



移动阅读

隰弯弯, 赵宇浩, 倪培, 等, 2023. 锂矿主要类型、特征、时空分布及找矿潜力分析[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 19–35. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04002](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04002)

XI W W, ZHAO Y H, NI P, et al., 2023. Main types, characteristics, distributions, and prospecting potential of lithium deposits[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1): 19–35. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04002](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04002)

锂矿主要类型、特征、时空分布及找矿潜力分析

隰弯弯¹, 赵宇浩^{1*}, 倪培², 姚春彦¹, 朱意萍¹, 郑璐¹, 姚仲友¹, 王天刚¹

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 2. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘要: 锂是重要的能源金属, 分布高度集中。目前可开发利用的锂矿床主要有盐湖卤水型、伟晶岩型、黏土型、锂沸石型、其他卤水型(包括油气田卤水亚类和地热卤水亚类)和离子吸附型6种类型。除伟晶岩型锂矿的时代呈幕式分布, 其他类型的锂矿主要集中形成于新生代。新生代锂矿占全球已查明资源量的75%, 主要分布于显生宙造山带如安第斯锂三角地区、中国川藏地区、北美科迪勒拉等地区, 其余锂矿则主要分布在前寒武纪克拉通如西澳克拉通、刚果克拉通、西非克拉通和加拿大地盾等区域。盐湖卤水型和伟晶岩型锂矿找矿潜力大, 是目前勘探开发的主要类型。

关键词: 锂矿; 矿床类型; 时代分布; 空间分布; 找矿潜力

中图分类号: P618.71

文献标识码: A

Main types, characteristics, distributions, and prospecting potential of lithium deposits

XI Wanwan¹, ZHAO Yuhao^{1*}, NI Pei², YAO Chunyan¹, ZHU Yiping¹, ZHENG Lu¹,
YAO Zhongyou¹, WANG Tiangan¹

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China; 2. State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Lithium is an important energy metal. At present, there are six types of lithium deposits: salt lake lithium brines, lithium pegmatites, lithium-clays, lithium-zeolites, oil-gas field lithium brines or geothermal lithium brines, and ion-absorption lithium. The pegmatites lithium deposits are of episodic ages and mainly distributed in Precambrian orogenic belts such as Western Australia Craton, Congo Craton, Western Africa Craton and Canadian Shield. Except the pegmatites lithium deposits, all of other lithium deposits are mainly distributed in Cenozoic orogenic belts such as the Andean lithium triangle area, Sichuan-Tibet region of China, Cordillera of North America, accounting for about 75% of the global lithium resources. At present, salt lake lithium brines and lithium pegmatites are of great prospecting potential and are the main types of lithium deposits being explored and developed.

Key words: Lithium; deposits type; age distribution; spatial distribution; prospecting potential

收稿日期: 2022-03-06; 改回日期: 2022-03-16; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 郭林楠

作者简介: 隰弯弯(1986—), 男, 高级工程师, 从事矿产勘查工作。E-mail: xww230@163.com

通讯作者: 赵宇浩(1989—), 男, 工程师, 从事区域成矿规律研究。E-mail: zhao61060427@126.com

资助项目: 国家重点研发计划“战略性矿产资源开发利用”专项“全球战略性矿产成矿规律和预警决策支持技术”项目“环太平洋和非洲成矿域战略性矿产信息及成矿规律”(2021YFC2901804); 中国地质调查局项目(DD20201155、DD20190441)联合资助

0 引言

锂元素于1817年由瑞典化学家Johan Arfvedson发现, August Matthiessen 和 Robert Bensen 于1855年首次分离出可供使用的锂金属(Emsley et al., 2011)。此后, 锂逐渐广泛应用于电池、陶瓷、玻璃、空气处理、润滑剂、医药及有机合成等传统和新兴领域, 被称为“21世纪绿色高能金属”和“白色石油”, 是不可或缺的工业原料(郭娟等, 2017; Bradley et al., 2017b; 王秋舒和元春华, 2019; 杨卉芃等, 2019)。近年来, 随着信息技术和电动汽车的迅猛发展, 全球对锂金属的需求与日俱增。2019年, 全球锂消费量约31万吨(何金祥等, 2020), 预测至2030年, 全球锂需求量为100~160万吨*(邢佳韵等, 2015; 郭娟等, 2017), 至本世纪末, 全球对锂的需求为0.6~1亿吨(Munk et al., 2016)。

目前, 中国是全球第一大新能源汽车开发生产国, 对锂需求量最高(刘帅, 2019)。据预测, 2030年中国锂需求为70万吨, 约45~50万吨锂依赖进口(马哲和李建武, 2018)。笔者所在团队对锂三角地区锂矿资源禀赋和开发情况进行了详细调查, 本文在团队调查统计数据及前人研究的基础上, 以自己有限的见识总结了锂矿的主要类型、特征和时空分布。

1 主要类型

许多学者都从不同角度对锂矿床的类型进行过划分, 部分学者根据其矿石形态和成因类型将锂矿床划分为硬岩锂矿(内生)和卤水锂矿(外生)两个大类。硬岩锂矿进一步划分为花岗伟晶岩型、

花岗岩型、云英岩型、黏土型和湖相沉积型等亚类; 卤水锂矿进一步划分为大陆盐湖型、地热卤水型和气田卤水型等亚类(李健康等, 2014; 李康和王建平, 2016; 杨卉芃, 2019; 张苏江, 2020)。部分学者根据锂的赋存状态和开发特征, 将锂矿床主要划分为三类: 卤水型、伟晶岩型和沉积岩型。其中, 卤水型矿床主要为大陆盐湖卤水; 沉积岩型矿床主要包括黏土型矿床和湖相沉积型矿床(吴西顺, 2014; 王秋舒等, 2015; 刘丽君等, 2017; 王晨, 2018; 于泓等, 2019)。此外, 近年来铝土矿中的锂得到了越来越多的重视和研究, 相应的离子吸附型锂矿已经成为不可忽视的资源(Wang et al., 2013; 钟海仁等, 2019; 范宏鹏等, 2021; 杨岳清等, 2021)。本文根据前人研究结果, 综合考虑资源禀赋、矿床成因、全球分布等特征, 以Bradley等提出的分类为主要参考(Bradley et al., 2017b), 同时结合中国锂矿主要类型, 将全球锂矿划分为6种类型: 盐湖卤水型、伟晶岩型(包括相关的花岗岩型及云英岩型)、黏土型、锂沸石型、其他卤水型(目前包含油气田卤水和地热卤水两种亚类)和离子吸附型(表1; Evans, 2012; 吴西顺, 2014; 后立胜等, 2016; Bradley et al., 2017b; 杨卉芃等, 2019; 钟海仁等, 2019; 范宏鹏等, 2021; 许志琴等, 2021)。其中, 盐湖卤水型因其巨大的资源量和便捷的开发方式将其从卤水锂矿中单独分出, 伟晶岩型锂矿因分布广泛、资源量大且开发程度最高而单分一类, 其他类型锂矿也因各具独特的成因或赋存状态而相互区分。

1.1 盐湖卤水型

盐湖卤水型锂矿亦可称为封闭盆地卤水锂矿或大陆盐湖卤水锂矿(Munk et al., 2016; Bradley et

表 1 锂矿类型划分
Table 1 Classification of lithium deposits

锂矿类型	主要矿物或成分	典型矿床
盐湖卤水型	钾、钠、钙、镁锂的氯盐、硫酸盐、硼酸盐和碳酸盐等	智利Atacama、玻利维亚Uyuni、阿根廷Hombre Muerto、中国扎布耶
伟晶岩型	锂辉石、锂云母、锂磷铝石、透锂长石和钾钠长石等	澳大利亚Greebushes、中国甲基卡和大红柳滩、刚果金Manono
黏土型	锂蒙脱石、伊利石	美国Kings Valley、墨西哥Sonora
锂沸石型	羟硼硅钠锂石(Jadarite)	塞尔维亚Jadar
其他卤水型	钾、钠、钙、镁锂的盐类	美国Smackover和Salton Sea
离子吸附型	高岭石、蒙脱石和绿泥石等	贵州大竹园铝土矿

*如非特别说明, 文中锂的计量单位均为碳酸锂当量

al., 2017b), 是指锂赋存于大陆封闭盆地内盐湖或盐壳中的一种锂矿类型。据统计, 全球盐湖卤水型锂矿储量约 9 170 万吨, 资源量约 1.59 亿吨(数据来源: S&P Global Market Intelligence、各公司技术报告和年报, 截至 2020 年 8 月; 下同)。该种锂矿类型分布较为集中, 主要分布于南美锂三角地区, 其次分布于中国西部和美国。

盐湖卤水型锂矿的成因主要是, 在封闭盆地, 特别是干旱沙漠地区的封闭盆地中, 锂在盐湖卤水中发生富集并形成有开采价值的锂矿床(图 1)。盐湖卤水型锂矿的成矿要素主要有 6 点(郑绵平, 2001; Bradley et al., 2013^①; Munk et al., 2016):

(1) 干旱的气候, 这是最重要的因素, 直接影响了盐湖的形成、锂浓缩富集成矿的时间和后续提取锂时卤水在蒸发池中进一步蒸发浓缩的效率。

(2) 有盐湖(或盐壳)分布的封闭盆地, 这是目前所有盐湖卤水型锂矿都具有的特征, 这一特征受构造背景和气候条件共同控制。

(3) 与成矿相关的火山或地热活动, 这一要素对形成盐湖卤水锂矿十分重要, 与之相关的热液可以对锂进行淋滤富集和运移, 而浅部热液更是可以直接成为锂源; 热活动导致的蒸馏作用也起到了一定的锂浓缩富集作用; 早期热液活动形成的富锂黏土矿物是锂源岩之一; 火山岩, 尤其是玻璃质碎屑成分, 是重要的锂源(图 1)。

(4) 构造导致的沉陷, 已知的盐湖卤水锂矿均位于与伸展、走滑和挤压等造山活动相关的盆地

内, 如与南美安第斯造山带相关的锂三角地区、北美科迪勒拉造山带相关的美国西部盆地和与青藏高原相关的中国西部青藏地区, 盐湖均位于受构造控制的山间断陷盆地内(陈克造, 1992; 郑绵平, 2001, 2013; Jordan et al., 2010; 陈安东和郑绵平, 2017), 盆地内部的活动构造及构造沉陷是重要的容矿、导矿机构。与之相反, 克拉通内盆地尚未发现具有重大经济价值的盐湖卤水锂矿(Bradley et al., 2013^①)。

(5) 充足的成矿锂来源, 关于盐湖卤水中锂的来源, 至今尚无定论(Houston et al., 2011; Kesler et al., 2012), 前人的研究成果主要集中于以下四个来源: (a) 新生代火山岩的风化作用和地下地表水淋滤以及卤水的循环富集(Rettig et al., 1980; Orti et al., 2000; Risacher and Fritz, 2009; Kay et al., 2011); (b) 古生代岩石的风化作用及地下水和地表水淋滤(Orti et al., 2000; Kasemann et al. et al., 2004); (c) 早期锂盐或盐壳沉积的活化、循环(Risacher et al., 1991, 2003; Orti et al., 2000); (d) 热液活动(岩浆、火山和地热等相关流体), 热液可以直接成为锂的来源, 也可以通过淋滤围岩, 尤其是对火山岩中锂进行提取富集(Orti et al., 2000; 郑绵平, 2001; Gibert et al., 2009; Bradley et al., 2013^①; Munk et al., 2016; Godfrey et al., 2019)。

(6) 盐湖卤水需经历长期的浓缩富集, 盆地中最初的含锂流体(盆地内径流、地下水等)锂离子含量极低(1~10 mg/L, 甚至更低), 需要经过几个数量级的富集形成含矿卤水(锂离子含量至少 100 mg/L)。此外, 不论卤水浓度到达多少, 一个具有经济价值的盐湖卤水锂矿的形成, 必须要有足够的时间来积累足量的可供开采的锂。盐湖卤水从淋滤、运移到浓缩、汇集成矿所需要的时间目前尚未明确, 但其成矿时代几乎均为新生代(Munk et al., 2016; 刘丽君等, 2017)。

卤水型锂矿由于其产出环境的气候、构造、自然地理等条件的独特性, 其在全球的分布较为集中, 空间上主要位于南北纬 19°~37°之间(Houston et al., 2011; Munk et al., 2016)。大地构造背景上则主要位于板块碰撞形成的加厚地壳岩浆造山带内, 地壳的增厚在减小地幔楔熔融程度的同时可以促进岩浆在地壳内的分异, 使锂在初始弧岩浆和地壳内富集, 为盐湖卤水型锂矿的形成提供充足的锂来源; 碰撞导致的地壳隆升则是陆内伸展盆地和干旱气

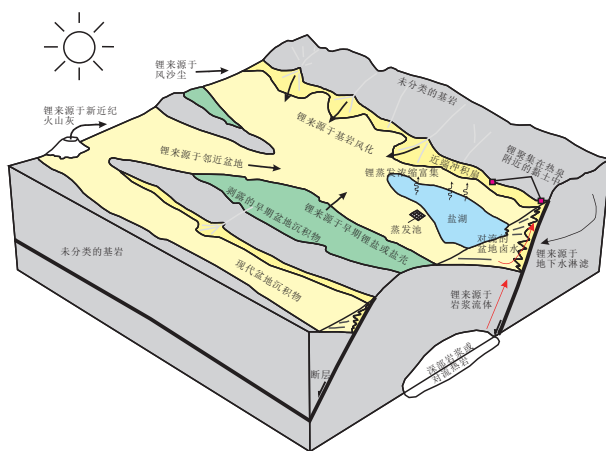


图 1 盐湖卤水型锂矿成矿模式示意图(据 Bradley et al., 2013^①)

Fig.1 Schematic deposit model for salt lake lithium brines(after Bradley et al., 2013^①)

候形成的重要因素;这些有利条件的耦合最终控制了盐湖卤水型锂矿的形成,如南美的安第斯山和中国的青藏高原(Munk et al., 2016; Chen et al., 2020; 刘成林等, 2021)。

1.2 伟晶岩型

伟晶岩型锂矿是指锂赋存在锂辉石、透锂长石、锂云母、锂霞石和磷铝锂石等含锂矿物中,成矿与花岗岩结晶分异形成的伟晶岩有关,其容矿围岩主要为花岗伟晶岩、花岗岩等花岗岩类,但一些矿床亦可赋存于基性岩杂岩体中(Kesler et al., 2012; 吴西顺等, 2014; Bradley et al., 2017a^②; 2017b, 刘丽君等, 2017; 王登红等, 2017; 许志琴等, 2020)。

据统计,全球伟晶岩型锂矿储量约 3 189 万吨,资源量约 6 459 万吨。该类型锂矿在全球分布最广泛且空间分布不均匀,既可以出现在稳定克拉通内,也可以出现在活动性很强的造山带,大型超大型矿床既分布于太古宙的克拉通内、元古代的褶皱带,也分布于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(王登红等, 2017; 陈衍景等, 2021)。大多数含锂伟晶岩赋存于高绿片岩相-低角闪岩相的表壳岩中,位于造山带内部,与 S 型花岗岩关系密切,是板块碰撞汇聚过程中加厚地壳熔融的产物,一般在造山运动后期侵位,受构造控制。伟晶岩多具内部分带结构(也存在内部组构均匀的伟晶岩),主要包括边界带、壁带、中间带和核部带,边界带与壁带中的细粒和 UST(单向固结结构)是液相线过冷所致,中间带与核部带中粗大矿物形成、矿物分带以及稀有金属矿物的饱和结晶是挥发分、稀有金属通过组成带状纯化方式在边界层聚集的结果(张辉等, 2021)。该类型矿床中锂主要来源于熔融形成 S 型花岗质熔体的泥质沉积物(云母是锂的主要储集物),由于其为强不相容元素,在熔体的结晶分异过程中逐渐富集成矿(岩浆演化最晚期的伟晶岩或花岗岩)。伟晶岩型锂矿的成矿峰期分别为 2 638 Ma、1809 Ma、962 Ma、485 Ma、309 Ma、274 Ma 和 97 Ma,与碰撞造山活动和超大陆汇聚的时间一致(Bradley et al., 2011, 2017a^②, 2017b; 付小芳等, 2015; 许志琴等, 2018; 陈衍景等, 2021)。

1.3 黏土型

黏土型锂矿是指锂赋存于黏土层(岩)中,主要为蒙脱石族和伊利石族等黏土矿物中的矿床,含锂

矿物最主要的类型为锂皂石和锂云母等(吴西顺等, 2014; 刘丽君等, 2017; 于泓等, 2019)。黏土型锂矿的成因目前尚未明确: Stillings 和 Morissette(2012)通过对美国西部黏土型锂矿中的富锂黏土进行的分析表明,除锂之外,它们还富含镁、氟等热液作用的产物,因此,部分学者认为黏土型锂矿成因可能是含锂原岩(主要为火山相关火山-沉积岩系)受热液作用蚀变形形成(Bradley et al., 2017b);但是,美国内华达州和俄勒冈州交界处的 Thacker Pass 地区黏土型锂矿的钻探结果表明黏土中的锂矿化十分均匀,可能意味着富锂黏土的形成与热液活动无关(于泓等, 2019); Castor 和 Henry(2020)通过对美国内华达州北部 McDermitt 破火山口内锂矿体中同生钾长石进行⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年结果显示,成矿比岩浆活动晚了约 1.2 Ma,表明黏土型锂矿并非简单的热液成因,封闭的水文系统成岩作用(CHSD)对锂矿化至关重要,锂主要来源于早期的岩浆活动,经早期热液或地下水淋滤富集后,同其他碎屑物质在封闭的火山口湖内沉积成岩成矿,与封闭盆地中富锂卤水的低温形成机制类似。

据统计,全球黏土型锂矿储量和资源量分别为 679 万吨和 1976 万吨。目前,全球发现的具有经济价值的黏土型锂矿主要分布于北美西部盆地(美国和墨西哥),南美洲秘鲁东南部 Falchani 地区凝灰岩中亦赋存上百万吨碳酸锂。黏土型锂矿的矿体是富锂的凝灰岩和黏土,回收锂的方式以硫酸常压淋滤、浸出为主,回收的产品主要是碳酸锂,回收率可达 80% 以上(于泓等, 2019)。

1.4 锂沸石型

锂沸石型锂矿发现于塞尔维亚的贾达尔盆地(Jadar)中,目前勘探资源量约 232 万吨。部分学者称其为湖相沉积型或湖泊蒸发岩型(吴西顺等, 2014; 杨卉芃等, 2019),由于黏土型锂矿也多赋存于湖盆沉积中,但贾达尔盆地内锂赋存在沸石族矿物中,故本文采用锂沸石型这一命名(Bradley et al., 2017b)以示区分。贾达尔盆地中的锂赋存于近年来新认可的沸石族硼锂硅酸盐矿物羟硼硅钠锂石(Jadarite)中,其化学式为 $[\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})]$ 。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的特殊矿物,其锂含量与锂辉石相似(Stanley et al., 2007; 吴西顺等, 2014; Bradley et al., 2017b; 郭慧, 2017; 于泓等, 2019)。

贾达尔盆地是一个北西-南东向的凹陷盆地,处于迪纳拉(Dinarides)造山带与潘诺尼亚(Pannonian)盆地之间。盆地由约 150 km² 的中新世湖相和海相沉积物充填,沉积于三叠纪与白垩纪岩层之上,主要岩石类型有页岩、粉砂岩、细砂岩、粗砂岩、碳酸盐岩、蒸发岩以及凝灰岩等。贾达尔盆地内已发现三层锂矿体,上部和中部矿体在平面上的投影形态为矩形,下部矿体的投影形态为圆形,矿体呈板状产出,长度 250~1 000 m。上部、中部和下部矿层厚度分别为 6~30 m、8~38 m 和 9~20 m,羟硼硅钠锂石的含量分别为 10%~20%、5%~10% 和 30%~50%。脉石矿物由方解石、白云石、钾长石、金红石、钛铁矿、黄铁矿和细粒白云母等组成。矿体成矿物质可能来源于凝灰岩,其成因尚无定论,可能是含硼的湖水由于其中的硼暂时性地达到饱和,或者是蒸发速率的改变以及由于热泉水的流入而使硼酸盐发生沉淀,从而形成硼酸盐矿床(赵元艺等, 2015; Bradley et al., 2017b; 刘丽君等, 2017)。

1.5 其他卤水型

目前主要包括油气田卤水和地热卤水两个亚类,受技术条件限制,勘查和开发利用程度暂时都较低(蔡艳龙和李建武, 2017)。

油气田卤水锂矿是锂赋存在油气田较深储层中的富锂卤水内的锂矿类型,其卤水中锂离子含量可达几百 mg/L,全球统计资源量约 314 万吨。美国阿肯色州、北达科他州、俄克拉荷马州、得克萨斯州和怀俄明州的部分油田卤水中均发现含有大量的锂,浓度高达 700 mg/L。最著名的油气田卤水锂矿位于美国南部得克萨斯州墨西哥湾沿岸地区的 Smackover 地层中,其卤水埋深 1 800~4 800 m,断续分布在地下灰岩孔隙中,卤水累计厚度可达 200 m,部分区段锂离子含量高达 692 mg/L。卤水被认为是圈闭的海水,在水热条件下逐渐富集锂和其他微量元素而形成(Garrett, 2004)。该类型卤水在开发上存在两个缺点:一是卤水通常位于较深的地下(大于 1 km);二是除非该类型卤水矿恰好位于干旱地区,否则无法使用方便廉价的太阳能蒸发法回收锂,因此该类型锂矿目前不是锂矿勘探和开发的重点类型(Bradley et al., 2013^①, 2017b; 蔡艳龙和李建武, 2017)。

地热卤水锂矿是指富含锂硼钾等元素的温热浓盐水溶液,这些流体除了其热能价值,亦是锂的潜在来源之一,其全球统计资源量约 168 万吨。美

国已经在加利福尼亚南部的 Salton Sea 地区的地热卤水中回收锂金属,其热卤水埋深 1865~3 170 m,温度为 270~370 °C,卤水化学类型属氯化钙型,锂离子平均含量约 250 mg/L,以高钙低镁为主要特征,镁/锂比值很低,为 0.18 左右,硫酸根和碳酸氢根含量很低,富含重金属元素。目前,索尔顿海深部卤水的开采对象主要是地热、金属锌、硅及锂等,根据供卤量估算,索尔顿海每年可回收金属锂 6 460~31 580 吨。该类型锂矿由于其埋深较深,资源潜力目前难以评价(吴西顺等, 2014; Bradley et al., 2017b; 蔡艳龙和李建武, 2017; 刘成林等, 2021)。

1.6 离子吸附型

该种类型锂矿和铝土矿伴生,与封闭沉积盆地内的黏土型锂矿不同,其成矿与铝土矿的形成关系密切。铝土矿形成于热带、亚热带气候,是含铝岩石强烈风化后原位或迁移再富集的产物,其成矿过程即是锂、稀土、镓、钒、钛、铌和钽等金属元素大量富集的过程(Calagari and Abedini, 2017)。因中国铝土矿资源丰富,位居世界前列,与之伴生的离子吸附型锂矿也逐渐成为锂的重要来源之一,前人在铝土矿中锂的寻找和研究方面做了大量工作,取得了较大成绩,该类型锂矿床已经成为一种具有巨大潜力,不可忽视的矿床类型(Wang et al., 2013; 钟海仁等, 2019; 范宏鹏等, 2021; 杨岳清等, 2021)。

华北陆块和扬子陆块是中国铝土矿主要分布地区,也是最重要的离子吸附型锂矿的潜力区。其中晋中-晋东北、豫西、黔中-黔北和桂西等地的铝土矿含矿岩系中锂超常富集的现象已被广泛发现,部分矿床中的锂甚至达到了独立锂矿床的边界品位。如贵州大竹园铝土矿钻孔样品中氧化锂单孔平均含量大于 0.05%,局部形成富矿地段,氧化锂含量超过 0.1%,最高可达 0.582%,初步估算大竹园铝土矿中锂金属量可达数十万吨,达到大型以上规模(Wang et al., 2013; 范宏鹏等, 2021)。

王登红等(2013)认为锂在铝土矿中一般以吸附状态存在,因此将此类锂矿称为风化壳吸附型锂矿,即离子吸附型锂矿。温汉捷等(2020)则将该类型矿床命名为碳酸盐黏土型锂矿床,认为锂来自基底不纯碳酸盐岩,碳酸盐岩风化-沉积作用是富锂黏土岩形成的主要机制,锂主要以吸附方式赋存于蒙脱石相中。Ling et al.(2020)通过 LA-ICP-MS 原位分析方法研究贵州西南铝土矿中锂的赋存状态,结果显示锂可能以类质同象的形式富集在蒙脱

石中。钟海仁等(2019)通过元素相关性及黏土矿物结构研究,认为锂和碱及碱土金属元素呈正相关性,和 Zr、Nb 等稳定元素存在特定关系,锂主要以离子交换和离子吸附 2 种形式赋存在高岭石、绿泥石、蒙脱石等黏土矿物中,存在锂绿泥石并可能含锂蒙脱石等锂的独立矿物。姚双秋等(2020)和凌坤跃等(2021)陆续在研究广西平果上二叠统合山组黏土岩时也指出锂绿泥石存在的可能。这些研究都表明在沉积岩特别是黏土岩中可能存在锂的独立矿物,但铝土矿中是否存在锂的独立矿物尚缺少实际依据(范宏鹏等, 2021)。因此,目前该类型矿床中,锂最重要的赋存状态依然是以离子吸附形式赋存在高岭石、绿泥石、蒙脱石等黏土矿物中。

2 成矿时代及分布特征

2.1 成矿时代

现代盐湖卤水中锂储量最为丰富,南美锂三角地区、中国西部和美国的众多盐湖卤水锂矿均主要形成于中新世及之后(陈克造, 1992; 郑绵平, 2001; Munk et al., 2016)。全球目前已知的黏土型矿床,如美国的 Kings Valley 和 Clayton Valley、墨西哥 Sonora 等矿床均赋存在新近纪以来的湖盆沉积岩或火山口湖沉积层中,塞尔维亚的锂沸石型锂矿贾达尔矿亦是赋存在中新世湖相沉积岩中(Munk et al., 2016; Bradley et al., 2017b; 刘丽君等, 2017; 于泓等, 2019)。其他卤水型锂矿中的油气田卤水和地热卤水也多赋存在新生代以来的稳定盆地中,因为古老的卤水难以保存至今。离子吸附型锂矿形成时代跨越中生代(早石炭世至第四纪),物源、干燥的气候、风化剥蚀时间等是影响锂富集程度的主要因素(钟海仁等, 2019; 范宏鹏等, 2021; 图 2)。

伟晶岩型锂矿时代分布广泛,跨度较大,目前已知最古老的伟晶岩型锂矿是位于澳大利亚的 Pilgangoora, 其铷钽铁矿 U/Pb 年龄为 2 879 Ma, 最年轻的伟晶岩型锂矿是位于意大利的 Elba, 其 Rb/Sr 同位素年龄为 7 Ma。伟晶岩型锂矿在时代上呈幕式分布(图 2、图 3),与超大陆形成的汇聚造山时间一致,而在造山运动的间歇期,即超大陆稳定时期,几乎没有具有重大经济价值的伟晶岩型锂矿形成,这些成矿寂静期为 2 450~2 225 Ma、1 625~1 000 Ma 和 875~725 Ma(Bradley et al., 2017a^②, 2017b)。

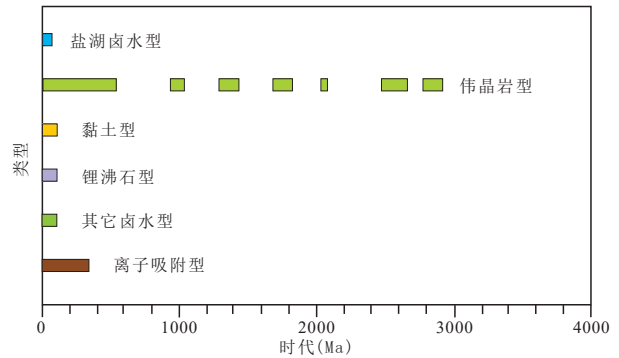


图 2 全球主要锂矿时代分布

Fig. 2 Global age distribution of major lithium deposits

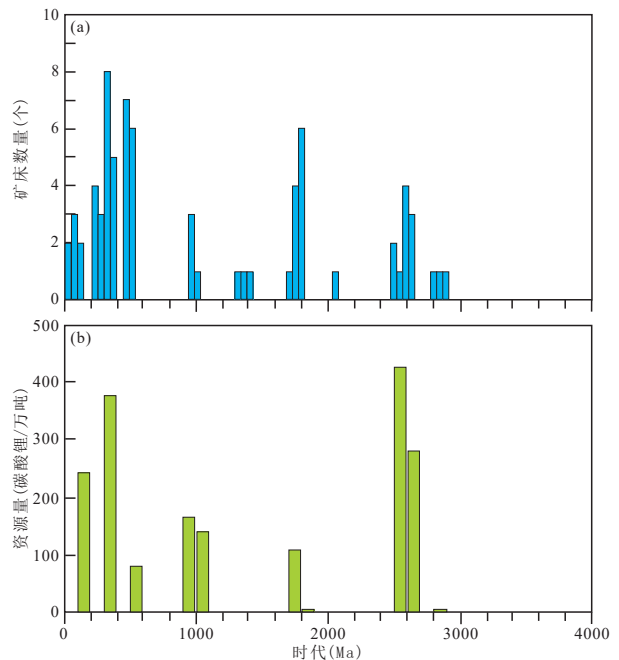


图 3 全球伟晶岩型锂矿时代分布特征(据 Bradley et al., 2017b)

Fig. 3 Age distribution of lithium pegmatites deposits in the world (after Bradley et al., 2017b)

2 638 Ma 这一成矿峰期内的伟晶岩型锂矿主要位于西澳克拉通、北美加拿大地盾和南非-津巴布韦太古宙地盾内,代表性矿床主要有西澳最著名的 Greenbushes(2 527 Ma)、Wodgina(2 829 Ma)、Pilgangoora(2 879 Ma)、加拿大的 Tanco(2 641 Ma)和津巴布韦的 Bikita(2 617 Ma)等大型或超大型矿床(Bradley et al., 2017a^②)。

1 809 Ma 成矿峰期内伟晶岩型锂矿主要位于波罗的海地盾和西伯利亚地盾中,该时期的锂矿床数量众多,但是缺乏全球知名的大型矿床(Bradley

et al., 2017a^②)。

962 Ma 成矿峰期内伟晶岩型锂矿主要位于刚果克拉通内,代表性矿床为形成于 940 Ma 的刚果金的 Manono 超大型矿床(Bradley et al., 2017a^②; 王登红等, 2017; 任军平等, 2021)。

古生代以来的伟晶岩型锂矿的成矿间期明显变短,与加里东运动、海西运动、印支运动和燕山运动的交替发生有关,矿床主要分布于西欧-乌拉尔海西褶皱带、美国阿帕拉契亚海西褶皱带和中国川西锂成矿带中,矿床数量众多,中国四川的甲基卡(208 Ma)、党坝和新疆可可托海三号脉(220 Ma)等即形成于印支期—燕山期(图 3; Wang et al., 2007; 李健康等, 2014; Bradley et al., 2017a^②, 2017b; 王登红等, 2017)。

全球锂矿床除伟晶岩型和离子吸附型外,均主要位于新生代尤其是新近纪以来的(封闭)沉积盆地中,只有少数零星赋存在中生代沉积层中(李健康等, 2014; 钟海仁等, 2019)。根据 Bradley et al.(2017a)^②报道的数据,新生代锂矿查明的资源量全球占比 75%。新生代之前的锂矿以伟晶岩型为主,中生代—古生代查明资源量全球占比约 9%,元古宙查明资源量全球占比约 6%,太古宙查明资源量全球占比约 10%。

2.2 分布特征

新老造山带及古老克拉通是锂矿赋存的最佳环境,如青藏高原造山带、南美安第斯造山带、北美科迪勒拉造山带和西澳克拉通等(图 4)。因此,锂矿在空间上主要分布于南美中安第斯的阿塔卡玛沙漠—玻利维亚高原—普纳高原一带(Munk et al., 2016),即众所周知的锂三角地区;其次为澳大利亚西澳克拉通的皮尔巴拉地块—伊尔岗地块、中国西部川藏地区、刚果克拉通、西非克拉通马恩—莱奥地盾、北美西部盆地、北美东部褶皱带和地盾区、南非—津巴布韦地盾、波罗的海地盾和西伯利亚地盾、西欧—乌拉尔海西褶皱带、阿富汗帕米尔高原锂潜力区和塞尔维亚贾达尔盆地等(图 4);近年来铝土矿的分布区也逐渐成为离子吸附型锂矿潜力区,如中国华北陆块和扬子陆块(李健康等, 2014; 王秋舒等, 2015; 王登红等, 2017; 张继纯等, 2019; 钟海仁等, 2019; 范宏鹏等, 2021)。

2.2.1 锂三角地区

南美锂三角地区位于中安第斯构造带,中新世以来,区域火山活动十分发育,在区内形成了广泛的英安岩和熔结凝灰岩,为锂矿形成提供了物质来源。上新世以来的构造沉降在区内形成大量封闭盆地,由于水岩反应、气候干旱等因素,卤水不断

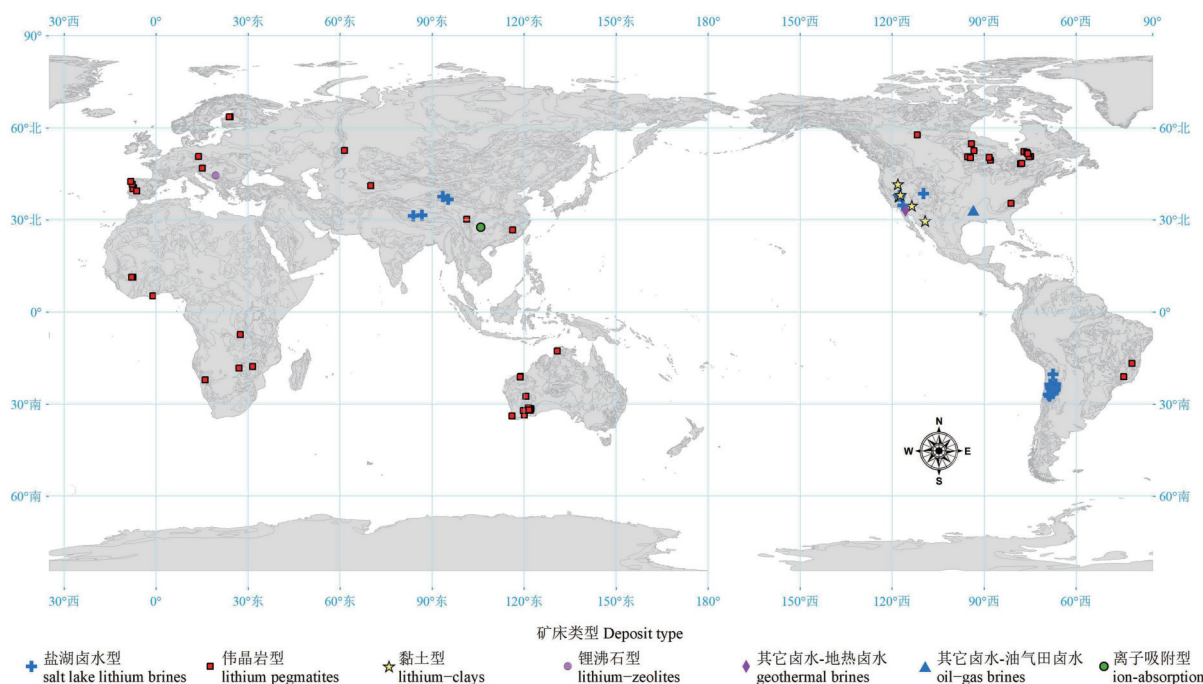


图 4 全球主要锂矿床分布图

Fig. 4 Global distribution of major lithium deposits

浓缩, 各类盐矿物在盐湖内沉淀, 锂离子因其较大的溶解度在卤水内不断富集, 并在盐田及其周边的沙粒及石盐混层沉积物中赋存, 形成了盐湖卤水型锂矿。据统计, 锂三角地区具备锂开发潜力的盐湖至少 53 个, 总面积超 25 000 km²。

锂三角地区是全球最大最重要的锂资源集中区, 锂储量约 6 708 万吨, 锂资源量约 1.33 亿吨, 已系统勘探盐湖的锂离子平均浓度 600 mg/L, Mg/Li 平均比值 9, 品质优于全球其他地区盐湖(图 5)。

锂三角地区锂资源量最大, 品质最好的盐湖为智利的 Atacama 盐湖(图 5), 该盐湖表面积约 3 000 km², 平均锂离子含量约 2 380 mg/L, 最高可达 5 000 mg/L(Munk et al., 2016), 该盐湖位于 Atacama 沙漠内, 气候极为干旱, 十分利于蒸发沉淀法开采。玻利维亚的 Uyuni 盐湖是全球表面积最大的盐湖, 约 10 000 km², 其资源潜力全球第一。阿根廷的 Hombre Muerto、Olaroz 和 Cauchari 盐湖也是全球闻名的优质盐湖(图 5)(Kesler et al., 2012)。

2.2.2 西澳克拉通皮尔巴拉地块—伊尔岗地块

西澳克拉通内的锂矿均为伟晶岩型锂矿, 产于克拉通内的太古宙花岗—绿岩带的深变质岩中。富锂伟晶岩多赋存在花岗质片麻岩、角闪岩和角闪石片岩中, 而伟晶岩本身多被绿帘石脉、辉绿岩脉和花岗岩脉所穿插。西澳克拉通内几乎包括了整个澳大利亚的锂资源, 其锂矿储量和资源量分别约

为 1827 万吨和 2 897 万吨, 是全球伟晶岩型锂矿最大的集中区, 是仅次于锂三角地区的锂资源赋存区。克拉通内伟晶岩锂矿常具有伴生组分多、规模大及经济价值高等优点。

西澳克拉通内主要矿床为位于伊尔岗地块的 Greenbushes、Mt Cattlin、Mt Marion 和 Bald Hill 等矿床; 位于皮尔巴拉地块的 Pilgangoora 和 Wodgina 等矿床(图 6)。其中, Greenbushes 矿是这些矿床的典型代表, 位于伊尔岗地块南西。Greenbushes 伟晶岩是西澳克拉通内目前发现的最大的伟晶岩群, 沿走向延伸达 6 km。Greenbushes 伟晶岩位于 Balingup 变质带内, 该变质带由下部角闪片麻岩和上覆的细粒角闪岩及条带状铁建造构成。位于皮尔巴拉地块的 Pilgangoora 矿床亦是一个世界级的伟晶岩型锂矿, Pilgangoora 伟晶岩由一系列沿南北走向断层控制的伟晶岩群组成, 分布在 Warrawoona 群镁铁质变质岩系中。Pilgangoora 伟晶岩群可区分为三个岩相, 即早期粗粒的含锂辉石相、中期含 Ta—Sn 氧化物的细晶岩相和晚期的含白云母岩石组合(Kendall—Langley et al, 2020)。

2.2.3 中国川藏地区

中国锂资源丰富, 矿床多, 规模大, 主要集中在川藏地区(吴学敏等, 2016), 在湖南、新疆、河南、福建、陕西等省区亦有产出(图 7)。川藏地区锂矿类型主要为盐湖卤水型和伟晶岩型, 根据其矿床类

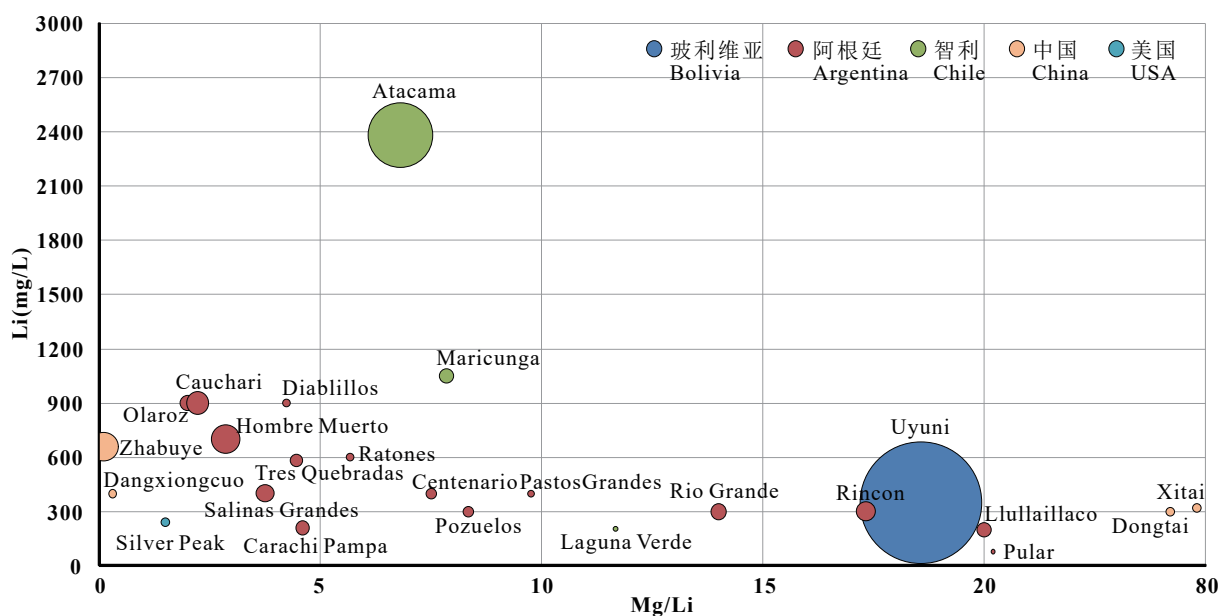


图 5 锂三角地区盐湖品质判别对比图

Fig. 5 Discrimination map of salt lake quality in Lithium Triangle area

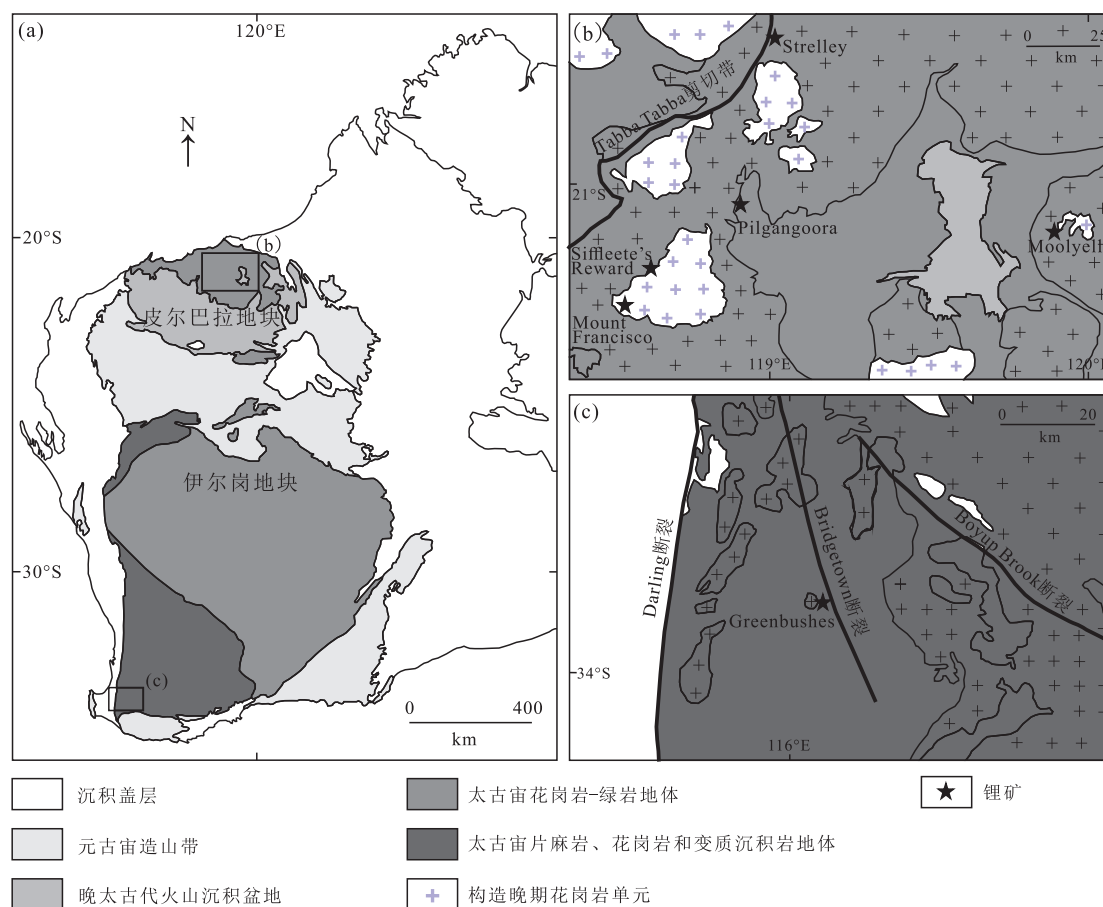


图6 西澳克拉通伟晶岩型锂矿地质概况 (据 Kendall-Langley et al., 2020)

Fig. 6 Distribution of lithium pegmatites deposits in Western Australia Craton (after Kendall-Langley et al., 2020)

型和主要分布区可以划分为川西伟晶岩型锂矿带和青藏高原盐湖卤水型锂矿带。

川西伟晶岩型锂矿带隶属松潘-甘孜造山带(张国伟等, 2002), 造山带内伟晶岩型稀有矿产种类多, 分布广, 已发现的锂矿主要位于造山带主体东缘(李健康等, 2014; Huang et al., 2020)和西缘(西昆仑大红柳滩锂矿)(彭海练等, 2018)。带内伟晶岩型锂矿成因上与板块碰撞导致的构造岩浆活动有关, 大多数锂矿床, 特别是大型锂矿床, 形成于岩浆活动中晚期热液蚀变体或伟晶岩脉中(李健康等, 2014)。矿带内甲基卡锂矿是亚洲最大的锂辉石矿床之一, 印支期含锂二云母花岗岩株沿甲基卡短轴背斜侵入三叠系浅变质岩中。围绕花岗岩内外接触带派生出一系列花岗伟晶岩脉。其主矿体称为新三号脉, 平面上呈分枝脉状, 向深部复合为一条巨大的锂辉石矿脉, 该矿脉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(代晶晶等, 2017; 王登红等,

2017)。

青藏高原盐湖卤水型锂矿带地跨西藏和青海两省(图 7), 带内盐湖卤水型锂矿分布较为集中, 主要位于青藏高原新生代构造盆地和凹陷中, 以扎布耶、察尔汗等盐湖为代表(陈克造, 1992; 郑绵平, 2001, 2013)。青藏高原盐湖卤水型锂矿带的形成要素主要为其第四纪以来干旱的气候和高原内部一系列的断陷谷地、盆地构造。其盐湖盆地分为两类: 一类为高原北部被大型断裂控制的山间盆地, 如柴达木和库里木盆地; 另一类为高原内部分布的断裂控制的规模不一的湖盆, 或由冰川和河流淤塞形成的小型湖泊。带内盐湖卤水型锂矿的成因与火山、地热活动关系密切(郑绵平, 2001)。带内的扎布耶盐湖是我国优质盐湖的代表, 为富锂碳酸盐型盐湖, 面积约 247 km², 位于高原腹地。扎布耶盐湖卤水中富含锂、钾、硼、铷、铯、溴等多种矿物元素, 锂离子含量在 420~1 320 mg/L 之间, 镁锂比值仅为 0.02, 开发条件优良(也贞等, 2010)。

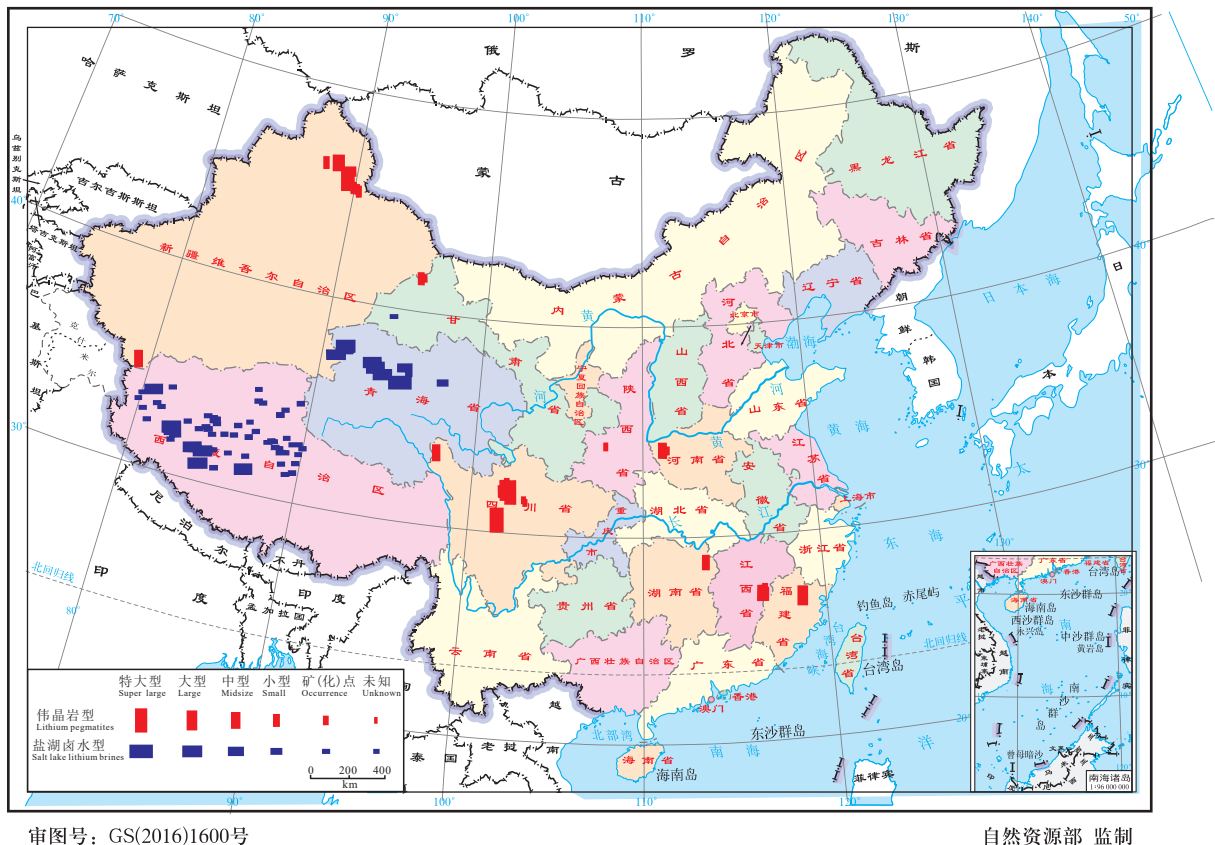


图 7 中国锂矿分布概况 (据李健康等, 2014)

Fig. 7 Distribution of lithium deposits in China (after Li et al., 2014)

2.2.4 刚果克拉通

该区内锂矿均为伟晶岩型, 成矿带从乌干达的南西部开始呈北北东—南南西向经卢旺达、布隆迪、刚果(金)进入安哥拉, 大致相当于该区中元古代基巴拉构造带(Kibara Belt)及周边稳定克拉通的位置。伟晶岩型锂矿主要产于基巴拉构造带(图8), 基巴拉构造带可分为两部分: 北部 Karagwe-Ankole 带(KAB)和南部 Kibaride 带(KIB)。伟晶岩型锂矿主要产于南部 Kibaride 带(KIB), 与带内最晚期的含锡花岗岩浆作用关系密切, 形成于陆陆造山碰撞晚阶段和碰撞后阶段。伟晶岩的地质年龄为 912~975 Ma(Kokonyangi et al., 2006), 侵入早期的变质沉积地层和岩体中, 与伟晶岩型锂矿 962 Ma 的成矿峰期一致(Dewaele et al., 2016; Bradley et al., 2017a^②, 2017b; 王登红等, 2017; 许康康等, 2019)。

据任军平等(2021)统计, 刚果(金)锂矿的储量约 327 万吨, 资源量约 482 万吨, 均位居非洲首位。刚果(金)的 Manono 锂矿为刚果克拉通内最大的伟晶岩型锂矿。矿床包括两个矿带: 南西的

Kitotolo 矿带和北东的 Manono-Kahungwe 矿带, 二者相距约 2 km。含矿伟晶岩位于区域花岗岩株的上部, 侵入千枚岩、片岩、变质砂岩和变质辉绿岩围岩中。伟晶岩地表风化残积层厚度可达 8 m(Dewaele et al., 2016)。

2.2.5 西非克拉通马恩-莱奥地盾

西非克拉通马恩-莱奥地盾内锂成矿带自西向东跨越几内亚、马里南部、科特迪瓦、布基纳法索和加纳等国。区内锂矿均为伟晶岩型锂矿, 新太古代—古元古代伟晶岩在区内断续分布, 构成区内太古代和古—中元古代结晶岩系的一部分, 伟晶岩型锂矿与区内钽、锡等矿床成矿关系密切。区内最大、最典型的伟晶岩型矿床是位于马里南部的 Goulamina 锂矿, 是非洲最大锂矿之一, 也是最近资源量取得突破的世界级的超大型伟晶岩型锂矿床, 矿床包括 Danaya 和桑加尔 Sangar 两个主要矿段, 成矿相关伟晶岩侵入到变质沉积岩和绿岩围岩中(张继纯等, 2019)。

2.2.6 北美西部盆地

北美西部盆地, 主要包括美国西部科迪勒拉山

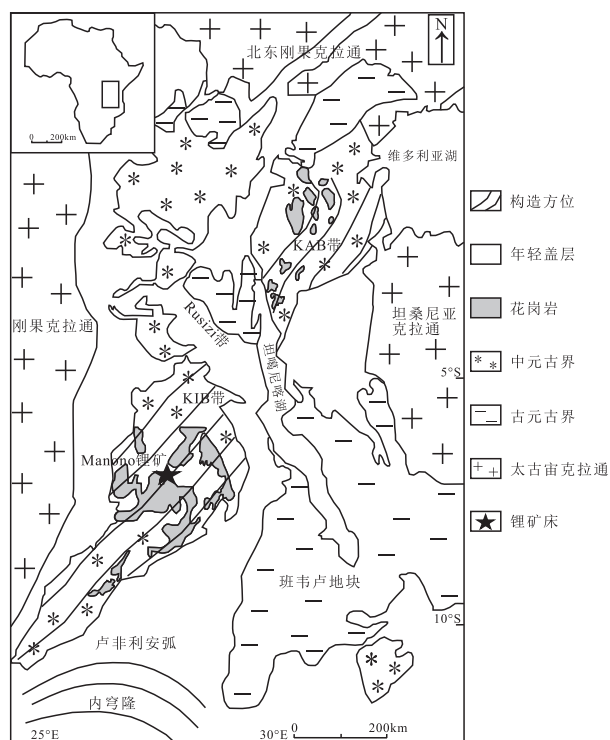


图8 基巴拉构造带地质简图(据许康康等, 2019)

Fig. 8 Geological map of Kibara Belt (after Xu et al., 2019)

系的高山深盆(袁见齐等, 1983)和墨西哥西部的索诺拉(Sonora)沙漠, 从美国俄勒冈州沿内华达州、加利福尼亚州南东和亚利桑那州一直延伸至墨西哥索诺拉地区。区内受大规模陆内伸展-岩浆活动影响, 形成了众多新近纪以来的火山-沉积盆地(舒良树和王德滋, 2006), 在干旱的气候、盆地沉积作用、火山和热液活动等条件影响下, 形成了一系列黏土型锂矿和盐湖卤水型锂矿, 全球为数不多的地热卤水锂矿(加利福尼亚的 Salton Sea)在区内也有分布(Bradley et al., 2017b; Castor and Henry, 2020; Rosen et al., 2020)。目前全球发现的具有经济价值的黏土型锂矿几乎全部位于该区域。区内主要的锂产地主要为美国的 Kings Valley、Clayton Valley、Big Sandy 和 Burro Creek 等地区 and 墨西哥的 Sonora 盆地(于泓等, 2019)。

位于美国内华达州北部 McDermitt 地区破火山口内的 Kings Valley 锂蒙脱石矿床是目前发现的最重要的黏土型锂矿之一。McDermitt 地区在中新世有广泛的火山活动, 热液渗透入火山岩中将锂元素提取到湖底形成富锂黏土层, 其赋存在火山口湖内火山碎屑岩中。更新世的火山活动将火山口

抬高, 使得湖水被排出, 将富含锂的沉积物带到了地表(Bradley et al., 2017b; 于泓等, 2019; Castor and Henry, 2020)。

内华达州 Esmeralda 县中南部的 Clayton Valley 是盐湖卤水型锂矿和黏土型锂矿的重要分布区。Clayton Valley 是一个面积 1 342 km² 的封闭盆地, 洼地处为一个 72 km² 的干盐湖, 即为美国现在唯一在产的盐湖卤水锂矿 Silver Peak(Munk et al., 2016)。该地区亦发现有高锂含量的黏土层, 含蒙脱石的黏土岩全岩矿化, 厚度超过 120 m(于泓等, 2019)。

墨西哥 Sonora 也是目前全球知名的黏土型锂矿, 位于墨西哥西部索诺拉沙漠内, 美国边境线以南 250 km 处。锂蒙脱石富集在索诺拉盆地内几个水平层状黏土层中, 盆地沉积主要为平坦的渐新世和中新世沉积物及沉积在浅盆地中的火山岩。黏土层覆盖于砂岩层上, 底部为玄武岩(于泓等, 2019)。

2.2.7 北美东部褶皱带和地盾区

北美东部地区, 主要包括加拿大地盾和美国阿巴拉契亚褶皱带两个区域, 是全球重要的伟晶岩型锂矿分布区。阿巴拉契亚褶皱带为海西期褶皱带, 带内断续有花岗伟晶岩出露, 其中最重要的是 Kings Mountain 伟晶岩带, 从北卡罗来纳州南部边界向北东延伸约 50 km, 宽 0.5~3 km。伟晶岩脉产状形态均十分复杂, 侵入区域内沉积变质岩, 包括石英岩、砾岩、绿泥片岩、黑云母片岩和片麻岩等, 以及石英二长岩中。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(Kesler et al., 2012; 王登红等, 2017)。

与西澳克拉通类似, 加拿大地盾太古宙绿岩带内亦分布众多的伟晶岩型锂矿。其主要成因是太古宙花岗质岩浆沿断层上侵到绿岩带, 经结晶分异形成了近水平的呈透镜状的矿体形态(王秋舒等, 2015; Maneta et al., 2019)。地盾内产出闻名全球的 Tanco 矿床和近年来备受关注的 Whabouchi 矿床(刘丽君等, 2017; 王登红等, 2017)。Tanco 矿床位于加拿大中部曼尼托巴省的伯尼克湖地区, 成矿伟晶岩侵入强烈变形变质的镁铁质变质岩层中, 为一条长约 1.5 km、宽约 1 km、厚约 100 m 的隐伏岩脉(Kesler et al., 2012)。

2.2.8 其他锂矿分布区

除上述区域外, 全球其他地区亦有一定的锂分

布,多以伟晶岩型锂矿为主。主要为:南非-津巴布韦太古宙地盾, Bikita 矿是其中的典型代表;波罗的海地盾和西伯利亚地盾,地盾内分布一系列伟晶岩型锂矿,但缺乏世界级的典型矿床;南美圭亚那和中巴西地盾,主要分布在巴西境内;西欧-乌拉尔海西褶皱带,包括法国中部、德国西部、捷克和东欧西亚等地区,法国中部的中央高原有海西期含锂、铍、铌、钽的花岗岩产出;阿富汗帕米尔高原锂潜力区,该潜力区锂矿的成矿时代主要为阿尔卑斯新生代成矿期,大规模的褶皱作用对于成矿作用有重要的影响;塞尔维亚贾达尔盆地,目前是锂沸石型锂矿唯一产地(资源量约 232 万吨);中国华北陆块和扬子陆块内离子吸附型锂矿的成矿潜力也开始受到重视(Kesler et al., 2012; 王秋舒等, 2015; 王登红等, 2017; 钟海仁等, 2019)。

3 勘探开发及找矿潜力分析

目前全球锂矿的开发类型主要为伟晶岩型锂矿和盐湖卤水型锂矿。1997 年以前,全球锂矿产量主要来自于伟晶岩型锂矿。自 1997 年盐湖卤水型锂矿提锂技术突破后,智利和阿根廷盐湖卤水型锂矿产量迅速上升,锂生产成本大幅下降,碳酸锂价格大跌,导致从 2003 年开始,全球锂资源开发格局由原有的伟晶岩型锂矿为主转变为以盐湖卤水型锂矿为主,并一直成为全球锂资源供应的主体(图 9)。2015 年随着新能源汽车对锂需求爆发式增长,锂价格暴涨,伟晶岩型锂矿因其投资周期短、

增产快,在市场供应中的地位迅速逆袭,2019 年全球锂产量 42.58 万吨,其中伟晶岩型产量 25.75 万吨,占比 60.47%。盐湖卤水型锂矿的供应量和其巨大的资源量不匹配(图 9)。

随着新能源产业的蓬勃发展,全球掀起了锂矿勘探热潮,查明的锂资源量显著增长,各种类型的锂矿均有勘探突破,尤以盐湖卤水型、伟晶岩型和黏土型锂矿最为突出(刘丽君等, 2019)。随着国际市场和国内市场对锂资源需求的跨越式增长,锂资源需求量与供给量超差缺口逐年增长,全球锂矿勘探热潮仍将持续。现有的锂矿类型无疑将成为未来的勘探热点,新的矿床类型也将陆续发现,由于盐湖卤水型锂矿和伟晶岩型锂矿是目前开发利用的主要类型,在未来的一段时间内,这两种锂矿类型仍将是找矿突破最主要的方向,也是勘探和研究的重点(Bradley et al., 2017a^②, 2017b; 陈衍景等, 2021; 刘成林等, 2021; 许志琴等, 2021)。

盐湖卤水型锂矿由于其独特的地理分布特征,锂三角地区、青藏高原和北美西部盆地仍是该类型锂矿最具找矿潜力的地区,尤以锂三角地区潜力最大,因其成矿条件优异,但勘探和研究程度十分低下,还有许多尚未系统勘探的盐湖,以玻利维亚为例,其高原南部分布至少十几个可开发盐湖,但仅有 Uyuni 盐湖南部一小片区域取得了勘探储量,勘探面积仅为 Uyuni 盐湖的 5%(Memoria Y L B, 2018)。智利和阿根廷目前开发的盐湖也仅为所谓的“三湖四矿”(智利 Atacama 盐湖两个生产项目、

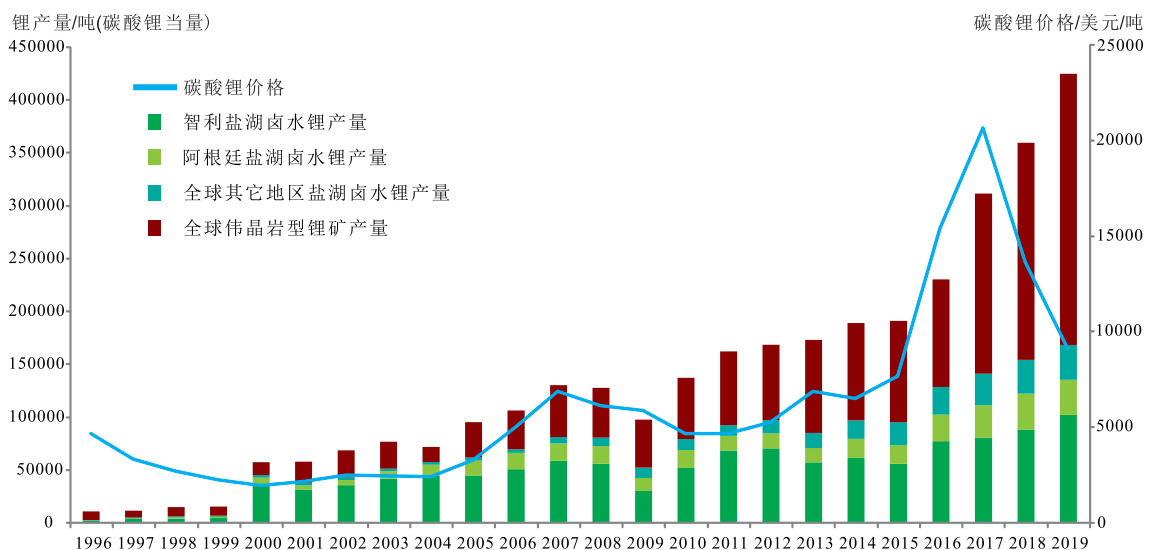


图 9 自 1996 年以来卤水型和伟晶岩型锂矿产量变化图

Fig. 9 Variation chart of salt lake lithium brines and lithium pegmatites lithium production since 1996

阿根廷 Hombre Muerto 和 Olaroz 盐湖各一个生产项目), 尚有大量盐湖未进行系统勘探。Atacama 盐湖现有储量 5 191 万吨, 资源量 5 239 万吨, 按现有的开采量可持续开发几百年, 根据 Munk 等预测数据(Munk et al., 2016), 单其一个盐湖的锂储量可满足全球约 50 年的锂需求。整体来看, 盐湖卤水型锂矿, 尤其是锂三角地区的锂矿, 由于其巨大的资源量及资源前景, 是保证未来全球锂矿稳定供应最重要的锂矿类型。

伟晶岩型锂矿全球分布较为广泛, 太古宙—中元古代的克拉通和北美、欧亚显生宙造山带均可成为找矿目标区(许志琴等, 2021)。其中, 非洲锂矿开发进度缓慢, 主要是由于前期勘探和投资严重不足, 随着 Manono 和 Goulamina 等超大型矿床的陆续发现, 非洲大陆成为全球关注的伟晶岩型锂矿找矿潜力区, 尤其基巴拉造山带和马里南部地区, 花岗岩边缘形成了很多锂—铯—钽型的伟晶岩(吴兴源等, 2020), 是未来伟晶岩型锂矿十分重要的找矿潜力区(许康康等, 2019; 任军平等, 2021)。

黏土型、锂沸石型、其他卤水型锂矿现阶段开发利用程度不高(许志琴等, 2021), 目前这些类型的锂矿床主要分布在勘查程度较高的美国西海岸地区和欧洲。黏土型锂矿是目前除盐湖卤水型锂矿和伟晶岩型锂矿外最受关注的锂矿类型, 已勘探资源量也较为可观, 但目前该类型锂矿总体的勘探程度不高, 根据其成因特点, 全球众多的新生代盆地蕴含了巨大的找矿潜力, 而盐湖卤水型锂矿分布区也都可能发现该类型锂矿床(Bradley et al., 2017b; 于泓等, 2019)。由于该类型锂矿锂提纯分离技术相对简单, 回收率高, 生产成本低, 又具有不可估量的找矿潜力, 可能会对全球锂矿原材料供应格局产生颠覆性影响。

锂沸石型锂矿虽然目前全球分布十分局限, 但其具有矿床规模大、分布稳定、开发利用成本低的特点, 富含巨量的硼使得该类型矿床具有巨大的综合开发利用价值, 贾达尔盆地和其附近土耳其的盆地是该类型矿床的重要勘探区, 因此, 该类型矿床的开发及找矿潜力不容忽视(赵元艺等, 2015; 于泓等, 2019)。

其他卤水型锂矿中的油气田卤水亚类和地热卤水亚类均是多种能源物质的载体, 综合利用价值高。随着传统盐湖卤水型锂矿的消耗和工业技术的发展, 其他卤水型锂矿无疑将成为未来全球锂矿

勘探开发的补充方向, 但是目前受制于勘探开采技术, 大规模开发利用在一定时期内尚无法实现(蔡艳龙和李建武, 2017; 于泓等, 2019; 温汉捷等, 2020)。

离子吸附型锂矿与铝土矿相伴产出, 互为找矿标志, 其锂资源潜力区的圈定主要由矿体顶底板的铝土岩或黏土岩以及低品质铝土矿矿石的分布特征决定, 而这些正是铝土矿开采过程中产生的无用尾矿, 由于锂矿矿体并不比铝土矿矿体薄太多的特点, 因而找矿潜力巨大, 对其加以利用不仅能进一步提高铝土矿矿山的价值, 还能为治理铝土矿矿山环境污染及缓解我国锂资源短缺状况作出贡献。因此, 离子吸附型的锂有可能成为中国锂资源开发利用的一个重要发展方向(王登红等, 2013; 温汉捷等, 2020; 范宏鹏等, 2021)。

4 结语

(1) 锂矿的主要类型分为盐湖卤水型、伟晶岩型、黏土型、锂沸石型、其他卤水型(油气田卤水和地热卤水)和离子吸附型 6 大类, 盐湖卤水型和伟晶岩型是最重要的锂矿类型, 南美锂三角地区和西澳分别是盐湖卤水型和伟晶岩型分布最集中的地区。

(2) 锂矿时代分布呈高度集中的特点, 主要形成于新生代, 其次主要分散于前寒武或古生代。新老造山带是锂矿的最佳赋存环境, 如青藏高原造山带、南美安第斯造山带、北美科迪勒拉造山带、基巴拉造山带和各古大陆碰撞汇聚造山带。

(3) 盐湖卤水型和伟晶岩型锂矿是现阶段勘探开发的主要类型, 黏土型和锂沸石型锂矿开发和找矿潜力巨大、其他卤水型(油气田卤水和地热卤水)锂矿是未来勘探开发的补充方向, 离子吸附型锂矿则对中国锂矿开发意义重大。

致谢: 南京地质调查中心陈世忠研究员对文稿进行了认真审阅和修改; 两位审稿专家和编辑提出了宝贵修改意见。在此一并表示真挚的感谢!

注释:

① Bradley D C, Munk L A, Jochens H, et al., 2013. A preliminary deposit model for lithium brines[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 2013-1006.

- ② Bradley D C, McCauley A D, Stillings L L, 2017a. Mineral-deposit model for lithium-cesium-tantalum pegmatites[R]. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-O, 48 p., <https://doi.org/10.3133/sir20105070O>.

References

- Bradley D C, 2011. Secular trends in the geologic record and the supercontinent cycle[J]. *Earth-Science Reviews*, 108: 16–33.
- Bradley D C, Stillings L L, Jaskula B W, et al., 2017b. Lithium[R]. chap. K of Schulz, K. J., DeYoung, J. H., Jr., Seal, R. R., II, and Bradley, D. C., eds., *Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply*: U. S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. K1–K21, <https://doi.org/10.3133/pp1802K>.
- Cai Y L, Li J W, 2017. The Analysis and Enlightenment of Exploitation Situation of Global Lithium Resources[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 38 (1): 25–29 (in Chinese with English abstract).
- Calagari A A, Abedini A, 2017. Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West-Azarbaidjan, Iran[J]. *J Geochem Explor*, 94 (1): 1–18.
- Castor S B, Henry C D, 2020. Lithium-Rich Claystone in the McDermitt Caldera, Nevada, USA: Geologic, Mineralogical, and Geochemical Characteristics and Possible Origin[J]. *Minerals*, 10: 68.
- Chen A D, Zheng M P, 2017. Salt forming periods in the Qaidam Basin and their correlation with Quaternary glaciations and tectonic movements on the Tibetan Plateau[J]. *Science & Technology Review*, 35 (6): 36–41 (in Chinese with English abstract).
- Chen C, Lee C T A, Tang M, et al., 2020. Lithium systematics in global arc magmas and the importance of crustal thickening for lithium enrichment[J]. *Nature Communications*, 11: 5313.
- Chen K Z, 1992. The general characteristics of salt lakes in China [J]. *Quaternary Sciences*, 3: 193–202 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Xue L Z, Wang X L, et al., 2021. Progress in geological study of pegmatite type lithium deposits in the world[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95 (10): 2971–2995 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Dewaele S, Hulsbosch N, Cryns Y, et al., 2016. Geological setting and timing of the world-class Sn, Nb-Ta and Li mineralization of Manono-Kitotolo (Katanga, Democratic Republic of Congo) [J]. *Ore Geology Reviews*, 72: 373–390.
- Emsley, John, 2011. *Nature's building blocks—An A–Z guide to the elements*[M]. Oxford: Oxford University Press, 538.
- Evans R K, 2012. An over abundance of lithium. Lithium Supply & Markets Conference, 4th, Buenos Aires, Argentina, January 23–25, Presentation.
- Fan H P, Ye L, Huang Z L, et al., 2021. The associated lithium resource in bauxite (bauxite-bearing rock) [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 41 (4/5): 382–390 (in Chinese with English abstract).
- 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*, 6: 1172–1186 (in Chinese with English abstract).
- Garrett D E, 2004. *Handbook of lithium and natural calcium chloride*[M]. Boston: Mass. Elsevier, 476.
- Gibert R O, Taberner C, Saez A, et al., 2009. Igneous origin of CO₂ in ancient and recent hot spring waters and travertines from the northern Argentinean Andes[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 79: 554–567.
- Godfrey L V, Herrera C, Gamboa C, et al., 2019. Chemical and isotopic evolution of groundwater through the active Andean arc of Northern Chile[J]. *Chemical Geology*, 518: 32–44.
- Guo H, 2017. World collections of lithium exploration in 2016 [J]. *Geology in China*, 44 (4): 823–824 (in Chinese with English abstract).
- Guo J, Cui R G, Xing J Y, et al., 2017. Analysis and outlook of the global lithium resources supply and demand[J]. *China Mining Magazine*, 26 (11): 27–31 (in Chinese with English abstract).
- He J X, Cun R G, Liu W, et al., 2020. Development of World Lithium Mining Industry and Prospect[J]. *Land and Resources Information*, 10: 21–26 (in Chinese with English abstract).
- Hou L S, Li X G, Jin R S, et al., 2016. China's saline lithium resources and suggestion[J]. *Resources & Industries*, 18 (1): 55–61 (in Chinese with English abstract).
- Houston J, Butcher A, Ehren P, et al., 2011. The evaluation of brine prospects and the requirement for modifications to filing standards[J]. *Economic Geology*, 106: 1225–1239.
- Huang T, Fu X F, Ge L Q, et al., 2020. The genesis of giant lithium pegmatite veins in Jiajika, Sichuan, China: Insights from geophysical, geochemical as well as structural geology approach[J]. *Ore Geology Reviews*, 124: 103557.
- Jordan T E, Nester P L, Blanco N, et al., 2010. Uplift of the Altiplano-Puna plateau: A view from the west[J]. *Tectonics*, 29: TC5007.
- Kasemann S A, Meixner A, Erzinger J, et al., 2004. Boron isotope composition of geothermal fluids and borate minerals from salar deposits (Central Andes, NW Argentina) [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 16: 685–697.
- Kay S M, Coira B, Worner G, et al., 2011. Geochemical, isotopic and single crystal ⁴⁰Ar/³⁹Ar age constraints on the evolution of the Cerro Galan ignimbrites[J]. *Bulletin of Volcanology*, 73: 1487–1511.
- Kendall-Langley L A, Kemp A I S, Grigson J L, et al., 2020. U–Pb and reconnaissance Lu–Hf isotope analysis of cassiterite and columbite group minerals from Archean Li–Cs–Ta type pegmatites of Western Australia[J]. *Lithos*, 352–353: 105231.
- Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, et al., 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other

- deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 48: 55 – 69 .
- Kokonyangi J W, Kampunzu A B, Armstrong R, et al., 2006. The Mesoproterozoic Kibari belt (Katanga, SE D. R. Congo) [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 46: 1 – 35 .
- 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, Wang J P, 2016. China's lithium resource development actuality and approaches[J]. *Resources & Industries*, 18 (1) : 82 – 86 (in Chinese with English abstract).
- Ling K Y, Tang H S, Zhang Z W, et al., 2020. Host minerals of Li–Ga–V–rare earth elements in Carboniferous karstic bauxites in southwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 119: 103325 .
- Ling K Y, Wen H J, Zhang Q Z, et al., 2021. Super-enrichment of lithium and niobium in the upper Permian Heshan Formation in Pingguo, Guangxi, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 51 (6) : 853 – 873 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Yu X C, Yuan X Y, et al., 2021. Characteristics , distribution regularity and formation model of brine-type Li deposits in salt lakes in the world[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95 (7) : 2009 – 2029 (in Chinese with English abstract).
- Liu L J, Wang D H, Liu X F, et al., 2017. The main types , distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine[J]. *Geology in China*, 44 (2) : 263 – 278 (in Chinese with English abstract).
- Liu L J, Wang D H, Gao J Q, et al., 2019. Breakthroughs of lithium exploration progress (2017–2018) and its significance to China's strategic key mineral exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93 (6) : 1479 – 1488 (in Chinese with English abstract).
- Liu S, 2019. Supply and demand of lithium resources in 2018 and future trend[J]. *Geology in China*, 46 (6) : 1580 – 1582 (in Chinese with English abstract).
- Ma Z, Li J W, 2018. Analysis of China's lithium resources supply system: status, issues and suggestions[J]. *China Mining Magazine*, 27 (10) : 1 – 7 (in Chinese with English abstract).
- Maneta V, Baker D R, 2019. The potential of lithium in alkali feldspars, quartz, and muscovite as a geochemical indicator in the exploration for lithium-rich granitic pegmatites: A case study from the spodumene-rich Moblan pegmatite, Quebec, Canada[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 205: 106336 .
- Memoria Y L B, 2018. https://www.ylb.gob.bo/resources/memorias/memoria_ylb_2018.pdf.
- Munk L A, Hynek S A., Bradley D C, et al., 2016. Lithium Brines: A Global Perspective[J]. *Reviews in Economic Geology*, 18: 339 – 365 .
- Nie Z, Bu L Z, Zheng M P, 2010. Lithium Resources Industrialization of Salt Lakes in China: a Case Study of the Xitaijinaier Salt Lake and the Zabuye Salt Lake[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31 (1) : 95 – 101 (in Chinese with English abstract).
- Orti F, Alonso R N, 2000. Gypsum–hydroboracite association in the Sijes Formation (Miocene, NW Argentina) : Implications for the genesis of Mg-bearing borates[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 70: 664 – 681 .
- 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).
- Ren J P, Hu P, Wang J, et al., 2021. Mining development status of Africa[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95 (4) : 945 – 961 (in Chinese with English abstract).
- Rettig S L, Jones B F, Risacher F, 1980. Geochemical evolution of brines in the Salar de Uyuni, Bolivia[J]. *Chemical Geology*, 30: 57 – 79 .
- Risacher F, Fritz B, 1991. Quaternary geochemical evolution of the salars of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia[J]. *Chemical Geology*, 90: 211 – 231 .
- Risacher F, Alonso H, Salazar C, 2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review[J]. *Earth Science Reviews*, 63: 249 – 293 .
- Risacher F, Fritz B, 2009. Origin of Salts and Brine Evolution of Bolivian and Chilean Salars[J]. *Aquatic Geochemistry*, 15: 123 – 157 .
- Rosen M R, Stillings L L, Kane T, et al., 2020. Li and Ca Enrichment in the Bristol Dry Lake Brine Compared to Brines from Cadiz and Danby Dry Lakes, Barstow–Bristol Trough, California, USA[J]. *Minerals*, 10: 284 .
- Shu L S, Wang D Z, 2006. A Comparison Study of Basin and Range Tectonics in the Western North America and Southeastern China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12 (1) : 1 – 13 (in Chinese with English abstract).
- Stanley C J, Jones G C, Rumsey M S, et al., 2007. Jadarite , $\text{LiNaSi}_2\text{B}_3\text{O}_{10}(\text{OH})$, a new mineral species from the Jadar basin, Serbia[J]. *European Journal of Mineralogy*, 19: 575 – 580 .
- Stillings L L, Morissette C L, 2012. Lithium clays in sediments from closed-basin, evaporative lakes in the Southwestern United States[J]. *Abstracts with Programs Geological Society of America*, 44 (7) : 210 .
- Wang C, 2018. Distribution and potential analysis of global lithium resources[J]. *Western Resources*, 1: 7 – 8 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Li P G, Qu W J, et al., 2013. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 56: 145 – 152 .
- Wang D H, Wang R J, Li J K, et al., 2013. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources[J]. *Geology in China*, 40 (2) : 361 – 370 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Liu L J, Dai H Z, et al., 2017. Discussion on particularity and prospecting direction of large and super Large spodumene deposits[J]. *Earth Science*, 42 (12) : 2243 – 2257 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q S, Yuan C H, Xu H, 2015. Analysis of the global lithium resource distribution and potential[J]. *China Mining Magazine*, 24 (2) : 10 – 17 (in Chinese with English abstract).

- Wang Q S, Yuan C H, 2019. The global supply situation of lithium ore and suggestions on resources security in China[J]. *China Mining Magazine*, 28 (5) : 1 – 6 (in Chinese with English abstract).
- Wang T, Tong Y, Jahn B, et al., 2007. SHRIMP U–Pb zircon geochronology of the Altai No. 3 pegmatite, NW China, and its implications for the origin and tectonic setting of the pegmatite[J]. *Ore Geology Reviews*, 32: 325 – 336.
- Wen H J, Luo C G, Du S J, et al., 2020. Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance[J]. *Chin Sci Bull*, 65: 53 – 59 (in Chinese with English abstract).
- Wu X S, Huang W B, Du X H, et al., 2014. Metallogenic types and models of lithium deposits in the world[J]. *Mineral Deposits*, 33 (S1) : 1197 – 1198 (in Chinese with English abstract).
- Wu X Y, Liu X Y, Zhou Z M, et al., 2020. Overview or geological, geochemical features and genesis of the granitic pegmatites in Gatumba area, Rwanda[J]. *Geological Survey And Research*, 43 (1) : 42 – 54 (in Chinese with English abstract).
- Wu X M, Zhou M J, Luo X C, et al., 2016. The metallogenic conditions and prospecting potential of lithium and rare metals in northwestern Jiangxi[J]. *East China Geology*, 37 (4) : 275 – 283 (in Chinese with English abstract).
- Xing J Y, Peng H, Zhang Y F, et al., 2015. Global lithium demand and supply[J]. *Resources Science*, 37 (5) : 988 – 997 (in Chinese with English abstract).
- Xu K K, Liu X Y, He S F, et al., 2019. Geological and tectonic evolution characteristics of the Kibara Belt in central Africa[J]. *Geological Review*, 65 (4) : 993 – 1006 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Wang R C, Zhao Z B, et al., 2018. On the structural backgrounds of the large scale “Hard-rock type” lithium ore belts in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92 (6) : 1091 – 1106 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Wang R C, Zhu W B, et al., 2020. Scientific drilling project of granite pegmatite type lithium deposit in western Sichuan: Scientific problems and significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (8) : 2177 – 2189 (in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Zhu W B, Zheng B H, et al., 2021. New energy strategy for lithium resource and the continental dynamics research—celebrating the centenary of the School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95 (10) : 2937 – 2954 (in Chinese with English abstract).
- Yang H P, Liu L, Ding G F, 2019. Present situation and development trend of lithium resources in the world[J]. *Conservation and utilization of mineral resources*, 39 (5) : 26 – 40 (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).
- Yao S Q, Pang C J, Wen S N, et al., 2021. Li-rich Claystone in the Upper Permian Heshan Formation in Western Guangxi and its Prospecting Significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45 (5) : 951 – 962 (in Chinese with English abstract).
- Yu F, Wang D H, Yu Y, et al., 2019. The Distribution and Exploration Status of Domestic and Foreign Sedimentary type Lithium Deposits[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 38 (3) : 354 – 364 (in Chinese with English abstract).
- Yuan J Q, Huo C Y, Cai K Q, 1983. The high mountain-deep basin saline environment—a new genetic model of salt deposits[J]. *Geological Review*, 29 (2) : 159 – 165 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G W, Dong Y P, Yao A P, 2002. Some thoughts on the study of continental dynamics and orogenic belts[J]. *Geology in China*, 29 (1) : 7 – 13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Lü Z H, Tang Y, 2021. A review of LCT pegmatite and its lithium ore genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95 (10) : 2955 – 2970 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J C, Yan Y X, Wang J X, et al., 2019. Geological Background and Important Metallogenic Divisions of Mineral Resources in Western Africa[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 35 (1) : 76 – 89 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S J, Zhang Y W, Zhang L W, et al., 2020. Present situation and sustainable development strategy of China’s lithium resources[J]. *Inorganic Chemicals industry*, 52 (7) : 1 – 7 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y Y, Fu J J, Li Y, 2015. Super Large Lithium and Boron Deposit in Jadard Basin, Serbia[J]. *Geological Review*, 61 (1) : 34 – 44 (in Chinese with English abstract).
- Zheng M P, 2001. On Saline Lakes of China [J]. *Mineral Deposits*, 20 (2) : 181 – 189 (in Chinese with English abstract).
- Zheng M P, Zhang X F, Hou X H, et al., 2013. Geological Environments of the Late Cenozoic Lakes and Salt-forming and Oil-gas Pool-forming Actions in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34 (2) : 129 – 138 (in Chinese with English abstract).
- Zhong H R, Sun Y, Yang Y Q, et al., 2019. Bauxite (aluminum) – type lithium resources and analysis of its development and utilization potential[J]. *Mineral Deposits*, 38 (4) : 898 – 916 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡艳龙, 李建武, 2017. 全球锂资源开发利用形势分析及启示[J]. *地球学报*, 38 (1) : 25 – 29.
- 陈安东, 郑绵平, 2017. 柴达木盆地成盐期与青藏高原第四纪冰期及构造运动阶段的相关性[J]. *科技导报*, 35 (6) : 36 – 41.
- 陈克造, 1992. 中国盐湖的基本特征[J]. *第四纪研究*, 3: 193 – 202.
- 陈衍景, 薛莅治, 王孝磊, 等, 2021. 世界伟晶岩型锂矿床地质研究进展[J]. *地质学报*, 95 (10) : 2971 – 2995.
- 代晶晶, 王登红, 代鸿章, 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.

- 范宏鹏, 叶霖, 黄智龙, 2021. 铝土矿(岩)中伴生的锂资源[J]. 矿物学报, 41(4/5): 382–390.
- 付小方, 袁茵平, 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, 6: 1172–1186.
- 郭慧, 2017. 2016年度世界锂矿勘探开发集锦[J]. 中国地质, 44(4): 823–824.
- 郭娟, 崔荣国, 邢佳韵, 等, 2017. 全球锂供需分析及展望[J]. 中国矿业, 26(11): 27–31.
- 何金祥, 崔荣国, 刘伟, 等, 2020. 世界锂矿业发展与展望[J]. 国土资源情报, 10: 21–26.
- 后立胜, 李效广, 金若时, 等, 2016. 中国盐湖卤水锂资源禀赋分析与策略建议[J]. 资源与产业, 18(1): 55–61.
- 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.
- 李康, 王建平, 2016. 中国锂资源开发利用现状及对策建议[J]. 资源与产业, 18(1): 82–86.
- 凌坤跃, 温汉捷, 张起钻, 等, 2021. 广西平果上二叠统合山组关键金属锂和铌的超常富集与成因[J]. 中国科学: 地球科学, 51(6): 853–873.
- 刘成林, 余小灿, 袁学银, 等, 2021. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型[J]. 地质学报, 95(7): 2009–2029.
- 刘丽君, 王登红, 刘喜方, 等, 2017. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质, 44(2): 263–278.
- 刘丽君, 王登红, 高娟琴, 等, 2019. 国外锂矿找矿的新突破(2017~2018年)及对我国关键矿产勘查的启示[J]. 地质学报, 93(6): 1479–1488.
- 刘帅, 2019. 2018年锂资源供需及未来趋势[J]. 中国地质, 46(6): 1580–1582.
- 马哲, 李建武, 2018. 中国锂资源供应体系研究: 现状、问题与建议[J]. 中国矿业, 27(10): 1–7.
- 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.
- 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.
- 任军平, 胡鹏, 王杰, 等, 2021. 非洲矿业发展概况[J]. 地质学报, 95(4): 945–961.
- 舒良树, 王德滋, 2006. 北美西部与中国东南部盆岭构造对比研究[J]. 高校地质学报, 12(1): 1–13.
- 王晨, 2018. 试论全球锂矿资源分布与潜力分析[J]. 西部资源, 1: 7–8.
- 王登红, 王瑞江, 李健康, 等, 2013. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J]. 中国地质, 40(2): 361–370.
- 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[J]. 地球科学, 42(12): 2243–2257.
- 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.
- 王秋舒, 元春华, 2019. 全球锂矿供应形势及我国资源安全保障建议[J]. 中国矿业, 28(5): 1–6.
- 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 等, 2020. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义[J]. 科学通报, 65: 53–59.
- 吴西顺, 黄文斌, 杜晓慧, 等, 2014. 世界锂矿床成矿类型及模式研究[J]. 矿床地质, 33(S1): 1197–1198.
- 吴兴源, 刘晓阳, 周佐民, 等, 2020. 卢旺达 Gatumba 地区花岗岩伟晶岩的地质、地球化学特征及其成因研究综述[J]. 地质调查与研究, 43(1): 42–54.
- 吴学敏, 周敏娟, 罗喜成, 等, 2016. 江西西北部锂及稀有金属成矿条件及找矿潜力分析[J]. 华东地质, 37(4): 275–283.
- 邢佳韵, 彭浩, 张艳飞, 等, 2015. 世界锂资源供需形势展望[J]. 资源科学, 37(5): 988–997.
- 许康康, 刘晓阳, 何胜飞, 等, 2019. 非洲中部基巴拉带的地质及构造演化特征[J]. 地质论评, 65(4): 993–1006.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 等, 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景[J]. 地质学报, 92(6): 1091–1106.
- 许志琴, 王汝成, 朱文斌, 等, 2020. 川西花岗-伟晶岩型锂矿科学钻探: 科学问题和科学意义[J]. 地质学报, 94(8): 2177–2189.
- 许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 等, 2021. 新能源锂矿战略与大陆动力学研究——纪念南京大学地球科学与工程学院100周年华诞[J]. 地质学报, 95(10): 2937–2954.
- 杨卉芃, 柳林, 丁国峰, 2019. 全球锂矿资源现状及发展趋势[J]. 矿产保护与利用, 39(5): 26–40.
- 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.
- 姚双秋, 庞崇进, 温淑女, 等, 2021. 桂西上二叠统合山组富锂黏土岩的发现及意义[J]. 大地构造与成矿学, 45(5): 951–962.
- 于枫, 王登红, 于扬, 等, 2019. 国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状[J]. 岩矿测试, 38(3): 354–364.
- 袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤, 1983. 高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式的剖析[J]. 地质论评, 29(2): 159–165.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平, 2002. 关于中国大陆动力学与造山带研究的几点思考[J]. 中国地质, 29(1): 7–13.
- 张辉, 吕正航, 唐勇, 2021. LCT型伟晶岩及其锂矿床成因概述[J]. 地质学报, 95(10): 2955–2970.
- 张继纯, 严永祥, 王建雄, 等, 2019. 西非矿产资源的地质背景及重要成矿分区[J]. 华南地质与矿产, 35(1): 76–89.
- 张苏江, 张彦文, 张立伟, 等, 2020. 中国锂矿资源现状及其可持续发展策略[J]. 无机盐工业, 52(7): 1–7.
- 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, 2001. 论中国盐湖[J]. 矿床地质, 20(2): 181–189.
- 郑绵平, 张雪飞, 侯献华, 等, 2013. 青藏高原晚新生代湖泊地质环境与成盐成藏作用[J]. 地球学报, 34(2): 129–138.
- 钟海仁, 孙艳, 杨岳清, 等, 2019. 铝土矿(岩)型锂资源及其开发利用潜力[J]. 矿床地质, 38(4): 898–916.