19	0.27	0.82	0.24	0.04	0.23	0.06	0.38	0.06	0.18	0.03	0.24	0.03	8.01	5.62	0.51	1.67

4 地球化学指标

4.1 地球化学指标

通过对研究区范围内各类伟晶岩、典型矿床稀

续表 4

岩性	送样 编号	w/×10 ⁻⁶														ΣREE	LREE/HREE	δEu	δCe
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
IV类伟晶岩	K-29	5.96	16.03	1.25	3.98	0.85	0.19	0.79	0.15	1.29	0.17	0.49	0.09	0.56	0.08	31.85	7.80	0.70	1.34
	K-30	1.75	6.25	0.33	1.08	0.28	0.06	0.25	0.05	0.34	0.06	0.17	0.03	0.21	0.03	10.89	8.55	0.68	1.85
	DB-1	0.92	4.29	0.21	0.73	0.15	0.06	0.15	0.03	0.17	0.03	0.10	0.02	0.11	0.02	6.99	10.10	1.21	2.26
	DB-2	0.72	4.02	0.15	0.52	0.10	0.03	0.10	0.02	0.10	0.02	0.05	<0.01	0.06	<0.01	5.93	14.21	0.91	2.80
	DB-3	1.16	5.52	0.24	0.84	0.16	0.05	0.16	0.03	0.16	0.03	0.10	0.02	0.11	0.02	8.60	12.65	0.95	2.39
	DB-4	1.29	4.10	0.26	0.84	0.17	0.05	0.16	0.03	0.19	0.04	0.11	0.02	0.13	0.02	7.41	9.59	0.91	1.61
	DB-5	0.17	0.47	0.03	0.10	0.02	<0.01	0.02	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	1.10	3.21	7.57	1.50
	DB-6	3.80	7.05	0.81	2.82	0.49	0.11	0.46	0.08	0.48	0.10	0.30	0.05	0.31	0.05	16.91	8.24	0.70	0.92
	DB-7	0.47	1.69	0.08	0.20	0.04	0.01	0.05	0.01	0.07	0.01	0.03	<0.01	0.03	<0.01	2.79	8.30	0.68	1.93
	DB-8	0.96	3.58	0.18	0.54	0.09	0.02	0.09	0.01	0.08	0.01	0.04	<0.01	0.05	<0.01	5.75	14.13	0.67	1.94
	DB-9	0.85	4.22	0.20	0.71	0.15	0.06	0.17	0.03	0.22	0.05	0.15	0.03	0.17	0.03	7.04	7.28	1.15	2.38
	LJG-3	1.94	2.69	0.26	0.89	0.20	0.12	0.18	0.04	0.18	0.04	0.11	0.02	0.12	0.02	6.81	8.59	1.90	0.79
	LJG-4	1.59	2.34	0.41	1.00	0.42	0.12	0.25	0.04	0.18	0.04	0.10	0.01	0.06	0.01	6.57	8.52	1.05	0.68
	LJG-5	2.20	2.83	0.28	1.16	0.22	0.12	0.19	0.03	0.16	0.04	0.10	0.02	0.10	0.02	7.47	10.32	1.75	0.75
	LJG-6	1.60	2.10	0.23	0.95	0.18	0.13	0.15	0.03	0.11	0.03	0.08	0.01	0.07	0.01	5.68	10.59	2.35	0.74
V类伟晶岩	K-31	2.25	3.44	0.38	1.23	0.24	0.06	0.23	0.04	0.23	0.04	0.11	0.02	0.12	0.02	8.41	9.38	0.77	0.82
	K-32	1.74	4.04	0.39	1.35	0.26	0.07	0.25	0.05	0.29	0.06	0.17	0.03	0.19	0.03	8.92	7.34	0.83	1.14
	K-33	4.01	9.40	0.96	3.43	0.66	0.17	0.64	0.13	0.78	0.15	0.46	0.07	0.48	0.07	21.41	6.70	0.79	1.12
	K-34	3.04	8.93	0.65	2.27	0.49	0.15	0.51	0.10	0.65	0.13	0.37	0.06	0.38	0.05	17.78	6.90	0.91	1.46

有金属矿体的全岩岩石地球化学元素含量变化进行统计,发现平面上自二云母花岗岩→伟晶相微斜钠长花岗岩→Ⅰ→Ⅱ→Ⅲ→Ⅳ→Ⅳ类伟晶岩存在元素或特征值的规律变化,呈渐变或突变的特征。垂向上,矿体由浅到深同样存在相关元素或特征值的规律变化,或与Li含量具有明显相关性。通过分类,将这些元素或特征值分为特征元素指标、指示指标和品位指标。特征元素指标指通过含量能直接指示矿体或矿化位置的一组元素;指示指标是指通过其变化规律可以指示找矿方向的一组元素或特征值;品位指标是指其含量与Li品位相关性强、能反映Li品位变化的元素或特征值。

(1)平面指标变化

特征元素指标包括Li、B、Sn、Rb、Be、Nb、Ta等元素(表2)。自Ⅰ类伟晶岩向Ⅴ类伟晶岩方向,Li含量在Ⅰ—Ⅲ类伟晶岩中含量略有升高,至Ⅳ类伟晶岩锂辉石含量升高而Li含量迅速升高15倍以上;B元素则相反,由于电气石明显减少导致Ⅳ类伟晶岩B含量突然降低17倍以上。Sn、Rb、Be、Nb、Ta等元素则表现为平均含量逐渐升高。这

些元素含量对寻找锂矿化区具有直接指示作用,其在伟晶岩中的含量及变化趋势符合上述规律可用于推断锂矿化伟晶岩位置。

指示指标包括Cs、Tl、F、Zr、Y、ΣREE等元素及TiO₂/Ta、Zr/Hf、Ta/Zr、Nb/Ta、K/Na等值(表2)。自Ⅰ类伟晶岩向Ⅴ类伟晶岩方向,Cs、Tl、F表现为含量逐渐升高,矿体平均含量分别为58.7×10⁻⁶、4.75×10⁻⁶、947×10⁻⁶;Zr、Y、ΣREE等元素表现为含量逐渐降低,矿体平均含量分别为13.7×10⁻⁶、1.94×10⁻⁶、10.7×10⁻⁶;Ta/Zr值逐渐升高,Ta/Zr值0.97~17.1(平均5.33);TiO₂/Ta值、Nb/Ta值、Zr/Hf值、K/Na值则表现为逐渐降低。其中,矿体的TiO₂/Ta值为0.73~15.5(平均4.61)、Nb/Ta值0.30~4.86(平均1.46)、Zr/Hf值2.53~18.0(平均9.23)、K/Na值0.20~2.43(平均0.70),这表明矿体总体具有Nb>Ta、Na>K的特点。这些元素和指标值可作为可尔因地区锂矿体的地球化学找矿指标。

(2)垂向指标变化

矿体的垂向指标主要包括品位指标和指示指标,品位指标与Li含量相关性强,主要包括A/NK、

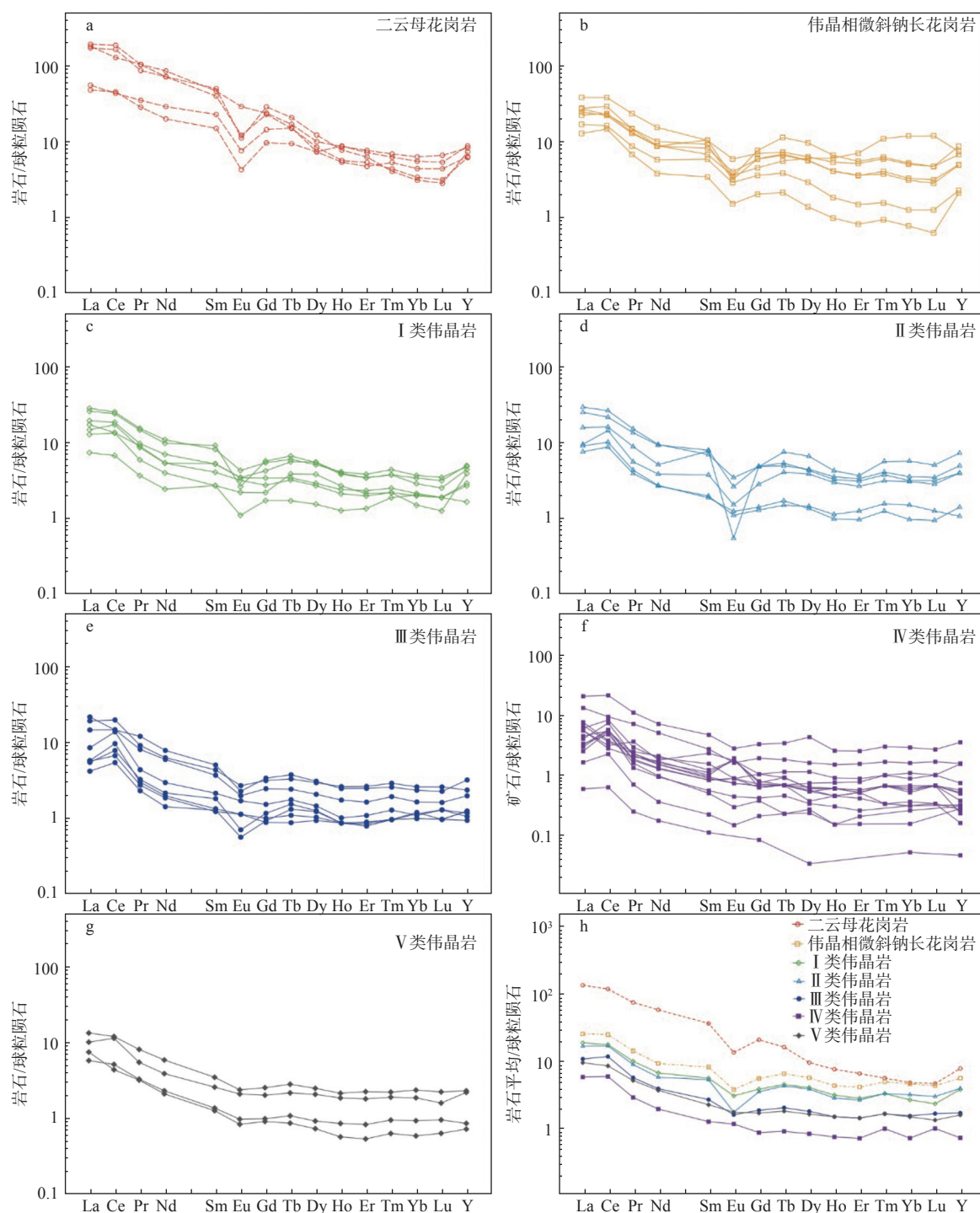


图 10 样品的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(球粒陨石标准值据 Boynton, 1984)

Fig. 10 Chondrite-normalized REE distribution patterns of the samples (chondrite normalization data according to Boynton, 1984)

A/CNK、 σ 、K+Na、K/Na 等(表 5)。矿体的铝碱比 A/NK 与铝饱和度 A/CNK 明显高于 I—III 类及 V 类等其他 4 类伟晶岩, 矿体的里特曼指数 σ 明显低于 I—III 类及 V 类等其他 4 类伟晶岩(表 2)。据表 6 可知, 矿体 Li_2O 含量与 A/NK、A/CNK 值呈正相关性, 与 σ 、K+Na、K/Na 值呈负相关性。表明矿

体品位与铝饱和度呈正相关、与碱性程度呈负相关。当矿体向深部延伸时锂含量与铝饱和度及碱度呈规律变化时, 可以对深部矿体延伸情况和找矿潜力做出判断。

指示指标包括 B、U、Zr、Be、Sn、Rb、Sr、Ba、Tl、In 等元素(表 2)。其中, B 元素向深部由 30×10^{-6} 以

表 5 可尔因地区伟晶岩型锂矿地球化学找矿指标
Table 5 Geochemical prospecting indexes of the pegmatite type lithium deposits in the Ke'eryin area

平面变化					垂向变化				
指标		含量/值 (矿体)	平均值 (矿体)	变化趋势 (I ~ V)	指标		含量/值	平均值	变化趋势 (由浅到深)
特征元素指标	Li	1866~13855	7202	突然升高	品位指标 (矿体)	A/NK	1.42~4.82	2.72	正相关
	B	5.36~162.49	21.06	突然降低		A/CNK	1.40~4.53	2.59	
	Sn	111~967	451	逐渐升高		σ	0.43~6.11	1.42	
	Rb	294~2643	1026			K+Na	3.75~12.32	6.31	负相关
	Be	54.2~279.0	153			K/Na	0.20~2.43	0.7	
	Nb	18.0~152.0	71.5						
	Ta	16.6~290.0	68.9						
指示指标	Cs	13.2~293.0	58.7	指示指标 (矿体及伟晶岩)	B	2.06~1000.00	51.57	突然升高	
	Tl	1.76~10.61	4.75		逐渐升高	U	1.27~27.61	7.55	逐渐升高
	F	151~2809	947		Zr	10.4~208.3	26.7		
	Zr	4.02~32.99	13.73		Be	1.47~655.00	165.11	逐渐降低	
	Y	0.09~6.89	1.94		逐渐降低	Sn	50.5~922.3		313.5
	Σ REE	0.82~31.87	10.69		Rb	345~2094	968		
	Ta/Zr	0.97~17.08	5.33		逐渐升高	Sr	3.53~133.65		32.28
	Nb/Ta	0.30~4.86	1.46		Ba	13.6~551.3	69.5		
	Zr/Hf	2.53~18.00	9.23		逐渐降低	Tl	1.34~10.61		4.33
	K/Na	0.20~2.43	0.7			In	0.68~0.05	0.18	
	TiO ₂ /Ta	0.73~15.52	4.61						

注: 元素含量单位均为10⁻⁶, K+Na=w(Na₂O)+w(K₂O)(%), K/Na=w(Na₂O)/w(K₂O), σ =(K₂O+Na₂O)²/(SiO₂-43)

表 6 Li₂O 含量与品位指标的相关系数
Table 6 Correlation coefficient between Li₂O content and grade indexes

指标	Li ₂ O	A/NK	A/CNK	σ	K+Na	K/Na
Li ₂ O	1					
A/NK	0.81	1				
A/CNK	0.82	0.99	1			
σ	-0.67	-0.70	-0.71	1		
K+Na	-0.79	-0.87	-0.87	0.95	1	
K/Na	-0.50	-0.62	-0.61	0.86	0.82	1

下迅速升高至数百 10⁻⁶, 代表伟晶岩由Ⅳ类向Ⅲ类过渡, 指示 Li 矿化将逐渐减弱、尖灭。U、Zr、Be 等元素由浅到深呈现逐渐升高的趋势, 部分矿区主矿体可见明显的上锂下铍的分带特征, 甚至形成独立 Be 矿体。Sn、Rb、Sr、Ba、Tl、In 等元素由浅到深呈现逐渐降低的趋势, 这些元素在矿体中上部变化规律不明显, 在矿体中下部随深度增加含量逐渐减少, 可用于判断矿体深部延伸情况。

4.2 地球化学找矿模型

以可尔因地区区域及矿区成矿地质条件为基

础, 结合二云母花岗岩成矿母岩的结晶分异、相带分布与挥发份、矿物质迁移富集、伟晶岩分带、含矿伟晶岩密集区与岩体空间距离分布关系及各类伟晶岩和典型矿床主矿体的岩石地球化学特征, 节理构造尤其是交汇部位的控矿与赋矿特征等, 建立可尔因地区伟晶岩型锂矿地球化学找矿模型(图 11)。

4.3 适用条件和注意事项

此次总结的地球化学指标主要适用于快速定位大范围伟晶岩田中的锂稀有金属找矿有利区或靶区, 可采用平面特征指标和指示指标辅助定位具有伴生无矿伟晶岩的隐伏锂稀有金属矿体, 对已有露头的锂稀有金属矿体, 在勘查过程中可采用垂向指标辅助判断矿体剥蚀程度和深部延伸情况, 判断矿体富集部位。

需要注意的是, 伟晶岩系统的空间分布及地球化学特征是一个复杂的系统, 伟晶岩中矿物颗粒较大、且分布不均匀, 部分脉体内还存在矿物分带现象, 矿物组合及化学成分在局部往往变化极大。因此, 采用地球化学指标定位伟晶岩型锂矿必须采集

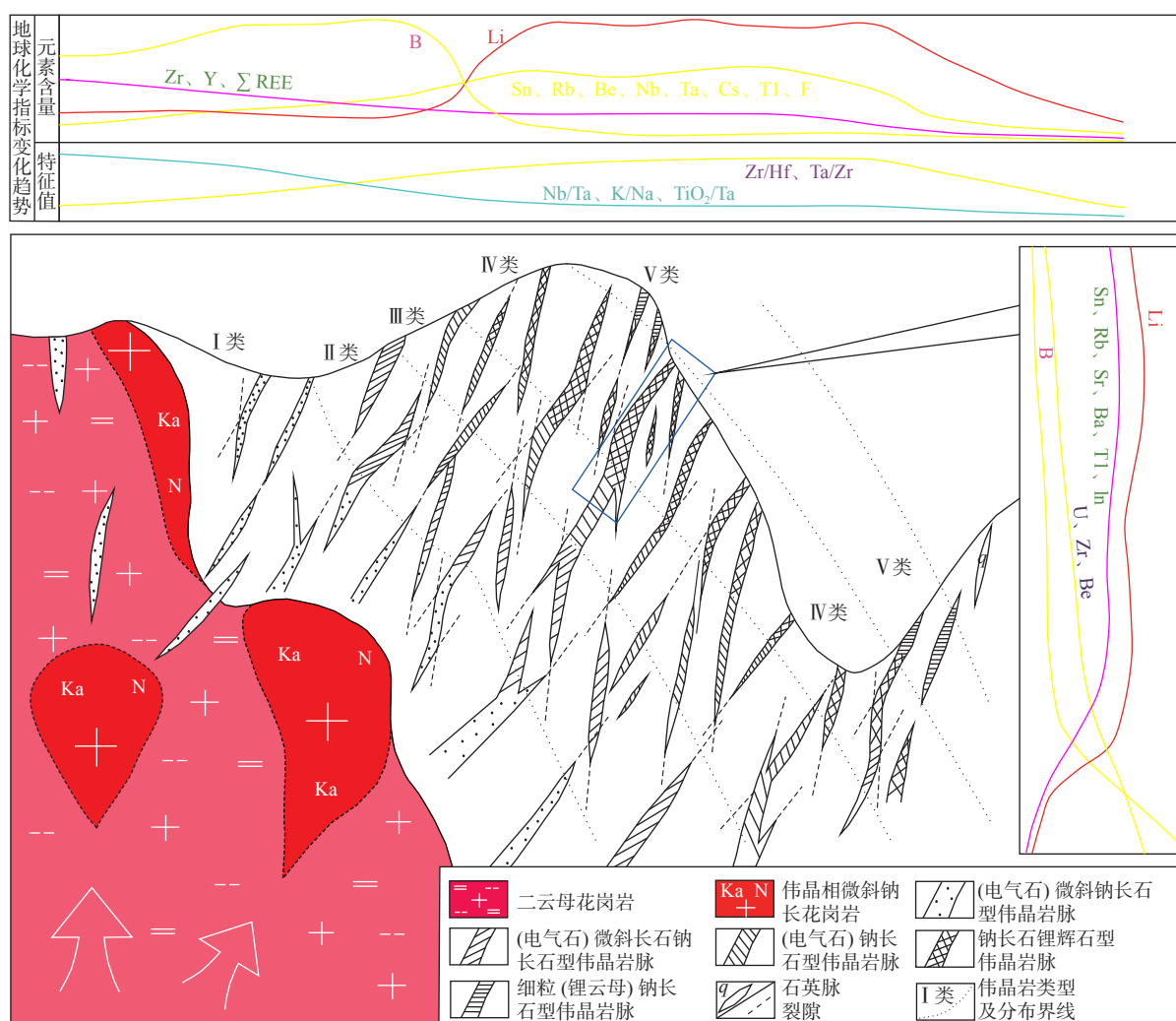


图 11 可尔因地区伟晶岩型锂矿地球化学找矿模型图

Fig. 11 Geochemical prospecting model of pegmatite-type lithium deposits in the Ke'eryin area

一定数量的具有代表性的样品,且采集全岩样品时要尽量多点采样分析取平均值,尽量避免单块标本样进行化学分析。同时,与热液蚀变较强的矿床(如细脉浸染型金矿、石英脉型金钨多金属矿等)相比,伟晶岩与围岩物质交换不活跃,采用地球化学指标定位找矿有利区或矿体需要直接采集伟晶岩样品,近矿围岩虽有部分具矿化蚀变现象,但规模小、原生晕无规律,难以实际应用,因此,在覆盖区使用需要借助轻型山地工程采样。

地球化学指标仅是定位找矿有利区或矿体的依据之一,同时还需要配合系统的构造研究、伟晶岩矿物学研究等。另外,还要考虑与母岩的空间位置关系,如与母岩二云母花岗岩的平面距离、相对高程等。因此,利用地球化学指标定位找矿有利区或矿体时需要综合多种地质信息后综合判断。

5 应用情况

位于可尔因岩体南侧的热达门锂矿区在勘查过程中发现地表出露的主矿体西段出现了同一条伟晶岩脉由多种类型伟晶岩组成的现象,并出现了Be、U升高,而Sn、Rb、Tl明显降低的趋势,据地球化学指标认为其含锂带(IV类伟晶岩)大部份已被剥蚀。矿体向东地表矿体厚度变小甚至尖灭,且冰碛物覆盖,矿体未出露,前期工作一度认为矿区东部不具找矿潜力,但东部伟晶岩转石出现了低Li、B、U,高Sn(285×10^{-6})、Rb(1133×10^{-6})、Nb(70×10^{-6})、Ta(187×10^{-6})、Tl(4.14×10^{-6})、F(444×10^{-6})的V类伟晶岩特征,地球化学指标判断矿区东部具有进一步寻找隐伏矿体的潜力。通过钻孔验证,证实矿区东部矿体向深部表现为变厚的趋势,锂矿化延深最大超

过了 500 m(图 12a),使热达门矿床锂资源量达到了大型规模。

可尔因岩体南东侧的龙古锂矿区紧邻李家沟锂矿床东部,前期找矿工作主要针对靠近李家沟的区域开展,未获得较大找矿突破。但在远离李家沟矿床和二云母花岗岩体(8 km)的阿拉伯村一带(图 3)发现了具有低 Li(16.2×10^{-6})、B(8.5×10^{-6})、U(1.52×10^{-6})、高 Sn(336×10^{-6})、Rb(1120×10^{-6})、Nb(66.4×10^{-6})、Ta(189×10^{-6})、Tl(4.0×10^{-6})、F(938×10^{-6})的伟晶岩脉,虽不具锂矿化,但其地球化学特征符合 V 类伟晶岩特征。同时,发现该区域发育北西—南东向节理系统,节理中可见伟晶岩脉填充。综合判断该区虽远离 IV 类伟晶岩脉赋存的有利区域,但由于海拔低,地球化学指标符合寻找隐伏矿体的条件。通过施工钻孔,发现了新的锂矿体(图 12b),新增 Li 资源量超过 5×10^4 t,截至 2021 年底矿床已接近大型规模。

6 结论

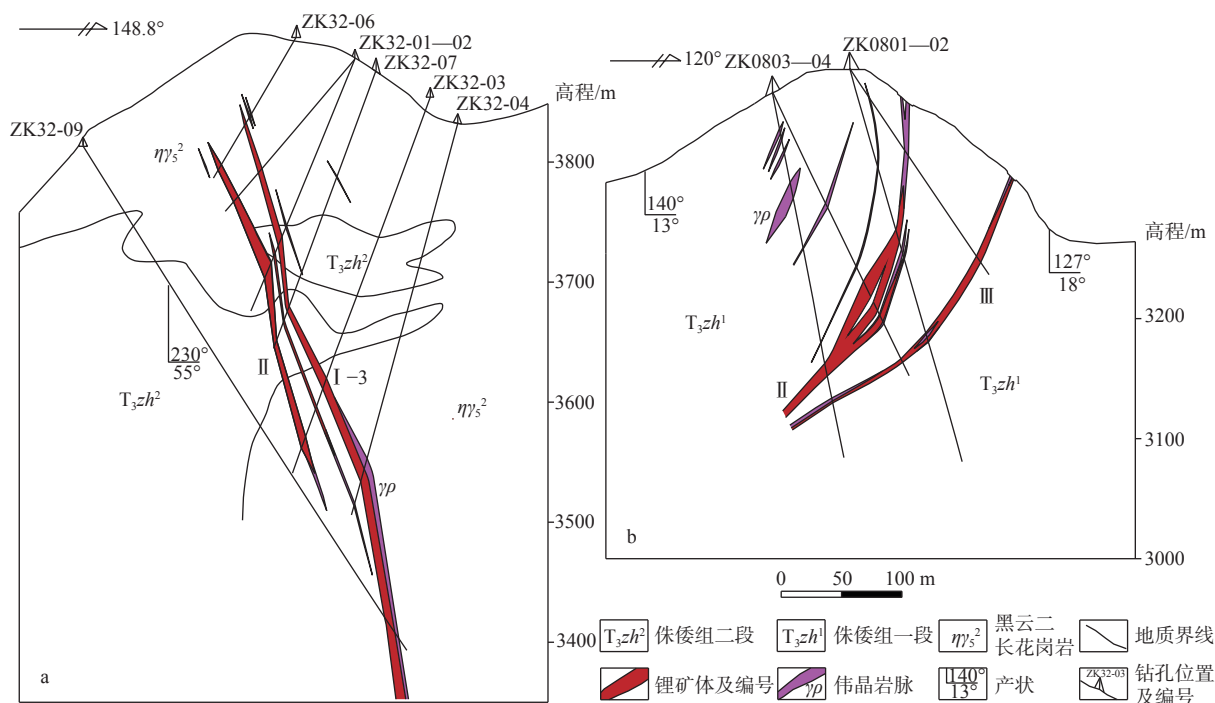
(1)可尔因地区伟晶岩铝饱和指数 A/CNK 平均为 1.98,为铝饱和系列,自二云母花岗岩→伟晶相微斜钠长花岗岩→I—IV 类伟晶岩,铝饱和指数 A/CNK

平均值逐渐升高,岩体总体 $K > Na$,伟晶岩特别是矿体总体 $Na > K$ 。

(2)成矿母岩二云母花岗岩与伟晶岩均富集熔体不相容元素,其中, Rb、K、Ta、Hf 等元素明显富集。二云母花岗岩具 Sm、Nd 正异常, P、Nb 负异常,伟晶岩则相反;二云母花岗岩稀土总量平均 190.27×10^{-6} ,远高于伟晶岩 $\Sigma REE(8.79 \times 10^{-6} \sim 28.79 \times 10^{-6})$ 。这可能与岩浆演化过程中,二云母花岗岩与伟晶岩之间发生液态不混溶有关。

(3)可尔因地区伟晶岩空间分布位置及形态受地层褶皱的节理裂隙(北西—南东走向)和岩浆穹隆裂隙(同心圆状和放射状)两个节理裂隙系统叠加控制,单条伟晶岩脉主要受控于其中一组特别发育的节理裂隙。当两个系统的节理裂隙大角度相交(如可尔因岩体南东和北东侧)时,易形成具有厚大矿体的超大型锂矿床;当两个系统的节理裂隙产状相近(如可尔因岩体南北两侧)时,是寻找矿脉细长但延伸稳定的中—大型锂矿床的有利部位。

(4)特征元素指标、指示指标、品位指标这三类地球化学指标可用于辅助定位伟晶岩型锂稀有金属找矿有利区或矿体。平面上,特征元素指标包括



a—热达门锂矿床 P32 剖面图; b—龙古锂矿床 P8 剖面图

图 12 热达门锂矿床 P32 剖面图与龙古锂矿床 P8 剖面图

Fig. 12 P32 profile of the Redamen lithium deposit and P8 profile of the Longgu lithium deposit

(a) P32 profile of the Redamen lithium deposit; (b) P8 profile of the Longgu lithium deposit

Li、B、Sn、Rb、Be、Nb、Ta 等元素, Li、B 在矿化边界突变, Sn、Rb、Be、Nb、Ta 等元素自二云母花岗岩→伟晶相微斜钠长花岗岩→I—IV 类伟晶岩平均含量逐渐升高, 对寻找锂矿化区具有直接指示作用。指示指标包括 Cs、Tl、F、Zr、Y、 Σ REE 等元素及 Zr/Hf、Ta/Zr、Nb/Ta、K/Na、TiO₂/Ta 等特征值, 自二云母花岗岩→伟晶相微斜钠长花岗岩→I—IV 类伟晶岩 Cs、Tl、F 含量及 Ta/Zr 值表现为逐渐升高, Zr、Y、 Σ REE 含量及 Nb/Ta 值、Zr/Hf 值、K/Na 值逐渐降低; 垂向上, 指示指标包括 B、U、Zr、Be、Sn、Rb、Sr、Ba、Tl、In 等元素。其中, B 元素深部含量突然升高指示矿体尖灭, U、Zr、Be 等元素含量由浅到深呈现逐渐升高, Sn、Rb、Sr、Ba、Tl、In 等元素含量逐渐降低。品位指标主要包括 A/NK、A/CNK、 σ 、K+Na、K/Na 等。Li 品位与铝饱和度及碱度密切相关, 与 A/NK 值、A/CNK 值呈正相关性, 与 σ 、K+Na、K/Na 值呈负相关性。

致谢: 感谢主编邢树文研究员和特邀主编胡健民研究员的组织和约稿。感谢两位匿名审稿人对本文提出的建设性意见。感谢《地质力学学报》编辑部老师对稿件的校对修订。

References

- BEUS A A, GRIGORIAN S V, 1977. Geochemical exploration methods for mineral deposits[M]. TETERUK-SCHNEIDER R, trans. Applied Publishing: 1-287.
- BOYNTON W V, 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies[M]/In: Henderson, P., Ed., Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 63-114.
- ČERNÝ P, ERCIT T S, 2005. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. The Canadian Mineralogist, 43(6): 2005-2026.
- CLARKE D B, 1992. Granitoid rocks[M]. London: Chapman and Hall: 1-283.
- DESCHAMPS F, DUCHÊNE S, SIGOYER J, et al., 2017. Coeval mantle-derived and crust-derived magmas forming two neighbouring plutons in the Songpan Garze accretionary orogenic wedge (SW China)[J]. *Journal of Petrology*, 58(11): 2221-2256.
- FAN B C, ZHANG J, MENG G L, et al., 2022. An assessment of lithium resource potentiality in Pamir syntax: based on 1: 1 million scale of geochemical survey[J]. *Northwestern Geology*, 55(1): 156-166. (in Chinese with English abstract)
- FEI G C, YUAN T J, TANG W C, et al., 2014. Classification of ore bearing pegmatites in Keeryin pegmatite type rare metal deposit in Western Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 33(S1): 187-188. (in Chinese)
- FEI G C, LI B H, YANG J Y, et al., 2018. Geology, fluid inclusion characteristics and H-O-C isotopes of large Lijiagou Pegmatite spodumene deposit in Songpan-garze fold belt, eastern Tibet: implications for ore genesis[J]. *Resource Geology*, 68(1): 37-50.
- FEI G C, MENUGE J F, LI Y Q, et al., 2020. 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.
- GU C H, 2014. Metallogenic regularity of spodumene deposits in the closely spaced pegmatite area in the southeastern Keeryin pegmatite field, Sichuan province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(1): 59-65. (in Chinese with English abstract)
- LI H, 1993. An ideal pattern of primary superimposed halo of hydrothermal gold deposits[J]. *Geology and Exploration*, 29(4): 46-51. (in Chinese with English abstract)
- LI H, ZHANG W H, LIU B L, et al., 1999a. Ideal model and principle of staching structure of axial geochemical parameter of gold deposit[J]. *Geology and Exploration*, 35(6): 40-43. (in Chinese with English abstract)
- LI H, ZHANG W H, CHANG F C, 1999b. Ideal models of overprint of primary halo for large, mega-size blind au ore deposits[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 14(3): 25-33. (in Chinese with English abstract)
- LI H, ZHANG G Y, WANG Z N, et al., 2003. The effect of applying structural superimposed halos to the prognosis of deep blind orebodies in the gold ore district[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 27(6): 438-440. (in Chinese with English abstract)
- LI H, ZHANG G Y, GAO Y L, et al., 2008. The structural superimposed halo model for prognosis of No. 2 enrichment zone at the depth of the Xiao Qinling gold ore concentration area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 32(5): 525-528. (in Chinese with English abstract)
- LI H, YU B, LI D L, et al., 2010. Research results of a new method of structural superposition halo for deep blind ore prospecting in crisis mines[J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 709-710. (in Chinese)
- LI H, YU B, LI D L, et al., 2013. Prediction of blind ore bodies using structural superimposed halo and research methods[J]. *Geology and Exploration*, 49(1): 154-161. (in Chinese with English abstract)
- LI J K, 2006. Mineralizing mechanism and continental geodynamics of typical pegmatite deposits in western Sichuan, China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 49-71. (in Chinese with English abstract)
- LI J K, WANG D H, FU X F, 2006. ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of the Keeryin pegmatite type rare metal deposit, western Sichuan, and its tectonic significances[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 843-848. (in Chinese with English abstract)
- LI P, LIU X, LI J K, et al., 2019. Petrographic and geochemical characteristics of Renli-Chuanziyuan No. 5 pegmatite, NE Hunan, and its metallogenic age[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1374-1391. (in Chinese with English abstract)
- LI X F, TIAN S H, WANG D H, et al., 2020. Genetic relationship between pegmatite and granite in Jiajika lithium deposit in western Sichuan: evidence from zircon U-Pb dating, Hf-O isotope and geochemistry[J]. *Mineral Deposits*, 39(2): 273-304. (in Chinese with English abstract)
- LIAO Z H, ZHOU Z G, ZHANG H P, 2019. Geochemical characteristics and evidence of liquid immiscibility in Keeryin rare metal deposit[J]. *Acta*

- Geologica Sichuan, 39(S1): 60-69. (in Chinese with English abstract)
- LIU C, WANG R C, WU F Y, et al., 2020. Spodumene pegmatites from the Pusila pluton in the higher Himalaya, South Tibet: Lithium mineralization in a highly fractionated leucogranite batholith[J]. *Lithos*, 358-359: 105421.
- LIU C M, 2006. Progress in studies on primary halos of ore deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(10): 1528-1538. (in Chinese with English abstract)
- LIU C M, MA S M, 2007. The main achievements of the study on primary halo in the past 50 years in China[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 29(S1): 215-221. (in Chinese with English abstract)
- LIU T, TIAN S H, WANG D H, et al., 2020. Genetic relationship between granite and pegmatite in Kalu'an hard-rock-type lithium deposit in Xinjiang: results from zircon U-Pb dating, Hf-O isotopes and whole-rock geochemistry[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3293-3320. (in Chinese with English abstract)
- LIU X, ZHAN Q Y, ZHU D C, et al., 2021. Provenance and tectonic uplift of the Upper Triassic strata in the southern Songpan-Ganzi fold belt, SW China: evidence from detrital zircon geochronology and Hf isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3513-3526. (in Chinese with English abstract)
- LUO W, LI Y G, LUO K J, et al., 2018. Anomaly evaluation and prospecting prediction of 1:50000 stream Sediment survey in Keeryin area, Sichuan Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 18(9): 56-62. (in Chinese with English abstract)
- MA S C, WANG D H, LIU S B, et al., 2019. Mineral chemistry of micas from Ke'eryin pegmatite type lithium orefield in western Sichuan and its indication for rare metal mineralization and prospecting[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 877-897. (in Chinese with English abstract)
- MCDONOUGH W F, SUN S S, RINGWOOD A E, et al., 1992. K, Rb and Cs in the Earth and Moon and the evolution of the Earth's mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(3): 1001-1012.
- PULLEN A, KAPP P, GEHRELS G E, et al., 2008. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleotethys Ocean[J]. *Geology*, 36(5): 351-354.
- QIN C S, PENG X H, XU B, et al., 2011. Research progress of prospecting by primary halos[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(S1): 828-829. (in Chinese with English abstract)
- REN L L, WANG R T, ZHANG C Y, et al., 2019. Application of structural superimposed halo prospecting method to deep blind ore prediction in Yang Meitian copper mine[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 34(2): 315-320. (in Chinese with English abstract)
- ROGER F, MALAVIEILLE J, LELOUP P H, et al., 2004. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan-Garze Fold Belt (eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(5): 465-481.
- ROGER F, JOLIVET M, MALAVIEILLE J, 2010. The tectonic evolution of the Songpan-Garze (North Tibet) and adjacent areas from proterozoic to present: a synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 254-269.
- SANG L K, MA C Q, 2012. *Petrology*[M]. 2nd ed. Beijing: Geology Press: 187-192. (in Chinese with English abstract)
- SHAND S J, 1947. *Eruptive rocks*[M]. 3rd ed. New York: John Wiley: 1-488.
- SHAO Y, 1997. Rock survey of hydrothermal deposits (primary halo method) prospecting [M]. Beijing: Geology Press: 1-143. (in Chinese)
- SUN W L, MA Y Q, SONG Q W, 2021. Characteristics and research progress of granitic pegmatite type lithium deposits in China[J]. *Geology and Exploration*, 57(3): 478-496. (in Chinese with English abstract)
- WANG B, SONG Y W, SUN B, et al., 2021. Structural superimposing halo practical modeling and deep prospecting prediction of Zhaishang gold deposit in the Gansu province[J]. *Geoscience*, 35(6): 1504-1514. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z P, LIU S B, MA S C, et al., 2018. Metallogenic regularity, deep and periphery prospecting of Dangba superlarge spodumene deposit in Aba, Sichuan province[J]. *Earth Science*, 43(6): 2029-2041. (in Chinese with English abstract)
- XU Z Q, HOU L W, WANG Z X, 1992. *Orogenic processes of the Songpan-Ganze orogenic belt of China* [M]. Beijing: Geology Press: 1-288. (in Chinese)
- XU Z Q, WANG R C, ZHAO Z B, et al., 2018. On the structural backgrounds of the large-scale "hard-rock type" lithium ore belts in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 1091-1106. (in Chinese with English abstract)
- XU Z Q, FU X F, ZHAO Z B, et al., 2019. Discussion on relationships of gneiss dome and metallogenic regularity of pegmatite-type lithium deposits[J]. *Earth Science*, 44(5): 1452-1463.
- XU Z Q, FU X F, WANG R C, et al., 2020. Generation of lithium-bearing pegmatite deposits within the Songpan-Ganze orogenic belt, east Tibet[J]. *Lithos*, 354-355: 105281.
- YUE X Y, YANG B, ZHOU X, et al., 2019. Geochemical characteristics and U-Pb age of Redamen granites in western Sichuan, China: petrogenesis and tectonic significance[J]. *Geoscience*, 33(5): 1015-1024. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG D H, 2020. *Geochemistry of hydrothermal ore-forming processes*[M]. Beijing: Geology Press: 578-594. (in Chinese)
- ZHAO Z B, DU J X, LIANG F H, et al., 2019. Structure and metamorphism of Markam gneiss dome from the eastern Tibetan Plateau and its implications for crustal thickening, metamorphism, and exhumation[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(1): 24-45.
- ZHENG Y L, XU Z Q, GAO W Q, et al., 2021. Tectonic genesis of the Markam gneiss dome and pegmatitic lithium deposits in western Sichuan province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3069-3084. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU X M, 2007. *Genesis of late mesozoic granites in Nanling area and lithosphere dynamic evolution*[M]. Beijing: Science Press: 1-691. (in Chinese)

附中文参考文献

- 范堡程, 张晶, 孟广路, 等, 2022. 帕米尔构造结锂矿资源潜力评价: 基于 1:100 万地球化学调查[J]. *西北地质*, 55(1): 156-166.
- 费光春, 袁天晶, 唐文春, 等, 2014. 川西可尔因伟晶岩型稀有金属矿床含矿伟晶岩分类浅析[J]. *矿床地质*, 33(S1): 187-188.
- 古城会, 2014. 四川省可尔因伟晶岩田东南密集区锂辉石矿床成矿规律[J]. *地质找矿论丛*, 29(1): 59-65.
- 李惠, 1993. 热液金矿床原生叠加晕的理想模式[J]. *地质与勘探*,

- 29(4): 46-51.
- 李惠, 张文华, 刘宝林, 等, 1999a. 金矿床轴向地球化学参数叠加结构的理想模式及其应用准则[J]. 地质与勘探, 35(6): 40-43.
- 李惠, 张文华, 常凤池, 1999b. 大型、特大型金矿盲矿预测的原生叠加晕理想模型[J]. 地质找矿论丛, 14(3): 25-33.
- 李惠, 张国义, 王支农, 等, 2003. 构造叠加晕法在预测金矿区深部盲矿中的应用效果[J]. 物探与化探, 27(6): 438-440.
- 李惠, 张国义, 高延龙, 等, 2008. 小秦岭金矿集中区深部第二富集带预测的构造叠加晕模型[J]. 物探与化探, 32(5): 525-528.
- 李惠, 禹斌, 李德亮, 等, 2010. 危机矿山深部找盲矿的构造叠加晕新方法研究成果[J]. 矿床地质, 29(S1): 709-710.
- 李惠, 禹斌, 李德亮, 等, 2013. 构造叠加晕找盲矿法及研究方法[J]. 地质与勘探, 49(1): 154-161.
- 李建康, 2006. 川西典型伟晶岩型矿床的形成机理及其大陆动力学背景[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 49-71.
- 李建康, 王登红, 付小方, 2006. 川西可尔因伟晶岩型稀有金属矿床的⁴⁰Ar-³⁹Ar年代及其构造意义[J]. 地质学报, 80(6): 843-848.
- 李鹏, 刘翔, 李建康, 等, 2019. 湘东北仁里-传梓源矿床5号伟晶岩岩相学、地球化学特征及成矿时代[J]. 地质学报, 93(6): 1374-1391.
- 李贤芳, 田世洪, 王登红, 等, 2020. 川西甲基卡锂矿床花岗岩与伟晶岩成因关系: U-Pb定年、Hf-O同位素和地球化学证据[J]. 矿床地质, 39(2): 273-304.
- 廖芝华, 周中国, 张洪平, 2019. 可尔因稀有金属矿床液态不混溶作用地球化学特征证据[J]. 四川地质学报, 39(S1): 60-69.
- 刘崇民, 2006. 金属矿床原生晕研究进展[J]. 地质学报, 80(10): 1528-1538.
- 刘崇民, 马生明, 2007. 我国原生晕研究50年的主要成果[J]. 物探化探计算技术, 29(S1): 215-221.
- 刘涛, 田世洪, 王登红, 等, 2020. 新疆卡鲁安硬岩型锂矿床花岗岩与伟晶岩成因关系: 锆石U-Pb定年、Hf-O同位素和全岩地球化学证据[J]. 地质学报, 94(11): 3293-3320.
- 刘祥, 詹琼窰, 朱弟成, 等, 2021. 松潘-甘孜褶皱带南部上三叠统物源及构造抬升: 碎屑锆石年代学和Hf同位素证据[J]. 岩石学报, 37(11): 3513-3526.
- 罗伟, 李佑国, 罗开杰, 等, 2018. 川西可尔因地区1:5万水系沉积物测量异常评价及找矿预测[J]. 科学技术与工程, 18(9): 56-62.
- 马圣钊, 王登红, 刘善宝, 等, 2019. 川西可尔因锂矿田云母矿物化学及稀有金属成矿和找矿指示[J]. 矿床地质, 38(4): 877-897.
- 卿成实, 彭秀红, 徐波, 等, 2011. 原生晕找矿法的研究进展[J]. 矿物学报, 31(S1): 828-829.
- 任良良, 王润涛, 张承玉, 等, 2019. 构造叠加晕找矿法在云南省杨梅田铜矿床深部盲矿预测中的应用[J]. 地质找矿论丛, 34(2): 315-320.
- 桑隆康, 马昌前, 2012. 岩石学[M]. 2版. 北京: 地质出版社: 187-192.
- 邵跃, 1997. 热液矿床岩石测量(原生晕法)找矿[M]. 北京: 地质出版社: 1-143.
- 孙文礼, 马叶情, 宋庆伟, 2021. 中国花岗伟晶岩型锂矿特征和研究进展[J]. 地质与勘探, 57(03): 478-496.
- 王斌, 宋伊圩, 孙彪, 等, 2021. 甘肃寨上金矿南矿带构造叠加晕实用模型及深部找矿预测[J]. 现代地质, 35(6): 1504-1514.
- 王子平, 刘善宝, 马圣钊, 等, 2018. 四川阿坝州党坝超大型锂辉石矿床成矿规律及深部和外围找矿方向[J]. 地球科学, 43(6): 2029-2041.
- 许志琴, 侯立炜, 王宗秀, 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社: 1-288.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 等, 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景[J]. 地质学报, 92(6): 1091-1106.
- 岳相元, 杨波, 周雄, 等, 2019. 川西地区热达门石英闪长岩锆石U-Pb年龄和岩石地球化学特征: 岩石成因与构造意义[J]. 现代地质, 33(5): 1015-1024.
- 张德会, 2020. 热液成矿作用地球化学[M]. 北京: 地质出版社: 578-594.
- 郑艺龙, 许志琴, 高文琦, 等, 2021. 川西马尔康片麻岩穹隆与伟晶岩型锂矿的构造成因[J]. 地质学报, 95(10): 3069-3084.
- 周新民, 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京: 科学出版社: 1-691.

获奖者简历:

唐文春, 四川省地质调查研究院正高级工程师, 专业技术二级。2021年获得第十七次李四光地质科学奖野外奖。现任四川省地质矿产勘查开发局化探队总工程师。长期从事野外地质工作, 主持和主要参与完成了区域化探、区域地质、矿产地质、生态地质等多项公益性和商业性重大地质勘查任务; 主持和主要参与完成超过16万平方千米1:20万、1:5万区域化探和区域地质调查等国家基础地质工作; 主持和主要参与探明二十多处锂矿、金矿等超大型及大中型矿床。发表论文26篇; 获省部级科技成果一等奖4项(2项R1、1项R5、1项团体奖); 获中国地质调查成果奖二等奖1项(R1)。享受国务院政府特殊津贴, 入选“第十二批四川省学术和技术带头人”, 获“全国先进工作者”和“四川省五一劳动奖章”荣誉称号。

