**引用格式:**王登红,代鸿章,刘善宝,等,2022.中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势[J].地质力学学报, 28(5):743-764.DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222811

Citation: WANG D H, DAI H Z, LIU S B, et al., 2022. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade [J]. Journal of Geomechanics, 28 (5): 743–764. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222811

# 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势

王登红<sup>1,2</sup>, 代鸿章<sup>1,2</sup>, 刘善宝<sup>1,2</sup>, 李建康<sup>1,2</sup>, 王成辉<sup>1,2</sup>, 娄德波<sup>1,2</sup>, 杨岳清<sup>1,2</sup>, 李 鹏<sup>1,2</sup>

WANG Denghong<sup>1,2</sup>, DAI Hongzhang<sup>1,2</sup>, LIU Shanbao<sup>1,2</sup>, LI Jiankang<sup>1,2</sup>, WANG Chenghui<sup>1,2</sup>, LOU Debo<sup>1,2</sup>, YANG Yueqing<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1,2</sup>

1. 中国地质科学院矿产资源研究所,北京100037;

2. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037

1. Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China

# New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade

Abstract: China is rich in lithium resource, among which lithium ore in the Salt Lake has huge reserves, but the development and utilization technology has yet to be developed, and the main target of development is hard-rock lithium ore at present. Hard-rock lithium ore is mainly pegmatitic and concentrated in Xinjiang and Sichuan. The Mesozoic is the most important metallogenic period for pegmatite-type lithium deposits in China. A relatively stable tectonic environment after an orogeny is favored by the formation of pegmatite-type lithium deposits. After a decade of exploration practice and theoretical research, the types of lithium resource in China have shown a great variety. The brine-type lithium resource has expanded from surface brine to both shallow brine and deep brine, and the hard-rock lithium resources from single granitic pegmatite-type to altered granite-type, cryptoexplosion breccia tube-type and sedimentary-type. The metallogenic age has extended from the Meso-Cenozoic to the Paleozoic and other epochs. The metallogenic zones has increased from 12 to 16, and a number of new mineralized areas have been discovered in the Jiajika and Ke'ervin areas in western Sichuan and the Dahongliutan and Shaligou areas in Xinjiang . A new resource pattern of lithium is being formed. Moreover, Prospecting methods and exploration techniques have also developed from single surface prospecting and mapping to an integration of new techniques and methods, e.g., remote sensing to determine the prospective area, geological surveying to determine the type, geochemical prospecting to determine the mineral, geophysical prospecting to determine the location of drilling, drilling to determine the reserves, as well as biological prospecting, deep penetration of the deep exploration. In view of the rigid demand for lithium resources due to the rapid development of strategic emerging industries, it is suggested to strengthen a) the investigation, research, development and utilization of new types of lithium resources with lepidolite as the main industrial mineral and sedimentary-type lithium resources with Li-bearing clay as the main lithium resources; b) the research and prospecting of the Paleozoic and even Precambrian lithium deposits; c) the exploration of new lithium mineralization belts such as Altyn Tagh, Himalaya, Gangdise and western slope of Great Hinggan Mountains; d) the research on new mechanisms of dynamic management of lithium resources under market economy; e) the advanced

基金项目:国家重点研发计划专项项目(2021YFC2901900);中国地质调查局地质调查项目(DD20221695,DD20190379,DD20160346)

This research is financially supported by the National key R & D plan (Grant 2021 YFC2901900) and the Project of China Geological Survey (Grants DD20221695, DD20190379, DD20160346)

**第一作者简介:** 王登红(1967一),男,博士,二级研究员,主要从事矿产资源研究。E-mail: wangdenghong@vip.sina.com 通讯作者:代鸿章(1985一),男,博士,副研究员,主要从事战略性矿产调查评价。E-mail: Daihz\_cags@163.com 收稿日期: 2022-05-14; 修回日期: 2022-06-28; 责任编辑: 吴芳

research and resource reserve on lithium isotope as the raw material of controllable nuclear fusion, for leading the development of high-end mining industry.

Keywords: lithium; prospecting and exploration; theoretical research; new progress; new tendency

摘要:中国锂矿资源丰富,其中盐湖锂矿虽然储量巨大,但开发利用技术尚待发展,目前开发的主要是硬岩型锂矿。硬岩型锂矿以伟晶岩型为主,集中分布在新疆和四川等地;成矿时代以中生代最为重要;成矿背景以强烈造山运动之后相对稳定的构造环境最为有利。经过十年来的勘查实践与理论研究,中国锂矿的类型已不再单一,卤水型从地表卤水扩展到浅部卤水与深部卤水并重,硬岩型从花岗伟晶岩型一枝独秀到蚀变花岗岩型、伟晶岩型、角砾岩筒型、沉积型等多种类型并重;成矿时代从中新生代拓展到古生代等多个期次;成矿区带从12个增加到16个,并在川西的甲基卡、可尔因及新疆的大红柳滩、砂锂沟等地探获了一批新的矿产地,新的资源格局正在形成;找矿方法与勘查技术也从单一的地表踏勘填图发展到遥感定区(远景区)一地质定型(类型)一化探定性(矿种)一物探定位(孔位)一钻探定量(资源量)及生物找矿、深穿透深部探矿等新技术新方法成体系化的新时代。鉴于战略性新兴产业快速发展对于锂资源的刚性需求,建议加强对以锂云母为主要工业矿物的新类型锂资源及以含锂黏土为主的沉积型锂资源的调查研究与开发利用;除了中生代之外,加强对古生代乃至前寒武纪锂矿的研究与找矿;加强对市场经济条件下锂资源动态管理的新机制研究;加强对锂同位素作为可控核聚变原材料的超前研究与资源储备,为开发高端矿业作出示范和引领。

关键词:锂矿;找矿勘查;理论研究;新进展;新趋势 中图分类号:P618.71;P612 文献标识码:A 文章编号:1006-6616(2022)05-0743-22 DOI:10.12090/j.issn.1006-6616.20222811

### 0 引言

中国共产党第十八次全国代表大会以来,中国 战略性新兴产业的布局与发展进程不断加快。 2022年,中国对于锂矿的勘查与研究进入了一个新 的阶段。十年前发表的文章和出版的专著,基本上 代表了当时国内对于锂矿的研究程度,并在国际上 该研究领域也属于前列,此不赘述。随着近十年来 新能源汽车产业"超常"的快速发展,国内外对于锂 矿的关注度异乎寻常,"白色石油""21世纪能源金 属"等溢美之词不绝于耳。那么,过去的十年,中国 锂矿在矿床学研究与找矿勘查方面取得了哪些成 绩,今后又会朝着什么样的趋势发展?这值得及时 回顾与总结。文章认为,至少在以下十个方面取得 了显著进展并提出了锂矿研究中的新问题、新发展 方向,对于解决现实问题、引领锂矿行业的高质量 发展具有启发意义。

1 新的矿床类型

十年前,对于锂矿床的类型,通常指新疆可可 托海等地的伟晶岩型锂辉石矿床和西藏扎布耶的 盐湖卤水型液态锂矿(邹天人和李庆昌,2006;陈毓 川等,2010a,2010b)。经过十年来的勘查实践证明, 无论是伟晶岩型还是卤水型都有新的亚类型发现 或证明其具有工业价值,如四川盆地东北部黄金口 一带地下卤水中的锂已经通过工业化试采,正在形 成产能;内蒙古维拉斯托产于角砾岩筒中的脉状锂 云母将得到开发;藏南和滇西的热泉型锂矿则是不 同于卤水型锂矿的新型锂资源。对于广泛分布于 铝土矿区甚至煤系地层中的沉积型锂矿,以往因为 没有工业开发价值而不作为资源,但国内外目前均 将其作为勘查和研究重点,一旦符合环保要求又有 经济合理的技术得以应用,将极大地改变锂资源格局。

中国盐湖卤水型锂矿主要分布在青海和西藏。 盐湖锂矿具体可分为碳酸盐型和硫酸盐型。前者 以西藏扎布耶盐湖为代表,后者以青海察尔汗、西 台吉乃尔、大浪滩、一里坪、南翼山等盐湖为代 表。其中,碳酸盐型锂铷铯等金属易于提取,开发 利用成本较低;地下卤水型锂矿以四川自贡、湖北 潜江地区的地下卤水为代表,青海柴达木盆地西部 也有发现但工作程度很低。该类资源开发利用的 潜力大,但资源尚未探明,开采过程中受到构造及 水文地质条件的影响很大,尚难以稳定生产。四川 雅安一带曾经抽水试验,由于卤水从地下被提取过 程中随着温度、压力等物理化学条件的变化,盐类 矿物结晶堵塞管道,大规模工业化开发难度也不小。

花岗伟晶岩型锂矿主要分布在新疆阿尔泰成矿 带、川西松潘--甘孜成矿带,典型矿床为新疆北部阿 尔泰的可可托海锂多金属矿床、新疆西南部的大红 柳滩锂多金属矿床及川西甲基卡锂铍铌钽铷矿床 等。此类矿床的特点是品位高、采选冶工艺成熟、 矿山建设投资回收期短,一直是国内外锂矿勘查的 重点。由于锂主要赋存在伟晶岩脉中,脉体规模一 般不大,且产状变化大,找矿勘探的难度增加,开采 难度也增加,因此,只有品位高的大脉是工业开采 的对象。无论是新疆可可托海的三号脉还是四川 甲基卡的新三号脉,都是在伟晶岩田或者矿集区中 "百里挑一"的结果。

与花岗伟晶岩型锂矿不同的是,花岗岩型锂矿 品位低、选矿难度大,但规模大、采矿难度小而呈 现出显著的规模效应,因而是中国当前开采的主要 对象,也是分布最广的硬岩型锂矿类型,主要位于 华南地区,以江西宜春414(国内唯一大规模露天开 采的花岗岩型锂矿)、湖南正冲和尖峰岭、广西栗 木等地区的矿床最为典型。此类矿床以往不被重 视,且大多数是探明而未开采,无法露天开采的矿 床(如江西的葛源、湖南的香花岭、广西的栗木)实 际上是"呆矿"。随着锂价格的上涨,低品位的硬岩 型锂矿也具备了开发的外部条件,尤其是随着宜春 414矿床资源的快速消费,盘活"呆矿"资源乃至寻 找新的花岗岩型锂矿已成为当务之急。其中,仍然 以江西在寻找花岗岩型锂矿方面的成效最为显著, 这可能跟宜春414的"示范效应"密切相关。

宜春414锂矿中的工业锂矿物主要是锂云母而 不是锂辉石。就全世界来说,津巴布韦、加拿大、 美国、墨西哥等国家都有锂云母矿床,但锂云母矿 物本身含锂低于锂辉石,并不是主导的工业锂矿 物。在新疆库卡拉盖锂矿区,锂云母甚至直接进入 尾砂库。中国的锂云母资源主要分布在江西宜春、 湖南正冲和尖峰岭、广西栗木等地区,而这些矿床 实际上也是花岗岩型锂矿(严格来说属于云英岩型 锂矿或者是云英岩化的花岗岩型锂矿)的典型代表。

除了花岗岩型锂云母矿床之外,近年来在内蒙 古维拉斯托铅锌多金属矿区发现了隐爆角砾岩筒 型的锂云母矿床,而且规模达大型以上,值得高度 重视。维拉斯托的锂云母一方面呈浸染状出现在 细粒花岗岩中,另一方面呈线脉状、网格状的"锂 云母脉"出现在花岗岩体外侧的角砾岩筒中,地质 特征独特。其发现得到以下启发:一是在铜铅锌等 传统的有色金属矿区,是可以找到独立的稀有的金 属矿床,这在以往是难以想象的;二是隐伏岩体外 侧的隐爆成因角砾岩筒,是锂矿赋存的有利部位, 不只是如国外强调的破火山口中的沉积型锂矿;三 是此类锂矿也可以达到大型以上的规模,可以规模 化工业开采,而不只是围岩蚀变的一种标志。因 此,对于以往鉴定出来存在锂云母、黑鳞云母、铁 锂云母甚至是"金云母"的矿区,需要重新研究其存 在锂矿的可能性。

需要强调的是,即便是以传统的伟晶岩型锂矿 为代表的典型矿床,从狭义的矿石类型的角度来考 量,伟晶岩型矿石、"细晶岩"型矿石及其混合类型 的矿石,可能都很重要。比如,四川甲基卡被作为 "伟晶岩型锂辉石矿床"的典型代表写入教科书并 单独编写有专著,但经过此次项目组 2012-2018 年 的钻探验证,尤其是对甲基卡矿田东南部鸭柯柯矿 区 ZK801 钻孔的详细研究,发现鸭柯柯矿区的锂矿 物不只有锂辉石,还有磷锂铝石;矿体不局限在伟 晶岩中,也出现在细粒花岗岩中,更常见的是以锂 辉石、磷锂铝石和其他造岩矿物(长石、石英、云母 等)共同组成的近等粒状的或不规则状结构,总体 上矿物粒度达不到伟晶结构,与标准的伟晶岩明显 不同(主要矿物粒度≥5 cm)。因此,鸭柯柯矿区的 工业矿体主要属于花岗岩型而非伟晶岩型,而甲基 卡的新三号脉实际上是伟晶岩型矿石和花岗岩型 矿石的复合体(杨岳清等, 2020)。即便是伟晶岩型 锂矿区,不同矿石类型甚至不同成因类型的矿石可 以同时存在,这实际上构成了矿床的成矿系列,而 两类甚至多种类型锂辉石矿体的共存对于拓展找 矿思路是具有重要的现实意义的。因此,甲基卡式 的锂矿与其说是伟晶岩型的典型代表不如说是硬 岩型锂矿的典型(刘丽君等, 2015; 付小方等, 2015; 王登红等, 2017)。这对于今后的找矿是具有启示 意义的。无论是阿尔泰、武夷山、秦岭还是柴北缘 等地区,都应该注意岩石结构的区分(花岗岩和云 英岩)、细粒锂矿物的鉴定以及新类型锂矿石的识 别,尤其是十字石、红柱石片岩等围岩中锂的赋存 状况,其含量甚至有可能超过"沉积型锂矿"的锂含 量。那么,甲基卡非传统矿化类型锂矿的发现,不 但弥补了硬岩型锂矿以"伟晶岩型锂辉石"为主导

的单打一局面,拓宽了找矿思路,同时也为伟晶岩型矿脉深部寻找大规模的层状稀有金属矿体—— "地下室"提供了实例。

### 2 新的成矿区带

十年前,中国锂矿成矿带(简称"成锂带")主要 有 12 个,分别是:阿尔泰、唐巴勒、西天山、东天 山、西昆仑、藏北、柴达木、松潘-甘孜、四川盆地、 秦岭、潜江凹陷和华南成锂(区)带(李建康等, 2014;陈毓川等,2015)。其中,大部分区带已取得了 新进展,仅唐巴勒等个别成锂带尚未取得进展。难 能可贵的是,这十年来又发现了一些新的锂成矿区 带,如阿尔金成矿带(Ⅲ-19)、喜马拉雅成矿带(Ⅲ-45)、班戈-腾冲成矿带(Ⅲ-42)和突泉-翁牛特成矿 带(Ⅲ-50)等(图 1)。

近十年来的勘查成果表明,将阿尔金、喜马拉 雅、冈底斯以及大兴安岭西坡作为新的成锂带是必 要的(表1)。其中,在阿尔金成锂带已发现有吐格 曼、砂锂沟(也称瓦石峡南)、塔木切、塔什达坂、 阿克亚、阿克亚东、塔什达坂北、塔西、库木萨依西 等伟晶岩型锂多金属矿产地;在大兴安岭西坡成锂 带发现有内蒙古克什克腾旗维拉斯托大型锂云母 矿床,工作程度相对较高(内蒙古地质勘查有限责 任公司,2018);在喜马拉雅和冈底斯成锂带已发现 有锂辉石滚石或残坡积物,尚未探明成型矿床。其 中,据秦克章等(2021)报道,在喜马拉雅琼嘉岗(实 际地名是穷家岗)发现了"超大型"锂矿,但工作程 度低,需要加大投入进一步查证。值得肯定的是, 无论是喜马拉雅成矿带西段的穷家岗(琼嘉岗)还 是东段的库局、库拉岗日以及冈底斯的腾美杰等 地,均已发现锂辉石等稀有金属的矿石转石,宜进 一步寻找原生露头。锂辉石矿石无论是滚石还是 残坡积物,如果落在锂的化探异常区(王学求等, 2020),其找矿意义不言而喻。由于气候变暖,雪线 上移,冰川融化等因素,西昆仑的大红柳滩地区、藏 南的喜马拉雅和冈底斯以及东昆仑、阿尔金、西南 天山等以往地质填图或其他区调工作未到达的地 区,完全有可能出现"露头型"的锂矿脉,值得高度 关注。王登红曾经提出"雪线找锂"的设想,在青藏 高原乃至于南美的高原区都有现实意义。

除了新的成锂带,在一些原先已经识别出来的 成锂带中也有不少新的发现。例如,华南成锂带的 幕阜山矿集区新发现有黄柏山锂辉石矿(李建康, 2021),在松潘-甘孜成锂带的可尔因矿集区发现有 加达、加达南等锂辉石矿床,在柴达木盆地成锂区 的南北两侧也都有硬岩型锂矿的新发现,其中,柴 北缘有茶卡北山、石乃亥等锂矿,在柴南缘(实际上 属于昆仑成矿带)有阿达滩、金水口和哈图等锂矿, 工作程度低但潜力大,值得深入开展找矿工作。

# 3 新的成矿时代

以往认为中国的锂矿主要是第四纪的卤水型锂 矿和中生代的硬岩型锂矿(陈毓川等, 2010a, 2010b)。 无疑,中国的卤水型锂矿主要形成于第四纪,与南 美"锂三角"的卤水型锂矿一致。但是,中国的硬岩 型锂矿主要形成于中生代,与国外主要形成于前寒 武纪的成矿时代明显不同。近年来在阿尔金成矿 带(Ⅲ-19,全国统一编号,下同;徐志刚等,2008)发 现了加里东期的锂矿(如吐格曼及吐格曼北的年龄 为 460 Ma 和 468~454 Ma, 徐兴旺等, 2019; 李杭等, 2020),不但丰富了中国锂矿成矿规律研究的内容, 更是明确了加里东期作为西部地区新的锂矿成矿 期的区域性找矿意义,这有助于打开锂矿找矿的新 局面。即在加里东构造运动影响到的成矿带范围 内, 应引起对锂矿找矿的重视。以往只注意到中东 部地区武夷山成矿带的福建南平和秦岭-大别成矿 省的河南卢氏南阳山出现加里东期的同位素年龄, 但未引起重视。需要强调的是,虽然在新疆阿尔泰 成矿省也存在加里东期的层状伟晶岩型矿床,主要 矿种是白云母,锂未见工业富集(王登红等,2001), 但这并不能排除其他成矿带甚至阿尔泰本身也存 在加里东期伟晶岩型锂成矿的可能性。其他涉及 到加里东期成矿作用的成矿带还包括中国西部的 准噶尔南缘成矿带(Ⅲ-6)、塔里木北缘成矿带(Ⅲ-12)、塔里木西南缘成矿带(Ⅲ-17)、阿拉善成矿带 (Ⅲ-18)、柴达木北缘成矿带(Ⅲ-24)、东昆仑成矿带 (Ⅲ-26)以及中国东部大兴安岭、吉黑、华北、华南 等成矿省内的相关成矿区带。总之,阿尔金成矿带 加里东期锂矿床的发现与确认,对于拓展中国硬岩 型锂矿的找矿前景意义重大。

总体而言,中生代仍然是中国硬岩型锂矿成矿 的极盛时期,在南方几乎所有的特大型、大中型矿 床都与燕山期构造-岩浆活动有关,属燕山期成矿 事件的重要组成部分。印支晚期到燕山早期的构





王登红,等:中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势

#### 表1 中国成锂带简表

Table 1 Main lithium metallogenic belts in China

编号	成锂带名称	典型矿床	主要成矿时代	相关成矿区带	相关成矿区带名称	构造背景
Li1	阿尔泰锂成矿带	可可托海	海西燕山期	Ⅲ-01	北阿尔泰稀有-Pb-Zn-Au-白云母-宝石成矿带	阿尔泰造山带
Li2	唐巴勒锂成矿带	合什哈西哈力		Ⅲ-04	唐巴勒-卡拉麦里Cr-Cu-Au-Sn-硫铁矿- 石墨-石棉-水晶成矿带	准噶尔地块及周缘造山带
Li3	西天山锂成矿带	沙音图拜		Ⅲ-09	伊犁微板块北东缘(造山带) Au-Cu-Mo-Pb-Zn-Fe-W-Sn-P石墨成矿带	古生代为主造山带
Li4	东天山锂成矿带	镜儿泉	海西-印支期	Ⅲ-08	远罗培哈-黑鹰山 Fe-Cu-Ni-Au-Ag-Mo-W-石膏-硅灰石-膨润 十-煤成矿带	多旋回造山带
Li5	西昆仑锂成矿带	大红柳滩	印支燕山期	Ⅲ-27	西昆仑Fe-Cu-Pb-Zn-RM-REE-硫铁矿- 水晶-白云母-宝玉石成矿带	多旋回造山带
Li6	藏北锂成矿带	扎布耶	第四纪			第四纪封闭的高蒸发环境
Li7	柴达木锂成矿带	察尔汗	第四纪	Ⅲ-25	柴达木盆地Li-B-K-Na-Mg-盐类-石膏- 油气成矿区	第四纪封闭的高蒸发环境
Li8	松潘甘孜锂成矿带	甲基卡	印支-燕山期	∭-30	北巴颜喀拉-马尔康 Au-Ni-Pt-Fe-Mn-Pb-Zn-Li-Be-云母成矿带	造山带
Li9	四川盆地锂成矿带	自贡	三叠纪	∭-74	四川盆地Fe-Cu-Au-石油-天然气-石膏-钙芒 硝-盐-煤和煤成气成矿区	凹陷盆地
Li10	秦岭锂成矿带	官坡	加里东期	∭-66	东秦岭Au-Ag-Mo-Cu-Pb-Zn-Sb- 非金属成矿带	多旋回造山带
Li11	潜江凹陷锂锂成矿带	潜江	第三纪	Ⅲ-72	江汉-洞庭(断陷)石膏-盐-石油-天然气成矿区	断陷盆地
		宜春	印支燕山期 印支燕山期	II-12	华南成矿省	
Li12	华南锂成矿带	南平	加里东期	Ⅲ-71	武功山杭州湾 Cu-Pb-Zn-Ag-Au-W-Sn-Nb-Ta-Mn- 海泡石-萤石-硅灰石成矿带	板内多旋回造山带
Li13	阿尔金成锂带	砂锂沟	加里东期	Ⅲ-19	阿尔金Au-Cu-Cr-Fe-Pb-Zn-石棉-玉石成矿 带	多旋回造山带
Li14	冈底斯成锂带	念青唐古拉、羊八井	喜马拉雅期	∭-42	班戈-腾冲(岩浆弧)Sn-W-Be-Li-Fe-Pb-Zn成 矿带	板块缝合带两侧
Li15	喜马拉雅成锂带	库局	喜马拉雅期	Ⅲ-45	喜马拉雅(造山带)Au-Sb-Fe-白云母成矿带	板内造山带
Li16	大兴安岭西坡成锂带	维拉斯托	燕山晚期	Ⅲ-50	突泉翁牛特Pb-Zn-Ag-Fe-Sn-REE成矿带	多旋回陆内造山带

注:此表在李建康等(2014)、陈毓川等(2015)基础上加以补充,相关成矿区带的代号及名称依据徐志刚等(2008)。需要注意到是,单矿种的成矿区带与单 矿种综合性成矿区带的范围不完全一致。

造运动转折时期,是中国西部伟晶岩型锂矿的成矿 高峰期,无论是新疆阿尔泰的卡鲁安(-库卡拉盖)、 西昆仑的大红柳滩,还是四川的甲基卡、扎乌龙等 大型、超大型伟晶岩型锂矿床都形成于这一时期。 阿尔泰、西昆仑和川西北形成于印支晚期一燕山早 期的伟晶岩型锂辉石矿床,构成了中国西部硬岩型 锂矿的"锂三角"。华南成矿省,江西宜春414、湖 南道县正冲、尖峰岭等矿床形成于燕山期,广西栗 木钽铌铷锂矿床形成于印支一燕山期(表1);新发 现的内蒙古维拉斯托锂云母矿床也形成于燕山期, 但已经延续到了燕山晚期(张彤, 2021);而西藏境 内喜马拉雅和冈底斯成矿带中新发现的锂辉石矿 床形成于喜马拉雅期。如果说阿尔金的加里东期 伟晶岩型锂矿和喜马拉雅、冈底斯的喜马拉雅期与 "淡色花岗岩"有关的硬岩型锂矿属于两个新的锂 成矿期,具有重要意义,那么,可以预测,在中国境

内,硬岩型锂矿可能形成于各个大地构造旋回,从 前寒武纪到喜马拉雅期,可构成一个完整的多旋回 成矿谱系(图2)。

### 4 新的勘查成果

十年前,中国锂矿的勘查工作基本停顿,除了 新疆可可托海作为危机矿山投入钻探工作之外,其 他地区几乎没有一个锂矿的勘查项目。2012年以 来,在四川甲基卡、四川可尔因、新疆大红柳滩、新 疆阿尔金等地取得了一系列新的勘查进展,其中, 四川甲基卡新三号锂矿脉的发现,可以作为十年来 中国硬岩型锂矿找矿突破的标志性成果(表2)。

在四川甘孜州的甲基卡矿田,以134号脉为开 采对象的融达锂矿已经成为中国西部目前正在露 天开采的骨干锂辉石矿山,但新增资源量主要集中



岩浆期与地壳演化阶段的划分依据程裕淇(1994);地质时代的绝对年龄依据全国地层委员会(2002);矿床成矿系列或矿床成矿系列组以编 号简称标示,依据陈毓川等(2007),新发现者尚未编号

图2 中国锂矿的成矿体系

Fig. 2 Lithium mineralization series in China

The division of magmatic and crustal evolution stages refers to Cheng et al., 1994; Absolute geological ages according to National Stratigraphic Commission(2002); Mineralization series or series groups are marked by abbreviation of serial number (Chen et al., 2007)

在新三号脉和烧炭沟一鸭柯柯等地。其中,在中国 地质调查局"我国三稀资源战略调查研究""川西 甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价"项目、国 家重点研发计划及中国地质科学院矿产资源研究 所自有经费科研工作的持续支持下,于 2012— 2013年6—7月在新三号脉完成第一期5个验证钻 孔的施工,孔孔见矿,总进尺545.35m,141件样品的 氧化锂(Li<sub>2</sub>O)含量为0.8%~2.81%,平均品位达1.61%。 通过后期的持续勘查,估算新增氧化锂资源储量达 64.31×10<sup>4</sup> t(王登红和付小方,2013;刘丽君等,2015, 2016;付小方等,2015;王登红等,2016a);2016— 2018年,在甲基卡矿区及外围鸭柯柯等地圈定找矿 靶区4处,并通过高分辨率遥感地质找矿、大比例 尺填图、激电中梯扫面、机械岩心钻探(5个钻孔, 共 1520.11 m)等工作, 提交新发现矿产地 2 处, 共探 获预测矿石资源量 2267.86×10<sup>4</sup> t, Li<sub>2</sub>O(334)资源量 25.77×10<sup>4</sup> t(刘丽君等, 2017a, 2017b; 代晶晶等, 2017; 王登红等, 2017, 2021b)。另外, 四川省地勘基金和 天齐锂业等其他资金渠道的商业性勘查工作也在 甲基卡矿田探获了相当规模的资源量, 此不赘述。

在四川阿坝州加达和加达南矿区,中国地质科 学院矿产资源研究所在中国地质调查局"川西甲基 卡大型锂矿资源基地综合调查评价"(2016—2018) 和"松潘-甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基地综 合调查评价"(2019—2021)项目资助下,于2017— 2021年通过地质填图、大比例尺低密度电法测量、 锂同位素找矿和钻探(8个钻孔,共1909.54 m)等工 作,新发现伟晶岩脉 61条。其中,锂辉石钠长花岗

表 2 中国主要硬岩型锂矿床及相关地质单元的同位素年代数据

矿床名称	矿床或岩石类型	定年方法	年龄/Ma	参考文献
福建南平	花岗伟晶岩型	K–Ar	364~412	仇年铭和杨岳清, 1985
广西恭县栗木	花岗岩型	白云母Ar-Ar	214	杨锋等, 2009
河南卢氏南阳山	花岗伟晶岩型	K–Ar	396	陈西京, 1976
湖南道县正冲	云英岩型	全岩Rb-Sr	14~153	陈廷愚等, 1986; 李耀菘等, 1986
湖南临武尖峰岭	花岗岩型	K–Ar	167	黄蕴慧等,1988
湖南幕府山断峰山	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	127.7~130.5	李鹏等, 2017
湖南幕府山仁里	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	136.6	黄小强等, 2021
湖南幕府山	幕府山复式花岗岩体		122~155	转引自李鹏等, 2020
湖南白沙窝	花岗伟晶岩型	辉钼矿Re-Os	140 ±6.7	文春华等, 2020
江西广昌西港	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	150~160	研究中资料
江西宜春雅山	花岗岩型	K–Ar	131~157	林传仙, 1994
江西于都上坪	石英脉型	K–Ar	177	袁忠信和白鸽, 2001
陕西宝鸡杨家湾	花岗伟晶岩型	K–Ar	132	陈好寿, 1975
四川甲基卡	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	195~199	王登红等, 2005; Li et al., 2013
四川甲基卡104号锂辉石伟晶岩	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	$195.7\pm0.1$	王登红等,2005
四川甲基卡134号锂辉石伟晶岩	花岗伟晶岩型	白云母 Ar-Ar	$198.9\pm0.4$	王登红等,2005
四川甲基卡	二云母花岗岩	锆石U-Pb	$223\pm1$	郝雪峰等,2015
四川甲基卡新3号锂辉石伟晶岩	花岗伟晶岩型	铌钽铁矿U−Pb	$214 \pm 2$	郝雪峰等,2015
四川可尔因	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	152~176	李建康等,2007b
四川可尔因	白云母钠长石伟晶岩	白云母 Ar-Ar	$159 \pm 1$	Li et al., 2019
四川可尔因	二云母花岗岩	锆石 U-Pb	$207 \pm 1$	Zhao et al., 2019
四川可尔因	黑云母二长花岗岩	锆石 U-Pb	206.7~229	赵永久, 2007; 岳相元等, 2019
四川可尔因	石英闪长岩	锆石 U-Pb	206.4~223.8	岳相元等, 2019; Zheng et al., 2020
四川可尔因	二云母花岗岩	锆石 U-Pb	202~219	研究中资料
四川可尔因党坝	花岗伟晶岩型	锡石U-Pb	199~208	费光春等, 2020
四川可尔因李家沟	花岗伟晶岩型	锆石 U-Pb	$198 \pm 3$	Fei et al., 2018

痖	表	2
	x	4

矿床名称	矿床或岩石类型	定年方法	年龄/Ma	参考文献
四川可尔因加达	花岗伟晶岩型	铌钽铁矿U-Pb	195~206	研究中资料
四川雪宝顶	石英脉型	白云母 Ar-Ar	$195 \pm 1$	Zhang et al., 2014
四川雪宝顶	伟晶岩	白云母 Ar-Ar	$190 \pm 2$	李建康等, 2007a
四川雪宝顶	羊拱海花岗岩	锆石 U-Pb	$221 \pm 4$	Zhang et al., 2006
四川扎乌龙	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	236	四川省地矿局, 1987
四川扎乌龙14号伟晶岩	花岗伟晶岩型	白云母 Ar-Ar	$180 \pm 2$	Li et al., 2019
四川扎乌龙14号伟晶岩	花岗伟晶岩型	铌钽铁矿 U-Pb	$205 \pm 2$	Li et al., 2019
四川扎乌龙97号伟晶岩	花岗伟晶岩型	白云母 Ar-Ar	$174 \pm 2$	Li et al., 2019
四川扎乌龙	白云母花岗岩	锆石 U-Pb	$212 \pm 5$	Li et al., 2019
四川打枪沟	花岗伟晶岩型	锆石 U-Pb	$147.5 \pm 2.3$	胡军亮,2020
青海茶卡北山	花岗伟晶岩型	锆石 U-Pb	217	王秉璋等,2020
青海草陇	花岗伟晶岩型	独居石U-Pb	200~204	李五福等, 2021
新疆大红柳滩102号伟晶岩	花岗伟晶岩型	白云母 Ar-Ar	$187.0 \pm 1.1$	Li et al., 2019
新疆大红柳滩90号伟晶岩	花岗伟晶岩型	铌钽铁矿 U-Pb	$211.9 \pm 2.4$	闫庆贺等, 2017; Yan et al., 2018
新疆大红柳滩90号伟晶岩	花岗伟晶岩型	白云母 Ar-Ar	189.4 ± 1.1	Li et al., 2019
新疆大红柳滩	二云母花岗岩	锆石 U-Pb	217~220	乔耿彪等, 2020
新疆大喀拉苏	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	248	王登红等,2002
新疆镜儿泉	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	243	陈郑辉等,2006
新疆柯鲁木特	花岗伟晶岩型	K–Ar	198~220	邹天人等, 1980
新疆可可托海	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	178~182	王登红等,2002
新疆塔拉提	花岗伟晶岩型	锆石U-Pb	$385.9 \pm 3.5$	Lv et al., 2018
新疆阿木拉宫	花岗伟晶岩型	锆石U-Pb	358.3 ±4.6	Lv et al., 2018
新疆拜城	花岗伟晶岩型	锆石U-Pb	$275.5 \pm 4.2$	任宝琴等, 2011; 张辉等, 2019
新疆小喀拉苏	花岗伟晶岩型	锆石U-Pb	241.5+3.1	张辉等, 2019
新疆磨什尕	花岗伟晶岩型	锆石U-Pb	249+2.9	张辉等, 2019
新疆萨尔加克	花岗伟晶岩型	锆石U-Pb	$252.7 \pm 2.1$	张辉等, 2019
新疆切木尔切克	花岗伟晶岩型	锆石U-Pb	253.5 ± 3.2	张辉等, 2019
新疆库儒尔特	花岗伟晶岩型	锆石U-Pb	180.7±0.5	任宝琴等, 2011; 张辉等, 2019
新疆小虎斯特	花岗伟晶岩型	锆石U-Pb	190.6±1.2	任宝琴等, 2011; 张辉等, 2019
新疆佳木开	花岗伟晶岩型	锆石UPb	199.1±1.0	任宝琴等, 2011; 张辉等, 2019
新疆卡鲁安	花岗伟晶岩型	铌铁矿、锆石U-Pb	198~223	马占龙等, 2015; Feng et al., 2019
新疆库卡拉盖	花岗伟晶岩型	锆石UPb	$211.3 \pm 2.4$	马占龙等,2015
新疆别也萨麻斯	花岗伟晶岩型	锆石U-Pb	157.2±0.5	吕正航等, 2015
新疆蒙库喀拉苏	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	252~268	邹天人和李庆昌,2006
新疆阿克塔斯	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	$144\pm4.3$	乔耿彪等, 2020
新疆505锂矿	花岗伟晶岩型	锡石U-Pb	223.5 ±7.9	彭海练等, 2018; 李侃等, 2019
新疆白龙山	花岗伟晶岩型	钽铁矿U-Pb	208	Wang et al., 2020
新疆砂锂沟	花岗伟晶岩型	白云母Ar-Ar	402~405	研究中资料
新疆吐格曼	花岗伟晶岩型	锆石U-Pb	$459.9 \pm 3.7$	徐兴旺等, 2019
新疆吐格曼北	花岗伟晶岩型	锡石、锆石U-Pb	454~468	李杭等, 2020
西藏琼嘉岗	花岗伟晶岩型	独居石、铌钽铁矿U-Pb	24~25	赵俊兴等, 2021
西藏普士拉	花岗伟晶岩型	锡石、铌钽铁矿U-Pb	23~25	Liu et al., 2020

伟晶岩脉 36条,估算新增 Li<sub>2</sub>O 潜在矿产资源超过 22×10<sup>4</sup> t<sub>o</sub>

基于一些学者对新疆西昆仑的大红柳滩锂矿区 研究的基础上,2012年通过的中国地质调查局地质 大调查计划"我国三稀资源战略调查研究"项目率 先对该地区稀有金属矿(锂矿、铍矿和铌钽矿)开展 定量预测,结合区域1:50000地球化学元素异常分 布范围和槽探工作,综合多源信息圈定锂铌钽靶区 4个,预测Li<sub>2</sub>O资源量2.23×10<sup>4</sup>t,并通过槽探控制 资源量7308.73t(王登红等,2016b;徐仕琪和涂其 军,2017;涂其军等,2019)。随后,西安地质调查中 心、新疆维吾尔自治区有色地质勘查局、新疆维吾 尔自治区地质矿产勘查开发局、陕西省地质调查 院、中化地质矿山总局陕西地质勘查院、中国科学 院广州地球化学研究所等单位在地质大调查、国家 重点研发计划、新疆维吾尔自治区地勘基金及企业 基金等项目支持下,投入了大量的工作,发现了大 红柳滩东、阿克塔斯(喀拉喀什河南)、雪龙山、俘 虏沟南、大红柳滩北、康西瓦东、雪凤岭、雪盆和双 牙等一批新的矿产地或原有的矿产地不断扩大规 模,使之成为中国最为重要的大型伟晶岩型锂矿资 源基地(图 3),其初步控制的Li<sub>2</sub>O资源量不少于 50×10<sup>4</sup> t。其中,10×10<sup>4</sup> t为大型(王核等,2017;梁婷 等,2021)。

在新疆阿尔金的砂锂沟矿区,中国地质科学院 矿产资源研究所于 2020 年在 00 勘探线施工 ZK01 钻孔,见厚度>1 m 的伟晶岩脉 7 条,累计 34.22 m,最 大视厚度 23.37 m,矿体平均品位 Li<sub>2</sub>O 1.175%, BeO 0.059%, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.011%,矿石类型主要是锂云母伟晶 岩(图 4a); 另见有萤石碳酸盐脉 2 条,最厚可达



1一雪被区; 2一第四系冲积物; 3一巴颜喀拉山群上组; 4一巴颜喀拉山群中组; 5一巴颜喀拉山群下组; 6一中细粒石英闪长岩; 7一黑云母二长花岗岩; 8一石英脉; 9一未矿化伟晶岩脉; 10一矿体及编号; 11一矿区范围

图 3 新疆和田县大红柳滩锂矿田 509 道班西-507 锂矿矿产地质图(据梁婷等, 2021 修改)

Fig. 3 Mineral geological map of the Track 509 West—Track 507 lithium deposit in the Dahongliutan ore field in Hetian, Xinjiang(Modified after Liang et al., 2021)

1-Snow area; 2-Quaternary alluvial deposits; 3-Upper Formation of Bayankhara Mountain Group; 4-Middle Formation of Bayankhara Mountain Group; 5-Lower Formation of Bayankhara Mountain Group; 6-Medium-fine grained quartz diorite; 7-Biotite monzogranite; 8-Quartz vein; 9-Unmineralized pegmatite dike; 10-Ore body and number; 11-Scope of mining area



a一新疆阿尔金砂锂沟矿区锂云母伟晶岩岩心; b一新疆阿尔金塔木切矿区锂辉石伟晶岩手标本; c一新疆阿尔金塔木切矿区锂云母锂电气石 伟晶岩

图4 新疆阿尔金成锂带典型含锂伟晶岩矿石

Fig. 4 Typical lithium-bearing pegmatite ores in the Altyn Tagh Li-metallogenic belt, Xinjiang

(a) Drilling core of lepidolite pegmatite from the Shaligou deposit; (b) Hand specimen of spodumene pegmatite from the Tamuqie deposit; (c) Hand specimen of lepidolite-elbaite pegmatite from the Tamuqie deposit

6m, 萤石含量 8%~15%。该钻孔是砂锂沟一带的 第一个钻孔,为后期的找矿突破打开了局面。如随 后在01勘探线施工钻孔2个,其前排钻孔(ZK0101) 见伟晶岩脉累计视厚度 29.25 m(最大单脉厚度 20.79 m), 真厚度 18.66 m, 矿体平均品位 Li<sub>2</sub>O, 1.277%; BeO, 0.077%; Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0.012%; 另见有萤石碳酸盐脉 4条,最厚可达 5.9 m;后排钻孔(ZK0102)见伟晶岩 脉4条,累计视厚度73.02m。其中,主脉体厚度分 别为16.59m和52.76m,控制伟晶岩脉深部延伸达 190 m, 另见有萤石碳酸盐脉 3条, 视厚度 2~3 m 不 等。砂锂沟矿区的找矿突破带动了阿尔金地区一 系列找矿新发现,如在阿尔金塔木切地区发现了锂 辉石伟晶岩锂云母和锂电气石伟晶岩(图 4b、4c)。 2021年,中国地质科学院矿产资源研究所对新疆塔 木切锂铍矿一带开展专项地质调查,对其中ρ2、 o3、o4号含矿伟晶岩脉开展了钻探验证,证实矿体 在深部有较稳定的延伸。此外,在塔木切北部地 区新发现伟晶岩脉6条,均为含矿的锂辉石伟晶 岩脉。

5 新的资源格局

十年来,除了上述在四川甲基卡矿田、四川可 尔因矿田、新疆大红柳滩锂矿田、新疆阿尔金吐格 曼矿田等西部地区取得显著进展之外,在中国东部 大兴安岭成矿省的内蒙古维拉斯托、华南成矿省的 江西九岭-武功山以及中国西南部藏南高喜马拉雅 等地区,也取得了一系列新突破或新发现,从而塑 造了中国锂矿尤其是硬岩型锂矿的新格局。 中国锂矿资源丰富, 矿床多, 规模大, 是中国的 优势矿产之一。十年前(截至2012年), 中国探明有 储量的锂矿区48处, 查明金属锂资源储量601.2×10<sup>4</sup>t (包括盐湖锂), 保有资源储量587.99×10<sup>4</sup>t(金属 锂), 主要分布在新疆、四川、江西、西藏、青海、湖 南、河南、福建和陕西等省(自治区)(表3, 表4)。

十年来,除了个别矿区提交了评审备案的资源 储量之外,绝大多数锂矿区的工作程度较低或者尚 未完成勘探,虽然有资源量方面的数据报道甚至已 经在开采,但尚未达到法定要求程度,如四川甲基 卡新三号脉新增氧化锂资源量 64.31×10<sup>4</sup> t(中国国 土资源报 2014 年 8 月 29 日第一版报道); 内蒙古维 拉斯托锂云母型锂矿的Li<sub>2</sub>O资源量达35.72×10<sup>4</sup> t(品位Li<sub>2</sub>O, 1.28%),被评为2018年中国地质学会 十大地质找矿成果;新疆的大红柳滩正在编写勘探 报告,具体数据待评审验收之后再报道,初步估算 可达到超大型规模:江西官春的低品位岩体型以锂 云母为主的氧化锂 258×10<sup>4</sup> t,等。这些数据有待于 进一步通过提高工作程度来核实,但以硬岩型锂矿 为重点的新一轮勘查工作无疑正在塑造中国锂资 源的新格局。值得指出的是,江西幕阜山-九岭-武 功山一带是"十二五"期间"我国稀有稀土稀散金 属矿产资源调查研究"计划项目提出的重点远景 区,近年来得到了商业性勘查活动的证实。宜春 414 是该区的已知典型矿床,以锂云母型锂矿为特 征,而宜春市锂云母的增储空间仍然很大。九岭地 区存在与414钽铌矿类似矿化特征的岩株,且其中 的稀有金属矿物比414矿床还发育。在综合研究的

#### 表 3 中国主要省(自治区)查明锂矿资源储量、消耗资源储量和保有资源储量一览表(陈毓川等, 2015)

Table 3 List of the identified, consumed and retained lithium mineral resources in China (Chen et al., 2015)

劣(白兴区)	查明资源储量			消耗资源储量		保有资源储量			太明次酒は昌正上は周/の
11(日伯匹)	Li <sub>2</sub> O/t	$LiCl/\times 10^4 t$	折合金属锂/t	Li <sub>2</sub> O/t	$LiCl/\times 10^4 t$	Li <sub>2</sub> O/t	LiCl/×104 t	折合金属锂/t	重勇更你陌重用自比例%
新疆	138006		64114	63368		74638		34675	1.07
西藏		822.0	1346341		1		821.0	1344703	22.39
青海		2135.0	3496209		19		2115.0	3464686	58.15
陕西	121		56			121		56	0.00
四川	1259386	2.4	589022			1259386	2.4	589021	9.80
河南	18455		8574			18455		8573	0.14
湖南	350806		162976			350806		162976	2.71
江西	737059		342420	149695		587364		272875	5.70
福建	5004		2325			5004		2324	0.04
合计	2508837	2960.0	6012037	213083	20	2296595	2939.0	5879892	100.00

#### 表 4 中国主要锂矿床资源信息

Table 4 Resources of the main lithium deposits in China

~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	储量规模				平均品位/%					
0 产地名林	锂	铍	铌	钽	Li <sub>2</sub> O	Li <sub>2</sub> O BeO		Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	a2O5 利用情况	
江西宜春钽铌锂矿	超大		中	超大	0.389		0.010	0.010	在用	
河南卢氏铌钽矿床	中		小	中	0.650				待用	
湖北潜江凹陷卤水矿	超大								待用	
湖南临武香花铺尖峰山铌钽矿床	大		小	大	0.299		0.012	0.013	未用	
湖南道县湘源正冲锂铷多金属矿床	大				0.557				未用	
湖南平江传梓源铍钽铌矿床		中	小	中		0.022	0.010	0.007	曾用	
云南龙陵黄莲沟铍矿床		中				0.049			曾用	
四川金川–马尔康可尔因锂铍矿床	大	中			1.200~1.271	$0.040 {\sim} 0.045$			在用	
四川康定甲基卡锂铍矿床	超大	大			1.203	0.040			在用	
四川石渠扎乌龙锂矿	中				1.109				未用	
四川金川县李家沟	超大型				1.300				在用	
青海柴达木一里坪盐湖锂矿	大				LiCl, 2.20 g/L				在用	
青海柴达木东台吉乃盐湖锂矿床	超大				LiCl, 2.57 g/L				在用	
青海柴达木西台吉乃盐湖锂矿床	大				LiCl, 3.12 g/L				在用	
西藏扎布耶盐湖锂矿	超大								在用	
新疆富蕴可可托海锂铍铌钽矿床	大	超大	小	中	0.982	0.051	0.006	0.024	已用	
新疆富蕴柯鲁木特锂铍铌钽矿床	中	中	小	中	0.987	0.049	0.026	0.011	停用	
新疆福海库卡拉盖锂矿床	中				1.100				未用	

注:据陈毓川等(2015)补充;其中,四川金川县李家沟经四川省地质矿产勘查开发局化探队补充勘探后,由四川省矿产资源储量评审中心评审认定新增Li<sub>2</sub>O资源储量为51.22×10<sup>4</sup> t

基础上,此次项目组对狮子岭附近存在相似矿化特征的尖山岭至云峰坛一带、黄岗至圳口里一带、余家里等地的岩体进行了初步调查,圈定了包括狮子岭在内的7个靶区,通过地表填图和系统采样估算远景资源量达38×10<sup>4</sup> t以上(王成辉等,2019)。据报道,宜春市及下属县市拥有探明可利用氧化锂储量逾258×10<sup>4</sup> t(约120×10<sup>4</sup> t金属锂),比十年以前全国查明的氧化锂储量总量还多(约251×10<sup>4</sup> t,表3)。可见,花岗岩型锂云母矿床资源量的大幅度增长,

在不久的将来会进一步改变中国硬岩型锂矿的资 源格局。

此外,一旦沉积型锂矿能够得到工业开发利 用,环保问题能够解决,那么豫西-晋南及川滇黔地 区与古生代沉积岩及铝土矿、煤系地层相伴生的锂 资源将可能在数量上超过花岗岩型和花岗伟晶岩 型锂矿,而柴达木盆地及四川盆地、江汉盆地及东 部的吉泰盆地、樟树盆地等的深部卤水中的锂资源 也值得重新评价。

# 6 新的勘查方法

十年前,对于锂矿勘查方法的研究,并不多见, 但实际上由于伟晶岩型矿床的复杂性,对于新疆可 可托海稀有金属矿床的勘查不仅投入过大量的工 作,还为"找矿勘探地质学"这一学科的诞生做出了 贡献。正是由于可可托海这一典型矿床的复杂性, 才将找矿勘探地质学作为一门专门的学科建立起 来了。同时,也正是由于伟晶岩型矿床的复杂性, 类似于可可托海三号脉这样的经典矿床的勘查方 法和经验,并不具有普遍的实用性。因此,才认识 到稀有金属矿床的成矿独特性,不盲目照搬教科书 和勘查规范的条条框框,想尽一切办法,探索找矿 与勘探的新技术新方法,是这十年来的重要进展。 具体如:在远景区圈定和靶区优选阶段,"牛粪找 矿"、生物找矿等非传统化探异常的提取与高分辨 率遥感信息的充分提取(代晶晶等, 2017; 于扬等, 2019a, 2019b), 是以往没有的; 在远景区填图和靶区 异常查证阶段,采用物探与"3定2参"地质填图相 结合的方法来查明伟晶岩脉的分布特征及深部延 伸情况,是以往没有的;在钻探验证阶段,采用 45°~60°的开孔角来布设斜孔(而不是直孔),也是 以往没有的;在综合评价阶段,除了求得锂及铍、 铌、钽等共伴生组分的品位和资源量之外,同时求 得锂同位素(°Li)的资源量,更是闻所未闻;到了扩 大规模甚至探边摸底、就矿找矿的阶段,采用地气 测量和锂同位素示踪技术开展"以锂找锂"的研究 (刘丽君等, 2017b; 王秋波, 2020; 王登红等, 2021a; 周四春等, 2022), 指出找矿方向, 同样是十年前没 有的。至于背包钻、取样钻、模块化钻探设备、非 泥浆甚至清水钻探技术的创新改进,也是十年来的 新进展。在卤水型锂矿方面,"锂钾兼探""气锂兼 探""油锂兼探"在四川盆地和柴达木盆地西部也 取得了新进展。

鉴于当前勘查投入不足,如何研发出投资少、 周期短、见效快的勘查技术方法,乃当务之急。毫 无疑问,地质填图是最传统的找矿方法,也是投入 最少、见效最快、周期最短但科技含量尤其是理论 含量最高的脑力劳动,而不是简单的"跑路线"。因 此,带着科学问题、奔着矿脉矿石去的专题填图,与 为了完成面积性工作量的"mapping"是有着本质区 别的。王登红十年来一直倡导"先找矿再填图",但 尚未得到推广。有必要再次以甲基卡为例加以说 明这也是学习李四光精神,实事求是,务实创新的 具体体现。

中国西部地区无论是新疆阿尔泰还是地处青藏 高原的西昆仑地区或是松潘-甘孜成矿带,都是伟 晶岩型矿床的找矿远景区,但山高谷深,要么剥蚀 严重,要么第四系覆盖甚至冰川覆盖,难以找到好 的矿化露头。四川甲基卡一带处于青藏高原东部 的夷平面, 地表见到的含锂辉石的"大石头" 曾经被 认为是"青藏高原大冰盖"的冰碛物。但经过项目 组长期的调查研究与钻探验证,结果发现,有的含 锂辉石的"大滚石"实际上是原地的、有根的,不是 外来的,并不是冰川漂来的;所谓的冰漂砾上的定 向擦痕实际上是"定向排列的板条状锂辉石风化 之后的痕迹",这一认识非常关键,对后期解放思想 大胆布钻起到了关键作用。那么, 地表哪些转石属 于冰川漂砾?哪些属于原地的残积物?根据实地 踏勘、遥感解译和钻探验证认为,如果含锂辉石的 转石是定向排列的(不是杂乱无章的), 与不含锂 辉石的沉积岩围岩碎块在遥感影像上呈条带状、黑 白相间排列(不是混杂在一起的)并具有一定的延 伸长度(其展布范围、方向与地质图上由露头圈定 的方向、产状吻合一致),那么,此时的含锂辉石转 石很可能是原地的。这在甲基卡矿田西部地区 2015-2018年的填图与钻探工作中发挥了很大的 指导作用。

2019-2021年,刘善宝等(2020)进一步总结出 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,即:通过确定伟晶岩转石的类型、尺度 和分布密度,参考矿区内伟晶岩脉的产状和地形条 件来圈定靶区的找矿方法。实践证明,该方法能够 快速有效识别伟晶岩转石的类型(冰碛物、坡积物 和原地或半原地型),为钻探工程布设提供依据。 2019年在甲基卡经8个钻孔验证,于日西柯第四系 覆盖区发现了16条花岗伟晶岩脉,其中,锂辉石伟 晶岩脉10条,实现了新的找矿突破。后来又将这一 方法应用到可尔因矿田(马圣钞等,2020),并指导 2019年"松潘-甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基 地综合调查评价"项目在上述两个地区实施钻探验 证,初步探获新增氧化锂资源量超过15×10<sup>4</sup>t,取得 了显著效果。这一方法在冈底斯和喜马拉雅成锂 带也值得推广采用。

# 7 新的成矿理论

"多旋回深循环内外生一体化"锂矿成矿理论, 是在前期对新疆阿尔泰成矿省的成矿系列以及对 全国锂矿成矿规律研究的基础上(王登红等,2002;王 登红等,2014;陈毓川等,2015;王瑞江等,2015)结合 十年来的勘查实践提炼出来的。

在中国,卤水型锂矿和硬岩型锂矿均很发育, 前者以西藏的扎布耶为代表,后者以新疆的可可托 海为代表。其在十年前就闻名天下,并得以开发利 用。这与国外是不一样的,南美玻利维亚、阿根廷 和智利的"锂三角"是盐湖卤水型锂矿,尚未发现硬 岩型锂矿:澳大利亚和非洲大陆刚果(金)等地只有 伟晶岩型锂矿(袁忠信等, 2016):北美加拿大东部 魁北克一带也是伟晶岩型锂矿,而美国西部内华达 只有现代热泉型锂矿,伟晶岩型锂矿尚未发现,以 麦克德米特为代表的沉积型锂矿倒是在近年来越 来越被重视(JINDALEE Resources Limited 网站 http:// www.jindalee.net; 中华人民共和国自然资源部网站 http://geoglobal.mnr.gov.cn; 在澳大利亚股案交易所上 市的金达利资源公司宣称其在俄勒冈州发现的麦 克德米特锂矿床是美国最大的锂矿床,碳酸锂含量 超过 10.1×10°t, 但其边界品位只有 0.1%), 并且在全 世界掀起了寻找沉积型锂矿的热潮。尽管美国也 是液态锂矿与硬岩型锂矿均有,但与中国不同,中 国的卤水型锂矿往往与硬岩型锂矿在空间上密切 相伴,卤水型锂矿产于盆地中,硬岩型锂矿产于盆 地周边的造山带,如柴达木盆地中的卤水型锂矿是 中国锂矿资源最集中的成矿区,其西北侧的阿尔金 成锂带、北侧的柴北缘成锂带和南侧的柴南缘(东 昆仑)成锂带都已经发现了独立的锂矿,成矿潜力 很大,找矿前景看好(潘彤等,2020);西藏冈底斯成 锂带中羊八井式的热泉型锂矿、扎布耶式的盐湖型 锂矿往往分布在"淡色花岗岩"邻近地区,二者在空 间上接近;四川盆地、江汉盆地、吉泰盆地以及周 田盆地均如此(图1)。即便是古生代的盆地,如豫 西-晋南的铝土矿分布区,伴生在石炭纪一二叠纪 铝土矿层及其顶底板围岩中的古生代黏土型锂矿, 其南侧就是属于加里东期一华力西期构造转折阶 段成矿的东秦岭成锂带,其中的桃坪岩体形成于 450 Ma, 黄龙庙南含铀伟晶岩形成于 415~404 Ma, 南阳山花岗伟晶岩型稀有金属矿床形成于 396 Ma (陈西京,1976;赵如意等,2013;张杰等,2021)。因此,有理由认为盆地中的沉积型锂矿(已经被固化 在黏土等沉积物中)以及卤水型锂矿(尚未固化)的 成矿物质,除了深部热泉(抑或还有岩浆热液,如云 南腾冲。郭唯明等,2019)的补给之外,地表造山带 风化剥蚀下来的锂也是重要来源。

另外,当富含锂的沉积物埋藏到一定的地壳深 部,随着温度、压力的增大,沉积岩发生埋藏变质, 由于锂具有降低熔点的奇特作用,富含锂的沉积物 比不富含锂的沉积物更容易发生低共熔点的重熔 (London, 2015), 重熔的结果是形成含锂岩浆, 岩浆 再通过正常的结晶分异作用形成含锂的花岗岩及 花岗伟晶岩,当锂富集到可工业利用的程度时即成 矿。可见,沉积型的外生锂矿与岩浆-热液型的内 生锂矿,并不是互不相干的,而是构成了一个锂的 物质循环过程。这就是内外生一体化的成矿机 制。之所以还要强调多旋回,一方面是沉积过程与 岩浆过程本身就发生在不同的构造背景,分别对应 于沉积旋回与岩浆旋回;另一方面是中国的造山运 动是多旋回的,而内动力地质过程与外动力地质过 程是不断转化的,加里东旋回形成的伟晶岩型锂矿 及含锂的花岗岩,风化剥蚀下来的锂为华力西旋回 的沉积型锂矿提供了物质来源;而石炭纪一二叠纪 沉积岩中富集的锂又为印支-燕山旋回重熔花岗岩 型和伟晶岩型锂矿的形成奠定了物质基础。

# 8 新的找矿方向

十年前,根据《稀有金属矿产地质勘查规范》等 行业标准,岩体型锂矿的边界品位是Li<sub>2</sub>O≥0.5%,工 业品位至少要达到0.8%。随着价格的成倍上涨,其 边界品位和工业品位也应该降低。在新的国家标 准或者行业标准出台之前,各矿山企业可以根据具 体情况给出企业标准。预计"九岭式"岩体型锂矿 将逐渐代替伟晶岩型锂矿成为可工业开采的硬岩 型锂矿的主导类型,其意义相当斑岩型铜矿代替砂 卡岩型铜矿。砂卡岩型铜矿品位高,储量相对小; 而斑岩型铜矿虽然品位低但储量大。岩体型锂矿 也是以"低品位、大吨位、露天开采"为特点,这一 特点将显著地影响新的找矿方向。

如宜春414钽铌矿以往是以钽铌作为主矿种的,锂的含量达不到独立锂矿的边界品位,但其中 共伴生的可开采氧化锂储量也达到110×10<sup>4</sup>t,随着 锂价的成倍上涨,锂云母得到了综合回收,甚至摇 身一变成为主矿种,414 钽铌矿也就成为全球最大 的锂矿山之一。实际上,宜春市境内还有大量的待 详勘地区,如:永兴的化山瓷石矿仅详勘了20%的 区域;江特电机的茜坑仅详勘了40%的区域;奉新 县联盟陶瓷土矿 2020 年末公开招标进行了新增储 量的测定。宜春市含锂矿山分布集中,锂及稀有金 属矿床主要分布于新坊矿区和宜丰-奉新矿区,前 者以宜春414矿为主,矿石资源储量1.4×10°t,氧化 锂品位 0.38%; 后者范围主要包括袁州区新坊乡、宜 丰县花桥乡和同安乡、奉新县上富镇以及高安市的 伍桥镇和华林山镇(王成辉等, 2022)。因此,除了 可可托海式和甲基卡式的伟晶岩型锂矿之外, 宜春 式的蚀变花岗岩型锂矿应该作为当前成矿预测的 重点,除了对武功山-杭州湾成矿带中的二云母二 长花岗岩岩体加以重点研究之外,无论是喜马拉雅 的"淡色花岗岩"还是南岭的、大兴安岭的、秦岭的 以及昆仑-阿尔金等地的所谓的"高分异花岗岩"也 应该纳入到与江西宜春414矿床相同或者相似的预 测类型中,将围岩蚀变也作为重要的预测要素来对 待(表5)。

# 9 新的利用趋势

十年来,锂从传统的冶金合金"配料"摇身一变 而成为最热门的矿种之一,主要是新能源汽车产业 的快速发展。现有产能的不足,尤其是汽车制造大 国的现实需求与锂资源本土供应能力之间的矛盾, 加剧了锂价的高涨,导致了锂电企业的全球"抢 矿",也导致产业布局的不断调整,包括对锂资源本 身的再认识。除了广泛用于冶金工业和军工装备, 锂在电池领域的应用已经众所周知。

实际上,锂作为重要的能源金属,可用于可控

#### 表 5 中国锂矿主要预测类型

Table 5 Main predicted lithium resource types in China

热核聚变,是生产氢弹、中子弹和质子弹的重要原 料,并在高能锂电池、受控热核反应中的应用。它 将成为人类解决能源供应问题的重要原料,被誉为 "21世纪的能源金属"。锂之所以被称为"21世纪 的能源金属"并不只是因为"锂电池",锂电池起到 的是储能作用,本身并不产生能源;而要产生能源, 就得靠"可控核聚变",一旦实现可控核聚变发电, 1g锂放出的有效能量最高可达8500~72000 kW/h, 比<sup>235</sup>U裂变所产生的能量大8倍,相当于3.7t标准 煤(王乃银, 1989),而且绿色环保无污染,对于"双 碳"目标的实现意义巨大。此外,锂作为自然界中 最轻的金属,在冶金合金材料领域广泛使用,通过 降低材料的重量所能节约的能源也是十分可观 的。当铝合金中含锂2%~4%时,可使合金的强度 提高 10%, 但重量却减少 15%~20%, 美国战斗机、 苏联的米格 29 战机等都应用了 Al-Li 合金(王登红 和吴西顺, 2017)。因此, 可以得出, 锂在电池和高 端装备制造业中的用途将越来越广,尤其是℃Li作为 一种特殊资源也将受到越来越广泛的关注。

# 10 新的管理模式

十年前中国锂矿的开发利用是很粗放的,初级品的出口量逐年上升,高端产品又在不断增加进口,当今中国已经成为新能源汽车的第一大国。要变成高端装备制造业的强国,还需要锂矿资源的安全保障。在需要面对的诸多问题中,管理是重中之重。

新疆阿尔泰地区的伟晶岩型锂矿虽然点多面 广,但以往探明的资源量并不大,大部分矿产地没 有探明资源量(邹天人等,2006),可可托海实际上 是以铍为重点,锂资源家底需要尽快查明;四川甲 基卡虽然资源丰富,开发利用的自然条件较为有

	Provincial Provinci Provincial Provincial Provincial Provincial Provincial Pr		·) p · · · · · · · · · · · · · ·						
预测类型	矿床式	大地构造分区	成矿区带	含矿岩系	矿床成因	矿床规模	成矿时代	共生矿产	预测要素
伟晶岩型	可可托海式	哈龙早古生代岩浆弧	北阿尔泰成矿带	花岗伟晶岩脉	花岗伟晶岩型	中型	С—Т	Be, Nb, Ta	中生代花岗岩, 伟晶岩脉
伟晶岩型	甲基卡式	巴颜喀拉– 松潘造山带	北巴颜喀拉- 马尔康成矿带	花岗伟晶岩脉	花岗伟晶岩型	超大型	印支晚期	Be、Nb、Ta	印支晚期花岗岩, 伟晶岩脉
花岗岩型	宜春式	武功山– 玉华山隆起	武功山– 杭州湾成矿带	燕山期雅山花岗岩体	花岗岩型	超大型	К1	Nb, Ta	燕山期花岗岩, 蚀变
沉积型	柴达木式	柴达木地块	柴达木盆地成矿区	第四纪湖相沉积	盐湖沉积型	超大型	Q	K , B	第四纪盐湖
沉积型	扎布耶式	拉萨地块	拉萨地块成矿带	第四纪湖相沉积	盐湖沉积型	大型	Q	K 、B	第四纪盐湖
沉积型	自贡式	四川盆地	四川盆地成矿区	三叠纪沉积	沉积型	小型	Т	K、石盐	地下卤水

利,可以大规模露天开采,但是初级品外运,没有形 成现代化的锂工业基地;江西宜春一带的花岗岩型 锂矿已经步入现代化开发利用的轨道,但锂资源又 面临危机,宜春的锂云母资源,以往是作为钽铌矿 床的伴生资源来评价的,在目前的市场价格下,是 否可以作为锂-铌-钽共生矿床?而内蒙古维拉斯 托的锂云母矿脉、角砾岩筒型矿体是否可以作为一 种独立的工业类型呢?上述问题无论是在新版的 《矿产资源工业要求手册》还是在《稀有金属矿产地 质勘查规范》中均没有明确的规定,不利于地质勘 查工作。因此,有必要在相关主管部门的支持下, 鼓励各企业按照各自的成本和产品方案提出企业 标准或群体标准。否则,探明的资源要想开发利用 也难以获得合法的"身份"。

沉积型锂矿要不要作为工业类型也是一个迫切 需要解决的问题。据报道云南滇中地区发现了"489× 10<sup>4</sup>t世界级特大型锂矿",已有企业投巨资建矿山, 甚至被写入2022年的玉溪市政府工作报告。但是, 这么大量的锂资源,是根据哪个行业标准或者勘探 规范探获的?是否符合环保要求?是否具有市场 竞争力?其开发利用能否获得采矿许可证等等。 这都是新问题、新情况,迫切需要解决,以免此类锂 矿资源的开发重走当年稀土矿(无论是川西牦牛坪 一带的硬岩型稀土矿还是赣南的离子吸附型稀土 矿)无序竞争、乱开乱挖、破坏环境、浪费资源又没 有掌握市场话语权的老路。

在山西、河南、贵州的铝土矿分布区,沉积型锂 资源是非常丰富的;在广西、贵州、云南、山西、内 蒙古等地区的煤矿甚至碳质岩系中也伴生有锂资 源,而且其"资源量"是天文数字,但这部分资源能 否开发利用,在"锂矿大战"中是否误导社会各界, 也是不容忽视的问题。否则,对于同一个矿床、同 一个矿层甚至同一条伟晶岩型矿脉被分割为不同 的矿业权分别进行招拍挂的情况,也将频繁出现。

总之,当前迫切需要构筑新的管理模式,形成 社会主义市场经济体制下根据市场变化尤其是市 场价格变化和企业成本建立起动态评价、资源储量 动态计算的新型管理机制,及时管控好 %Li这样的作 为战略性资源的高端开发与滇中等地尚未上储量 表的沉积型锂资源的开发利用问题,避免可以作为 可控核聚变原料的锂资源被低端利用,也避免不成 熟的、风险极大的潜在资源被过分夸大,以至于影 响国家层面和企业层面的决策,进而波及战略性新 兴产业的安全和可持续发展。

### 11 结语

十年来,中国锂矿已经从卤水型和伟晶岩型为 主,拓展到了多种类型并存的新局面:成矿时代也 从中新生代拓展到古生代等多个期次并存:成矿区 带增加了阿尔金、喜马拉雅、大兴安岭西坡等重要 区带,并在川西的甲基卡、可尔因及新疆的大红柳 滩、吐格曼等地探获了一批可以开发利用的伟晶岩 型锂辉石矿产地,在豫西、晋南、滇中等地发现了 一批沉积型锂矿的远景区;研发出"以锂找锂" "3定2参""遥感找锂""生物找锂"等一批新技术 新方法,探获了一批新的资源储量,形成了新的资 源格局,并且首次从可控核聚变的角度评价了甲基 卡新三号脉的"Li资源,为战略性新兴产业发展布局 提供了科学依据。需要强调的是,蚀变花岗岩型锂 矿(锂云母)应该作为当前成矿预测的重要类型,在 管理层面也应该根据市场经济快速发展的现实需 要及时改进管理机制。

此外,中国在锂矿资源勘查和科学研究方面还 有很多新进展新成果,如深部探测的技术、化探的 成果以及物理选矿等方面的成果,限于篇幅,此不 赘述。可以期望,中国锂矿无论是在地质找矿还是 科学研究以及高端开发利用等方面都将取得更大 的成就。

#### References

- CHEN H S, 1975. On the isotopic ages of some granites and metamorphic rocks from Northwest China[J]. Acta Geological Sinica, 49(1): 45-60. (in Chinese with English abstract)
- CHEN T Y, WANG X Y, REN J S, et al., 1986. Isotopic geochronology of the Jiuyishan and Baimashan composite granitic intrusions, Hunan[J]. Geological Review, 32(5): 433-439. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X J, 1976. Deep-seated magmatic differentiation and the formation of granite pegmatites in a certain district, China[J]. Geochimica, 5(3): 213-229. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Y C, WANG D H, ZHU Y S, et al. , 2007. Chinese mineralization system and assessment of regional mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-1005. (in Chinese)
- CHEN Y C, WANG D H, XU Z G, et al. , 2010a. Technical requirements for research on regional metallogenetic regularity of important minerals in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-179. (in Chinese)
- CHEN Y C, WANG D H, LI H M, et al. , 2010b. Classification scheme of important mineral prediction types[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-222. (in Chinese)

- CHEN Y C, WANG D H, XU Z G, et al., 2015. Important mineral and regional metallogenic regularity in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-795. (in Chinese)
- CHEN Z H, WANG D H, GONG Y F, et al., 2006. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar isotope dating of muscovite from Jingerquan pegmatite rare metal deposit in Hami, Xinjiang, and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 25(4): 470-476. (in Chinese with English abstract)
- CHENG Y Q, 1994. Concise regional geology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-517. (in Chinese)
- DAI J J, WANG D H, DAI H Z, et al., 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)
- FEI G C, TIAN J J, YANG J Y, et al., 2018. New zircon U-Pb age of the super-large Lijiagou spodumene deposit in Songpan Garze Fold Belt, Eastern Tibet: implications for Early Jurassic rare-metal polymetallic event[J]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 92(3): 1274-1275.
- FEI G C, YANG Z, YANG J Y, et al., 2020. New precise timing constraint for the Dangba granitic pegmatite type rare-metal deposit, Markam, Sichuan Province, evidence from cassiterite LA-MC-ICP-MS U-Pb dating[J]. Acta Geologica Sinica, 94(3): 836-849. (in Chinese with English abstract)
- FENG Y G, LIANG T, ZHANG Z, et al., 2019. Columbite U-Pb geochronology of Kalu'an lithium pegmatites in northern Xinjiang, China: implications for genesis and emplacement history of rare-element pegmatites[J]. Minerals, 9(8): 456.
- FU X F, YUAN L P, WANG D H, et al., 2015. Mineralization characteristics and prospecting model of newly discovered X03 rare metal vein in Jiajika orefield, Sichuan[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1172-1186. (in Chinese with English abstract)
- GUO W M, MA S C, SUN Y, et al., 2019. Characteristics and significance of rare metal mineralization in hot-springs of Tengchong area, Yunnan[J].
  Acta Geologica Sinica, 93(6): 1321-1330. (in Chinese with English abstract)
- HAO X F, FU X F, LIANG B, et al., 2015. Formation ages of granite and X03 pegmatite vein in Jiajika, western Sichuan, and their geological significance[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1199-1208. (in Chinese with English abstract)
- HU J L, 2020. Geological-geochemical, geochronology and resourcet prospect analysis for the lithium and beryllium deposit in Daqianggou, Jiulong, Western Sichuan, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-59. (in Chinese with English abstract)
- HUANG X Q, LI P, ZHANG L P, et al., 2021. Geochemical characteristics and metallogenic age of No. 36 pegmatite in Renli rare metal ore field, Hunan Province, and their significance[J]. Mineral Deposits, 40(6): 1248-1266. (in Chinese with English abstract)
- HUANG Y H, DU S H, ZHOU X Z, 1988. Xianghualing rock deposit and minerals[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press: 4-11. (in Chinese)
- JINDALEE Resources Limited. McDermitt lithium project[EB/OL]. https:// www.jindalee.net/site/projects/usa/us-lithium.
- LI H, HONG T, YANG Z Q, et al., 2020. Comparative studying on zircon,

cassiterite and coltan U-Pb dating and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of muscovite raremetal granitic pegmatites: a case study of the northern Tugeman lithiumberyllium deposit in the middle of Altyn Tagh[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(9): 2869-2892. (in Chinese with English abstract)

- LI J K, LIU S B, WANG D H, et al., 2007a. Metallogenic epoch of Xubaoding W-Sn-Be deposit in northwest Sichuan and its tectonic tracing significance[J]. Mineral Deposits, 26(5): 557-562. (in Chinese with English abstract)
- LI J K, WANG D H, ZHANG D H, et al. , 2007b. Mineralizing mechanism and continental geodynamics of typical pegmatite deposit in Western Sichuan, China[M]. Beijing: Atomic Energy Publishing House: 1-182. (in Chinese)
- LI J K, WANG D H, CHEN Y C, 2013. The ore-forming mechanism of the Jiajika pegmatite-type rare metal deposit in Western Sichuan Province: evidence from isotope dating[J]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 87(1): 91-101.
- LI J K, LIU X F, WANG D H, 2014. The metallogenetic regularity of lithium deposit in China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2269-2283. (in Chinese with English abstract)
- LI K, GAO Y B, TENG J X, et al., 2019. Metallogenic geological characteristics, mineralization age and resource potential of the granite-pegmatitetype rare metal deposits in Dahongliutan area, Hetian County, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 52(4): 206-221. (in Chinese with English abstract)
- LI J K, 2021. Annual progress report 2021 of National Key research and development Program "Metallogenic regularity and prediction and evaluation of lithium, beryllium and other strategic metal mineral resources" [R]. (in Chinese)
- LI P, LI J K, PEI R F, et al., 2017. Multistage magmatic evolution and Cretaceous peak metallogenic epochs of Mufushan composite granite mass: constrains from geochronological evidence[J]. Earth Science, 42(10): 1684-1696. (in Chinese with English abstract)
- LI P, LI J K, CHOU I M, et al., 2019. Mineralization epochs of granitic raremetal pegmatite deposits in the Songpan-Ganzê Orogenic Belt and their implications for orogeny [J]. Minerals, 9(5): 280.
- LI P, ZHOU F C, LI J K, et al., 2020. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of the concealed granite of Renli-Chuanziyuan deposit, NE Hunan and geological significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 44(3): 486-500. (in Chinese with English abstract)
- LI W F, LI S P, WANG B Z, et al., 2021. Discovery of the (beryl-bearing) spodumene pegmatite in the Caolong area in the Sanjiang Northern section of the Qinghai: implications for Li-Be mineralization[J]. Geotectonica et Metallogenia: 1-25,doi: 10.16539/j.ddgzyckx.2021.05.021. (in Chinese with English abstract)
- LI Y S, ZHU J C, ZHENG M G, et al., 1986. Rb-Sr chronology and genesis of Jiuyishan granite complex, south China[J]. Uranium Geology, 2(5): 257-264. (in Chinese with English abstract)
- LIANG T, TENG J X, WANG D H, et al., 2021. The Dahongliutan lithiumberyllium rare metal deposit, Xinjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-262. (in Chinese)
- LIN C X, LIU Y M, WANG Z G, et al., 1994. Rare metal and rare earth element deposits in China[M]//SONG S H. Beijing: Geological Publishing

House: 296-299. (in Chinese)

- 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 L J, FU X F, WANG D H, et al., 2015. Geological characteristics and metallogeny of Jiajika-style rare metal deposits[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1187-1198. (in Chinese with English abstract)
- LIU L J, WANG D H, YANG Y Q, et al., 2016. Metallogenic characteristics of X03 rare metal vein in Jiajika of Sichuan[J]. Journal of Guilin University of Technology, 36(1): 50-59. (in Chinese with English abstract)
- LIU L J, WANG D H, DAI H Z, et al., 2017a. Geochemical characteristics of REE and its implications to X03 super-large lithium pegmatite vein, Jiajika, Sichuan[J]. Earth Science, 42(10): 1673-1683. (in Chinese with English abstract)
- LIU L J, WANG D H, HOU K J, et al., 2017b. Application of lithium isotope to Jiajika new No. 3 pegmatite lithium polymetallic vein in Sichuan[J]. Earth Science Frontiers, 24(5): 167-171. (in Chinese with English abstract)
- LIU S B, WANG C H, WANG D H, et al., 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)
- LONDON D, 2015. Reply to Thomas and Davidson on "a petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites" (London, 2014a)[J]. Lithos, 212-215: 469-484.
- LV Z H, ZHANG H, TANG Y, 2015. Petrogenetic relationship between the Bieyesamasi Li Li-Nb-Ta deposit and hosting granitic rocks, Xinjiang[J]. Acta Mineralogica Sinica, 35(S1): 323. (in Chinese)
- LV Z H, ZHANG H, TANG Y, et al., 2018. Petrogenesis of syn-orogenic rare metal pegmatites in the Chinese Altai: evidences from geology, mineralogy, zircon U-Pb age and Hf isotope[J]. Ore Geology Reviews, 95: 161-181.
- MA S C, WANG D H, LIU S B, et al., 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)
- MA Z L, ZHANG H, TANG Y, et al., 2015. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of pegmatites from the Kaluan mining area in the Altay, Xinjiang and their genetic relationship with the Halong granite[J]. Geochimica, 44(1): 9-26. (in Chinese with English abstract)
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. A bonanza was occurred in McDermitt lithium mine drilling in the US[EB/OL]. (2022-03-17). http://geoglobal.mnr.gov.cn/zx/kcykf/ztjz/202203/t2022 0317\_8238789.htm.
- National Stratigraphic Commission, 2002. Specification of China regional chronostratigraphic (geochronological) table[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-134. (in Chinese)

PAN G T, XIAO Q H, LU S N, et al., 2009. Subdivision of tectonic units in

China[J]. Geology in China, 36(1): 1-28. (in Chinese with English abstract)

- PAN T, LI S P, REN H, et al., 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)
- PENG H L, HE N Q, WANG M C, et al., 2018. Geological characteristics and metallogenic regularity of West Track 509 rare polymetallic deposit in Dahongliutan region, Hetian, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 51(3): 146-154. (in Chinese with English abstract)
- QIAO G B, WU Y Z, LIU T, 2020. Formation age of the Dahongliutan pegmatite type rare metal deposit in Western Kunlun Mountains: evidence from muscovite <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar isotopic dating[J]. Geology in China, 47(5): 1591-1593. (in Chinese with English abstract)
- QIN K Z, ZHAO J X, HE C T, et al., 2021. Discovery of the Qongjiagang giant lithium pegmatite deposit in Himalaya, Tibet, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(11): 3277-3286. (in Chinese with English abstract)
- QIU N M, YANG Y Q, 1985. Study on magmatic and metallogenic regularity and prospecting direction of nanping Pegmatite field, Fujian Province[R].
  Beijing: Development and Research Center (National Geological Archives of China): 1-236. (in Chinese)
- REN B Q, ZHANG H, TANG Y, et al., 2011. LA-ICPMS U-Pb zircon geochronology of the Altai pegmatites and its geological significance[J]. Acta Mineralogica Sinica, 31(3): 587-596. (in Chinese with English abstract)
- REN J S, WANG Z X, CHEN B W, 1999. Tectonics of China from a global perspective: a brief description of tectonics maps of China and adjacent areas[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-50. (in Chinese)
- Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1987. 1: 200000 geological map and regional geological survey report, Shiqu[R].
- TU Q J, HAN Q, LI P, et al., 2019. Basic characteristics and exploration progress of the spodumene ore deposit in the Dahongliutan area, West Kunlun[J]. Acta Geologica Sinica, 93(11): 2862-2873. (in Chinese with English abstract)
- WANG B Z, HAN J, XIE X L, et al., 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 C H, WANG D H, CHEN C, et al., 2019. Progress of research on the Shilizing rare meatals mineralization from Jiuling-type rock and its significance for prospecting[J]. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1359-1373. (in Chinese with English abstract)
- WANG C H, WANG D H, SUN Y, et al., 2022. Investigation and research progress of rare and rare earth minerals in key ore-concentrated areas of South China[M]. Beijing: Science Press: 1-357. (in Chinese)
- WANG D H, CHEN Y C, XU Z G, 2001. Chronological study of Caledonian metamorphic pegmatite muscovite deposits in the Altay Mountains, Northwestern China, and its significance[J]. Acta Geologica Sinica, 75(3):419-425. (in Chinese with English abstract)
- WANG D H, CHEN Y C, XU Z G, et al., 2002. Study on metallogenetic series and metallogenetic regularity of Altai Metallogenic Province[M].

Beijing: Atomic Energy Publishing House: 1-493. (in Chinese)

- WANG D H, LI J K, FU X F, 2005. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating for the Jiajika pegmatitetype rare metal deposit in western Sichuan and its significance[J]. Geochimica, 34(6): 541-547. (in Chinese with English abstract)
- WANG D H, FU X F, 2013. Prospecting breakthrough of lithium resources in periphery of Jiajika, Sichuan Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 32(6): 987. (in Chinese)
- WANG D H, XU Z G, SHENG J F, et al., 2014. Progress on the study of regularity of major mineral resources and regional metallogenic regularity in China: a review[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2176-2191. (in Chinese with English abstract)
- WANG D H, WANG R J, FU X F, et al., 2016a. A discussion on the major problems related to geological investigation and assessment for energy metal resources base: a case study of the Jiajika large lithium mineral resource base[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(4): 471-480. (in Chinese with English abstract)
- WANG D H, WANG R J, SUN Y, et al., 2016b. A review of achievements in the three-type rare mineral resources (rare resources, rare earth and rarely scattered resources) survey in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(5): 569-580. (in Chinese with English abstract)
- WANG D H, LIU L J, HOU J L, et al., 2017. A preliminary review of the application of "Five levels+Basement" model for Jiajika-style rare metal deposits[J]. Earth Science Frontiers, 24(5): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- WANG D H, WU X S, 2017. The mystery of lithium, the energy metal of the 21st century[J]. Scientific and Cultural Popularization of Land and Resources(4): 22-27. (in Chinese)
- WANG D H, CHEN Y C, JIANG B, et al., 2020. Preliminary study on the Triassic continental mineralization system in China[J]. Earth Science Frontiers, 27(2): 45-59. (in Chinese with English abstract)
- WANG D H, DAI H Z, YU Y, et al., 2021a. Theory, method and practice of investigation and evaluation of large lithium resource base: a case study of Jianjika super large lithium deposit in western Sichuan[M]. Beijing: Science Press: 1-458. (in Chinese)
- WANG D H, SUN Y, ZHOU S C, et al., 2021b. 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, LI P, MA H D, et al., 2017. Discovery of the Bailongshan superlarge lithium-rubidium deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang, and its prospecting implication[J]. Geotectonica et Metallogenia, 41(6): 1053-1062. (in Chinese with English abstract)
- WANG H, GAO H, ZHANG X Y, et al., 2020. Geology and geochronology of the super-large Bailongshan Li-Rb-(Be) rare-metal pegmatite deposit, West Kunlun orogenic belt, NW China[J]. Lithos, 360-361: 105449.
- WANG N Y, 1989. The attractive metal energy source[J]. Today Science and Technology(9): 32. (in Chinese)
- WANG Q B, 2020. Indication of geogas prospecting technology to concealed ore body in Jiajika rare metal orefield[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology: 1-62. (in Chinese with English abstract)

WANG R J, WANG D H, LI J K, et al. , 2015. Rare, rare earth and rarely

scattered resources and its development and utilization[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-429. (in Chinese)

- WANG X Q, LIU H L, WANG W, et al., 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)
- WEN C H, CHEN J F, CAO C H, 2020. Study on the mineralization of rare metal pegmatite in Lianyunshan ore district, Hunan Province[J]. Geological Review, 66(S1): 135-136. (in Chinese with English abstract)
- XU S Q, TU Q J, 2017. Application of deposit modeling and integrated geological information using in mineral resource potential assessment, taking Dahongliutan of West Kunlun as an example[J]. Xinjiang Geology, 35(3): 285-289. (in Chinese with English abstract)
- XU X W, LI H, SHI F P, et al., 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 G, CHEN Y C, WANG D H, et al., 2008. Scheme of the classification of the minerogenetic units in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-138. (in Chinese)
- YAN Q H, WANG H, QIU Z W, et al., 2017. Cassiterite and tantalite geochronology of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, western, and its geological significance[C]//Collection of the 9th National Member Congress and the 16th annual academic Conference of Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Xi'an: Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry: 833-834. (in Chinese)
- YAN Q H, QIU Z W, WANG H, et al., 2018. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, West Kunlun, Xinjiang (NW China): constraints from LA-ICP-MS U-Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite[J]. Ore Geology Reviews, 100: 561-573.
- YANG F, LI X F, FENG Z H, et al., 2009. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of muscovite from greisenized granite and geological significance in Limu tin deposit[J]. Journal of Guilin University of Technology, 29(1): 21-24. (in Chinese with English abstract)
- YANG Y Q, WANG D H, LIU S B, et al., 2020. The co-occurrence mechanism of two types of spodumene ore bodies and their prospecting significance in Jiajikan, Sichuan Province[J]. Acta Geologica Sinica, 94(1): 287-302. (in Chinese with English abstract)
- YANG Y Q, WANG D H, SUN Y, et al., 2021. Review on research and exploration of the 3R mineral resources during the past 70 years by Institute of Mineral Resources[J]. Mineral Deposits, 40(4): 655-692. (in Chinese with English abstract)
- YU Y, WANG D H, GAO J Q, et al., 2019a-02-15. Method for predicting concealed lithium deposits based on lithium element content in plants: China, 109343143A[P]. (in Chinese)
- YU Y, WANG D H, GAO J Q, et al., 2019b. A review of "three-type rare resources" biological methods for mineral exploration and its application in China[J]. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1533-1542. (in Chinese with English abstract)
- YUAN Z X, BAI G, 2001. Temporal and spatial distribution of endogenic rare and rare earth mineral deposits of China[J]. Mineral Deposits, 20(4): 347-354. (in Chinese with English abstract)

- YUAN Z X, HE H H, LIU L J, et al., 2016. Rare metal and rare earth element deposits abroad[M]. Beijing: Science Press: 1-170. (in Chinese)
- 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 L, PENG J T, COULSON I M, et al., 2014. Cassiterite U-Pb and muscovite <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar age constraints on the timing of mineralization in the Xuebaoding Sn-W-Be deposit, western China[J]. Ore Geology Reviews, 62: 315-322.
- ZHANG H, LV Z H, TANG Y, 2019. Metallogeny and prospecting model as well as prospecting direction of pegma-tite-type rare metal ore deposits in Altay orogenic belt, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 38(4): 792-814. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H F, ZHANG L, HARRIS N, et al., 2006. U-Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 152(1): 75-88.
- ZHANG J, ZHANG Y F, TIAN X M, et al., 2021. Geological characteristics and genesis of the Caijia granitic pegmatite-type lithium deposit in Lushi County, Henan Province[J]. Geology and Exploration, 57(3): 497-506. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG T, 2021. Mineral geology of China Inner Mongolia volume (internal report )[R]. (in Chinese)
- ZHAO J X, HE C T, QIN K Z, et al., 2021. Geochronology, source features and the characteristics of fractional crystallization in pegmatite at the Qongjiagang giant pegmatite-type lithium deposit, Himalaya, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(11): 3325-3347. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO R Y, LI W H, JIANG C Y, et al., 2013. Age and tectonic significance of uranium-bearing granitic pegmatite in Danfeng area, Shaanxi Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 33(S2): 880-882. (in Chinese)
- ZHAO Y J, 2007. Mesozoic granitoids in Eastern Songpan-Garzê: geochemistry, petrogenesis and tectonic implications[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences: 1-101. (in Chinese with English abstract)
- 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, LI G W, et al., 2020. Genesis of the Markam gneiss dome within the Songpan-Ganzi orogenic belt, eastern Tibetan Plateau [J]. Lithos, 362-363: 105475.
- ZHOU S C, WANG D H, LIU X H, et al., 2022. Technical methods and demonstration of deep prospecting for key minerals[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- ZOU T R, YANG Y Q, CAO H Z, et al, 1980. Geochemical characteristics and genesis of the 112 pegmatite dike in Xinjiang, China[R]. Beijing: Research Report of Chinese Academy of Geological Sciences: 1-157. (in Chinese)
- ZOU T R, LI Q C, 2006. Rare and rare earth metallic deposits in Xinjiang,

China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-284. (in Chinese) 附中文参考文献

- 陈好寿,1975.西北地区某些花岗岩及变质岩同位素年龄数据讨论 [J].地质学报,49(1):45-60.
- 陈廷愚,王雪英,任纪舜,等,1986.湖南九嶷山及白马山复式花岗岩 体的同位素地质年代测定[J].地质论评,32(5):433-439.
- 陈西京, 1976. 深处岩浆分异与某地花岗伟晶岩的形成[J]. 地球化学, 5(3): 213-229.
- 陈毓川,王登红,朱裕生,等,2007.中国成矿体系与区域成矿评价 [M].北京:地质出版社:1-1005.
- 陈毓川,王登红,徐志刚,等,2010a.全国重要矿产和区域成矿规律研 究技术要求 [M].北京:地质出版社:1-179.
- 陈毓川,王登红,李厚民,等,2010b.重要矿产预测类型划分方案[M]. 北京:地质出版社:1-222.
- 陈毓川,王登红,徐志刚,等,2015.中国重要矿产和区域成矿规律 [M].北京:地质出版社:1-795.
- 陈郑辉,王登红,龚羽飞,等,2006.新疆哈密镜儿泉伟晶岩型稀有金属矿床<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质,25(4):470-476.
- 程裕淇, 1994. 中国区域地质概论 [M]. 北京: 地质出版社: 1-517.
- 代晶晶,王登红,代鸿章,等,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.
- 费光春,杨峥,杨继忆,等,2020.四川马尔康党坝花岗伟晶岩型稀有 金属矿床成矿时代的限定:来自LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年 的证据[J].地质学报,94(3):836-849.
- 付小方,袁蔺平,王登红,等,2015.四川甲基卡矿田新三号稀有金属 矿脉的成矿特征与勘查模型[J].矿床地质,34(6):1172-1186.
- 郭唯明,马圣钞,孙艳,等,2019.云南腾冲热泉中稀有金属矿化特征 及其意义[J].地质学报,93(6):1321-1330.
- 郝雪峰,付小方,梁斌,等,2015.川西甲基卡花岗岩和新三号矿脉的 形成时代及意义[J].矿床地质,34(6):1199-1208.
- 胡军亮,2020.川西九龙打枪沟锂铍矿床地质-地球化学、年代学及 资源前景 [D].成都:成都理工大学:1-59.
- 黄小强,李鹏,张立平,等,2021.湖南仁里稀有金属矿田36号伟晶岩 地球化学特征、成矿时代及其意义[J].矿床地质,40(6):1248-1266.
- 黄蕴慧,杜绍华,周秀仲,1988.香花岭岩石矿床与矿物[M].北京:北 京科学技术出版社:4-11.
- 李杭,洪涛,杨智全,等,2020.稀有金属花岗伟晶岩锆石、锡石与铌 钽铁矿 U-Pb和白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>99</sup>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.
- 李建康,刘善宝,王登红,等,2007a.川西北雪宝顶钨锡铍矿床的成 矿年代及其构造示踪意义[J].矿床地质,26(5):557-562.
- 李建康,王登红,张德会,等,2007b.川西伟晶岩型矿床的形成机制 及大陆动力学背景[M].北京:原子能出版社:1-182.
- 李建康,刘喜方,王登红,2014.中国锂矿成矿规律概要[J].地质学报,88(12):2269-2283.
- 李建康,2021. 国家重点研发计划"锂、铍等战略性金属矿产资源成 矿规律与预测评价"项目2021年度进展报告[R].
- 李侃,高永宝,滕家欣,等,2019.新疆和田县大红柳滩一带花岗伟晶 岩型稀有金属矿成矿地质特征、成矿时代及找矿方向[J].西北 地质,52(4):206-221.

- 李鹏,李建康,裴荣富,等,2017.幕阜山复式花岗岩体多期次演化与 白垩纪稀有金属成矿高峰:年代学依据[J].地球科学,42(10): 1684-1696.
- 李鹏,周芳春,李建康,等,2020. 湘东北仁里-传梓源铌钽矿床隐伏 花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 大地 构造与成矿学,44(3):486-500.
- 李五福,李善平,王秉璋,等,2021.青海三江北段草陇(绿柱石-)锂辉 石花岗伟晶岩的发现及其Li-Be找矿意义[J].大地构造与成矿 学:1-25,doi:10.16539/j.ddgzyckx.2021.05.021.
- 李耀菘,朱杰辰,郑懋公,等,1986.九嶷山花岗杂岩体的 Rb-Sr 年代 学及其成因[J].铀矿地质,2(5):257-264.
- 梁婷,滕家欣,王登红,等,2021.新疆大红柳滩锂铍稀有金属矿床 [M].北京:地质出版社:1-262.
- 林传仙,刘义茂,王中刚,等,1994.中国稀有稀土矿床[M]//宋叔和. 中国矿床(中册).北京:地质出版社:296-299.
- 刘丽君,付小方,王登红,等,2015.甲基卡式稀有金属矿床的地质特征与成矿规律[J].矿床地质,34(6):1187-1198.
- 刘丽君,王登红,杨岳清,等,2016.四川甲基卡新三号稀有金属矿脉 成矿特征的初步研究[J].桂林理工大学学报,36(1):50-59.
- 刘丽君,王登红,代鸿章,等,2017a.四川甲基卡新三号超大型锂矿 脉稀土元素地球化学[J].地球科学,42(10):1673-1683.
- 刘丽君,王登红,侯可军,等,2017b.锂同位素在四川甲基卡新三号 矿脉研究中的应用[J].地学前缘,24(5):167-171.
- 刘善宝,王成辉,王登红,等,2020.四川甲基卡锂矿伟晶岩转石分布 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.
- 吕正航,张辉,唐勇,2015.新疆别也萨麻斯L1号伟晶岩脉Li-Nb-Ta矿床与围岩花岗岩成因关系研究[J].矿物学报,35(S1):323.
- 马圣钞,王登红,刘善宝,等,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.
- 马占龙,张辉,唐勇,等,2015.新疆卡鲁安矿区伟晶岩锆石 U-Pb定 年、铪同位素组成及其与哈龙花岗岩成因关系研究[J].地球化 学,44(1):9-26.
- 内蒙古地质勘查有限责任公司,2018.内蒙古自治区克什克腾旗维 拉斯托矿区锂多金属矿勘探报告[R].
- 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等,2009.中国大地构造单元划分[J].中国 地质,36(1):1-28.
- 潘彤,李善平,任华,等,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.
- 彭海练, 贺宁强, 王满仓, 等, 2018. 新疆和田县大红柳滩地区 509 道 班西稀有多金属矿地质特征与成矿规律探讨[J]. 西北地质, 51(3): 146-154.
- 乔耿彪,伍跃中,刘拓,2020.西昆仑大红柳滩伟晶岩型稀有金属矿的形成时代:来自白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar同位素年龄的证据[J].中国地质,47(5):1591-1593.
- 秦克章,赵俊兴,何畅通,等,2021.喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩型 锂矿的发现及意义[J].岩石学报,37(11):3277-3286.
- 仇年铭,杨岳清,1985.福建省南平伟晶岩田成岩成矿规律及找矿方 向研究报告 [R].北京:中国地质调查局发展研究中心:1-236.
- 全国地层委员会,2002.中国区域年代地层(地质年代)表说明书[M]. 北京:地质出版社:1-134.

- 任宝琴,张辉,唐勇,等,2011.阿尔泰造山带伟晶岩年代学及其地质意 义[J].矿物学报,31(3):587-596.
- 任纪舜,王作勋,陈炳蔚,1999.从全球看中国大地构造:中国及邻区 大地构造图简要说明书[M].北京:地质出版社:1-50.
- 四川省地矿局, 1987. 1/20万地质图及区调报告·石渠幅 [R].
- 涂其军,韩琼,李平,等,2019.西昆仑大红柳滩一带锂辉石矿基本特 征和勘查新进展[J].地质学报,93(11):2862-2873.
- 王秉璋,韩杰,谢祥镭,等,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.
- 王成辉,王登红,陈晨,等,2019.九岭式狮子岭岩体型稀有金属成矿 作用研究进展及其找矿意义[J].地质学报,93(6):1359-1373.
- 王成辉,王登红,孙艳,等,2022.华南重点矿集区稀有和稀土矿产调 查研究进展 [M].北京:科学出版社:1-357.
- 王登红,陈毓川,徐志刚,2001.阿尔泰加里东期变质成因伟晶岩型 白云母矿床的成矿年代证据及其意义[J].地质学报,75(3): 419-425.
- 王登红,陈毓川,徐志刚,等,2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿 规律 [M].北京:原子能出版社: 1-493.
- 王登红,李建康,付小方,2005.四川甲基卡伟晶岩型稀有金属矿床的成矿时代及其意义[J].地球化学,34(6):541-547.
- 王登红,付小方,2013.四川甲基卡外围锂矿找矿取得突破[J]. 岩矿 测试,32(6):987.
- 王登红,徐志刚,盛继福,等,2014.全国重要矿产和区域成矿规律研 究进展综述[J].地质学报,88(12):2176-2191.
- 王登红,王瑞江,付小方,等,2016a.对能源金属矿产资源基地调查 评价基本问题的探讨:以四川甲基卡大型锂矿基地为例[J].地 球学报,37(4):471-480.
- 王登红,王瑞江,孙艳,等,2016b.我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资 源调查研究成果综述[J].地球学报,37(5):569-580.
- 王登红, 刘丽君, 侯江龙, 等, 2017. 初论甲基卡式稀有金属矿床"五 层楼+地下室" 勘查模型[J]. 地学前缘, 24(5): 1-7.
- 王登红,吴西顺,2017.21世纪的能源金属:锂的奥秘 [J]. 国土资源科 普与文化 (4): 22-27.
- 王登红,陈毓川,江彪,等,2020.中国三叠纪大陆成矿体系[J].地学 前缘,27(2):45-59.
- 王登红,代鸿章,于扬,等,2021a.大型锂资源基地调查评价的理论、 方法与实践:以川西甲基卡超大型锂矿为例 [M].北京:科学出版社:1-458.
- 王登红,孙艳,周四春,等,2021b. 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.
- 王核,李沛,马华东,等,2017.新疆和田县白龙山超大型伟晶岩型锂 铷多金属矿床的发现及其意义[J].大地构造与成矿学,41(6): 1053-1062.
- 王乃银, 1989. 令人垂青的金属能源 [J]. 今日科技 (9): 32.
- 王秋波,2020.甲基卡稀有金属矿区地气测量技术对隐伏矿体的指示 [D]. 绵阳:西南科技大学:1-62.
- 王瑞江,王登红,李建康,等,2015.稀有稀土稀散矿产资源及其开发 利用[M].北京:地质出版社:1-429.
- 王学求,刘汉粮,王玮,等,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.
- 文春华,陈剑锋,曹创华,2020.湖南连云山矿集区稀有金属伟晶岩

成矿作用研究[J]. 地质论评, 66(S1): 135-136.

- 徐仕琪,涂其军,2017. 矿床模型综合地质信息在稀有金属矿定量预 测中的应用: 以西昆仑大红柳滩为例[J]. 新疆地质,35(3):285-289.
- 徐兴旺,李杭,石福品,等,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.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 等, 2008. 中国成矿区带划分方案 [M]. 北京: 地质出版社: 1-138.
- 闫庆贺,王核,丘增旺,等,2017.西昆仑大红柳滩稀有金属伟晶岩矿 床锡石及铌钽铁矿年代学及其地质意义[C]//中国矿物岩石地球 化学学会第九次全国会员代表大会暨第16届学术年会文集.西 安:中国矿物岩石地球化学学会:833-834.
- 杨锋,李晓峰,冯佐海,等,2009.栗木锡矿云英岩化花岗岩白云母 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年龄及其地质意义[J].桂林工学院学报,29(1):21-24.
- 杨岳清,王登红,刘善宝,等,2020.四川甲基卡两类锂辉石矿体共存 机制及其找矿意义[J].地质学报,94(1):287-302.
- 杨岳清,王登红,孙艳,等,2021.矿产资源研究所"三稀"矿产研究 与找矿实践70年历程:回顾与启示[J].矿床地质,40(4):655-692.
- 于扬,王登红,高娟琴,等,2019a-02-15.一种基于植物中锂元素含量 预测隐伏锂矿床的方法:中国,109343143A[P].
- 于扬,王登红,高娟琴,等,2019b.中国三稀矿产生物找矿技术方法 及其应用综述[J].地质学报,93(6):1533-1542.
- 袁忠信,白鸽,2001.中国内生稀有稀土矿床的时空分布[J]. 矿床地 质,20(4):347-354.
- 袁忠信,何晗晗,刘丽君,等,2016.国外稀有稀土矿床[M].北京:科学出版社:1-170.

- 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.
- 张辉,吕正航,唐勇,2019.新疆阿尔泰造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.
- 张杰,张彦锋,田晓敏,等,2021.河南省卢氏县蔡家花岗伟晶岩型锂 矿地质特征及矿床成因分析[J].地质与勘探,57(3):497-506.
- 张彤, 2021. 中国矿产地质志·内蒙古卷(内部报告)[R].
- 赵俊兴,何畅通,秦克章,等,2021.喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩锂 矿的形成时代、源区特征及分异特征[J].岩石学报,37(11): 3325-3347.
- 赵如意,李卫红,姜常义,等,2013.陕西丹凤地区含铀花岗伟晶岩年 龄及其构造意义[J].矿物学报,33(S2):880-882.
- 赵永久,2007. 松潘-甘孜东部中生代中酸性侵入体的地球化学特征、岩石成因及构造意义 [D]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所:1-101.
- 中华人民共和国自然资源部.美国麦克德米特锂矿钻探见富矿 [EB/OL].(2022-03-17).http://geoglobal.mnr.gov.cn/zx/kcykf/ztjz/202203/ t20220317\_8238789.htm.
- 周四春,王登红,刘晓辉,等,2022.关键矿产深部找矿的技术方法与示范 [M].北京:地质出版社.
- 邹天人,杨岳清,曹惠志,等,1980.新疆[阿勒泰地区]112 伟晶岩脉 的物质成分、矿化特征及其成因的研究[R].北京:地质部矿床 地质研究所:1-157.
- 邹天人,李庆昌,2006.中国新疆稀有及稀土金属矿床[M].北京:地质出版社:1-284.

### 

#### 获奖者简历:

王登红,中国地质科学院矿产资源研究所二级研究员。2021年荣获第17次李 四光地质科学奖科研奖。主要从事与矿产资源有关的科研工作。创新提出大型锂 矿多旋回深循环内外生一体化、离子吸附型稀土矿8多3深等成矿理论及"南钨北 扩、东钨西扩"等新认识,构建完善"五层楼+地下室"层脉组合成矿模式勘查模 型,完善生物找矿、水化学找矿等一系列创新技术,在四川甲基卡发现新三号脉 等十多处矿产地,在广东大宝山、江西九龙脑等取得找矿新突破,推动甲基卡锂 矿列入国家《十三五矿产资源规划》,为矿政管理提供科技支撑,为我国战略性 新兴产业发展提供资源保障;组织实施《中国矿产地质志》这一自然资源部重大 工程,主编《矿产地名录卷》《典型矿床总述卷》《钨矿卷》等十余卷,填补我



国矿产地质领域大型志书空白,提升了我国矿床学研究整体水平。曾获国家科技进步二等奖1项,省部 级一等奖5项,二等奖1项及中国矿物岩石地球化学学会侯德封奖等多个奖项。公开出版第一作者专著 16部,发表论文500多篇(第一作者164篇)。享受国务院政府特殊津贴。