

doi:10.3799/dqkx.2017.142

试论国内外大型超大型锂辉石矿床的特殊性与找矿方向

王登红¹, 刘丽君², 代鸿章¹, 刘善宝¹, 侯江龙¹, 吴西顺³

1. 中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

3. 中国地质调查局地学文献中心中国地质图书馆, 北京 510640

摘要: 锂辉石矿床是锂矿的重要类型,但曾经因为开采成本高于盐湖提锂而被停止勘查.近年来随着新兴产业快速发展对锂的需求成倍增长,对锂辉石的重新开采已经成为锂资源的重要来源.通过对国内外7个大型超大型锂辉石矿床一些成矿特点的归纳总结,认为大规模的锂辉石成矿作用总是伴有一定的特殊性,如:伟晶岩型的锂辉石矿床可以产出在基性岩而不局限于花岗岩、片麻岩、片岩等常见的围岩中;锂辉石在伟晶岩中可以是粗晶的,也可以是细晶的;含锂辉石的伟晶岩脉可以是分带性良好的,也可以是分带性很差的;矿脉的形态可以是简单的板状体也可以是极其复杂的;成矿时代可以老到太古宙也可以晚到新生代;成矿构造环境可以是稳定的地台区也可以是构造活跃的喜马拉雅造山带.从容矿围岩特殊性、成矿时代特殊性、构造背景特殊性、矿化分带特殊性等方面探讨了大型超大型锂辉石矿床的找矿方向,指出,在找矿的过程中不能局限于花岗岩体的周边,也不能只以古老地台区的西澳的格林布什或北美的坦科为唯一模板,更不能只想到新疆可可托海的复杂性而忽略还有四川甲基卡、可尔因这样规模可十倍于大型矿床但形态却十分简单的超大型矿床的存在,找矿过程中也不能只考虑传统地质方法而要结合实际情况建立适当的物探化探等勘查模型.只要具体问题具体分析,拓展找矿思路,恰当使用勘查技术手段,要取得新的找矿突破是完全可能的.

关键词: 锂辉石;大型超大型矿床;找矿方向;成矿时代;成矿区带;矿床学.

中图分类号: P577

文章编号: 1000-2383(2017)12-2243-15

收稿日期: 2017-04-02

Discussion on Particularity and Prospecting Direction of Large and Super-Large Spodumene Deposits

Wang Denghong¹, Liu Lijun², Dai Hongzhang¹, Liu Shanbao¹, Hou Jianglong¹, Wu Xishun³1. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*2. *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*3. *GEO-Documentation Center, China Geological Survey, Beijing 510640, China*

Abstract: The spodumene deposit is an important type of lithium ore deposit, but its prospecting has been discontinued because of its higher cost than salt lake in extracting lithium. Recently, the demand for lithium has multiplied due to the rapid development of emerging industries, and the recovery of spodumene has become an important source of lithium resources. This article summarizes some metallogenic characteristics of seven large and super-large spodumene deposits at home and abroad, and it is concluded that certain particularities are always associated with large-scale spodumene mineralization. For example, spodumene ore deposit of pegmatite type can be hosted within basic rocks instead of granite, gneiss, schist and other common host rocks. The size of spodumene grain can be either coarse or fine in the pegmatite. The zonality of pegmatite veins containing spodumene can be of good or not. The shape of the pegmatite veins can be simple or extremely complex. The metallogenic epoch can be old

基金项目: 国家重点研发计划“锂能源金属矿产基地深部探测技术示范”项目“我国锂能源金属成矿规律、靶区优选与重点查证”课题(No.2017YFC0602701);中国地质调查局“大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查”工程“川西甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价”项目(No.DD20160055);华南重点矿集区稀有稀散和稀土矿产调查项目(No.DD20160056);中国地质调查局中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务(矿产地质志)项目(No.DD20160346).

作者简介: 王登红(1967—), 研究员, 博导, 主要从事矿产资源研究. ORCID: 0000-0001-8575-2647. E-mail: wangdenghong@sina.com

引用格式: 王登红, 刘丽君, 代鸿章, 等, 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. 地球科学, 42(12): 2243-2257.

to the Archean or be new to the Cenozoic. The metallogenic tectonic environment can be a stable platform or an active Himalayan orogenic belt. In this paper, the prospecting direction of large and super-large spodumene deposits is discussed in terms of the particularity of the host rock, the mineralization epoch, the tectonic background and the mineralization zonality and so on. It points out that prospecting can neither be confined to the periphery of granite rock mass, nor taking the Greenbushes in Western Australian or the Tanco in North American located in old platform as the only case. It can't only think about the complexity of Xinjiang Koktokey, and oversight other super-large deposits whose size can be ten times in large deposits but in simple form such as the Jiajika and the Ke'eryin pegmatite fields in Sichuan. Also, it can not only consider the traditional geological method but also combine the actual situation to establish proper geophysical and geochemical prospecting models. As long as the specific problem is analyzed, the prospecting method is expanded, the exploration technique is used properly, it is completely possible to obtain a new prospecting breakthrough.

Key words: spodumene; large and super-large ore deposits; prospecting direction; metallogenic epoch; mineralization belt; mineral deposit.

0 引言

随着新兴产业的快速发展,伟晶岩型锂矿重新受到重视,国内外新发现了(或老矿区扩大规模)一批大型超大型锂辉石矿床,为满足市场需求提供了资源保障。其中,2013年以来我国国内新发现或显著扩大规模的锂辉石矿床就有四川的甲基卡、李家沟、党坝、业隆沟等多处(王登红和付小方,2013;付小方等,2014;费光春等,2014;古城会,2014;四川省地质矿产勘查开发局化探队和马尔康金鑫矿业有限公司,2015;饶魁元,2016;王子平等,2017),但也有一些著名矿床正在快速消耗资源,甚至在价格高涨的大好形势下却因为资源枯竭而不得不闭坑(如新疆的可可托海3号脉)。为我国新兴产业的可持续发展提供锂资源保障,已经是当务之急。2013年以来,陕西、甘肃、河北、黑龙江等地也设立了一些勘查项目,但找矿效果不佳,其原因之一就是伟晶岩型矿床当作单一的“花岗伟晶岩型”矿床,找矿重点只局限于伟晶岩、局限于燕山期岩体的接触带、局限于化探。本文在对国内外一些大型超大型锂矿的地质特征加以初步归纳的基础上,概要地总结了这些矿床的一些特殊性,进而简单概括了成矿规律,探讨了找矿方向,分析了勘查技术手段,期望有助于地质找矿的新突破。

1 对锂辉石资源需求的分析

尽管世界上最大的锂矿是盐湖或卤水型锂矿,但本文重点讨论的是硬岩型的锂辉石矿床(王登红等,2014)。正因为卤水中锂矿资源丰富(据20世纪80、90年代的估计,卤水型锂矿足够用100年),开采成本也比伟晶岩型锂辉石矿床低得多,因而在20

世纪末,伟晶岩型锂辉石矿床被市场(也被有的专家)认为是“应该抛弃的类型”。1994年全世界的锂产量只有5800t(王瑞江等,2015)。岂料进入21世纪以来,锂电池快速遍及千家万户,更加诱人的“可控核聚变”也正在取得看得见的突破。美国科学家预计在21世纪40、50年代可能实现“可控核聚变”的商业化。届时,锂的新用途将带来能源革命,对锂的需求也将一直增长,直到2080年前后才会达到最大产能(约40万t)(Vikström *et al.*, 2013)。尤其是2011年以来的短短几年间,随着新兴产业的快速发展,锂的用途越来越广,市场价格也一路飙升,目前稳定在金属锂每吨80万元人民币(2003年的价格是每吨2000多美元),相当于铜的17倍,原煤的1700倍,充分显示了其巨大的潜力。在常规有色金属不景气,煤、铁等大宗矿产全面亏损的状况下,在2016年的全球矿业界乃至“股票市场”,锂却是“一枝独秀”。2016年也被称为全球找锂年,而其中最大的关注点就是一批大型超大型锂辉石矿床的新发现(刘丽君等,2017a)。

与全球一样,我国探明的锂资源主要集中在盐湖卤水中,但一方面卤水提锂的技术还需要不断完善,另一方面锂辉石矿床的开采成本虽然高于国外卤水提锂,但开采锂辉石矿床仍然能取得高利润。因此,和国外一样,我国也重新重视了锂辉石资源。由于世界各地盐湖锂资源的家底在20多年前基本上被摸清楚了,因此,具有新发现潜力、仍有“投资空间”的锂矿也就聚焦到了锂辉石矿床。澳洲、非洲、美国乃至“环保要求”最严苛的欧洲也开展了广泛的锂矿找矿活动,并纷纷取得了找矿进展。全球锂矿资源的格局正在改变,对于锂辉石矿床的重视程度已经不可同日而语,对于锂资源的明争暗斗也在全球展开(连韩国最大的钢铁公司也扩展到盐湖提锂领

域)。我国的地质学界和矿业界对锂辉石矿床的勘查、研究与开发虽然起步早,以新疆可可托海 3 号脉为代表的典型矿床在半个世纪前就写入全世界的矿床学教科书,但最近几年又变成了危机矿山。

我国锂辉石矿床的整体工作程度低,打过钻的锂辉石矿床只有 10 来处,而且勘查深度普遍小于 300 m;但我国已然是全世界锂的最大消费国,占全球消费量的 40%;也是最大的锂进口国,我国 74% 的锂矿原料靠进口,国内找矿工作已迫在眉睫。根据工业和信息化部发布的《汽车产业中长期发展规划》,到 2020 年,我国 7 大新兴产业中仅新能源汽车的产量就将达到 200 万辆,需要增加 10~14 万 t 碳酸锂的消耗(相当于 1.80~2.52 万 t 锂)。为此,国家对锂矿资源高度重视,在《全国矿产资源规划(2016—2020)》中 18 处提到锂,把锂作为 9 个“储备和保护矿种”之一,24 种战略性矿种之一,要完成 60 万 t Li_2O 的勘查目标,要建设 2 个能源基地(甲基卡,柴达木),1 个国家规划矿区(甲基卡)和 7 个重点勘查区。而上一轮的规划《全国矿产资源规划(2008—2015)》对锂是只字未提。

可见,锂辉石矿床已经不再被“抛弃”,而是热门的战略性的矿产资源,需要高度重视。

2 典型矿床特殊性简介

世界各地的伟晶岩型锂辉石矿床总数不多,但在北美、澳洲、亚洲、欧洲、非洲都有分布,只是因为“稀有金属”长期不被重视,普及也不够,国人熟悉的似乎只有可可托海的 3 号脉。实际上,就伟晶岩型稀有金属矿床而言,无论是中国新疆的可可托海 3 号脉,还是澳大利亚西部的格林布什(Greenbushes),或者津巴布韦的卡玛提维(Kamativi),抑或是阿富汗的帕斯古斯塔(Pasgushta),都各具特点,很难找到相互之间“可归类”的共同点,即个性更显著。也正因为如此,伟晶岩型锂辉石矿床的找矿工作难以“模型化”地进行,新疆可可托海的成矿模式难以推广到阿尔泰成矿省的其他地区更不用说推广到世界各地,澳大利亚格林布什的成矿模式也不能复制到非洲等地。这也是矿床学界对于伟晶岩型稀有金属矿床的研究程度、研究热度不如 BIF 铁矿、不如“斑岩铜矿”、不如“SEDEX”型铅锌矿、甚至不如“IOCG”矿床的原因之一。此处仅介绍几个大型特大型锂辉石矿床的特殊之处(表 1),其一般地质特征(包括矿物晶体粗大、矿化具有结构分带、成矿与花岗岩结晶

分异形成的伟晶岩有关等一般性特点)在众多文献中可以查到,此不赘述。

2.1 中国新疆的可可托海三号脉

可可托海三号脉是自 1935 年起就被世界上著名的矿床学家、矿床地球化学专家(如苏联的涅赫洛舍夫、西尼村、巴涅科、斯米尔诺夫、伊科尔尼科夫、索洛多夫、谢维洛夫、丘洛契尼夫、别乌斯、弗拉索夫及中国的吉新汗、司幼东、佟城、葛振北、宁广进、徐百淳、单久让、邹天人等)研究得最为深入的伟晶岩型稀有金属矿床,且载入各类矿床学教科书,但大多数人并没有注意到:该矿床的围岩是基性岩而不是花岗岩(图 1)。不少文献、专家都不约而同地把“花岗伟晶岩”简单地理解为“伟晶岩是分布在花岗岩顶部并且是由花岗岩结晶分异出来的”。固然,在华南等花岗岩广泛发育的地区,在花岗岩岩体的顶部、外接触带乃至岩体内部时而不时地出现伟晶岩、伟晶岩脉、伟晶岩壳、似伟晶岩……,但可可托海的伟晶岩的确是嵌中一基性岩“包裹”着的,尽管其岩石学名称被定为辉长岩、蚀变辉长岩、变质辉长岩、辉长闪长岩、角闪辉长岩等不同的名称(栾世伟等,1995)。

可可托海三号脉的另外一个特点是其“草帽状”的形态并具有完善的分带性。对于为什么呈“草帽状”,存在不同的看法,多数人认为是不同方向、不同性质、不同规模的断裂、裂隙共同制约的结果。由于这种构造组合方式存在偶然性,导致“草帽状”的形态也是世界上独一无二的。这种形态的偶然性对于找矿尤其是勘探工程的布设来说也是至关重要的,并且是深有启发的,即:伟晶岩矿体形态复杂,勘探网度自然要“加密”了再“加密”,否则就会“圈错”矿体甚至漏掉矿体。也正因为对“草帽状”的可可托海三号脉的勘探经历了漫长而艰难的过程(《新疆维吾尔自治区富蕴县可可托海稀有金属(锂、铍、钽、铌、铯)矿床勘探地质报告》于 1994 年才审批),以第二次世界大战之后苏联地质学家为主的专家们的努力才形成了后来在苏联(及其解体之后的独联体国家)和中国普遍采用的矿床勘探的理论和方法体系。也可以说,可可托海三号脉是现代“地质找矿勘探学”学科的诞生地之一,并对今后勘探复杂类型锂辉石矿床具有启示意义。

也许可可托海三号脉“草帽状”的形态(图 1)及其完美的内部结构分带、巨大而美丽的矿物晶体给人以太深的印象,对其围岩特点反而被忽视。一般将可可托海三号脉概括为“构造上定位于阿尔泰褶皱带额尔齐斯地背斜的中南部的、产于海西期角闪辉

表 1 国内外重要锂辉石矿床
Table 1 Simple list of important spodumene deposits at home and abroad

矿床所在洲	国家	锂矿床/项目	矿产	Li 金属(10^4 t)	Li 品位(%)	地质特征简介	参考文献
亚洲	俄罗斯	Vishnyakovskoe	锂	21.00	0.49	3组缓倾斜伟晶岩,矿化体宽1~3 km,厚500 m;伟晶岩群之间隔以40~120 m宽的无矿地带;单个伟晶岩体厚达12 m,单个伟晶岩体和伟晶岩群都具有分带性;锂辉石和透锂长石出现在最深部的伟晶岩群中。	Kester <i>et al.</i> (2012)
亚洲	阿富汗	Pasgusha Pass	锂	49.00	0.92	围岩可以是片麻岩也可以是辉长岩;矿体形态复杂,产状变化大;成矿于渐新世。	Rossovsky and Chmyrev (1977); 施俊法等(2006)
亚洲	阿富汗	Jamanak	锂	21.00	0.72	锂辉石伟晶岩岩墙状侵入到三叠系变质岩中,4个带,长1 km,宽10~20 m。	Rossovsky and Chmyrev (1977); 施俊法等(2006)
亚洲	阿富汗	Taghawlor	锂	68.8	0.03~1.30	含锂辉石岩墙侵入上三叠统钙质石英黑云母片岩,单个岩墙0.6~1.0 km长,3~7 m厚。	British Geological Survey (2016)
亚洲	阿富汗	Drungal	锂	12.00	0.65~0.74	3个含锂辉石伟晶岩岩墙侵入上三叠统板岩,单个岩墙1~2 km长,7~30 m厚。	British Geological Survey (2016)
亚洲	中国	甲基卡	锂、铍	30.00	0.71	产于三叠系董青石、红柱石片岩中;板状复合矿脉;缓倾斜,锂占绝对优势。	王登红和付小方(2013); 付小方等(2014)
亚洲	中国	可可托海	铍、锂、钽、铯等	7.30		产于海西期中基性岩中,形态呈草帽状,形成于中生代;锂为大中型,铍为超大型。	王登红等(2002)
欧洲	捷克	Cinovec	锂、锡、钨等	130.00	0.20	除了锂之外还有锡、钨大量共生,锂可能主要呈锂云母形式出现,尚在勘查。	国土资源部(2015, 2017)
澳洲	澳大利亚	Greenbushes	锂、钽	56.00	0.74	产于片麻岩、角闪岩、角闪片岩等,被辉绿岩脉和花岗岩脉穿插,形成于太古宙。	何金祥(2015); Kester <i>et al.</i> (2012)
澳洲	澳大利亚	Pilgangoora	锂、钽	72.17	0.56	埋深浅,矿体厚,高品位,产于绿岩带;伴生丰富的钽资源。	Pilbara Minerals Ltd. (2016)
澳洲	澳大利亚	Wodgina East	锂	—	0.74	位于Pilgangoora西15 km处,锂辉石为主。	Altura Mining Ltd. (2016).
澳洲	澳大利亚	Lynas Find North	锂	—	1.23	产于绿岩带,距离Pilgangoora仅8 km。	Metalicity Ltd. (2016)
非洲	津巴布韦	Bikita	锂、钽、锡、铍等	15.00	1.40	伟晶岩产于由火山岩变质而成的绿岩带角闪岩和角闪片岩中,锂云母和透锂长石大量发育;分带性复杂(可分10个带)。	Symons (1961); Kester <i>et al.</i> (2012)
非洲	津巴布韦	Kamativi	锂、锡	28.00	0.28	产于穹隆变质岩中;伟晶岩常见电气石;锡与锂“反相关”;产状平缓,分带不明显。	Kester <i>et al.</i> (2012)
非洲	马里	Goulamina	锂	49.00	0.58	尚未公开地质资料。	Birimian Ltd. (2017)
非洲	扎伊尔	Manono—Kitorolo	锂	72.00	0.60	伟晶岩脉长可达5 km,宽约400 m;开采锂辉石、绿柱石和锡石,锡渣中回收铌钽。	Kester <i>et al.</i> (2012)
北美洲	加拿大	Whabouchi	锂	12.00	0.71	可能是北美品位最高规模最大的锂辉石矿床,产于加拿大地盾的绿岩带,伟晶岩脉群宽90 m,长1.3 km,锂辉石为主。	Nemaska Lithium Inc. (2016)
北美洲	美国	Bessemer City	锂	42.00	0.67	美国最大的锂矿之一,矿化均匀。	Kester <i>et al.</i> (2012)
北美洲	美国	Kings Mountain	锂	32.00	0.70	围岩、矿脉产状、形态及矿化分带均多样性、复杂化,内带锂外带铍,产黑钨矿。	Kester <i>et al.</i> (2012)
北美洲	加拿大	Tanco	锂、钽、铯	14.00	0.64	近平坦的板状伟晶岩产于绿岩带褶皱中。	Kester <i>et al.</i> (2012)

注:“—”待补充或核实相关资料;表中锂金属量数据由参考文献原始资源储量数据换算成金属锂当量。

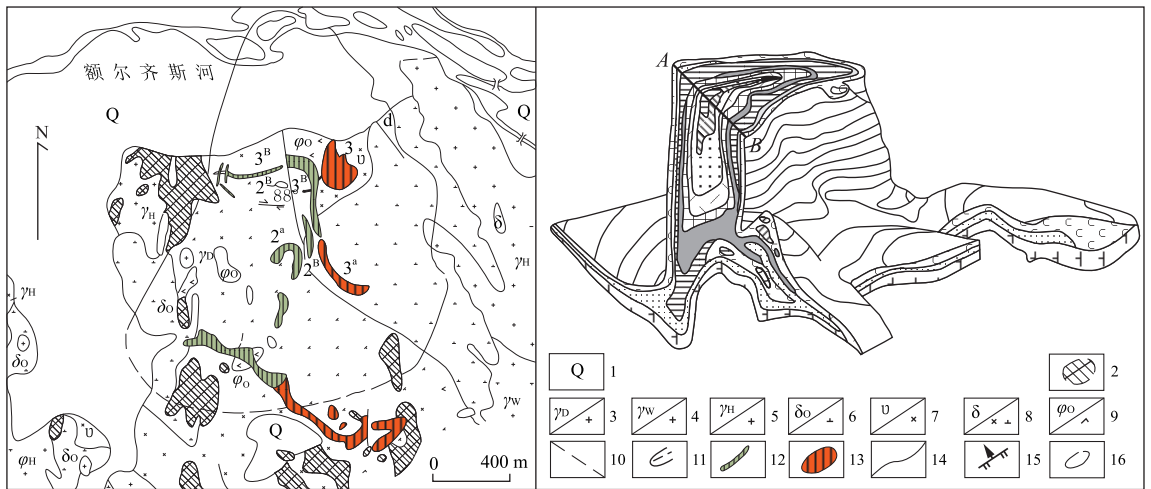


图 1 中国新疆可可托海 3 号伟晶岩脉的地质简图

Fig.1 Geological sketch map of Koktokay No.3 pegmatite vein in Xinjiang, China

1.第四系;2.十字石-黑云母-石英片岩;3.淡色花岗岩;4.微晶花岗岩;5.黑云母花岗岩;6.石英闪长岩;7.角闪辉长岩;8.辉长闪长岩;9.角闪岩;10.暗色岩墙;11.闪长玢岩脉;12.Be-Nb-Ta 矿化伟晶岩脉;13.Li-Be-Nb-Ta-Cs 矿化伟晶岩脉;14.地质界线;15.断层;16.深部缓倾斜岩脉范围;简编自栾世伟等(1995);邹天人和李庆昌(2006)

长岩体中的大型稀有金属锂铷铯铍铌钽花岗岩伟晶岩矿床”(《中国矿床发现史·新疆卷》编委会,1996)。基于此,本文进一步强调其特殊性:(1)含矿伟晶岩的形态可以是很复杂的,独一无二的,与块状硫化物矿床、斑岩铜矿、石英脉型金矿等类型的矿床具有相对可参考的“形态”明显不同;(2)伟晶岩的容矿围岩可以是基性超基性岩,黑色的,不是白色的花岗岩,不要看到黑山头(不是花岗岩岩体)就“绕开了”,以至于漏矿;(3)可可托海三号脉中铍的重要性大于锂。

2.2 中国四川甲基卡新三号脉

四川甲基卡是亚洲最大的锂辉石矿床之一(图 2),实际查明的资源储量超过澳大利亚的格林布什而跻身于世界级锂辉石矿床行列.2011 年,中国地质调查局“我国三稀金属资源战略调查”项目将四川甲基卡作为重点靶区,2012 年在第四系掩盖区探测到多条新矿脉,通过 2013 年和 2014 年的钻探,控制其中新三号脉(编号 X03)的 Li_2O (333+334 级别)资源量达 64.313 6 万 t(国土资源报,2014 年 8 月 29 日报道),通过 2015 年和 2016 年的进一步工作,其规模进一步扩大(王登红和付小方,2013;付小方等,2014;Li et al., 2015)。

甲基卡新三号脉的特点是:规模大、品位高、产状较缓、适于露天开采,即便是矿体顶板需要剥离的“废石”中也含有丰富的高铝材料矿物(红柱石、堇青石等)及高纯石英而可以综合利用.该矿脉另外一个突出特点是:含有目前世界上已知最高含量的⁶Li,

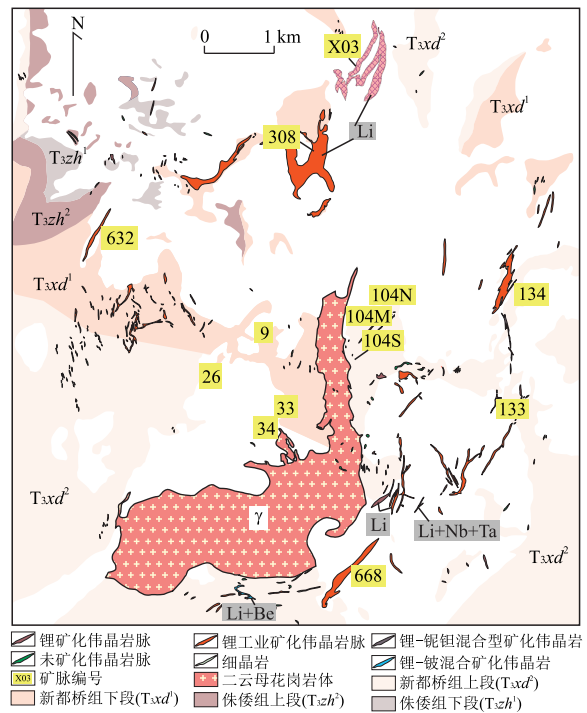


图 2 四川甲基卡锂矿田地质简图

Fig.2 Geological Sketch map of the Jiajikaspodumeneore field, Sichuan

新三号脉 X03 未出露地表,图上标示的是矿体的投影;改编自唐国凡和吴盛先(1984)

而⁶Li 是可控核聚变的关键性原材料(王登红等,2013b, 2016a, 2016b, 2017; 刘丽君等, 2015, 2016, 2017b)。

甲基卡新三号脉侵入到三叠系浅变质岩中,平

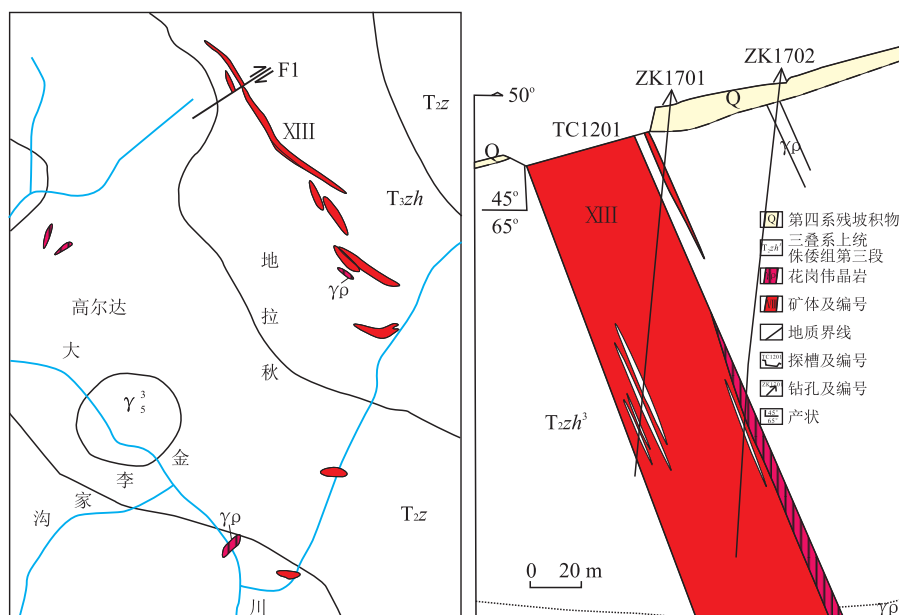


图 3 四川可尔因伟晶岩矿田党坝锂辉石矿床地质简图

Fig.3 Geological Sketch map of the Dangbaspodumene deposit in Ke'erlyn pegmatite field, Sichuan

据四川马尔康金鑫矿业公司内部资料简化;饶魁元(2016)

面上呈分枝脉状,向深部复合为一条巨大的锂辉石矿脉。主矿体走向近南北,倾向西,倾角 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$,已控制矿体长度至少 1 050 m,地表出露宽度 50~114 m,矿体平均厚度 66.40 m,最厚 110.17 m。全脉矿化, Li_2O 平均品位 1.5%,品位变化系数 32.5%。新三号脉还有一个明显的特点是没有明显的矿化分带,主要为细粒钠长石锂辉石结构带,锂辉石呈针状产出,长度一般小于 5 mm,矿脉边部的锂辉石呈梳状垂直于脉壁生长,与石英、钠长石共生,白云母含量相对较少,也罕见巨大的矿物晶形。也可能正是因为锂辉石颗粒细小,并不具备一般伟晶岩中巨大的矿物形态和分带性,导致前人可能不注意“细晶矿物”而漏掉对“细晶岩”的调查研究。因此,甲基卡新三号脉的发现,给人最大的启示是:伟晶岩田中的“细晶岩”同样值得高度重视,而伟晶岩型锂辉石矿床的名称同样可能误导地质人员,故无论是对新区还是对甲基卡这样的老矿区、抑或是对可可托海这样的“经典”矿床(其中也有细粒的锂辉石),建议采用“硬岩型锂辉石矿床”的名称可能更符合实际,更有助于总结规律,更利于拓展找矿思路(王登红等,2017)。

2.3 中国四川可尔因的李家沟和党坝

可尔因伟晶岩型稀有金属矿田位于四川省西北部的阿坝州,面积达 800 km^2 ,是我国面积最大的锂辉石矿田。矿田内现有探矿权 11 个,其中四川省地勘基金项目 2 个,达到详查或勘探程度的有 5 个。据

“四川省金川县李家沟锂辉石矿资源量核实报告”,李家沟锂辉石矿床通过国土资源部评审备案的锂资源量为 50.22 万 t(国土资储备字[2014]310 号),相当于 5 个大型矿床规模。除李家沟办理了采矿权之外,党坝、业隆沟、热达门正在详查或勘探,资源量将继续增加,其中党坝据介绍已控制的资源量不少于 66 万 t(333 及以上级别)。根据四川省地质矿产勘查开发局化探队和马尔康金鑫矿业有限公司(2015)的预测,可尔因地区锂辉石矿床的最大成矿深度可达 2.6 km 以上,李家沟、党坝、业隆沟、热达门、瓦英矿区 Li_2O 的远景资源潜力可达 700 万 t 以上,可望成为世界级矿集区。

可尔因锂辉石稀有金属矿田的特殊性表现在:(1)矿体呈厚大板状,但产状普遍较陡;(2)锂辉石为主,铍、铋和锡不发育;(3)分带性不发育;(4)外部地形地貌不利于找矿,工作难度大,漏矿可能性大;(5)规模巨大。与甲基卡矿田的高原草甸地形截然不同,可尔因矿田是山高林密,通行困难,要不是大渡河(上游称为大金川)刚好从矿田中部深切而过,类似于李家沟、党坝这样的矿脉是很难被发现的,而正是因为大渡河的高山峡谷又不便于地质工作的铺开,加上矿体产状陡(图 3),露头少,森林密布,要找到甲基卡这样的地形平坦的自然露头并不容易。

2.4 澳大利亚的格林布什

澳大利亚的格林布什锂辉石矿床位于西澳耶尔

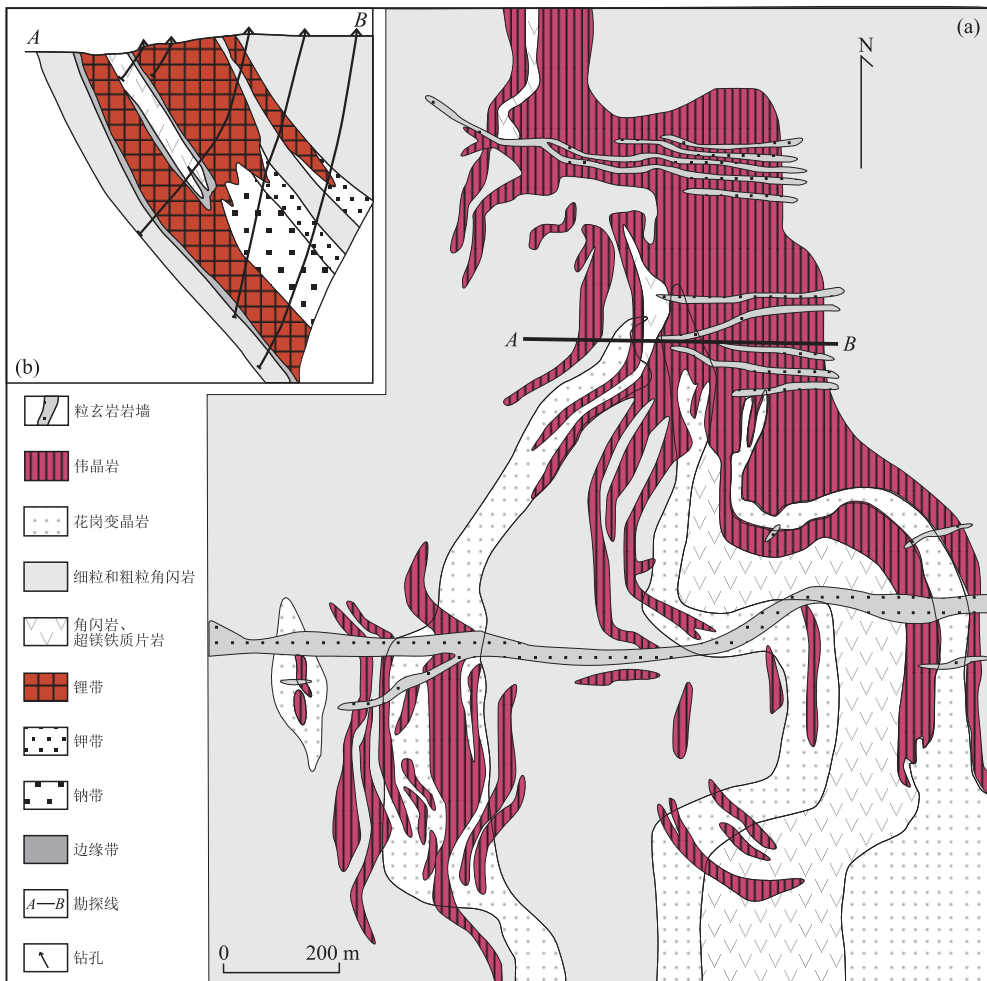


图 4 西澳大利亚格林布什伟晶岩矿床地质图(a)、伟晶岩内各带分布剖面图(b)

Fig.4 Geological plan (a) and sectional drawing (b) of Greenbushes pegmatite deposit in Western Australia

1.粒玄岩岩墙;2.伟晶岩;3.花岗变晶岩;4.细粒和粗粒角闪岩;5.角闪岩、超镁铁质片岩;6.糜棱岩;据 Partington *et al.* (1995)改绘

岗地块的西南部,在别尔特山以南 200 km 处。伟晶岩赋存于花岗片麻岩、角闪岩和角闪石片岩中,而伟晶岩本身又被绿帘石脉、辉绿岩脉和花岗岩脉所穿插(图 4)。花岗岩类有黑云母花岗岩、局部为细晶岩,不少已钠长石化。它们与细晶岩、伟晶岩和石英脉伴生。其特殊性表现在:(1)古老。该矿床是世界上最古老的锂辉石矿床之一。伟晶岩年龄为太古宙(2 700 Ma),成矿与伟晶岩的初始结晶和围岩交代有关(2 527 Ma);(2)存在伟晶岩的热液蚀变,即成矿至少有两期,27 Ga 的伟晶岩期和 25 Ga 的热液期,而热液期成矿可能更加重要至少也是“第二矿化”(约 2 430 Ma);(3)成岩成矿后的变形比可可托海、甲基卡等伟晶岩脉要明显得多,并且在晚期变形和变质时期(约 1 100 Ma)再度活化成矿;(4)表生期风化作用形成的残坡积矿床,具有很大的开采价值;(5)共伴生组分多,规模大、经济价值高。其中,钽资

源就大约占世界钽资源的一半;(6)分带性不明显。分带现象十分罕见,主要的富矿体仅产在伟晶岩脉的钠长石化带中,通常产于钠长石化带内的富电气石亚带,局部 Li_2O 含量可达 5% (Partington *et al.*, 1995)。

2.5 津巴布韦的卡玛提维

在津巴布韦,20 km 长的卡玛提维带(Kamativi)出现电气石伟晶岩以及一系列含锂和锡的伟晶岩。其平均成分:长石 50%~60%,石英 10%~15%,云母 15%~20%,锂辉石 5%~10%。估计资源量为 100 Mt,平均含锂 0.28% (相当于 0.28 Mt 锂)。

该矿床的特殊性表现为:(1)锂与锡共伴生但“反相关”。该矿区在 20 世纪 60 年代曾作为锡矿区勘查,并且被作为“锂与锡反相关”的实例,即最高含量的锂富集在锡含量最低的伟晶岩中。这种情况类似于中国广东长坑金矿与富湾银矿的“反相关”,也

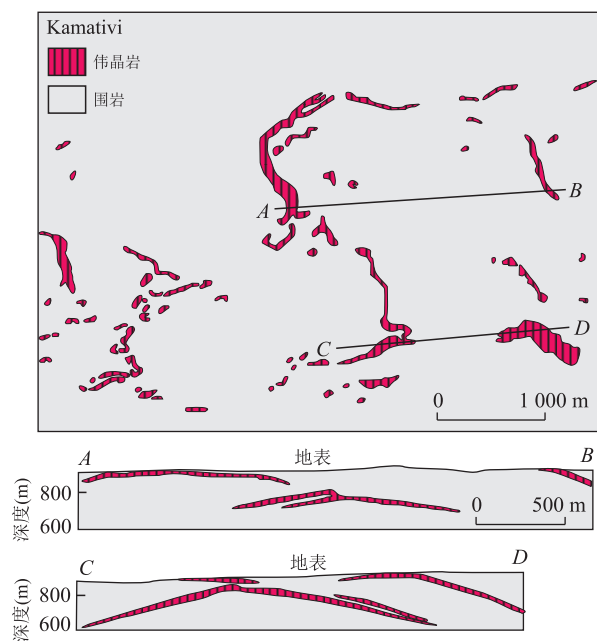


图 5 津巴布韦卡玛提维锂辉石矿床地质及剖面地质简图
Fig.5 Geological plan and section of Kamativi spodumene deposit in Zimbabwe

转引自袁忠信等(2016)

可归属于“伴生矿床”之列(王登红等,1999);(2)穹隆控矿.各种伟晶岩大体呈席状侵入在穹隆深变质岩中.席状伟晶岩在穹隆的中心部位厚 1~6 m,水平方向的延展则至少有 1 km;(3)产状平缓(图 5);(4)分带性不突出.伟晶岩有一定的分带性,锂辉石在过渡带最常见,但含量低一些的透锂长石却是广泛分布的,并不集中在哪个“带”(von Knorring and Condliffe, 1987).

2.6 阿富汗的帕斯古斯塔

阿富汗位于亚洲中西部,矿产资源丰富,特别是锂资源储量巨大而且品位很高.虽然苏联地质学家早期开展了大量的研究,指出该地区具有世界上含量最高的含锂伟晶岩,但由于种种原因很少公开资料(施俊法等,2006).2007 年进行了初步评估之后,在 2009—2011 年间,美国地质调查局的专家们在军队的武装护卫下开展了多次实地考察并写成了专报.已探明的矿区包括帕斯古斯塔山口(Pasgushta Pass)、德鲁姆加尔(Drumgal)、贾马纳克(Jamanak)、帕斯奇、约里加尔等.其中,帕斯古斯塔河上游的 3 个锂辉石岩脉总厚度达 70 m, Li_2O 含量为 1.96%.在帕斯古斯塔山口,有一处 20 m 厚矿层的 Li_2O 含量达 2.14%.估算帕斯古斯塔矿床 100 m 深度以浅氧化锂储量 105 万 t (British Geological Survey, 2016).

阿富汗帕斯古斯塔锂辉石矿床的特殊性表现为:(1)围岩多样化.无论是片麻岩、混合岩等变质岩还是拉格曼(Laghman)的侵入杂岩体或是辉长岩中,都可以见到锂辉石伟晶岩,如尼拉维的辉长岩体和闪长岩体(图 6);(2)产状多样化.尼拉维、库兰、达拉赫贝等地的伟晶岩倾角平缓,但帕隆等地的伟晶岩则产状较陡;(3)矿体形态多样化.如在帕隆矿田,网脉状矿体呈岩床、岩席状(倾角平缓)产于元古代片麻岩中,而倾角较陡的伟晶岩岩脉赋存在片岩中,呈线型狭长带状;(4)成矿时代新,但可能经历过多期次演化.与成矿有关的是二云母花岗岩,属于拉格曼侵入杂岩体 3 个期次中最晚者.

2.7 美国的金斯山

美国著名的金斯山(Kings Mountain)伟晶岩带位于北卡罗来纳州,呈北东向带状延伸,长约 45 km,宽约 3.2 km,面积约 150 km^2 .区域岩石主要是沉积变质岩,包括石英岩、砾岩、绿泥片岩、黑云母片岩和片麻岩以及石英二长岩等,变质沉积岩内

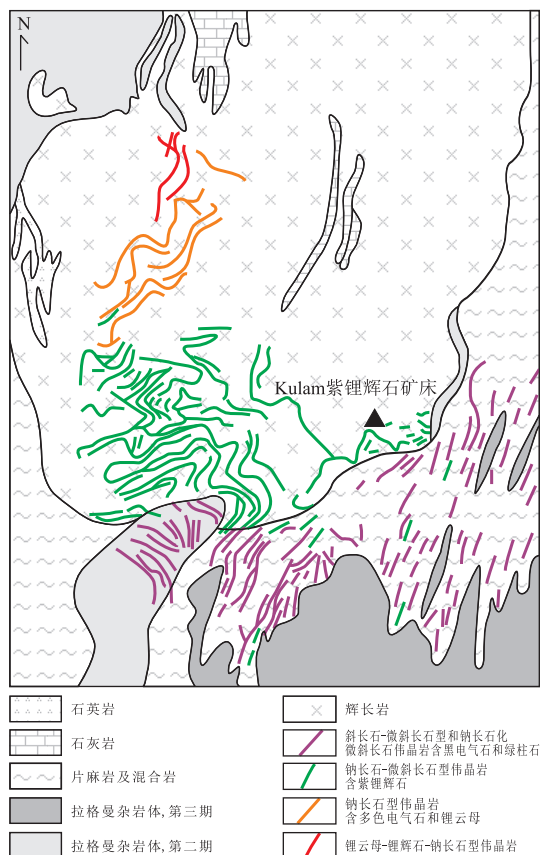


图 6 阿富汗尼拉维—库兰伟晶岩田地地质图

Fig.6 Geological map of Nilawe-Kulan pegmatite field, Afghanistan

改编自 Rossovskiy *et al.*(1977); British Geological Survey(2016)

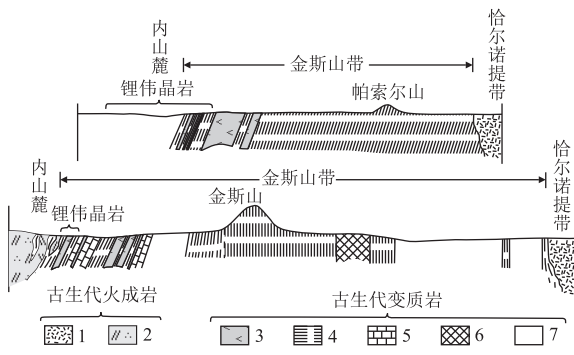


图 7 美国北卡罗来纳金斯山伟晶岩带的区域地质剖面示意图

Fig.7 Regional geological section of Kings Mountain pegmatite belt in North Carolina, America

1.二叠系 Yorkville 石英二长岩;2.二叠系(?)Cherryville 石英二长岩;3.薄层角闪岩;4.含硅质夹层的变质泥质岩;5.结晶灰岩;6.具片理的火山碎屑岩;7.片岩和片麻岩;转引自袁忠信等(2016)

夹有薄层角闪岩、结晶灰岩、千枚状页岩和具片理的火山碎屑岩等夹层(图 7),变质沉积岩内富含硅质的地段抗风化能力强而在地貌上构成山脊,伟晶岩就分布在山脊以西硅质岩石较少的平缓地带。

金斯山锂辉石矿床位于北卡罗来纳州南部的克利夫兰境内,由一系列大致平行的矿脉组成.在空间上,伟晶岩与其西侧的石英二长岩邻近,后者被认为与含锂伟晶岩有成因关系.矿脉主要由锂辉石(20%)、石英(32%)、钠长石(27%)、微斜长石(14%)及白云母(6%)组成.副矿物主要为锡石,其次有绿柱石、铌钽矿物及黑钨矿等.伟晶岩中锂含量变化较大,以锂辉石含量 20%来圈定矿体,则矿石 Li_2O 含量约 1.5%.整个北卡罗来纳伟晶岩带的 Li_2O 储量约一百万吨.其特殊性表现为:(1)产出状态复杂,围岩具多样化.矿脉大致平行于云母片岩的片理,但部分厚度不大的伟晶岩脉产于角闪片麻岩内,沿片麻岩不同方向的节理侵入;(2)矿脉形态复杂,产状变化大.虽然伟晶岩脉主要呈板状体及楔状体产出,长度从数米到上千米,最大厚度达 130 m,但从图 8 明显可见,伟晶岩脉不但形态复杂,而且厚度变化大;(3)伟晶岩脉的矿物组成也很复杂.伟晶岩从石英二长岩成分的简单伟晶岩到复杂的锂辉石伟晶岩均有;(4)矿脉的内部分带性变化大,总体上不发育.锂辉石主要分布在内带,以灰白色、浅红色块体形式产出;(5)矿脉向下延伸稳定.矿山开采坑道向下延拓深达 2 km 时,矿石的矿物组成和结构构造仍无大的变化;(6)围岩蚀变明显但范围有限.伟晶岩脉壁见有约 0.5 m 宽的蚀变带,由含锂黑云

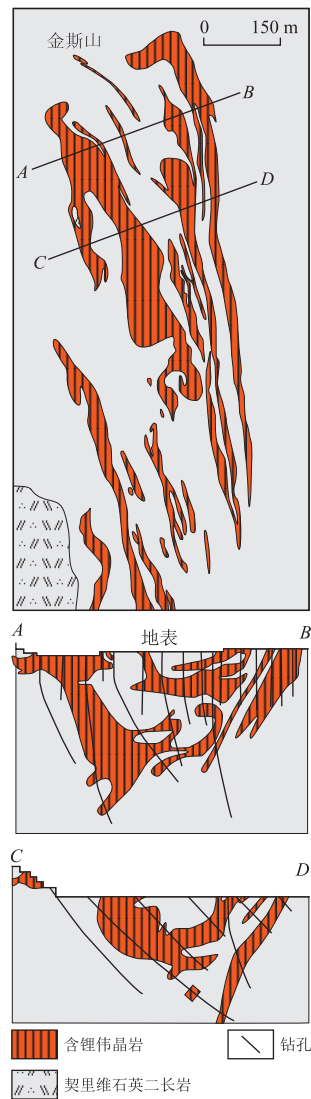


图 8 北卡罗来纳金斯山伟晶岩田地地质简图

Fig.8 Simple geological map of Kings Mountain pegmatite field in North Carolina

据 Kesler et al.(2012)改绘

母、锂闪石、方解石和磷灰石组成.脉壁围岩中黑色电气石也极发育(Kesler et al., 2012; 袁忠信等,2016).

3 成矿规律

3.1 成矿区带

尽管伟晶岩型锂矿不像铁矿、铜矿、金矿那么在全球各地分布广泛,但在全球各个重要的成矿区带内也都不同程度地发育,其中最大的特点是:既可以出现在稳定地台区,也可以出现在活动性很强的造山带(图 9),其中跟大型超大型锂辉石矿床有关的主要区带有:

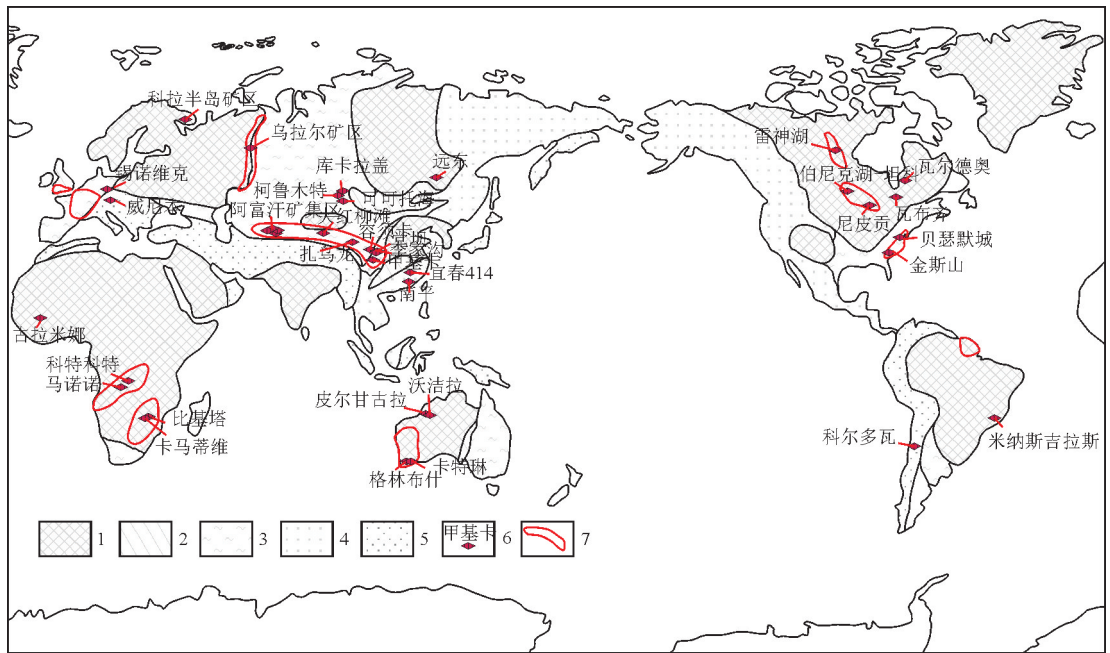


图 9 全球主要锂辉石矿床分布略图

Fig.9 Sketch distribution of major spodumene deposits in the world

1.前寒武纪地台;2.加里东褶皱带;3.海西-印支褶皱带;4.中生代褶皱带;5.喜马拉雅褶皱带;6.主要锂辉石矿床;7.主要锂辉石成矿区带

泛非地台成矿带。成矿带从乌干达的西南部开始呈北北东-南南西向经卢旺达、布隆迪、扎伊尔进入安哥拉,大致相当于该区元古宙基巴里德褶皱带-泛非地台的位置。带内主要产出含稀有金属的花岗伟晶岩。伟晶岩的同位素地质年龄为 800~1 000 Ma。扎伊尔的科特科特和曼诺诺(Manono,也译为马诺诺)盛产锂辉石。

津巴布韦-南非成矿带。该带位于非洲最古老岩石分布的构造单元——南非-津巴布韦太古宙地盾内。津巴布韦比基塔花岗伟晶岩曾经是世界三大含锂伟晶岩矿床之一。

西欧海西褶皱系成矿区。该区包括法国中部与德国西部;法国中部的中央高原有海西期含锂、铍、铌、钽的花岗岩产出。

乌拉尔成矿带。该带大致与乌拉尔海西褶皱带吻合,已知稀有金属碱性岩、碱性超基性岩-碳酸岩有伊尔门岩体、维斯涅戈尔斯岩体等。岩体形成于古生代。

西澳大利亚皮尔巴拉-卡尔古里成矿区。该区属西澳地台的一部分,主要产出铌钽铁矿、锂辉石、锡石花岗伟晶岩及其砂矿。重要的岩脉有格林布什伟晶岩,形成于前寒武纪。

加拿大地盾奴河成矿区。位于加拿大地盾西部,有锂辉石伟晶岩、绿柱石-铌钽铁花岗岩伟

晶岩产出。

加拿大地盾温尼伯-尼皮贡湖成矿区。产出有世界最大的花岗伟晶岩矿床之一——伯尼克湖坦科(Tanco)伟晶岩型矿床,以铌、钽、锂矿化特富而知名。

美国阿帕拉契亚褶皱带北卡罗来纳成矿带。在阿帕拉契亚褶皱带,沿北东方向断续有花岗伟晶岩出露。其南段,即北卡罗来纳成矿带内以锡石锂辉石伟晶岩为主。

南美北圭亚那地盾成矿带。成矿带位于南美北部,沿大西洋海岸呈东西向延展。伟晶岩产绿柱石、锂辉石及铌钽铁矿,但地质矿产资料不多。

中亚兴都库什成矿带。阿富汗境内的伟晶岩型锂矿,主要位于其东北部的兴都库什山脉,仅 5 个较大的伟晶岩矿体的 Li_2O 储量就可达到 213.4 万 t,其中包括帕斯古斯塔 105 万 t(品位 2.14%)、德鲁姆加尔 25.3 万 t(品位 1.38%~1.58%)、贾马纳克 45 万 t(品位 1.83%)、下帕斯古斯塔 12.4 万 t(品位 2.2%)、帕斯奇 12.7 万 t(品位 1.46%~2.10%)、约里加尔 13 万 t。除了锂,该地区伟晶岩还富集铌、铍、钽、锡和铯。部分伟晶岩还开采出宝石级电气石、紫锂辉石、绿宝石等。

总体上看,大型超大型锂辉石矿床既分布在太古宙的地台区、元古代的褶皱带,也分布在古生代的褶皱造山带,还可以出现在新生代的造山带尤其是

青藏高原的北部、东北部,除了四川的甲基卡锂辉石矿田、可尔因矿田之外,在四川与青海交界处还有扎乌龙矿田,在新疆西南部还有大红柳滩锂辉石矿田,在阿富汗的兴都库什地区同样存在锂辉石矿田,已经构成了一条世界级的“锂矿带”,不妨称为青藏高原北缘锂成矿省。

3.2 成矿时代

锂辉石矿床在各个地质时代均有产出,从太古宙直到新生代,其中,已知最古老的含矿伟晶岩产于津巴布韦的比基塔(同位素年龄 2 850 Ma),该矿床位于非洲最古老岩石分布区——南非—津巴布韦太古宙地盾内。北美加拿大地盾的伯尼克湖坦科伟晶岩矿床,形成于 2 600 Ma,成矿与太古宙微斜长石花岗岩有关。雷神湖正长岩型稀有稀土金属矿床,是加拿大 20 世纪 80 年代以来查明的另一个特大型矿床,成矿也与太古宙花岗岩及碱性正长岩有关。南美最古老的含矿伟晶岩产于北圭亚那地盾成矿带,岩石同位素地质年龄为 1 900~2 200 Ma。美国阿帕拉契亚造山带中的伟晶岩形成于 375~265 Ma 之间的海西期。中国四川的甲基卡、党坝等锂辉石矿床和新疆的可可托海三号脉,形成于印支期—燕山期(王登红等,2002,2005)。

时代最新的大型超大型锂辉石矿床产于阿富汗东北部的兴都库什山区,那里的稀有金属伟晶岩主要形成于渐新世;其中,努里斯坦(Nuristan)稀有金属伟晶岩勘探区的稀有金属伟晶岩产于早元古代和上三叠统的变质岩中,但成因上与渐新世二云母花岗岩有关(施俊法等,2006)。

3.3 容矿围岩

锂辉石矿床可以产于太古宙花岗—绿岩带的深变质岩中,可以产于古生代的基性侵入岩,也可以产于中生代的片岩、板岩中,还可以产于与伟晶岩脉基本同期的花岗岩中(如新疆阿尔泰的 112 号脉和四川可尔因、甲基卡矿田的部分规模不大的矿脉),在结晶灰岩和未变质的碳酸盐岩中少见。本文介绍的 7 个大型超大型锂辉石矿床主要产于基性岩(无论变质与否)和硅铝质变质岩中,这可能是因为这两种围岩一方面脆性大、容易产生张性裂隙,另一方面可能是化学性质比较惰性,含锂的岩浆熔体不容易与围岩发生化学反应,成矿物质难以被分散以至于富集成矿。四川甲基卡新三号脉的围岩蚀变带宽度一般不超过 5 cm,矿脉与围岩之间虽然发生电气石化,但“黑白分明”的界线是截然的,与南岭石英脉型钨矿非常类似。

4 找矿方向

上述大型超大型锂辉石矿床的一些特殊性对于拓展思路、延伸找矿方向具有现实意义:

(1)在类型上,锂辉石矿床不局限于伟晶岩型,细晶岩型或者细粒结晶岩(指粒度细小、但成分与伟晶岩类似的结晶岩)矿石与伟晶岩矿石混杂的锂辉石矿床,也是重要的找矿类型。沉积型锂矿以及透锂长石型、磷锂铝石型的硬岩型锂矿不在此文讨论范围,但也值得重视。

(2)在空间上,锂辉石矿床既可以出现在地台区也可以出现在褶皱造山带,从而打破了以往只把北美加拿大的伯尼克湖坦科伟晶岩和西澳的格林布什作为典型样板的局限性。我国地台面积小,但褶皱造山带的面积大,尤其是青藏高原新生代造山带的分布面积几乎占我国陆地面积的 1/4,从而可大大拓展锂辉石矿床的找矿空间。

(3)在时间上,锂辉石矿床的成矿时代从太古宙到新生代均有,尤其是我国以“多旋回构造运动”为特点,不同的构造单元、不同的成矿时代均可以成矿,而且往往“后来居上”,即:尽管澳大利亚、北美、非洲的锂辉石矿床形成于太古宙和元古宙,美国金斯山属于古生代成矿(矿区西部 Cherryville 石英二长岩的同位素年龄为 375~265 Ma),中国川西和新疆阿尔泰的锂辉石矿床主要形成于中生代,阿富汗的锂辉石矿床形成于新生代。中生代和新生代形成的几个锂辉石矿床在资源储量总量上已经超过了太古宙的锂辉石矿床。

5 找矿思路和方法

前述分析表明,大型超大型的锂辉石矿床,具有多类型、多成矿时代、多构造背景的特点,这有助于地质找矿工作的部署。对寻找具体的矿床来说,还需要进一步拓展思路,即:

(1)多围岩。除了片岩、片麻岩等外接触带的变质岩之外,还需要注意到侵入杂岩体的内部去找矿。包括辉长岩、闪长岩等在内的基性岩也可以是容矿围岩,而且是大型超大型锂辉石矿床,如中国的可可托海、阿富汗的帕斯古斯塔、澳大利亚的格林布什及美国的金斯山均存在基性杂岩体容矿的现象,而这一点恰恰是最容易被忽略的。

(2)多方法。伟晶岩型锂辉石矿床的找矿,主要

是地质人员利用路线地质调查、重砂、采矿遗迹等传统方法来开展的。《中国矿床发现史·新疆卷》对富蕴县可可托海锂铍铌钽矿的地质发现过程进行了详细的介绍,但对是否用到了物化探方法却只字未提。不但对可可托海如此,在介绍富蕴县柯鲁木特锂铍铌钽矿、福海县库卡拉盖锂矿、青河县阿斯喀尔特铍矿及福海县群库尔绿柱石钽铌矿时,也未提及物化探方法的使用。的确,中国使用物化探方法发现的伟晶岩型矿床,除了内蒙古的巴尔哲曾经因为放射性强而通过放射性测量取得重大突破外,一般不采用物探方法。这主要是因为含矿伟晶岩在物性上与花岗岩、片岩、片麻岩的差别比较小,而伟晶岩岩体本身一般又规模比较小,无论是重、磁、电等方面都难以产生显著的物探异常,以至于很少采用物探方法。实际上,每个大型超大型矿床还是有其独特的地球物理特征的,如四川甲基卡锂辉石矿区的围岩含有细粒黄铁矿和磁黄铁矿,但伟晶岩矿脉中不含硫化物,实测伟晶岩电阻率变化于 $15\ 630\sim 21\ 380\ \Omega\cdot m$,片岩变化于 $1\ 800\sim 5\ 200\ \Omega\cdot m$,接触带变化于 $4\ 460\sim 6\ 490\ \Omega\cdot m$,因此采用电法可圈出高阻体。对于硫化物矿床来说,矿化体是低阻体,而伟晶岩恰好是高阻体。利用这一技术路线在甲基卡成功地预测了高阻的伟晶岩脉(即新三号脉)。在美国的金斯山,产于角闪岩内的一些大伟晶岩脉壁围岩内,角闪岩破碎成角砾,岩石多已蚀变成绿泥石岩,含大量磁黄铁矿和黄铜矿,可产生低阻异常。在四川甲基卡,近年来采用遥感找矿和生物找矿的新方法,也取得了显著成果(代晶晶等,2017)。

(3)多解性。除了物探异常存在多解性之外,化探异常也存在多解性。在化探方面,锂属于活动性比较强的稀碱金属,在岩浆热液活动过程中、在风化过程中都易于形成较大范围的“扩散晕”,因而利用区域化探资料尤其是大比例尺的原生晕测量和土壤化探测量,有可能取得比较理想的效果,但小比例尺的水系沉积物测量结果不一定能圈出远景区。如,根据谢学锦院士的资料,四川的可尔因锂辉石矿田的确落在高背景值区,但甲基卡矿田并不位于高背景场,而贵州遵义至云南个旧之间的大面积 Li 高背景场区只反映含锂沉积岩分布区,并不具备锂辉石成矿的地质条件(图 10)。

6 结语

(1)找矿总是先找围岩。对于锂辉石矿床来说,

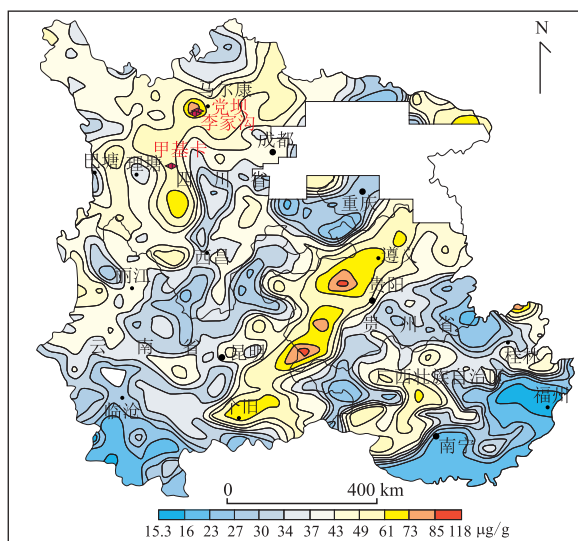


图 10 中国西南部锂的地球化学异常图

Fig.10 The geochemical anomaly map of Li in Western China
据谢学锦等(2008)

其容矿围岩可以是多种多样的,绝不局限于“花岗岩类”,尽管“花岗伟晶岩”被作为主要类型,世界上一些著名的大型超大型锂辉石矿床,如中国的可可托海、澳大利亚的格林布什、阿富汗的帕斯古斯塔及美国的金斯山,或者被基性岩包裹或者部分产于其中。这启示我们,基性岩杂岩体也是找锂辉石矿床的重要方向,不能视而不见更不能排斥。

(2)锂辉石矿床的时空分布是非常广泛的,尽管已知的矿产地不多,这与斑岩铜矿明显不同,斑岩铜矿矿产地非常多,但成矿时代集中在新生代。因此,无论是构造稳定的地台区还是活动的造山带,无论是太古宙还是新生代,都应该作为找矿方向,而不拘泥于某时某地。

(3)伟晶岩与花岗岩、变质岩等其他结晶岩相比,其岩体的规模要小得多,其形态要复杂得多,其类型也更加多样化,不但有矿物成分上的区分,还有矿物大小、形态、结构等方面的区别。因此,要建立一个统一的、放之四海而皆准的理论模式是不现实的,需要从各个矿集区的实际地质情况出发,具体问题具体分析,才能有助于找矿突破。

致谢:此文不是以大量测试数据说话的,在某种程度上只是成矿理论研究 with 地质找矿实践相结合的经验体会。不当之处,请专家们批评指正。如能对找矿有所裨益,则不无欣慰。工作过程中得到国土资源部地勘司、开发司、储量司及规划司刘连和、于海峰、许大纯、姚华军、车长波、牛力、吴登定、吴峻等部门领导和中国地质调查局钟自然、李金发、王昆、严光

生、陈仁义、薛迎喜、徐学义、龙宝林、邢树文、张生辉以及中国地质科学院矿产资源研究所傅秉锋、王宗起、谢国刚、沈结苟及陈毓川、裴荣富、郑绵平和邹天人、杨岳清、白鸽、袁忠信、徐珏、侯立玮、丁嘉榆、韩久竹、罗子声等老专家及四川地调院、新疆有色地勘局众多领导专家的支持和帮助, 包括在提供信息、参与讨论、提出要求等方面都有益于本文; 成文过程中得到《地球科学》编辑部老师及审稿专家的指导, 不胜感激, 一并致谢!

References

《Discovery History of Chinese Deposits • Xinjiang Volume》
Editorial Committee, 1996. Discovery History of Chinese Deposits • Xinjiang Volume. Geological Publishing House, Beijing, 105—109 (in Chinese).

Altura Mining Ltd, 2016. Kairos Minerals forms Joint Venture with Altura Mining for Wodgina East Lithium Project. <http://www.mining-technology.com/news/newskairos-minerals-forms-joint-venture-with-altura-mining-for-wodgina-east-lithium-project-5681482/>

Birimian Ltd, 2017. Birimian to sell Mali's Bougouni Lithium Project. <http://www.mining-technology.com/news/newsbirimian-to-sell-bougouni-lithium-project-5709235/>

British Geological Survey. Minerals in Afghanistan. http://www.bgs.ac.uk/afghanMineals/docs/RareMetals_A4.pdf.

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. *Geology in China*, 44(2): 389—398 (in Chinese with English abstract).

Fei, G. C., Yuan, T. J., Tang, W. C., et al., 2014. Simple Division on Pegmatite-Type rare Metal Deposits Ore-Bearing Pegmatites in Keeryin, Sichuan. *Mineral Deposits*, 33(Suppl.): 187—188 (in Chinese).

Fu, X. F., Hou, L. W., Wang, D. H., et al., 2014. Achievements in the Investigation and Evaluation of Spodumene Resources at Jiajika in Sichuan, China. *Geological Survey of China*, 1(3): 37—43 (in Chinese with English abstract).

Gu, C. H., 2014. Metallogenic Regularity of Spodumene Deposits in the Closely Spaced Pegmatite Area in the Southeastern Keeryin Pegmatite Field, Sichuan Province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, (1): 59—65 (in Chinese with English abstract).

He, J. X., 2015. Lithium, Annual Review of World Mineral Resources. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).

Kesler, S. E., Gruber, P. W., Medina, P. A., et al., 2012. Global

Lithium Resources: Relative Importance of Pegmatite, Brine and other Deposits. *Ore Geology Reviews*, 48(5): 55—69. doi: 10.1016/j.oregeorev.2012.05.006

Li, J. K., Zou, T. R., Liu, X. F., et al., 2015. The Metallogenic Regularities of Lithium Deposits in China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 89(2): 652—670. doi: 10.1111/1755-6724.12453

Liu, L. J., Fu, X. F., Wang, D. H., et al., 2015. Geological Characteristics and Metallogeny of Jiajika-Style Rare Metal Deposits. *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. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 50—59 (in Chinese with English abstract).

Liu, L. J., Wang, D. H., Liu, X. F., et al., 2017a. The Main Types, Distribution Features and Present Situation of Exploration and Development for Domestic and Foreign Lithium Mine. *Geology in China*, 44(2): 263—278 (in Chinese with English abstract).

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. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 167—171 (in Chinese with English abstract).

Luan, S. W., Mao, Y. Y., Fan, L. M., et al., 1995. Rare Metals Mineralization and Prospecting in Keketuohai. Chengdu university of science and technology Press, Chengdu (in Chinese).

Metalicity Ltd, 2016. Metalicity Acquires Fortescue's Lithium Portfolio in Pilbara Region. <http://www.mining-technology.com/news/newsmetalicity-acquires-fortescue-lithium-portfolio-in-pilbara-region-5703012/>

Nemaska Lithium Inc, 2016. How to Profit From the Booming Lithium Markets, Available. <http://www.nemaskalithium.com/assets/documents/docs/Nemaska%20Lithium%20Corporate%20Presentation%20April%202016.pdf> (accessed on 09.11.16).

Partington, G. A., McNaughton, N. J., Williams, I. S., 1995. A Review of the Geology, Mineralization, and Geochronology of the Greenbushes Pegmatite, Western Australia. *Economic Geology*, 90(3): 616—635. doi: 10.2113/gsec-geo.90.3.616

Pilbara Minerals Ltd., 2016. Pilgangoora Mineral Resource Jumps 60% to 128.6 Mt Confirming World-class, Long-life, High Grade Lithium Project. <http://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/tantalum-investing/pilgangoora-mineral-resource-jumps-60-to-128-6mt-confirming-world-class-long-life>

- high-grade-lithium-project/
- Rao, K. Y., 2016. Geological Feature and Prospecting Direction of Dilaqiu Lithium Deposit, in Maerkang, Sichuan. *Sichuan Nonferrous Metals*, (1): 54—58 (in Chinese).
- Rossovskiy, L. N., Chmyrev, V. M., 1977. Distribution Patterns of Rare-Metal Pegmatites in the Hindu Kush (Afghanistan). *International Geology Review*, 19 (5): 511—520. doi:10.1080/00206817709471047
- Rossovskiy, L.N., 1977. First Find of Pollucite and Its Crystals in Afghanistan, Transactions (Doklady) of the U.S. S.R. *Academy of Sciences; Earth Science Sections*, 236 (1—6): 157—160.
- Shi, J.F., Li, Y.Z., Jin, Q.H., et al., 2006. The World Mining Situation (Asian Volume). Geological Publishing House, Beijing, 360—376 (in Chinese).
- Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Maerkang Jinxin Mining Ltd., 2015. General Exploration and Resource Reserve Verification Report on Lithium Ores in Dangba Minging, Maerkang County, Sichuan. Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, Chengdu (in Chinese).
- Symons, R., 1961. Operation at Bikita Minerals Ltd, Southern Rhodesia. *Bull. Instn. Mining and Metallurgy*, 661: 129—172.
- Tang, G.F., Wu, S.X., 1984. Geological Research Report on Jiajika Granitic Pegmatite Lithium Deposit in Kangding, Sichuan, 1—104 (in Chinese).
- Vikström, H., Davidsson, S., Höök, M., 2013. Lithium Availability and Future Production Outlooks. *Applied Energy*, https://www.researchgate.net/publication/236734286_Lithium_Availability_and_Future_Production_Outlook.
- Von Knorring, O., Condliffe, E., 1987. Mineralized Pegmatites in Africa. *Geological Journal*, 22 (S2): 253—270. doi:10.1002/gj.3350220619
- Wang, D. H., Chen, Y. C., Xu, J., et al., 1999. Discussion on Associated Deposits Example from Changkeng Au deposit and Fuwan Ag Deposit, Guangdong. *Acta Geoscientia Sinica*, 20 (suppl.): 346—350 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Chen, Y. C., Xu, Z. G., et al., 2002. Metallogenic Series and Regularity of Altay Metallogenic Province. Atomic Energy Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, D. H., Li, J. K., Fu, X. F., 2005.⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating for the Jiajika Pegmatite-type Rare Metal Deposit in Western Sichuan and its Significance. *Geochemica*, 34 (6): 541—547.
- Wang, D. H., Fu, X. F., 2013a. The Breakthrough of Lithium Prospecting in the Periphery of Jiajika Mining Area, Sichuan. *Rock and Mineral Analysis*, 32 (6): 987 (in Chinese).
- Wang, D. H., Wang, R. J., Li, J. K., et al., 2013b. The Progress in the Strategic Research and Survey of Rare Earth, Rare Metal and Rare-Scattered Elements Mineral Resources. *Geology in China*, 40(2): 361—370 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2176—2191 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Liu, L. J., Liu, X. X., et al., 2016a. Main Types and Research Trends of Energy Metallic Resources in China. *Journal of Guilin University of Technology*, 36 (1): 21—28 (in Chinese with English Abstract).
- Wang, D. H., Wang, R. J., Fu, X. F., et al., 2016b. 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. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(4): 471—480 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Liu, L. J., Hou, J. L., et al., 2017. A Prime Review on Application of “Five Levels + Basement” Model for Jiajika-style Rare Metal Deposits. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 1—7. doi:10.13745/j.esf.yx.2017-1-1
- Wang, R. J., Wang, D. H., Li, J. K., et al., 2015. Mineral Resources and Development of Rare Earth, Rare Metal and Rare-Scattered Elements Mineral Resources. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, Z. P., Liu, S. B., Dai, H. Z., et al., 2017. The Metallogenic Regularity, Deep Ore-Prospecting and Exploitation of Dangba Super Large Spodumene Deposit in Aba, Sichuan Province (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. J., Cheng, Z. Z., Zhang, L. S., 2008. Geochemical Atlas of 76 elements in Southwest China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yuan, Z. X., He, H. H., Liu, L. J., et al., 2016. Rare-metal and Rare Earth Elements Deposits in Foreign Countries. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zou, T. R., Li, Q. C., 2006. Rare and Rare Earth Deposits in Xinjiang, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 《中国矿床发现史·新疆卷》编委会, 1996. 中国矿床发现史·新疆卷. 北京: 地质出版社, 105—109.
- 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.中国地质,44(2): 389—398.
- 费光春,袁天晶,唐文春,等,2014.川西可尔因伟晶岩型稀有金属矿床含矿伟晶岩分类浅析.矿床地质,33(增刊): 187—188.
- 付小方,侯立玮,王登红,等,2014.四川甘孜甲基卡锂辉石矿矿产调查评价成果.中国地质调查,1(3): 37—43.
- 古城会,2014.四川省可尔因伟晶岩田东南密集区锂辉石矿床成矿规律.地质找矿论丛,(1): 59—65.
- 国土资源部,2015.捷克锡诺维克成为世界级锂矿.http://www.geoglobal.mlr.gov.cn/zx/kcykf/resources_update/201502/t20150213_4737270.Htm
- 国土资源部,2017.捷克锡诺维克锂矿资源量上升11.8%.http://www.geoglobal.mlr.gov.cn/zx/kcykf/resources_update/201702/t20170221_6239138.Htm
- 何金祥,2015.锂·世界矿产资源年评.北京:地质出版社.
- 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.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.桂林理工大学学报,36(1): 50—59.
- 刘丽君,王登红,刘喜方,等,2017a.国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状.中国地质,44(2): 263—278.
- 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.地学前缘,24(5): 167—171.
- 饶魁元,2016.四川马尔康地拉秋锂矿床地质特征及找矿方向.四川有色金属,(1): 54—58.
- 栾世伟,毛玉元,范良明,等,1995.可可托海地区稀有金属成矿与找矿.成都:成都科技大学出版社.
- 施俊法,李友枝,金庆花,等,2006.世界矿情(亚洲卷).北京:地质出版社,360—376.
- 四川省地质矿产勘查开发局化探队,马尔康金鑫矿业有限公司,2015.四川省马尔康县党坝矿区锂矿补充详查及资源储量核实报告.成都:四川省地质矿产勘查局.
- 唐国凡,吴盛先,1984.四川省康定县甲基卡花岗伟晶岩锂矿床地质研究报告.
- 王登红,陈毓川,徐珏,等,1999.试论伴生矿床——以长坑金矿与富湾银矿为例.地球学报,20(增刊): 346—350.
- 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研究.北京:原子能出版社.
- 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.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.岩矿测试,32(6): 987.
- 王登红,王瑞江,李建康,等,2013.中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述.中国地质,40(2): 361—370.
- 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.地质学报,88(12): 2176—2191.
- 王登红,刘丽君,刘新星,等,2016a.我国能源金属矿产的主要类型及发展趋势探讨.桂林理工大学学报,36(1): 21—29.
- 王登红,王瑞江,付小方,等,2016b.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.地球学报,37(4): 471—480.
- 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.地学前缘,24(5): 1—7.
- 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.北京:地质出版社.
- 王子平,刘善宝,代鸿章,等,2017.四川阿坝州党坝超大型锂辉石矿床的成矿规律、深部找矿与开发利用(待刊).
- 谢学锦,程志中,张立生,2008.中国西南地区76种元素地球化学图集.北京:地质出版社.
- 袁忠信,何晗晗,刘丽君,等,2016.国外稀有稀土矿床.北京:中国科学出版社.
- 邹天人,李庆昌,2006.中国新疆稀有稀土矿床.北京:地质出版社.