

全球锂资源开发利用形势分析及启示

蔡艳龙¹⁾, 李建武^{2)*}

1) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
2) 中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心, 北京 100037

摘要: 锂是一种对国民经济及国防安全具有重要战略意义的能源金属。随着锂在新能源、新材料等领域应用的快速发展, 锂作为战略性矿产的重要地位日益凸显。本文概述了全球锂矿的矿床类型和资源分布, 对比了主要国家锂矿的地质特征, 分析了主要锂矿生产国锂资源开发利用形势, 指出盐湖型锂矿是未来全球锂矿开发的主要类型, 也是我国未来锂资源开发的首选, 提出加大盐湖提锂技术科技攻关, 综合开发盐湖资源等4条对策建议。

关键词: 锂矿; 资源分布; 开发形势

中图分类号: P618.71; P966 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2017.01.05

The Analysis and Enlightenment of Exploitation Situation of Global Lithium Resources

CAI Yan-long¹⁾, LI Jian-wu^{2)*}

1) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;
2) Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Lithium is a strategic important energy metal to the national economy and national defense security. With the rapid development of lithium in new energy, new materials, and other new applications, lithium has become increasingly more prominent as a strategically mineral. This paper summarizes the main deposit types and global distribution of lithium resources, compares the geological characteristics of lithium ore resources in major countries and on such a basis, analyzes the exploitation situation of the world's major producing countries. It is pointed out that the exploration of continental brines have become the global inevitable trend of extracting lithium and also the first choice of the development of China's lithium industry in the future. Finally, four suggestions are put forward concerning the development of China's lithium salt lakes, such as the strengthening of the technological research on extracting lithium from the brine and the comprehensively development and utilization of the mineral resources of salt lakes.

Key words: lithium ore; exploitation situation; enlightenment

锂被称为“推动世界前进的重要元素”, 近年来, 在电动汽车、储能、受控热核反应等领域应用愈加广泛。随着全球对清洁能源需求的高涨, 锂战略地位凸显, 锂供应安全, 已被锂资源短缺的工业化国家列为战略资源安全保障范围, 寻求多元化的供应渠道已是普遍的策略选择(高峰等, 2011)。

由新能源产业带动, 中国锂资源的消费逐年递增, 但目前国内盐湖锂矿和矿石锂矿的开发均难以

满足消费需求, 在当前形势下, 对全球锂资源的分布及开发利用形势进行分析研究, 对于我国锂资源开发战略具有重要意义。

1 全球锂资源分布

1.1 全球锂矿床类型及分布

锂在自然界中丰度较大, 在卤水中以离子态存在, 在岩石中以化合物形式存在。目前已发现的锂

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: 12120115057401)资助。

收稿日期: 2016-03-09; 改回日期: 2016-04-20。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 蔡艳龙, 男, 1988年生。硕士研究生。主要从事矿产资源战略方向研究。E-mail: rufengruyu163@163.com。

*通讯作者: 李建武, 男, 1967年生。研究员, 博士。主要从事矿产资源战略方向研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街26号。电话: 010-68999512。E-mail: jwli67@126.com。

矿物及含锂矿物有 150 多种, 主要赋锂矿物有磷锂铝石、锂辉石、透锂长石和锂云母。

前人研究中多将锂矿床划分为盐湖型和硬岩型(hard rock), 或者盐湖型和伟晶岩型。Evans(2008)将其细分为大陆盐湖型、伟晶岩型、地热卤水型, 油田卤水和富锂黏土型五种。目前开发的主要类型大陆盐湖型(以下简称盐湖型)约占 58%, 伟晶岩型约占 26%。

盐湖型锂矿是目前锂资源开发利用的最主要的类型。矿床中锂主要来源于周围岩浆热液流体和火山喷发物, 故常分布在新生代地质活动较活跃的构造区域, 如大陆边缘弧后盆地、断裂带扩张克拉通盆地等。从地理位置上看, 全球盐湖锂矿床主要分布于南美洲的安第斯高原、美国西南部和青藏高原。并且盐湖中多含钾、镁、溴、硼等多种有用元素, 具有重要的综合利用价值。

花岗伟晶岩型锂矿是早期矿石提锂的主要类型, 一般产出于交代伟晶岩矿脉中, 并且大多具有明显的分带性。该类锂矿床分布广泛, 主要产出于构造穹窿区和增生大陆边缘非造山环境, 代表性矿床如澳大利亚的 Greenbushes 锂矿床和中国的甲基卡锂矿床。

沉积型锂矿床主要产于渐新世—中新世的沉积盆地中, 矿床主要以黏土岩类或沉积盆地中的冲击层、沼泽相、湖泊相以及组合相的形式产出(王秋舒等, 2015), 目前勘查程度较低。富锂黏土型锂矿主要分布在美国内华达州的 Kings Valley 和墨西哥中南部高原山谷。此外, 近几年在塞尔维亚的 Jadar 盆地新发现了另一类超大型沉积型锂硼矿床, 其特有的赋锂矿物为羟硼硅钠锂石(赵元艺等, 2015)。

油田卤水矿床和地热卤水锂矿分布则比较局限。目前已发现的油田卤水矿床有美国德克萨斯州的 Smackover 矿床, 地热卤水锂矿床分布在美国加利福尼亚南部的希尔斯地区。这两种矿床全球资源

潜力目前难以评价, 受制于勘探技术与勘查工作的进展, 但无疑将成为未来锂矿床的勘查热点。

早期一些学者认为海水可作为锂的潜在资源。Vikstrom 等(2013)综合前人研究, 从技术和成本两方面论证, 认为海水提锂在实际应用中至少未来几十年内不可行。由于迄今未有任何公开发表的关于海水提锂的进展内容, 在此本文不作深入讨论。

1.2 全球锂矿资源储量分布

全球锂资源总量丰富, 但分布不均, 主要分布在南美洲、北美洲、亚洲、大洋洲以及非洲。

据美国地质调查局(USGS), 2014 年全球锂矿储量约为 1 350 万吨(Li, 储量及资源量单位同此), 已探明资源量约为 3 950 万吨(图 1, 图 2), 主要分布在智利、中国、阿根廷、澳大利亚、玻利维亚等国。南美地区盐湖锂资源约占全球已探明资源量的 58%。

2 主要国家锂矿地质特征

2.1 智利

智利是世界锂矿储量最大的国家, 锂资源主要集中在北部 Atacama 盐湖。

Atacama 盐湖是世界第二大干盐湖, 位于智利安托法加斯塔省, 此盐湖处于海岸山脉和安底斯山脉之间新生代断陷盆地(Atacama)之中, 属后弧挤压盆地大陆型盐湖, 海拔 2 300 m, 年蒸发量高达 3 600 mm。Atacama 盐湖属于硫酸镁亚型盐湖, 平均锂含量约 0.15%(锂质量分数, 下同), 拥有锂储量约 370 万吨, 资源量约 600 万吨, 并富含硼和钾。

2.2 阿根廷

阿根廷是世界上盐湖锂资源较丰富的国家, 锂资源主要分布在西北部普纳高原的盐湖区。代表性盐湖有 Hombre Muerto、Rincon 和 Olaroz 盐湖等。

普纳高原是沿安第斯聚合边缘造山带的最高部分, 包含众多封闭盆地。富锂盐湖属硫酸型, 镁锂比值低, 同时伴生钾和硼等, 开发条件优越。其中 Hombre Muerto 盐湖平均锂含量 0.06%, 拥有锂资源量约 80 万吨。

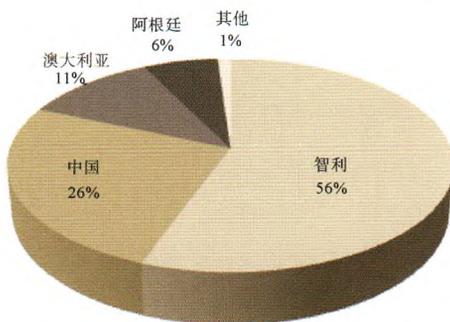


图 1 2014 年全球锂储量分布图
(来源: USGS, 2015)

Fig. 1 The distribution of global lithium reserves in 2014
(source: USGS, 2015)

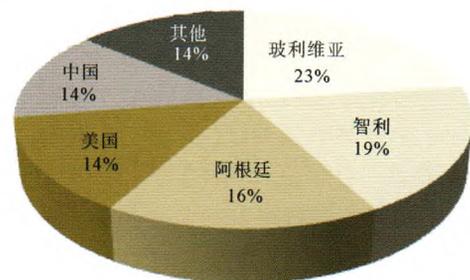


图 2 2014 年全球锂已探明资源量分布图
(来源: USGS, 2015)

Fig. 2 The distribution of global proved lithium reserves in 2014 (source: USGS, 2015)

2.3 玻利维亚

玻利维亚富锂盐湖较多,并拥有世界第一大盐湖锂矿床 Uyuni 盐湖,与安第斯科迪勒拉其它盐湖群同属于后弧挤压盆地大陆型盐湖。Uyuni 盐湖位于玻利维亚高原,海拔 3 653 m,年蒸发量是降雨量的 15 倍。该盐湖为硫酸型盐湖,镁锂比较高,平均锂含量 0.05%,锂资源量高达 1 020 万吨。

2.4 中国

中国盐湖锂矿主要集中在青海柴达木盆地和青藏高原,花岗伟晶岩型锂矿主要集中在新疆和四川,碱性长石花岗岩型锂矿床主要分布在江西。

青藏高原分布有盐湖锂矿床 80 多个,锂矿床多以碳酸盐型为主,已查明资源储量约占全国总储量的 18.8%(宋彭生和项仁杰,2014),重要矿床有扎布耶盐湖、当雄措盐湖等。西藏扎布耶盐湖拥有锂资源量 153 万吨(宋彭生等,2014),其锂含量 1 413 mg/L(南湖晶间卤水),镁锂比低至 0.003(郑绵平和刘喜方,2010),是世界上唯一的低镁锂比碳酸盐型富锂盐湖。

柴达木盆地的盐湖型锂储量约占全国总储量的 48.5%,重要矿床有一里坪盐湖、西台吉乃尔盐湖和东台吉乃尔盐湖,多为硫酸型。西台吉乃尔盐湖原勘探报告提交的 LiCl 储量达 300 万吨以上(宋彭生和项仁杰,2014),其锂含量 201.5 mg/L,镁锂比高达 67.4,属于硫酸镁亚型盐湖(郑绵平和刘喜方,2010)。

花岗伟晶岩型锂矿主要分布在新疆阿尔泰山成矿带、川西松潘—甘孜成矿带,典型矿床有新疆可可托海锂铍铌钽矿床、川西甲基卡锂铍矿床。川西甲基卡锂铍矿床已探明锂储量 20.4 万吨(Li),矿石中锂平均品位为 1.2%(Li₂O),铍平均品位 0.043%(BeO)。碱性长石花岗岩型矿床主要位在华南地区,典型矿床有江西宜春钽铌锂矿床。宜春钽铌锂矿床拥有锂资源量 32.5 万吨,矿石中锂平均品位为 0.886%(Li₂O),钽平均品位为 0.0141%(Ta₂O₅),铌平均品位为 0.0091%(Nb₂O₅),是一个锂、铌、钽等多稀有元素金属矿床。

此外,四川邛崃、湖北江汉等地的油气田卤水中的锂含量都超过单独开采品位,但目前尚未规模化开发。

2.5 澳大利亚

澳大利亚拥有全球储量最大、品质最好的伟晶岩型锂矿床(Greenbushes),矿石类型主要为锂辉石。矿床赋存在一条南北向的伟晶岩带中,该伟晶岩又侵入在一个巨大的花岗岩体中。2012 年公布的剩余可采储量 31.4 Mt,平均品位 1.45%。

3 主要国家锂资源开发利用形势

3.1 智利

智利是全球锂矿第一生产大国,2014 年产量约占全球的 39%。其锂矿开采主要来自 Atacama 盐湖,目前由 SQM 公司(智利化学品公司)和 Rockwood 公司控制。SQM 公司目前是全球最大的盐湖锂生产商,碳酸锂产能达 53 100 t/a。该公司主营钾肥(硝酸钾),以生产氯化钾时的副产品氯化锂来提取碳酸锂和氢氧化锂,分担了成本。

2011 年以来,加拿大、韩国、澳大利亚等国分别进入地区进行勘查活动,其中以 Talision 公司的 Salares 7 项目初步勘查结果较为理想。

3.2 阿根廷

阿根廷是全球盐湖锂主要生产国之一,2014 年产量约占全球的 9%。其锂矿开采主要来自 Hombre Muerto 盐湖,另有 Rincon 和 Olaroz 盐湖(唐尧,2014)。Hombre Muerto 盐湖目前由 FMC 公司开采,2013 年第三季度碳酸锂产能达到 32 000 t/a。FMC 公司是一家多元化化学品公司,主营农业化学、特殊化学、工业化学三个方面的产品,采用自主研发的选择性净化吸附法提锂,具有生产成本低、效率高优点,是当前全球三大锂产品供应商之一。

Rincon 盐湖归 Rincon 公司所有,2012 年投产,碳酸锂产能 10 000 t/a。Olaroz 盐湖于 2014 年第三季度投产,碳酸锂产能 17 500 t/a。

阿根廷锂矿资源潜力巨大,是目前全球锂矿勘查最热点地区。美国、加拿大、德国、澳大利亚等国纷纷进入该国,锂资源争夺愈加激烈,但总体上大部分项目尚处于勘查阶段。

3.3 玻利维亚

目前玻利维亚严格控制 Uyuni 盐湖锂矿开采,只允许外国公司以科学顾问的形式协助研究,只能参与最后产品的生产阶段,目前其境内的项目均处于前期勘查阶段。中国、日本、法国、韩国等各国竞标参与 Uyuni 盐湖锂矿项目开发,但玻利维亚政府还未公布最终合作人选。

3.4 中国

中国锂资源以盐湖型为主,但限于技术和成本各方面原因,目前依然主要从矿石中提锂,且大量进口锂矿石。花岗伟晶岩型锂矿是目前我国锂矿生产的主要类型。

四川甲基卡锂矿床是我国最大的伟晶岩型锂辉石矿床,已探明锂储量居亚洲之首。该矿由路翔股份子公司融达锂业和天齐锂业所有,目前整体处于储量评估阶段,仅天齐锂业雅江措拉矿区采选项目一期项目锂精矿产能达 10 万吨/年(折合碳酸锂约

1.3 万吨), 2014 年下半年投产, 二期工程产能规划仍为锂精矿 10 万吨/年。

江西宜春锂矿床, 锂品位低, 提锂成本高, 尚未大规模开采, 但其副产品铌、钽等受益高, 综合开发前景好。目前该矿床正在由江特电机和众和股份等操作, 进行提锂技术试验, 计划碳酸锂产能 18 000 t/a。

盐湖锂矿主要开发项目有青海西台吉乃尔盐湖和西藏扎布耶盐湖。西台吉乃尔盐湖锂矿目前由中信国安科技发展有限公司(CITIC)进行开发, 近年来在持续增产扩建, 目前其碳酸锂产能达到 10 000 t/a, 远期规划目标碳酸锂产能 35 000 t/a。

扎布耶盐湖由西藏扎布耶锂业高科技开发有限公司开发, 2013 年锂产品产量约 4 000 t, 二期工程将实现硼、钾、锂综合开发, 碳酸锂产能达 18 000 t/a, 预计 2017 年投产。受技术和管理等因素制约, 该项目进展不如预期。

3.5 澳大利亚

Greenbushes 矿床目前由 Talison 公司勘查开发, 2012 年锂辉石产量 53 000 t (碳酸锂当量)。2013 年中国天齐锂业完成对 Talison 公司的收购, 目前与美国 Rookwood 公司分别控股 51%、49%。

4 盐湖提锂成为全球未来锂矿开发必然趋势

4.1 盐湖型锂矿储量、资源量在各类型锂矿中占绝对优势

就储量而言, 据美国地质调查局, 2009 年以来, 盐湖型锂矿储量(以智利和阿根廷两国储量估算)约占全球锂储量的 60%以上(图 3)。未来随着玻利维亚、中国盐湖进一步勘查开发, 资源量向储量的递进转化, 全球盐湖型锂矿储量占比还有上升趋势。

从资源量上讲, 2014 年, 仅玻利维亚、智利和阿根廷三国的盐湖型锂矿资源量就占全球锂矿资源量的 58%。虽然近年来玻利维亚的 Jadar 盆地沉积

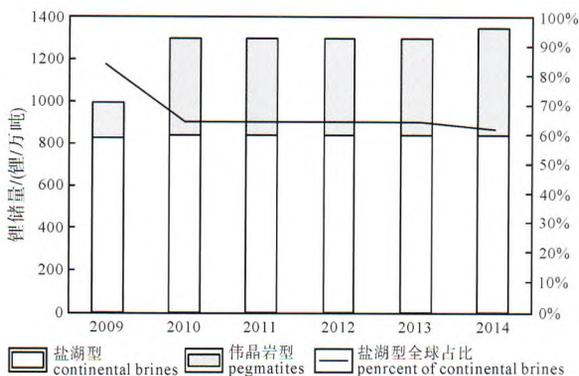


图3 2009—2014年全球盐湖型锂矿储量变化 (来源: USGS, 2015)

Fig. 3 Change of global lithium reserves in continental brines, 2009–2014 (source: USGS, 2015)

型锂矿取得一定的勘查进展, 目前推断的锂资源量为 2.06 Mt (Li_2O), 然而全球范围内盐湖型锂矿资源量仍占主要地位。

4.2 盐湖型锂矿产量在各类型锂矿中占主要地位

从产量上讲, 自 2000 年以来, 盐湖型锂矿产量(以智利、阿根廷和美国三国产量估算)约占全球锂产量的一半左右(图 4)。随着世界主要盐湖锂矿的扩产达产, 尤其是中国和玻利维亚盐湖的进一步开发生产, 全球盐湖型锂矿产量占比还有上升趋势。

4.3 盐湖提锂相对矿石提锂成本优势明显

据统计, 全球锂矿生产商中, 当前在 Atacama 盐湖开发的 SQM 和 Rockwood 公司锂盐生产成本最低(表 1), 碳酸锂生产成本约 10 000 元/t。国外其他盐湖碳酸锂生产成本 10 000 ~ 15 000 元/t, 而国内盐湖碳酸锂生产成本 15 000 ~ 20 000 元/t。

锂辉石提锂工艺成熟, 但耗能高、污染重、成本高, 开采规模最大的矿山企业 Talison 的碳酸锂生产成本也在 23 000 元/t。锂云母开采时, 多伴生有钽、铌、铷、铯等多种稀有金属元素, 如果无法综合利用, 每吨碳酸锂的生产成本至少也要 30 000 元以上。相比而言, 盐湖提锂成本优势明显。

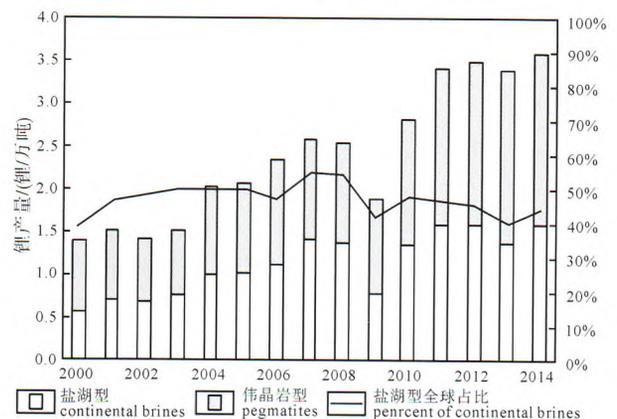


图4 2000—2014年全球盐湖型锂矿产量变化 (来源: USGS, 2015)

Fig. 4 Change of global lithium production in continental brines, 2000–2014 (source: USGS, 2015)

表1 全球主要锂生产商碳酸锂生产成本

Table 1 Production costs of LCE of the world's main leading manufacturers

生产工艺	公司	生产成本/ (元/吨, 不含税)
盐湖提锂	SQM/Rockwood	10 000
	国外其他盐湖	10 000 ~ 15 000
	国内盐湖	15 000 ~ 20 000
锂辉石提锂	泰利森	23 000
外购原材料	赣锋锂业(卤水/矿石)	27 000
	天齐锂业(矿石)	27 000
锂云母	江特电机 (不考虑铷铯开发)	>30 000

注: 来源于各公司公告。

5 我国锂资源开发利用建议

全球锂矿开发以盐湖型为主已成大势所趋。我国约有 80% 锂资源赋存于盐湖之中, 特别是西藏盐湖拥有富锂低镁碳酸盐型盐湖, 具有低成本开采潜力。因此, 我国锂资源开发首选国内盐湖型锂矿。

(1) 加大技术攻关力度, 重视盐湖提锂对周边环境影响。例如青海西台吉乃尔盐湖生产采用煅烧法。该工艺方法能耗高、易腐蚀设备, 同时存在大量稀盐酸的处置问题。因此, 要从加强节能减排和设备选型方面改进(乜贞等, 2010)。

(2) 综合开发利用盐湖资源, 加强钾、硼等伴生元素的综合利用。综合开发利于开发成本分摊, 减少污染物排放和提高资源利用率。如世界著名钾肥生产商 SQM 对盐湖实现综合开发利用, 一条线以卤水为原料, 生产碳酸锂、氯化钾、硫酸钾、硼酸等, 另一条线以硝石为原料, 生产碘、硝酸盐专用肥, 两条线结合生产硝酸钾。锂产品只是其副产品, 所以锂盐成本很低。

(3) 加强多品种、深加工、高值化锂产品开发, 延长产业链。目前我国盐湖锂矿开发还停留在碳酸锂等初级锂产品上。随着新能源、新材料领域对锂化合物质量和性能的更高要求, 急需加强深度加工、高附加值锂产品研发, 延长产业链。同时要加强锂电技术研发, 特别是大容量、高性能的高端锂电研发, 为满足国内新能源汽车领域日益增长打下技术基础。

(4) 建立我国锂资源开发长远战略规划。目前我国已成为全球锂主要消费国之一, 随着新能源产业快速发展, 未来锂需求量还将大幅增长。近年来我国所需的锂原料大多来自澳大利亚进口的锂辉石, 进口量约占国内原料总供应量的 60%, 对外依存度不断攀高。从战略角度出发, 应尽早建立我国锂资源开发的长远规划, 建立不同类型和国内国外锂资源多元供应体系。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. 12120115057401).

参考文献:

高峰, 郑绵平, 乜贞, 刘建华, 宋彭生. 2011. 盐湖卤水锂资源及其开发进展[J]. 地球学报, 32(4): 483-492.
 乜贞, 卜令忠, 郑绵平. 2010. 中国盐湖锂资源的产业化现状-以西台吉乃尔盐湖和扎布耶盐湖为例[J]. 地球学报, 31(1):

95-101.

宋彭生, 项仁杰. 2014. 盐湖锂资源开发利用及对中国锂产业发展的建议[J]. 矿床地质, 33(5): 977-992.
 唐尧. 2014. 阿根廷锂开发利用及我国未来锂资源发展策略建议[J]. 国土资源情报, 3: 44-48.
 王秋舒, 元春华, 许虹. 2015. 全球锂矿资源分布与潜力分析[J]. 中国矿业, 24(2): 10-17.
 赵元艺, 符家骏, 李运. 2015. 塞尔维亚贾达尔盆地超大型锂硼矿床[J]. 地质论评, 61(1): 34-44.
 郑绵平, 刘喜方. 2010. 青藏高原盐湖湖水化学及其矿物组合特征[J]. 地质学报, 84(11): 1585-1600.

References:

EVANS R K. 2008. An abundance of lithium[R]. America: Lithium Corporation of America.
 GAO Feng, ZHENG Mian-ping, NIE Zhen, LIU Jian-hua, SONG Peng-sheng. 2011. Brine lithium resource in the salt lake and advances in its exploitation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(4): 483-492(in Chinese with English abstract).
 NIE Zhen, BU Ling-zhong, ZHENG Mian-ping. 2010. Lithium resources industrialization of salt lakes in China: a case study of the Xitaijinaier Salt Lake and the Zabuye salt Lake[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(1): 95-101(in Chinese with English abstract).
 SONG Peng-sheng, XIANG Ren-jie. 2014. Utilization and exploitation of lithium resources in salt lakes and some suggestions concerning development of Li industries in China[J]. Mineral Deposits, 33(5): 977-992(in Chinese with English abstract).
 TANG Yao. 2014. The exploitation of lithium resources in Argentina and its recommendation for the development of Chinese lithium industrial[J]. Land and Resources Information, 3: 44-48(in Chinese).
 USGS. 2015. Lithium-mineral commodity summary[EB/OL]. [2016-01-25]. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/>.
 VIKSTROM H, DAVIDSSON S, HOOKET M. 2013. Lithium availability and future production outlooks[J]. Applied Energy, 110(10): 252-266.
 WANG Qiu-shu, YUAN Chun-hua, XU Hong. 2015. Analysis of the global lithium resource distribution and potential[J]. China Ming Magazine, 24(2): 10-17(in Chinese with English abstract).
 ZHAO Yuan-yi, FU Jia-jun, LI Yun. 2015. The super-large lithium-boron deposit in the Jadar basin in Serbia[J]. Geological Review, 61(1): 34-44(in Chinese).
 ZHENG Mian-ping, LIU Xi-fang. 2010. Hydrochemistry and Minerals Assemblages of Salt Lakes in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Acta Geologica Sinica, 84(11): 1585-1600(in Chinese with English abstract).