

doi: 10.12029/gc20230516004

刘延亭,王春连,丁婷,颜开,游超,刘雪,陈振红. 2023. 硼矿床的成因类型、分布、应用及找矿远景[J]. 中国地质, 50(5): 1414–1431.

Liu Yanting, Wang Chunlian, Ding Ting, Yan Kai, You Chao, Liu Xue, Chen Zhenhong. 2023. Genetic types, distribution, application and ore-searching prospects of boron deposits[J]. Geology in China, 50(5): 1414–1431(in Chinese with English abstract).

硼矿床的成因类型、分布、应用及找矿远景

刘延亭^{1,2},王春连²,丁婷¹,颜开²,游超²,刘雪^{2,3},陈振红^{2,4}

(1. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093; 4. 长江大学油气资源与勘查技术教育部重点实验室, 湖北武汉 430100)

摘要:【研究目的】硼是重要的非金属关键性矿产资源,也是新技术产业重要的工业原材料。中国硼矿资源储量 2400 万 t,位列世界第五,中国既是硼矿生产大国,也是硼矿进口大国,82%的硼矿来自国外。研究硼矿床的成因、分布及其找矿远景,是解决中国硼资源大量依赖进口的有效途径,有利于保障国民经济的持续发展。【研究方法】本文通过搜集公开资料,对硼矿的成因类型、分布及应用等进行了归纳总结。【研究结果】硼矿按成因可划分为火山沉积型、沉积变质型、砂卡岩型、现代盐湖型、地下卤水型、海相蒸发沉积型等六类;主要分布于环太平洋沿岸及地中海沿岸,如土耳其的凯斯特莱克、埃梅特、比加迪奇等矿床,美国的克拉默矿床,玻利维亚的乌尤尼盐湖等,储量占全球储量的 90%左右。【结论】其中火山沉积型硼矿床占全球总量的 75%左右,品位最低可达 25% (B₂O₃),是全球重要的矿床类型;现代盐湖型硼矿床约占 20%,品位 8%~30% (B₂O₃)不等;沉积变质型硼矿床是中国重要的硼工业矿床,矿石品位 11% (B₂O₃)。根据硼矿床的规模及分布,将全球划分为六大成矿远景区。

关键词:硼矿床;成因类型;分布;关键应用;找矿远景;矿产勘查工程

创 新 点:(1)总结了全球硼矿床的成因类型、分布、关键应用及找矿远景等方面;(2)为了缓解中国硼矿资源供不应求的现状,应加大中国乃至全球硼矿远景的勘探力度,构建完整的产业体系,提高硼资源的利用效率。

中图分类号:P612 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2023)05-1414-18

Genetic types, distribution, application and ore-searching prospects of boron deposits

LIU Yanting^{1,2}, WANG Chunlian², DING Ting¹, YAN Kai², YOU Chao²,

LIU Xue^{2,3}, CHEN Zhenhong^{2,4}

(1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

收稿日期:2023-05-16;改回日期:2023-07-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2906605)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(KK2005)和中国地质调查局项目(DD20230056、DD20190606、DD20221684、DD20230291)联合资助。

作者简介:刘延亭,女,1999年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业;E-mail: liuyanting9911@163.com。

通讯作者:王春连,男,1983年生,研究员,主要从事沉积学及矿床学方面的研究工作;E-mail: wangchunlian312@163.com。

4. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Boron is an important non-metallic key mineral resource and an important industrial raw material in the new technology industry. China is not only a major producer of boron deposits, but also a major importer. Eighty-two percent of boron ore comes from abroad. Studying the origin, distribution and prospects of boron mineral deposits is an effective way to address the massive dependence on imports of boron resources, which is beneficial to the development of the national economy. **[Methods]** By collecting public information, this paper summarizes the genesis types, distribution and application of boron deposits. **[Results]** Boron deposits can be divided into volcanic sedimentary type, sedimentary metamorphic type, skarn type, modern salt lake type, underground brine type and marine evaporative sedimentary type. It is mainly distributed in the Pacific Rim and the Mediterranean coast, such as Kestelek, Emat, Bigadic and other deposits in Turkey, Kramer deposit in the United States and Uyuni Salt Lake in Bolivia, accounting for about 90% of the global reserves. **[Conclusions]** Among them, volcanic sedimentary boron deposits account for about 75% of the global total, and the lowest grade is 25% (B_2O_3), which is an important deposit type in the world. Modern salt lake type boron deposits account for about 20%, grade 8%–30% (B_2O_3). The sedimentary metamorphic boron deposit is an important boron industrial deposit in China, with ore grade of 11% (B_2O_3). The world is divided into six regions of metallogenic potential based on the size and distribution of boron deposits.

Key words: boron deposits; type of cause; distribution; critical application; prospecting vision; mineral exploration engineering

Highlights: (1) The genetic types, distribution, key applications and prospecting prospects of boron deposits in the world are summarized; (2) In order to alleviate the shortage of boron resources in China, we should increase the exploration of boron mine prospects in our country and the world, build a complete industrial system, and improve the efficiency of boron resources utilization.

About the first author: LIU Yanting, female, born in 1999, master degree candidate, majors in mineralogy, petrology and mineral deposit; E-mail: liuyanting9911@163.com.

About the corresponding author: WANG Chunlian, male, born in 1983, research fellow, mainly engaged in sedimentology and mineral deposit research; E-mail: wangchunlian321@163.com.

Fund support: Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2023YFC2906605), Basic Research Funds for Public Welfare Research Institutes at the Central Level (No.KK2005) and the projects of China Geological Survey (No. DD20230056, No.DD20190606, No.DD20221684, No.DD20230291).

1 引言

硼(Boron)是岩石圈中的一种非金属微量元素。硼和氧化物结合成一种含有 B_2O_3 的化合物,其中应用最广且储量最大的是硼砂、钠硼镁石和硼镁石三种矿物(Ozkul et al., 2017; USGS, 2022)。硼常用于冶金、陶瓷、玻璃、搪瓷等传统工业领域(郑学家, 2005; 刘然等, 2006; 赵鸿, 2007), 以及永磁、超导、晶须、医疗等高新技术领域(Kalay et al., 2015; Kim et al., 2018; Zhu et al., 2019; Ali et al., 2020; Dymova et al., 2020)。因其具有质轻高硬、阻燃耐热、耐磨催化、无磁性等一系列独特的物理化学特性, 在传统工业及高新技术领域均具有重要地位。

中国的硼品位低、开采难度大, 五分之四的硼资源需从美国、土耳其、俄罗斯、智利等国家进口,

故硼的需求将持续增加。本文根据前人的资料, 对硼矿资源的成因类型、分布、找矿远景进行了归纳整理, 有助于进一步指导硼矿勘查, 为中国的矿产资源安全提供保障, 改善硼矿资源短缺的现状(袁建国等, 2018; 施春晖等, 2018; 张福祥等, 2019; 王莹和熊先孝, 2022)。同时, 通过对硼矿的应用总结概括, 提出中国发展硼工业的必要性。

2 硼矿成因类型

全球的硼矿资源根据矿床成因大致可以划分为六种类型: 火山沉积型、沉积变质型、现代盐湖型、地下卤水型、海相蒸发沉积型、矽卡岩型等(图1)。其典型矿床、矿石矿物、矿床规模及分布总结概括见表1。火山沉积型硼矿床一般形成于古近纪—新近纪, 湖相沉积环境中, 来自于火山活动的含

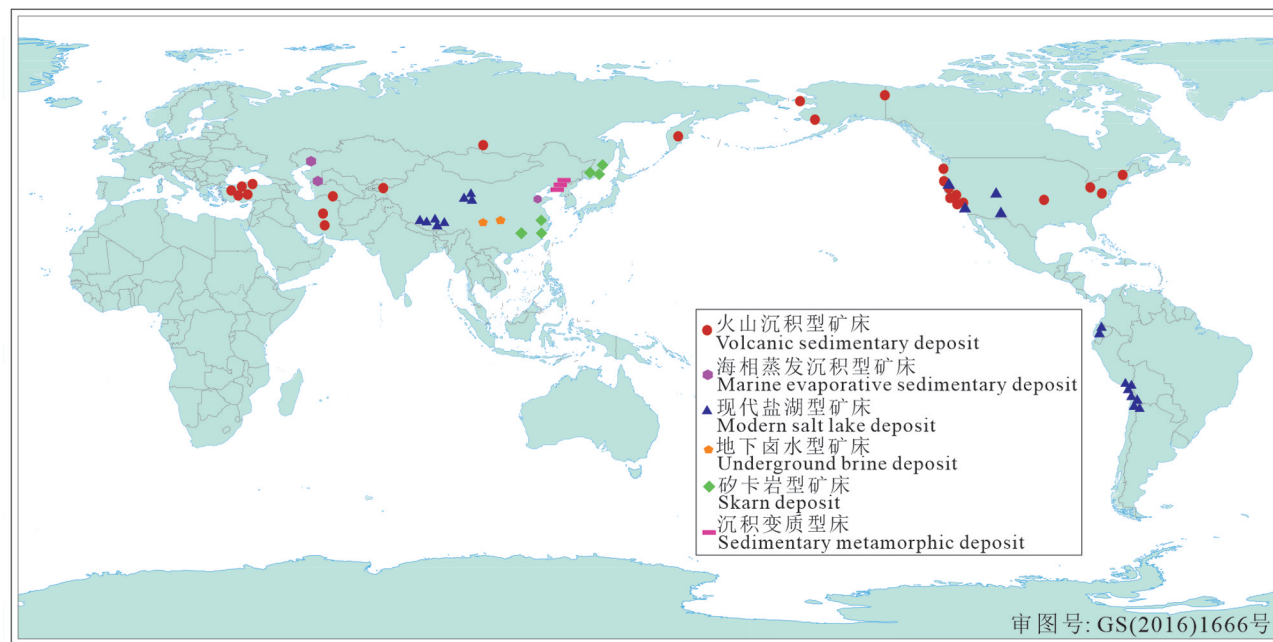


图1 全球硼矿床分布图

Fig.1 Global distribution map of boron deposits

硼热液流入湖盆,与Ca、Mg等发生物理化学反应形成钠硼钙石,来自热泉水比湖水的钠硼酸盐含量高,所以比重较大,流到湖底冷却时析出硼砂(Siefke, 1999; Kocak and Koc, 2016; 宋丽蓉等, 2017; Helvacı et al., 2021),因其一般不含任何易溶盐类而区别于现代盐湖型及地下卤水型硼矿床(宋克勤和李登明, 1987)。沉积变质型硼矿床发育在中国古元古代华北克拉通辽吉裂谷带内,与火山沉积型硼矿床最大的区别在于其独特的变质矿物组合以及较老的成矿年龄(Hu et al., 2015)。现代盐湖型及地下卤水型硼矿床的形成需要新构造运动、封闭或半封闭的盆地以及极度干旱的气候条件等因素,使汇集于盆地的水体经过蒸发浓缩形成蒸发岩,进而形成盐类硼矿床(高春亮等, 2016; 洪昌荣等, 2017)。王春连等(2021)认为江汉盆地江陵凹陷火成岩的水-岩反应为地下卤水型硼矿床的形成提供了物质来源,干热的古气候条件使地表流体蒸发浓缩富集成矿。矽卡岩型硼矿床从沉积成因地球化学硼储层的形成开始,随后经过岩浆改造、热液活动,形成了硼硅酸盐矽卡岩(Ratkin et al., 2016)。天津蓟县的海相蒸发沉积型硼矿形成于中元古代时期,大红峪期火山活动形成了大量富锰硼元素的水气溶液,通过裂隙上涌后,在高温、弱酸的

海洋环境中沉积形成矿床(王秋舒等, 2013; 王富良等, 2016)。

2.1 火山沉积型硼矿

火山沉积型硼矿床的形成与火山活动或火山作用有关,主要分布于土耳其安纳托利亚高原西部地中海沿岸及美国西部。该类硼矿床主要成矿时代为地质年代较新的古近纪—新近纪,其形成的地质背景包括火山作用、富硼温泉、湖相沉积环境,火山作用和特殊板块构造格架中的伸展盆地为化学沉积提供了有利的内生和外生条件,最终形成了蒸发岩沉积中心,其中硼酸盐作为主要的蒸发相起着重要的作用(Swihart et al., 1996; Siefke, 1999; Helvacı and Alonso, 2000; Ozkul et al., 2017)。土耳其硼矿中硼的最终来源是钙碱性火山岩,由于大陆碰撞期间岩石圈地幔的交代和熔融而富集硼,火山岩中的硼通过地热水淋溶出来,在湖相环境中沉积形成硼酸盐矿床(图2)(Helvacı and Palmer, 2017)。Swihart et al.(1996)认为美国克拉默硼矿床是在湖盆活动时期或沉积物固结之前,富含钙的地下水与富含硼酸钠的盐水发生反应,在湖周围的淤泥中生成了硼钠钙石。

埃梅特硼矿床是土耳其典型的硼酸盐矿床之一,位于土耳其西部(爱琴海地区东部)新近纪埃梅

表1 全球硼矿类型的划分
Table 1 Classification of boron ore types in the world

主要类型	典型矿床	矿石矿物	规模	分布	参考文献
火山沉积型	土耳其凯斯特莱克	硬硼钙石、钠硼解石	超大型	土耳其靠近地中海沿岸安纳托利亚高原西部的火山-盐湖盆地	Helvacı and Alonso, 2000; Kocak and Koc, 2016; Helvacı and Palmer, 2017; Helvacı et al., 2021
	土耳其埃梅特	硬硼钙石、钠硼解石	超大型		
	土耳其科尔卡	天然硼砂	超大型		
	土耳其比加第奇	硬硼钙石、钠硼解石	超大型	美国加利福尼亚州	Swihart et al., 1996; Siefke, 1999
	美国死谷	硬硼钙石	超大型		
	美国克拉默	硼砂、四水硼砂	超大型		
	西藏雄巴盆地	硬硼钙石、钠硼解石	大型	青藏高原地区	郑锦平等, 2016
沉积变质型	辽宁后仙峪	硼镁石、硼镁铁矿、遂安石	超大型	辽(宁)东-吉(林)南沉积变质型硼矿成矿带	刘敬党, 1996; 王翠芝等, 2008; Hu et al., 2015; Li et al., 2015; 胡艳春等, 2022; 孙桂涛等, 2022
	辽宁翁泉沟	硼镁石、硼镁铁矿、遂安石	超大型		
	辽宁宽甸	硼镁石、硼镁铁矿、遂安石	超大型		
矽卡岩型	江苏六合冶山	硼镁石、氟硼镁石	小型	华南褶皱系	黄富荣, 1996; 肖荣阁等, 2001; 邵世宁和熊先孝, 2010; 孙浅, 2013; 李空, 2016; 孙浅等, 2017
	湖南常宁七里坪和汤市	硼镁石、硼镁铁矿	小型		
	广西钟山黄宝	硼镁石、硼镁铁矿	小型		
	广东连平	硼镁石、硼镁铁矿	小型		
	俄罗斯的塔约扎诺耶硼矿、达尔尼戈尔斯克	硼硅酸盐矿石	大型		
地下水型	自贡邓井关、宜汉川25号井	含硼卤水	中型	四川盆地	林耀庭和曹善行, 2001; 林耀庭等, 2002
	潜江凹陷、江陵凹陷	含硼卤水	大型	江汉盆地	王春连等, 2021; 余小灿等, 2022
现代盐湖型	青海察尔汗、大柴旦; 西藏的扎布耶盐湖、杜佳里湖及班戈湖	硼砂、库水硼镁石和柱硼镁石、钠硼解石	超大型	青藏高原	姜盼武等, 2021; Zhang et al., 2019; 高春亮等, 2009
	美国的西尔斯湖	硼砂	小型	美国西部太平洋沿岸	Swihart et al., 1996
	阿根廷的廷卡劳盐湖, 智利的安托法加斯塔、塔拉帕卡等盐湖	钠硼解石	大型	南美安第斯山脉	Helvacı and Alonso, 2000; Risacher and Fritz, 2009; 唐尧, 2015
海相蒸发沉积型	天津蓟县东水厂	锰方硼	中型	天津市	肖荣阁等, 2002; 肖成东等, 2007; 王富良等, 2016;
	哈萨克斯坦因德尔坦城	硼镁石、水方硼石	大型	因德尔地区	申军, 2013; 王松等, 2017

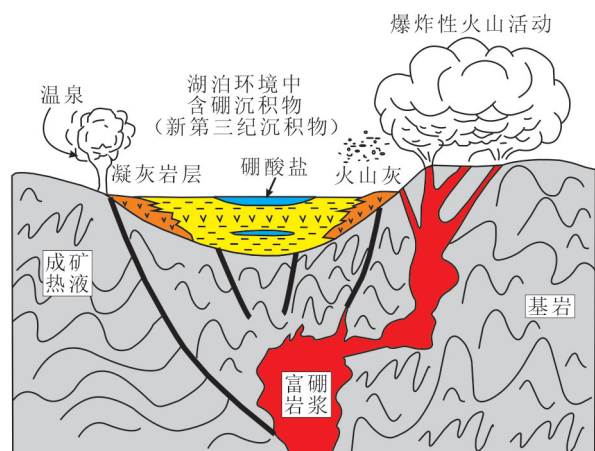


图2 土耳其新近纪盆地硼酸盐矿床形成的沉积模式图(修改自 Helvacı and Palmer, 2017)

Fig.2 Sedimentary model of borate deposit in Neogene Basin (modified from Helvacı and Palmer, 2017)

特—希萨尔茨克南北向盆地内,靠近库塔亚市。系土耳其西部发生了伸展、地壳变薄及碱性钙碱性火山作用所导致曼德列斯地块和邻近伊兹密尔—安卡拉区形成的断陷盆地。该区域的岩性单元可归纳为两个亚组:新近系前单元和新近系单元;基底岩石为古生代 Menderes 地块的中低变质岩,主要为云母片岩、绿泥片岩、钠长片岩和大理岩 (Helvacı and Alonso, 2000; Ozkul et al., 2017)。硼矿呈透镜状结构,与黏土岩、泥灰岩、凝灰岩和薄层灰岩交替出现。矿石矿物主要为硬硼钙石、水硼钙石、水硼锶石等,共生矿物为斜长石、白云石、方解石、蒙脱石和伊利石 (Kocak and Koc, 2016)。Kocak and Koc (2018) 对埃梅特盆地样品进行了微量元素的分析,发现了 Ce 异常,认为该地区硼矿沉积于氧气充足的湖泊环境;元素地球化学分析认为硼来源于火山环境。该硼酸盐矿床与安纳托利亚西部其他矿床一样,沉积于中新世湖相环境,其形成时期与古近纪开始并持续到第四纪初的火山活动时期相吻合。

2.2 现代盐湖型硼矿床

现代盐湖型硼矿床主要形成于第四纪,多产生于新生代构造活动区内,硼酸盐矿物大多沉积于第四纪盐湖湖底或湖岸盐坪上,部分以液态形式赋存于湖面卤水和晶间卤水中,呈固液相硼矿共存 (林勇杰等, 2017)。盐湖型硼矿的形成需要封闭或半

封闭的汇水盆地,干旱或半干旱的气候供硼酸盐的蒸发和富集 (Risacher, 1984; Risacher and Fritz, 2009; 洪荣昌等, 2017)。该类硼矿床主要分布于美国西部的西尔斯湖、南美安第斯山脉的智利、阿根廷、玻利维亚,中国的柴达木盆地等地区。樊启顺等 (2015) 对柴达木盆地的察尔汗盐湖的蒸发岩及卤水进行了硼同位素的研究,认为其沉积于非海相蒸发环境,判断为现代盐湖型成因。

2.2.1 南美地区现代盐湖型硼矿床

南美地区分布着丰富的盐湖型锂、钾、硼等资源,在沿海岸山脉和安第斯山脉之间的高原地区分布约 130 个封闭盐湖盆地,其中玻利维亚 35 个,智利 65 个,阿根廷 30 个。玻利维亚的乌尤尼盐湖是世界上最大的盐湖 (约 10000 km²) (Risacher and Fritz, 2009; 唐尧, 2015)。大多数矿床与晚期覆盖在硼酸盐上的钙质凝灰岩有关,有时也与岩盐和石膏有关。邻近地区玄武岩—流纹岩表明存在火山活动,推测为火山热液流体;矿床由岩床和结核组成,含有一些硼砂或银辉石,与最近的盐湖沉积物有关,沉积物为泥、淤泥、岩盐和石膏 (Helvacı and Alonso, 2000)。智利是南美洲硼酸盐矿床的主要生产国,现逐渐转移到阿根廷。阿根廷的硼酸盐矿床局限于晚新生代非碰撞挤压造山带形成的高原上。主要位于帕斯托斯格兰德盆地,该盆地位于一个 1500 m 厚的火山碎屑和湖泊地层单元上,被称为 Sijes 组。底部为岩盐,中部为硼砂石膏,顶部为凝灰岩和凝灰质物质 (Helvacı and Alonso, 2000)。García-Valles et al. (2016) 认为该区域硼矿床的形成与火山岩蚀变以及卤水循环有关。

2.2.2 柴达木盆地现代盐湖型硼矿

中国的青藏高原地区分布着丰富的现代盐湖型硼资源,发现有盐湖硼矿产地达 113 处,其中大型硼矿 15 处,中型硼矿 13 处,小型硼矿 85 处。柴达木盆地位于青藏高原北部,是一个不规则的菱形封闭断陷盆地,盆地东北为祁连山、西北为阿尔金山、南部为祁连山脉 (曹国强等, 2005; Fan et al., 2015) (图 3); 分布有盐湖 28 个,盐湖硼矿 10 个 (林勇杰等, 2017)。分别为大柴旦、小柴旦、一里坪、西台吉乃尔及察尔汗盐湖,另分布有多处中小型硼矿床 (Zhang et al., 2019; 姜盼武等, 2021)。高春亮等 (2009) 认为柴达木盆地卤水硼矿床和固体硼矿床

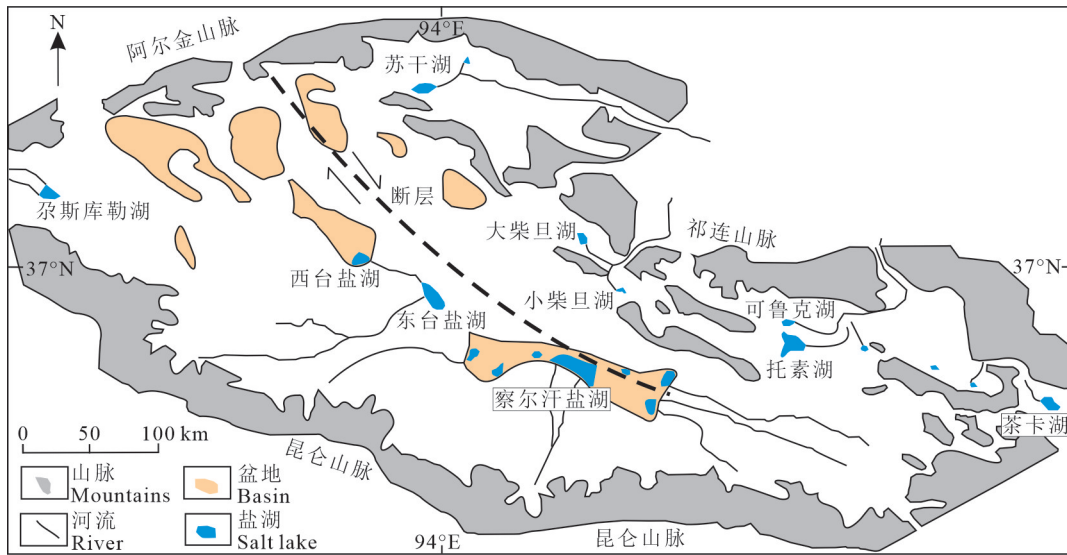


图3 中国柴达木盆地盐湖分布地质简图(修改自 Fan et al., 2015)

Fig.3 Geological map of salt lake distribution in Qaidam Basin, China (modified from Fan et al., 2015)

的成矿条件、富集机制等存在本质的区别。卤水硼的形成需要2个条件:(1)盐湖处在有大量硼物质来源的封闭汇水盆地;(2)盐湖所在区域具有极端干旱的气候条件。固体硼矿床的形成条件主要有4种:(1)稳定的介质条件供硼浓缩富集;(2)低温条件有利于盐类矿物自卤水中析出;(3)地下水的稀释或其他水体的混入掺杂作用;(4)生物成硼作用。

2.3 地下卤水型硼矿床

地下卤水型硼矿床一般形成于三叠纪和新近纪时期,成矿时代早于现代盐湖型的第四纪,主要分布于中国的四川盆地和江汉盆地,属上扬子川中前陆盆地和下扬子鄂中碳酸盐台地(林耀庭和曹善行,2001;王春连等,2022)。该类型硼矿为液态类型,埋藏一般较深,四川盆地埋藏4600 m,含矿层位稳定,区域上含硼卤水具有呈近椭圆形分带特色,且多与石油、天然气密切共生,为硼、锂、钾、碘、溴等多元素地下卤水型(油田水)硼矿组合。该类型硼矿中Br、I、K、Li、Cl可综合利用,系中国一种以硼为主,同时富集Li、I、K、Br等资源,且潜力巨大,综合利用价值可观的新型硼矿类型。深层地下富硼卤水是在内生和外生地质共同作用下形成的,裂谷盆地的火山活动以及火山岩的水岩反应提供富硼卤水的物质来源,表生干热的气候条件有利于富硼卤水的浓缩富集(余小灿等,2022)。王春连等(2021)对江汉盆地卤水型硼矿的成因进行了研究,

初步认为玄武岩的水-岩反应是富硼卤水矿的重要物质来源,高盐度流体是硼成矿元素主要的迁移载体,表生环境下干热的古气候使含矿水体蒸发浓缩是富硼卤水富集成矿的重要机制。

2.4 沉积变质改造型硼矿床

沉积变质改造型硼矿床主要位于中国辽吉裂谷带内,硼矿床主要产于古元古界辽河群里尔峪组 and 集安群蚂蚁河组内,近东西向分布,东西长约350 km,南北宽近160 km,是一套经过角闪岩相区域变质作用的火山碎屑岩、熔岩-沉积岩组合(刘敬党,1996;Li et al., 2015;胡艳春等,2022)。该成矿带西起辽宁营口东至集安地区,分布有凤城翁泉沟、营口后仙峪、宽甸砖庙沟等大型硼矿床,断续产出近百处规模不等的硼矿床,是目前国内最大的硼矿成矿带(图4)。硼矿床的容(控)矿岩石为古元古代辽河群里尔峪组蛇纹石化白云质大理岩。矿体围岩主要为:蛇纹石化白云质大理岩、黑云母变粒岩、电气变粒岩、斜长角闪岩、浅粒岩、混合花岗岩等(张景山,1994;刘敬党,1996;王翠芝等,2008)。硼矿体多呈似层状、透镜状、扁豆状。沿走向、倾向均呈膨缩明显的舒缓波状,矿体赋存在蛇纹石化白云质大理岩中,矿体产状与围岩产状一致,矿体厚度与大理岩厚度及矿石品位呈正比关系(刘敬党,1996)。主要矿石矿物为纤维状硼镁石、遂安石、板状硼镁石;脉石矿物主要为蛇纹石、白云石、菱镁

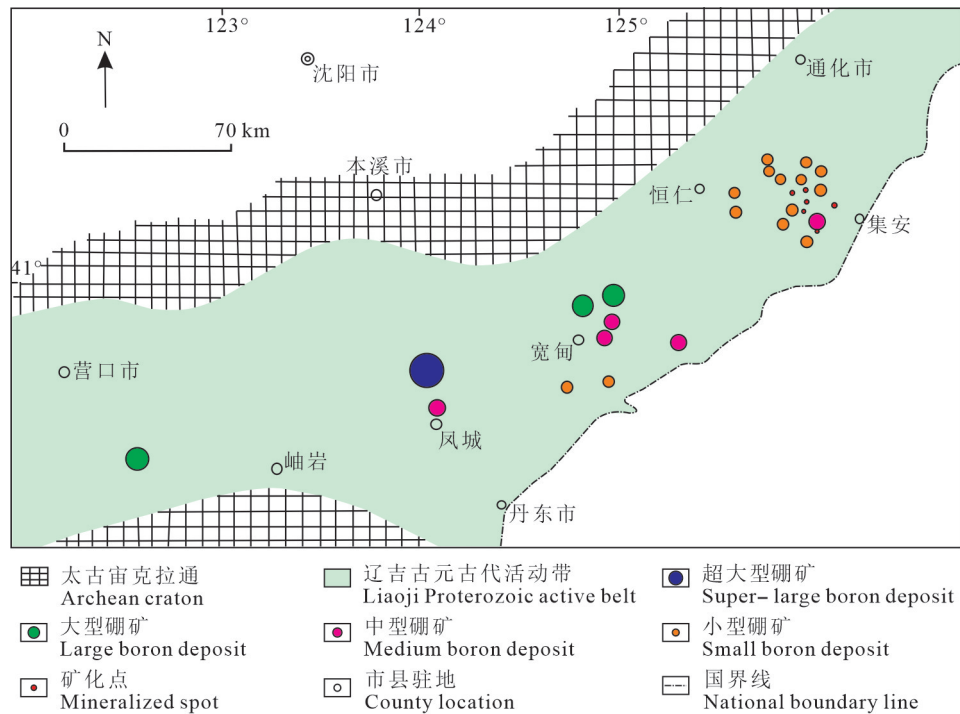


图4 辽东—吉南硼矿床分布图(修改自冯本智等, 1998; 胡艳春等, 2022)

Fig.4 Distribution map of the Liaodong and Jinan boron deposit (modified from Feng Benzhi et al., 1998; Hu Yanchun et al., 2022)

矿、镁橄榄石、方解石等。含硼岩系、镁质岩石、区域变质及混合岩化热液交代作用和构造改造是辽东硼矿形成的主要控矿因素。其中含硼岩系、镁质容矿岩石是硼矿形成的物质基础, 区域变质及混合岩化作用、构造改造活动是硼矿形成的必要条件(王翠芝等, 2008)。硼矿的形成分为原始火山-沉积初始富集和部分熔融含硼热液交代镁质岩石两个主要过程(Hu et al., 2015; 孙桂涛等, 2022)。

2.5 矽卡岩型硼矿床

矽卡岩型硼矿床主要分布于中国江苏冶山、湖南大义山, 俄罗斯东西伯利亚滨海边疆地带。与矽卡岩型硼矿床成矿有关的中酸性岩浆, 一般分布于造山带和汇聚型板块边缘, 属下地壳重熔型岩浆(S型花岗岩)系列。硼在岩浆期后热液中的运移大多与含氟的碱性溶液相关, 当含氟的碱性溶液与石灰岩、白云岩接触时, 溶液被中和而沉淀硼酸盐矿物(李空, 2016)。矽卡岩型硼矿在形成的过程中发生热液的接触交代作用, 硼矿物与铁镁质矿物出现共生组合关系, 如中国江苏冶山的矽卡岩硼矿床的矿石矿物为硼镁铁矿和硼镁石(孙浅, 2013; 孙浅等, 2017), 湖南常宁大义山硼矿床为钙镁质矽卡岩型

硼矿床(黄富荣, 1996)。

陶卡地区是俄罗斯南部远东地区盛产多金属地区之一, 例如锡霍特—阿林东南沿海的硼-铅-锌成矿区(图5)。自19世纪以来, 开采了大量矽卡岩型和脉状铅锌矿床。20世纪40年代末, 勘探发现了达尔尼戈尔斯克矽卡岩型硼硅酸盐矿床, 该矿床是晚白垩世俯冲带、东锡霍特山脉火山深成岩带(ESAVB)和古新世哈桑—阿姆拉雷亚尔火成岩与构造板块滑动有关的硼锡多金属亚区最大的矿床。硼的初步富集与古元古代中朝克拉通裂谷带的沉积作用有关, 在裂谷带形成了海相蒸发岩层序。含硼沉积物在古元古代变质作用中转化为电气石、含电气石片麻岩和变质岩。在中生代, 中朝克拉通古元古代变质杂岩及其显生宙流体-岩浆改造的产物遭受强烈的侵蚀。它们的分解产物富含碎屑电气石, 具有典型的蒸发 $\delta^{11}\text{B}$ 特征, 随河流流入边缘海, 在那里富集了早白垩世含硼的增生楔体(Ratkin et al., 2014, 2016); 推断陶卡增生棱柱体基质中的海相沉积岩或早白垩世长石砂岩可能是硼的来源(Karas' and Ratkin, 2014; Ratkin et al., 2016)。

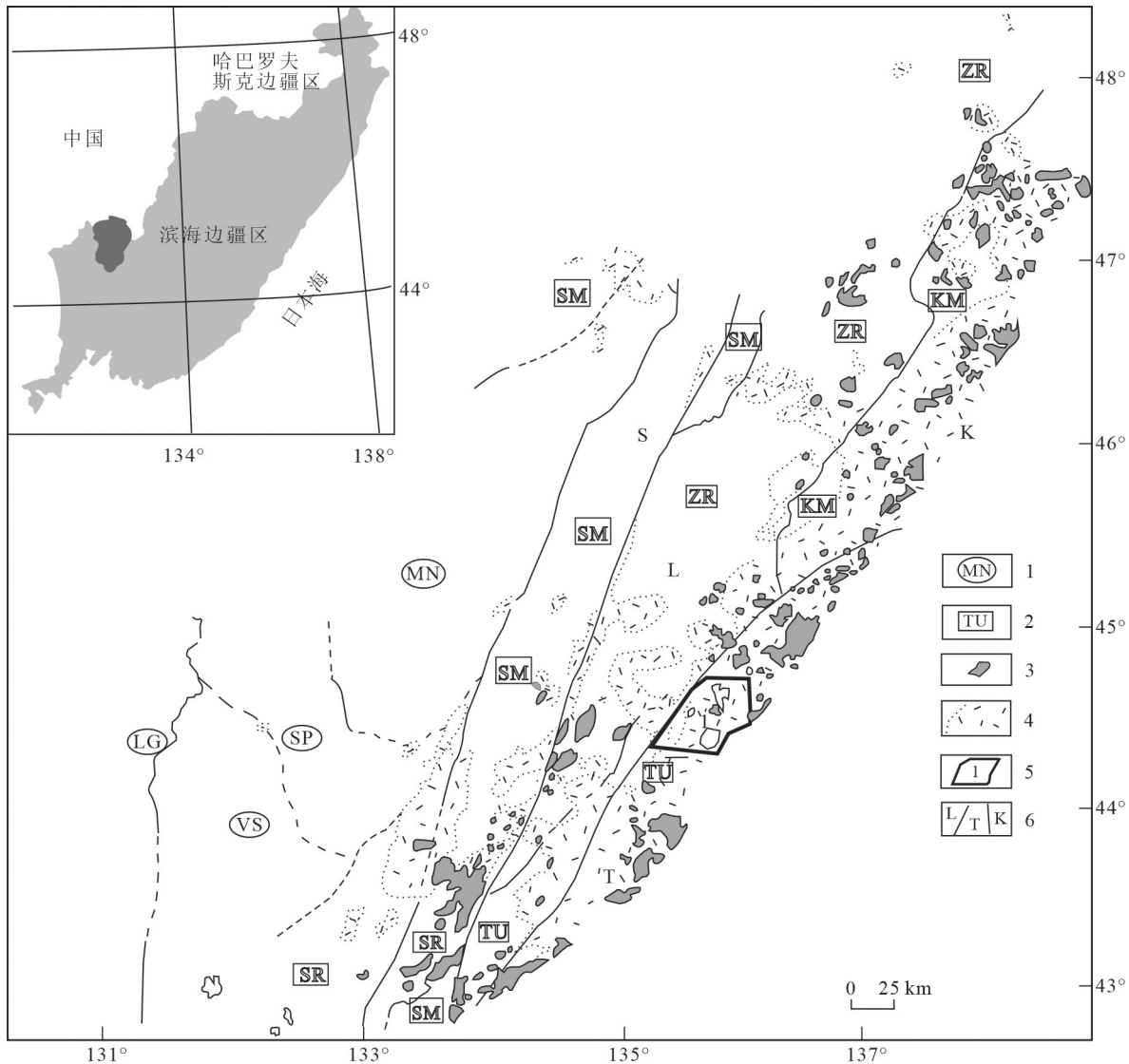


图5 俄罗斯陶卡成矿带在锡霍特—阿林—北萨哈林造山带中的位置(修改自 Ratkin et al., 2016)

1—前侏罗纪亚洲大陆边界地质体:MN—马特维耶夫卡—纳希莫夫卡,SP—斯帕斯克,VS—沃兹涅森卡,LG—拉韦林—格罗德科沃;2—早白垩世锡霍特阿林—萨哈林造山带北部的地质体:SR—谢尔盖耶夫卡,SM—撒马尔加,ZR—茹拉夫列夫卡,TU—陶卡,KM—凯马;3—晚白垩世—古新世花岗岩侵入体;4—锡霍特—阿林火山带火山岩;5—达勒内戈尔斯克矿区;6—成矿带及其边界:T—陶卡,L—卢日基,K—凯马,S—撒马尔加

Fig.5 Position of the Taukha metallogenic zone in the Sikhote-Alin-North Sakhalin orogenic belt (modified from Ratkin et al., 2016)

1-Terranes of the pre-Jurassic Asian continental margin: MN-Matveevka-Nakhimovka, SP-Spassk, VS-Voznesenka, LG-Laolin-Grodekovo; 2-Terranes of the Early Cretaceous Sikhote-Alin-Northern Sakhalin orogenic belt: SR-Sergeevka, SM-Samarka, ZR-Zhuravlevka, TU-Taukha, KM-Kema; 3-Late Cretaceous-Paleocene granitoid intrusions; 4-Volcanic rocks of the Sikhote Alin volcanic belt; 5-Dal'negorsk ore district; 6-Metallogenic zones and their boundaries: T-Taukha, L-Luzhki, K-Kema, S-Samarka

2.6 海相蒸发沉积型硼矿床

海相蒸发沉积型硼矿床形成于中元古代时期,主要矿床为中国天津蓟县的锰方石硼矿,俄罗斯南部的因叠尔、德国斯塔斯弗德硼矿床、哈萨克斯坦的因德尔坦城等(肖荣阁等,2002;肖成东等,2007;

申军,2013;王富良等,2016;王松等,2017)。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、水硼石为主,储量约150 t(申军,2013;王松等,2017)。

天津蓟县东水厂的锰方硼矿床,是世界上唯一

一个具有经济开采价值的锰方硼矿床,矿石矿物主要是锰方硼。矿石矿物主要为水方硼石、硼镁石、板硼石、钠硼解石、多水硼镁石等。蓟县正处于裂隙槽内且被海水覆盖,周围有火山活动的作用,裂隙槽形成的静水环境则为矿质的沉积提供了良好的场所(王富良等,2016)。肖荣阁等(2002)首次研究了天津蓟县硼矿床的硼同位素, $\delta^{11}\text{B}$ 的值为+6.7‰~+14.9‰,均为正值,表明该矿床的成矿元素属于海水来源。王富良等(2016)对天津蓟县东水厂的硼矿床进行了地球化学及硼同位素的研究,均证明其属于海相蒸发成因。

3 硼矿分布

全球硼矿床主要分布于太平洋沿岸与地中海沿岸,集中在土耳其、美国、俄罗斯、智利和中国等国家(表2)。据USGS数据,2021年全球硼储量13.43亿t,其中美国4000万t,土耳其120000万t,智利3500万t,中国2400万t,俄罗斯4000万t(USGS,2022)。这五个国家硼矿资源储量占全球硼资源总量的99%以上。

3.1 土耳其硼矿资源

土耳其是世界上最大的硼酸盐生产国,土耳其硼矿资源储量120000万t,占全球总储量73%。矿区分布在土耳其靠近地中海沿岸西安托尼亚地区的火山-盐湖盆地,整个矿区东西长300 km,南北宽150 km。区域上共分布有5个超大型的硼酸盐矿床:凯斯特莱克(Kestelek)、苏丹里泽(Sultancayir)、比加迪奇(Bigadic)、埃梅特(Emat)和科尔卡(Kirka)

表2 全球硼矿资源储量表(万t)(据USGS,2022)
Table 2 Global boron reserves (w t) (after USGS, 2022)

国家	产量(所有形式)		储量
	2020	2021	
美国	W	W	4000
阿根廷	7.1	7.1	NA
玻利维亚	20	21	NA
智利	35	30	3500
中国	38	38	2400
德国	12	12	NA
秘鲁	11	5	400
俄罗斯	8	8	4000
土耳其	200	170	120000
世界总量	XX	XX	XX

注:NA—不可用;W—美国数据不公布;XX—不适用,世界总量无法计算,并非所有国家都以一致的方式报告产量和储量。

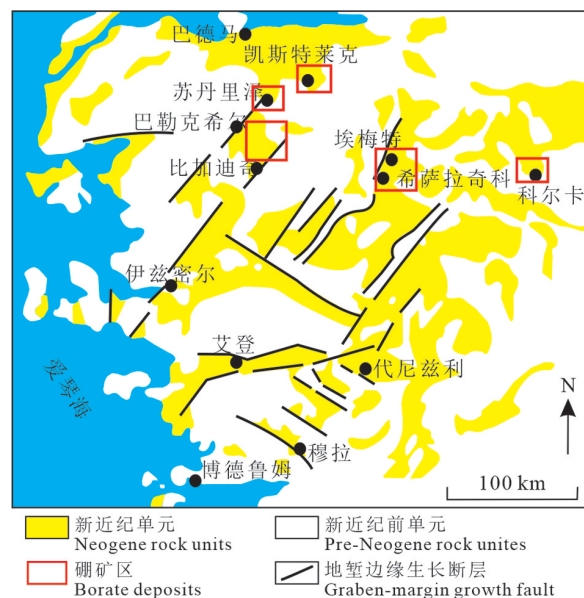


图6 土耳其西部地区硼矿床分布地质简图(修改自 Helvacı and Palmer, 2017)

Fig.6 Geological map of boron deposit distribution in western Turkey (modified from Helvacı and Palmer, 2017)

(Kocak and Koc, 2016; Ozkul et al., 2017; Helvacı et al., 2021)(图6),均属于火山沉积类型的硼矿床。其含硼矿物主要为硬硼钙石、硼钠钙石和天然硼砂。硬硼钙石产于埃梅特、比加迪奇、凯斯特莱克矿,硼钠钙石主要产于比加迪奇和凯斯特莱克矿床,天然硼砂主要产于科尔卡矿区。土耳其硼矿的矿石品位较高,最低也可达26%(B_2O_3)(张福祥等,2019;焦森等,2020),易开采。艾梯麦矿业集团是土耳其硼矿最大的开采、加工、生产、销售运营商,生产了大量的硼砂产品,不仅满足了其国内市场需求,并且大量出口,为全球最大硼产品供应商。

3.2 美国硼矿资源

美国硼矿资源储量4000万t,是世界第二大硼矿生产国。美国硼矿资源按成因分为火山沉积型和盐湖卤水型等两类。新近纪火山沉积型硼矿床主要产自美国西部加利福尼亚莫哈韦沙漠中部的克拉默和死谷矿区,矿石矿物主要为硼砂、四水硼砂、硬硼钙石,该类矿床矿石品位较高,平均可达到25%(B_2O_3),开采利用较为高效(李空,2016);盐湖卤水成因的硼矿床主要分布在加利福尼亚东南部西尔斯湖的第四纪盐湖中,发现有硼砂和天然碱,但其卤水品位只能达到1%~2%(B_2O_3)(USGS,2018;焦

森等,2020)。美国在加利福尼亚州的露天采场,主要开采粗硼砂和四水硼砂,其中粗硼砂品位25.3%(B₂O₃),四水硼砂品位31.9%(B₂O₃)(USGS, 2018)。美国硼矿开采加工公司主要有美国加利福尼亚州的硼砂集团和西尔斯河谷矿物有限公司。美国硼砂集团分公司分布在全球多个地区,为世界提供了25%的精制硼酸盐(USGS, 2018;力拓股份有限公司,2019),在硼资源及硼产品上处于垄断地位。

3.3 中国硼矿资源

中国硼矿资源储量位居全球第四,是硼的生产和消费大国,硼进口量位居世界第一。中国硼矿资源总量6566.71万t,储量为1119.29万t,其中辽宁、青海、西藏三省约5807.54万t(表3)。中国硼矿床类型较多(图7):沉积变质型的硼矿床主要分布于辽东—吉南地区的辽吉裂谷带内,主要为固体硼矿床,占全国硼矿总量的40%左右;盐湖卤水型硼矿床主要分布于青海西藏两省的盐湖盆地中(李志丹等,2020),包括固体硼矿和液体硼矿,占全国硼矿总量的50%左右;矽卡岩型硼矿床主要分布于湖南大义山地区,该类矿床独立的矿床较少,多数为铁硼矿床或硼镁矿床;西藏巴雄盆地发现火山沉积成因硼矿床(郑锦平等,2016)。虽然中国的硼储量位居世界第四,但是硼的开采难度大。可开采的硼矿

床主要是辽宁的翁泉沟和后仙峪硼矿床,矿石品位11%(B₂O₃),提取难度大,其产量远不能满足国内市场需求;青海西藏地区的盐湖卤水硼矿,位于青藏高原,高寒缺氧的地理环境导致硼矿资源开采程度低。中国市场的硼矿资源仅小部分为国内生产,大部分从土耳其、美国、智利等国家进口。

4 硼矿的应用

硼是战略性非金属矿产资源之一,有着广阔的应用空间和重要的价值(王春连等,2022)。全球拥有200多种自然形成的硼矿物,其中四水硼砂、硼酸、硬硼钙石、钠硼解石等硼化物占全球工业应用的90%(USGS, 2018)。硼及其化合物具有300多种用途,在玻璃、陶瓷、农业、漂白和洗涤剂等行业领域应用广泛。对于硼砂,古巴比伦人早在4000年以前就开始使用,并将从喜马拉雅山带来硼砂用于制造珠宝;古埃及人在木乃伊制作中同样需要使用硼砂;公元300年的中国人和公元600年的阿拉伯人开始使用硼砂制作硼砂釉(Helvaci and Palmer, 2017)。硼酸在化妆品、药品应用广泛;硼酸盐同时可添加到制动液、燃油添加剂、润滑剂、金属加工液和水处理化学品中(表4)。氧化硼用于抑制腐蚀,近年来硼化物在高新技术领域的重要地位日益凸显,如氮化硼纳米管已经应用于光催化领域、硼中子俘获疗法在癌症治疗领域的应用、硼化物可治疗神经退行性疾病等。

中国硼矿资源的需求呈逐渐增长的趋势,但中国的硼酸盐产业规模较小,生产技术水平较低,企业面临生产工艺较老、生产成本低、创新意识不足等问题(袁建国等,2018;施春晖等,2018)。中国的硼酸盐产业可以通过技术升级,产业结构调整,在青海、西藏等原产地增加企业数量等逐步解决硼产品大量依赖进口的现状。

4.1 硼及其化合物在传统领域的应用

4.1.1 玻璃、陶瓷等工业

硼酸盐在工业中使用最多就是玻璃和陶瓷,全球47%的硼酸盐用于制造玻璃,16%的硼酸盐用于制造陶瓷(USGS, 2018)。硼砂、硼酸、磷酸硼、硼酸钙等是玻璃、陶瓷行业生产中重要的化工原料,在生产过程中加入适量的硼砂、氧化硼、硼酸、硼酸钙等,可以使玻璃膨胀系数降低,具有良好的耐热耐

表3 中国各省(自治区、直辖市)硼矿保有资源储量排序

Table 3 Boron mineral reserves China

硼矿(固体)保有资源排序(单位:B ₂ O ₃ 千t)				
省区	储量	基础储量	资源量	资源储量
辽宁	11064.22	13016.79	5816.91	18833.70
西藏	84.92	868.50	15375.99	16244.49
青海	1191.48	3750.77	797.12	4547.89
湖南	32.82	40.03	563.92	603.95
广东	217.07	261.53	207.24	468.77
吉林	23.17	269.79	60.23	330.02
浙江			100.09	100.09
广西			27.04	27.04
天津			21.71	21.71
内蒙古			8.78	8.78
黑龙江			5.40	5.40
硼矿(液体)保有资源排序(单位:B ₂ O ₃ 千t)				
省区	储量	基础储量	资源量	资源储量
青海	2713.25	7526.07	7043.07	14569.14
湖北			5249.01	5249.01
西藏			3880.15	3880.15
四川		717.00		717.00
新疆			59.97	59.97

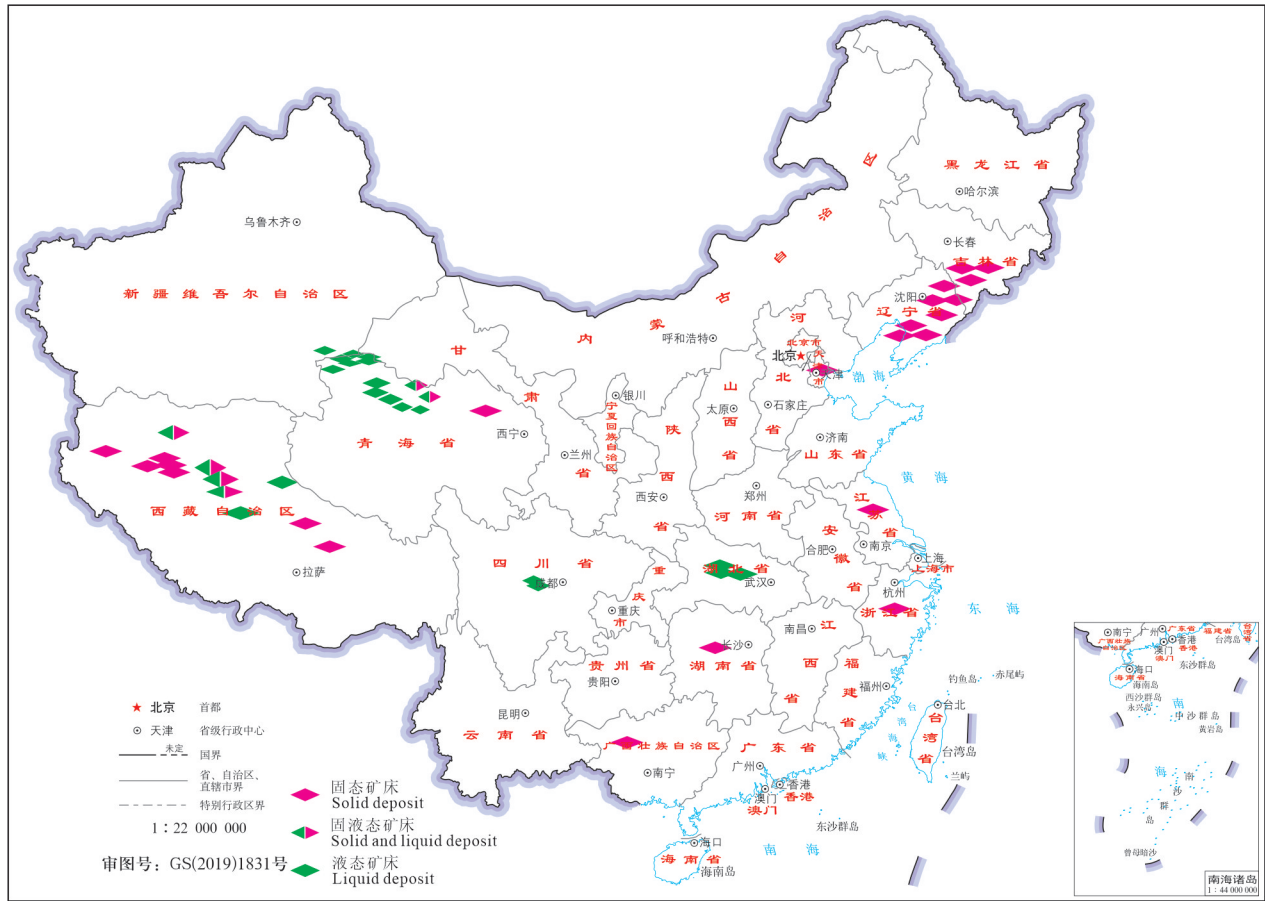


图7 中国硼矿床分布图
Fig.7 Distribution map of boron deposits in China

磨性能,可增强光泽度和透明度,同时可缩短熔化时间,改善熔化质量(赵鸿,2007)。B₂O₃在墙砖、地板砖用的硼硅釉料中占有一定比例,硼化物是日用搪瓷、卫生搪瓷釉料的必需品。目前,硼已经成为耐热玻璃、化学仪器玻璃、温度计玻璃、光学玻璃和一些特种玻璃的重要组成部分。如含硼玻璃纤维制成的玻璃钢,由于没有磁性,在军事上具有广泛的用途,用它制成的鱼雷快艇能避开磁性鱼雷的攻击;用于飞机上的构件能吸收和散射雷达射来的电磁波,使敌方雷达失去目标(刘然等,2006)。

4.1.2 农业

硼在肥料中是一种重要微量营养素,是高等植物生理功能所必需的元素,硼能够影响花粉管生长,进而影响果实产量,并间接负责脱氢酶的激活、同化物的运输、核酸和某些植物激素的代谢调节(Shireen et al., 2018)。硼肥料主要来源于硼砂、硼酸和硼酸钙,因为它们具有高水溶性,故硼肥料可

以通过喷雾或水体进行灌溉。含硼叶面肥对于植物的生长具有重大影响,例如可以提高石榴树叶片中矿物质元素的浓度、果实产量和果实质量,并减少果实开裂,石榴、菠菜等的果蔬产品都离不开含硼叶面肥(Davarpanah et al., 2016)。Vishekaii et al. (2019)的研究表明,施用纳米硼叶面肥之后,橄榄油产量及含油率提高,作物负荷降低。农业约占世界硼消费量的16%,随着世界人口的增长,硼消费量预计会增加(USGS, 2018)。

4.2 硼及其化合物在高新材料领域的应用研究

4.2.1 永磁材料

钕铁硼材料是高性能的稀土永磁材料,于1983年问世。目前,Nd-Fe-B磁体在所有永磁体中具有最大磁能积和最高的性价比(Wang et al., 2022)。近年来由于钕铁硼永磁材料综合性能的进一步提升,其正在逐步替代其他磁性材料而成为主流磁性材料,应用领域不断扩展。钕铁硼磁体材料主要有

表4 硼化物的特性与应用(修改自张福祥等,2019)

Table 4 Characteristics and applications of borides (modified from Zhang Fuxiang et al., 2019)

硼化物	特性	应用
硼酸	改善玻璃制品的耐热、透明性能,提高机械强度,缩短熔融时间	改善玻璃制品的耐热、透明性能,提高机械强度,缩短熔融时间
硼纤维	高强度,高拉伸、轻质材料	高强度,高拉伸、轻质材料
二硼化镁	常规超导体	包括超导磁铁、电力传输线及灵敏的磁场侦测器
氧化硼	已知的最难结晶的物质之一	制取其他硼化合物(如碳化硼)的原料;制造硼硅酸盐玻璃的原料;有机合成中的酸性催化剂;搪瓷、陶瓷釉料的助熔剂;玻璃纤维生产过程中的添加剂;制造化合物半导体(如砷化镓、磷化镓、砷化镉)时的液封剂等
碳化硼	极硬的陶瓷材料,吸收大量的中子而不会形成任何放射性同位素	坦克车的装甲、避弹衣、核反应堆的控制棒
氮化硼	高导热性	包装材料或散热基板应用,高功率电子器件的制造
硼烷	引火特性	火箭的高能燃料
钕铁硼	高性能的稀土永磁材料	清洁能源、交通运输、电子信息、自动化和机器人及磁选机、磁性分离及信号传输、传感器等领域

烧结和黏结两种。烧结钕铁硼材料主要应用于清洁能源、交通运输、电子信息、自动化和机器人及磁选机、磁性分离、信号传输及传感器等领域(郭诚君等,2016)。黏结钕铁硼磁体是由磁粉和黏结剂组成的复合材料,其生产工艺具有局限性,故黏结磁体的快淬磁粉生产能力只适应较低端市场的应用(孙艳荣等,2021)。

4.2.2 超导材料

二硼化镁具有简单的化学组成和晶间结构,它是目前发现的临界转变温度最高的金属化合物常规超导体,其临界温度为39 K,是一种介于高温超导材料和低温超导材料之间的新型超导材料,具有资源丰富、价格低廉、导电率高、容易合成和加工简便的特点,广泛应用于电力传输、超级电子计算机器件以及CT扫描成像等方面(张超等,2017)。MgB₂与合金超导体一样,无明显的各向异性,从而能够避免输电应用中因各向异性而产生的能量损耗。中国采用的高温高压法在短时期内成功合成了一种高密度的二硼化镁超导体样品,已接近国际先进水平(刘然等,2006)。

4.2.3 氮化硼纳米管

氮化硼纳米管(BNNT)因其独特的原子结构,在许多领域有着巨大的应用潜力。由于高导热性,BNNT可以与各种聚合物集成,以创建一类新的导热BNNT聚合物复合材料,用于包装材料或散热基板应用;应用于高功率电子器件的制造可以解决发热问题。目前,BNNT的实际应用研究正在广泛和持续进行(Kim et al., 2018)。例如,在水净化领域

中,BNNT已在滤油、自清洁膜和可重复使用的耐热膜中进行了检测;在生物应用领域中,由于BNNT的无毒性,可以用作生物探针、药物载体或生物传感器中的生物通道;BNNT氧化的高稳定性使其能够使用场发射技术,BNNT还用于氢储存、传感和光电等行业(Kalay et al., 2015; Kim et al., 2018),预计BNNT的应用将在未来继续扩大。

4.2.4 硼医疗

硼化合物药理学方面的应用在十年前就得到了认可,但在药物中发现的硼化物很少。Ali et al. (2020)研究了硼中子俘获疗法(BNCT)在癌症治疗方面的应用,取得了新进展。该疗法已被用于治疗最常见和致命的原发性恶性脑肿瘤。 $\delta^{10}\text{B}$ 的空间分布将被证明在破坏所有恶性肿瘤方面至关重要,并且处于静止期或不积累 $\delta^{10}\text{B}$ 载体分子的细胞如何对结果产生重大影响(Dymova et al., 2020)。事实上,基于含硼化合物的药物,如塔瓦博罗(标记为Kerydin)和硼替佐米(商标为Velcade)已经经过研究并用于临床治疗(Zhu et al., 2019)。此外,硼在治疗神经元衰退方面也取得了很大的进展,例如实验中发现大鼠缺硼会导致小脑缺磷,从而导致神经组织发生直接变化。Barrón-González et al. (2022)认为饮食中的硼化物对神经衰退具有一定的抵抗作用,尤其是蔬菜和硼酸中的硼酸复合物,故硼可被视为改善神经传递或限制神经损伤相关的神经元有益过程的增强剂。这些和其他新的观察结果清楚地表明,含硼化合物在医学应用和生物有机化学等方面具有巨大的开发潜力。

5 硼矿找矿远景

综上所述,火山沉积型硼矿床形成条件主要有:(1)大陆边缘碰撞带的火山活动;(2)火山活动形成的火山灰及含硼温泉提供物源;(3)干旱气候条件及湖相沉积环境。地下卤水型硼矿床形成条件主要有:(1)封闭半封闭盆地提供沉积条件;(2)极端干旱的气候条件;(3)含硼卤水提供物源条件。现代盐湖型硼矿床的主要成矿条件:(1)封闭的断陷汇流盆地,(2)干旱半干旱的气候条件。沉积变质型硼矿床形成条件主要有:(1)深大断裂带提供构造条件;(2)深部火山,部分为与碳酸盐岩同源的陆源物质;(3)干旱条件供盐类物质蒸发富集;(4)区域变质作用及混合岩化改造作用。矽卡岩型硼矿床的形成条件主要有:(1)中酸性—中基性侵入岩类与碳酸盐类岩石的接触带上;(2)含硼汽水热液交代作用。海相蒸发沉积型硼矿床的主要成矿条件:(1)海洋环境;(2)海底火山活动提供物质来源。

根据以上条件全球的硼矿床主要分布于劳亚成矿域中朝成矿区,特提斯成矿域喜马拉雅成矿带、地中海成矿带,环太平洋成矿域北科迪勒拉成矿带、安第斯成矿带及东亚成矿带(表5)。

5.1 国内找矿远景

中国的硼矿资源主要分布在辽宁、青海、西藏、吉林等省份,根据中国硼矿资源的分布、储量、开采的难易程度等,可以把中国硼矿资源划分为三个等级(图8)。首先把中国辽宁、吉林两省的沉积变质成因的固体硼矿床,以及青藏、江汉盆地现代盐湖型及地下卤水型成因的大型固体、液体硼矿床作为

找矿的重点远景区;加大辽吉裂谷带的老矿山的外围地区及深部地区的找矿力度,提高对低品位硼镁铁矿的选矿技术和低品位卤水型硼矿综合利用技术等。其次,加强对西藏地区中小型现代盐湖型及地下卤水型硼矿的勘探工作,青藏高原海拔高、高寒缺氧,气候环境极其恶劣,严重地影响了矿产资源的勘探和开发工作,要加强对高寒环境下采矿技术的研究,促进青海西藏等矿产资源的开发。最后进行其他地区硼矿床的勘探和开采工作,如湖南的矽卡岩成因的硼镁矿床。

5.2 国外找矿远景

根据全球硼矿资源分布图(图1),将中国以外的区域划分为三个找矿重点区域。首先是土耳其西部安纳托利亚高原的硼矿床,在优越的构造运动条件下形成了多个大型的火山沉积硼矿床,如埃梅特、比加迪奇、科尔卡硼矿床(Kocak and Koc, 2016; Ozkul et al., 2017; Helvaci et al., 2021)。目前发现的全球品位最高的硼矿床分布于此,土耳其西部地区硼资源占全球总量的70%以上,出口量占全球的30%~40%(USGS, 2018)。其次是南美安第斯山脉的阿根廷、玻利维亚、智利和秘鲁等国家,该区域位于美洲板块和太平洋板块的构造边缘,安第斯构造火山成矿带上,成矿物质来源丰富,富集在干旱封闭的盐湖内,发育成现代盐湖型硼矿。硼酸盐矿床主要分布于阿根廷的西北端、秘鲁的东南角、玻利维亚的西南角和智利的东北边界,其资源储量可以达到4000万t以上,具有巨大的找矿潜力。中国可以通过国际合作的方式获得土耳其西部硼矿的探矿权及开采权,在土耳其、阿根廷、智利等国家获得

表5 全球硼矿成矿带划分(修改自李空,2016)

Table 5 Classification of global boron metallogenic belts (modified from Li Kong, 2016)

地区	成矿时代	成矿远景区	成矿域	成矿区带	矿床或产地名称	成因类型
国内	前寒武纪	辽—吉— 东西伯利亚	劳亚成矿域	中朝成矿区	辽宁、吉林、俄罗斯矿床	沉积变质型硼矿床
	第四纪	青海—西藏	特提斯成矿域	喜马拉雅成矿带	西藏、青海矿床	现代盐湖型、 火山沉积型硼矿床
	古近纪	江汉盆地	环太平成矿域	东亚成矿带	江汉盆地矿床	地下卤水型
国外	第四纪	南美安第斯	环太平洋成矿域	安第斯成矿带	塞尔维亚、智利、秘鲁及 阿根廷矿床	现代盐湖型硼矿床
	古近纪—新近纪	西安托利亚	特提斯成矿域	地中海成矿带	凯斯特莱克、埃梅特、科 尔卡、比加第奇矿床	火山沉积型硼矿床
	古近纪—新近纪	美国西部	环太平洋成矿带	北科迪勒拉成矿带	克拉默、西尔斯湖矿床	火山沉积型硼矿床、 现代盐湖型硼矿床

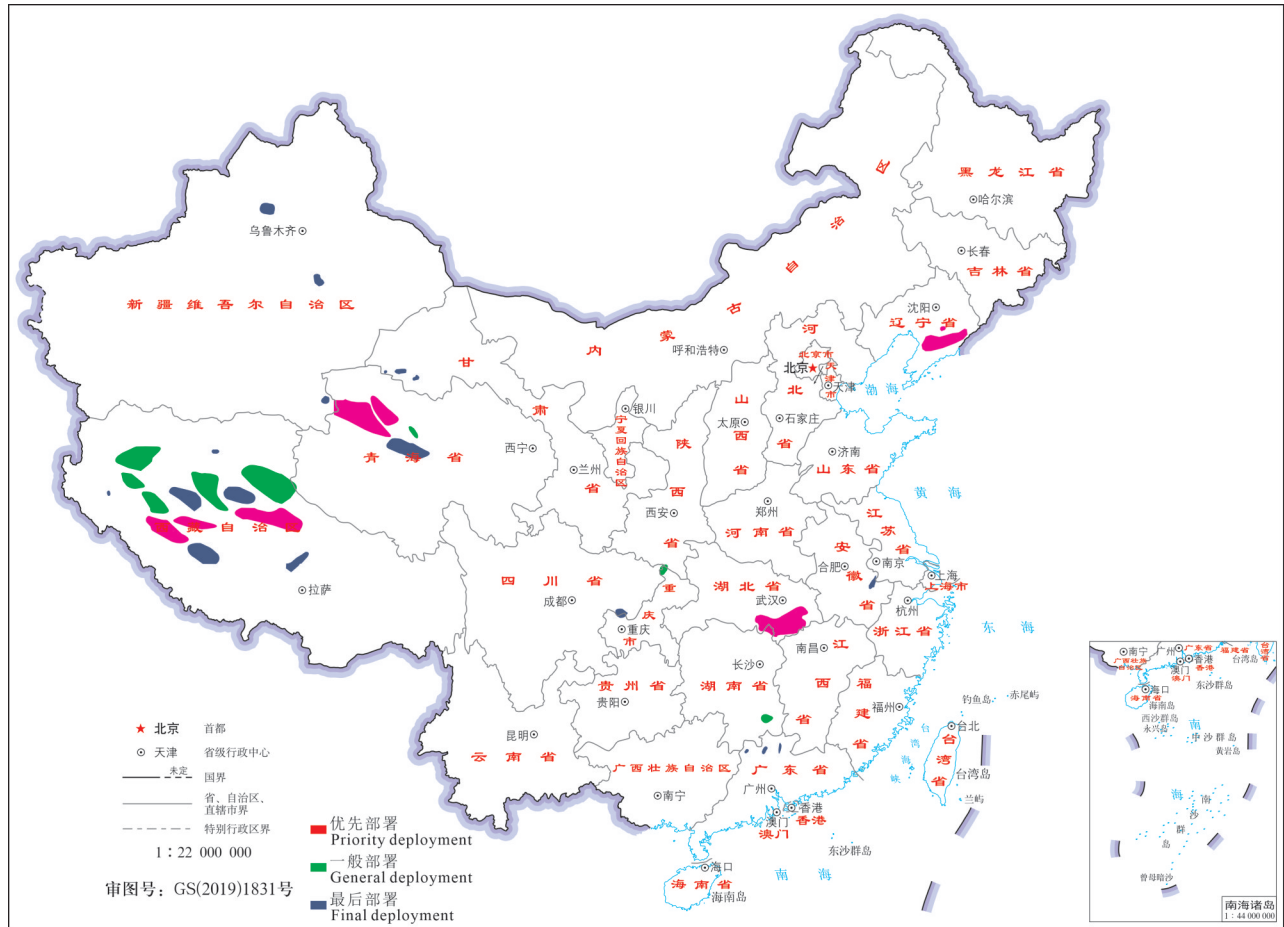


图8 中国硼矿资源找矿远景划分图
Fig.8 Division of boron prospecting prospects in China

独立的硼矿开采权,这将改变中国硼资源严重依赖进口的现状。

6 结 论

(1)根据硼矿床成因类型,初步划分为火山沉积型、沉积变质型、现代盐湖型、地下卤水型、砂卡岩型及海相蒸发沉积型等六类。前三种硼矿类型占全球硼资源储量的90%以上,是主要的工业性硼矿。

(2)全球硼矿资源主要分布在土耳其、美国、俄罗斯、智利、中国等国家,资源储量分别为120000万t、4000万t、4000万t、3500万t、400万t,占全球资源总量的97%。集中分布于环太平洋火山构造带、地中海沿岸、青藏高原、美国西部及南美安第斯山脉等区域。

(3)硼及其化合物广泛应用于陶瓷、玻璃、冶金等传统工业领域及永磁、超导、纳米等高新技术领

域,体现中国发展硼工业的必要性。

(4)中国应该解决硼矿床“高储量、低品位、低利用、高依赖”现状,提高选矿技术及综合利用水平;加强与土耳其、智利、阿根廷等国家开展合作开发等相关工作,开采高品位、低成本的硼矿床。

Reference

Ali F, Hosmane N S, Zhu Y H. 2020. Boron chemistry for medical applications[J]. *Molecules*, 25(4): 828.

Barrón-González M, Montes-Aparicio A V, Cuevas-Galindo M E, Orozco-Suárez S, Barrientos R A, Querejeta E, Trujillo-Ferrara J G, Farfán-García E D, Soriano-Ursúa M A. 2022. Boron-containing compounds on neurons: Actions and potential applications for treating neurodegenerative diseases[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 1: 112027.

Cao Guoqiang, Chen Shiyue, Xu Fengyin, Peng Dehua, Yuan Wenfang. 2005. Ceno-Mesozoic sedimentary and tectonic evolution in the western Qaidam Basin[J]. *Geology in China*, 32(1):

- 33–40 (in Chinese with English abstract).
- Davarpanah S, Tehranifar A, Avarynejad G, Abadía J, Khorasani R. 2016. Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality[J]. *Scientia Horticulturae*, 210: 57–64.
- Dymova M A, Taskaev S Y, Richter V A, Kuligina E V. 2020. Boron neutron capture therapy: Current status and future perspectives[J]. *Cancer Communications*, 40(9): 406–421.
- Fan Q S, Ma Y Q, Cheng H D, Wei H C, Yuan Q, Qin Z J, Shan F S. 2015. Boron occurrence in halite and boron isotope geochemistry of halite in the Qarhan Salt Lake, western China[J]. *Sedimentary Geology*, 322: 34–42.
- Fen Benzhi, Lu Jingwen, Zou Ri, Ming Houli, Xie Hongyuan. 1998. Ore-forming conditions for the Early Proterozoic large-superlarge boron deposits in Liaoning and Jilin Provinces, China[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, (1): 3–17 (in Chinese with English abstract).
- Gao Chunliang, Yu Junqing, Zhan Dapeng, Zhang Lisha, Cheng Aiyong. 2009. Formation and distribution characteristics of boron resources in Salt Lake of Qaidam Basin[J]. *Salt Lake Research*, 17(4): 6–13 (in Chinese with English abstract).
- Gao Chunliang, Yu Junqing, Min Xiuyun, Cheng Aiyong, Hong Rongchang, Zhang Lisha. 2016. The study on borate deposit of Da Qaidam Salt Lake compared to other borate deposits in the world[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 24(4): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- García-Valles M, Alfonso P, Arancibia J R, Martínez S, Parcerisa D. 2016. Mineralogical and thermal characterization of borate minerals from Rio Grande deposit, Uyuni (Bolivia)[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 125(2): 673–679.
- Guo Chengjun, Li Jiajie, Rao Xianfa, Luo Ce, Xu Jie. 2016. Anti-corrosion kinetics behavior of sintered Nd–Fe–B magnets in different corrosive climates[J]. *Nonferrous Metal Science and Engineering*, 7(1): 59–63 (in Chinese with English abstract).
- Helvacı C, Alonso R N. 2000. Borate deposits of Turkey and Argentina: A summary and geological comparison[J]. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 9: 1–27.
- Helvacı C, Palmer M R. 2017. Origin and distribution of evaporite borates: The primary economic sources of boron[J]. *Elements*, 13(4): 249–254.
- Helvacı C, Ycel-zturk Y, Seghedı I, Palmer M R. 2021. Post-volcanic activities in the Early Miocene Kirka–Phrigian caldera, western Anatolia– Caldera basin filling and borate mineralization processes[J]. *International Geology Review*, 63(14): 1719–1736.
- Hong Rongchang, Gao Chunliang, Yu Junqing, Min Xiuyun, Cheng Aiyong, Zhang Lisha, Xu Hong. 2017. Metallogenic conditions and pattern of typical Salt Lake-type borate deposit on Qinghai–Tibetan Plateau[J]. *Salt Lake Research*, 25(1): 8–18 (in Chinese with English abstract).
- Hu G Y, Li Y H, Fan C F, Hou K J, Zhao Y, Zeng L S. 2015. In situ LA–MC–ICP–MS boron isotope and zircon U–Pb age determinations of Paleoproterozoic borate deposits in Liaoning Province, northeastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 1127–1141.
- Hu Yanchun, Li Tingting, Feng Yuanyuan, Shi Jian. 2022. Geological characteristics and evaluation of the geological remains of boron deposits in Liaoji Active Belt[J]. *Modern Mining*, 38(7): 34–37 (in Chinese with English abstract).
- Huang Furong. 1996. Metallogenic model of skarn type boron deposit in Dayishan, Hunan Province [J]. *Building Materials Geology*, 1: 2–8 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Panwu, Fan Qishun, Qin Zhanjie, Du Yongsheng, Zhang Xiangru, Li Qingkuan, Ma Zhengming. 2021. The distribution characteristics of boron in water-surrounding rocks in Qaidam Basin and discussion on the of its enrichment[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 29(1): 44–55 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Sen, Zheng Houyi, Qu Yunyan, Liu Bingqiu, Han Beibei. 2020. Supply and demand situation of global boron resources[J]. *Land and Resources Information*, 10: 85–89 (in Chinese with English abstract).
- Kalay S, Yilmaz Z, Sen O, Emanet M, Kazanc E, Çulha M. 2015. Synthesis of boron nitride nanotubes and their applications[J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6: 84–102.
- Karas' O A, Ratkin V V. 2014. Dal'negorsk skarn deposit, Sikhote–Alin: Stages and sources of matter for borosilicate ores[J]. *Doklady Earth Sciences*, 455(2): 411–413.
- Kim J H, Pham T V, Hwang J H, Kim C S, Kim M J. 2018. Boron nitride nanotubes: Synthesis and applications[J]. *Nano Convergence*, 5: 17.
- Kocak I, Koc S. 2016. Geochemical characteristics of Kirka (Sarıkaya) borate deposit, northwestern Anatolia, Turkey[J]. *Journal of Earth System Science*, 125(1): 147–164.
- Kocak I, Koc S. 2018. Geochemical characteristics of the Emet (Espey–Hisarcik) borate deposits, Kutahya, Turkey[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 142: 52–63.
- Li Kong. 2016. Distribution and Potential Analysis of Global Boron Resources [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Li Zhidan, Jin Ruoshi, Li Xiaoguang, Li Lingping, Chen Lie, Liu Chaoqiang, Zhou Kenken, Zhang Chao. 2020. The discovery of lithium–boron large scale deposit in Zetso salt lake, Ngali District of Tibet and its prospects for development and utilization[J]. *Geology in China*, 47(2): 265–277 (in Chinese with English abstract).
- Li Z, Chen B, Wei C J, Wang C X, Han W. 2015. Provenance and tectonic setting of the Paleoproterozoic metasedimentary rocks from the Liaohe Group, Jiao–Liao–Ji Belt, North China Craton: Insights from detrital zircon U–Pb geochronology, whole-rock

- Sm–Nd isotopes, and geochemistry[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 711–732.
- Lin Yaoting, Cao Xingshan. 2001. A rare potassium–rich boron–rich gas field brine was discovered in western Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, (7): 45–47 (in Chinese).
- Lin Yaoting, He Jinqun, Wang Tianding, Ye Maocai. 2002. Geochemical characteristics of potassium–rich brine in Middle Triassic Chengdu Salt Basin of Sichuan Basin and its prospects for brine tapping[J]. *Geology of Chemical Minerals*, (2): 72–84 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongjie, Zheng Jinping, Liu Xifang. 2017. Boron resource of salt lakes in Qinghai–Tibet plateau[J]. *Science and Technology Guide*, 35(12): 77–82 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jingdang. 1996. Geological characteristics and genesis of Early Proterozoic boracite type boron deposits in Liaodong and Jinnan area [J]. *Geology of Chemical Mineral*, 3: 64–69 (in Chinese).
- Liu Ran, Xue Xiangxin, Jiang Tao, Zhang Shuhui, Duan Peining, Yang He, Huang Dawei. 2006. The current situation and development of boron and boride[J]. *Materials Review*, 6: 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Özkul C, Çiftçi E, Tokel S, Savaş M. 2017. Boron as an exploration tool for terrestrial borate deposits: A soil geochemical study in Neogene Emet–Hisarcik basin where the world largest borate deposits occur (Kutahya–western Turkey) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 173: 31–51.
- Ratkin V V, Gvozdev V I, Karas' O A. 2014. Boron–polymetallic metallogeny of the North and Northeast of the Sino–Korean Craton[J]. *Russian Journal of Pacific Geology*, 8(5): 379–389.
- Ratkin V V, Karas O A, Golozubov V V. 2016. Genesis of the boron potential of the Taukha metallogenic zone, Sikhote Alin, and boron sources during formation of the Dal'negorsk boron deposit[J]. *Russian Journal of Pacific Geology*, 10(6): 443–457.
- Risacher F. 1984. Origine des concentrations extrêmes en bore et en lithium dans les saumures de l'Altiplano bolivien [J]. *Comptes–Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 299(11): 701–709.
- Risacher F, Fritz B. 2009. Origin of salts and brine evolution of Bolivian and Chilean salars[J]. *Aquatic Geochemistry*, 15: 123–57.
- Shao Shining, Xiong Xianxiao. 2010. Discussion on China boron–concentrating area and the resource potential[J]. *Geology of Chemical Mineral*, 32(2): 65–74 (in Chinese with English abstract).
- Shen Jun. 2013. Overview of boron resources and boron industry at home and abroad[J]. *Chemical and Mineral Geology*, 42(3): 38–42 (in Chinese with English abstract).
- Shi Chunhui, Wang Lilin, Lu Pin, Cheng Enqing. 2018. Current situation and development suggestions of China's boric acid Production[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 47(9): 1948–1951 (in Chinese with English abstract).
- Shireen F, Nawaz M, Chen C, Zhang Q, Zheng Z, Sohail H, Sun J Y, Cao H S, Huang Y, Bie Z L. 2018. Boron: Functions and approaches to enhance its availability in plants for sustainable agriculture[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(7): 1856.
- Siefke J W. 1999. The Kelamo boron deposit and the Bo–re open–pit boron deposit in the United States[J]. *Geology of Inner Mongolia*, 4: 37–41.
- Song Keqin, Li Dengming. 1987. Introduction to volcanic sedimentary boron deposits[J]. *Geology in China*, (5): 30–31 (in Chinese).
- Song Lirong, Yu Changqing, Zheng Mianping, Chen Wenxi, Wang Yongzhi, He Junjie, Li Guihua, Qian Peng. 2017. Exploration of volcanosedimentary boron deposit by geophysical methods–application in the Ngari area, Tibet[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(4): 1584–1594.
- Sun Guitao, Sun Li, Wang Xueqiang. 2022. Occurrence and prospecting prospect of boron deposits in eastern Liaoning[J]. *Natural Resources of North China*, 3: 51–53 (in Chinese).
- Sun Qian. 2013. Mineralogy of Borate Minerals in the Yesan Skarn–type Boron Deposit, Jiangsu[D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- Sun Qian, Zhao Ming, Zhang Wenlan. 2017. Formation mechanism of the Yesan skarn–type boron deposit, Nanjing, Jiangsu Province: Constraints from borate minerals[J]. *Geological Journal of China Universities*, 23(3): 417–430 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yanrong, Zhang Zhipeng, Li Saisong, Xiao Daqing, Gao Shuanglin, Li Dongzhi. 2021. Development status and properties of Nd–Fe–B magnetic materials[J]. *Modern Chemical Industry Research*, 21: 117–119 (in Chinese with English abstract).
- Swihart G H, Mcbay E H, Smith D H, Siefke J W. 1996. A boron isotopic study of a mineralogically zoned lacustrine borate deposit: the Kramer deposit, California, USA[J]. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 127: 241–250.
- Tang Yao. 2015. Brine Resources Distribution in South America and Deposit Genesis Analysis [J]. *Salt Industry and Chemical Industry*, 44(2): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- USGS. 2022. Mineral Commodity Summaries[R]. United States Geological Survey.
- USGS. 2018. Minerals Years Book—Boron[R]. United States Geological Survey.
- Vishekaii Z R, Soleimani A, Fallahi E, Ghasemnezhad M, Hasani A. 2019. The impact of foliar application of boron nano–chelated fertilizer and boric acid on fruit yield, oil content, and quality attributes in olive (*Olea europaea* L) [J]. *Scientia Horticulturae*, 257: 108689.
- Wang Chunlian, Meng Lingyang, Liu Chenglin, Yu Xiaocan, Yan Kai, Liu Sihan, You Chao, Li Kekun, Teng Xiaohua. 2021. Genesis of underground brine–type boron deposit in Jiangling Depression during Paleocene [J]. *Journal of Petromineralogy*, 40(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunlian, Wang Jiuyi, You Chao, Yu Xiaocan, Liu Dianhe, Yan

- Kai, Liu Sihan, Xue Yan, Liu Yanting, Liu Xue, Yin Chuankai. 2022. A study on strategic non-metallic mineral definition, key applications, and supply and demand situation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 43(3): 267–278 (in Chinese with English abstract).
- Wang Cuizhi, Xiao Rongge, Liu Jingdang. 2008. Ore-forming genesis and model of eastern Liaoning borate deposits[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 6: 813–824 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fuliang, Fu Yong, Xu Zhigang, Pei Haoxing, Jiang Ran, Zhou Wenxi. 2016. The new understanding of the cause of Dongshuichang chambersite deposit in Jixian, Tianjin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 398–408 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiushu, Xu Hong, Gao Shen, Yang Lijun, Wu Dexin, Tian Zhu, Sun Yi. 2013. Synthesis of the rare mineral chambersite and its ore deposit geological significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(3): 123–130 (in Chinese with English abstract).
- Wang S, Sun J B, Xiao Z X, Yang M X, Shi W D. 2022. Effect of doping Al–Cu–Fe alloy on the microstructure and magnetic properties of annealed Nd–Fe–Co–B ribbons[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 646: 414333.
- Wang Song, Zhao Yuanyi, Wang Ao, Chang Yuhu. 2017. A study of distribution regularity and exploitation techniques of potash and boron resources in countries of “One Belt, One Road” [J]. *Geological Bulletin of China*, 36(1): 35–49 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ying, Xiong Xianxiao. 2022. Metallogenic regularity and prospecting prospectivity analysis of boron deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 41(5): 939–951 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Chengdong, Zhang Jing, Zhang Baohua, Liu Jinglan, Qin Zhengyong, Li Shiwei. 2007. Chambersite deposit in Jixian, Tianjin[J]. *Geological Survey and Research*, 30(3): 186–191 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Rongge, Takao Io, Nomura Masao, Yoshikazu Kikawada. 2001. Study on composition and fractionation of boron isotopes in Hydrothermal Deposits from South Hunan[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Rongge, Takao Oi, Hou Wanrong, An Guoying, Fei Hongcai. 2002. Boron isotopic composition of Dongshuichang chambersite deposit, Ji County, Tianjin, China[J]. *Geoscience*, (3): 270–275 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xiaocan, Liu Chenglin, Wang Chunlian, Xu Haiming, Zhao Yanjun, Huang Hua, Li Ruiqin. 2022. Genesis of lithium brine deposits in the Jiangnan Basin and progress in resource exploration: A review[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 107–123 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianguo, Qu Yunyan, Liu Qiuying, Feng Xiaoli. 2018. Analysis of the supply and demand tendency of boron resources in China[J]. *China Mining Magazine*, 17(5): 9–12, 27 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Wang Fei, Li Kai, Liu Kai. 2017. New research progress of practical high-temperature superconductors material[J]. *Hot Working Technology*, 46(14): 7–10 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fuxiang, Zhao Sha, Liu Zhuo, Jing Haipeng, Zhang Wanyi, Dong Yantao, Wang Fengxiang. 2019. Current situation and utilization trend of the global boron resources[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 39(6): 142–151 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jingshan. 1994. Geological characteristics and mineralization of boracite type boron deposit in eastern Liaoning [J]. *Liaoning Geology*, 4: 289–324 (in Chinese).
- Zhang X R, Li Q K, Qin Z J, Fan Q S, Du Y S, Wei H C, Gao D L, Shan F S. 2019. Boron isotope geochemistry of a brine-carbonate system in the Qaidam Basin, western China[J]. *Sedimentary Geology*, 383: 293–302.
- Zhao Hong. 2007. *The Chinese Types of Boron and the Application of the Deposits Doride*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Chen Wenxi, Qi Wen. 2016. New findings and perspective analysis of prospecting for volcanic sedimentary boron deposits in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 37(4): 407–418 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Xuejia. 2005. Development and application prospect of boron and borate[J]. *Inorganic Salt Industry*, 4: 1–3 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y H, Lin X L, Xie H M, Li J L, Hosmane N S, Zhang Y J. 2019. The current status and perspectives of delivery strategy for boron based drugs[J]. *Current Medicinal Chemistry*, 26(26): 5019–5035.

附中文参考文献

- 曹国强, 陈世悦, 徐凤银, 彭德华, 袁文芳. 2005. 柴达木盆地西部中—新生代沉积构造演化[J]. *中国地质*, 32(1): 33–40.
- 冯本智, 卢静文, 邹日, 明厚利, 谢宏远. 1998. 中国辽吉地区早元古代大型—超大型硼矿床的形成条件[J]. *长春科技大学学报*, (1): 3–17.
- 高春亮, 余俊清, 展大鹏, 张丽莎, 成艾颖. 2009. 柴达木盆地盐湖硼矿资源的形成和分布特征[J]. *盐湖研究*, 17(4): 6–13.
- 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 成艾颖, 洪荣昌, 张丽莎. 2016. 大柴旦盐湖硼矿床与国内外硼矿床的对比研究[J]. *盐湖研究*, 24(4): 1–11.
- 郭诚君, 李家节, 饶先发, 罗策, 徐杰. 2016. 烧结Nd–Fe–B磁体腐蚀动力学行为[J]. *有色金属科学与工程*, 7(1): 59–63.
- 洪荣昌, 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 成艾颖, 张丽莎, 徐虹. 2017. 青藏高原典型盐湖硼矿床成矿条件对比与矿床模式研究[J]. *盐湖研究*, 25(1): 8–18.
- 胡艳春, 李婷婷, 冯园园, 石建. 2022. 辽吉活动带硼矿地质遗迹的地质特征及评价[J]. *现代矿业*, 38(7): 34–37.
- 黄富荣. 1996. 湖南大义山砂卡岩型硼矿床成矿模式[J]. *建材地质*,

- 1: 2-8.
- 姜盼武, 樊启顺, 秦占杰, 都永生, 张湘如, 李庆宽, 马正明. 2021. 柴达木盆地水-岩硼含量分布特征及其富集区域物源讨论[J]. 盐湖研究, 29(1): 44-55.
- 焦森, 郑厚义, 屈云燕, 刘丙秋, 韩贝贝. 2020. 全球硼矿资源供需形势分析[J]. 国土资源情报, 10: 85-89.
- 李空. 2016. 全球硼矿资源分布与潜力分析研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李志丹, 金若时, 李效广, 李凌平, 陈烈, 刘朝强, 周恩慧, 张超. 2020. 西藏阿里地区泽错大型盐湖锂(硼)矿床的发现及开发利用前景[J]. 中国地质, 47(2): 265-277.
- 力拓股份有限公司. 2019. 2018年年度报告: 英国伦敦, 力拓股份公司[EB/OL]. http://www.riotinto.com/documents/RT_2018_annual_report.
- 林耀庭, 曹善行. 2001. 四川盆地西部发现罕见的富钾富硼气田卤水[J]. 中国地质, (7): 45-47.
- 林耀庭, 何金权, 王田丁, 叶茂才. 2002. 四川盆地中三叠统成都盐盆富钾卤水地球化学特征及其勘查开发前景研究[J]. 化工矿产地质, (2): 72-84.
- 林勇杰, 郑绵平, 刘喜方. 2017. 青藏高原盐湖硼矿资源[J]. 科技导报, 35(12): 77-82.
- 刘敬尧. 1996. 辽东-吉南地区早元古代硼镁石型硼矿床地质特征及矿床成因[J]. 化工矿产地质, 3: 64-69.
- 刘然, 薛向欣, 姜涛, 张淑会, 段培宁, 杨合, 黄大威. 2006. 硼及其硼化物的应用现状与研究进展[J]. 材料导报, 6: 1-4.
- 邵世宁, 熊先孝. 2010. 中国硼矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 化工矿产地质, 32(2): 65-74.
- 申军. 2013. 国内外硼矿资源及硼工业发展综述[J]. 化工矿物与加工, 42(3): 38-42.
- 施春辉, 王立林, 吕品, 程恩庆. 2018. 我国硼酸生产现状及发展建议[J]. 当代化工, 47(9): 1948-1951.
- 宋克勤, 李登明. 1987. 火山沉积型硼矿床简介[J]. 中国地质, (5): 30-31.
- 宋丽蓉, 于常青, 郑绵平, 陈文西, 王永智, 何俊杰, 李桂花, 钱鹏. 2017. 利用地球物理方法探测火山沉积型硼矿——在西藏阿里地区的应用[J]. 地球物理学报, 60(4): 1584-1594.
- 孙桂涛, 孙莉, 王学强. 2022. 辽东地区硼矿赋存规律及找矿远景分析[J]. 华北自然资源, 3: 51-53.
- 孙浅. 2013. 江苏冶山矽卡岩型硼矿床中硼酸盐矿物学特征研究[D]. 南京: 南京大学.
- 孙浅, 赵明, 张文兰. 2017. 江苏冶山矽卡岩型硼矿成因机制研究: 来自硼酸盐矿物学制约[J]. 高校地质学报, 23(3): 417-430.
- 孙艳荣, 张志鹏, 李赛松, 肖大庆, 高双林, 李冬至. 2021. 钕铁硼磁性材料发展现状及性能研究[J]. 当代化工研究, 21: 117-119.
- 唐尧. 2015. 南美地区卤水资源分布及矿床成因分析[J]. 盐业与化工, 44(2): 1-6.
- 王春连, 孟令阳, 刘成林, 余小灿, 颜开, 刘思晗, 游超, 栗克坤, 滕晓华. 2021. 江陵凹陷古新世地下卤水型硼矿成因研究[J]. 岩石矿物学杂志, 40(1): 1-13.
- 王春连, 王九一, 游超, 余小灿, 刘殿鹤, 颜开, 刘思晗, 薛燕, 刘延亭, 刘雪, 尹传凯. 2022. 战略性非金属矿产厘定、关键应用和供需形势研究[J]. 地球学报, 43(3): 267-278.
- 王翠芝, 肖荣阁, 刘敬尧. 2008. 辽东硼矿的成矿机制及成矿模式[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 6: 813-824.
- 王富良, 付勇, 徐志刚, 裴浩翔, 江冉, 周文喜. 2016. 天津蓟县东水厂锰方硼石矿床成因新认识[J]. 地质学报, 90(2): 398-408.
- 王秋舒, 许虹, 高桑, 杨利军, 吴德新, 田竹, 孙逸. 2013. 稀有矿物锰方硼石的合成及其矿床地质意义[J]. 地学前缘, 20(3): 123-130.
- 王松, 赵元艺, 汪傲, 常玉虎. 2017. “一带一路”国家钾盐及硼资源分布规律与开采技术[J]. 地质通报, 36(1): 35-49.
- 王莹, 熊先孝. 2022. 中国硼矿床成矿规律概要及找矿远景分析[J]. 矿床地质, 41(5): 939-951.
- 肖成东, 张静, 张宝华, 刘景兰, 秦正永, 李世伟. 2007. 天津蓟县锰方硼石矿床[J]. 地质调查与研究, 30(3): 186-191.
- 肖荣阁, 大井隆夫, 野村雅夫, 木川田喜一. 2001. 湘南高温热液矿床中硼同位素组成及分馏作用研究[J]. 华南地质与矿产, (2): 1-7.
- 肖荣阁, 大井隆夫, 侯万荣, 安国英, 费红彩. 2002. 天津蓟县硼矿床锰方硼石矿物的硼同位素研究[J]. 现代地质, (3): 270-275.
- 余小灿, 刘成林, 王春连, 徐海明, 赵海军, 黄华, 李瑞琴. 2022. 江汉盆地大型富锂卤水矿床成因与资源勘查进展: 综述[J]. 地学前缘, 29(1): 107-123.
- 袁建国, 屈云燕, 刘秋颖, 冯晓利. 2018. 中国硼矿资源供需趋势分析[J]. 中国矿业, 27(5): 9-12, 27.
- 张超, 王飞, 李凯, 刘凯. 2017. 实用化高温超导材料的新进展[J]. 热加工工艺, 46(14): 7-10.
- 张福祥, 赵莎, 刘卓, 荆海鹏, 张万益, 董延涛, 王丰翔. 2019. 全球硼矿资源现状与利用趋势[J]. 矿产保护与利用, 39(6): 142-151.
- 张景山. 1994. 辽东硼镁石型硼矿床地质特征及成矿作用[J]. 辽宁地质, (4): 289-324.
- 赵鸿. 2007. 我国硼矿床的类型及工业利用[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 郑绵平, 陈文西, 齐文. 2016. 青藏高原火山-沉积硼矿找矿的新发现与远景分析[J]. 地球学报, 37(4): 407-418.
- 郑学家. 2005. 硼及硼酸盐产品开发和前景[J]. 无机盐工业, 4: 1-3.