

“一带一路”地区能源金属矿床分布规律及开发工艺

乔东海¹, 赵元艺², 汪 傲¹, 常玉虎¹, 黄道袤²

QIAO Donghai¹, ZHAO Yuanyi², WANG Ao¹, CHANG Yuhu¹, HUANG Daomao²

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, 北京100037

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:对“一带一路”地区的能源金属锂和铀的矿床分布规律进行统计,并对典型矿床的地质特征与开发工艺进行概述,为了解“一带一路”地区的锂矿和铀矿提供基础信息,同时为中国进行“能源金属”的开采提供科学依据。研究认为,“一带一路”地区共有大型及以上锂矿36个,成因类型有硬岩型、盐湖型、沉积型和煤伴生型4种,资源储量分别为 $784\times 10^4\text{t}$ 、 $1702\times 10^4\text{t}$ 、 $237.5\times 10^4\text{t}$ 和 $623\times 10^4\text{t}$ 。盐湖型锂矿分布于中国和阿富汗,硬岩型锂矿分布在俄罗斯等国家,沉积型锂矿分布在塞尔维亚等国家,煤伴生型锂矿只分布于中国。鉴于盐湖型锂矿开发的环境影响较小,建议有关国家加大对盐湖型锂资源的勘探与开发。“一带一路”地区共有大型及以上铀矿130个,成因类型主要为砂岩型和火山岩型,主要集中在哈萨克斯坦等国家,铀资源储量(可靠回收成本 $\leq 130\$/\text{kg}$)达 $181.94\times 10^4\text{t}$,占“一带一路”地区总资源储量的92.12%,建议中国与相关国家进行交流与合作,加大对中国境内北方地区砂岩型铀矿的寻找力度,同时进行火山岩型铀矿的勘探开发。

关键词:一带一路;锂矿;铀矿;能源金属

中图分类号:P618.71;P619.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)01-0066-14

Qiao D H, Zhao Y Y, Wang A, Chang Y H, Huang D M. A study of the distribution regularity and development process of the energy metal deposits in "One Belt, One Road" region. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(1):66-79

Abstract: To fully understand the basic information of lithium deposits and uranium deposits, the authors performed statistical analysis for “energy metals” of lithium deposit and uranium deposit distribution in “One Belt, One Road” region and summarized geological characteristics and development process of the typical deposits on the basis of referring to a large number of relevant data. At the same time, this paper can provide some scientific basis for the exploitation of “energy metals” in China. Researches show that the “One Belt, One Road” region has 36 large and superlarge lithium deposits, which genetically include hard rock type, saline lake type, sedimentary type and coal associated type, with resource reserves being 7.84, 17.02, 2.375 and 6.23 million tons, respectively. Salt lake lithium deposits are distributed in China and Afghanistan, hard rock type lithium deposits are distributed in Russia and some other countries, sedimentary type lithium deposits are distributed in Serbia and some other countries, and coal associated lithium deposits are only distributed in China. In view of the fact that development of saline lake type lithium deposits will have low impact on the environment, the authors hold that the relevant countries should increase the exploration and development of saline lake lithium resources. The “One Belt, One Road” region has 130 large and superlarge uranium deposits mainly concentrated in Kazakhstan and some other countries, their genetic types are mainly of sandstone type and volcanic rock type, and their uranium resource reserves (reliable recovery cost $\leq 130\$/\text{kg}$) are 1.8194 million tons, accounting for 92.12% of the total resource reserves of the “One Belt, One

收稿日期:2016-04-06;修订日期:2016-05-16

资助项目:中国地质调查局项目《中蒙边境大型-特大型铜、金、铀和稀有金属矿集区对比研究》(编号:12120115066201)、《“一带一路”资源潜力综合分析与成果应用》(编号:12120115065901)和中国地质调查局项目(编号:121201103000150006)

作者简介:乔东海(1992-),男,在读硕士生,从事矿物学、岩石学、矿床学研究。E-mail:15001319313@163.com

通讯作者:赵元艺(1966-),男,博士,研究员,从事矿床学、地球化学研究。E-mail:yuanyizhao2@sina.com

Road” region. It is suggested that China should expand exchange and cooperation with the relevant countries and increase the exploration of sandstone type uranium deposits in northern China. At the same time, the exploration and development of volcanic rock type uranium deposits should also be carried out.

Key words: “One Belt, One Road”; lithium deposits; uranium deposit; energy metal

“能源金属”矿床是指一种能够作为能源来利用的金属矿床,而锂矿和铀矿正是目前能够作为“能源金属”利用的2种金属矿床。锂是最轻的金属,有独特的物理和化学性能。当前,锂主要应用于锂电池领域,由于锂在新能源领域的大量使用,被誉为21世纪的“能源金属”^[1-2]。虽然世界锂资源的潜在储量巨大,但尚有超过60%的锂矿资源有待勘探开发,迫切需要加大勘探开发力度^[3]。铀是国家战略资源和重要的能源资源,是核军工和核电的重要原料。2012年,全世界有超过437个核电站在运行,每年消耗61980t金属铀,其中有21个国家每年能提供58816t金属铀,大约可以满足全部需求量的95%,剩余的由二次铀供应。专家预测,2035年前,全世界核发电能力可达 $4000\times 10^8\sim 6800\times 10^8\text{W}$,铀资源消耗量将达72000~122000t^[4-5]。因此,加大铀资源的勘探和开发是世界各国的当务之急。

“一带一路”地区包括俄罗斯、蒙古、中国、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、乌克兰、塞尔维亚、罗马尼亚、印度、约旦等65个国家。前人^[1-38]对相关国家的锂矿和铀矿做过一定的研究,但并未从“一带一路”战略计划角度出发进行系统研究。鉴于此,笔者通过搜集大量资料,对“一带一路”地区的能源金属矿床及其开发工艺进行详细的分析研究,提出了意见和建议,对推动中国“一带一路”计划提供能源方面的参考意见具有重要的意义。

1 区域地质构造概况

“一带一路”地区地质构造非常复杂,区域整体上由多个陆块拼合而成,包括劳亚古陆的绝大部分,以及冈瓦纳古陆分解出来的某些陆块。现今,“一带一路”地区主要由6个大型陆块和5条巨型造山带及其间的小陆块拼合而成,5条造山带分别是北极造山带、乌拉尔-蒙古造山带、昆仑-秦岭-祁连造山带、特提斯-喜马拉雅造山带和环太平洋造山带。“一带一路”地区横跨古亚洲、特提斯和环太平洋3个大型成矿域,成矿域上分布着数量和储量巨大的铀、锂矿床,如古亚洲成矿域上分布的俄罗斯斯特列佐夫斯卡铀矿、蒙古多尔诺德铀矿及中国

新疆可可托海锂铍铋钽矿;特提斯成矿域上分布的阿富汗塔哈尔卢尔(Taghawlor)、贾马纳克(Jamanak)和帕斯古什塔(Pasghusta)锂矿及土库曼斯坦舍尔诺伊铀矿;环太平洋成矿域上分布的中国相山铀矿、下庄铀矿等。特提斯成矿域是晚古生代—新生代期间,古、新特提斯洋在扩张和闭合过程中板块发生大规模俯冲、碰撞而成,复杂的构造演化导致该带成矿具有多金属、多类型的特征;古亚洲成矿域矿产资源丰富,稀有金属矿产在成矿域上大量产出,如在新疆阿尔泰、天山等地区的褶皱造山带中,与花岗岩类岩石有关的锂、钨、锡、铍和宝石矿床分布广泛。总体上,在漫长的地质历史时期,“一带一路”地区经历了复杂的地质构造演化,陆块的多次裂解、汇聚、增生和拼合为成矿元素的富集创造了有利条件,形成了许多储量可观的油气田、金属和非金属矿床^[39-42]。

2 “一带一路”地区锂资源和典型矿床地质特征

2.1 锂资源及其主要类型

截至目前,世界锂资源的主要来源有:封闭盆地卤水(58%)、花岗伟晶岩矿床(26%)、富锂的黏土(7%)、油田卤水(3%)、地热卤水(3%)、富锂沸石(3%)。其中封闭盆地卤水是锂资源最重要的来源。“一带一路”地区产出4种类型锂矿,当前能够用来提锂的矿床主要有盐湖型、硬岩型和沉积岩型3种类型^[43-44]。“一带一路”地区65国中,上述3种类型锂矿均有发现,除图表中列出的锂矿外,“一带一路”地区其他国家也有锂矿发现,如蒙古发现锂矿4处,储量大小尚无资料统计;乌克兰的锂矿主要富集在伟晶岩中,在滨亚速海地区和基洛沃格勒州地区产出伟晶岩型锂矿, Li_2O 的含量可达5.07%;哈萨克斯坦目前没有生产锂原料,但在稀有金属矿Belogorsk mining和metallurgical complex中伴生有锂的产出^[6-7,11-13]。在全球探明的锂资源中,盐湖型锂矿占全球锂资源的66%、硬岩型占26%、沉积岩型占8%^[43];盐湖型和硬岩型锂矿在世界范围内分布广泛,而沉积岩型锂矿分布范围有限,此类型矿床主

要分布在塞尔维亚贾达尔盆地和墨西哥中南部高原山谷中^①。河北工程大学孙玉壮团队经过多年不懈努力,通过对1000多块样品进行研究,证明山西宁武煤田和准格尔煤田煤中锂的含量具有经济价值,且已达工业开采品位,可以综合开发利用。对于准格尔6号主采煤层而言,已形成1个5157000t Li_2O 的超大型伴生锂矿,平朔宁武煤田4、9和11采煤层锂的资源储量分别达到100000t、558400t和382600t,为超大型煤伴生锂矿^[14-19]。

本次在“一带一路”地区65个国家中共搜集到36个大型及以上锂矿床,其中盐湖型锂矿10个、硬岩型22个、沉积岩型2个、煤伴生锂矿2个^②(图1;表1)。据USGS(美国地质调查局)^[5]统计,全球锂资源量为 $4070\times 10^4\text{t}$,目前可采储量 $1300\times 10^4\text{t}$;“一带一路”地区统计到盐湖型锂资源储量 $1702\times 10^4\text{t}$,硬岩型、沉积岩型和煤伴生锂资源储量分别为 $784\times 10^4\text{t}$ 、 $237.5\times 10^4\text{t}$ 和 $623\times 10^4\text{t}$ 。盐湖型锂矿分布在中国和阿富汗,主要有碳酸盐型、硫酸盐型和氯化物型3种;硬岩型锂矿分布在中国、俄罗斯和阿富汗,主要有花岗岩型和伟晶岩型2种;沉积岩型锂矿分布在塞尔维亚和乌兹别克斯坦;新型矿种煤伴生锂矿只分布在中国。中国的硬岩型锂矿主要集中在四川、新疆、江西等地,盐湖型锂矿集中在青藏高原地区;俄罗斯在Kola Peninsula和Sayanakh Region地区拥有储量巨大的锂资源。阿富汗加兹尼省的盐湖型锂资源几乎和玻利维亚的锂资源相当。此外,伟晶岩型锂矿在东巴达赫尚、西巴达赫尚、努里斯坦-南帕米尔和赫尔曼德4条成矿带上广泛分布;乌兹别克斯坦的锂矿主要集中在塔什干地区,沙瓦兹赛矿床资源储量达 $12\times 10^4\text{t}$,是该国目前开采的最大锂矿床^{①[8,11-13,24-25,49]}。

2.2 典型锂矿床

“一带一路”地区搜集到大型及以上锂矿床36个^②。由于篇幅所限,本文选出10个具有代表性的锂矿列于表1中。

2.2.1 阿富汗塔哈卢尔(Tagawlor)锂矿床

塔哈卢尔锂矿床位于阿富汗中部地区乌鲁兹甘省,北东方向距首都喀布尔约250km(图1;表1编号29)。矿床整体在长20km、宽1~1.5km范围内呈线性延长分布,伟晶岩脉达300余条,推测的氧化锂资源储量约 $146.4\times 10^4\text{t}$,品位为0.08%~2.8%。巨量分布的锂辉石伟晶岩脉及大范围分布的花岗岩和

伟晶岩,预示塔哈卢尔伟晶岩矿区拥有丰富的稀有金属资源。

大地构造位置上,该矿床位于阿富汗中部赫尔曼德-阿尔甘德地块阿尔卑斯期褶皱带赫尔曼德成矿带上,与大的黑云母花岗闪长岩和赫尔曼德省多元的花岗岩在时空上有紧密的联系。伟晶岩脉在时空上呈特定的展布模式,分布在渐新世花岗岩外接触带1~1.5km宽的石英-长石-黑云母角页岩带内,矿体不与外带的片岩直接接触;除锂辉石伟晶岩矿脉外,微斜长石、黑电气石-白云母伟晶岩矿脉在内外接触带广泛分布。锂辉石伟晶岩矿脉夹在南部渐新世花岗岩和北部新元古代变质碎屑岩及火山岩之间,在东西方向被锂辉石-钠长石穿透。矿区内角页岩化蚀变带宽达5~7km,伴生丰富的Sn、W、稀有金属元素。锂矿化赋存在狭长的深大断裂带内的角页岩和片岩中,呈条纹状、条带状或微条带状交替产出,构成陡倾斜扁平板状矿体。大量的伟晶岩矿体展布在东西向、南东走向的塔哈卢尔伟晶岩矿区内,许多未命名的矿化区内也含有大量的锂,同时伴生Sn、Be、Zn、W等元素。矿石中金属矿物有锂辉石、绿柱石和腐锂辉石;脉石矿物有微斜长石、石英、钠长石和白云母。矿区内主要的岩石类型为古元古代石英-绢云母碳酸盐、绿泥石-绢云母-石英片岩、大理岩、角闪岩、石英岩和片麻状花岗岩,这些岩石与新元古代绿片岩、大理岩、白云岩和变质火山岩呈断层接触;古生代石灰岩、砂岩、粉砂岩分布在矿区南部的中元古代岩石断裂带内,以及矿区东南部少量出露的中元古代岩石顶部。狭长的接触变质带内的热力学条件非常适合矿体的形成,据此可以初步判断锂辉石伟晶岩熔融体初始结晶时的温压条件;角页岩接触带内的矿物组合整体上与角闪石-角页岩变质相下形成的矿物组合一致,据此可推测锂辉石伟晶岩结晶的温压条件是几百帕到3000Pa、500~600℃。矿体内细密颗粒状的锂辉石-钠长石、锂辉石-锂磷铝石-钠长石的聚集现象和锂辉石被细粒聚集的丝绢白云母交代现象常见,加上成矿早期出现的锂辉石和石英假象及在锂辉石后形成的透锂辉石现象,这些现象共同表明,塔哈卢尔锂矿的成矿模式是锂再沉积模式^{①[24-25,49]}。

2.2.2 中国西藏扎布耶湖锂矿床

扎布耶盐湖隶属于日喀则地区仲巴县,距拉萨

1050km,是世界上罕见的锂硼钾铯综合型盐湖矿床^[1,46,52](图1;表1编号5)。扎布耶湖面海拔为4422m,湖区年蒸发量是降水量的20倍,年均气温0℃以上,年均日温差12℃,年日照数3100h。扎布耶盐湖锂矿可分为固体锂矿和液体锂矿2种,固体矿资源储量为 $100\times 10^4\text{t}$,液体矿资源储量为 $83\times 10^4\text{t}$,合计 $183\times 10^4\text{t}$ ^[45]。盐湖中赋存于不同部位的锂品位不同, $\text{Li}^+(\text{g/L})$ 品位在南湖地表卤水为0.42~0.71、南湖晶间卤水为0.92~1.61、北湖地表卤水为0.89~1.32^[1,45-46]。近几年,扎布耶碳酸锂年产量维持在5000t左右,是中国目前开采的最大盐湖型锂矿^{①[46]}。

大地构造位置上,扎布耶位于喜马拉雅碰撞造山带冈底斯山脉北侧的山间盆地中,是印度板块和欧亚板块碰撞后,在碰撞弧后盆地中形成的盐湖,是内外地质作用综合作用的结果^[53]。盐湖整体呈南北向条带状分布,是一个干盐滩与表面卤水共存的半干盐湖;具体可分为南、北2个湖,北湖为常年积水的卤水湖,面积约98km²,水深0.3~2m;南湖面积133~145km²,为一半干盐湖^[1,45-46,52-53]。矿区内主要出露石炭系、二叠系、白垩系、古近系和新近系,岩性主要为碎屑岩、碳酸盐岩、火山沉积岩、火山碎屑岩等,最上部覆盖第四纪残坡积物、河流沉积物、湖泊沉积物、泉华等^[53]。盐湖含锂矿石有扎布耶石、含锂白云石,同时产出石盐、钾石盐、硼砂、水碱、芒硝等,伴生B、K、Br、Rb、Cs等有益元素。

2.2.3 塞尔维亚贾达尔锂硼矿床

贾达尔锂硼矿床是在塞尔维亚贾达尔盆地中发现的一个超大型锂硼矿床,北东距离首都贝尔格莱德约100km。截至目前,推断的矿石资源量为 $1.146\times 10^8\text{t}$,其中 Li_2O 为 $206\times 10^4\text{t}$,平均品位为1.8%, B_2O_3 为 $1401\times 10^4\text{t}$,平均品位为13.1%^[50](图1;表1编号36)。目前该矿床正处于勘察评价阶段,未进行工业化生产。

大地构造位置上,该矿床地处瓦尔达尔构造带(Vardar Tectonic Zone)西北部的贾达尔盆地,位于迪纳拉造山带(Dinarides Orogen)与潘诺尼亚盆地(Paaimmiai Basin)之间。瓦尔达尔构造带与成矿作用密切相关,很多产在俯冲板块边界伸展环境下的硼酸盐矿床都分布在此条带上。受构造运动的影响,一系列地垒、倾斜岩体和半地堑组合形成,在此

之间形成山内地堑山谷,并在山谷中形成了大量典型的晚中新世北北西—南南东走向的凹陷盆地,贾达尔盆地便是其中之一。贾达尔盆地由盖层和基底2部分组成,盖层有新近系中新统海相和湖相沉积岩(物),沉积岩(物)沉积在三叠系和白垩系岩层之上,最上覆盖有贾达尔河的第四纪冲积物;基底主要由变质岩、石灰岩和花岗岩组成^{①[50]}。盆地中沉积岩主要有页岩、粉砂岩、细粒砂岩、粗粒砂岩、油页岩、白云岩、凝灰岩、蒸发岩等,其中油页岩、白云岩和蒸发岩为湖相沉积岩,凝灰岩则来自火山灰沉积。矿床的容矿围岩为湖相沉积的页岩、粉砂岩、细粒砂岩和粗砂岩,矿石矿物是世界上最新发现的、独有的、既含锂也含硼的羟硼硅钠锂石 $[\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})]$,单斜晶系,硬度4~5,其中含 B_2O_3 47.2%、含 Li_2O 7.3%,密度 2.46g/cm^3 ,其含量在上、中、下部矿层中分别为10%~20%、5%~10%和30%~50%。矿体整体呈板状产出,近水平展布,脉石矿物有黄铁矿、钛铁矿、细粒白云母、方解石、钾长石、白云石和金红石^[50,54]。盆地内未见花岗岩类等岩体,成矿物质可能主要来源于附近河流和湖泊中各个时代的富锂沉积物。

2.3 锂资源开发工艺

当前,“一带一路”地区锂产品主要来源于含锂矿石提锂,但从长远看,由于从卤水中生产碳酸锂和氯化锂的工艺和成本相对简单、低廉,卤水锂资源将是锂化合物和金属锂的主要原料来源^[53]。起初,锂矿石是提取锂产品的唯一来源,主要分为选矿、提取和加工3步;选矿完成后,主要用酸法(硫酸法、氯化焙烧法等)、碱法(石灰法等)等工艺来提取锂产品。锂矿石提锂技术已经发展的相当成熟,由于其他开发工艺复杂或开发成本高等原因,目前锂资源开发主要用硫酸法提锂,具体步骤是,将 β 型锂辉石与硫酸混合后,在一定工业温度下进行焙烧,粉碎后用洗液浸出硫酸锂,然后将洗出的溶液蒸发浓缩并加入饱和碳酸钠溶液沉淀出碳酸锂,最后经过分离、干燥等得到碳酸锂产品^[55]。

盐湖卤水提锂具有成本低、工艺手法简单、产品质量好、对环境污染较小等优势,越来越受到相关国家及企业的重视。目前,卤水提锂工艺主要有沉淀法、盐析法、碳化法、煅烧浸取法、溶剂萃取法和离子交换吸附法,应用于工业生产的技术工艺为

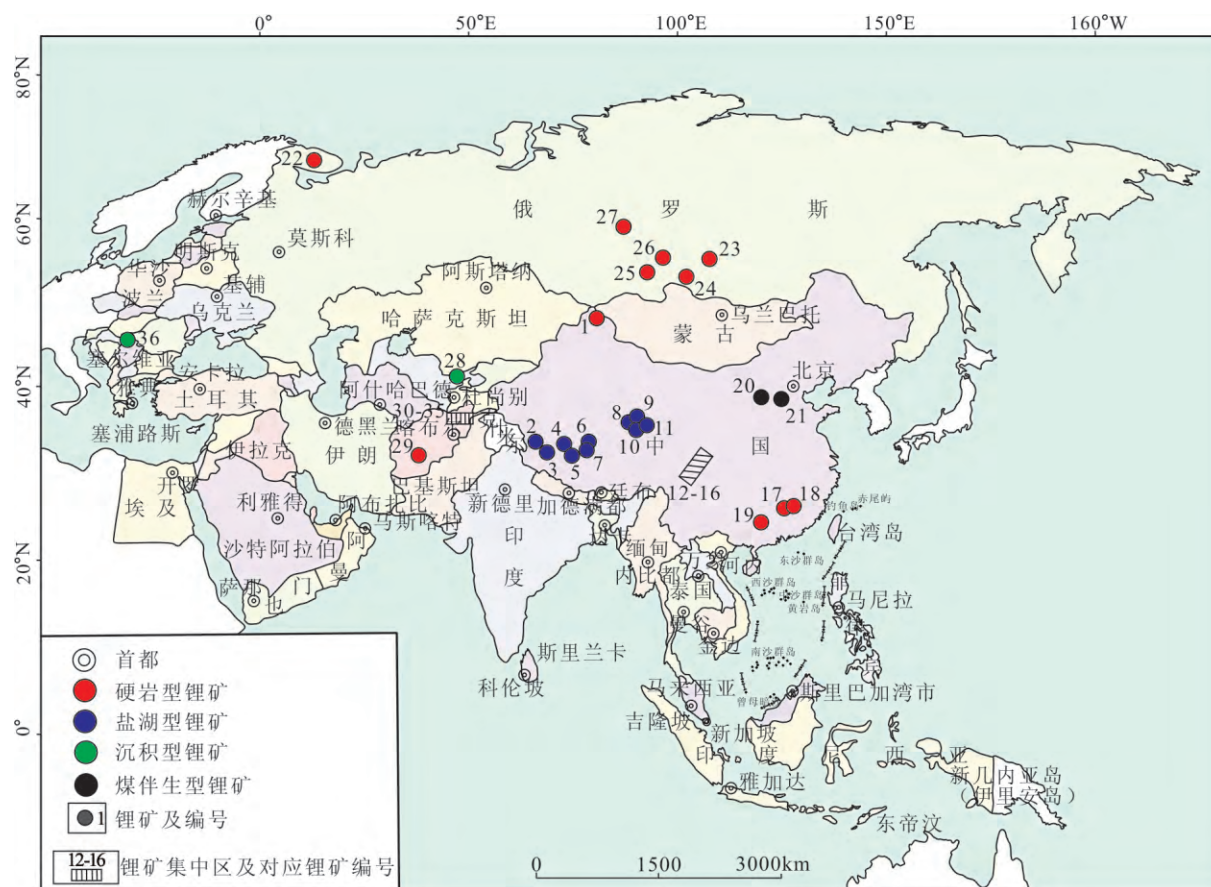


图1 “一带一路”地区大型及以上锂矿分布简图

Fig. 1 Distribution of large and superlarge lithium deposits in “One Belt, One Road” region

沉淀法、锻烧浸取法和碳化法。沉淀法是将含锂卤水蒸发浓缩、酸化脱硼,分离剩余硼、钙、镁离子,加入碳酸钠使锂以碳酸锂形式沉淀析出,干燥后制得碳酸锂产品^[45,56-57],这是当前世界上开发盐湖型锂矿的主要工艺手段。扎布耶盐湖为碳酸盐型盐湖,可以从卤水中直接沉淀碳酸锂,是世界上罕见的低镁锂比盐湖。虽然可以直接沉淀碳酸锂,但碳酸盐型盐湖中的锂易在蒸发的各个阶段分散析出,不易富集,同时碳酸锂的品位低且不稳定。世界上现有生产锂的工厂都采用日晒蒸发分步结晶除盐,浓缩卤水精制后用碱沉淀法生产碳酸锂。扎布耶盐湖目前采用“冷冻除碱-蒸发浓缩-梯度太阳池升温析锂”工艺进行锂产品开采,并采用多重积热法对卤水加热,该工艺简单易行、成本低、产品质量好,收到了很好的效果,已进行工业化生产^[45,58]。

3 “一带一路”地区铀资源和典型矿床地质特征

3.1 铀资源分布及其主要类型

截至2013年1月1日,“一带一路”地区铀资源储量(可靠回收成本 ≤ 130 \$/kg)为 197.51×10^4 t,占回收成本 ≤ 130 \$/kg世界常规铀资源储量(590.29×10^4 t)的33.46%^[5,30-38,59]。“一带一路”地区65个国家中,铀资源丰富的国家有哈萨克斯坦、俄罗斯、中国、蒙古、乌克兰、乌兹别克斯坦、印度、约旦等,资源储量分别为 67.93×10^4 t、 50.59×10^4 t、 19.91×10^4 t、 14.15×10^4 t、 11.77×10^4 t、 9.13×10^4 t、 8.46×10^4 t和 4×10^4 t^[5,59]。

本次在“一带一路”地区共搜集到大型及以上铀矿床130个,其中,哈萨克斯坦53个、俄罗斯33个、中国14个、乌兹别克斯坦9个、蒙古6个、印度5个、乌克兰4个、吉尔吉斯斯坦3个、土库曼斯坦2

表 1 “一带一路”地区典型锂矿数据分布
Table 1 Data distribution of typical lithium deposits in “One Belt, One Road” region

序号	编号	矿床名称	经纬度(E/N)	国家	矿种	成因类型	矿物组合	伴生有益元素	品位(Li ₂ O%)	资源储量(Li ₂ O×10 ⁴ t)	开发现状	资料来源
1	4	西藏麻米措盐湖	83°30' 32°10'	中国	锂硼钾矿	盐湖型	—	K、B	6.08	250	未开采	[45]③
2	5	西藏扎布耶	84°04' 31°21'	中国	锂矿	盐湖型	扎布耶石、含锂白云石、石盐、钾石盐、硼砂、水碱、芒硝等	B、K、Br、Rb、Cs	南湖地表卤水 2.55~4.31, 南湖晶间卤水 5.59~9.78, 北湖地表卤水 5.40~8.01	183	正在开采	[1,45-46]
3	13	四川甲基卡锂铍铌钽矿床	101°48' 30°21'	中国	锂铍铌钽矿	硬岩型	锂辉石、锂云母、石英、白云母、长石等	Be、Nb、Ta、Rb	1.2	90	正在开采	[2,47]①
4	20	准格尔煤伴生锂矿	111°30' 39°23'	中国	锂矿	煤伴生型	—	—	—	515.7	未开采	[14,17,19]
5	23	Goltsovoe	104°30' 54°20'	俄罗斯	锂矿	硬岩型	锂辉石、微斜长石、钠长石、铈榴石、磷锂铝石	Ta、Cs	0.79	30	未开采	[20-23,26-29]
6	27	Vishnyakovskoe	98°30' 55°20'	俄罗斯	锂矿	硬岩型	透锂长石、锂辉石	—	1.06	42	未开采	[21-22]
7	28	塔什干地区沙瓦兹赛矿床	68°31' 41°21'	乌兹别克斯坦	锂铍铌矿	沉积岩型	—	Ce、Rb	—	12	正在开采	[11-13,48]
8	29	Taghawlor 塔哈卢尔	66°42' 33°21'	阿富汗	锂矿	硬岩型	锂辉石、电气石、白云母、磷灰石、透锂长石、石英	Ni、Ta、Ce、Pb、Zn	0.08~2.8	146.4	未开采	[49]①
9	30	Drumgal	71°01' 35°19'	阿富汗	锂矿	硬岩型	—	—	1.38~1.58	25.3	未开采	[49]①
10	36	贾达尔盆地超大型锂硼矿床	19°43' 44°28'	塞尔维亚	锂硼矿	沉积岩型	—	—	1.8	225.5	未开采	[50]①

注：盐湖型锂矿大型以 LiCl≥50×10⁴t 为界，其他类型锂矿以 Li₂O≥10×10⁴t 为界；序号 1、2 锂矿的品位和资源储量以 LiCl 计，品位单位以 g/L 计；表格中锂矿编号与图 1 中锂矿编号一致；“—”表示数据无法获得

个、罗马尼亚 1 个；铀矿类型主要有火山岩型、花岗岩型、砂岩型、碳硅泥岩型、不整合面型、交代岩型、褐煤型、磷酸盐型、碳酸盐型、黑色页岩型、脉型等^④（图 2；表 2）。哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦以砂岩型铀矿为主，同时含有火山岩型铀矿；俄罗斯和蒙古以火山岩型为主，同时含有砂岩型铀矿。中国铀矿类型以四大工业类型铀矿为主，即花岗岩型、火山岩型、砂岩型和碳硅泥岩型；乌克兰全部为交代岩型铀矿；印度铀矿类型有脉型和砂岩型；吉尔吉斯

斯坦和土库曼斯坦都拥有火山岩型铀矿，还分别有碳酸盐型和黑色页岩型铀矿。

3.2 典型铀矿床

“一带一路”地区搜集到大型及以上铀矿床 130 个^④。由于篇幅所限，本文选出 10 个具有代表性的铀矿列于表 2 中。

3.2.1 俄罗斯斯特列利佐夫斯卡铀矿床

斯特列佐夫斯克铀矿床（图 2；表 2 编号 22）位于俄罗斯赤塔州南东方向，是斯特列利佐夫斯卡

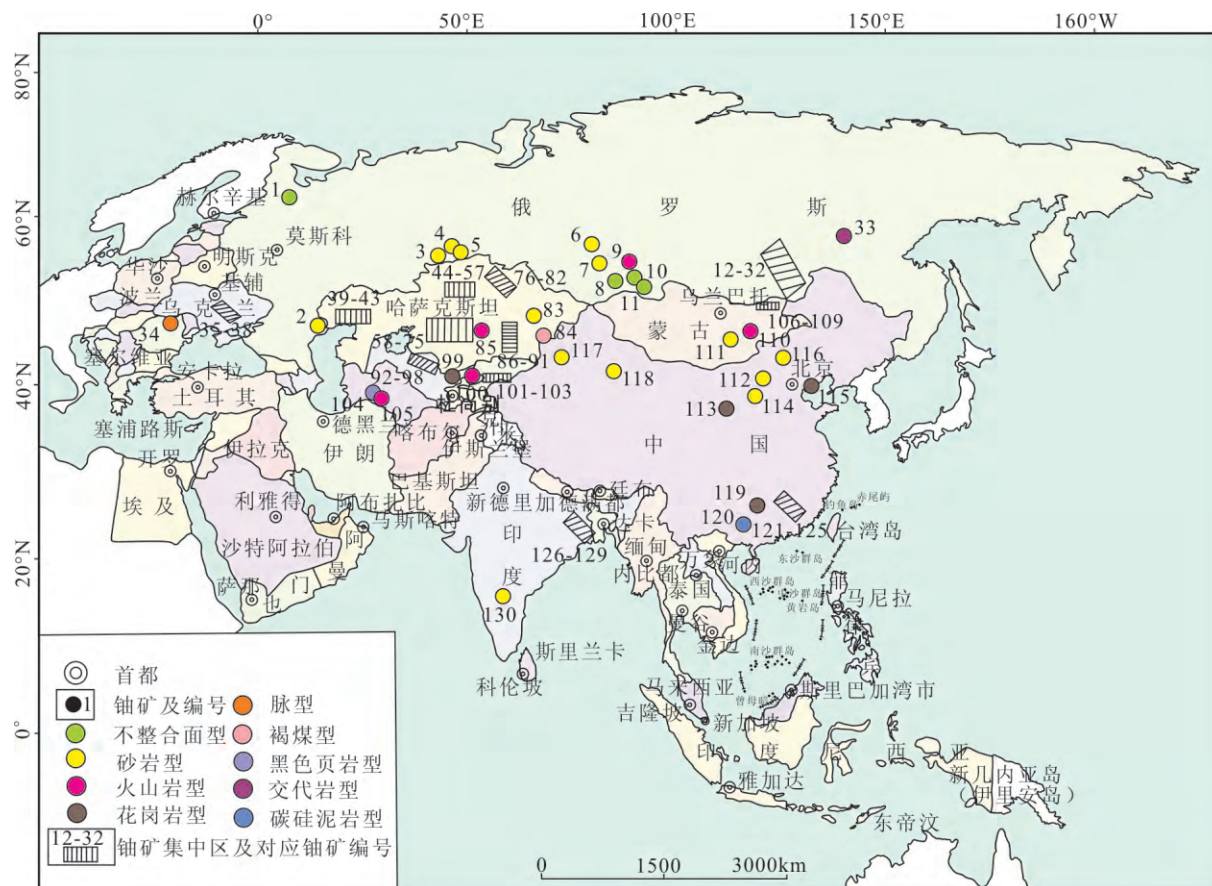


图2 “一带一路”地区大型及以上铀矿分布简图

Fig. 2 Distribution of large and superlarge uranium deposits in “One Belt, One Road” region

铀矿区最大的火山岩型铀矿,同时也是世界上最大的火山岩型铀矿,以储量大、品位高和总产量大闻名于世界,距中蒙边境仅有40km。矿床的原地资源储量达71000t,平均品位为0.185%。近几年,矿床年均产铀3500t,是目前俄罗斯开采的超大型铀矿床^[8,35]。

大地构造位置上,该矿床位于俄罗斯额尔古纳地穹系杜鲁库耶夫斯克晚侏罗世环状火山构造盆地内,产于鲁柳恩古耶夫成矿带东段,与双峰式火山岩和钠长交代岩具有密切的时空分布关系^[61,66-68]。火山盆地由基底和盖层两部分组成,盖层由含矿火山岩和沉积岩构成,含矿火山-沉积岩岩石类型主要有玄武岩、粗面英安岩、流纹岩、霏细流纹岩、安山岩、流纹质火山碎屑岩及相应的熔岩流和火山灰流,局部层位见薄层砂岩、底砾岩和凝灰岩;基底岩性为古元古代—太古宙黑云母角闪片麻岩、黑云母角闪斜

长片麻岩、片麻状花岗岩、角闪岩、变晶花岗岩、结晶片岩等^[61,66]。铀矿化大多沿黑云母花岗岩和沉积火山岩接触带呈细脉状、网脉状产出,同时构成裂隙脉状、网脉状和层状矿体。矿区热液交代蚀变主要分晚古生代热液交代蚀变和晚中生代热液交代蚀变2个期次,晚古生代蚀变包括钾长石化、钠长石化、矽卡岩化和云英岩化;晚中生代蚀变与铀成矿作用密切相关,蚀变主要为水云母交代蚀变和石英-碳酸盐-硫化物交代蚀变。矿区内非晶质铀矿和铀-钼矿广泛分布,主要出现在酸性淋滤带中,带内水云母化和泥化广泛发育^[68]。矿石中金属矿物有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、辉钼矿,以及锑、砷、金矿化,脉石矿物有水云母、绿泥石、石英等;矿石主要元素组合为U、Bi、Mo、Li、Sn、Pb、Zn,含铀矿物为铀石、沥青铀矿和钛铀矿。对中生代热液蚀变矿物钾云母进行K-Ar法和

表 2 “一带一路”地区典型铀矿数据分布
Table 2 Data distribution of typical uranium deposits
in “One Belt, One Road” region

序号	编号	矿床名称	经纬度 (E/N)	国家	矿种	成因类型	矿物组合	伴生有益元素	品位 (%U)	资源储量 (吨 t)	开发现状	资料来源
1	22	斯特列佐夫斯卡 Stritssovskoye	118°00' 50°00'	俄罗斯	铀矿	火山岩型	铀石、沥青铀矿、 钛铀矿、辉钼矿、 黄铁矿、白铁矿、 方铅矿	Li、Sb、Mo、 Au、Zn、Hg	0.185	71000	正在开采	[4,35]
2	34	Crucea, Bihor and Crucea	25°50' 47°25'	罗马尼亚	铀矿	脉型	—	—	0.21	8769	正在开采	[4,59]
3	36	Novokonstan- tinovskoe	31°50' 48°25'	乌克兰	铀矿	交代岩型	钛铀矿、晶质铀 矿、沥青铀矿、水 沥青铀矿、铀石、 磷灰石、方解石等	Sc、V	0.139	93630	正在开采	[4,59]
4	72	明库杜克 Mynkuduk	68°30' 46°00'	哈萨克 斯坦	铀矿	砂岩型	方解石、黄铁矿、 菱铁矿、白铁矿、 铀石、沥青铀矿	Se、Sc、 Y、REE	0.015~0.15	127000	正在开采	[32]
5	94	苏格拉利 Sugraly	64°11' 41°39'	乌兹别 克斯坦	铀矿	砂岩型	铀石、沥青铀矿、 钛铀矿、黄铁矿、 白铁矿	Se、Mo、Re	0.2	60000	正在开采	[37]
6	102	图雅-姆云 Tyuya-Muyun	72°12' 40°15'	吉尔吉 斯斯坦	铀矿	碳酸盐型	沥青铀矿、乌黑沥 青铀矿、赤铁矿、 黄铁矿	Co、V、 Cu、Ra	1.4	5000	正在开采	[33]
7	104	Bařlik	58°15' 39°20'	土库曼 斯坦	铀矿	黑色页 岩型	铀石、黄铁矿、菱 铁矿、磷酸盐	Ag、Co、Mo、 Ni、Pb、V、 Au、Pt	—	5000	未开采	[36]
8	111	Zoovch Ovoo 祖尔维奇敖包	108°20' 45°20'	蒙古	铀矿	砂岩型	—	—	0.022	67706	未开采	[34,60]
9	124	相山 Xiangshan	116°18' 27°55'	中国	铀矿	火山岩型	铀石、沥青铀矿、 钛铀矿、辉钼矿、 黄铁矿	REE、Mo、 Pb、Zn、 Ag、P、Be、 Cd、Ni、Sr	0.1~0.3	26000	正在开采	[30,61-65]
10	129	斯因布姆 Singhbhum	86°29' 22°29'	印度	铀矿	砂岩型	铀石、沥青铀矿、 黄铁矿、铜铀云 母、钙铀云母	Co、Cu、Ni、 Mo、Ni	0.012~0.041	56000	未开采	[31]

注：砂岩型铀矿大型以 10000t 为界，其他类型铀矿以 3000t 为界；表格中铀矿编号与图 2 中铀矿编号一致；“—”表示数据无法获得

Rb-Sr 法测年，得到的年龄值为 135~139Ma；对水云母进行 K-Ar 同位素测年，得到的年龄值为 138Ma 和 136±3Ma，这些年龄值与铀主成矿年龄一致^[66-68]。相关资料研究表明，该矿床成矿流体来自共结熔浆中析出的岩浆流体，同时大气降水对

成矿作用也有一定的影响。综合来讲，矿床属于低温热液-交代型矿床^[66-67]。

3.2.2 哈萨克斯坦萨雷苏盆地明库杜克铀矿床

萨雷苏盆地位于哈萨克斯坦的中南部，宽 250km，向东、南东方向延伸长达 600km，与天山山

脉接壤,北西延伸到咸海洼地。盆地内砂岩型和褐煤型铀矿床(点)星罗棋布,其中,明库杜克铀矿床以资源储量巨大而备受关注。迄今为止,整个盆地中已探明的铀资源储量为 $29.5 \times 10^4 \text{t}$,明库杜克铀资源储量为 $12.7 \times 10^4 \text{t}$,占总探明量的43.05%。明库杜克铀矿床位于萨雷苏盆地西北部,距南东方奇姆肯特市约400km(图2;表2编号72)。矿床由7个矿段组成,分别为Peschany、Ortalyk、West、Osenni、Central、Lagerny和East矿段。其中,Peschany和Ortalyk矿段赋存于Inkuduk地层中,平均品位为0.028%,拥有整个矿床11%的铀资源量;West、Osenni、Central、Lagerny和East矿段赋存于Mynkuduk地层中,平均品位分别为0.038%、0.037%、0.047%、0.025%和0.030%,分别占整个矿床资源量的2.3%、7.5%、36.9%、2.3%和21.8%。矿床原地铀资源量达 $12.7 \times 10^4 \text{t}$,品位为0.015%~0.15%,局部地段超过0.4%。迄今为止,矿床未进行大规模的工业开采,仅在矿床的东部地区运用地浸法开采一部分铀。

大地构造位置上,该矿床位于热尔套加里东碰撞结合带西北部,楚河以北。矿床整体呈东西向展布,长65km,宽度整体狭窄,但部分矿段可达10km。矿段受赋存在晚白垩世Zhalpak、Inkuduk和Mynkuduk地层中的氧化还原锋面控制,在长90km的氧化还原锋面上赋存30个矿体,其中16个矿体赋存于205~403m深的Mynkuduk地层中,其余赋存于225~325m深的Inkuduk地层中。Zhalpak地层整合于Inkuduk地层上,由一个厚40~75m的沉积旋回构成,岩性主要为砂岩,夹1~2m厚的长石石英砂岩。Inkuduk地层不整合在Mynkuduk地层上,中间为一侵蚀间断,地层厚40~130m,由3个沉积旋回构成,岩性主要为淡绿色砂岩、泥岩和粘土岩,杂砂岩、砂砾岩也广泛分布。Mynkuduk地层是主要的赋矿单元,厚30~90m,由2个碎屑沉积旋回构成,每一个旋回都是从粗粒砂岩过渡到细粒砂岩,最顶部变为粘土岩,其中,中细粒砂岩占地层的绝大部分。铀矿化赋存在晚白垩世地层的中、上部,被晚渐新世—第四纪沉积岩(物)覆盖,下部为晚泥盆世—二叠纪地层,基底杂岩由寒武纪褶皱地层岩石和奥陶纪地层岩石构成。铀矿化大都在砂岩和砂泥岩中呈浸染状、绸带状产出,且构成卷状矿体。含铀矿物主要为铀石和沥青铀矿,铀石主要产出于Inkuduk地层中,沥青铀矿主要产出于Mynkuduk地层中^[32]。

3.2.3 中国江西相山铀矿田

相山铀矿田地处江西乐安、崇仁两县的交界部位,南东距清江镇70km。矿田受相山火山—侵入杂岩体控制,位于赣杭铀成矿带上,是中国最大的火山岩型铀矿田^[62-65,69](图2;表2编号124)。迄今为止,在东西长25km、南北宽15~18km的矿区内先后发现和圈定矿体几十处,确定铀资源储量为26000t,品位为0.1%~0.3%。近几年,铀年产量一直维持在几百吨左右^[30]。

大地构造位置上,矿田地处扬子板块与华南板块缝合线南缘,位于北东向赣杭火山岩成矿带与北北东向大王山—于山花岗岩成矿带的交汇部位,赋存于相山大型塌陷式火山盆地中^[62,70-73]。矿田与晚侏罗世—早白垩世火山—侵入杂岩体有密切的时空分布关系,侵入杂岩体主要为一套酸性、中酸性火山熔岩、火山碎屑岩和次火山岩。矿体受火山—侵入杂岩体中次级、无序的断裂或裂隙带控制,赋存在不同的断裂或裂隙的接触带内^[72,74]。铀矿化大都在白垩纪火山岩和中元古界基底变质岩内,呈单脉状、网脉状和细脉浸染状产出,且构成脉状、群脉状、透镜状及复杂的扁豆状、巢状和串珠状矿体^[63-65,73-75]。矿田的容矿围岩有碎斑熔岩、流纹英安斑岩、黑云母石英片岩、花岗斑岩等,蚀变类型有萤石化、水云母化、碳酸盐化和绿泥石化蚀变。矿石的金属矿物主要有沥青铀矿、钛铀矿、铀钍石、辉钼矿、黄铁矿、赤铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、磁铁矿等,脉石矿物有萤石、石英、绢云母、水云母、钠长石、方解石、绿泥石等。相山花岗斑岩单颗粒锆石U—Pb年龄为135.4Ma^[64,76];对火山—侵入杂岩体碎斑熔岩进行锆石SHRIMP测年,年龄为134~135Ma,似斑状花岗岩年龄为133~135Ma^[72]。测年数据表明,相山铀矿田的形成年龄主要集中在135Ma左右,即形成于晚侏罗世—早白垩世之间。铀矿田成矿流体主要来自于地幔的岩浆热液,同时在成矿期和成矿后有大量的大气降水加入,深部发生的水—岩作用对铀的成矿起积极的作用。综合来讲,相山铀矿田是与火成岩有关的中、低温热液型铀矿田^[75,77-80]。

3.3 铀资源开发工艺

中国铀资源开发工艺有原地浸出开采、原地爆破浸出开采、无轨开采、“三下开采”、露天开采等多种方式。在这些开发工艺中,原地浸出开采(以下

简称地浸采铀技术)是中国近些年掌握的最主要的铀资源开发工艺,也是最受欢迎的铀资源开发工艺之一^[81]。

原地浸出开采是一种在天然埋藏条件下,通过溶浸剂与矿物发生化学反应选择性地溶解矿石中的铀,而不使矿石产生位移的集采、冶于一体的铀矿开采方法。原地浸出开采主要用于砂岩型铀资源的开采,具体过程是通过钻孔将浸出剂注入到天然埋藏条件下的矿体中,运用一定手段有选择性地浸出有益成分,并将浸出液通过抽液孔抽至地表,经化工处理,回收得到有用成分^[82-83]。

中国砂岩型铀矿床主要集中在西北地区,形成了伊犁、吐哈、鄂尔多斯、二连、通辽、巴音戈壁6个大型铀矿资源基地。砂岩型铀资源量约占中国铀资源量的35%,如在内蒙古二连盆地、鄂尔多斯盆地、松辽盆地、海拉尔盆地、巴丹吉林-巴音戈壁盆地及新疆伊犁盆地、吐哈盆地中赋存有储量巨大的砂岩型铀矿床^[81,84-85]。原地浸出开采工艺的运用,使中国数万吨低品位砂岩型铀矿得以重新利用,极大地增加了中国铀资源的产量,同时也大大降低了铀资源的开采成本,减少了开采过程中对环境的破坏。

4 讨论

4.1 锂矿找矿远景

4.1.1 盐湖型锂矿找矿远景

在“一带一路”地区寻找盐湖型锂矿,主要集中在中国青藏高原和阿富汗加兹尼省地区。青藏高原地区分布大量的现代第四纪盐湖,通过对盐湖中不同元素组分及其含量的测定,寻找值得开发的盐湖型锂矿,尤其是要寻找碳酸盐型盐湖。加兹尼省盐湖型锂资源可能与玻利维亚相当,但勘察程度很低,找矿远景巨大。此外,阿富汗赫尔曼德省西南地区也拥有大量的盐湖,盐湖型锂矿的找矿远景巨大。

4.1.2 硬岩型锂矿找矿远景

阿尔泰山成矿带是一条著名的成矿带,呈北西向展布,横跨哈萨克斯坦、俄罗斯、中国和蒙古四国,著名的新疆可可托海锂铍铌钽矿床(图1编号1)就位于其上^[86]。在综合研究已有资料的基础上,加大对俄罗斯阿尔泰山南部、哈萨克斯坦东部和蒙古西部地区伟晶岩型锂矿的勘察开发力度,同时加大

中国境内(四川雅江、江西宜春等地)伟晶岩型锂矿的寻找。

最近,依托中国地质调查局部署开展的“中国三稀资源战略调查”计划项目,在位于甘孜州雅江县的甲基卡锂辉石矿床(图1;表1编号13)外围新发现8条锂矿化伟晶岩脉,新增氧化锂资源量 $64.31 \times 10^4 \text{t}$ ^[87],该项目的开展,不仅增加了甲基卡锂辉石矿床的锂资源量,还建立了一套有效的找矿方法体系,为在“一带一路”地区已发现的伟晶岩型锂矿周围寻找隐伏伟晶岩型稀有金属矿提供了指导型示范。鉴于此,加大对俄罗斯Kola Peninsula和Sayanakh Region地区及阿富汗东北部努里斯坦、帕米尔等地伟晶岩型锂矿的寻找力度,同时加大阿富汗中部乌鲁兹甘省塔哈卢尔(Taghawlor)锂矿外围的找矿力度。

4.1.3 沉积型锂矿找矿远景

随着锂矿勘察开发程度的加深,沉积型锂矿作为新型锂矿已成为一种极具潜力的锂矿类型,为当前锂矿的勘察提供了新的方向。沉积型锂矿一般产出在由构造活动形成的山间盆地中,沉积岩(物)以冲击层、沼泽和湖泊沉积组合为特征,而且锂矿周围常伴生有产在俯冲板块边界伸展环境下的典型硼酸盐矿床。鉴于此,除在塞尔维亚贾达尔盆地和乌兹别克斯坦塔什干地区进行锂矿勘察外,也在“一带一路”其他具有相似地形、地貌和成矿特点的国家地区进行锂矿勘察,同时加大贾达尔盆地周围地区锂矿的勘察力度,寻找潜在的锂矿区。

4.2 铀矿找矿远景

4.2.1 火山岩型铀矿找矿远景

俄罗斯、蒙古和中国的北东交界地区处于欧亚东西向铀-多金属成矿带与环太平洋成矿带的相交部位,区内铀矿化在不同地质历史时期非常活跃,特别是中生代与火山作用有关的铀矿化,形成了众多的火山岩型铀矿,如在俄罗斯外贝加尔地区发育丰富的火山岩型铀矿,仅本文搜集到的相关铀矿就有15个(图2编号12~32中的15个),世界上最大的火山岩型铀矿斯特列利佐夫斯卡铀矿(图2;表2编号22)就是其中之一。该地区距中蒙边境仅40km,与相邻区处于同一古亚洲成矿域上。当前,在蒙古一侧东部地区已发现乔巴山大型铀矿田及邻近铀矿床,鉴于此,加大蒙古-额尔古纳铀

多金属成矿带(已发现斯特列利佐夫斯卡(图2编号22)、安泰(图2编号13)、多尔诺特(图2编号108)、古尔万布拉克(图2编号109)等铀矿)、沽源-赤峰铀成矿带和兴城-青龙铀成矿带上铀矿的勘察力度,如蒙古国乔巴山、内蒙古赤峰红山子、二连、额尔古纳等地,尤其要在构造交叉、火山机构及有利成矿岩性地段进行火山岩型铀矿的勘察。

4.2.2 砂岩型铀矿找矿远景

“一带一路”地区65个国家中,砂岩型铀矿的勘察主要集中在哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、中国等国家。当前,在哈萨克斯坦楚萨雷苏铀成矿域、锡尔达林铀成矿域、楚伊犁铀成矿域、伊犁铀成矿域、北哈萨克斯坦铀成矿域、曼格什拉克铀成矿域6个铀成矿域和乌兹别克斯坦中克兹尔库姆铀成矿域、费尔干纳铀成矿域2个铀成矿域内,已经发现了数量巨大的砂岩型铀矿(图2编号58~74、79、83、92~97)。鉴于此,应加大在这8个铀成矿域砂岩型铀矿的勘察力度,同时要继续扩大已知铀矿区的铀资源量。当前,内蒙古地区发现了一定数量的砂岩型铀矿,如二连盆地(图2编号116)、鄂尔多斯盆地(图2编号112、114)、松辽盆地、海拉尔盆地和巴丹吉林-巴音戈壁盆地中发现的铀矿,这些地区铀资源潜力巨大,要加大铀矿的勘察力度。此外,在中国伊犁-吐哈铀成矿域内,要加大砂岩型铀矿的勘察力度,同时继续扩大已知铀矿区的铀资源量^[88-91]。

4.3 锂矿和铀矿开发工艺

4.3.1 锂矿开发工艺

“一带一路”地区盐湖型锂矿资源储量巨大,但开发工艺一直不够成熟,尤其是对高镁锂比盐湖的提锂,因此投入工业生产的盐湖不多。2007年底,青海锂业采用中国科学院盐湖所研发的高镁锂比分离技术,运用氨法沉镁联合提取工艺技术,使硼、镁、锂顺序析出,成功实现了镁锂的分离,但由于工艺复杂及工业生产所用的酸和碱对设备腐蚀严重等原因,导致生产成本低,至今未用于工业化生产^[92]。鉴于此,若要减少硬岩型锂矿的消耗,加大盐湖型锂矿的开采,首先要突破高镁锂比盐湖提锂技术上的难题,且提锂成本不能太高,否则没有工业价值。

4.3.2 铀矿开发工艺

中国砂岩型铀矿具有低品位、低渗透、高碳酸

盐、高矿化度等特点,用酸法或碱法地浸均难以顺利开采,最新发明的“二氧化碳+氧气”原地浸出开采工艺成功地解决了这一难题,使许多复杂砂岩型铀矿得以重新利用。“二氧化碳+氧气”地浸开采技术的应用使铀的开采边界品位降低,铀的浸出率达到75%,使铀的可采资源量成倍增加^[93]。

中国铀矿床矿石平均品位都很低,大约在0.1%左右,生产1t铀就要从地下开采1000t矿石,且999t是废石。最近,地浸开采技术在硬岩型铀矿开采中取得了突破,成功地解决了这一问题。硬岩型铀矿具有地质条件稳定、矿床顶底板围岩透水性差、矿石硬度不大等特点,利用爆破和特定浸出液相结合的办法,硬岩型铀矿实现了原地浸出开采^[94]。这一技术的应用使铀矿开采的边界品位至少降低2个点,收到了资源和环境的双重效益,相信在不久的将来,这一技术会大量地应用于硬岩型铀矿的工业化生产中。

5 结 论

(1)“一带一路”地区共搜集到大型及以上锂矿36个,成因类型有盐湖型、硬岩型、沉积型和煤伴生型4种,资源储量分别为 1702×10^4 t、 784×10^4 t、 237.5×10^4 t和 623×10^4 t。盐湖型分布在中国和阿富汗,硬岩型分布在中国、阿富汗和俄罗斯,沉积型分布在塞尔维亚和乌兹别克斯坦,煤伴生型分布在中国。盐湖型锂矿通过沉淀法即可获得锂产品,不仅大大降低生产成本,而且降低了对环境的危害,建议“一带一路”地区相关国家加大对盐湖型锂资源的勘探与开发,减少硬岩型锂矿石的使用。

(2)“一带一路”地区共搜集到大型及以上铀矿130个,成因类型主要为砂岩型和火山岩型,主要集中在哈萨克斯坦、俄罗斯、中国、蒙古、乌克兰、乌兹别克斯坦、印度等国家,可靠回收成本 ≤ 130 \$/kg的铀资源储量达 181.94×10^4 t,占“一带一路”地区总资源储量的92.12%。哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦两国拥有大量的砂岩型铀矿,且单个铀矿的资源储量也巨大,中国已经掌握了一套相对成熟的地浸采铀技术,建议中国展开与相关国家的交流与合作,加大对中国境内北方地区砂岩型铀矿的勘察力度,同时进行火山岩型铀矿的勘探开发。

致谢:中国地质科学院矿产资源研究所赵一鸣研究员提出建设性建议,绘制图件时得到了中国科学院油气资源研究重点实验室樊海龙硕士的帮助,在此一并感谢。

参考文献

- [1]赵元艺.中国盐湖锂资源及其开发进程[J].矿床地质,2003,22(1):99-105.
- [2]李建康,刘喜方,王登红.中国锂矿成矿规律概要[J].地质学报,2014,88(12):2269-2276.
- [3]王秋舒,元春华,许虹.全球锂矿资源分布与潜力分析[J].中国矿业,2015,24(2):11-13.
- [4]Susan H, Margaret C. Critical analysis of world uranium resources; U.S. Scientific Investigations Report 2012-5239[M].U.S. Geological Survey,2013:56.
- [5]OECD NEA & IAEA. Uranium 2014:Resources,Production and Demand[M]. OECD NEA & IAEA,2014.
- [6]纪忠元,项仁杰,刘吉成,等.世界矿情.独联体[M].北京:地质出版社,2010:19-48,89-120,225-230.
- [7]李俊建,刘晓阳,唐文龙,等.蒙古国矿产资源概况[C]//李俊建,刘新秒编译.蒙古地质矿产研究进展.天津:天津科学技术出版社,2013:59-64.
- [8]施俊法,李友枝,金庆花,等.世界矿情.亚洲卷[M].北京:地质出版社,2006:88-100,360-378.
- [9]郑绵平.论中国盐湖[J].矿床地质,2001,20(2):181-185.
- [10]OECD NEA & IAEA. Uranium 2009:Resources, production and demand[M]. OECD NEA & IAEA, 2010:456.
- [11]Richard M L, Glenn J W. 2006 Minerals Yearbook[M]. U.S.Geological Survey,2009.
- [12]Richard M L, Mark B, Glenn J W. 2007 Minerals Yearbook[M].U. S.Geological Survey,2010.
- [13]Richard M L, Glenn J W. 2008 Minerals Yearbook[M].U.S.Geological Survey,2010.
- [14]Sun Y Z, Zhao C L, Li Y H, et al. Li distribution and mode of occurrences in Li-bearing coal seam #6 from the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, northern China[J]. Energy Exploration & Exploitation,2012,30(1):109-130.
- [15]Sun Y Z, Yang J J, Zhao C L. Minimum mining grade of associated Li deposits in coal seams[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2012,30(2):167-170.
- [16]Sun Y Z, Zhao C L, Zhang Y Z, et al. Concentrations of valuable elements of the coals from the Pingshuo Mining District, Ningwu Coalfield, northern China[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2013,31(5):727-744.
- [17]Sun Y Z, Zhao C L, Li Y H, et al. Further Information of the Associated Li Deposits in the No.6 Coal Seam at Jungar Coalfield, Inner Mongolia, Northern China[J]. Acta Geologica Sinica,2013,87(4):1097-1108.
- [18]Sun Y Z. China Geological Survey Proved the Existence of an Extra-large Coal-Associated Lithium Deposit[J]. Acta Geologica Sinica,2015,89(1):311.
- [19]Sun Y Z, Zhao C L, Qin S J, et al.Occurrence of some valuable elements in the unique 'high-aluminium coals' from the Jungar coalfield, China[J].Ore Geology Reviews,2016,72:659-668.
- [20]Evans R K. An abundance of lithium[EB/OL](2012-07-12)[2016-06-30]http://www.doc88.com/p-497333704749.html.2008.
- [21]Seltmann R, Soloviev S, Shatov V, et al. Metallogeny of Siberia:tectonic, geologic and metallogenic settings of selected significant deposits[J]. Australian Journal of Earth Sciences,2010:687-690.
- [22]Stephen E K, Paul W G, Pablo A M, et al. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. Ore Geology Reviews, 2012, 48: 56-68.
- [23]Camille G, Pamela H M, Marion P, et al. Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2012, 16:1737-1744.
- [24]Stephen G P, Trude V V K, Thomas J M, et al.Summaries of Important Areas for Mineral Investment and Production Opportunities of Nonfuel Minerals in Afghanistan[M].U.S. Geological Survey, 2013:294-302.
- [25]Stephen G P, Summaries and Data Packages of Important Areas for Mineral Investment and Production Opportunities in Afghanistan: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2011-3108[M]. U.S. Geological Survey,2012.
- [26]Matviyenko A D. Geological and physical-chemical formation conditions of spodumene pegmatites of the Ukrainian Shield[J]. Arch. Mineralogiczne XLIX,1993:143-144.
- [27]Ryabtsev V V, Chistov L B, Schuriga T N. Tantalum ores of Russia[M]. Mineral Resources 21,2006.
- [28]Odintsova I V, Syzykh A I. Mineral raw material resources of rare and base metals in Eastern Siberia[C]//Geology and mineral deposits of Eastern Siberia. Irkutsk University Publishing, Irkutsk, 2007:95-101.
- [29]Ryabtsev V V, Kalish E A, Golovanov O G. The perspectives of the use of the mineral resource base of tantalum in Russia[C]//Mineral Resources 18 (A Special Issue devoted to the current problems of the rare metal resource base of Russia (1956-2006)),2006:40-61.
- [30]Dahlkamp F J. Chapter 1 China, Uranium deposits of the world-Asian[M].Berlin Heidelberg:Springer-Verlag,2009:32-155.
- [31]Dahlkamp F J. Chapter 2 India, Uranium deposits of the world-Asian[M].Berlin Heidelberg:Springer-Verlag,2009:157-173.
- [32]Dahlkamp F J. Chapter 6 Kazakhstan,Uranium deposits of the world-Asian[M].Berlin Heidelberg: Springer- Verlag, 2009:192-267.
- [33]Dahlkamp F J. Chapter 7 Kyrgyzstan,Uranium deposits of the world-Asian[M].Berlin Heidelberg: Springer- Verlag, 2009:269-284.
- [34]Dahlkamp F J. Chapter 8 Mongolia,Uranium deposits of the world-Asian[M].Berlin Heidelberg:Springer-Verlag,2009:286-308.

- [35]Dahlkamp F J. Chapter 10 Russian Federation,Uranium deposits of the world- Asian[M].Berlin Heidelberg: Springer- Verlag, 2009: 322-390.
- [36]Dahlkamp F J. Chapter 14Turkmenistan, Uranium deposits of the world- Asian[M].Berlin Heidelberg: Springer- Verlag, 2009:397-400.
- [37]Dahlkamp F J. Chapter 15 Uzbekistan, Uranium deposits of the world- Asian[M].Berlin Heidelberg: Springer- Verlag, 2009:402-446.
- [38]Dahlkamp F J. Chapter 16 Vietnam, Uranium deposits of the world- Asian[M].Berlin Heidelberg: Springer- Verlag, 2009:449-450.
- [39]张洪瑞,侯增谦,杨志明.特提斯成矿域主要金属矿床类型与成矿过程[J].矿床地质,2010,29(1):113-115.
- [40]任秉琛,郭介人.古亚洲成矿域古生代矿床成矿系列组合与矿床成矿系列类型的初步划分[J].矿床地质,2002,21(增刊):219-221.
- [41]任秉琛,郭介人.古亚洲成矿域重要金属矿床类型与区域成矿规律探讨[J].矿床地质,2004,23(增刊):112-120.
- [42]周飞飞.“一带一路”点燃地质工作新梦想[N].中国国土资源报(第5版),2015-01-01.
- [43]国土资源部信息中心.世界矿产资源年评[M].北京:地质出版社,2014:250-254.
- [44]Bradley D, Jaskula B. Lithium-For harnessing renewable energy: U. S. Geological Survey Fact Sheet 2014- 3035[M].U.S. Geological Survey,2014.
- [45]曹文虎,吴蝉.卤水资源及其综合利用技术[M].北京:地质出版社,2004:1-189,249-279.
- [46]也贞,卜令忠,郑绵平.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,2010,31(1):95-99.
- [47]《中国矿床发展史.四川卷》编委会.中国矿床发现史.四川卷[M].北京:地质出版社,1996:131-133.
- [48]张立生.乌兹别克斯坦的矿产资源与投资前景——随中国科学家代表团访问乌兹别克斯坦考察报告之一[J].四川地质学报,2001,21(4):205-213.
- [49]British Geological Survey. Minerals in Afghanistan[EB/OL](2016-12-03)[2016-12-03]http://www.bgs.ac.uk/afghanMinerals/docs/RareMetals_A4.pdf. 2016.
- [50]赵元艺,符家骏,李运.塞尔维亚贾达尔盆地超大型锂硼矿床[J].地质论评,2015,61(1):34-43.
- [51]Bray E L,Guberman D E,Edelstein D L, et al. Mineral commodity summaries 2016[M]. U.S. Geological Survey,2016:100-101.
- [52]罗莎莎,郑绵平.西藏地区盐湖锂资源的开发现状[J].地质与勘探,2004,40(3):10-14.
- [53]刘喜方,郑绵平,齐文,等.西藏扎布耶盐湖超大型B、Li矿床成矿物质来源研究[J].地质学报,2007,81(12):1709-1714.
- [54]尹淑苹,任玉峰.新矿物(2007.1~2007.12)[J].岩石矿物学杂志,2010,29(4):445-451.
- [55]纪志永,焦朋朋,袁俊生,等.锂资源的开发利用现状与发展分析[J].轻金属,2013,5:2-5.
- [56]雪晶,胡山鹰.我国锂工业现状及前景分析[J].化工进展,2011,30(4):783-787.
- [57]杨晶晶,秦身钧,张健雅,等.锂提取方法研究进展与展望[J].化工矿物与加工,2012,6:44-46.
- [58]赵元艺.西藏扎布耶盐湖碳酸锂提取盐田工艺及其相关技术研究[D].中国地质科学院博士后论文,2000:1-9.
- [59]Uranium Maps and Statistics[EB/OL](2016-12-01)[2016-12-03]<http://www.wise-uranium.org/umaps.html>.2016.
- [60]World Nuclear Association.Uranium in Mongolia[EB/OL](2016-04-01)[2016-12-03]<http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/Mongolia/>.2016.
- [61]方锡珩.相山铀矿田与斯特列利措夫铀矿田特征对比[J].铀矿地质,2012,28(5):265-272.
- [62]邱爱金,郭令智,郑大瑜,等.江西相山地区中、新生代构造演化对富大铀形成的制约[J].高校地质学报,1999,5(4):418-424.
- [63]张万良,余西垂.相山铀矿田成矿综合模式研究[J].大地构造与成矿学,2011,35(2):249-254.
- [64]张树明,曹寿孙,曾文乐,等.江西相山矿田典型铀矿床流体包裹体特征及意义[J].矿床地质,2012,31(1):66-69.
- [65]张万良,邹茂卿.相山矿田铀多金属成矿条件分析[J].铀矿地质,2014,30(3):172-174.
- [66]李有柱.俄罗斯东外贝加尔地区图鲁库伊破火山口铀矿床上的交代作用[J].国外铀金地质,2000,17(1):23-28.
- [67]叶庆森.俄罗斯外贝加尔地区晚中生代Tulukuev破火山口铀矿床和蚀变作用[J].世界核地质科学,2003,20(3):153-154.
- [68]谭克仁,侯惠群,蔡新平,等.斯特列佐夫斯克铀矿床构造岩浆活化控矿特征及成矿规律[J].大地构造与成矿学,2003,27(1):91-95.
- [69]李海东,钟福军,张志勇,等.我国火山岩型铀矿床中铀-多金属组合特征及其意义[J].矿产与地质,2015,29(3):283-286.
- [70]杨明桂,梅勇文.钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J].华南地质与矿产,1997,3:52-56.
- [71]陈雷,赵元艺,王宗起,等.江西相山铀矿田山南矿区流纹英安岩和花岗斑岩的地球化学与Sr、Nd同位素特征[J].地质与勘探,2013,49(6):999-1001.
- [72]陈正乐,王永,周永贵,等.江西相山火山-侵入杂岩体锆石SHRIMP定年及其地质意义[J].中国地质,2013,40(1):217-219.
- [73]聂江涛,李子颖,王健,等.江西相山矿田多金属成矿流体特征与成矿作用[J].地质通报,2015,34(2/3):535-537,546.
- [74]陈肇博,谢佑新,万国良,等.华东南中生代火山岩中的铀矿床[J].地质学报,1982,3:235-242.
- [75]严冰,严寒,周莉,等.江西相山火山岩型铀矿C、O、H、S同位素特征及意义[J].矿物岩石,2013,33(3):47-49.
- [76]陈小明,陆建军,刘昌实,等.桐庐、相山火山-侵入杂岩单颗粒锆石U-Pb年龄[J].岩石学报,1999,15(2):272-277.
- [77]李学礼.论热源、水源、矿(铀)源三源成矿问题[J].华东地质学院学报,1992,15(2):101-108.
- [78]陈迪云,周文斌,周鲁民,等.相山铀矿田同位素地质学特征[J].矿床地质,1993,12(4):370-376.

- [79]姜耀辉,蒋少涌,凌洪飞.地幔流体与铀成矿作用[J].地学前缘,2004,11(2):493-496.
- [80]钟福军,潘家永,夏菲,等.我国火山岩型铀矿找矿预测地质模型的构建与应用[J].东华理工大学学报(自然科学版),2015,38(2):135-138.
- [81]施祖远.我国铀矿开采技术成就与发展对策[J].铀矿冶,2011,30(4):175-179.
- [82]苏学斌,杜志明.我国地浸采铀工艺技术发展现状与展望[J].中国矿业,2012,21(9):79-82.
- [83]黄群英.某砂岩铀矿酸法地浸溶质运移与酸化进程分析[J].有色金属(冶炼部分),2015,(6):50-51.
- [84]蔡煜琦,张金带,李子颜,等.中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J].地质学报,2015,89(6):1052-1015.
- [85]焦养泉,吴立群,彭云彪,等.中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积-构造背景综合分析[J].地学前缘,2015,22(1):190-195.
- [86]董永观,邢怀学,高卫华等.阿尔泰成矿带构造演化与成矿作用[J].矿床地质,2010,29(增刊):1-2.
- [87]付小方.四川甘孜甲基卡地区发现超大型规模锂辉石矿[EB/OL](2015-03-25)[2016-06-30]http://www.cgs.gov.cn/xwl/cg-kx/201603/t20160309_298929.html.2015.
- [88]王木清.中国东北部铀矿化与大地构造活动及演化的关系[J].铀矿地质,2013,29(4):193-198.
- [89]赵忠华,彭志东,张学元,等.中国北东部火山岩型铀矿成矿地质特征及找矿方向[J].铀矿地质,2007,23(3):135-136.
- [90]姚振凯,刘翔,郑大瑜.亚欧东西向活化构造铀成矿带划分依据及铀成矿域分布[J].铀矿地质,2014,30(4):195.
- [91]姚振凯,刘翔.中亚独联体五国铀成矿的大地构造背景[J].大地构造与成矿学,2000,24(1):1-5.
- [92]申军,戴斌联.盐湖卤水锂矿资源开发利用及其展望[J].化工矿物与加工,2009,4:2-4.
- [93]袁于飞.我国地浸采铀新技术获得重大突破-盘活数万吨复杂砂岩型铀矿资源[N].光明日报,2014-08-02.
- [94]于德福.我国实现硬岩型铀矿原地浸开采[N].中国国土资源报,2015-08-05.
- ①应对全球化:全球主要矿产资源研究系列报告(锂矿卷).中国地质调查局发展研究中心,2015.
- ②乔东海,赵元艺,汪傲,等.“一带一路”地区36个锂矿数据统计表.中国地质大学(北京)、中国地质科学院矿产资源研究所,2016.
- ③赵元艺.西藏麻米错盐湖卤水锂硼钾资源综合开发扩大试验.中国地质科学院矿产资源研究所研究报告.2013.
- ④乔东海,赵元艺,汪傲,等.“一带一路”地区130个铀矿数据统计表.中国地质大学(北京)、中国地质科学院矿产资源研究所,2016.