

doi: 10.12029/gc20170204

刘丽君, 王登红, 刘喜方, 李建康, 代鸿章, 闫卫东. 2017. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质, 44(2): 263–278.

Liu Lijun, Wang Denghong, Liu Xifang, Li Jiankang, Dai Hongzhang, Yan Weidong. 2017. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine[J]. Geology in China, 44(2): 263–278(in Chinese with English abstract).

国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状

刘丽君^{1,2} 王登红² 刘喜方² 李建康² 代鸿章² 闫卫东³

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 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; 3. 国土资源部信息中心, 北京 100812)

摘要: 2011 年以来, 随着新能源汽车的快速发展, 锂作为 21 世纪能源金属的地位日益凸显。文章仅就 2015 年和 2016 年国内外锂矿主要类型、特点和找矿方面的主要进展和动向作简要概括, 着重介绍近两年来世界范围内在卤水型、硬岩型以及其他类型锂矿勘探方面的找矿进展以及一些锂矿找矿热点地区的进展情况, 并结合近年来新兴产业发展的趋势和锂资源开发利用的新动向, 对中国的锂矿找矿与开发提出如下建议: 进一步摸清资源家底, 在重点地区有针对性地加强找矿工作, 为建设大型锂资源基地提供资源保障; 在突出卤水型和硬岩型重点类型的同时也关注新类型锂矿的找矿, 多型并举, 提高资源利用效率, 促进相关行业转型升级; 着手研究锂的循环利用和作为能源金属的高端开发利用, 为占领技术制高点提供科学依据。

关键词: 锂矿; 找矿; 进展; 建议

中图分类号: P618.71; P617 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)02-0263-16

The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine

LIU Lijun^{1,2}, WANG Denghong², LIU Xifang², LI Jiankang², DAI Hongzhang², YAN Weidong³

(1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Information Center of Ministry of Land and Resources, Beijing 100812, China)

Abstract: With the rapid development of new energy vehicles, lithium as an energy metal is increasingly important in recent years. This paper briefly summarizes the progress of the lithium prospecting both in China and abroad between 2015 and 2016 and the development trend. The authors focus on the progress and prospecting of brine type, hard rock type and other types of lithium ore as well as the hot lithium prospecting areas in the world. Meanwhile, combined with the development of new industry and lithium

收稿日期: 2017-03-30; 改回日期: 2017-04-25

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目“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(DD20160055)、“华南重点矿集区稀有稀散和稀土矿产调查”项目(DD20160056); “中国矿产地质与成矿规律系统集成和服务”(矿产地质志)项目(DD20160346)资助。

作者简介: 刘丽君, 女, 1991 年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: liulijunmails@163.com

通讯作者: 王登红, 男, 1967 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事矿产资源研究; E-mail: wangdenghong@sina.com。

resources utilization, some suggestions are made on prospecting and exploration of lithium resources in China. People should further understand lithium resources in China and strengthen the prospecting work in key areas so as to provide resources for the construction of large-scale lithium resources base. Geologists should not only focus on the brine type and hard rock type lithium mines but also pay attention to the prospecting for new types of lithium ore so as to improve resource utilization efficiency and promote the transformation and upgrading of related industries. Scientists should begin to study the recycling of lithium and the high-end exploitation and utilization of lithium as an energy metal for occupying the technical key point to provide a scientific basis.

Key words: lithium; prospecting; progress; suggestion

About the first author: LIU Lijun, female, born in 1991, doctor candidate, mainly engages in research on Jiajika typical deposit and rare metals; E-mail: liulijunmails@163.com.

About the corresponding author: WANG Denghong, male, born in 1967, senior researcher, supervisor of doctor candidates, mainly engages in research on mineral deposits; E-mail: wangdenghong@sina.com.

Fund support: Supported by the project of "Comprehensive intergration of Jiajika lithium basement in Western Sichuan" (No. DD20160055), "Comprehensive integration of rare metals, scattered metals and rare earth elements in ore concentration areas, South China" (No. DD20160056) and "Comprehensive integration and service of mineral geology and its metallogenic regularity in China" from China Geological Survey (No. DD20160346).

1 引 言

锂作为一种新型且重要的能源战略金属,在锂电池,新能源汽车,可控核聚变等领域发挥着显著的作用。同时由于其重要的战略意义,市场和经济等多因素的推动下,全球范围内都掀起了锂矿资源的勘查热潮及研究,2016年更是可以称得上是“全球锂矿找矿年”,与大宗矿产市场的萎靡不振相比,锂矿资源却相对成为了市场的热点。笔者初步分析了全球的锂矿资源分布及类型,同时关注近两年来世界范围内活跃的锂矿勘查活动,借此为国内市场与资本投资提供参考价值,为国内锂矿资源的开发和利用提供可行的建议。

2 全球锂矿资源分布

全球锂资源并不稀缺,至少20个国家发现了锂矿床,包括智利、玻利维亚、中国、澳大利亚、美国、巴西、葡萄牙、阿根廷、俄罗斯、津巴布韦、刚果民主共和国、塞尔维亚、西班牙、奥地利、以色列、爱尔兰、法国、印度、南非、芬兰、瑞典、莫桑比克等(图1)。其中,锂资源最丰富的国家有智利、玻利维亚、中国、澳大利亚等。可以说,就目前而言,整体还是以卤水型和伟晶岩型的锂矿为主体,沉积型等新类型锂矿的比重很小,而且世界范围内锂矿勘探的进展情况悄然影响着世界锂矿格局,目前世界范围内主要的锂矿床及锂矿项目如表1所示。

3 锂矿床的主要类型及找矿进展

到目前为止,自然界中发现的锂矿床最主要的有3种类型:卤水型、伟晶岩型和沉积岩型。据美国密歇根大学 Paul Gruber 和 Pablo Medina 统计(2010),含锂卤水型矿床占全球锂资源的66%,伟晶岩型占26%,沉积岩型占8%。此外,黏土型(在黏土矿床中含有锂)和湖成蒸发岩型(在湖成蒸发岩中含有锂)也具有潜在开发意义。

3.1 卤水型锂矿

卤水型锂矿是锂矿床的重要类型和锂的主要来源,主要分布在南美洲的玻利维亚、智利和阿根廷(表1),称为“锂三角区”。自20世纪80年代起开发利用盐湖卤水中巨大的锂资源,卤水提锂已成为世界锂工业的主导,1995年全球从卤水中提锂只占全部锂生产能力的26%,到2003年世界锂生产中卤水提锂所占的比例已上升到了91.2%。其成因机制主要是,在封闭盆地,特别是干旱沙漠地区的封闭盆地中,锂可在地下卤水中发生富集并形成有开采价值的锂矿床。在南美洲西部高原荒漠地区,已查明有世界著名的玻利维亚乌尤尼盐沼(Salar de Uyuni)和智利阿塔卡马盐沼(Salar de Atacama)巨型锂矿床,前者的成矿时代为白垩纪至古近-新近纪,后者属第四纪。此外,在美国西部内华达山脉与落基山脉之间的大盆地区域内已查明有西尔斯湖、锡尔弗皮克等地下卤水型锂矿床,它们的成矿

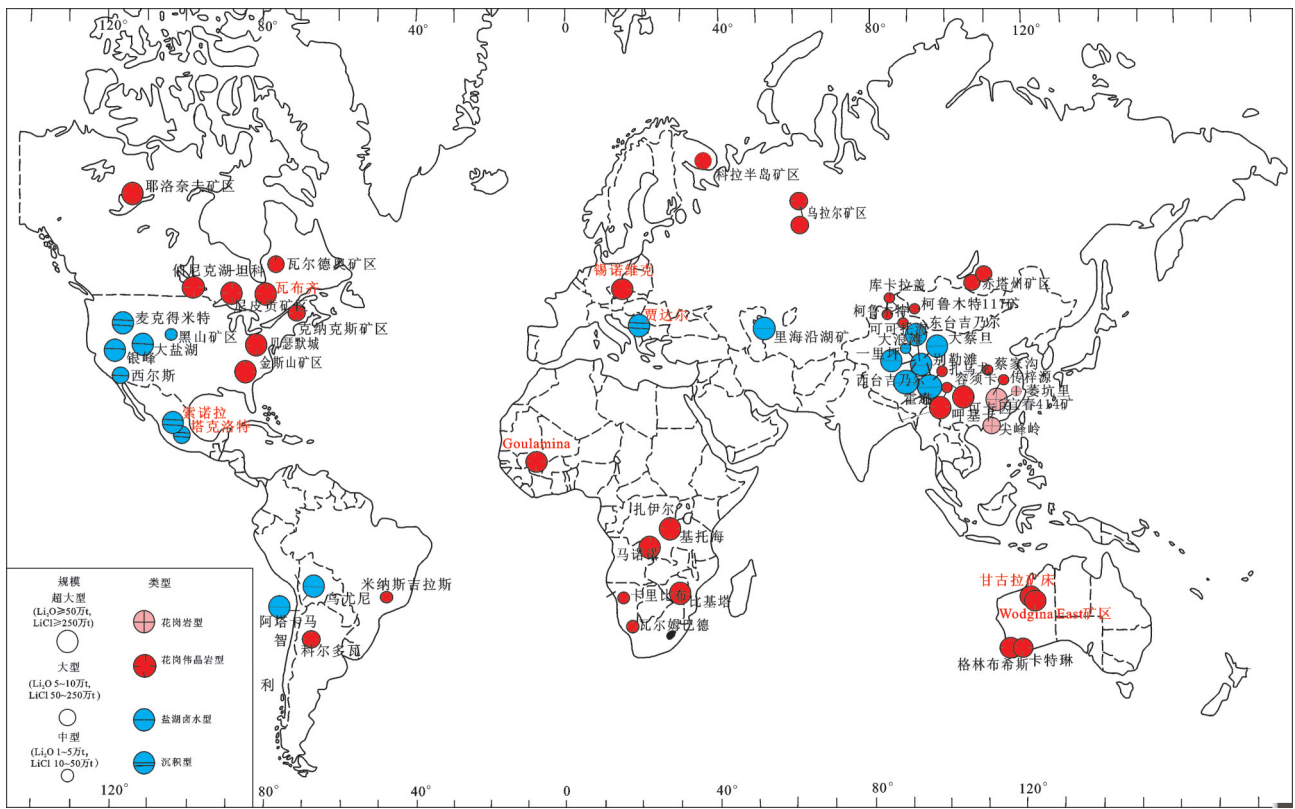


图1 全球主要锂矿床分布图(标示了近年来新发现的矿床)

Fig.1 Distribution of major lithium deposits in the world (with newly discovered ore deposits marked)

时代均为白垩纪至古近-新近纪。

阿塔卡马盐沼锂矿床位于安托法加斯塔以东200 km处,总面积3000 km²,盐核面积1400 km²。盐层总厚估计超过400 m。盐层顶部30 m以内呈多孔状,其中充满富锂的卤水。该矿床是目前世界最大锂产品原料基地之一,除提取锂之外,还从卤水中提取钾。

中国盐湖锂资源主要分布于青藏高原中的盐湖中。卤水类型有碳酸盐型、硫酸盐型和氯化物型3种,目前主要开发的是碳酸盐型和硫酸盐型。中国独有的优质碳酸盐型锂资源主要集中于西藏羌塘中部,即冈底斯板块中北部,那曲一师泉河公路南侧;硫酸盐型锂资源主要分布于柴达木盆地和藏北锂资源带的北侧;氯化物型盐湖锂资源主要分布于藏北无人区和青海可可西里地区(郑绵平等,2007)。

一般理解的卤水锂矿指的是南美的可地表开采的盐湖型锂矿,但近年来国际上尤其是美国不断强化深部卤水型锂矿的找矿工作,内华达也已经成为

为一个找矿热点地区(图2),那里在1977年施工的USGS钻孔(CV-5)深度仅为146 m(479 ft),钻遇的地下卤水含锂 $24 \times 10^{-6} \sim 110 \times 10^{-6}$ 。2016年12月21日,Advantage Lithium Corp.宣布,在内华达Clayton Valley一带钻获富锂热卤水,深度209.23~596.92 m,锂含量达243.66 mg/L,远高于1977年钻遇的卤水中的锂含量。这一新发现又进一步激发了全球对于寻找深部含锂热卤水的热情。

除了深部卤水找锂之外,在南美,2016年智利列出15个具有潜力的盐滩在全世界范围“招投标”,Pujasa盐湖也是其中之一,预计锂浓度为220 mg/L至620 mg/L。2016年9月,阿根廷卡塔马卡省的矿业和环境部门批准了Neo Lithium的环境报告和Tres Quebradas(3Q)项目的工作计划,允许公司进入勘探阶段,建造并运行试验蒸发池,建设必要的实验室以及永久和半永久的营地。

3.2 伟晶岩型锂矿

这类矿床的分布比较广泛(图1,表1),主要产在古老结晶地盾、地块等相对稳定的地质构造单元

表1 主要锂矿床及锂项目统计(以金属锂当量计)
Table 1 Statistics of major lithium deposits and projects (equivalent to Li metal)

大洲	国家	锂矿床/项目	类型	矿产	Li 资源量/万t	Li 品位/%	参考文献
亚洲	俄罗斯	Vishnyakovskoe	硬岩型	锂	21	0.49	Kesler et al., 2012
亚洲	中国	察尔汗盐湖	卤水型	锂、钾	260	-	何金翔, 2015
亚洲	中国	甲基卡	硬岩型	锂、铍	30	0.71	付小方等, 2014
欧洲	捷克	Cinovec	硬岩型	锂、锡、钨等	130	0.2	国土资源部, 2017
澳洲	澳大利亚	Greenbushes	硬岩型	锂、钽	56	0.74	何金翔, 2015
澳洲	澳大利亚	Pilgangoora	硬岩型	锂、钽	72.17	0.56	Pilbara Minerals Ltd., 2016
澳洲	澳大利亚	Wodgina East	硬岩型	锂	-	0.74	Altura Mining Ltd. 2016
澳洲	澳大利亚	Lynas Find North	硬岩型	锂	-	1.23	Metalicity Ltd. 2016
非洲	津巴布韦	Kamativi	硬岩型	锂、锡	28	0.28	Kesler et al., 2012
非洲	马里	Goulamina	硬岩型	锂	49	0.58	Birimian Ltd. 2017
非洲	扎伊尔	Manono-Kitotolo	硬岩型	锂	72	0.6	Kesler, et al., 2012
北美洲	加拿大	Whabouchi	硬岩型	锂	12	0.71	Nemaska Lithium Inc. 2016
北美洲	美国	Clayton NE 项目	卤水型	锂、钾	-	243.66 mg/L	Advantage Lithium Ltd. 2016
北美洲	美国	Bessemer City	硬岩型	锂	42	0.67	Kesler et al., 2012
北美洲	美国	Kings Mountain	硬岩型	锂	32	0.7	Kesler et al., 2012
北美洲	美国	Tanco	硬岩型	锂、钽、铍	14	0.64	Kesler et al., 2012
北美洲	墨西哥	Sonora	沉积型	锂	165.64	-	何金翔, 2015
北美洲	墨西哥	Tecolote	沉积型	锂	13	0.3	何金翔, 2015
南美洲	玻利维亚	Salar de Uyuni	卤水型	锂、镁	1020	0.05	何金翔, 2015
南美洲	智利	Salar de Atacama	卤水型	锂、钾、硼等	530	0.14	何金翔, 2015
南美洲	智利	Salar de Pujasa	卤水型	锂、钾	-	220~620mg/L	Wealth Minerals Ltd. 2016
南美洲	阿根廷	Cauchari-Olaroz	卤水型	锂、钾	274	0	何金翔, 2015
南美洲	阿根廷	Sal de Vida	卤水型	锂、钾	157.3	-	何金翔, 2015
南美洲	津巴布韦	Bikita	硬岩型	锂、钽、锡、铍、铀	15	1.4	Kesler et al., 2012
南美洲	塞尔维亚	Jadar	沉积型	锂、硼	96	0.84	赵元芝等, 2015

注：“-”表示未查到相关数据资料。表中数据由参考文献原始数据换算成金属锂当量。

中,成矿时代以前寒武纪为主,少数形成于早古生代。含矿伟晶岩可分为带状构造伟晶岩和无带状构造伟晶岩两大类。

(1)带状构造伟晶岩锂矿床。该类矿床的矿物成分复杂,除含有大量锂辉石、透锂长石、锂云母、锂霞石和磷铝锂石等矿物之外,还常含有少量综合利用的绿柱石、铌钽铁矿、锡石、铍榴石等多种稀有金属矿物。这类矿床中锂辉石含量约为20%,晶体粗大,最大长度可超过14 m,是目前优质低铁锂辉石精矿的主要来源(如澳大利亚的格林布希斯锂矿)。

(2)无带状构造伟晶岩矿床。此类矿床的伟晶岩体基本是单相均质岩体,由钠长石、微斜长石、石

英、白云母和锂辉石组成,少量矿物有绿柱石、锡石和钽铌矿物。锂辉石分布均匀,其含量可占岩体总量的25%,是伟晶岩型锂辉石的重要来源。这类锂矿床通常是独立的锂矿床,或者是伴有少量铍和钽的锂矿床。美国北卡罗来纳州“锡石-锂辉石”带的金斯山矿床和贝瑟默城矿床可作为典型代表。中国的锂辉石型锂矿床主要分布在新疆、四川、福建和陕西东秦岭等省(区),包括新疆可可托海、柯鲁木特锂铍钽矿床,四川甲基卡、可尔因、扎乌龙锂铍钽矿床和福建南平铌钽锂矿床。此类矿床的共性是多种稀有金属共生。不同的历史时期侧重于开采某种矿床。例如新疆可可托海和柯鲁木特

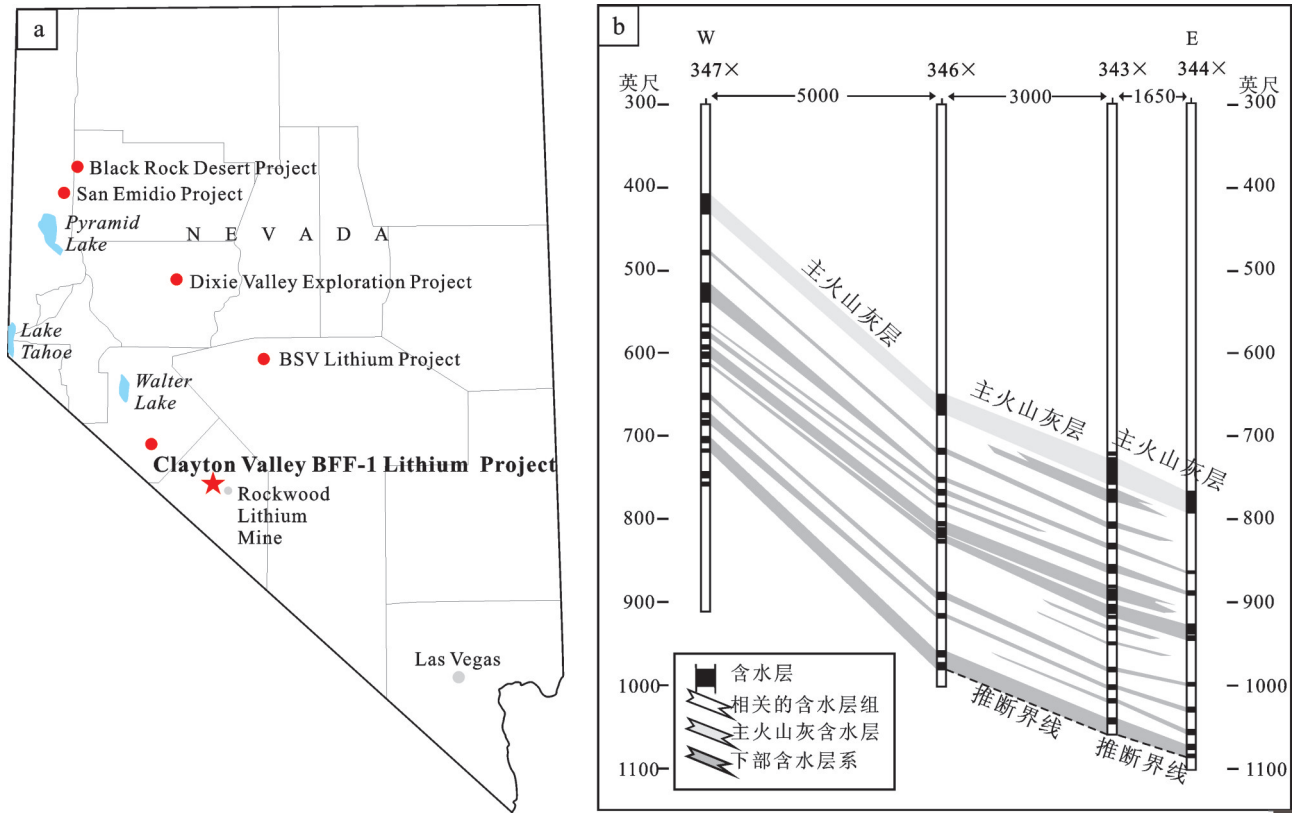


图2 美国内华达州 Clayton Valley 锂项目位置(a)及卤水矿床剖面图(b)
(深度自干盐滩表面向下计算, 据文献 Zampirro, 2003 修改)

Fig.2 Clayton Vally lithium project location (a) and brine deposit section (b) in Nevada, USA (modified after Zampirro, 2003)

等稀有金属矿床在早期以开采铍资源为主,近年来逐渐偏重于锂资源的开发利用。

伟晶岩型锂矿由于分布范围不像卤水型锂矿那样局限于少数几个盆地,因而引起了全世界的勘查兴趣,勘查新进展也很多。如西澳皮尔甘古拉矿田(Pilgangoora)这个世界级的伟晶岩型锂矿田,具有埋深浅、矿体厚、高品位的特点(图3),侵位于太古宇皮尔巴拉克拉通绿岩带内,2016年7月资料显示该矿田的总资源量达12860万t, Li_2O 平均品位为1.22%。欧洲也掀起了找锂矿的热潮,据国土资源部发布的矿业信息显示,2015年2月,欧洲金属控股公司宣布其锡诺维克项目的推测矿石资源量为5.148亿t, Li_2O 平均品位为0.43%,即 Li_2O 资源量为221.36万t,碳酸锂当量为700万t,因此也使该项目一跃成为世界级锂矿床。近日,该项目最新完成17个钻孔,并升级了资源量,再次传来捷报。锡诺维克项目最新计算的矿石资源量为6.565亿t, Li_2O 品位0.43%,锡品位0.04%。

3.3 沉积型锂矿床

广义的沉积型锂矿床一般指的是产于沉积岩中的、尚不具备独立工业开采而具有市场竞争价值的锂矿床,包括产于铝土矿、煤矿、高岭土矿床中可作为伴生矿产利用的矿床,一般含量不高、赋存状态不清楚或者往往没有独立矿物而是赋存在黏土矿物晶格中,难以经济有效地开发利用,但由于其资源总量非常大而引起了高度重视,尤其是对一些经济效益不高的大宗矿产类矿山企业,一些实现了技术突破,必将引领产业的新发展。如,贵州大竹园铝土矿区 Li_2O 含量可大于0.50%、可以独立开采的锂矿本身也是铝土矿(王登红等,2013);而 Li_2O 含量大于0.05%,可以作为伴生矿产综合利用的锂资源,既可以出现在铝土矿中,也可以出现在低品级的铝土岩中,还可以出现在黏土岩中。

值得重视的是,自从在塞尔维亚贾达尔盆地发现Jadarite(羟硼硅钠锂石)含锂新矿物之后,沉积型锂矿有了新的含义,即具备了独立开采的可能性。

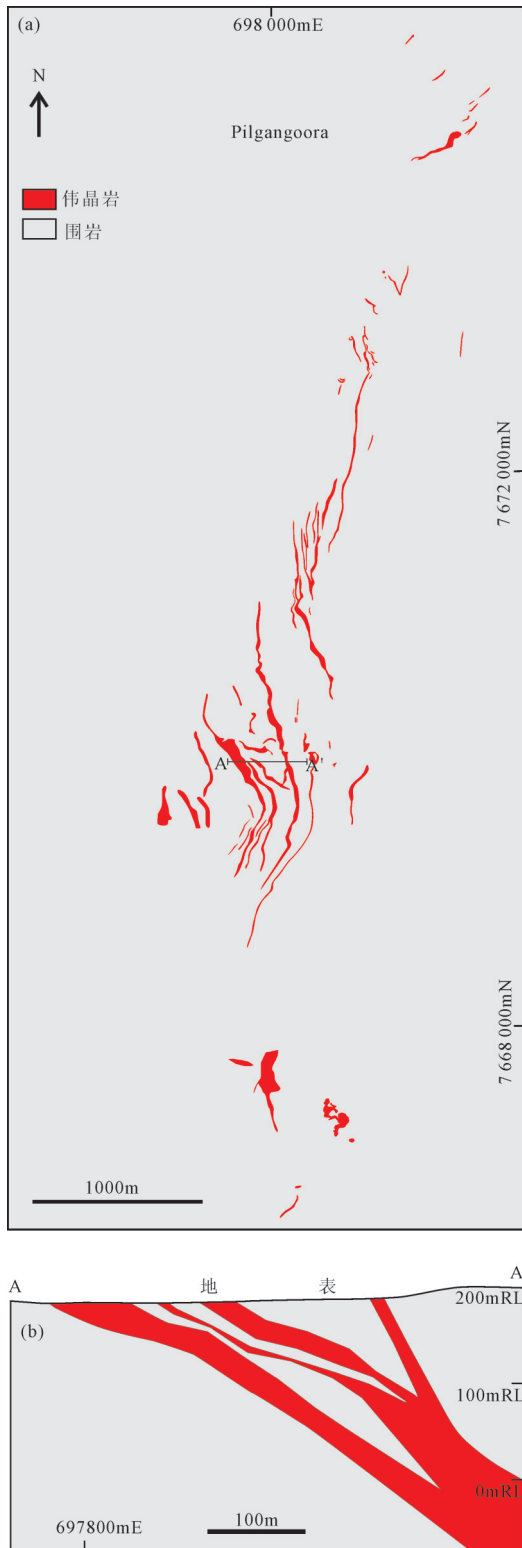


图3 皮尔甘古拉伟晶岩矿田简化平面图(a)、剖面图(b)(据 Pilbara Mineral Ltd., 2016 修改)

Fig.3 Simplified plan view (a) and section (b) of Pilgangoora pegmatite field, western Australia(modified after Pilbara Mineral Co., Ltd., 2016)

由于羟硼硅钠锂石是一种含硼锂硅酸盐矿物,同时含硼和锂,是世界少见的一种矿物中能够同时开发硼和锂两种重要资源的特殊矿物,其中Li₂O的含量也达到7.3%,与锂辉石相似。目前贾达尔推断的矿石量至少11460万t, Li₂O含量为1.8% (即Li₂O资源量可达206万t)。矿体产于中新统湖相沉积岩中(图4),凝灰岩层、低电阻率、重力异常低可作为找矿标志,而选矿和化工处理流程又比较简单,因而羟硼硅钠锂石新矿物的发现及贾达尔锂硼矿的勘探也推动了东欧及世界其他地区寻找沉积型新类型锂矿的找矿热潮(赵元艺等,2015)。

3.4 黏土型锂矿床

富锂黏土主要是富含锂皂石、皂石和斯皂石的黏土。已知在美国西部的锂皂石黏土中蕴藏有巨大数量的锂资源。美国在20世纪70年代就可以把古风化壳黏土岩中75%的锂提取出来。中国华北煤矿分布区的石炭系本溪组中的黏土矿分布也十分广泛,是中国重要的耐火材料原料基地,河南焦作、山西运城等地的黏土矿、铝土矿及其围岩——黏土岩普遍含锂,氧化锂含量远远超过《矿产工业要求参考手册》中对西南某含锂镓铝土矿床的锂的要求。此类矿床的资源量往往可以达到超大型规模而备受关注,如,2016年1月6日,加拿大阿利克斯资源公司宣布在墨西哥塔克洛特(Tecolote)发现了富含锂的黏土层(黏土型锂矿),推测资源量为4330万t,锂平均品位0.3005%。塔克洛特锂矿化区发育在古近-新近纪渐新世到中新世的流纹质凝灰岩、熔结凝灰岩区和火山角砾岩区,矿体由一系列含锂的黏土层组成。上层含锂矿物主要是锂皂石,下层含锂矿物是多硅锂云母。

4 全球锂矿资源找矿勘探开发趋势

4.1 找矿勘探现状

4.1.1 西澳

西澳的格林布希斯,是目前世界上最大的锂辉石矿山,其锂辉石精矿产品出口到中国。由于格林布希斯的研究程度较高,以点带面,带动了区域性的找矿热,皮尔巴拉地区就是一个典型的突出区域,该区目前就有多个锂矿项目正在勘探。其中,西皮尔巴拉(Western Pilbara)正迅速成为锂辉石精矿的一个新的全球采矿中心,此地已经勘查了几个

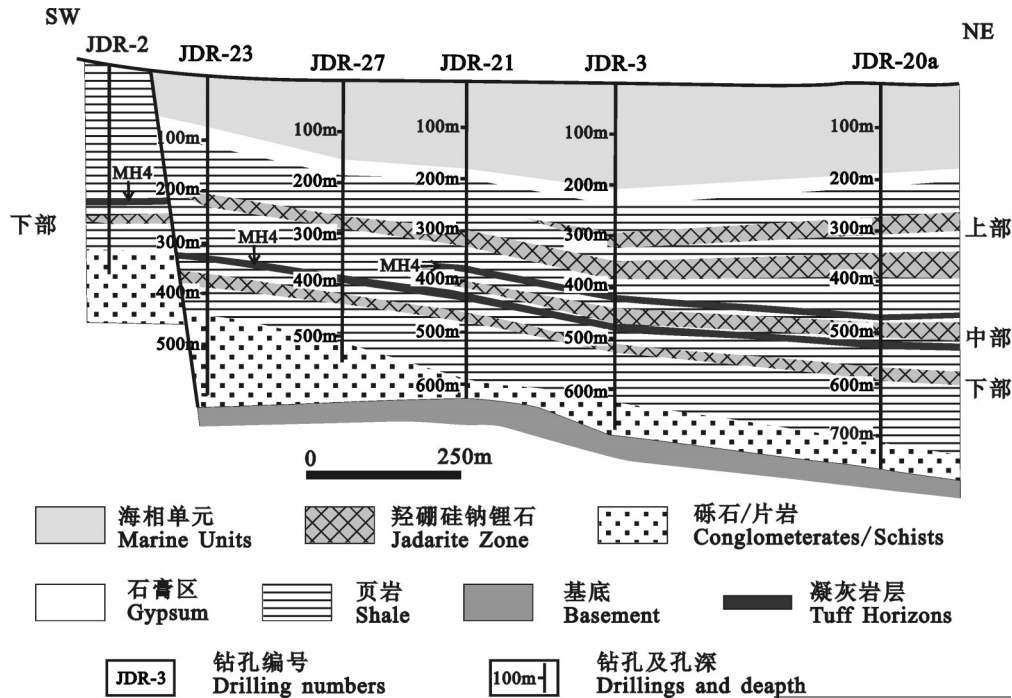


图4 力拓公司勘查Jadar见矿层位剖面示意图(据Kellie,2009修改)

Fig.4 Sketch map of Rio Tinto exprolation area, showing the ore deposit (modified after Kellie, 2009)

世界级的锂矿床,如皮尔甘古拉(Pilgangoora)矿床并有可能发现更多的锂矿。与此同时,东皮尔巴拉的锂勘探活动也在加强。2016年11月29日, Kairos Minerals 公司与 Altura Mining 公司在 Wodgina East 锂矿项目上成立合资公司共同开发。Wodgina East 锂项目包括一个具有良好锂辉石矿化记录的伟晶岩矿田,报道的Li₂O品位高达1.6%。其区域地质和构造情况与皮尔甘古拉锂矿相似。Kairos Minerals公司的总经理Joshua Wellisch表示,包括Wodgina East锂矿项目,他们将在东皮尔巴拉地区也形成一个重要的锂资源勘探基地。

2016年6月, Mining Projects Group (MPJ)集团收购Pilbara Gold-Lithium项目,以强化其在东皮尔巴拉地区的找矿工作。2016年上半年, Kairos Minerals公司一边收购Wodgina East锂项目,一边致力于在其100%控股的Mount York Gold-Lithium项目开发黄金资源(拥有含金1.42 g/t的569.2万t矿石)。在靠近Wodgina East锂矿项目的Wodgina Tantalum 矿山,由Pilbara Minerals公司和Altura Mining公司共同开发。Pilbara Minerals公司拥有Li₂O品位为1.26%的8020万t矿石资源量; Altura

Mining公司拥有Li₂O品位为1.05%的3570万t矿石资源量。

位于西澳皮尔巴拉地区的Lynas Find North 锂项目包括3个授权矿权,占地面积约51 km²,位于Pilgangoora绿岩带。该项目距离Pilgangoora锂矿约8 km。虽然没有进行过系统调查,但已经确定了含锂伟晶岩的存在。初步的勘查工作发现局部存在高品位的资源,其中有厚达21 m、Li₂O达2.64%的优质资源。

此外,2016年3月, Galaxy Resources公司收购General Mining公司,两家矿业公司之间的合并使位于澳大利亚的Mt Cattlin 矿山得以重新开发。

4.1.2 北美

除了前文述及的美国内华达已成为寻找深部卤水型锂矿的热点地区之外,北美的加拿大也是一个对伟晶岩型稀有金属具有悠久研究历史、研究程度较高的国家,矿业资本市场一直很活跃,近年来也把关注点投向了锂矿。其中,位于加拿大魁北克省的瓦布齐(Whabouchi)锂矿最引人注目,该矿床被认为是北美洲最富的世界级硬岩型锂矿床, Li₂O平均品位达1.53%,矿石资源量可达2700万t

(Chagnes et al., 2015)。另外, Sayona Mining 公司收购了加拿大魁北克省的 Authier 锂矿床, 期望通过进一步探索扩大现有的资源量, 并确定矿权包中的其他资源, 以扩大项目规模。Authier 锂矿床位于 Val d'Or 市西北 45 km 处, 长达 825 m, 位于含锂辉石的伟晶岩侵入体中, 平均厚度为 25 m, 最小为 4 m, 最大为 55 m。该项目最初在 1991 年至 1999 年间进行过钻探, 完成钻孔 123 个, 钻探米数超过 1.5 万 m, 测定样品 2143 个 (Sayona Mining Ltd. 2016.)。

4.1.3 非洲

非洲的地质工作程度低, 但成矿条件好, 尤其是稳定地台(地盾)区在经历了裂谷化构造演化之后, 伴随碱性岩浆作用、碳酸岩浆作用、伟晶岩作用等特殊地质作用可形成多种多样的稀有金属矿床, 如泛非地台上扎伊尔北卢古鲁伟晶岩田的曼诺诺和科特科特 (Manono-Kototolo) 曾经盛产锂辉石, 津巴布韦比基塔伟晶岩田中的 Kamativi 也曾经是锂辉石的著名产地, 伟晶岩规模较大 (图 5)。

近年来, 非洲的锂矿勘查也重新升温。如, 西非马里南部地区由于存在高品位的锂矿化而成为

一个新的找矿热点地区。其中, Bougouni 锂项目和 Diendio 项目已经经过多次股权转让, 说明锂矿勘查之活跃、竞争之激烈。Bougouni 锂项目位于马里南部, 拥有 Goulamina 锂矿床, 估计资源量为 1550 万 t, 含 1.48% 的 Li_2O , 合计 Li_2O 22.9 万 t。部署在 Goulamina 锂矿床的 10000 m 钻探工作仍在进行中, 预计 2017 年上半年完成 (Birimian Ltd., 2017.)。Diendio 锂项目位于马里首都巴马科以南约 230 km 处, 包括 3 个特许经营权, Diendio Sud、Diossyan Sud 和 Manankoro Nord。2016 年 11 月, Kodal Minerals 公司收购了该项目, 并派地质学家现场调查, 证明存在含锂辉石(含锂矿物)的粗粒伟晶岩。

4.1.4 亚洲

在中国四川西部的甘孜州和阿坝州, 近年来寻找伟晶岩型锂矿的成果也是非常显著的。其中, 位于康定、道孚和雅江三县交界处的甲基卡伟晶岩型锂矿田, 在 20 世纪 70、80 年代勘查的基础上, 通过 2011 年以来中国地质调查局的立项支持, 于 2013 年取得了发现超大型矿脉(新三号脉)资源量达 64 多万 t Li_2O 的重大突破(按中国标准, 10 万 t 即为大型), 且矿石品位稳定在 Li_2O 1.3% 左右, 并于 2014、2015、2016 年进一步扩大规模 (图 6), 使得整个矿田的资源量超过 200 万 t, 为川西大型锂矿资源基地的建设奠定了基础 (王登红等, 2013, 2016; 付小方等, 2014, 2015)。与此同时, 在阿坝州马尔康、金川和壤塘县三县交界处的可尔因伟晶岩矿田中, 以往开采的马尔康阿拉伯 503 号脉和金川县观音桥两处采矿区资源枯竭, 但马尔康的党坝、金川县的李家沟等地均取得了找矿突破, 其中, 李家沟和党坝已达超大型规模, 地拉秋达大型规模, 新发现的业龙沟(业隆沟)、热达门和瓦英等地也具有资源前景。据“四川省金川县李家沟锂辉石矿资源量核实报告”, 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。除李家沟之外, 其它矿区均正在勘查, 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)。总体上看, 甘孜州和阿坝州通过进一步的找矿, 专家们预测能新增氧化锂资源量 200 万 t。

4.2 锂矿开发现状

据美国地质调查局 2017 年资料, 截至 2015 年,

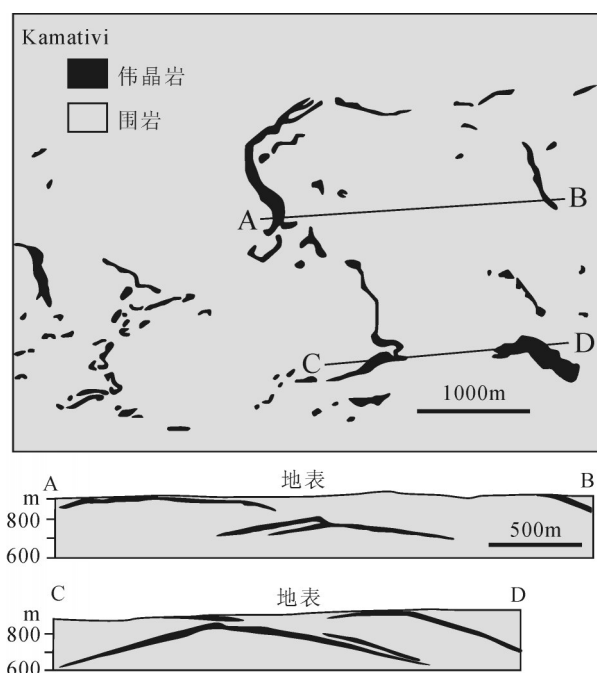


图 5 津巴布韦 Kamativi 锂矿地质简图
(转引自文献 Kesler et al., 2012)

Fig.5 Sketch geological map of Kamativi pegmatite field, Zimbabwe (after Kesler et al., 2012)

表2 全球锂储量
Table 2 List of global lithium reserves

国家/地区	锂储量 (万吨)
澳大利亚	21.18
智利	13.60
阿根廷	5.30
中国	4.30
津巴布韦	0.47
巴西	0.16
葡萄牙	0.80
世界总计	39.91

注:资料来源:U. S. Geological Survey. 2017. Mineral Commodity Summaries。

全球探明锂储量约1 400万t(表2),与2014年相比,探明锂储量增长3.7%。

2015年以来,全球锂消费量继续快速增长,2015年的消费量达到21.18万t(碳酸锂当量),比2014年增长了30.7%。2015年,中国碳酸锂价格形势也十分看好。工业级碳酸锂价格从2015年年初的40214元/t,上涨到2015年6月30日的45071元/t,涨幅为12.08%;进入下半年,由于政策红利的释放和新能源汽车放量增长等因素,中国锂价格出现暴涨,工业级碳酸锂价格从6月底的45071元/t,飙升到年末每吨100753元,涨幅达123.5%。中国市场碳酸锂价格的涨势一直延续至2016年3月底。中国的锂矿物进口主要来自澳大利亚(每吨约430美元左右),而锂产品(碳酸锂)进口主要来自智利和阿根廷。

据美国地质调查局资料(2011—2017年)显示,世界锂主要生产国有:澳大利亚、智利、中国、阿根廷、津巴布韦等。其中,澳大利亚和智利一直是两个最主要的生产国,近两年两国锂产量之和约占世界总产量的78%。过去7年世界锂矿山产量见表

3。近几年来,澳大利亚、智利、阿根廷的锂产量都呈现明显的稳步上升趋势,虽然其他国家的锂产量涨幅不明显,但世界范围内的锂产量总体呈现上升趋势(图7)。

2015年,澳大利亚仍然是全球第一大锂生产国,主要开发位于西澳州珀斯附近的格林布希斯(Greenbushes)硬岩型锂矿床。格林布希斯是世界上规模最大、品位最高的锂辉石矿床之一,由泰利森矿产(Talison Minerals)公司所有,锂资源量约56万t,矿床平均含锂品位高达1.59%。智利过去多年一直是世界上最大的锂生产国,近三年(2013—2015年)产量有所下降,成为世界第二大锂生产国,主要开采卤水矿床,有两个卤水矿山,其中位于智利北部的阿塔卡马盐湖(Salar de Atacama)是全球最大的卤水锂矿床之一,面积达3000 km²,卤水锂含量达0.14%,含锂资源量530万t。阿根廷是世界第三大锂生产国,主要开采位于布宜诺斯艾利斯西北约1360 km处的翁布雷穆埃尔托(Hombre Muerto)卤水矿床。2015年,阿根廷一座新的锂卤水矿山也投入商业性生产。

5 对中国锂矿找矿与开发的讨论与建议

5.1 发展趋势

锂被称为21世纪的能源金属,一方面旨在强调其在电器充电电池及新能源汽车领域中的快速发展,另一方面也是为了突出其作为可控核聚变原材料的潜在的、但的确是十分巨大的社会经济影响力。按照美国科学家的预计,2040—2050年间有可

表3 世界锂矿山产量(t)
Table 3 Production of lithium mines in the world (Li metal/t)

国家或地区	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年 ^e
澳大利亚	9260	12500	12800	12700	13300	14100	14300
智利	10510	12900	13200	11200	11500	10500	12000
阿根廷	2950	2950	2700	2500	3200	3600	5700
中国	3950	4140	4500	4700	2300	2000	2000
津巴布韦	470	470	1060	1000	900	900	900
巴西	160	320	150	400	160	200	200
葡萄牙	800	820	560	570	300	200	200
世界总计	29100	24100	24070	22070	21660	21500	25200

注:e-估计值;资料来源:U. S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries (2011—2017)。

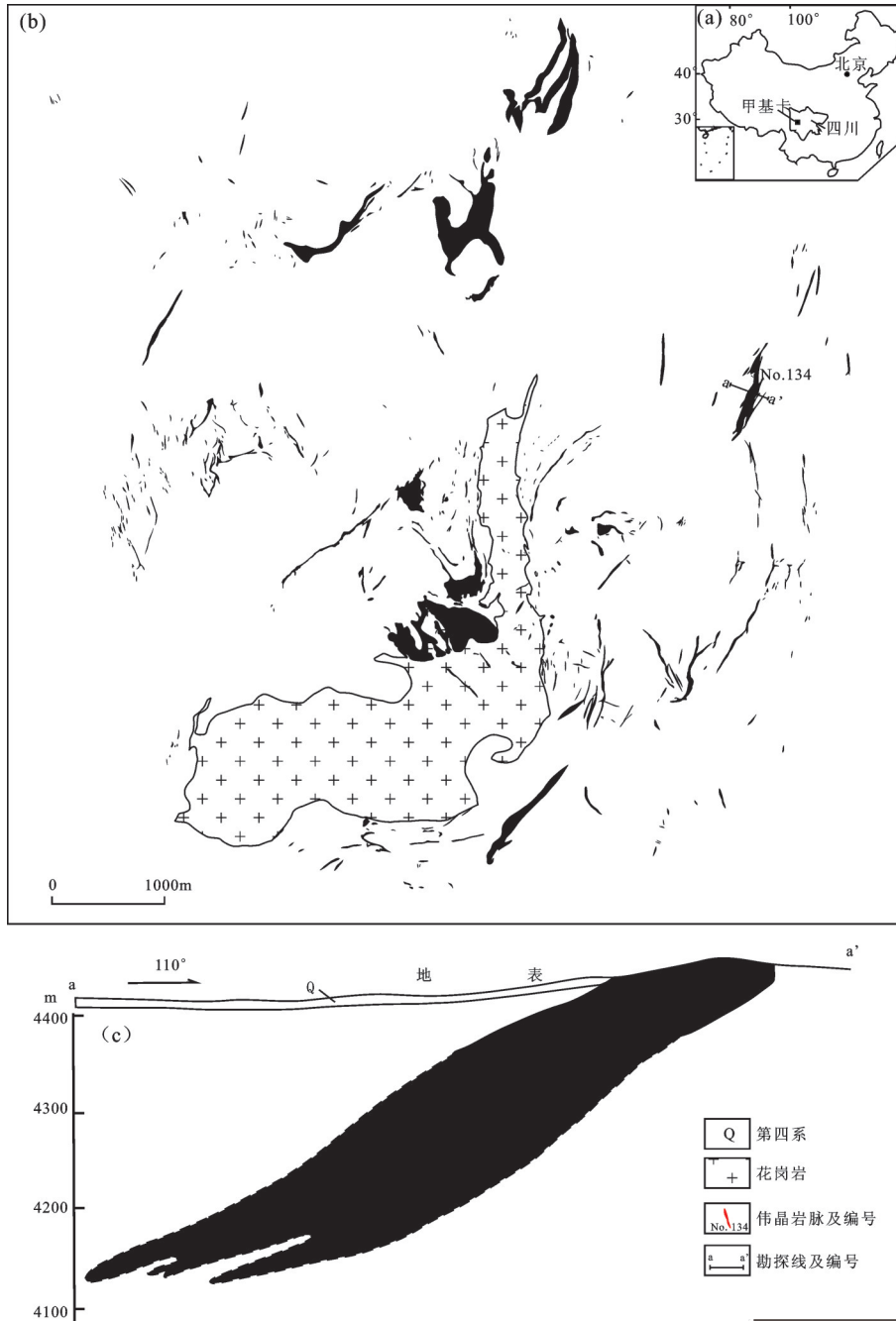


图6 四川甲基卡伟晶岩矿田位置图(a)、简化平面图(b)及剖面图(c)
 (据唐国凡等,1984;四川省地质调查院,2014;付小方等,2015;刘丽君等,2015修改)

Fig.6 Location(a), sketch map (b) and section (c) of Jiajika pegmatite field, Sichuan (modified after Tang et al., 1984; Geological Survey of Sichuan Province, 2014; Fu et al., 2015)

能实现可控核聚变的商业化,而可控核聚变使用的是锂原料(不是铀)。国际核聚变反应堆将于2019年开始实验,预计将在2040年前建成2000 MW至4000 MW的示范性核聚变电站(游清治,2013)。中国于1967年6月17日成功爆炸的第一颗氢弹,利用

的就是氘化锂。据估计,1 g 锂放出的有效能量最高可达8500~72000 kW·h,比²³⁵U裂变所产生的能量大8倍,相当于3.7 t标准煤(王乃银,1989)。生产100亿度电的锂反应堆,只需要10 t金属锂(王秀莲,2001)。因此,充分开发锂作为能源金属的潜力也

是保护环境、从根本上解决能源问题的一个重要新手段(王登红等,2016b)。

目前,锂的实际开发利用也的确受到了世界各国的高度重视,其消费增长势头也会持续。无论是军用还是民用,也无论是采用哪种类型的预测模型,全世界都认为对于锂的需求是刚性的。比如,Vikström(2013)预测,对于锂的需要将持续增长,一直到2080年左右才会出现拐点(图8)。

20世纪90年代晚期以来,地下卤水采矿成为世界碳酸锂生产的主要来源。但由于价格上涨,无论是卤水锂还是矿物锂(伟晶岩型为主),都具有较大的盈利空间,因而盐湖中的锂和硬岩型锂都在开发利用,只是硬岩型锂矿的成本要高一些而已,但相对于利润来说,开采伟晶岩型锂矿仍然是可以获得巨额利润的。澳大利亚格林布希斯锂矿的复产并大规模扩产,便是明证。尤其是到了2015年,由于中国锂需求的快速增长,世界卤水锂和矿物锂的产能大致各占50%,澳大利亚也一度成为最大的锂矿生产国。因此,在以往“便宜的卤水锂够用”的观点影响下、不被看好的伟晶岩型锂矿当前也得以充分开发,甚至引起了新一轮的全球性找矿热潮,因为伟晶岩型锂矿的找矿空间很大,而表层卤水就集中在南美等地几个大盐湖中,且被“垄断着”,一般投资人难以介入。

在需求的拉动下,围绕相对成熟的开采技术,卤水锂和硬岩锂成为两个主要的找矿方向。黏土层中的锂矿虽然规模巨大,但作为非传统型锂矿,目前还不具备开发利用的现实意义,但一旦找到了新的切入点,也将产生重要的影响。比如,类似于贵州大竹

园铝土矿区的锂如果能得到综合回收利用(王登红等,2013),或者研发出新的冶金技术和工艺流程,带动冶铝工业的新革命,既降低能耗又能直接生产出“锂-铝合金”(制造飞机机身等飞行器的原料,因此,锂和铝一样被称为“飞行金属”),那么,当前处于亏损境地的铝土矿矿山企业和冶金企业有可能重获新生。

卤水锂和硬岩锂是锂资源开发的主要对象,也是找矿的主导方向,新类型的锂资源值得探索但需要加大全方位的研究,包括锂的赋存状态、富集机制和回收技术等。中国目前是全球第四大锂生产国,锂生产主要来自卤水,开发位于西藏和青海的含锂卤水,生产碳酸锂、氯化锂和氢氧化锂等。中国也生产少量硬岩锂矿。但中国生产碳酸锂、氯化锂和氢氧化锂的原材料,大部分来自进口的锂辉石甚至进口的卤水,部分来自国内卤水和硬岩矿山。中国国内已经形成了卤水型和硬岩型锂矿均能加工处理的产能,因此其找矿工作也主要围绕卤水锂和硬岩锂展开,但注意铝土矿及其他类型包括沉积型锂的综合评价也是非常必要的。

需要特别注意的是,中国在充分利用两个市场、两种资源的实践中,走了不少弯路。当前我国锂的对外依存度高达74%,如何到国外去找矿、开矿也是需要深入研究的,不能再次被国际市场“玩弄”。比如,塞尔维亚新增加了200多万t的锂资源,但基本上被美国、澳大利亚等国的国家矿业巨头垄断,中国要再进入也不容易。即便是位于邻国阿富汗的锂矿,中国要进入也不易,但象非洲这样的地区仍有很大的找矿潜力和回旋余地,值得中国企业在走出去的时候高度重视。

另一方面,技术创新始终是战胜竞争对手的不二法宝。全球盐湖绝大多数锂资源都是高镁低锂型,从高镁低锂卤水中提纯分离碳酸锂的工艺技术难度较大,这些技术目前主要掌握在少数外国公司手中。根据初步统计,目前全球约2/3的锂产自卤水。随着锂提取技术的日益成熟和更多国家掌握从卤水中提取锂化合物的技术,这一比例可能会进一步提高。据电池大学(Battery University)资料,在拉美地区,生产一吨锂需使用750t卤水。我国的中信集团也在青海取得了从高镁锂比“不良”卤水中回收锂的新突破,但有报道称韩国钢铁巨头

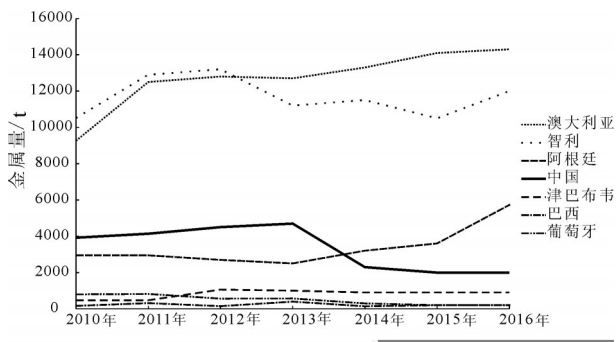


图7 2010—2016年世界矿山锂产量变化图

Fig.7 Change chart of lithium production in the mines of the world between 2010—2016

POSCO“改行”搞锂业开发,并且发明了新的方法,可以将传统蒸发池需要12~18个月的提锂周期(回收率50%)缩短到8h(回收率达90%)。如果此技术得到现实应用,其影响无疑是巨大的,对传统技术来说几乎是颠覆性的。因此,我国也迫切需要加强提锂技术的研发,一方面有助于开发国内的卤水锂资源,另一方面也有利于在勘查、开发国外资源的时候抢占技术优势,因此,即便是对南美这样的“老牌”卤水锂矿集区,也仍然存在合作开采开发的空间。其中,玻利维亚是全球最大的锂潜在资源国,其乌尤尼盐湖(Salar de Uyuni)(卤水)锂矿床是全球最大的锂矿床之一,含锂品位平均达0.0532%,锂资源量高达1020万t,占全球锂资源总量的27%。但由于种种原因,该矿床至今仍处于可行性研究阶段。

5.2 对中国锂矿勘查的建议

中国是目前世界第一的锂消费大国,几乎占用40%的原锂资源,为此而大量进口;另一方面,我国新能源汽车作为七大新兴产业领域之一,得到了国家的大力支持,按照工信部的《汽车产业中长期发展规划》,2020年新能源汽车产量达200万辆,需要增加10~14万t碳酸锂的消耗(合1.80~2.52万t金属锂);再一方面,我国国内的产量从2011年的4140t降低到2015年的2200t,缺口越来越大。因此,国家层面上高度重视对锂资源的勘查与开发,在《全国矿产资源规划(2016—2020)》中18处提到锂,把锂作为9个需要“储备和保护矿种”之一、24种战略性矿种之一,“十三五”期间设立了1个国家规划矿区(甲基卡)和7个重点勘查区,下达的勘查指标是60万t Li₂O,并要建设2个能源基地(甲基卡,柴达木)。而在《全国矿产资源规划(2008—2015)》,对锂只字未提。

那么,如何寻找到更多、更好的锂资源并且开发利用好锂这一关乎新兴产业发展大局的“关键金属”资源呢?本文提出如下3条建议。

5.2.1 摸清资源家底,重点部署找矿工作

进一步摸清国内和国外的锂资源家底,在资源潜力大的地区部署有重点的找矿工作,立足于为大型锂资源基地的建设提供资源保障,而不一定要撒胡椒面似的“全面铺开”。总体上看,锂在全球范围内尚不是急缺矿种,中国也不是,但未雨绸缪是必要的。过去几十年的教训应该吸取。中国曾经

摘掉了贫油的帽子,中国也曾经停止了铁矿的找矿,但无论是石油还是铁都是高度依赖国外的,而且对外依存度越来越高,难以保证国家的资源安全。锂虽然是小矿种,但对于新兴产业的发展来说,至关重要,是关键金属中的关键,因此,有必要在2006—2013年全国重要矿产潜力评价的基础上,进一步摸清国内的资源家底(图9);同时也从四川天齐锂业并购澳大利亚格林布希斯锂矿“蛇吞象”的过程中吸取经验教训,以国际视野来考虑锂矿的找矿与开发。前文所述国外这几年的找矿突破,也充分说明国际上的找矿潜力还是很大的。

据美国地质调查局2017年资料,2016年美国发现的锂资源有690万t,全球其他地区有约4010万t,其中,玻利维亚有锂资源900万t,智利有锂资源750万t,阿根廷有锂资源900万t,澳大利亚有锂资源200万t,中国有锂资源700万t,加拿大有锂资源200万t,刚果(金)、俄罗斯和塞尔维亚各有锂资源100万t,巴西和墨西哥各有锂资源20万t,奥地利有锂资源10万t。2016年,美国、阿根廷、中国、澳大利亚和加拿大都有明显的锂资源量的增长(图10),这些有潜力的地区,尤其是与已探明资源量相差较大的国家和地区(对比表1),不妨作为今后调查研究、地质找矿和开发利用的重点,但肯定不局限于此。如美国探明的储量只有3.8万t(表1),而资源量达690万t,说明其找矿前景是非常大的。

5.2.2 多种类型并举,突出优势类型

毫无疑问,卤水型锂矿的成本低于伟晶岩型,

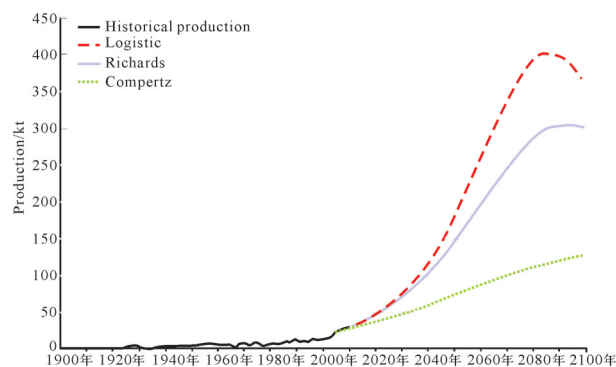


图8 1990—2100年世界锂产量预测图
(转引自Vikström et al., 2013)

Fig.8 Prediction of global lithium production from 1990 to 2100 (after Vikström et al., 2013)

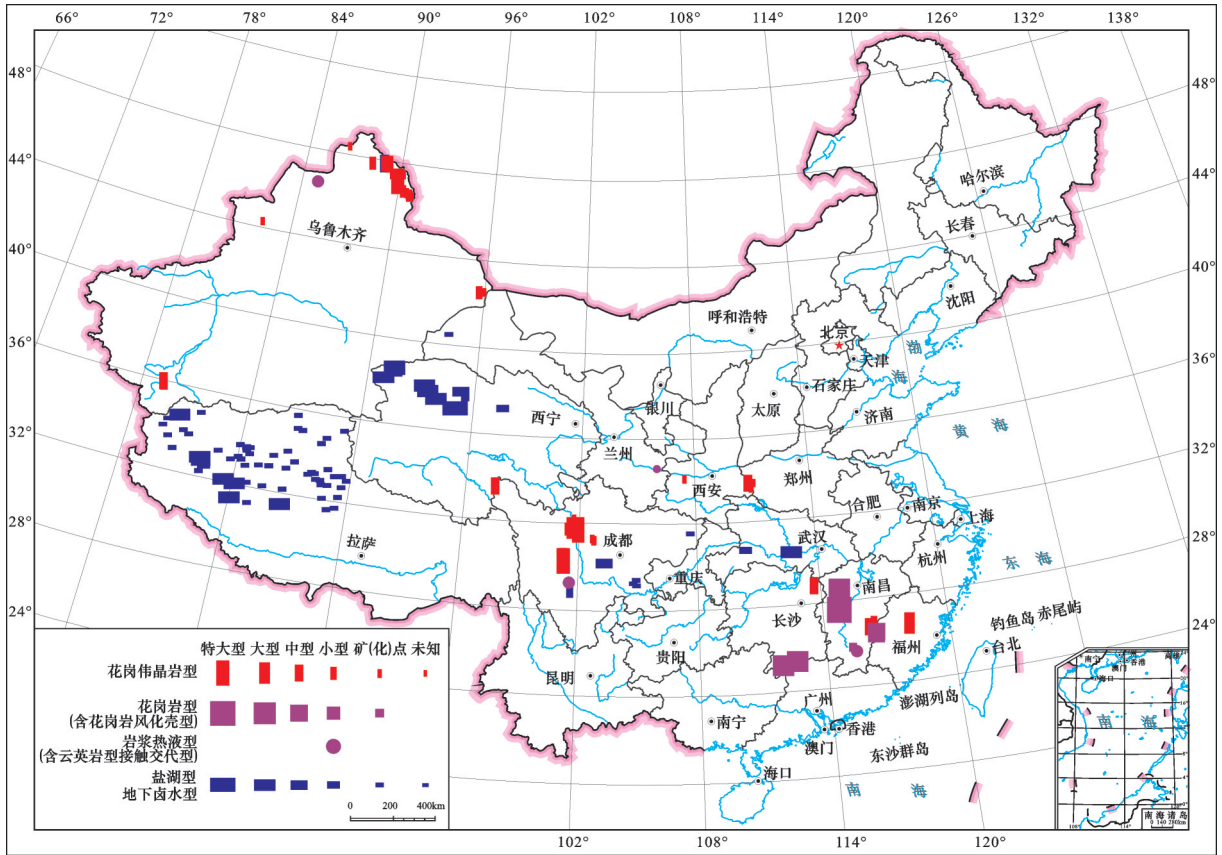


图9 中国锂矿床分布图
Fig.9 Distribution of lithium deposits in China

但在市场经济条件下,卤水锂和硬岩锂的开发均可获利,各有所长,二者的找矿是并重的,开发也如此,不能只注意卤水锂而放弃硬岩锂,也不能只回收浅表盐湖中的锂而不顾深层卤水中的锂。预计未来若干年,世界锂产量还会继续增加,这是因为目前一些国家正在建设的锂矿项目如玻利维亚的乌尤尼盐湖锂矿项目、阿根廷卡塔马卡省锂矿项目等会相继投入生产;另一方面,由于国内锂消费需求会保持增加,因此会带动世界锂消费总量的进一步增长,但由于全球经济增长乏力以及中国经济增长放慢,对锂产品需求量的增长也可能有所放缓,而过热的投资会造成产能的过剩,带来的也许是“恶性”竞争。鉴于当前锂矿的生产集中在个别国家的少数几个矿区,一旦发生战争或其他,全球锂供应格局将会深受影响。因此,中国既要继续深化盐湖提锂技术的创新,也要保证硬岩型锂矿资源的储备,同时也要注意新类型尤其是共伴生于其他矿种中的锂资源的调查研究和综合利用(如前述之铝

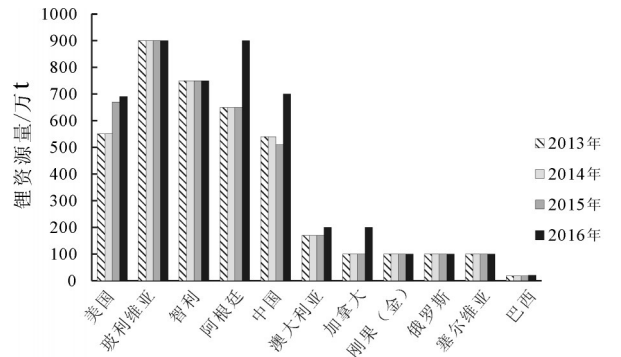


图10 2013—2016年主要锂生产国探明锂资源量变化情况柱状图
Fig.10 Change of proved lithium resources of major lithium producing countries between 2013-2016

土矿中的锂),以期改善盈利效果较差企业的经济运行,促进其转型升级,同时也回收锂资源。

5.2.3 加强锂循环利用研究

着手锂循环利用的研究,更要着手开始将锂作

为能源金属高端开发利用的研究,为占领技术制高点提供科学依据。美国早已开始了此类研究,但我国还没有被重视。据美国地质调查局资料,美国某公司自1992年以来就一直在其位于加拿大不列颠哥伦比亚省的工厂循环利用锂金属和锂离子电池。2009年,美国能源部奖励该公司950万美元以建造美国第一座锂离子电池循环利用工厂,2015年该工厂仍在建设之中。另据美国地质调查局Brian资料,目前比利时、德国和日本等国的锂电池再利用项目也都在研发之中。据相关资料(何金翔,2015),20 t废旧的锂离子电池可生产1 t锂,只是目前再回收锂的成本明显高于矿山生产锂的成本。对于锂的高端利用,重点在于 ^6Li 应用于可控核聚变。但这方面的资料极其罕见,一方面是高度机密,另一方面也的确存在超前效应。一般来说, ^6Li 偏向于保留在固体中,而 ^7Li 易于进入溶液中(苏媛娜等,2011),所以卤水型锂矿中相对富集 ^7Li ,而伟晶岩型锂矿中富集 ^6Li 。据有限资料(陈刚等,1990;刘丽君等,2017),四川甲基卡一带伟晶岩型锂矿恰好是全世界天然地质样品中最富集 ^6Li 的,加强对其资源的专项调查评价具有前瞻性,也是非常必要的。

6 结 论

2011年以来,随着新能源汽车等新兴产业的快速崛起,对于锂的需求带动了全球范围的勘查热潮,一直到2016年,在绝大多数矿种市场行情萎靡不振的情况下,锂一枝独秀而使得2016年成为“锂矿找矿年”。近年来锂矿的找矿在卤水型锂矿、硬岩型锂矿和沉积岩型新类型锂矿方面均取得了重大进展,尤其是美国内华达深部富锂卤水的突破、西澳及北美等地传统伟晶岩型锂矿的大幅度增储、墨西哥等地富锂黏土地发现等等,都将带动各地锂矿的勘查,并且已经在西澳、北美和非洲等地形成了几个找矿热点地区。中国自2011年以来也取得了重大突破,但主要集中在四川西部的甲基卡和可尔因一带,新疆阿尔泰、华南等传统的锂矿优势地区尚未取得新突破,应该加大重点地区、针对优势类型的找矿投入,加强对沉积型锂矿和深部卤水成矿机制和成矿条件的研究,加快川西大型锂矿资源基地的整装勘查,加深对锂作为能源金属前瞻性、战略性的研究,配合找矿突破战略行动,带动区域

性的锂矿找矿突破,为新兴产业的发展作出贡献。

致谢:审稿专家和编辑老师对文章提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢!

References

- Chagnes A, Światowska J. 2015. Lithium Process Chemistry: resources, Extraction, Batteries, and Recycling [J]. Elsevier Science.
- Advantage Lithium Ltd. 2016. Advantage Lithium JV Hits Best Hole to Date at Clayton NE: Total Composite 387. 69 metres of 243. 66 mg/l Lithium in Brines [EB/OL]. http://www.einnews.com/pr_news/358952141/advantage-lithium-jv-hits-best-hole-to-date-at-clayton-ne-total-composite-387-69-metres-of-243-66-mg-l-lithium-in-brines.
- Albemarle Ltd. 2016. Albemarle gets approval to increase lithium brine extraction in Salar de Atacama, Chile [1-5] [EB/OL]. <http://www.mining-technology.com/news/newsalbemarle-secures-approval-lithium-brine-extraction-facility-salar-de-atacama-chile-4800727/>.
- Altura Mining Ltd. 2016. Kairos Minerals forms joint venture with Altura Mining for Wodgina East lithium project [EB/OL]. <http://www.mining-technology.com/news/newskairos-minerals-forms-joint-venture-with-altura-mining-for-wodgina-east-lithium-project-5681482/>.
- Battery University. BU-308: Availability of Lithium [EB/OL]. http://batteryuniversity.com/learn/article/availability_of_lithium.
- Birimian Ltd. 2017. Birimian to sell Mali's Bougouni Lithium Project [EB/OL]. <http://www.mining-technology.com/news/newsbirimian-to-sell-bougouni-lithium-project-5709235/>.
- Chen Gang, Zhang Qinglian, Xiao Yingkai, Qi Haiping. 1990. Study on lithium isotope abundance of lithium minerals in China [J]. Chemistry, (9): 33-35 (in Chinese).
- Deals this week: Alix Resources, Landore Resources, Ferrum Americas Mining. [EB/OL] <http://www.mining-technology.com/news/newsdeals-this-week-alix-resources-landore-resources-ferrum-americas-mining-4809541/>.
- Fu Xiaofang, Hou Liwei, Wang Denghong, Yuan Linping, Liang Bin, Hao Xuefeng, Pan Meng. 2014. Achievements in the Investigation and Evaluation of Spodumene resources at Jiajika in Sichuan, China [J]. Geological Survey in China. (03): 37-43 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xiaofang, Yuan Linping, Wang Denghong, Hou Liwei, Pan Meng, Hao Xuefeng, Liang Bin, Tang Yi. Mineralization characteristics and prospecting model of newly discovered X03 rare metal vein in Jiajika orefield, Sichuan [J]. Mineral Deposits. 2015, (06): 1172-1186 (in Chinese with English abstract).
- Galaxy to acquire General Mining for \$155m [EB/OL]. <http://www.mining-technology.com/news/newsgalaxy-to-acquire-general->

- mining-for-155m-4907860/.
- Gruber P, Medina P, 2010. Global Lithium Availability: A Constraint for Electric Vehicles [M].
- He Jinxiang. 2015. Lithium. Annual review of world mineral resources[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Kellie B. 2009. Jadar Lithium Project, Serbia: powerpoint presentation on behalf of Rio Tinto Exploration Ltd. to the Lithium Supply and Markets conference. Santiago de Chile. 1-31.
- Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, Keoleian G A, Everson M P, Wallington T J. 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 48(5): 55-69.
- Kodal Minerals Ltd. 2016. Kodal Minerals expands lithium portfolio with three new concessions in Mali [EB/OL]. <http://www.mining-technology.com/news/newskodal-minerals-expands-lithium-portfolio-with-acquisitions-of-three-new-concessions-in-mali-5682824/>.
- Liu Lijun, Wang Denghong, Hou Kejun, Tian Shihong, Zhao Yue. 2017. Application of lithium isotope to Jiajika new No.3 pegmatite lithium polymetallic vein in Sichuan[J]. *Earth Science Frontiers*, in Press (in Chinese with English abstract).
- Metalicity Ltd. 2016. Metalicity acquires Fortescue's lithium portfolio in Pilbara region [EB/OL]. <http://www.mining-technology.com/news/newsmetalicity-acquires-fortescues-lithium-portfolio-in-pilbara-region-5703012/>.
- Mining Projects Group to acquire Wodgina East project in Australia [EB/OL]. <http://www.mining-technology.com/news/newsmining-projects-group-to-acquire-wodgina-east-project-in-australia-4849919/>.
- Nemaska Lithium Inc. 2016. How to profit from the booming lithium markets, available [EB/OL]. [http://www.nemaskalithium.com/assets/documents/docs/Nemaska % 20Lithium% 20Corporate% 20Presentation%20April%2019%202016.pdf](http://www.nemaskalithium.com/assets/documents/docs/Nemaska%20Lithium%20Corporate%20Presentation%20April%2019%202016.pdf) (accessed on 09. 11. 16).
- Neo Lithium gets environmental approval for Tres Quebradas project in Argentina [EB/OL]. <http://www.mining-technology.com/news/newsneo-lithium-gets-environmental-approval-for-tres-quebradas-project-in-argentina-5006511/>.
- Nevada Sunrise gains drilling permits to explore lithium brines [EB/OL]. <http://www.mining-technology.com/news/newsnevada-sunrise-receives-drilling-permits-to-explore-lithium-brines-4960537/>.
- Nevada Sunrise Gold provides update on six lithium exploration projects in Nevada. [EB/OL] <http://www.mining-technology.com/news/newsnevada-sunrise-gold-provides-update-on-six-lithium-exploration-projects-in-nevada-4900694/>.
- Nevada Sunrise Gold secures drilling permit for Neptune lithium property in US. [EB/OL] <http://www.mining-technology.com/news/newsnevada-sunrise-gold-secures-drilling-permit-neptune-lithium-property-us-4767846/>.
- Pilbara Minerals Ltd., 2016. Pilgangoora mineral resource jumps 60% to 128.6Mt confirming world-class, long-life, high grade lithium project[EB/OL].<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/>.
- Sayona Mining Ltd. 2016. Sayona Mining to acquire Authier lithium deposit in Canada [EB/OL].
- Su Aina, Tian Shihong, Hou Zengqian, Li Jiankang, Li Zhenzhen, Hou Kejun, Li Yanhe, Hu Wen hao, Yang Zhusen. 2011. Lithium isotope and its application to Jiajika pegmatite type lithium polymetallic deposit in Sichuan[J]. *Geoscience*, 25(2), 236-242 (in Chinese with English abstract).
- U. S. Geological Survey. 2011. Mineral Commodity Summaries [R].
- U. S. Geological Survey. 2012. Mineral Commodity Summaries [R].
- U. S. Geological Survey. 2013. Mineral Commodity Summaries [R].
- U. S. Geological Survey. 2014. Mineral Commodity Summaries [R].
- U. S. Geological Survey. 2015. Mineral Commodity Summaries [R].
- U. S. Geological Survey. 2016. Mineral Commodity Summaries [R].
- U. S. Geological Survey. 2017. Mineral Commodity Summaries [R].
- Vikström, H. , S. Davidsson , M. Höök. 2013. Lithium availability and future production outlooks [J]. *Applied Energy*, 110 (110): 252-266.
- Wang Denghong, Fu Xiaofang. 2013. The breakthrough of lithium prospecting in the periphery of Jiajika mining area, Sichuan [J]. *Rock and Mineral Analysis*. (06): 987 (in Chinese).
- Wang Denghong, Li Peigang, Qv Wenjun, Lei Zhiyuan, Liao Youchang The discovery and comprehensive evaluation of tungsten and lithium in bauxite, Dazhuyuan, Guizhou [J]. *Science China Press: Earth Scichina*. 2013. 43 (1): 44-51 (in Chinese).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Fu Xiaofang, Sun Yan, Wang Chenghui, Hao Xuefeng, Liu Lijun, Pan Meng, Hou Jianglong, Dai Jingjing, Tian Shihong, Yu Yang. 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*. (4): 471-480 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Liu Lijun, Liu Xinxing, Zhao Zhi, He Hanhan. 2016b. Main types and research trends of energy metallic resources in China [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 36 (1): 21-28 (in Chinese with English Abstract).
- Wang Naiyin. 1989. A welcome energy metal [J]. *Today Science & Technology*, (9): 34 (in Chinese).
- Wang Xiulian, Li Jinli, Zhang Mingjie. 2001. Energetic metal of the 21th century: the use of metal lithium in nuclear fusion[J]. *Gold Journal*, 3(4): 249-252.
- Wealth Minerals Ltd. 2016. Wealth Minerals to acquire Pujsa lithium project in Chile [EB/OL]. <http://www.mining-technology.com/>

- news/newswealth- minerals- acquire- pujsa- lithium- project- chile-4926257/.
- You Qingzhi. 2013. The development and outlook of lithium industry [J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 36 (A02): 147-149 (in Chinese).
- Zampirro, D. 2003. Hydrogeology of Clayton Valley brine deposits, Esmeralda County, Nevada: Nevada[M]. Bureau of Mines and Geology. Special Publication. 33, 271-280.
- Zhao Yuanyi, Fu Jiajun, Li Yun. 2015. Super large lithium and baron deposit in Jadar basin, Sebría [J]. Geological Review, 61(1): 34-44 (in Chinese with English abstract).
- Zhen Mianping, Liu Xifang. 2007. Lithium Resources in China [J]. New Material Industry, (8): 13-16 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈刚, 张青莲, 肖应凯, 祁海平. 1990. 我国锂矿物中锂同位素丰度研究[J]. 化学通报, (9): 33-35.
- 付小方, 侯立玮, 王登红, 袁瀚平, 梁斌, 郝雪峰, 潘蒙. 2014. 四川甘孜甲基卡锂辉石矿矿产调查评价成果[J]. 中国地质调查, 1(3), 37-43.
- 付小方, 袁瀚平, 王登红, 侯立玮, 潘蒙, 郝雪峰, 梁斌, 唐屹. 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, (6): 1172-1186.
- 国土资源部. 2015. 捷克锡诺维克成为世界级锂矿 [EB/OL]. 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% [EB/OL]. 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[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘丽君, 王登红, 侯可军, 田世洪, 赵悦. 2017. 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, 待刊.
- 苏媛娜, 田世洪, 侯增谦, 李建康, 李真真, 侯可军, 李延河, 胡文浩, 杨竹森. 2011. 锂同位素及其在四川甲基卡伟晶岩型锂多金属矿床研究中的应用[J]. 现代地质, 25(2), 236-242.
- 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, (06): 987.
- 王登红, 李沛刚, 屈文俊, 雷志远, 廖友常. 2013. 贵州大竹园铝土矿中钨和锂的发现与综合评价 [J]. 中国科学: 地球科学, 43 (1): 44-51.
- 王登红, 王瑞江, 付小方, 孙艳, 王成辉, 郝雪峰, 刘丽君, 潘蒙, 侯江龙, 代晶晶, 田世洪, 于扬. 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, (4): 471-480.
- 王登红, 刘丽君, 刘新星, 赵芝, 何哈哈. 2016b. 我国能源金属矿产的主要类型及发展趋势探讨 [J]. 桂林理工大学学报, 36 (1): 21-28.
- 王乃银. 1989. 令人垂青的金属能源 [J]. 今日科技, (9): 34.
- 王秀莲, 李金莉, 张明杰. 2001. 21 世纪的能源金属——金属锂在核聚变反应中的应用[J]. 黄金学报, 3 (4): 249-252.
- 游清治. 2013. 锂工业的发展与展望[J]. 新疆有色金属, 36 (A02): 147-149.
- 郑绵平, 刘喜方. 2007. 中国的锂资源[J]. 新材料产业, (8): 13-16.