

“一带一路”国家钾盐及硼资源分布规律与开采技术

王松¹, 赵元艺², 汪傲¹, 常玉虎¹

WANG Song¹, ZHAO Yuanyi², WANG Ao¹, CHANG Yuhu¹

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

1. *College of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

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

摘要:随着中国经济快速发展,对钾盐和硼矿的需求快速增加。世界钾盐资源主要集中在北美洲和欧洲。在参阅大量资料后,初步估算“一带一路”国家地区钾盐资源量(以K₂O当量计算)约112×10⁸t,主要分布在柴达木盆地、塔里木盆地、呵叻盆地(含沙空那空盆地)、中亚盆地、死海盆地和涅帕盆地。硼矿资源73%的储量和70%的储量基础分布于美国、土耳其、俄罗斯和哈萨克斯坦,“一带一路”国家中硼资源主要分布于俄罗斯、土耳其、哈萨克斯坦、塞尔维亚等国家。据美国地质调查局2014年公布的数据,世界探明硼储量约2.43×10⁸t,“一带一路”地区探明硼储量约1.46×10⁸t,约占世界探明硼储量的69.5%。对“一带一路”国家钾盐矿和硼矿资源分布做了详细统计,对典型矿床的地质特征进行了简单的概括,介绍了钾盐和硼矿的开发技术,讨论了中国利用境外钾盐及硼资源的首选地区,为中国企业“走出去”提供有益信息。

关键词:钾盐矿;硼矿;一带一路;资源分布;开采技术

中图分类号:P619.21⁺;P619.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)01-0035-15

Wang S, Zhao Y Y, Wang A, Chang Y H. A study of distribution regularity and exploitation techniques of potash and boron resources in countries of "One Belt, One Road". *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(1):35-49

Abstract: With the rapid development of economy in China, the demand for potash salt is rising rapidly. Although there are rich potash resources all over the world, the distribution is uneven in that they are mainly distributed in North America and the Europe. After referring to a large number of data, the authors have made a preliminary estimation of potash resources in the countries of "One Belt, One Road", which reach about 11.2 billion tons (in terms of K₂O equivalent). The total reserves are dominated by six major potash-forming basins, i.e., Qaidam Basin, Tarim Basin, Khorat Basin (including Sakon Nakhon Basin), Central Asian basin, Dead Sea Basin and Nepa Basin. The global boron resources are not evenly-distributed, with 73% reserves and 70% reserve bases dispersed in the USA, Turkish, Russia and Kazakhstan. There are abundant boron resources in the countries of "One Belt, One Road", mainly distributed in Russia, Turkey, Kazakhstan, Serbia and some other countries. According to the data published by US Geological Survey (USGS) in 2014, the world's proven reserves of boron are about 243 million tons. The authors have estimated that total boron resource reserves in the countries of "One Belt, One Road" come up to 146 million tons, accounting for about 69.5 percent of the world reserves. The authors made a detailed statistical analysis of distribution of potash and boron resources in the countries of "One Belt, One Road", gave an overview of the geological characteristics of typical deposits, described the exploitation techniques for potash and boron, and discussed the preferred areas for using foreign potash and boron resources, thus providing useful information for

收稿日期:2016-04-06;**修订日期:**2016-05-19

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应用》(编号:12120115065901)和《中亚及邻区铜镍铀资源潜力评价与应用示范》(编号:121201103000150006)

作者简介:王松(1992-),男,在读硕士生,地质工程专业。E-mail:wangsong656@163.com

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

Chinese enterprises' "going out" policy.

Key words: potash salt deposits; boron deposits; One Belt, One Road; distribution of resources; exploitation techniques

钾盐是一种重要的工农业矿物原料,有着重要的经济价值,其主要用作钾肥,是重要的农肥资源。中国作为全球最大的钾盐及钾肥需求国之一,钾肥消费量一直大于生产量。2002年中国的钾盐产量仅为 $147 \times 10^4 \text{t}$,2005年为 $232.65 \times 10^4 \text{t}$,而中国钾肥消费量已达到 $1000 \times 10^4 \text{t}$,对外依存度高达75%以上^[1],2006年以来,中国钾盐的对外依存度一直保持在50%以上^[2]。2011年中国的钾盐产量仅占全球的10.4%,却消耗了全球21%的钾盐资源,是目前全球钾盐第一消费国。2012年中国钾肥消费量 $752.6 \times 10^4 \text{t}$,以此为基础,预测在2022~2026年中国钾肥需求可能达到 $1000 \times 10^4 \sim 1100 \times 10^4 \text{t}$ (折合 K_2O)^[3]。受资源条件等的制约,中国钾盐紧缺的状况在较长时期内难以改观。

硼(B)是用途广泛的重要非金属元素,是重要的基础无机化工原料。20世纪90年以后,随着硼化工的发展和玻璃工业的进一步兴起,中国硼化合物的用量大增,硼矿及其加工产品的进口量逐年增加。2004年中国硼矿(B_2O_3)消费量为 $25 \times 10^4 \text{t}$,到2013年激增至 $62 \times 10^4 \text{t}$,十年间年平均消费增长率达10.56%^[4]。近年来,中国硼矿消费量一直高于产量,对外依存度逐年递增,2013年对外依存度高达72%。依现有硼资源消费需求,预测到2020年中国的硼矿(B_2O_3)需求量将达到 $70 \times 10^4 \text{t}$ 左右^[4]。随着中国经济的发展,中国现有的硼矿储量难以满足未来生产的需求。

“一带一路”地区矿产资源十分丰富,本文对“一带一路”沿线国家的钾盐及硼资源分布和矿床地质特征进行了较详细的分析,并对钾盐和硼资源储量进行了统计,介绍了目前有关钾盐和硼矿的开采技术,为中国企业实施“走出去”战略,提供境外钾盐及硼资源的有益信息,对解决国内钾盐及硼矿供需日益紧张的问题具有重要意义。

1 “一带一路”地区地质构造概况

“一带一路”所在地域横跨劳亚、特提斯和环太平洋成矿域,属于一个拼合的大陆,既包括劳亚古陆的主要部分,又囊括了冈瓦纳古陆分解出来的部分陆块,主要包括西伯利亚陆块、塔里木陆块、中朝陆块、阿拉伯陆块、印度陆块、扬子陆块6个大型陆

块。古生代时期,冈瓦纳古陆与劳亚古陆以古特提斯洋相隔,之后,古陆发生裂解分离,形成了现今“一带一路”地区的印度陆块和阿拉伯陆块,也包括大陆边缘的5条巨型造山带(北极造山带、乌拉尔-蒙古造山带、昆仑-祁连-秦岭造山带、特提斯-喜马拉雅造山带和环太平洋构造活动带)及夹持其间的陆块。在漫长的地质历史时期,亚洲大陆的形成经历了陆块的多次裂解、汇聚、增生和拼合的复杂演化过程,这种大陆岩石圈的多旋回性拼合和裂解,为成矿元素大规模、突发性和超巨量富集创造了有利的条件,在“一带一路”地区形成了许多储量巨大的油气田、金属和非金属矿床,在全球经济和社会发展中占据着举足轻重的位置^[5]。

2 钾盐与硼矿概况

钾盐矿床与硼矿床是2种不同的非金属矿床,在产出空间、成矿时代、矿床成因等方面有着较大的差异,但也存在一些联系。目前,世界已探明钾盐资源量绝大部分赋存在地下固体钾盐矿床中,多为海相沉积,少部分分布在地表或近地表的含钾卤水矿中。世界制钾工业原料的98%来自第四纪以前的层状矿床中的可溶性钾盐,2%来自盐湖卤水和地下卤水^[6]。世界已探明硼矿储量的1/3分布在美国和土耳其,且均为新近纪—第四纪火山沉积型矿床。与钾盐相比,现代盐湖型硼矿床资源量所占比重较大,主要分布在拉美地区,且硼在这些盐湖中常与钾、锂伴生。中国许多现代盐湖中钾和硼也常伴生出现,如青海的察尔汗盐湖、大柴旦盐湖等,西藏的扎布耶盐湖、扎仓茶卡盐湖等。现代盐湖中的钾盐与硼矿既存在液体矿,又存在固体矿,是中国钾盐和硼矿的主要来源。

钾(K)是典型的亲石碱金属元素,在地壳中的分布占第七位,约占地壳重量的2.1%。目前已知的含钾矿物有120余种,其中硅酸盐约占50%,硫酸盐约占25%,卤化物约占10%,其余为碳酸盐、硝酸盐、硼酸盐、磷酸盐等。目前,有现实经济意义的钾矿物主要为钾石盐、光卤石、无水钾镁矾、钾盐镁矾、钾芒硝、杂卤石等可溶性固体和液体钾盐矿物,其中以钾石盐最为重要。世界钾盐产量的90%以上用作钾肥,是重要的农肥资源^[7]。在化学工业中有30

多种钾制品,主要为氯化钾、氢氧化钾、硫酸钾、高锰酸钾、溴化钾、碘化钾、氰化钾等。按工业用途,35%用于生产洁净剂,25%以碳酸盐和硝酸盐形式用于玻璃和陶瓷工业中,20%用于纺织和染色,13%用于制化学药品,其余用于罐头工业、皮革工业、电器、冶金工业等^[8]。

中国是人口大国和农业大国,钾肥对促进粮食增产和保障粮食安全供给具有重要的战略意义。钾盐作为钾肥的主要矿物原料,被列为中国重要的战略矿种,备受地质学界的关注。中国钾盐资源短缺,是7种(石油天然气、铜、铝、铁、锰、铬、钾盐)大宗紧缺矿产之一^[1]。目前,中国钾盐的消费量居世界第一,钾肥进口量居世界第二。

硼矿作为世界重要的化工原料矿物,是生产硼砂、硼酸和硼的各种化合物及元素硼的基础原料,主要被用于冶金、化工、建材、电器、机械、核工业、农业、医药等行业。目前硼的用途超过300种,其中玻璃工业、陶瓷工业、洗涤剂和农用化肥是硼的主要用途,约占全球硼消费量的75%。其中,46%用于玻璃纤维保温绝热材料,20%用于织物玻璃纤维,6%用于非纤维性硼硅酸盐玻璃和陶瓷,4%用于肥皂、洗涤剂、漂白剂,3%用于农业和搪瓷,其他占14%^[9]。在现代新技术上,硼与氢、锂、铍的化合物是高能喷气燃料;锆和钛的硼化物制成的陶瓷金属和氧化硼是超高温、超硬质材料,在国防航天工业中用途极大。硼的同位素吸收中子的能力很强,所以硼的化合物在原子反应堆中用作控制棒调节器和做防护屏的材料^[10-11],因此,具有极其广阔的市场应用前景。

随着玻璃工业、电子工业和硼的新产品开发和应用领域的扩大,中国对硼的需求量越来越大。据统计,2013年中国累计进口硼酸 20.4×10^4 t,同比增长27%;五水硼砂 68.7×10^4 t,同比增长14%^[12]。

3 “一带一路”国家钾盐资源与开采技术

3.1 钾盐资源

世界钾盐资源十分丰富,但是分布极不平衡,绝大部分在北半球,大型著名钾盐矿床都在北纬 $40^\circ \sim 60^\circ$ 之间^[3]。具有工业开采和商业开发价值、经济意义较高的优质钾盐矿床,90%以上的固体钾盐资源集中在加拿大、俄罗斯、白俄罗斯和德国4个国家,按储量,加拿大位居第一,俄罗斯位居第二,白

俄罗斯位居第三^[13-14]。

根据美国地质调查局(USGS)2014年公布的探明储量和2009年公布的基础储量数据及相关资料数据显示,“一带一路”沿线12个产钾国探明的钾盐储量约 49.2×10^8 t,基础储量约 63×10^8 t(以 K_2O 当量计算,下同),其中“一带”沿线国家分布有钾盐资源的主要有俄罗斯、白俄罗斯、土库曼斯坦、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、乌克兰、巴基斯坦等,探明的钾盐储量分别为 33×10^8 t、 7.5×10^8 t、 1.8×10^8 t、 1.4×10^8 t、 1.15×10^8 t、 0.25×10^8 t,巴基斯坦的探明储量不详;“一路”沿线国家分布有钾盐资源的主要有约旦、以色列、泰国、老挝等,探明的资源储量分别为 0.4×10^8 t、 0.4×10^8 t、 1.0×10^8 t、 0.2×10^8 t。这些钾盐资源主要分布于6个重要成钾盆地,包括柴达木盆地、塔里木盆地、呵叻盆地(含沙空那空盆地)、中亚盆地、死海盆地和涅帕盆地。

中国钾盐资源相对紧缺,且分布很不均匀。全球探明的钾盐资源储量约为 60×10^8 t^[15],而中国探明储量约 2.1×10^8 t,仅占全球储量的3.5%。中国钾盐以液体矿为主,主要分布在柴达木盆地和塔里木盆地的现代盐湖中,可溶性的固体钾盐矿较少,难溶和不溶性的含钾矿石较多,且质量差、可选性差^[1]。随着中国经济的发展,对钾盐的需求量越来越大,而中国钾盐的产量严重不足,对外依存度很大。为缓解中国钾盐紧缺的局面,一方面要充分利用国内的钾盐资源,开发新技术,综合利用不溶性钾盐;另一方面,应实施“走出去”战略,到国外勘探开发钾盐矿产资源。同时,也要对现有钾盐资源进行保护性开采,以确保中国钾盐的安全及可持续发展。在2015年世界钾盐钾肥大会上,郑绵平院士^①提出,中国应保护性开采有限的钾盐资源,不再扩大钾肥的产量,为钾肥生产和粮食安全提供持久的保障,并建议中国要加大国内找钾力度,加大地球物理和钻探工程的投入,进一步实施“油钾兼探”,同时加强对“走出去”政策的引导和支持力度。

俄罗斯已探明的钾盐储量大部分(约83%)集中在维尔赫涅卡姆斯克钾盐矿床,位于俄罗斯别尔姆斯克边区^[16];涅帕钾盐矿床是位于俄罗斯西伯利亚的未开发的另一个超大型钾盐矿床,预测光卤石资源量超过 4500×10^8 t,钾盐地质储量 700×10^8 t^[16-18]。

白俄罗斯位于世界第二大钾盐集中区,现有钾盐储量达 $80\times 10^8\text{t}$,约占世界钾盐储量的9.1%^[19],白俄罗斯目前开采的主要是斯塔罗宾钾盐矿,该矿是世界上最大的钾盐矿床之一,形成于3.5~3.6亿年前,湿盐的表内储量超过 $30\times 10^8\text{t}$,表外储量近 $10\times 10^8\text{t}$,现有储量可供企业开采数十年。斯塔罗宾钾盐矿所属公司为白俄罗斯钾肥自由控股公司,该公司的氯化钾产量占世界总产量的15%,其生产的钾肥有80%用于出口^②。白俄罗斯钾肥公司是世界上唯一将钾盐矿床的设计系统应用在实践中企业,其矿山提取率高达80%,该公司采用独特的技术对矿山进行开采,具备世界上领先的生产能力,生产的钾盐产品种类多、品质高,主要销往中国、印度、巴西、印度尼西亚和欧洲各国,是中国最大的钾肥供应商^③。

乌兹别克斯坦的钾盐资源相当丰富,比较著名的是丘别加坦钾盐矿,其钾盐主要赋存在丘别加坦背斜的北西翼,预测资源总储量约 $7\times 10^8\text{t}$ 。泰国和老挝的钾盐矿主要分布在呵叻高原中的呵叻盆地和沙空那空盆地中,泰国目前开发的矿区主要为邦内那隆矿区和乌隆矿区,预计资源储量分别为 $3.53\times 10^8\text{t}$ 和 $5\times 10^8\text{t}$ ^[17,20];老挝的钾盐主要赋存在万象和甘蒙地区,万象钾盐矿储量丰富,且品味高。泰国和老挝是中国开展国外找钾工作较早的地区,目前中国有多家公司在这两国进行勘探、开发钾盐矿,主要企业有中水电、云天化中寮矿业、中农钾盐公司、四川开元集团等,其中四川开元集团在老挝甘蒙、沙湾拿吉省拥有 194.8km^2 的探矿权和 41.69km^2 的采矿权^④。

“一带一路”国家地区的钾盐矿床主要有3种类型,分别为现代盐湖型、地下卤水型和沉积型^[21]。沉积型钾盐矿床在各类钾盐矿床中占主导地位,现代盐湖型和地下卤水型次之。“一带一路”地区大型及大型以上钾盐矿床共计23个,其中现代盐湖型钾盐矿4个,其余均为沉积型钾盐矿床(图1),比较典型的矿床见表1。

3.2 典型矿床

3.2.1 俄罗斯涅帕钾盐矿床

俄罗斯涅帕钾盐矿床(Nepa potassium salt deposit)分布在东西伯利亚含盐盆地的东北部,位于伊尔库茨克州北部下通古斯河与涅帕河交汇处,距涅帕村西南约30km。含钾盆地面积约 $2\times 10^4\text{km}^2$,是世

界上少有的大型含钾盆地。涅帕钾盐矿钾盐层赋存于下寒武统安加拉组下部加仁段,分布面积约 $1\times 10^4\text{km}^2$,自下而上分布有K1~K6六个钾盐层。钾盐层由盆地边缘向中心增厚,由数米增至超过150m,含钾矿层呈北东—南西向展布,钾盐埋藏北浅(600~900m)、南深(1300m)^[17,31]。涅帕钾盐矿床品位富(KCl平均品位25%~55%),几乎不含不溶杂质,含钾矿物以钾石盐和光卤石为主,已探明储量 $30\times 10^8\text{t}$ (K₂O),预测光卤石资源量超过 $4500\times 10^8\text{t}$,钾石盐资源量为 $700\times 10^8\text{t}$,是世界富优钾矿之一^[16-18,30-31]。经钻探,俄罗斯涅帕钾矿的最佳处有3层钾盐,第一层平均厚度约为3m,氯化钾的平均含量为36.18%;第二层平均厚度为11.5m,氯化钾平均含量为34.22%,约占储量的74%;第三层平均厚度为5.74m,氯化钾平均含量为35.17%^[37]。

涅帕钾盐盆地构造上属于西伯利亚地台南部涅帕—巴杜阿宾斯克弯窿南部的涅帕断错带。该带西北部为通古斯台向斜,东部为外贝加尔褶皱带。盆地基底为前寒武纪地层,由于其处于2个不同性质的大地构造带之间,构造比较复杂,褶皱、断裂发育^[31]。涅帕断错带东部、南部、西部是几个复杂背斜,中部为较稳定的加仁地块,该地块的中部为赋存钾盐矿床的苏林多—加仁拗陷。区域构造的总体方向为北东—南西向,断错带长400km,最大宽度在涅帕河上游,宽70~80km^[30-31]。苏林多—加仁拗陷从南西向北东延伸长250km,东西宽80km,拗陷边部陡直,底部平缓,致使矿体埋深南深北浅。拗陷内钾盐层受构造影响不大,产状平缓,四周盐丘发育^[30]。

赋存钾盐的安加拉组按岩性可分为上、下2段。上段主要是白云岩与硬石膏岩互层,下段称加仁段,也是含钾盐岩系,为岩盐、钾盐夹硬石膏与白云岩。加仁段按岩性又可分为5个亚层,分别为下硬石膏层、下岩盐层、中部含钾层、上岩盐层、上硬石膏层^[30-31]。含钾盐层作为一个整体,在盆地中的分布呈一定规律,钾石盐型含钾层主要分布在盆地的中心部位,有上、中、下3个带,以中带规模最大,涅帕钾盐矿床位于该带的东北端;光卤石岩型含钾层主要分布在盆地的外侧;钾石盐—光卤石型含钾层分布在其间^[17,30]。

涅帕钾盐盆地的成盐条件较好。西伯利亚含盐盆地位于西伯利亚地台南部,东、南、西三面为

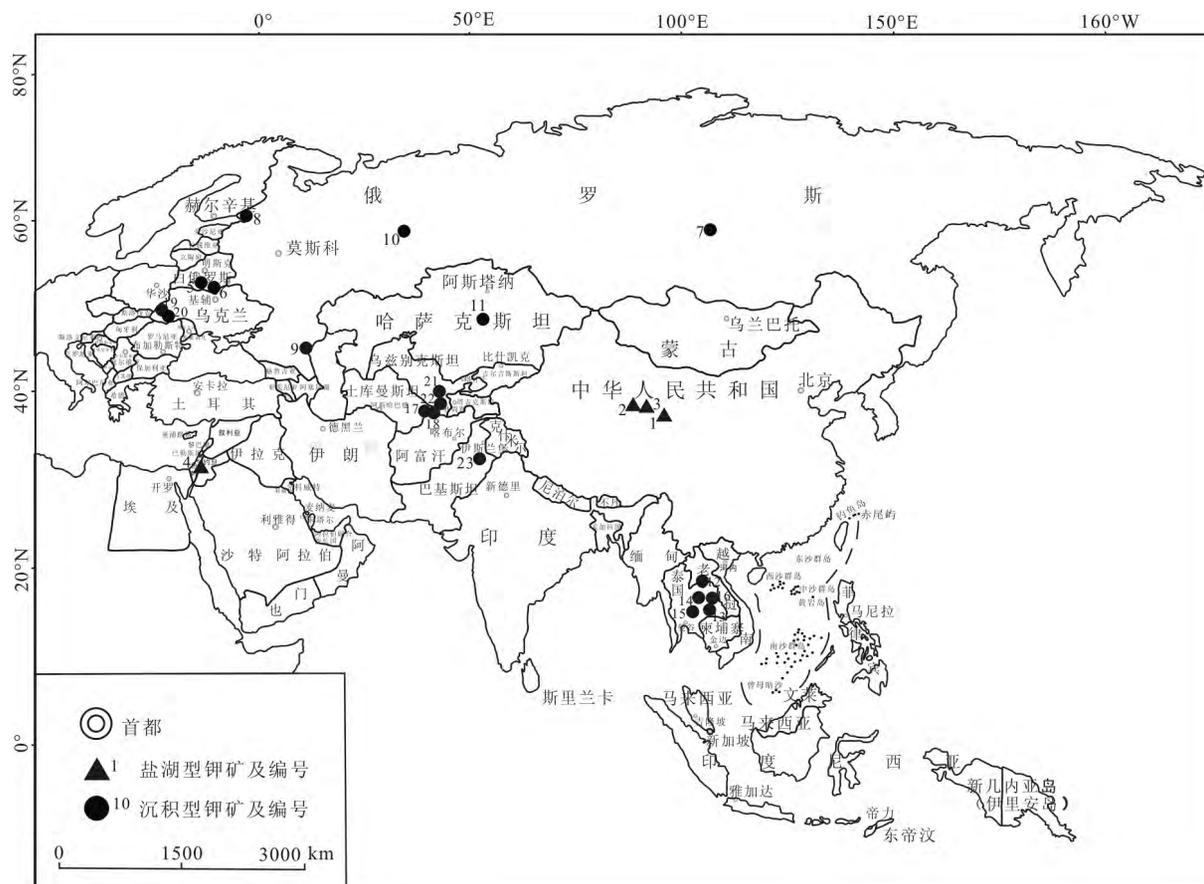


图1 “一带一路”地区大型及超大型钾盐矿床分布简图

Fig. 1 The distribution of large and superlarge potash deposits in the region of "One Belt, One Road"

外贝加尔褶皱带及断裂带。褶皱和断裂带的活动使盆地基底不断下陷,为盐类快速堆积提供了空间,并在盆地边缘形成台阶,阻碍高矿化度卤水外泄,水体盐度逐渐增高,为成盐成钾创造了极有利的构造条件^[30-31]。从古地理环境看,东西伯利亚盆地周围有部分水下隆起带,盆地东北部有1个宽100~150m的堡礁带,将盆地和广海分隔开。堡礁带之外是正常盐度的古杯类-叠层石碳酸盐沉积,其内是硬石膏-白云岩沉积,再向里出现了石盐、钾盐沉积^[30]。

涅帕钾盐矿床从20世纪30年代初开始预测,直至1979年找到钾盐矿床,经历了近半个世纪的时间,该矿于1983年完成盆地中部的初步勘查,到2007年才完成了详勘工作^[8,17-18,31]。涅帕钾盐矿由于地理位置偏远、气候恶劣、基础设施落后等问题,俄罗斯联邦对这一地区的资源一直未给予应有的重视,另

一方面对远东地区的矿产开发和利用需要投入大量资金,凭俄罗斯目前的经济实力,难以倾力顾及该地区的矿产资源开发^[18]。随着西伯利亚地区油、气等资源的开发,基础设施的不断完善,同时鉴于中国与俄罗斯的睦邻友好关系,再加上中俄双方在该地区的成功合作事例,涅帕钾盐矿床可作为中国利用境外钾盐资源的开发目标。

3.2.2 老挝万象钾盐矿床

老挝万象钾盐矿位于呵叻盆地西北角,呈三角形,面积约1100km²,是典型的沉积型钾盐矿床。呵叻盆地位于印支陆块北部,处于藏滇印支地槽褶皱系南段,地层发育,无明显岩浆活动与变质作用迹象,构造较简单^[32],面积约17×10⁴km²,地理位置处于泰国东北部和老挝中部。其南、西、北东三面分别被北柬埔寨、南乌江和湄公河深大断裂控制,构成一个独特的、长期较稳定的、持续下降的拗陷。盆

表1 “一带一路”地区典型钾盐矿床特征
Table 1 Geological characteristics of typical potash deposits
in the region of "One Belt, One Road"

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	资源储量 (K ₂ O/×10 ⁸ t)	开发现状	资料来源
1	2	罗布泊盐湖	90°53' 37°40'	中国	钾盐矿	现代盐湖型	石盐、钙芒硝、钾盐 镁矾、光卤石	Li、B、 Mg、Br	KCl 平均品位 1.40%	2.5	正在 开采	[22-26]
2	1	察尔汗盐湖	95°10' 37°01'	中国	钾硼矿	现代盐湖型	石盐、钾石盐、光卤 石、水氯镁石、 硼砂等	B、Mg、Br、Li Rb、Cs	地表卤水 KCl 2% 以上; 固体钾盐矿 KCl 1.68%~2.16%	1.5	正在 开采	[27-29]
3	5	斯塔罗宾	27°45' 52°48'	俄罗斯	钾盐矿	沉积型	岩盐、钾石盐、光卤 石、硬石膏、白云 岩、泥岩等	Mg、Br	—	100	正在 开采	[30]
4	7	涅帕	108°00' 59°02'	俄罗斯	钾盐矿	沉积型	石盐、光卤石、硬石 膏、白云岩、方硼 石、粘土矿物等	Mg、Br、B Sr、Li	KCl 25%~55%	30	未开 采	[16,18,30-31]
5	11	日梁	70°22' 48°39'	哈萨克 斯坦	钾盐矿	沉积型	石盐、硬石膏、光卤 石、硫镁矾石、磷 锂铝石	Na、 Mg	K ₂ O 10.3%	3.824	正在 开采	[18,30]
6	12	万象平原	102°41' 17°59'	老挝	钾盐矿	沉积型	石盐、光卤石、 硬石膏	Mg、Br、Na	KCl 平均 15.2%	10	正在 开采	[18,20,32-33]
7	13	呵叻盆地	103°44' 15°48'	泰国	钾盐矿	沉积型	石盐、光卤石、钾石 盐、硬石膏、泥岩	Br、Rb、Sr、B	K ₂ O 平均 8.64%	266.62	正在 开采	[17-18,30,34]
8	17	卡拉比尔	66°23' 37°29'	土库曼 斯坦	钾盐矿	沉积型	岩盐、钾石盐、光卤 石、硬石膏等	Mg、Na	KCl 27.32%	3.5	正在 开采	[18,30,35]
9	19	斯捷布尼克	23°39' 49°20'	乌克兰	钾盐矿	沉积型	石盐、钾石盐、光卤 石、硫镁矾、硬石膏	—	K ₂ O 10.8%	20	正在 开采	[30,36]
10	21	丘别加坦	66°08' 39°57'	乌兹别 克斯坦	钾盐矿	沉积型	钾石盐、光卤石、硬 石膏、泥岩、砂岩等	Mg、B	KCl 平均品位 36.88%	6.86	正在 开采	[17-18,30]

注：“—”表示数据无法获得；编号与图1中的编号相对应

地中部普潘隆起将盆地分为2个次级盆地，北面为沙空那空盆地，南面为呵叻盆地。沙空那空盆地与中国云南兰坪—思茅盆地毗连。

万象钾盐矿床的钾盐矿赋存在白垩系马哈沙拉堪组中^[30]，由光卤石、钾石盐、岩盐、硬石膏及泥岩、粉砂岩和少量砂岩组成。含盐系可分为上、中、下3个盐组，钾盐矿层（主要为光卤石和钾石盐）主要位于下盐组，且只分布在下盐组岩盐层上。其中光卤石分布较稳定，最厚95m，平均38m。钾石盐分布不稳定，最厚20m，平均6m。中盐组岩盐分布范围向盆地中部收缩，上盐组仅零星分布。钾盐分布面积4452km²。万象钾盐矿的矿体形态简单，埋深一般150m左右，最大埋深331.65m，厚16~100m（平均35m），KCl平均品位15.2%^[20]。矿床的矿石类型单一，顶板、底板及夹层多为石盐岩。万象钾盐矿

的主矿体产于塔贡组下段膏盐岩亚段中，呈层状产出，有加厚减薄现象，局部地段有分支复合现象。还存在透镜状的次要矿体，但次要矿体仅在局部地段具有工业开采价值。该矿床属碎屑岩系中的钾盐矿床，具有海源陆生特点^[18,32]。

万象钾盐矿床形成于气候长期干燥炎热的内陆盆地。钾盐盆地为石盐盆地的继承性盆地，成钾卤水主要来自于南部的呵叻盆地，钾盐矿通过海水的持续补给，经自身浓缩形成。在成钾过程中发生过3次较大的海侵，14次稍小的海侵^[32]。

老挝万象钾盐矿储量丰富，可开采周期较长。经过云南地质勘查局多年的勘探，探明该地区有丰富的钾盐资源，KCl储量7.18×10⁸t，目前该地区已初步探明的可采钾盐储量1×10⁸t以上，远景储量133.6×10⁸t，开发前景良好^[8]。

3.2.3 中国罗布泊钾盐矿床

罗布泊干盐湖位于新疆塔里木盆地东北端,是世界最大的第四纪干盐湖之一,属于现代盐湖型钾盐矿床。其北部为库鲁塔格山,东部为北山,南部为阿尔金山,西部为塔克拉玛干沙漠。湖区可以划分为北部区(即钙芒硝沉积区,包括罗北次级凹地等及其两侧抬升区)、南部大耳朵湖区及西部新湖区^[22]。罗布泊钾盐矿床位于罗布泊干盐湖北部,区内地势平坦,海拔788~790m。目前勘查的罗布泊钾盐矿床主要分布于罗北凹地,南北长80km,东西宽10~30km,面积约1300km²。经过多方勘察论证,罗布泊地区罗北凹地是以卤水钾矿为主,并伴生有液体NaCl、MgCl₂和固体石盐、钙芒硝的大型-超大型综合性盐类矿床^[17,38]。

罗布泊钾盐矿床是一种新型钾盐矿床^[1,23],罗布泊盐湖出现巨量钙芒硝沉积,富钾卤水主要赋存于钙芒硝的孔隙中,属于以液体钾盐矿为主、固液相矿共存的钾盐矿床,资源储量约 2.5×10^8 t。罗布泊盐湖卤水属硫酸镁亚型卤水,赋存钾、镁、钠、硫酸盐等成分,其品位超过工业品位,具有单独开采的价值^[24]。含盐系地层中也分布有一定规模的钾盐矿物,伴生有固体石盐、钙芒硝矿床,主要为杂卤石,其次为钾盐镁矾、杂硝矾、光卤石等,构成厚度数厘米至2m的含钾层,具有一定资源规模和潜在的开采价值^[22]。

罗布泊地区在大地构造上位于塔里木地块、东天山褶皱带和北山褶皱带的交会处,地层和构造比较复杂。区内断裂主要有孔雀河断裂、塞斯克断裂、疏勒河断裂、罗布泊南岸断裂、罗布泊东岸断裂等^[38]。罗布泊钾盐矿床区出露的地层均为第四纪湖泊碎屑沉积物和化学盐类沉积物,可分为中更新统、上更新统和全新统^[39]。矿区为一断陷湖盆,其北、东、西三面均与断裂相接,湖盆呈北深南浅的箕状。矿区位于箕状盆地中盐类沉积最厚的地段,构造不发育^[23,40]。

第四纪时期,由于喜马拉雅运动强烈,塔里木盆地西部抬升,东部相对沉降,统一的塔里木盆地逐渐解体,位于盆地东部的罗布泊地区成为最终汇水区。罗布泊盐湖钾盐矿的形成经历了3个阶段^[1,25,40]:①早更新世—中更新世早期,塔里木盆地为统一的大湖区,沉积环境以淡水湖泊沉积为主,罗布泊地区为咸水环境;②中更新世晚期—晚更

新世,出现南北分异,罗布泊北部开始出现盐湖沉积,南部仍为咸水湖环境;③晚更新世时期,受新构造运动影响,罗布泊北部较强烈抬升,使中下更新统露出水面,同时统一的罗布泊逐渐分割,形成次级成盐盆地,即罗北凹地。罗北凹地是罗布泊最大、最重要的成盐盆地。由于气候的周期性波动,罗布泊湖水经历多次涨落,罗北凹地受到间歇性补给,强烈的蒸发作用使湖水浓缩并保存下来,此作用反复进行,使得罗北凹地卤水中的含钾物质富集成矿。

3.3 钾盐开采技术与工艺

自然界可利用的钾资源包括可溶性钾资源和不溶性钾资源2类。前者是指自然界形成的各种含钾氯化物、硫酸盐、硝酸盐、硼酸盐等可溶性的含钾盐类矿物,包括含钾卤水经蒸发沉积形成的可溶性固体钾盐(如钾石盐、光卤石等)、盐湖卤水、地下含钾卤水等液体矿。不溶性钾资源主要是指富含钾长石、霞石、白云母或水云母类粘土矿物的各类含钾岩石^[41-42]。

可溶性固体钾盐的开采主要有旱采和水采。旱采可分为地下开采和露天开采,其开采方式对各种盐类矿床都基本适用,水采分为硐室水溶法和钻井水溶法;液体矿床(地下卤水)主要采用钻井抽卤法开采。目前,国外广泛采用竖井开拓的传统房柱法开采钾盐矿石,该方法对品位高、埋深1000m以内的矿体较适用^⑤。

可溶性钾盐资源是目前世界范围内开发利用的主要对象。固体可溶性钾盐的组分较复杂,可分为氯化物型、硫酸盐型和混合盐型3种,生产钾盐的工艺一般为溶解结晶法和浮选法2种^[43]。溶解结晶法主要是向含钾岩盐中加入KCl溶液,加热至一定的温度,使固液分离,可得到固相的氯化钠,同时对液相进行冷却结晶、分离、洗涤,进而得到KCl产品,该工艺的优点在于,对高钠低钾矿石中钾的回收也有显著的作用^[44]。浮选法是根据钾盐矿物表面物理和化学性质的差异,利用浮选药剂依据矿物的可浮性进行选别,然后对选别出的浮选泡沫进行洗涤、干燥后得到相应的含钾产品^[43-44]。

液体可溶性钾盐矿提钾主要采用冷分解-浮选工艺和反浮选-冷结晶工艺。冷分解-浮选法是先对含钾卤水进行蒸发浓缩,在盐田中得到光卤石矿,然后再对光卤石进行冷水分解,使其中的氯化镁溶于水,剩余的主要是氯化钾和氯化钠的混合

盐,再利用氯化钾与氯化钠在捕收剂作用下的疏水性差异,使钾、钠分离。该工艺的主要优点是工艺流程相对简单、能耗较小,缺点是产品物理性能不佳、粒度细,目前该方法正逐渐被淘汰^[43,45]。反浮选-冷结晶工艺是通过反浮选除去矿浆中的氯化钠,得到低钠光卤石,再通过冷结晶工艺控制低钠光卤石的分解速度,然后利用特殊的冷分解结晶器改善氯化钾的结晶条件,进而得到高质量的氯化钾晶体^[44-45]。该工艺流程虽较复杂,但得到的产品质量高、粒度较粗,回收率也较高,是目前以光卤石为原料制取氯化钾的最优工艺。

不溶性钾资源提钾的工艺主要有煅烧法、湿化学法、微生物法等。煅烧法是利用不溶性钾矿提钾的常用方法,该工艺是将富钾岩石与其他配料在高温(1100~1500℃)条件下煅烧,破坏钾长石等含钾矿物的晶体结构,使富钾岩石中游离出来的钾与其他元素形成可溶性钾盐,达到提钾的目的^[42,46]。湿化学法提钾的原理是采用酸、碱等化学试剂在溶液中分解钾矿石,使钾离子溶离出来,进而得到可溶性的钾盐,分离后制成纯度较高的钾肥。该工艺能耗较低,产品纯度高,而且可同时回收其他有价值的组分^[46-47]。生物法提钾主要是指利用钾细菌来提钾,其原理是利用钾细菌生物的分解作用,将K元素转化成能被植物吸收的有效钾,转化率可达12%~14%。该方法简便、无污染,而且可以充分利用钾含量低的钾矿石,适合土法生产,但高效稳定的钾细菌来源是一个需要解决的问题^[46]。

中国不溶性钾资源极为丰富,中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究室根据已有资料估计,中国的不溶性钾资源量大于 $1000 \times 10^8 \text{t}$,所含的 K_2O 资源量大于 $100 \times 10^8 \text{t}$,而且不溶性钾资源在中国普遍分布,如果不溶性钾资源能够大规模开发利用,那么中国将不缺钾^⑥。

4 “一带一路”地区硼资源及典型矿床地质特征

4.1 硼矿资源

世界硼矿资源丰富,但分布不均匀。73%的储量和70%的基础储量分布于美国、土耳其、俄罗斯和哈萨克斯坦,美国、土耳其两国储量分别达 $4000 \times 10^4 \text{t}$ 和 $6000 \times 10^4 \text{t}$ 。据美国地质调查局(USGS)2013年公布的数据,世界探明硼储量约 $2.1 \times 10^8 \text{t}$ 。中国

探明的硼储量为 $3200 \times 10^4 \text{t}$,位居世界第四,其他探明硼资源分布在秘鲁、智利、阿根廷、玻利维亚等南美安第斯地区国家^[48]。

“一带一路”沿线国家分布着丰富的硼资源,探明硼储量约为 $1.46 \times 10^8 \text{t}$,约占世界探明硼储量的69.5%。这些国家主要位于“一带”沿线地区,主要有土耳其、俄罗斯、哈萨克斯坦、塞尔维亚等国家,资源储量分别为 $6000 \times 10^4 \text{t}$ 、 $4000 \times 10^4 \text{t}$ 、 $1400 \times 10^4 \text{t}$ 、 $1500 \times 10^4 \text{t}$ (推断资源量)。

土耳其的硼资源总量位居世界第一,总储量 $6000 \times 10^4 \text{t}$,且品位高、质量优,其硼矿集中分布在土耳其西北部小亚细亚半岛的安纳托利亚高原,主要的硼矿产地是屈塔希亚省埃迈特地区、埃斯基谢希尔省科尔卡地区和凯斯特莱克地区。矿床类型主要为新近纪火山沉积型,且发育于浅水湖相沉积中,代表矿床有比加迪奇、凯斯特莱克、埃迈特、科尔卡等。硼矿类型有天然硼砂、硬硼钙石和钠硼解石3种,矿石中 B_2O_3 的平均品位高者可达37%~42%,低者为26%~27%。科尔卡主要产天然硼砂,比加迪奇、凯斯特莱克和埃迈特埋藏大量硬硼钙石,常用于生产硼酸^[10-11]。

俄罗斯的硼矿资源也很丰富,储量仅次于土耳其,总储量为 $4000 \times 10^4 \text{t}$,与美国并列世界第二,储量集中分布在雅库特南部,矿床类型为镁矽卡岩和钙矽卡岩型,硼矿石以硼镁铁矿为主,矿石含硼(B_2O_3)达34%^[11]。哈萨克斯坦的硼矿分布在黑海北岸的因德尔地区因德尔坦城,以硼镁石、水方硼石为主,储量为 $1400 \times 10^4 \text{t}$ ^[9]。塞尔维亚的硼资源分布在贾达尔(Jadar)盆地,为一种特殊的超大型锂硼矿床,矿石矿物是一种既含锂也含硼的矿物,为世界独有,也是世界少数几个锂和硼资源量超过百万吨的矿床之一,其资源量已达 $1500 \times 10^4 \text{t}$ ^[49]。

中国的硼矿资源比较丰富,硼矿种类多,但矿产地分布很不均匀,绝大多数产地和储量集中分布在东北和西南地区的辽宁、吉林、青海、西藏四省区,主要分布在辽(宁)东-吉(林)南沉积变质型硼矿成矿带、青藏高原盐湖硼矿成矿带及江苏六合冶山-广西钟山黄宝矽卡岩型硼矿成矿带3个成矿带中^[50]。另外,中国绝大多数硼矿石的品位较低, B_2O_3 含量低于12%的硼矿石约占全国硼矿储量总数的90.74%^[12]。

“一带一路”国家硼矿床类型有火山沉积型、现代盐湖型、矽卡岩型和沉积变质型^[51],大型及大型以

上硼矿床共计 25 个(图 2),主要代表性矿床见表 2。土耳其的硼矿床主要为火山沉积型;中国辽宁和吉林的硼矿床为沉积变质型,西藏和青海的硼矿床为现代盐湖型;俄罗斯的硼矿床主要为矽卡岩型。中国具工业意义的硼矿床只有沉积变质型硼矿、现代盐湖沉积型硼矿和矽卡岩型硼矿,开发利用的主要为前 2 种类型,而矽卡岩型硼矿和地下卤水型硼矿规模较小。当前中国海相沉积型硼矿、热液型硼矿、火山沉积型硼矿只具有矿床成因学意义^[63]。

4.2 典型矿床

4.2.1 土耳其比加迪奇硼矿床

比加迪奇(Bigadic)硼矿床位于土耳其安拉托尼亚硼酸盐区东南,巴勒克埃希尔省东南 37km 处。该矿床是世界上最大的硼矿床,硼酸盐层主要以硬硼钙石和钠硼解石为主,资源量居世界之首,已探明储量多达 $2.99 \times 10^8 \text{t}$,如果再加上远景储量,总资源储量超过 $8.95 \times 10^8 \text{t}$ ^[58]。

比加迪奇硼矿床是典型的火山沉积型矿床,区内分布大面积的火山岩,西北部出露部分基底杂岩。矿床发育上、下 2 个矿层,中间被厚层的凝灰岩分开,并且上、下 2 矿层均以硬硼钙石和钠硼解石为主,这 2 种矿石中 B_2O_3 的平均含量分别为 30% 和 29%,是目前工业上开发利用的主要硼酸盐矿物,其他硼酸盐仅具有矿物学研究意义,而暂无工业利用价值^[58-59]。硼酸盐矿物主要由硬硼钙石、钠硼解石、水方硼石、钠钙硼石等组成;脉石矿物主要有方解石、白云石、石膏、硬石膏,以及蒙脱石等粘土矿物。该矿床上、下硼酸盐矿层在不同剖面,矿物组合不尽相同,硼酸盐矿物相也有差别。从地球化学特征看,下硼酸盐层沉积时卤水中比上硼酸盐层富含 Ca 和 Sr^[58]。硼酸盐矿物的产出形式常见的有结核状、纤维状、薄层状、浸染状晶体、细脉状、块状等。下硼酸盐层呈黄白色,致密、半致密,中-薄层状;上硼酸盐矿呈结核状、薄层状、透镜状。

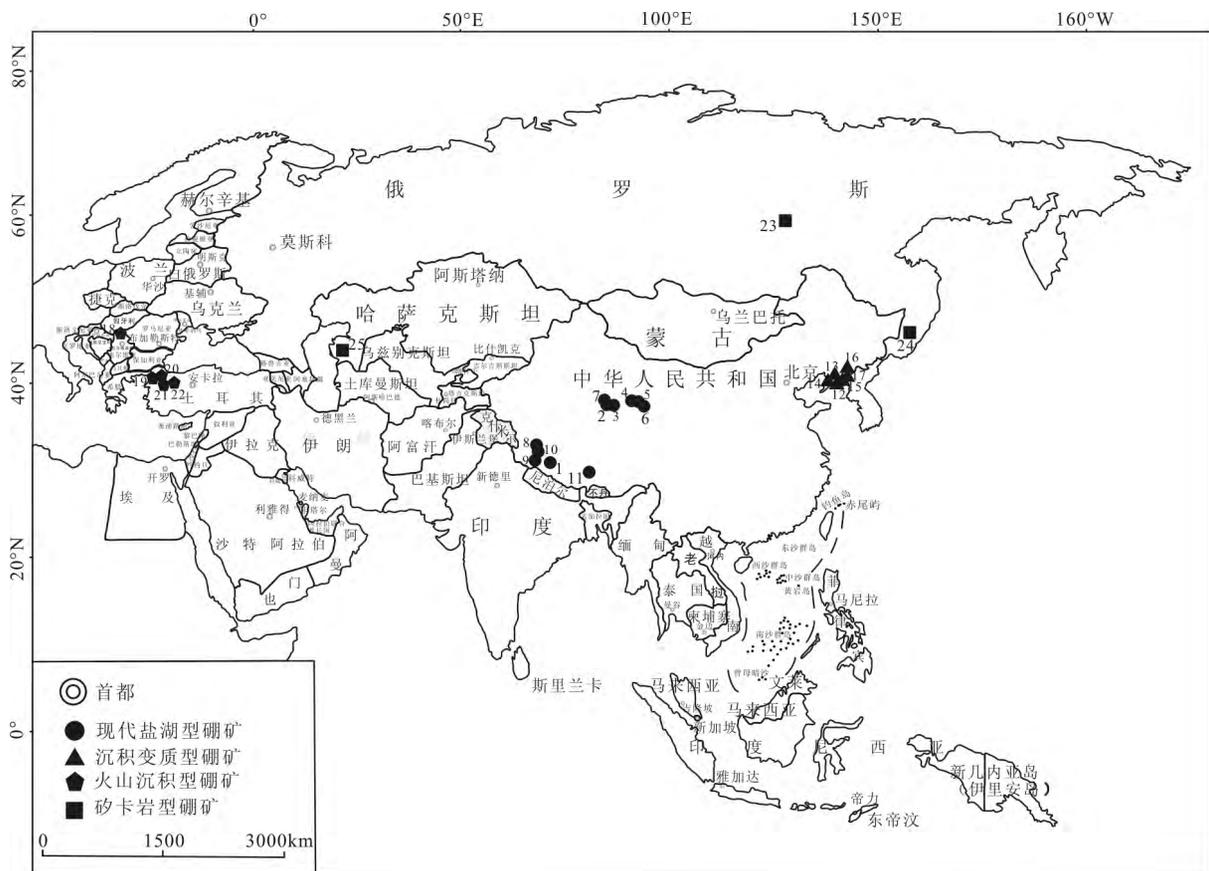


图 2 “一带一路”地区大型及超大型硼矿床分布简图

Fig. 2 The distribution of large and superlarge boron deposits in the region of "One Belt, One Road"

比加迪奇硼酸盐矿床发育在中新统湖相沉积中,在此期间火山活动十分强烈,为湖相沉积提供了重要的物质来源。火山-沉积地层的总厚度超过1200m,上、下2层硼酸盐矿层的厚度分别为20~110m和35~130m^[59]。这套火山-沉积地层受挤压作用较强,形成大小不同的北东-南西走向的数个背斜和向斜。在上硼酸盐层沉积之后,硼酸盐层及其所赋存的沉积层被北西-南东向和北东-南西向的正断层错断。中新世火山-沉积之前,前中新统基底上所发生的断层活动对比加迪奇矿区硼酸盐成矿具有决定性意义^[58],断陷活动不仅形成了多个或孤立存在或彼此相连的断陷盆地,而且为深部富硼的热液和热泉向上运移进入盆地提供了通道。该地区的东北部至今发育许多热泉,热泉的周围遍布钙华,虽然泉水中硼含量不高,但不断对常年湖进行补给,也是湖水硼的一个重要来源。

比加迪奇矿区中新世火山-沉积地层与下伏古生代基底杂岩之间为不整合接触关系,产状受古地理控制,所以沉积层厚度不等,硼酸盐沉积前后均为碳酸盐岩相。矿化发生在卤水蒸发速度快、盐度高、碱度较低阶段。在此阶段,盆地部分干化事件较为频繁,盆地较深处出现间歇湖或卤水洼地,富硼热泉或含硼卤水进入到盆地中,造成盆地中高盐度的湖水硼过饱和,从而沉淀出硼酸盐,最终形成了比加迪奇硼酸盐矿床^[58-59]。

4.2.2 塞尔维亚贾达尔盆地超大型锂硼矿床

塞尔维亚贾达尔(Jadar)盆地超大型锂硼矿床是一种特殊的矿床,该矿床的矿石矿物是一种既含锂也含硼的矿物,为世界独有。矿床位于塞尔维亚贾达尔盆地,北东距首都贝尔格莱德(Belgrade)约120km,基础设施齐全,交通较为便利。目前该矿床推断的矿石量为 1.146×10^8 t,其中 Li_2O (含量1.8%)为 206×10^4 t, B_2O_3 (含量13.1%)为 1500×10^4 t,根据中国对硼矿床规模的划分, 50×10^4 t以上即为大型矿床,所以贾达尔锂硼矿床是一个超大型的硼矿床^[49]。

贾达尔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(Paiimmiai Basin)之间。瓦尔达尔构造带与硼酸盐矿床之间有密切联系,该地区已发现的硼酸盐矿床都位于瓦尔达尔构造带^[49]。贾达尔盆地是一个北西-南东向的凹陷盆地,由古近系一新近系中新统湖相和海相沉

积物充填,部分被第四系冲积物覆盖^[64]。盆地内的主要岩石类型有页岩、粉砂岩、细粒砂岩、粗粒砂岩、凝灰岩等。矿区内矿体围岩为中新统湖相沉积岩,矿床的矿石矿物为羟硼硅钠锂石,化学式为 $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$,贾达尔盆地是世界上唯一发现该矿物的地方。羟硼硅钠锂石中 B_2O_3 含量为47.2%, Li_2O 含量为7.3%;该矿物属于单斜晶系,硬度4~5,密度为 $2.46\text{g}/\text{cm}^3$ ^[49,65],羟硼硅钠锂石在上、中、下矿层中的含量分别为10%~20%、5%~10%和30%~50%。主要的脉石矿物有方解石、白云石、钾长石、金红石、钛铁矿、黄铁矿、细粒白云母等。

贾达尔盆地硼酸盐矿床产于消减板块边缘的伸展构造活动区,矿床相关的岩石类型包括凝灰岩、灰岩、泥灰岩、粘土岩、石膏,以及陆源泥质岩、砂岩等。贾达尔硼酸盐矿床赋存于中新统湖相沉积中,由一系列古近纪一新近纪油页岩、泥晶白云岩及凝灰岩和湖相蒸发岩组成^[49,66],不存在花岗岩岩体或海相沉积的其他源岩,且硼矿体均产于凝灰岩层的附近层位,所以硼矿床的形成与凝灰岩层具有密切的时空关系^[49]。

4.2.3 中国辽宁后仙峪硼矿

中国辽宁后仙峪硼矿位于辽宁省大石桥市黄土岭镇后仙峪村,矿区位于大石桥市东南41km处。后仙峪硼矿床是典型的沉积变质再造型硼矿,这也是中国重要的硼矿工业类型。后仙峪硼矿区位于华北地台辽宁台背斜营口-宽甸古隆起西端,为辽东-吉南硼矿带的一部分,地表出露的地层均为元古宇辽河群变质岩系,地层在该硼矿区倒转,由里尔峪组、高家峪组、大石桥组、盖县组组成^[67-68]。

后仙峪硼矿床工业类型为遂安石硼镁石型矿床^[69],以富含遂安石为主要特征, B_2O_3 品位高,含硼矿物结构粗大,矿石致密,不同于辽、吉地区已知的其他硼矿床。该硼矿产于含硼建造中部变质凝灰岩所夹的镁橄榄石岩、硅镁石岩、白云大理岩中,矿体呈层状、透镜状,矿石矿物主要有硼镁石、遂安石、硼镁铁矿等,脉石矿物主要有镁橄榄石、蛇纹石、金云母、透闪石、方解石、白云石、菱镁矿、磁铁矿等^[70]。

矿区内的硼矿床产于辽河群里尔峪组含硼变粒岩段中。该岩段具有特征性的岩石组合,主要由角闪变粒岩、黑云变粒岩、透辉变粒岩、透闪变粒岩、电气变粒岩等岩石构成。含硼蛇纹岩、大理岩

表 2 “一带一路”地区典型硼矿床特征
Table 2 Geological characteristics of typical boron deposits in the region of "One Belt, One Road"

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 (B ₂ O ₃ %)	资源储量 (B ₂ O ₃ ×10 ⁴ t)	开发现状	资料来源
1	1	西藏扎布耶	84°04' 31°21'	中国	锂硼矿	现代盐湖型	扎布耶石、硼砂、含锂白云石、石盐、钾石盐、水碱、芒硝等	Li、K、Br、Rb、Cs	18%~21%	963	正在开采	[6,52-53]
2	6	察尔汗盐湖	95°10' 37°01'	中国	钾硼矿	现代盐湖型	石盐、钾石盐、光卤石、水氯镁石、硼砂等	B、K、Mg、Br、Li、Rb、Cs	液体 0.5~1.37g/L	356.84	正在开采	[54-55]
3	12	凤城翁泉城	124.07° 40.45°	中国	硼镁铁矿	沉积变质型	硼镁石、遂安石、磁铁矿、硼镁铁矿、蛇纹石、金云母	Mg、Fe	7.2%	2185	正在开采	[56-57]
4	14	营口后仙峪	122.56° 40.54°	中国	硼矿	沉积变质型	硼镁石、遂安石、镁橄榄石、蛇纹石、金云母、方解石、菱镁矿等	—	平均 12%	68	正在开采	[56-57]
5	18	贾达尔盆地	19.43° 44.28°	塞尔维亚	锂硼矿	火山沉积型	羟硼硅钠锂石、方解石、白云石、钾长石、金红石、黄铁矿	—	13.1%	1500	未开采	[49]
6	19	比加迪奇 Bigadic	28.13° 39.39°	土耳其	硼矿	火山沉积型	硬硼钙石、钠硼解石、方解石、白云石、石膏	—	平均 30%	29900	正在开采	[58-59]
7	20	凯斯特莱克 Kestelek	29.21° 40.20°	土耳其	硼矿	火山沉积型	硬硼钙石、钠硼解石、方解石、石英	—	—	1000	正在开采	[58,60]
8	21	埃默特 Emet	29.26° 39.34°	土耳其	硼矿	火山沉积型	硬硼钙石、方解石、白云石、天青石	—	43%~49%	110000	正在开采	[58]
9	22	科尔卡 Kirka	30.53° 39.27°	土耳其	硼矿	火山沉积型	硼砂、方解石、白云石、天青石等	—	20%~25%	10000	正在开采	[58,61]
10	23	塔约扎诺耶 Tayozhnoye	119.85° 59.03°	俄罗斯	硼矿	砂卡岩型	硼镁石、硼镁铁矿、磁铁矿、白云质大理岩、页岩	—	34%	10000	未开采	[62]

注：根据中国对硼矿床规模的划分，B₂O₃≥50×10⁴t 为大型矿床；“—”表示数据无法获得；编号与图 2 中编号相对应

即赋存在该岩段中，并构成区域上唯一的含硼层位^[71]。里尔峪组以含硼量高为突出特点，岩石的含硼量一般高于克拉克值数十倍至数百倍，高于正常酸性岩浆岩平均值的百余倍^[70]。

后仙峪硼矿大地构造位置处于华北地台北缘辽东台背斜营口-宽甸隆起西端虎皮峪倾斜背斜上，产于辽-吉古元古代裂谷中，裂谷的发展演化直接控制了矿床的形成。五台运动以前，辽东-吉南地区为一克拉通，五台运动使克拉通发生裂陷，形成与海水沟通的裂陷盆地。在盆地沉降过程中，海底火山喷发活动频繁，富硼、镁的火山物质溶于海水中，与海水相互作用，形成了层状的化学沉积矿床与岩石，为该区硼矿床的形成奠定了原始的物质基础^[67,70]。矿区内主要构造为后仙峪向形背斜，北翼在西端转向南倾构成马蹄形，西端抬起、收敛，向东倾伏、开阔，岩层倒转，核部主要为里尔峪组混合花岗岩。矿区硼矿含矿岩层均向南倾，倾角平缓，共存在 5 个矿化带，其中 2 号矿化带规模最大，矿化最

佳，矿化出露较长，矿体厚度较稳定，呈似层状^[72]。

4.3 硼矿开发工艺

世界上含硼的天然矿物有 100 多种，而在硼工业中实际开发利用的只有斜方硼砂矿、硬硼钙矿、硼镁矿、盐湖卤水等^[73]。从硼矿石中提取得到的硼化物主要是硼酸和硼砂。中国的硼矿资源主要以硼镁石型固体矿物为主，生产硼砂的主要方法有水浸溶解法、硫酸法、碱解法、碳碱法等。

水浸溶解法用于加工斜方硼砂矿，主要步骤是将原矿石破碎，用水加热浸取，然后进行固液分离，将得到的溶液冷却结晶，控制不同的结晶温度就可得到不同的硼砂产品^[74]。硫酸法是在硼镁矿粉中加入硫酸，生成溶于水的硼酸，然后将滤液中的硼酸分离，加入纯碱溶液中反应，可生成溶于水的硼砂，滤液经过浓缩、冷却后析出硼砂晶体^[75]。碱解法制取硼砂是将硼镁矿煅烧后，将其粉碎得到熟矿粉，然后在熟矿粉中加入氢氧化钠溶液进行碱解，碱解后的滤液经蒸发浓缩、冷却后得到偏硼酸钠结晶，

然后加水溶解,再与小苏打中和,冷却后得到硼砂结晶^[75]。碳碱法是目前制取硼砂的主要方法,该工艺的一般过程是,将焙烧处理过的硼镁矿粉与碳酸钠溶液混合,然后通入二氧化碳(石灰窑气)进行碳酸化,滤液经浓缩,冷却析出硼砂结晶。该方法的优点是工艺流程短、硼砂收率较高,能够加工低品位硼镁矿,比较适合中国硼矿资源开发^[76]。

目前生产硼酸的方法主要有硫酸一步法、硼砂酸化法、碳氨法等。硫酸一步法是从硼镁石矿中制取硼酸的主要方法,该法是在一定温度下用硫酸与硼镁石反应,生成的硼酸溶入液相中,然后将残渣和含硼酸的滤液进行分离,利用硼酸在水中的溶解度随温度的降低而减小的性质,将滤液冷却,使硼酸从液相中结晶析出^[77-78]。硼砂酸化法是以硼砂和硫酸或硝酸为原料,将硼砂酸解得到硼酸和硫酸钠,然后根据二者溶解度的不同,蒸发浓缩结晶后,过滤得到硼酸。该工艺流程短、技术成熟、基本无环境污染。碳氨法是以硼镁石和碳酸铵为原料制取硼酸的工艺,先将硼镁石进行焙烧活化,然后与碳酸氢铵混合生成硼酸铵,经加热后释放出氨气,便可得到硼酸。该方法可直接加工硼矿生产硼酸,比间接法生产所需的酸、碱消耗少,但工艺流程复杂、能耗较大,存在产品质量差等问题^[79]。

工业上从卤水中提取硼主要运用酸化沉淀法、萃取法等方法。酸化沉淀法是利用硼酸在一定的酸性溶液中溶解度较小的特点来提取硼,加酸调节含硼溶液的酸度,使溶液中的硼转化为溶解度较小的硼酸,从而分离出硼,溶液中 B_2O_3 的浓度达到2%~3%时就可利用该方法提取硼^[79]。萃取法最早应用于从含硼卤水中提取硼酸,近年来国内外对溶剂萃取法的研究也较多,主要是利用萃取剂和硼酸能形成一种复合型产物,从而实现硼酸与卤水的分离。该工艺对硼的萃取率较高、原材料消耗少、成本低,具有较好的经济效益,可用于加工中低品位的含硼卤水^[45,77]。

5 讨论

为缓解中国钾盐和硼矿资源日益紧张的局面,中国应加大“走出去”的政策扶持力度,鼓励国内企业积极“走出去”,合理利用境外资源,以“一带一路”经济战略为依托,充分利用好“两种资源、两个

市场”。本文从资源分布情况、开采技术及开发条件出发,结合各地区钾盐及硼矿资源特征,讨论并提出中国利用“一带一路”沿线国家钾盐及硼矿资源的首选地区。

5.1 利用境外钾盐资源的首选地区

“一带一路”沿线地区钾盐资源储量丰富且开发利用程度较低的国家主要有泰国、老挝和俄罗斯的涅帕地区。泰国已探明的钾盐资源储量约 $1.0 \times 10^8 t$,远景储量超过百亿吨,主要开发了2个钾盐矿床,其他地区的钾盐矿还未开发。泰国东部呵叻高原的钾盐矿区的矿石主要为光卤石和钾石盐,且矿层埋藏浅,赋存相对稳定,对开采比较有利,而且泰国供水、供电条件好,交通条件也很优越,能基本满足建厂需要。老挝的钾盐主要赋存在万象和甘蒙地区,开发程度很低,资源储量大,预测资源量也超过百亿吨,矿石以光卤石为主,老挝钾盐矿的赋存条件与泰国钾盐矿相似,供水、供电条件较好,但交通条件差,不能大规模开采。目前,中国有多家企业在老挝开发钾盐资源,采用的生产技术主要有“地下早采+正浮选”工艺和“地面水采+浓缩结晶”工艺,主要借鉴国内的钾盐生产技术^[80]。涅帕钾盐矿床是俄罗斯未开发的一个超大型钾盐矿,矿床已探明储量 $30 \times 10^8 t$,预测光卤石资源量超过 $4500 \times 10^8 t$,钾石盐资源量为 $700 \times 10^8 t$,且品位高,在距矿区最近的城市建有铁路,矿区附近分布有河流,供水条件良好,在距矿区300km处有水电站可供电,基础设施基本能满足建厂需要,在开采技术方面采用坑采-浮选方案^[37]。另外,涅帕钾盐矿区还赋存有油气资源,中国与俄罗斯在该地区也有过成功合作的事例,所以可以对该矿床进行投资开发。

综上所述,泰国和老挝地理位置比较优越,建设条件良好,矿体内部地质构造简单,建设安全性好,投资成本低,开采技术成熟,可作为中国利用境外钾盐资源的首选国家,中国应进一步加大投资和勘探力度,合理充分地利用两国钾盐资源。另外,俄罗斯涅帕钾盐矿开发前景良好,建议中国将开发涅帕地区的钾盐资源列入规划。

5.2 利用境外硼资源的首选地区

在“一带一路”分布有硼资源的国家中,塞尔维亚的贾达尔锂硼矿床还未被开发,且资源储量大,具有很好的开发前景。目前贾达尔锂硼矿床中硼

矿推断资源量为 $1500 \times 10^4 \text{t}(\text{B}_2\text{O}_3)$, 锂矿推断资源量超过 $200 \times 10^4 \text{t}(\text{Li}_2\text{O})$, 无论是硼资源还是锂资源, 其规模均达到超大型。目前在该地区拥有矿权的企业有力拓(Rio Tinto)、泛全球资源(Pan Global Resources)和超锂(Ultra Lithium), 中国地勘单位正在这一矿区进行勘查工作^[49]。该矿床地理位置优越, 交通运输系统健全, 基础设施齐全。矿床的开采方式为井采, 生产硼酸的技术为酸化-结晶法, 各项技术均较成熟, 不需要开发新技术。建议中国加大在该地区的勘查力度, 积极寻求合作开发。

6 结 论

(1)“一带一路”沿线国家探明的钾盐储量约 $49.2 \times 10^8 \text{t}$, 基础储量约 $63 \times 10^8 \text{t}$ 。钾盐资源主要分布在俄罗斯($33 \times 10^8 \text{t}$)、白俄罗斯($7.5 \times 10^8 \text{t}$)、中国($2.1 \times 10^8 \text{t}$)、土库曼斯坦($1.8 \times 10^8 \text{t}$)、哈萨克斯坦($1.4 \times 10^8 \text{t}$)、乌兹别克斯坦($1.15 \times 10^8 \text{t}$)、乌克兰($0.25 \times 10^8 \text{t}$)、约旦($0.4 \times 10^8 \text{t}$)、以色列($0.4 \times 10^8 \text{t}$)、泰国($1.0 \times 10^8 \text{t}$)、老挝($0.2 \times 10^8 \text{t}$)等国家。矿床类型主要有沉积型、现代盐湖型、地下卤水型, 沉积型占主导地位, 以固体钾盐为主。中国钾盐资源相对紧缺, 且分布不均匀, 以液体矿为主, 主要为现代盐湖型矿床, 对外依存度很大。为缓解中国钾盐紧缺的局面, 中国应实施“走出去”战略, 利用境外钾盐资源, 泰国和老挝应作为中国重点投资开发的地区, 其次是俄罗斯的涅帕地区。

(2)可利用的钾资源包括可溶性钾资源和不溶性钾资源2类, 目前开发利用的主要对象是可溶性钾盐资源, 包括固体可溶性钾盐和液体可溶性钾盐。生产工艺有溶解结晶、浮选法、冷分解-浮选工艺和反浮选-冷结晶工艺。中国可溶性的固体钾盐矿较少, 而不溶性钾盐矿十分丰富, 应开发新技术综合利用不溶性钾盐。

(3)“一带一路”沿线国家硼资源探明储量约为 $1.46 \times 10^8 \text{t}$, 约占世界探明硼储量的69.5%, 主要分布在土耳其($6000 \times 10^4 \text{t}$)、俄罗斯($4000 \times 10^4 \text{t}$)、中国($3200 \times 10^4 \text{t}$)、哈萨克斯坦($1400 \times 10^4 \text{t}$)、塞尔维亚($1500 \times 10^4 \text{t}$)等国家。“一带一路”地区硼矿床类型有火山沉积型、现代盐湖型、砂卡岩型和沉积变质型。塞尔维亚贾达尔盆地的钾盐资源开发前景较好, 中国应积极寻求合作开发, 以保障中国硼资源的安全。

(4)工业中实际开发利用的硼矿石主要有斜方硼砂矿、硬硼钙矿、硼镁矿、盐湖卤水等几种, 提取得到的硼化物主要是硼酸和硼砂。碳碱法是目前制取硼砂的主要方法, 该方法能够加工低品位的硼镁矿, 比较适合中国硼矿资源; 硼砂酸化法制取硼酸技术较为成熟且基本无环境污染; 酸化沉淀法和萃取法是工业上从卤水中提取硼的主要方法。

致谢:在资料收集过程中得到中国地质科学院矿产资源研究所李小赛助理研究员与中国地质大学(北京)乔东海在读硕士生的帮助, 论文成文后得到中国地质调查局发展研究中心部署室张万益研究员的认真审阅并提出宝贵意见, 在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献

- [1]赵元艺, 焦鹏程, 李波涛, 等. 中国可溶性钾盐资源地质特征与潜力评价[J]. 矿床地质, 2010, 29(4): 650-656.
- [2]邢万里, 陈其慎. 中国钾盐资源安全简析[J]. 中国矿业, 2013, 22(12): 11-14
- [3]唐尧. 中国钾盐资源需求前景分析[J]. 地质论评, 2015, 61(增刊): 812-813
- [4]唐尧. 中国硼矿资源勘查现状及前景分析[J]. 国土资源情报, 2015, (3): 24-28.
- [5]周飞飞. “一带一路”, 点燃地质工作新梦想[J]. 国土资源, 2015, 1(1): 22-25.
- [6]曹文虎, 吴蝉, 等. 卤水资源及其综合利用技术[M]. 北京: 地质出版社, 2004
- [7]马鸿文, 苏双青, 刘浩, 等. 中国钾资源与钾盐工业可持续发展[J]. 地质学前沿, 2010, 17(1): 294-310.
- [8]庾莉萍. 我国积极破解钾盐矿资源短缺迷局[J]. 盐湖研究, 2007, 15(4): 49-55.
- [9]国土资源部信息中心. 世界矿产资源年评2014[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 270-290.
- [10]申军. 国内外硼矿资源及硼工业发展综述[J]. 化工矿物与加工, 2013, 3: 38-41.
- [11]唐尧, 陈春琳, 熊先孝, 等. 世界硼资源分布及开发利用现状分析[J]. 现代化工, 2013, 33(10): 1-4, 6.
- [12]孙小虹, 熊先孝, 王莹, 等. 中国硼矿床类型及时空分布规律[J]. 地质论评, 2015, 61(增刊): 810-811
- [13]王孝峰. 我国与世界钾资源及开发利用现状[J]. 磷肥与复肥, 2005, 20(1): 10-13.
- [14]Orris G J, Cocker M D, Dunlap P, et al. Potash: a global overview of evaporate-related potash resources, including spatial databases of deposits, occurrences, and permissive tracts: Chapter S in Global mineral resource assessment[M]. U. S. Geological Survey, 2014.
- [15]U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries[M]. U.S. Geological Survey, 2014.

- [16] 鲍荣华, 梁光明. 俄罗斯钾盐资源及开发利用情况介绍[J]. 中国农资, 2011, 7: 46-47.
- [17] 王春宁, 余俊清, 陈良, 等. 钾盐资源全球分布和我国找钾实践及方法探究[J]. 盐湖研究, 2007, 15(3): 56-72.
- [18] 李仰景, 孙鹰翔, 李慧英, 等. 我国周边国家钾盐资源的分布及开发情况[J]. 磷肥与复肥, 2013, 28(4): 12-15.
- [19] 李泽红, 李富佳, 董锁成, 等. 中国和俄罗斯钾肥资源合作态势与潜力研究[J]. 资源科学, 2015, 37(6): 1295-1303.
- [20] 李文光. 开发泰国、老挝钾盐矿产资源[J]. 中国地质, 1998, 9: 47-48.
- [21] 韩豫川, 熊先孝, 商朋强, 等. 中国钾盐矿成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [22] 刘成林, 王弭力, 焦鹏程, 等. 罗布泊盐湖钾盐矿床分布规律及控制因素分析[J]. 地球学报, 2009, 30(6): 796-802.
- [23] 王弭力, 刘成林, 焦鹏程. 罗布泊盐湖钾盐矿床调查科研进展与现状[J]. 地质评论, 2006, 52(6): 757-764.
- [24] 李浩, 刘传福. 罗布泊盐湖资源开发现状及前景[J]. 化学工业, 2008, 26(12): 10-12.
- [25] 王弭力, 刘成林, 焦鹏程, 等. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [26] 卞贞, 卜令忠, 刘建华, 等. 我国盐湖钾盐资源现状及提钾工艺技术进展[J]. 地球学报, 2010, 31(6): 869-874.
- [27] 蔡克勤, 高建华. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件[J]. 地学前缘, 1994, 1(3/4): 231-233.
- [28] 李波涛, 赵元艺, 郝爱兵, 等. 青海察尔汗盐湖固体钾盐物质组成特征[J]. 矿床地质, 2010, 29(增刊): 381-382.
- [29] 李承宝, 张秀春. 青海察尔汗盐湖钾资源开发现状[J]. 现代矿业, 2009, 478(2): 16-19.
- [30] 钱自强, 等. 钾盐矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [31] 刘群. 西伯利亚涅帕钾盐矿床地质、发现经过及其对我国找钾工作的启示[J]. 地球学报, 1995, 1: 45-54.
- [32] 朱延浙. 老挝万象平原钾盐矿床[J]. 地质与资源, 2008, 17(1): 45-49.
- [33] Hite R J, Japakasetr T. Potash deposits of the Khorat plateau, Thailand and Laos[J]. Economic Geology, 1979, 74(2): 448-458.
- [34] 唐敏, 刘成林, 焦鹏程, 等. 世界海相钾盐矿床特征定量分析及其意义[J]. 沉积学报, 2009, 27(2): 326-333.
- [35] 张永生, 郑绵平, 齐文等. 对土库曼斯坦钾盐资源及开发利用的考察[J]. 矿床地质, 2005, 24(6): 692-696.
- [36] Rami al Rawashdeh R, Maxwell P. Analysing the world potash industry[J]. Resources Policy, 2014, 41: 143-151.
- [37] 冯元琦. 走出去, 建立境外钾肥生产基地[J]. 化肥工业, 2000, 27(6): 34-35, 39-59.
- [38] 顾新鲁, 赵振宏, 李清海, 等. 罗布泊地区罗北凹地潜卤水钾矿床成因与开发前景[J]. 水文地质工程地质, 2003, 2: 32-36.
- [39] 赵振宏, 侯光才, 蔡青勤, 等. 罗布泊钾卤水矿床成矿地质背景[J]. 新疆地质, 2002, 20(3): 210-213.
- [40] 刘成林, 王弭力. 罗布泊第四纪沉积环境演化与成钾作用[J]. 地球学报, 1999, 2: 264-270.
- [41] 顾汉念, 王宁, 杨永琼, 等. 不溶性含钾岩石制备钾肥研究现状与评述[J]. 化工进展, 2011, 30(11): 2450-2455.
- [42] 曲均峰, 赵福军, 傅送保, 等. 非水溶性钾研究现状与应用前景[J]. 现代化工, 2010, 30(6): 16-19.
- [43] 白仟, 袁俊红, 王章俊. 国内外水溶性钾盐资源及我国钾盐产业发展现状[J]. 资源与产业, 2014, 16(2): 37-46.
- [44] 程玉刚, 张忠辉, 兰尧中. 我国钾盐制钾肥开发利用现状[J]. 现代矿业, 2011, 502(2): 92-94.
- [45] 李武, 董亚萍, 宋彭生, 等. 盐湖卤水资源开发利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [46] 王万金, 白志民, 马鸿文. 利用不溶性钾矿提钾的研究现状及展望[J]. 地质科技情报, 1996, 15(3): 59-62.
- [47] 刘杰, 韩跃新, 印万忠. 难溶性钾矿资源制备钾肥研究现状及展望[J]. 有色矿冶, 2005, 21(增刊): 172-174.
- [48] U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries[M]. U.S. Geological Survey, 2013.
- [49] 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]. 地质评论, 2015, 61(1): 34-44.
- [50] 李文光. 我国硼矿资源概况及利用[J]. 化工矿物与加工, 2002, 9: 37.
- [51] Kistler R B, Helvacı C. Boron and borates[J]. Industrial minerals and rocks, 1994, 6: 171-186.
- [52] 刘喜方, 郑绵平. 西藏扎布耶超大型锂、硼矿床地质背景及其形成演化[J]. 化工矿产地质, 1999, 21(2): 65-68.
- [53] 王伟, 王刚, 赵元艺, 等. 西藏盐湖硼矿资源特点与开发利用[J]. 盐业与化工, 2013, 42(8): 9-12.
- [54] 魏新俊. 柴达木盆地盐湖钾硼锂资源概况及开发前景[J]. 青海国土土略, 2002, 增刊: 64-69.
- [55] 田润, 韩凤清, 马海州, 等. 察尔汗盐湖别勒滩区段晶间卤水的主要离子分布特征[J]. 盐湖研究, 2007, 3: 7-13.
- [56] 吕鹏, 张志杰, 范宇峰. 辽宁丹东宽甸地区硼矿资源潜在价值评价[J]. 中国矿业, 2012, 21(增刊): 101-105.
- [57] 刘敬堂, 肖荣阁, 王文武, 等. 辽东硼矿区域成矿模型[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [58] 曹开春, 贺孟清. 土耳其火山沉积硼矿床成矿条件综述[J]. 化工矿产地质, 1999, 21(2): 95-111.
- [59] Helvacı C. Stratigraphy, mineralogy, and genesis of the Bigadic borate deposits, Western Turkey[J]. Economic Geology, 1995, 90(5): 1237-1260.
- [60] Helvacı C. Mineral assemblages and formation of the Kestelek and Sultanqayiri borate deposits[C]//Proc. 29th Int'l. Geol. Congr., 1994, Part A: 245-264.
- [61] Palmer M R, Helvacı C. The boron isotope geochemistry of the Kirka borate deposit, western Turkey[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17): 3599-3605.
- [62] 曹开春. 独联体国家的硼资源及加工利用概况[J]. 化工矿产地质, 1998, 1: 67-68.
- [63] 邵世宁, 熊先孝. 中国硼矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 化工矿产地质, 2010, 32(2): 65-74.
- [64] Richard K R. Pan Global Resources Inc., Jadar West Lithium-Boron Project, Serbia, Jadar West Lithium Boron Project, Serbia, NI

- 43-101 Technical Report[EB/OL] (2015-10-25) [2015-11-29] http://panglobalresources.com/_resources/presentations/presentation.pdf. 2010.
- [65]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.
- [66]Stanley C J, Jones G C, Rumsey M S, et al. Jadarite, $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$, a new mineral species from the Jadar Basin, Serbia[J]. European Journal of Mineralogy, 2007, 19(4): 575-580.
- [67]王生志,徐大地,张琦.后仙峪硼矿区硼矿地质特征及其成因探讨[J].地质与资源,2003,12(4):221-227.
- [68]曹洪亮,李洋.大石桥市后仙峪硼矿区硼矿床特征[J].矿床地质,2008,27(增):76-77.
- [69]Dzikowitzky L, Schwarzbauer J. Chemical and stable isotopic compositions of Proterozoic metamorphosed evaporites and associated tourmalines from the Houxianyu borate deposit, eastern Liaoning, China[J]. Chemical Geology, 1997, 135(3/4):189-211.
- [70]冯本智,邹日.辽宁营口后仙峪硼矿床特征及成因[J].地学前缘,1994,4:235-237.
- [71]夏学惠,赵玉海,闫飞.辽东—吉南地区硼矿床地质特征及成矿远景[J].化工矿产地质,2007,29(3):169-177.
- [72]周永恒.辽东地区硼矿矿产资源评价[D].吉林大学博士学位论文,2011.
- [73]刘然,薛向欣,刘欣,等.我国硼资源加工工艺与硼材料应用进展[J].硅酸盐通报,2006,25(6):102-107.
- [74]张亨.硼酸生产研究进展[J].宁波化工,2012,4:7-11.
- [75]胡伟,杨晓军,符寒光.含硼矿中硼的提取工艺技术现状及趋势[J].有色金属科学与工程,2015:1-11.
- [76]王令,杨曾焜.碳碱法加工硼镁矿制硼砂[J].无机盐工业,2005,37(10):31-33.
- [77]朱建华,魏新明,马淑芬,等.硼资源及其加工利用技术进展[J].现代化工,2005,25(6):26-29.
- [78]于长水,海燕,安峰.硼酸制备工艺综述[J].化工科技市场,2009,32(6):17-18.
- [79]张珍,钟辉,王涛.沉淀法提取卤水中硼的研究进展[J].内蒙古石油化工,2008,1:7-9.
- [80]朱明松.老挝钾盐矿资源规模化开发的总体思路[J].云南化工,2013,40(6):1-4.
- ①郑绵平.应保护性开采本国钾盐资源——青海格尔木“2015世界钾盐钾肥大会”专家发言集锦(一).中国无机盐工业协会,2015.
- ②刘吉成摘译.白俄罗斯钾肥自由控股公司是世界钾肥生产企业的龙头老大.国外地学动态(内部参考),2015,3:21-24.
- ③Podlesny I.白俄罗斯钾肥工业对未来充满信心——青海格尔木“2015世界钾盐钾肥大会”专家发言集锦(十).中国无机盐工业协会,2015.
- ④何永平.中国企业境外找钾初见成果——青海格尔木“2015世界钾盐钾肥大会”专家发言集锦(五).中国无机盐工业协会,2015.
- ⑤周茂普.矿山固体钾盐开采技术——青海格尔木“2015世界钾盐钾肥大会”专家发言集锦(二十五).中国无机盐工业协会,2015.
- ⑥刘建明.难溶性钾资源及开发现状——青海格尔木“2015世界钾盐钾肥大会”专家发言集锦(十四).中国无机盐工业协会,2015.