

国内外花岗伟晶岩型锂矿找矿预测研究进展*

娄德波¹, 王登红^{1**}, 李婉悦^{1,2}, 范莹琳^{1,2}, 刘欢¹, 杜晓川²

(1 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2 中国地质大学, 北京 100083)

摘要 21世纪,随着对锂资源需求的不断增长,找锂矿成为提高锂矿资源保障能力的关键一环。作为锂矿家族中的重要一员,伟晶岩型锂矿床的找矿取得了重要突破,同时在预测理论和找矿技术方面也取得了重要进展。文章主要从6个方面的进展结合实例进行系统总结,以期有助于伟晶岩型锂矿找矿的新突破,包括:①地质找矿方向及找矿方法;②化探(含重砂)有效指示元素(重砂矿物)以及隐伏矿床化探找矿方法;③使用合适的遥感资料识别伟晶岩并判断其含矿性;④物探在推断与成矿有关的花岗岩和片(麻)岩穹隆构造以及在刻画伟晶岩岩脉地下空间展布中的作用;⑤各类综合找矿预测模型(或方法组合)的应用及效果;⑥潜在资源量估算的主要方法和与查明资源储量/资源量的区别等。

关键词 地质学;花岗伟晶岩型锂矿;找矿预测;综合找矿模型;远景区;潜在资源量

中图分类号:P618.71

文献标志码:A

Progress of prospecting prediction research for granitic pegmatite-type lithium deposits at home and abroad

LOU DeBo¹, WANG DengHong¹, LI WanYue^{1,2}, FAN YingLin^{1,2}, LIU Huan¹ and DU XiaoChuan²

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;

2 China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The demand for lithium has skyrocketed in recent years. To address that demand, the discovery of new lithium deposits is crucial. Many granitic pegmatite-type lithium deposits have been discovered in the past several years, at the same time, many advances in prospecting prediction theories and technologies have been obtained. The main advances include: ① geological prospecting directions and methods for granitic pegmatite-type lithium deposits; ② effective elements and natural heavy placer minerals indicating for granitic pegmatite-type lithium deposits, and geochemical exploration methods for buried granitic pegmatite-type lithium deposits; ③ how to use suitable remote sensing data to identify Li-bearing pegmatite; ④ roles of geophysical exploration for inferring the buried granites and gneiss domes associated with granitic pegmatite-type lithium deposits, and for describing space distribution of buried Li-bearing pegmatite veins; ⑤ application of all kinds of integrated prospecting models for Li-bearing granitic pegmatite; ⑥ the major estimation methods of potential resources and the distinctions between potential resources and the identified resource / reserves. Those advances will help to find new pegmatite-type lithium deposits.

* 本文得到国家重点研发计划(编号:2017YFC0602700、2021YFC2901905)和中国地质调查项目(编号:DDDD20190182)联合资助
第一作者简介 娄德波,男,1979年生,博士,正高级工程师,主要从事矿产资源潜力评价研究。Email:lldbb_e@126.com

** 通讯作者 王登红,男,1967年生,博士,研究员,主要从事成矿规律及找矿勘查工作。Email:wangdenghong@vip.sina.com

收稿日期 2021-09-28;改回日期 2022-07-28。秦思婷编辑。

Key word: geology, granitic pegmatite-type lithium deposits, mineral prediction, integrated prospecting model, tracts, potential resources

近年来,由于绿色低碳经济的需要(Amato et al., 2021)以及相应3项国际条约(京都议定书、巴黎协定和联合国可持续发展目标)的出台,加速了国际社会对锂——这种具有良好物理和化学性能的资源的需求(王登红等, 2018; Tabelin et al., 2021), 锂矿的产量和消费量整体上呈现出迅速增加的态势(图1), 并一跃成为国际公认的战略关键矿产(Gourcerol et al., 2019; Choubey et al., 2016), 广泛应用于电池、医药、核工业、航空航天、新能源汽车等新兴领域, 并在可控核聚变发电等方面展现出未来可以期待的巨大潜力(1 g 锂相当于3.7 t 标准煤), 是未来新能源的发展方向(王登红等, 2019)。其中, 锂作为锂电池的原材料在2019年已经超过锂资源使用总量的60%(Tabelin et al., 2021), 为了满足不断增长的需求, 各国争夺和开发锂资源的力度都在加强。从技术角度看, 锂矿的勘查、开采、提炼和循环利用等方面的理论和技术进步都可以为提高锂矿资源的保障程度做出重要贡献(Choubey et al., 2016; Kavanagh et al., 2018; Tabelin et al., 2021), 通过矿产勘查, 增加锂矿资源储量是解决锂矿资源供需矛盾的关键。

世界锂矿资源从矿床类型来看, 大致分为卤水型、伟晶岩型和其他类型3类, 目前具有经济价值的主要是伟晶岩型和卤水型锂矿床, 其他类型的锂矿床资源利用还处于研究中(Kesler et al., 2012)。伟晶岩型锂矿由于分布范围不像卤水型锂矿局限于少数几个盆地, 而是在全球7大洲均有分布(Bradley et al., 2017)(图2), 且品位较高、具有较为成熟的开采和提炼技术, 引起了全世界的勘查兴趣(Kesler et al., 2012; Choubey et al., 2016; 刘丽君等, 2017)。近些年, 新发现或储量增加的伟晶岩型锂矿床主要有非洲刚果(金)的Manono、民主刚果的Manono-Kitolo、马里的Goulamina; 大洋洲澳大利亚的Pilgangoora、King Col、Kathleen Valley、Buldani、Grant、Bald Hill、Youanmi、Dorchap Dyke Swarm; 北美洲加拿大的Whabouchi、Authier、Tansim、Seymour Lake、美国的Carolina Tin-Spodumene Belt; 欧洲德国的Zinnwald、瑞典的Bergby、葡萄牙的Alvarre、奥地利的Wolfsberg; 亚洲中国的甲基卡、李家沟、党坝、业隆沟、大红柳滩、吐格曼、茶卡北山等(刘丽君等,

2017; 2019; 王登红等, 2017; David, 2018; 徐兴旺等, 2019; 潘彤等, 2020; 李杭等, 2020; 王秉璋等, 2020; 王核等, 2021)。

与此同时, 伟晶岩型锂矿床的找矿预测研究也取得了一定的进步。本文主要针对伟晶岩型锂矿床在国内外的最新找矿预测研究成果, 从地质、化探(含重砂)、遥感、物探、综合找矿预测模型以及潜在资源量估算6个方面, 结合具体实例进行总结, 以期有助于伟晶岩型锂矿找矿的新突破。需要指出的是, 虽然该类矿床具有一定但不绝对的共性(晶体粗大、分带、以脉群出现以及与花岗岩有成因联系等), 但不同矿床也有其特殊性, 到目前为止, 也没有完全可靠和固定的找矿预测方法, 不同地区也不应当一概而论, 而应具体问题具体分析(Galeschuk et al., 2007; Bradley et al., 2017; 王登红等, 2017)。

1 伟晶岩型锂矿床地质找矿预测进展

从地质角度进行找矿预测是基础, 近年的地质找矿预测, 主要在“哪里找”和“怎么找”2个方面取得了进展。

到哪里去找伟晶岩型锂矿床的问题, Bradley等(2017)和陈衍景等(2021)指出, 世界各地在区域上造山带腹地产出有丰富的过铝质花岗岩或者浅色花岗岩, 达到高绿片岩相到低角闪岩相的变质沉积岩或变质火山岩地区是寻找LCT伟晶岩型锂矿床的有利区域, 而大面积的沉积岩区的存在表明, 对LCT伟晶岩型锂矿床的形成是不利的; 许志琴等(2016)指出, 在甲基卡等地区片(麻)岩穹窿构造与同构造花岗岩、含矿伟晶岩脉以及大型印支滑脱带在时空和成因上有天然联系, 认为片(麻)岩穹窿地区具有良好的找矿前景; Peters等(2007)在研究阿富汗的伟晶岩型锂多金属矿床时指出, 其在成因与空间上与花岗岩有密切关系, 并将“花岗岩分布区”作为寻找花岗岩伟晶岩型锂等稀有金属矿床的成矿有利地区。在大比例尺矿区范围内, 地表表现(浅色、晶体粗大、抗风化)、围绕母体花岗岩的矿物和蚀变分带的远端以及就矿找矿是寻找伟晶岩型锂矿的重要标志(Bradley et al., 2013; 2017; 岳相元等, 2019; 张辉等, 2019)

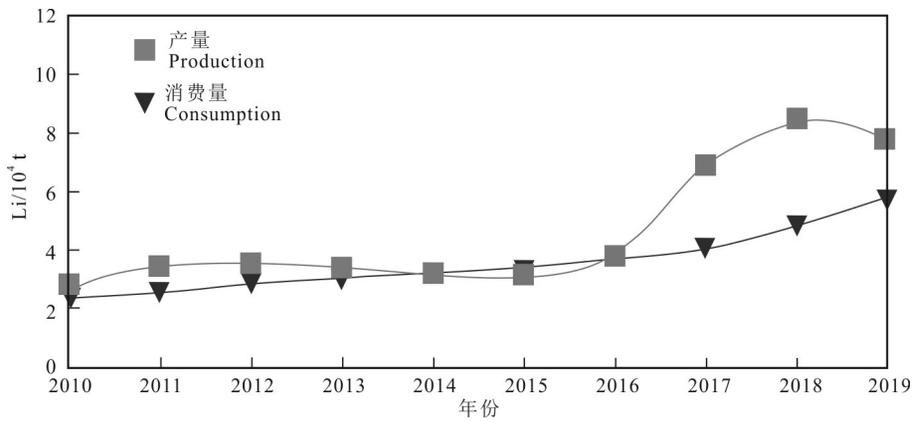


图 1 2010~2019年世界锂产量和消费量变化趋势图(修改自 Tabelin et al., 2021)

Fig.1 Global Lithium production (supply) and consumption (demand) from 2010 to 2019(modified after Tabelin et al., 2021)

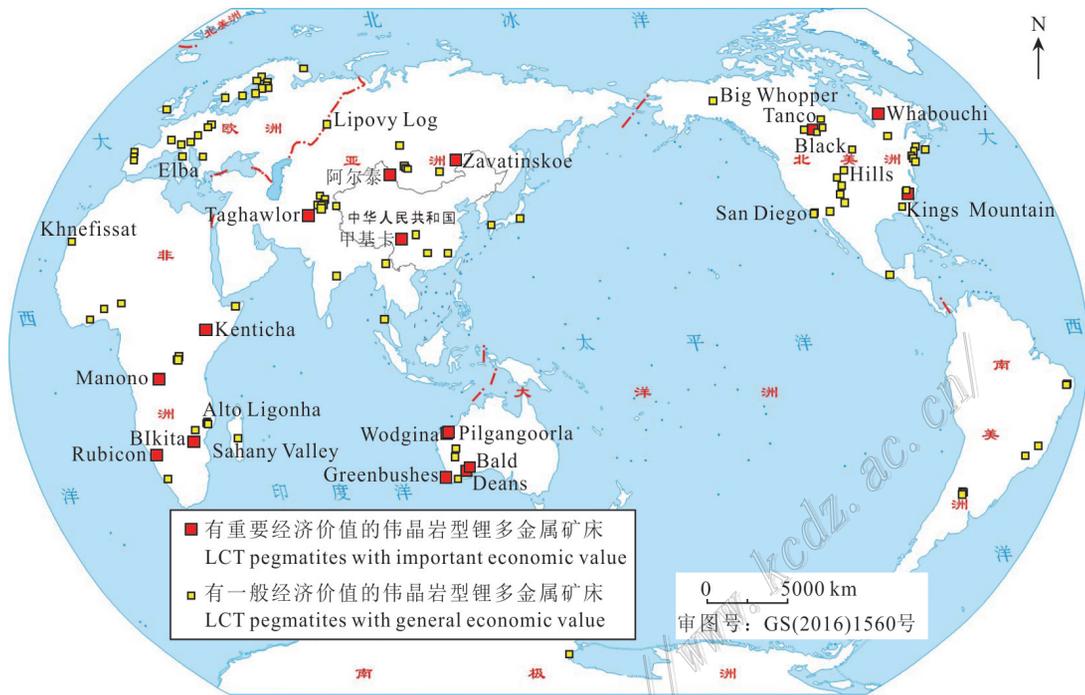


图 2 世界主要 LCT 伟晶岩型锂矿床分布图(修改自 Bradley et al., 2017)

Fig.2 World map showing locations of selected lithium-cesium-tantalum (LCT) pegmatite deposits(modified after Bradley et al., 2017)

(图 3a、b);王登红等(2021)根据甲基卡和马尔康以及国外一些伟晶岩型矿床提出了“五层楼+地下室层脉组合”地质勘查模型,即在产状直立或切层伟晶岩脉出露的地区注意寻找深部顺层含矿伟晶岩脉,而当层状伟晶岩脉大面积出露时,意味着剥蚀程度很高,在深部矿种可能会发生从锂到铌钽的转化;Bradley等(2017)和陈衍景等(2021)也指出,构造尤其是深度对矿体产状及矿种的控制作用,认为可将深度作为大比例尺找矿的重要标志。

通过路线地质调查(填图)来发现矿床是地质找矿各个阶段中最基本和最重要的手段,在地质找矿中一直发挥着重要的作用,对伟晶岩型锂多金属矿床找矿工作也不例外。20世纪初期,中国新疆的可可托海和柯鲁木特伟晶岩型锂矿床就是通过传统的路线地质调查直接发现了富锂铍伟晶岩脉,从而发现了该类矿床(《中国矿床发现史·新疆卷》编委会,1996)。在路线地质调查寻找伟晶岩型锂矿的过程中,人们通过实践不断创新找矿方式,如在寻找新疆

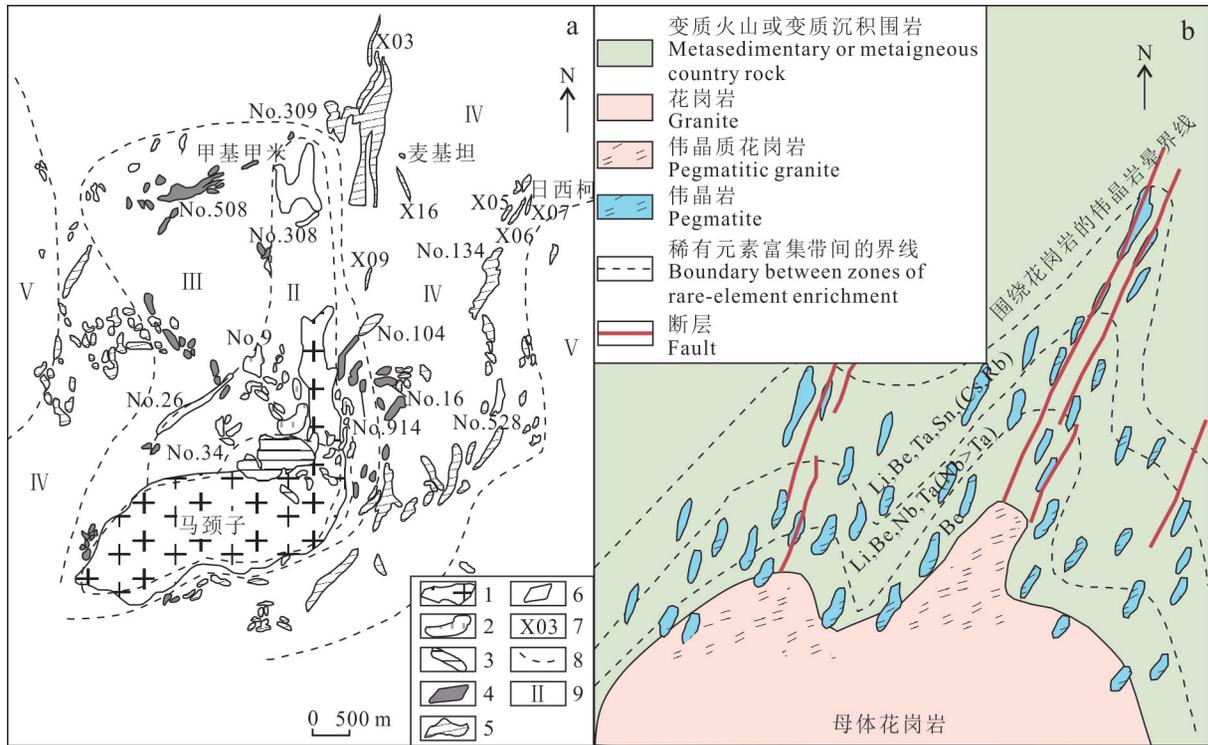


图3 甲基卡矿田中南段花岗岩体、变质地层、伟晶岩脉分布关系图(a,据付小方等,2019)和花岗伟晶岩矿区地层、构造、岩体、岩脉理想的区域分带示意图(b,据Bradley et al.,2017)

1—二云母花岗岩;2—微斜长石型伟晶岩;3—微斜长石钠长石型伟晶岩;4—钠长石型伟晶岩;5—钠长石锂辉石型伟晶岩;6—钠长石—锂云母型伟晶岩;7—伟晶岩脉编号;8—伟晶岩类型分带线;9—伟晶岩类型分带编号(X03为4300m标高的投影): I—微斜长石伟晶岩带; II—微斜长石钠长石带; III—钠长石带; IV—钠长石锂辉石带; V—钠长石锂(白)云母型

Fig. 3 Distribution of pegmatite veins in the middle and southern sections of the Jiajika orefield (a, after Fu et al., 2019) and idealized concentric and regional zoning pattern in a pegmatite field (b, after Bradley et al.,2017)

1—Two mica granite; 2—Micro-plagioclase-type pegmatite; 3—Micro-plagioclase albite-type pegmatite; 4—Albite-type pegmatite; 5—Albite spodumene pegmatite; 6—Albite lepidolite pegmatite; 7—Pegmatite vein number; 8—Pegmatite type zoning boundary; 9—Pegmatite type zoning number (X03 is a projection of 4300 m elevation): I—Micro-plagioclase pegmatite belt; II—Micro-plagioclase albite pegmatite belt; III—Albite pegmatite belt; IV—Albite spodumene belt; V—Albite lepidolite pegmatite belt

库卡拉盖锂等稀有金属矿床和四川甲基卡锂等稀有金属矿床的路线地质调查过程中,发现了含锂辉石伟晶岩、花岗岩、细粒伟晶岩以及红柱石云母片岩的转石,然后根据地形,通过“向源追索”,发现了原生的富锂铍伟晶岩脉(《中国矿床发现史·四川卷》编委会,1996);为了在川西甲基卡地区寻找新的隐伏锂矿床,人们在地质填图过程中探索出一套在第四系覆盖严重但又有伟晶岩转石分布地区的填图找矿方法——“3定2参”1:2000伟晶岩转石填图法(刘善宝等,2020),实践证明该方法能够快速有效识别伟晶岩转石类型,并可进一步确定第四系覆盖区内伟晶岩脉的类型、产状及规模,为钻探工程部署提供依据。

2 伟晶岩型锂矿床勘查地球化学(含自然重砂)找矿预测成果进展

在伟晶岩型锂矿的找矿过程中,化探和自然重砂均发挥了重要的作用,取得了一定的进展,主要表现在2个方面:一是总结了能有效指示矿床存在的化探元素和重砂矿物标志;二是在寻找隐伏富锂伟晶岩矿床方法学方面获得重要突破。

第一方面进展,如 Galeschuk 等(2007)和 Bradley 等(2017)通过对 Tanco 和 Dibs 地区原生晕测量研究,认为 $Li > Rb > Cs$ (活动性)是使用岩石地球化学测量探测隐伏伟晶岩型锂矿床的有效元素,并指出这是稀有元素活动性较高的结果,通过钻探验证发

现多条含矿伟晶岩脉(图 4a、b);Bradley 等(2017)指出富锂伟晶岩风化能产生土壤和重砂矿物异常,有效指示矿床的存在,如在 Greenbushes 伟晶岩锂矿周边的红壤中,As、Sn、Be、Sb 能产生 12~20 km 的异常晕,Nb、Ta 和 B 能产生 1~5 km 的异常晕,锡石、钽铁矿、锂电气石、锰铝榴石因其不宜风化破碎可作为重要的重砂指示矿物,而锂辉石由于在地表环境下容易分解而难以成为重砂矿物;Marcus(2016)指出在澳大利亚,尤其是西澳地区,具有强抗风化能力的富锂电气石重砂矿物是寻找伟晶岩型锂矿的重要标志;罗伟等(2018)通过对川西可尔因地区 1:5 万水系沉积物中 8 种元素(Li、Be、Rb、Cs、W、Sn、Nb、Ta)的聚类分析、因子分析,发现该地区各元素间的相关性较好,主成矿元素为 Li,各元素异常强度高、规模大、套合性好,主要分布在可尔因岩体外接触带,结合地质、物探成果,圈定了 8 处锂多金属矿找矿靶区;张辉等(2019)通过对在阿尔泰地区区域和矿田尺度富磷伟晶岩填图以及对世界伟晶岩型锂矿含磷统计,认为伟晶岩富磷是圈定稀有金属伟晶岩矿化的有效途径;王学求等(2020)通过对全国 12 118 件岩石样品和 3394 个水系沉积物 Li 元素的分析,从成矿物质基础或地球化学块体的角度圈定了 19 个锂

地球化学省。这 19 个地球化学省虽然不是针对伟晶岩锂矿,但对锂矿成矿总体还是有意义的。

第二方面进展,如加拿大钽矿业有限公司(Tanco)在 Bernic 湖地区发现了 Tanco LCT 伟晶岩矿床后,通过路线地质填图和传统的土壤地球化学勘查(总量提取地球化学),在该地区寻找新的伟晶岩矿床,虽然做了大量工作,但效果并不理想,原因在于土壤大部分由外来物质通过物理作用搬运至此(如冰川作用),传统的土壤地球化学测量难以捕捉到由隐伏矿体形成的地球化学异常,于是改为使用先进的选择性土壤地球化学勘查(选择性酶提取技术)寻找隐伏伟晶岩矿床,先后在 Tanco 和 Dibs 发现了许多隐伏的含矿伟晶岩脉(Galeschuk et al., 2007);Maneta 等(2019)在对加拿大昆士兰的 Main Sill of the Moblan 伟晶岩进行研究时指出,富锂伟晶岩中新鲜的碱性长石中 $w(\text{Li})(>40 \times 10^{-6})$ 、石英中 $w(\text{Li})(>30 \times 10^{-6})$ 、白云母中 $w(\text{Li})(>500 \times 10^{-6})$ 普遍比贫锂伟晶岩中锂的含量要高得多,这种普通矿物中锂的高含量特征,可不依赖伟晶岩锂矿物的地表出露,而在地球化学测量中直接作为指示隐伏伟晶岩型锂矿出现的地球化学标志;Xu 等(2019)在川西甲基卡地区针对第四系土壤覆盖造成的传统土壤地球化学找

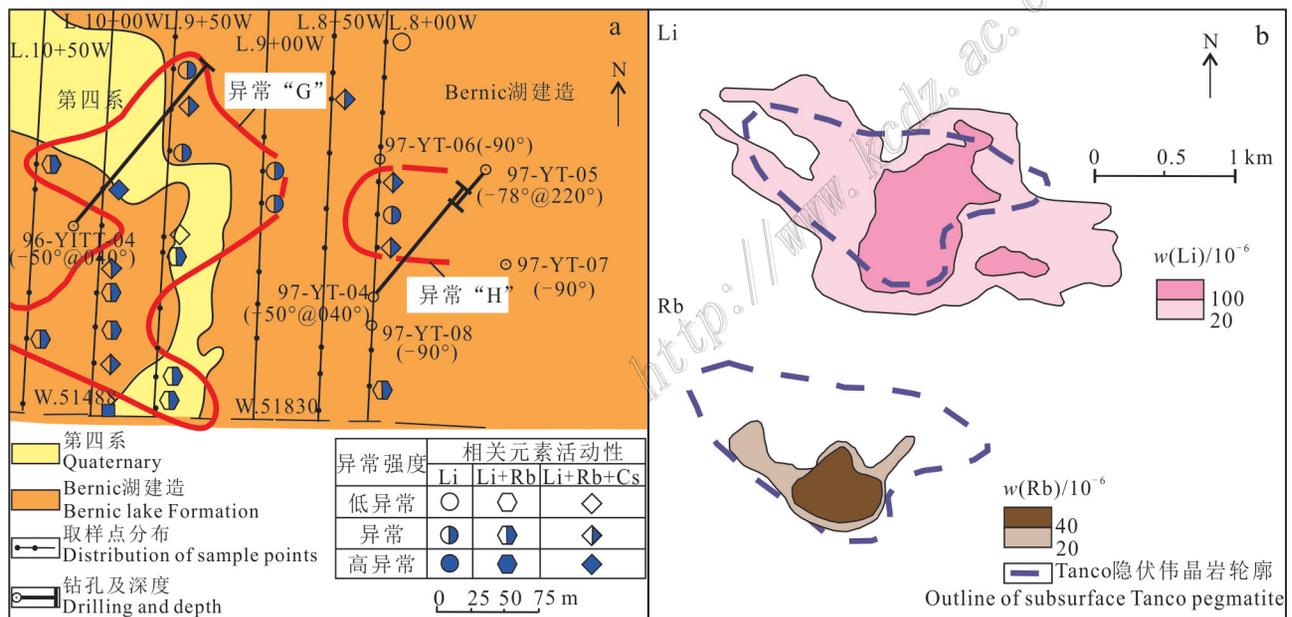


图 4 Dibs 地区岩石地球化学异常以及钻探成果(a, Galeschuk et al., 2007)及 Tanco 地区岩石地球化学异常以及与富锂隐伏伟晶岩关系(b, Bradley et al., 2017)

Fig.4 Litho-geochemical anomaly with Dibs pegmatite discovery holes (a, Galeschuk et al., 2007) and lithium and rubidium geochemical anomalies of rock samples over the buried Tanco pegmatite, Manitoba, Canada (b, after Bradley et al., 2017)

矿能力的不足,提出采用深穿透地球化学技术提取10~25 cm深度土壤中的Li、Cs、Rb、Be、B元素异常,可有效探测隐伏的伟晶岩型锂矿床;于扬等(2018)发明了一种在无法开展常规物化探工作的地区(如自然保护区核心区及缓冲区、高海拔特殊景观区)基于植物中Li异常含量寻找隐伏伟晶岩型锂矿体的方法,这种植物地球化学勘查方法,进一步拓展了锂矿找矿的新途径;王登红等(2021)提出了以锂找锂的技术路线,利用同位素测试技术来查明不同地质体中锂同位素的组成及其空间分布规律,进而分析成矿物质——锂的来源、运移及其聚集的物质迁移轨迹,以帮助发现矿体,该技术在马尔康加达地区找矿实践中取得了新的找矿突破。

3 伟晶岩型锂矿床遥感地质找矿预测研究进展

遥感技术以其耗资少、速度快、范围广的特点而在地质矿产调查中应用日益广泛,同样在伟晶岩型锂矿床的找矿预测中也取得了丰富的成果(姚佛军等,2020;姜琪等,2021),其进展主要体现在2个方面:一是如何将伟晶岩从不同岩性的围岩当中识别出来;二是如何将富锂伟晶岩与普通伟晶岩区别开来。在基岩出露区,作为一种颜色较浅、晶体较大且抗风化能力较强的岩石,伟晶岩很容易被识别,如在美国亚利桑那州的White Picacho地区,主要的伟晶岩脉可以在谷歌地球影像上清晰地显示(Bradley et al.,2017),然而若要识别出富含锂的伟晶岩,则需要合适的遥感数据源和先进的数据处理技术,在这方面国内外学者做了许多开创性的工作。代晶晶等(2017)等在川西甲基卡地区通过对Landsat8影像数据752波段彩色合成和Geocye-1影像数据432波段彩色合成的基础上从不同的尺度根据伟晶岩呈亮白色、成群出现的特点圈定了靶区,经野外验证,与事实吻合度较高;代晶晶等(2018)发明了一种基于多元遥感数据的锂矿找矿方法,首先是根据第一分辨率遥感影像(分辨率较低)圈定远景区,然后根据雷达数据和第二分辨率遥感影像(分辨率较高)在远景区内圈定可供进一步勘查的穹隆构造内的伟晶岩转石区;王海宇(2021)基于深度学习语义分割网络模型采用高空间分辨率WorldView-3遥感影像,以阿尔金地区伟晶岩脉为识别对象开展工作,大大提高了区域上寻找伟晶岩脉的效率,且具有较高的准确率;Cardoso-Fernandes等(2019)利用Landsat-5、Landsat-

8、Sentinel-2、ASTER影像在西班牙和葡萄牙之间的产有伟晶岩锂矿床的Fregeneda-Almendra低植被覆盖区通过彩色合成、比值分析、选择性主成分分析,把富含锂辉石的伟晶岩的波谱特征从变质沉积岩围岩的波谱特征中区分开来,完成了蚀变填图和富锂矿物的识别,取得了良好的找矿效果,同时指出使用更高空间和波谱分辨率的影像效果会更好,彩色合成识别热液蚀变如图5所示。其中,花岗岩表现为淡绿色,变质沉积岩为紫色;热液蚀变岩石被定为深绿色和深蓝色,而深绿色又和过火区有关,除了Landsat5影像中的Bajoca和Alberto矿山外,已知锂矿区呈现出指示热液蚀变的蓝色;金谋顺等(2019a)、金谋顺等(2019b)和Gao等(2020)在海拔高、切割深、地表调查难度极大的西昆仑大红柳滩地区,通过分析地质矿产资料确定含矿层位,对Worldview-2高分遥感影像进行伟晶岩脉的识别,采用主成分变换对ASTER遥感影像提取与伟晶岩型锂矿相关的遥感蚀变异常,结合稀有金属化探异常,圈定找矿靶区,在此基础上发现了505、507、俘虏沟南1号、俘虏沟南2号等多处大型锂铍矿产地;徐兴旺等(2019)在新疆阿尔金中段吐格曼地区通过ASTER遥感数据的假彩色合成识别稀有金属伟晶岩矿床时,发现含绿柱石的花岗伟晶岩脉呈浅黄绿色,含锂辉石与锂云母的花岗伟晶岩脉呈淡蓝色,黑云二长花岗伟晶岩呈亮白色-粉白色,而介于浅黄绿色与淡蓝色之间的浅蓝绿色可能为含绿柱石与锂辉石的花岗伟晶岩脉;姚佛军等(2020)在东天山戈壁区采用微弱信号增强技术进行岩性识别,使用ASTER遥感数据将含矿伟晶岩从相似成分和波谱特征的花岗岩中分离出来,实现了难识别锂矿遥感找矿技术的新突破。

此外,国产高分辨率遥感卫星也得到了快速发展,形成了众多的遥感数据,在很大程度上改变了中国测绘遥感影像数据长期依赖国外高分遥感卫星的情况(杨诗瑞,2021)。如高分系列遥感影像中,高空间分辨率的高分二号遥感数据和高光谱分辨率的高分五号遥感数据,均更加适合用于寻找伟晶岩型稀有金属矿床。其中,高分二号由于其高空间分辨率可直接用于解译和识别伟晶岩脉,而高分五号由于其高光谱分辨率且在近红外和短波红外具有多个波段,可更好地提取与成矿有关的蚀变信息。但到目前为止,关于这方面的研究工作还相对较少,建议增强这方面的研究。

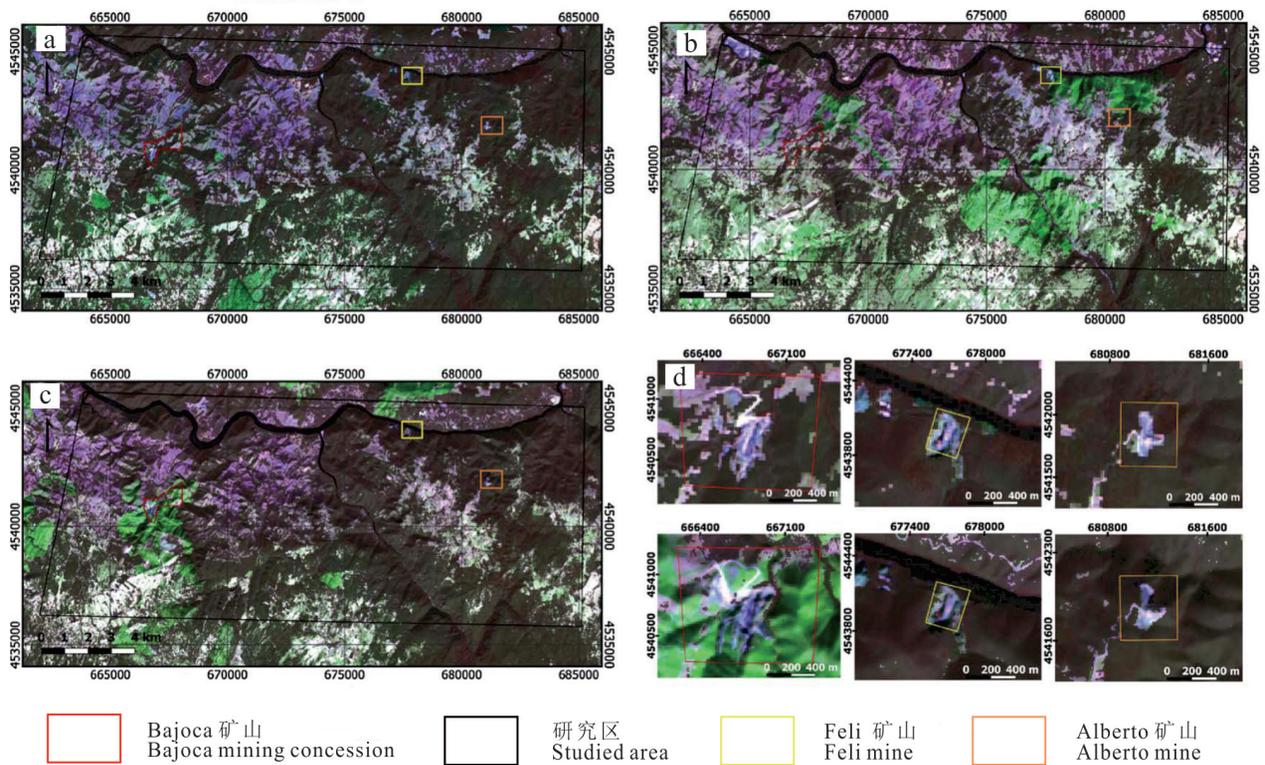


图 5 Fregeneda-Almendra 热液蚀变区的遥感影像图(据 Cardoso-Fernandes et al.,2019)

a. 基于 Landsat-8 的 573 波段; b. Landsat-5 的 472 波段; c. Sentinel-2 的 8123 波段; d. 三座矿山在遥感影像上的详细信息

Fig. 5 RGB combinations to highlight hydrothermally altered areas of Fregeneda-Almendra (after Cardoso-Fernandes et al., 2019)

a. RGB 573 for Landsat-8; b. RGB 472 for Landsat-5; c. RGB 8123 for Sentinel-2; d. detailed information for the 3 mines

4 伟晶岩型锂矿床物探找矿预测研究进展

物探因其方法多(重力、磁法、电法、地震、放射性测量)、参数多(密度、磁化率、电阻率、极化率、波速、放射性)、观测位置多(空中、地面、地下),而在地质找矿工作中得到了广泛的应用。但由于含矿伟晶岩在物性上与围岩(花岗岩、片岩、片麻岩)的差别比较小,伟晶岩规模又比较小,因此,在重、磁、电、震、放等方面都难以产生显著的异常,以至于在区域中小比例尺找矿预测过程中,由伟晶岩引起的微弱物探异常很难被捕捉到(Galeschuk et al., 2007),因此,物探方法在区域上只用来推断与富锂伟晶岩有成因关系的具有低磁、低重、高阻特点的花岗岩以及穹隆构造(杨荣等,2020)。但在具体的大比例尺矿体探测过程中,由于矿体与围岩在具体的实例中仍然有一定的差异,尤其伟晶岩矿体在地表出露而地下空间展布不清的情况下,物探方法仍然起到了重要作用(Bradley et al., 2017;王登红等,

2017)。刘应冬等(2018)通过在甲基卡矿床西缘(约 25 km 处)开展 1:5 万高精度地面磁法测量并结合重力资料,推断长征穹隆构造区域应有隐伏的花岗岩体,是成矿的有利地段;马圣钡等(2020)在马尔康稀有金属矿田加达锂矿区采用高密度电法依据伟晶岩与围岩的电阻率差异(伟晶岩电阻率较高,而围岩因含有一定的黄铁矿或磁黄铁矿而电阻率较低)确定了地表出露的富锂伟晶岩体的倾向,明晰了伟晶岩体在深部的空间展布,为钻探工程的设计提供了依据,经钻探验证,发现了 36 号伟晶岩脉群(图 6a、b);杨荣等(2020)通过对甲基卡 X03 脉采用音频电磁测深(AMT)进行深部测量,发现其深部有高阻体存在,推断深部的高阻体可能是隐伏的富锂伟晶岩矿脉反映,认为 X03 脉深部仍有找矿拓展空间;杨荣等(2021)在石渠扎乌龙矿区针对 No.14 含矿伟晶岩脉采用激电中梯扫面中的低极化率特征和大功率对称四极剖面测深的高电阻率和低极化率特征分析,初步探明了其东西延伸及主体部分在深部的分布特征。

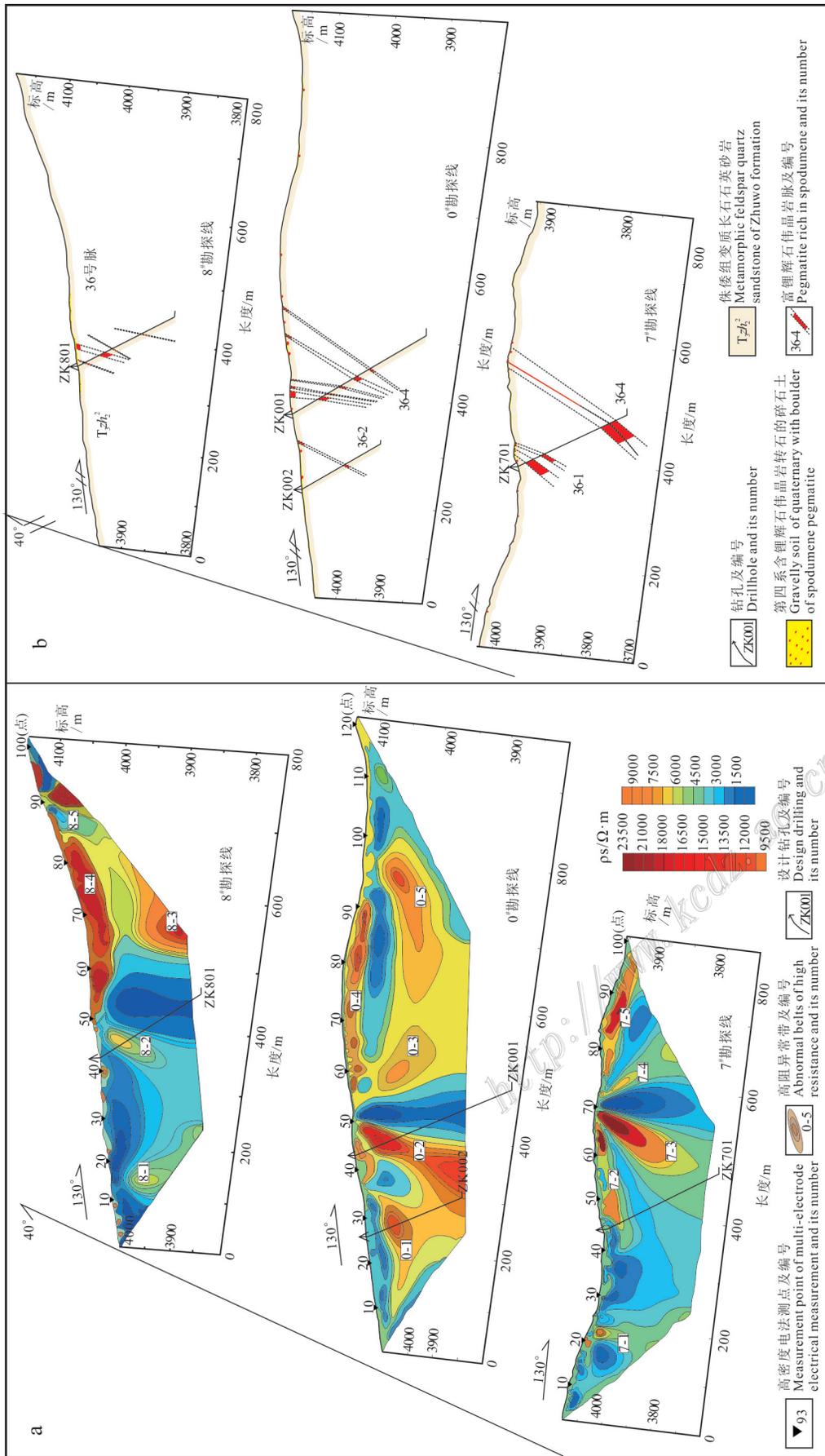


图6 马尔康加达矿区高密度电法反演联合剖面(a)及勘探线联合剖面(b)(据马圣钞等, 2020)
 section map of prospecting line (b) in Jada mining area (after Ma et al., 2020)

5 伟晶岩型锂矿床综合找矿预测研究进展

无论是区域,还是大比例尺找矿预测,综合信息找矿是大势所趋。前人总结的多个找矿理论,如综合信息矿产预测理论(王世称等,2000)、矿床模型综合地质信息预测理论和大比例尺“三位一体”找矿预测理论(叶天竺,2013)、矿床系统-勘查系统找矿预测理论(McCualg et al., 2010)、“三联式”五步式成矿预测理论(赵鹏大等,2003)、“三部曲”矿产资源潜力评价方法(Singer, 1993)等无不体现综合信息找矿的思想。在伟晶岩型锂矿综合信息找矿方面也取得了一些新进展,如加拿大铌业有限公司(Tanco)在Bernic湖地区将地质填图、选择性土壤地球化学勘查(酶提取技术)、岩石地球化学测量并结合控岩构造识别作为伟晶岩型矿床找矿的方法组合(Galeschuk et al., 2007);Bradley等(2013;2017)通过对世界范围内LCT花岗伟晶岩型矿床的充分总结,建立了基于地质、地球化学、遥感、地球物理信息的多尺度描述性矿床模型,从而指导该类型矿床的找矿勘查和潜力评价工作;燕洲泉等(2018)和王记周等(2019)在新疆大红柳滩地区以阿克塔斯中型伟晶岩型锂矿床为典型矿床,建立了地质-地球化学-遥感综合信息找矿模型,将成矿地质背景+伟晶岩型锂等稀有金属矿床(点)+伟晶岩脉+(Li、Be、Ta、Nb、Rb、Cs为主)化探异常+具很高的光谱反射率,一般表现为白色或浅色调,脉状影纹特征作为主要预测要素,在该区开展的1:5万找矿预测中,圈定了30多个找矿预测区;潘彤等(2020)在柴达木盆地北缘通过对沙柳泉铌锂矿、茶卡北山锂铍矿等典型矿床的研究,总结了花岗伟晶岩特征(伟晶岩类型、伟晶岩带状构造、交代作用、典型矿物电气石)、次级构造及韧性剪切带、化探异常浓集中心(Li、Be)等预测要素为主体的地质-地球化学找矿模型,并圈定了龙尾沟、大柴旦北山、布赫特山、沙柳河、茶卡北山等远景区;马圣钊等(2020)在马尔康稀有金属矿田加达锂矿区建立了大比例尺地质-地球物理(电法)找矿预测模型,通过地质填图圈定的残-坡积锂辉石伟晶岩转石带或伟晶岩露头确定了脉体走向,通过高密度电法测量圈定的陡倾高阻异常确定了脉体倾向,最终通过钻探工程控制了隐伏矿脉;付小方等(2017;2019)在甲基卡地区对X03锂矿床找矿实践的基础上,建立了“岩浆-变形-变质-成矿”四位一体控矿要素和成矿模

式,归纳总结了地质-地球物理-地球化学异常的内在关联,从远景区分析、找矿靶区圈定、矿床(体)预测定位的层次与流程,建立了第四系掩盖区隐伏稀有锂金属的综合找矿模型,在指导稀有金属找矿中取得了快速突破,并指出注重在隐伏花岗岩株(枝)与伟晶岩(矿)脉相连部位的找矿(表1);王登红等(2021)通过在川西地区找矿预测研究,建立了一整套深部和外围找矿预测技术方法组合:采用地球化学测量和遥感铝羟基蚀变矿物异常圈定靶区,通过地质填图、路线调查寻找矿体(脉)露头,通过物化探(地气、植物)剖面测量定位或寻找(隐伏)含矿伟晶岩脉,通过电阻率法判断脉体的产状与延伸,通过钻探工程控制矿体的实际情况,并为资源量计算提供依据。

6 伟晶岩型锂矿潜在资源量估算研究进展

潜在资源量估算是是指在综合评价远景区(靶区)地质、物化探、遥感等有利异常的基础上,通过与已发现矿床(体)进行类比,以外推为特点,采用定量方法(如体积法、金属量法、物探反演、德尔菲法、品位-吨位法、回归分析等)对远景区(靶区)潜在资源量进行估算,估算结果可为进一步详细的勘查工作提供有利地段。潜在资源量的估算与查明资源量/储量的估算具有本质的区别,查明资源量/储量的估算是以探矿工程为基础(包括槽探、坑探、井探以及钻探等),其中尤以钻探最为广泛,以内插为特点,通过化学分析获取的成矿元素数据,根据边界品位圈定矿体,并采用定量的方法(如地质块段法、算术平均法、克里格法以及反距离加权法等)对矿区的资源量/储量进行估算,其目的之一是为矿山开采设计提供依据。

国际上普遍采用美国“三部曲”中的品位-吨位模型法对矽卡岩型钨矿、绿岩带型金矿、砂岩型铜矿等多个矿床类型潜在资源量进行总和式估算(Singer, 1993; 2007; Cossette et al., 2014; Ellefsen et al., 2019; Green et al., 2020),但对LCT伟晶岩型锂矿床仅建立了初步的描述性模型,并在阿富汗等国家圈定了找矿有利地段,未见采用品位-吨位模型对伟晶岩型锂矿潜在资源量进行估算的实例(Bradley et al., 2013; 2017; Peters et al., 2007)。伟晶岩型锂矿潜在资源量估算方法在中国最常用的是地质参数体积法,2006~2013年在全国各省重要

表1 甲基卡式花岗伟晶岩型稀有金属床综合找矿模型简表(据付小方等,2019)

Table 1 Brief introduction to comprehensive prospecting model for Jiajika type granitic pegmatite type rare metal deposits (after Fu et al., 2019)

| 层次与流程 | 找矿标志与找矿准则 | 找矿技术方法 |
|--------|---|---|
| 找矿靶区确定 | 地质标志 ① 造单元:松潘-甘孜造山带被动陆缘残余海盆滑脱-推覆褶皱带; ② 双向挤压压缩背形构造横跨叠加部位; ③ 中生代壳熔型花岗岩浆浅层次底辟穹窿顶部及周缘; ④ 含矿地层为上三叠统西康群复理石浅变质碎屑岩; ⑤ 环绕穹窿体发育黑云母-铁铝榴石-十字石(红柱石)-蓝晶石和矽线石渐进动力热流变质特点的片岩带、和热接触角岩带 | ① 1:20万、1:25万区域地质调查报告及区域地质构造专著综合分析研究; ② 野外重点地质调查 |
| | 物化遥标志 ① 小比例尺区域重力低剩余重灾区; ② 小比例尺区域航磁 ΔT 弱磁异常区; ③ 小比例尺水系沉积Li、Be、Rb、Cs异常增高区; ④ 与穹窿体核部花岗岩、伟晶岩、细晶岩、断裂带有关的环形和线形影像,以及重力和磁源重力资料反演得到的花岗岩顶界面信息 | ① 1:100万、1:50万重力异常图和1:100万、1:50万磁异常资料收集; ② 1:20万Li元素地球化学异常资料收集; ③ 高分遥感解译甲基卡1:2.5万重力测量 |
| 矿床预测 | 地质标志 ① 距穹窿体核部花岗岩体顶部及外接触带0~1000m; ② 穹窿体顶部及周缘层间剥离空间,以及纵、横控矿控岩裂隙系统,尤其是与花岗岩连接的开放型裂隙系统; ③ 近岩(矿)围岩具云英岩化、电气石化气液蚀变 | 甲基卡1:1万地质填图 |
| | 物化遥标志 ① 土壤化探Li、Be异常浓集中心突出,与Be、Rb、Cs异常套合较好; ② 综合地质剖面及钻孔中,原生岩(矿)脉对应Li、Rb、Cs高值区段,与成矿具成因联系的花岗岩Li、F、B含量较高; ③ 大比例尺视电阻率大于8000 Ω m的南北向条状异常带,指示存在伟晶岩、细晶岩和花岗岩,电阻率曲线波峰对应高阻异常体顶部,电阻率越大异常体厚度越大 | ① 甲基卡1:1万土壤化探; ② 甲基卡地区综合地质剖面及验证钻孔岩芯取样分析资料; ③ 甲基卡1:5000激电测量 |
| 矿体预测 | 地质标志 ① 矿伟晶岩转石残坡积及基岩露头; ② 具岩浆液态不混溶脉动式充填-交代型、和岩浆结晶分异-自交代成因特征花岗岩伟晶岩; ③ 钠长锂辉石型花岗伟晶岩脉的出现 | ① 1:2000地质追索填图; ② 坡残积锂矿石“追根溯源”; ③ 探地雷达(超高频电磁波)探测;便携式取样钻 |
| | 物化遥标志 经大比例尺激电高阻异常定位,和土壤化探异常定性,预测有资源体存在,并经钻探验证见矿的部位 | 地质、地球物理、地球化学等单一找矿模型综合研究,钻探验证 |

伟晶岩型锂成矿区潜在资源量估算普遍采用这一方法(叶天竺等,2013),其基本原理为:预测资源量=预测面积 \times 预测深度 \times 模型区含矿地质体体积含矿率 \times 相似系数(肖克炎等,2010)。该方法能够较好地反映成矿系统的全要素,具有科学性和实用性,在后续的伟晶岩型锂矿找矿中也得到了较好的应用,如燕洲泉等(2018)通过在新疆大红柳滩地区,以阿克塔斯锂矿为典型矿床,采用地质参数体积法估算该区200m以浅的Li₂O潜在资源量约为366.8万t。此外,杨荣等(2021)采用物探反演(电阻率法)方法对扎乌龙锂矿床No.14矿脉首先估算高阻异常体体积,然后结合岩体密度以及锂矿品位(前人在该区已查明矿体的统计数据的均值)进行潜在资源量估算,推断该条矿脉Li₂O潜在资源量157.3万t。

7 结论及建议

(1) 随着锂资源需求的激增,通过勘查增加其储量是提高锂矿资源保障能力的关键一环,伟晶岩型锂矿床由于其品位较高、分布广泛和成熟的开采、提炼技术而重新成为勘查的主要对象,并获得重要找矿突破。

(2) 虽然花岗伟晶岩型锂矿具有一定的共性,但在不同地区其差异性也很明显,伟晶岩含矿元素的不同、围岩岩性的差异、地表出露情况、蚀变及其分带发育程度等,这些均会导致其在地质、物探、化探以及遥感特征上的差异,使得其找矿预测没有确定和统一的方法,而应在实际工作中具体问题具体分析。

(3) 综合信息找矿预测应是大势所趋,其既可

以尽量避免单一找矿信息多解性所造成的困扰,又可以最大限度地解决信息不对称(或不完整)问题所带来的“假象”,从多角度完整刻画找矿预测模型,大大提高了花岗伟晶岩型锂矿找矿的命中率。

(4)在花岗伟晶岩型锂矿潜在资源量估算方面的成果还相对较少,有必要增强这方面的研究;另外,明确其与查明资源储量/资源量的本质区别是非常重要的,只有这样才能更好地合理发挥潜在资源量在国家资源战略、矿产资源规划以及找矿勘查中的作用。

(5)鉴于伟晶岩型矿床往往含有多种稀有(Li、Rb、Cs、Be、Nb、Ta等)元素并在空间上围绕花岗岩体呈现出一定的分带特征,建议进一步强化矿床成矿系列理论关于“全位成矿”和“缺位找矿”思路在综合勘查评价伟晶岩型矿床中的指导作用,完善伟晶岩型锂多金属矿床的找矿模型,提升找矿预测水平。

致 谢 审稿专家提出的建设性意见对于提高文章水平大有裨益,在此表示衷心的感谢。

References

- Amato A, Becci A, Villen-Guzman M, Vereda-Alonso C and Francesca B. 2021. Challenges for sustainable lithium supply: A critical review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 300: 126954.
- Bradley D and McCauley A. 2013. A preliminary deposit model for lithium-cesium-tantalum (LCT) pegmatites[R]. U. S: U. S. Geological Survey. 7p.
- Bradley D C, McCauley A D and Stillings L M. 2017. Mineral-deposit model for lithium-cesium-tantalum pegmatites[R]. U. S: U. S. Geological Survey. 48p.
- Cardoso-Fernandes J, Teodoro A C and Lima A. 2019. Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites[J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 76:10-25.
- Chen Y J, Xue L Z, Wang X L, Zhao Z B, Han J S and Zhou K F. 2021. Progress in geological study of pegmatite type lithium deposits in the world[J]. *Acta Geological Sinica*, 95(10):2971-2995(in Chinese with English abstract).
- Choubey P K, Kim M S, Srivastava R R, Lee J C and Lee J Y. 2016. Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: Lithium. part I: From mineral and brine resources[J]. *Minerals Engineering*, 89:119-137.
- Cossette P M, Bookstrom A A, Hayes T S, Robinson G R, Wallis J C and Zientek M L. 2014. Sandstone copper assessment of the Teniz Basin, Kazakhstan[R]. U. S: U. S. Geological Survey.
- Dai J J, Wang D H, Dai H Z, Liu L J and Wu Y N. 2017. Geological mapping and ore-prospecting study using remote sensing technology in Jiajika area of western Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 44(2):389-398 (in Chinese with English abstract).
- Dai J J. 2018. A pegmatite-type lithium deposit prospecting method based on multi-source remote sensing data: China, CN 109359 621A[P]. 2018-11-02[2021-11-17]. <https://cas.cugb.edu.cn/sso/cugb/user-LoginLibrary>.
- David C. 2018. Australian resource reviews lithium[R]. Australia: Geoscience Australia. 12p.
- Editorial Board of the Discovery History of mineral Deposits of China, Sichuan Volume. 1996. The discovery history of mineral deposits of China, Sichuan volume[M]. Beijing: Geological Publishing House. 223p(in Chinese with English abstract).
- Editorial Board of the Discovery History of Mineral Deposits of China, Xinjiang Volume. 1996. The discovery history of mineral deposits of China, Xinjiang volume[M]. Beijing: Geological Publishing House. 281p(in Chinese with English abstract).
- Ellefsen K J. 2019. Effect of size-biased sampling on resource predictions from the three-part method for quantitative mineral resource assessment—A case study of the gold mines in the Timmins-Kirkland Lake area of the abitibi greenstone belt, Canada[R]. U. S: U. S. Geological Scientific. 15p.
- Fu X F, Hou L W and Liang B. 2017. Metallogenic model and three-dimensional prospecting model for Jiajika granitic pegmatite-type-lithium deposits[M]. Beijing: Science Press. 222p(in Chinese).
- Fu X F, Huang T, Hao X F, Zou F G, Xiao R Q, Yang R, Pan M, Tang Q and Zhang C. 2019. Application of comprehensive prospecting model to rare lithium metal exploration in Jiajika concealed ore deposit[J]. *Mineral Deposits*, 38(4):751-770(in Chinese with English abstract).
- Galeschuk C and Vanstone P. 2007. Exploration techniques for rare-element pegmatite in the Bird-River Greenstone Belt, southeastern Manitoba[A]. Proceedings of exploration 7: Fifth decennial international conference on mineral exploration[C]. 823-839.
- Gao Y B, Bagas L, Li K, Jin M S, Liu Y G and Teng J X. 2020. 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*, 8:1-26.
- Gourcerol B, Gloaguen E, Melleton J, Tuduri J and Galiegue X. 2019. Re-assessing the European lithium resource potential—A review of hard-rock resources and metallogeny[J]. *Ore Geology Reviews*, 109: 494-519.
- Green C J, Lederer G W, Parks H L and Zientek M L. 2020. Grade and tonnage model for tungsten skarn deposits-2020 update[R]. U. S: U. S. Geological Survey. 23p.
- Jiang Q, Dai J J, Wang D H and Tian S F. 2021. Application of optical remote sensing to identifying granite pegmatite lithium deposits[J]. *Mineral Deposits*, 40(4): 793-804(in Chinese with English abstract).
- Jin M S, Gao Y B, Li K, Teng J X and Yan Z Q. 2019a. A method and

- system for identifying pegmatite rare metal deposits: Shaanxi Province, China, CN108181664B[P]. 2019-11-15[2021-11-17]. <https://cas.cugb.edu.cn/sso/cugb/userLoginLibrary>.
- Jin M S, Gao Y B, Li K, Song J B and Yan Z Q. 2019b. Remote sensing prospecting method for pegmatite type rare metal deposit—taking Dahongliutan area in western Kunlun for example[J]. *Northwestern Geology*, 52(4):222-231 (in Chinese with English abstract).
- Kavanagh L, Keohane J, Cabellos G G, Lloyd A and Cleary J. 2018. Global lithium sources—industrial use and future in the electric vehicle industry: A review[J]. *Resources*, 7(3): 57.
- Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, Keoleian G A, Everson M P and Wallington T J. 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 48:55-69.
- Li H, Hong T, Yang Z Q, Chen J Z, Ke Q, Wang X H, Niu L and Xu X W. 2020. Comparative studying on zircon, cassiterite and coltan U-Pb dating and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of muscovite rare-metal granitic pegmatites: A case study of the northern Tugeman lithium-beryllium deposit in the middle of Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(9): 2869-2892 (in Chinese with English abstract).
- Liu L J, Wang D H, Liu X F, Li J K, Dai H Z and Yan W D. 2017. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine[J]. *Geology in China*, 44(2): 263-278 (in Chinese with English abstract).
- Liu L J, Wang D H, Gao J Q, Yu F and Wang W. 2019. Breakthroughs of lithium exploration progress (2017~2018) and its significance to China's strategic key mineral exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6):1479-1488 (in Chinese with English abstract).
- Liu S B, Wang C H, Wang D H, Dai H Z, Ma S C, Yu Y, Pan M, Hao X F and Yang R. 2020. The "3D2R-BP" large scale mapping method for blocks of pegmatite in the Jajika deposit, western Sichuan, and significance of its application in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(1):326-332 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y D, Zhou Y, Guo R P, Zhou X and Zhang Y. 2018. Anomalies characteristics of ground high-precision magnetic survey and the prospecting prediction in Jijika style spodumene deposits, Sichuan[J]. *Mineral Exploration*, 9(3): 428-437 (in Chinese with English abstract).
- Luo W, Li Y G, Luo K J, Yue X Y, Tang S and Yang B. 2018. Anomaly evaluation and prospecting prediction of 1: 50 000 stream sediment survey in Keery in area, Sichuan Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 18(9): 56-62 (in Chinese with English abstract).
- Ma S, Wang D H, Liu S B, Wang C H, Dai H Z, Rao K Y, Ding X P, Zhu H Y, Deng Z Q and Guo W P. 2020. The application of comprehensive prospecting methods on the hard rock type lithium deposit—A case study of the Jiada lithium mine in the Maerkang rare metals orefield[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2341-2353 (in Chinese with English abstract).
- Maneta V and Baker D R. 2019. The potential of lithium in alkali feldspars, quartz, and muscovite as a geochemical indicator in the exploration for lithium-rich granitic pegmatites: A case study from the spodumene-rich Moblan pegmatite, Quebec, Canada[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 205: 1-12.
- Marcus S. 2016. Pegmatite-Hosted lithium resources of Australia: A review of characteristics and exploration[A]. 13th IAGOD symposium volume, giant ore deposits downunder conference[M].
- McCualg T C, Beresford S and Hronsky J. 2010. Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system[J]. *Ore Geology Reviews*, 38(3): 128-138.
- Pan T, Li S P, Ren H, Wang B Z, Li W F, Wang C T and Jin T T. 2020. Metallogenic conditions and prospecting potential of lithium polymetallic deposits in North Qaidam Basin[J]. *Mineral Exploration*, 11(6):1101-1116 (in Chinese with English abstract).
- Peters S G, Ludington S D, Orris G J, Sutphin D M and Bliss J D. 2007. Preliminary non-fuel mineral resource assessment of afghanistan[R]. U.S.:U.S. Geological Survey Open-File Report.
- Singer D A. 1993. Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources[J]. *Natural Resources Research*, 2(2): 69-81.
- Singer D A. 2007. Short course introduction to quantitative mineral resource assessments[R]. U.S.:U.S. Geological Survey. 13p.
- Tabelin C B, Dallas J, Casanova S, Pelech T, Bournival G, Saydam S and Canbulat I. 2021. Towards a low-carbon society: A review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives[J]. *Minerals Engineering*, 163(15):1-23.
- Wang B Z, Han J, Xie X L, Chen J, Wang T, Xue W W, Bai Z H and Li S P. 2020. Discovery of the indosinian (Beryl-bearing) spodumene pegmatitic dike swarm in the Chakaibeishan area in the northeastern margin of the Tibetan plateau: Implications for Li-Be mineralization[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(1):69-79 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Liu L J, Dai H Z, Liu S B, Hou J L and Wu X S. 2017. Discussion on particularity and prospecting direction of large and super-large spodumene deposits[J]. *Earth Science*, 42(12): 2243-2257 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Sun Y, Liu X F, Tian S H, Dai J J, Liu L J and Ma S C. 2018. Deep exploration technology and prospecting direction for lithium energy metal[J]. *Geological Survey of China*, 5(1):1-9 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Liu S B, Yu Y, Wang C H, Sun Y, Dai H Z, Li J K, Dai J J, Wang Y X, Zhao T, Ma S C and Liu L J. 2019. Exploration progress and development suggestion for the large-scale mining base of strategic critical mineral resources in western Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1444-1453 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Sun Y, Zhou S C, Liang T, Fu Y, Fu X F, Hao X F, San J Z, Liu X F, Hou K J, Gou W M, Tian S H, Li C, Kong W G, Ma S C

- and Guo X J. 2021. Progress of the deep exploration technology demonstration project for lithium energy metal mineral base[J]. *Mineral Deposits*, 40(4): 641-654(in Chinese with English abstract).
- Wang H, Xu Y G, Yan Q H and Zhang X Y. 2021. Research progress on Bailongshan pegmatite type lithium deposit, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3085-3098(in Chinese with English abstract).
- Wang H Y. 2021. Research on extracting pegmatite dike information of remote sensing image based on depth semantic segmentation(dissertation for Master degree)[D]. Dissertation Supervisor: Zhao Z F. Beijing: China University of Geosciences. 68p(in Chinese with English abstract).
- Wang J Z, Yan Z Q, Xu L, Li K, Li Y M, Zheng Y W, Wang H T and Wang Y X. 2019. Potential evaluation of pegmatite-type lithium-beryllium mineral resources in Dahongliutan, Xinjiang[J]. *Gold Science and Technology*, 27(6): 802-815(in Chinese with English abstract).
- Wang S C, Chen Y L and Xia L X. 2000. Theory and method of mineral prediction based on comprehensive information[M]. Beijing: Geological Publishing House. 343p(in Chinese).
- Wang X Q, Liu H L, Wang W, Zhang J, Zhang B M and Xu S F. 2020. Geochemical abundance and spatial distribution of lithium in China: Implications for potential prospects[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(6): 797-806(in Chinese with English abstract).
- Xiao K Y, Ye T Z, Li J C, Yang Y H, Ding J H and Lou D B. 2010. Integrated geo-information modeling reserve estimation method[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(10): 1404-1412(in Chinese with English abstract).
- Xu X W, Li H, Shi P F, Yao F J, Chen J Z, Yang Z Q, Hong T and Ke Q. 2019. Metallogenic characteristics and prospecting of granitic pegmatite-type rare metal deposits in the Tugeman area, middle part of Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(11): 3303-3316(in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Fu X F, Ma X X, Qi X X, Wu C, Hou L W and Zhao Z B. 2016. The gneiss domes in Tibetan Plateau and their potential for prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(11): 2971-2981(in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Liang B, Geng Y, Liu T and Wang Q B. 2019. Extraction of soils above concealed lithium deposits for rare metal exploration in Jiajika area: A pilot study[J]. *Applied Geochemistry*, 107: 142-151.
- Yang R, Hao X F, Wang D H, Fang J B and Dai H Z. 2019. Effect of geophysical exploration on the pegmatite vein in Jiajika lithium ore field, Sichuan Province: A case study of X03 vein[J]. *Mineral Deposits*, 39(1): 111-125(in Chinese with English abstract).
- Yang R, Hao X F, Peng Y, Fang J B, Pan M, Tang Y, Xiong C L, Fu X F, Wang D H and Liu S B. 2021. A comprehensive study on geology and geophysics of Zhawulong lithium deposit[J]. *Mineral Deposits*, 40(4): 842-856(in Chinese with English abstract).
- Yang S R. 2021. Gaofen series satellite—Chinese eyes in space[J]. *Space Exploration*, (3): 6-10(in Chinese with English abstract).
- Yang Z Q, Wang H T, Li Y M, Wang Z J, Li K, Wang Y X, Ren W X, Yu C and Zhou Y Q. 2018. The potential evaluation of pegmatite-type lithium-beryllium mineral resources in Dahongliutan, West KunLun[J]. *Gansu Geology*, 27(Supp. 1): 42-48(in Chinese with English abstract).
- Yao F J, Xu X W, Yang J M, Wu L N and Geng X X. 2020. A technology for identifying Li-Be pegmatite using ASTER remote sensing data in granite of Gobi shallow-covered area: A case study of recognition and prediction of Li-Be pegmatite in Jingerquan, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 39(4): 686-696(in Chinese with English abstract).
- Ye T Z. 2013. Theoretical framework of methodology of deposit modeling and integrated geological information for mineral resource potential assessment[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(3): 1053-1072(in Chinese with English abstract).
- Yu Y, Wang D H, Gao J Q and Yu F. 2019. A method for predicting concealed lithium deposits based on lithium content in plants: China, CN109343143A[P]. 2019-02-15[2021-11-17]. <https://cas.cugb.edu.cn/sso/cugb/userLoginLibrary>.
- Yue X Y, Zhang Y, Zhou X, Gong D X, Tan H Q, Zhou Y and Zhu Z M. 2019. Metallogenic regularity and prospecting direction of rare metal deposits in Keeryin ore concentration area, western Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 867-876(in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Lu Z H and Tang Y. 2019. Metallogeny and prospecting model as well as prospecting direction of pegmatite-type rare metal ore deposits in Altay orogenic belt, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 792-814(in Chinese with English abstract).
- Zhao P D, Chen J P and Zhang S T. 2003. The new development of "Three components" quantitative mineral prediction[J]. *Geoscience Frontiers*, 10(2): 455-463(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈衍景, 薛莅治, 王孝磊, 赵中宝, 韩金生, 周可法. 2021. 世界伟晶岩型锂矿床地质研究进展[J]. *地质学报*, 95(10): 2971-2995.
- 代晶晶, 王登红, 代鸿章, 刘丽君, 吴亚楠. 2017. 遥感技术在川西甲基卡大型锂矿基地找矿填图中的应用[J]. *中国地质*, 44(2): 389-398.
- 代晶晶. 2018. 一种基于多元遥感数据的伟晶岩型锂矿找矿方法: 中国, CN109359621A[P]. 2018-11-02[2021-11-17]. <https://cas.cugb.edu.cn/sso/cugb/userLoginLibrary>.
- 付小方, 侯立玮, 梁斌. 2017. 甲基卡式花岗伟晶岩型锂矿床成矿模式与三维勘查找矿模型[M]. 北京: 科学出版社. 227页.
- 付小方, 黄韬, 郝雪峰, 邹付戈, 肖瑞卿, 杨荣, 潘蒙, 唐屹, 张晨. 2019. 综合找矿模型在甲基卡隐伏区稀有锂金属找矿中的应用[J]. *矿床地质*, 38(4): 751-770.
- 姜琪, 代晶晶, 王登红, 田淑芳. 2021. 光学遥感在识别花岗伟晶岩型锂矿床中的应用[J]. *矿床地质*, 40(4): 793-804.

- 金谋顺,高永宝,李侃,滕家欣,燕洲泉. 2019a. 一种基于遥感技术的伟晶岩型稀有金属矿的识别方法及系统:中国陕西省, CN108181664B[P]. 2019-11-15[2021-11-17]. <https://cas.cugb.edu.cn/sso/cugb/userLoginLibrary>.
- 金谋顺,高永宝,李侃,宋忠宝,燕洲泉. 2019b. 伟晶岩型稀有金属矿的遥感找矿方法——以西昆仑大红柳滩地区为例[J]. 西北地质, 52(4): 222-231.
- 李杭,洪涛,杨智全,陈建中,柯强,王学海,牛磊,徐兴旺. 2020. 稀有金属花岗伟晶岩锆石、锡石与钨钼铁矿 U-Pb 和白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年对比研究——以阿尔金中段吐格曼北锂铍矿床为例[J]. 岩石学报, 36(9): 2869-2892.
- 刘丽君,王登红,刘喜方,李建康,代鸿章,闫卫东. 2017. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质, 44(2): 263-278.
- 刘丽君,王登红,高娟琴,于泓,王伟. 2019. 国外锂矿找矿的新突破(2017~2018年)及对我国关键矿产勘查的启示[J]. 地质学报, 93(6): 1479-1488.
- 刘善宝,王成辉,王登红,代鸿章,马圣钡,于扬,潘蒙,郝雪峰,杨荣. 2020. 四川甲基卡锂伟晶岩转石分布区“3定2参”大比例尺填图法及其在青藏高原应用的意义[J]. 地质学报, 94(1): 326-332.
- 刘应冬,周玉,郭润平,周雄,张贻. 2018. 四川甲基卡锂辉石矿床西缘地面高精度磁测异常特征及找矿预测[J]. 矿产勘查, 9(3): 428-437.
- 罗伟,李佑国,罗开杰,岳相元,唐爽,杨波. 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.
- 马圣钡,王登红,刘善宝,王成辉,代鸿章,饶魁元,丁晓平,朱海洋,邓子清,郭玮鹏. 2020. 综合勘查方法在硬岩型锂矿找矿中的应用——以马尔康稀有金属矿田加达锂矿为例[J]. 地质学报, 94(8): 2341-2353.
- 潘彤,李善平,任华,王秉璋,李五福,王春涛,金婷婷. 2020. 柴达木盆地北缘锂多金属矿成矿条件及找矿潜力[J]. 矿产勘查, 11(6): 1101-1116.
- 王秉璋,韩杰,谢祥镭,陈静,王涛,薛万文,白宗海,李善平. 2020. 青藏高原东北缘茶卡北山印支期(含绿柱石)锂辉石伟晶岩脉群的发现及 Li-Be 成矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 44(1): 69-79.
- 王登红,刘丽君,代鸿章,刘善宝,侯江龙,吴西顺. 2017. 试论国内外大型超大型锂辉石矿床的特殊性与找矿方向[J]. 地球科学, 42(12): 2243-2257.
- 王登红,孙艳,刘喜方,田世洪,代晶晶,刘丽君,马圣钡. 2018. 锂能源金属矿产深部探测技术与找矿方向[J]. 中国地质调查, 5(1): 1-9.
- 王登红,刘善宝,于扬,王成辉,孙艳,代鸿章,李建康,代晶晶,王裕先,赵汀,马圣钡,刘丽君. 2019. 川西大型战略性新兴产业矿产基地勘查进展及其开发利用研究[J]. 地质学报, 93(6): 1444-1453.
- 王登红,孙艳,周思春,梁婷,付勇,付小方,郝雪峰,三金柱,刘喜方,侯可军,郭唯明,田世洪,李超,孔维刚,马圣钡,郭旭吉. 2021. 锂能源金属矿产基地深部探测技术示范项目进展[J]. 矿床地质, 40(4): 641-654.
- 王海宇. 2021. 基于深度语义分割的遥感影像伟晶岩脉信息提取研究(硕士论文)[D]. 导师:赵志芳. 北京:中国地质大学. 68页.
- 王核,徐义刚,闫庆贺,张晓宇. 2021. 新疆白龙山伟晶岩型锂矿床研究进展[J]. 地质学报, 95(10): 3085-3098.
- 王记周,燕洲泉,徐磊,李侃,李元茂,郑耀文,王怀涛,王玉玺. 2019. 新疆大红柳滩地区伟晶岩型锂铍资源潜力分析[J]. 黄金科学技术, 27(6): 802-815.
- 王世称,陈永良,夏立显. 2000. 综合信息矿产预测理论与方法[M]. 北京:地质出版社. 343页.
- 王学求,刘汉粮,王玮,周建,张必敏,徐善法. 2020. 中国锂矿地球化学背景与空间分布:远景区预测[J]. 地球学报, 41(6): 797-806.
- 肖克炎,叶天竺,李景朝,杨毅恒,丁建华,姜德波. 2010. 矿床模型综合地质信息预测资源量的估算方法[J]. 地质通报, 29(10): 1404-1412.
- 徐兴旺,李杭,石福品,姚佛军,陈建中,杨智全,洪涛,柯强. 2019. 阿尔金中段吐格曼地区花岗伟晶岩型稀有金属成矿特征与找矿预测[J]. 岩石学报, 35(11): 3303-3316.
- 许志琴,付小方,马绪宣,戚学祥,吴婵,侯立伟,赵中宝. 2016. 青藏高原麻岩穹窿与找矿前景[J]. 地质学报, 90(11): 2971-2981.
- 燕洲泉,王怀涛,李元茂,王记周,李侃,王玉玺,任文秀,余超,周煜祺. 2018. 西昆仑大红柳滩伟晶岩型锂铍矿产资源潜力评价[J]. 甘肃地质, 27(增): 42-48.
- 杨荣,郝雪峰,王登红,范俊波,代鸿章. 2020. 四川甲基卡锂矿田伟晶岩脉的地球物理探测效果——以新三号脉(X03)为例[J]. 矿床地质, 39(1): 111-125.
- 杨荣,郝雪峰,彭宇,范俊波,潘蒙,唐屹,熊昌利,付小方,王登红,刘善宝. 2021. 扎乌龙锂矿床地质地球物理综合研究[J]. 矿床地质, 40(4): 842-856.
- 杨诗瑞. 2021. 高分系列卫星——太空中的中国慧眼[J]. 太空探索, (3): 6-10.
- 姚佛军,徐兴旺,杨建民,吴林楠,耿新霞. 2020. 戈壁浅覆盖区花岗岩中锂铍伟晶岩的ASTER遥感识别技术——以新疆镜儿泉地区为例[J]. 矿床地质, 39(4): 686-696.
- 叶天竺. 2013. 矿床模型综合地质信息预测技术方法理论框架[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1053-1072.
- 于扬,王登红,高娟琴,于泓. 2019. 一种基于植物中锂元素含量预测隐伏锂矿床的方法:中国, CN109343143A[P]. 2019-02-15[2021-11-17]. <https://cas.cugb.edu.cn/sso/cugb/userLoginLibrary>.
- 岳相元,张贻,周雄,龚大兴,谭洪旗,周玉,朱志敏. 2019. 川西可尔因矿集区稀有金属矿床成矿规律与找矿方向[J]. 矿床地质, 38(4): 867-876.
- 张辉,吕正航,唐勇. 2019. 新疆阿尔泰山带中伟晶岩型稀有金属矿床成矿规律、找矿模型及其找矿方向[J]. 矿床地质, 38(4): 792-814.
- 赵鹏大,陈建平,张寿庭. 2003. “三联式”成矿预测新进展[J]. 地学前缘, 10(2): 455-463.
- 《中国矿床发现史·四川卷》编委会. 1996. 中国矿床发现史·四川卷[M]. 北京:地质出版社. 223页.
- 《中国矿床发现史·新疆卷》编委会. 1996. 中国矿床发现史·新疆卷[M]. 北京:地质出版社. 181页.