

# 中国硼矿床成矿规律概要与找矿远景分析\*

王莹<sup>1,2</sup>, 熊先孝<sup>1\*\*</sup>

(1 中化地质矿山总局化工地质调查总队, 北京 100101; 2 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要** 硼矿是重要的化工矿产资源, 广泛应用于玻璃工业、陶瓷工业、洗涤剂和农用化肥。2014年至今, 中国地质调查局组织编写的中国矿产地质志, 全面总结了我国硼矿的资源特征和成矿规律。文章依托中国矿产地质志项目, 总结了我国硼矿的成矿规律, 圈定了硼矿找矿远景区, 对未来硼矿的找矿工作有一定的参考价值。文章选取了具有代表性的矿床进行详细解剖工作, 分别建立了现代盐湖型和沉积变质型典型硼矿床的预测模型。我国硼矿床的主要类型包括现代盐湖型、沉积变质型、地下卤水型、砂卡岩型和海相火山岩型。目前, 我国共发现硼矿的矿产地 216 处, 查明资源储量 7575.69 万 t ( $B_2O_3$ ), 分布在辽宁、西藏、青海、湖北等 14 个省(市、自治区)。在成矿时代上, 我国硼矿主要形成于新生代、古元古代和中生代。在空间上, 我国硼矿可划分为 14 个Ⅲ级成矿区带和 11 个矿集区。根据硼矿成矿预测成果, 本文圈定了 10 个硼矿找矿远景区和 8 个优先勘查区, 其中优先勘查区主要集中在青海油泉子(地下卤水型), 昆特依(现代盐湖型), 辽宁夹皮沟-红石砬子、吉林高台沟(沉积变质型), 西藏扎布耶茶卡、依布茶卡、麻米错、班戈错(现代盐湖型)等地区。

**关键词** 地质学; 硼矿; 成矿规律; 预测模型; 找矿远景; 地质调查

中图分类号: P578.93

文献标志码: A

## Metallogenic regularity and prospecting prospectivity analysis of boron deposits in China

WANG Ying<sup>1,2</sup> and XIONG XianXiao<sup>1</sup>

(1 General Institute of Chemical Geology Survey of CCGMB, Beijing 100101, China; 2 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

### Abstract

Boron ore is an important chemical mineral resource, which is widely used in glass industry, ceramic industry, detergent and agricultural fertilizer. Since 2014, the compilation of Annals of Geology of Mineral Resources of China has been organized by China Geological Survey, which comprehensively summarizes the resource characteristics and metallogenic regularity of boron deposits in China. Based on the project of Annals of Geology of Mineral Resources of China, this paper systematically summarizes the metallogenic regularity of boron deposits in China and delineates the potential prospecting areas of boron ore, which has certain reference value for exploring boron deposits in China in the future. In this paper, the representative boron deposits are selected for detailed study and the prediction models of modern salt lake type and sedimentary metamorphic type boron deposits are established respectively. The main types of boron deposits in China include modern salt lake type, sedimentary metamorphic type, underground brine type, skarn type and Marine volcanic rock type. Up to now, there are 216 boron mines/deposits in China with 75 756 900 tons of confirmed resources/reserves ( $B_2O_3$ ), which is distributed

\* 本文得到中国矿产地质志项目(编号:DD20221695、DD20190379、DD20160346)资助

第一作者简介 王莹,女,1987年生,博士研究生,高级工程师,从事矿产地质、环境地质研究。Email:496776694@qq.com

\*\* 通讯作者 熊先孝,男,1961年生,教授级高级工程师,从事矿产资源研究工作。Email:xxx@hgdy.com.cn

收稿日期 2021-11-09;改回日期 2022-08-01。秦思婷编辑。

in 14 provinces (or municipalities, autonomous regions) including Liaoning, Xizang, Qinghai and Hubei. In terms of metallogenic age, boron deposits in China are mainly formed in Cenozoic, Paleoproterozoic and Mesozoic. In space, boron deposits in China are mainly concentrated in 14 grade III metallogenic belts and 11 ore concentration areas. According to the results of boron ore-forming prediction, 10 boron ore-prospecting potential areas and 8 high priority exploration areas are delineated. In the future, the exploration focus of boron deposits in China should be the Youquanzi area (underground brine type) and Kuntayi area (modern salt lake type) in Qinghai Province, the Jiapigou-Hongshilazi area in Liaoning Province and Gaotaigou area in Jilin Province (sedimentary metamorphic type), the Zabuyechaka, Yibuchaka, Mamico, Bango Co areas etc. in Xizang (modern salt lake type).

**Key words:** geology, boron ore, metallogenic regularity, prediction model, prospecting prospect, geological survey

硼及硼化合物具有阻燃、耐热、高硬、耐磨及催化等特殊性能,广泛应用于冶金、建材、机械、电器、化工、医药、农业、核电、航空航天、军事装备、电子器件及光学仪器等领域。其中,玻璃工业、陶瓷工业、洗涤剂 and 农用化肥是硼的主要用途,约占全球硼消费量的3/4。硼矿是一种不可再生的矿产资源,其可持续开发与利用直接关系到人类的生存发展。

全球硼矿资源较丰富,但分布很不平衡。据美国地质调查局统计,2016年全球硼矿储量3.80亿t(以 $B_2O_3$ 计),主要分布在欧洲、北美、亚洲、南美等地区,其中,98.6%集中分布在土耳其、美国、俄罗斯、智利、中国(张福祥等,2019;焦森等,2020)。中国硼矿储量3200万t,占世界总量的8.42%,位居世界第五。

截至2016年底,中国累计查明资源储量( $B_2O_3$ )7575.69万t,集中分布在辽宁、西藏、青海、湖北。其中,辽宁37%,西藏28%,青海25%,湖北6.90%,占总查明资源储量的96.90%。中国硼矿成因类型较多,而各类硼矿的矿物成分相当复杂,共生、伴生矿物很多。全国累计查明资源储量中,现代盐湖型3967万t,占总资源储量的52.36%;沉积变质型2886.69万t,占总资源储量38.10%;地下卤水型594万t,占总资源储量7.84%;矽卡岩型117.27万t,占总资源储量1.55%;海相火山岩型4.22万t,占总资源储量0.15%(尚红林等,2019)。

中国硼矿地质工作开展较早。1949年以前,李希霍芬、木户忠太郎、葛利普等一批外国学者(1869~1923年)及孙云铸、李四光、翁文灏、黄汲清等国内著名的地质学家(1923~1931年)均在辽宁做过零星的地质工作,多以矿产调查为主。1949年以来,中国硼矿勘查工作大致可以分为计划经济时期(1953~1978年)、改革开放时期(1979~2000年)和新时期(2001

年至今)。计划经济时期,中国新发现硼矿主要分布在辽东吉南和青藏硼矿带;改革开放时期,共发现大中型硼矿产地10处,新发现大型硼矿主要为辽宁栾家沟深部、花园沟深部、辽宁营口盆沟、西藏改则麻木错4处;新时期仍然重点加强了辽东、吉南沉积变质再造硼矿和西藏地区盐湖型硼矿找矿和勘查工作,发现硼矿41处,其中,大中型8处。2000年以来,区域层面的硼矿研究工作开始实施,但对于硼矿成矿规律的研究,大多仅限于单个矿床或单种成矿类型,仍然缺乏全国性的规律研究工作,也未开展硼矿全国性资源预测工作,资源“家底”不清,重要成矿远景区的找矿工作突破有限,已不能满足勘查工作的需要(胡墨田等,1993;王翠芝等,2006;邵世宁等,2010;王莹等,2014;吴文骥等,2016;曹焯等,2018;付燕刚等,2018;李超等,2020)。2007~2013年,以成矿系列理论为基础,成矿规律研究和成矿区带为背景,中国地质调查局实施了全国化工矿产资源潜力评价项目,硼矿研究取得了阶段性的成果(刘敬党等,2005;齐路晶等,2014)。2014年至今,中国地质调查局实施的中国矿产地质志全面总结了硼矿的资源特征和成矿规律,是在全国矿产资源潜力评价等项目的基础上,对中国硼矿床理论研究与勘查成果的总结和深化,提升了对全国硼矿矿情的掌握(齐永生等,2009;徐志刚等,2015;林勇杰等,2017;黄凡等,2020;沈保丰等,2020)。本文依托中国矿产地质志项目,系统总结了全国层面硼矿时空分布特征,在《中国成矿区带划分方案》的基础上划分了硼矿的三级成矿区带,并以此圈出11个硼矿矿集区,通过对典型矿床的研究总结,建立了典型矿床预测模型,圈定了全国硼矿重要成矿预测区和硼矿找矿远景区,并进一步圈出硼矿重点勘查区,对未来中国硼矿找矿工作有一定的参考价值。

# 1 成矿规律

## 1.1 时空分布特征

### 1.1.1 空间分布特征

目前,全国查明硼矿资源储量 7575.69 万 t ( $B_2O_3$ ),分布在辽宁、西藏、青海、湖北、四川、湖南、广东、吉林等 14 个省(市、自治区),按矿床类型分为沉积变质型、现代盐湖型、地下卤水型、砂卡岩型和海相火山岩型。其中,沉积变质型主要分布在中国辽东-吉南地区;现代盐湖型主要分布在青海、西藏;地下卤水型主要分布在四川盆地和湖北潜江盆地;砂卡岩型主要分布在湖南南部、广西东北部、广东西北部、江苏中南部、浙江西北等地区;海相火山岩型主要分布在依连哈比

尔尕-博格达裂谷盆地的博格达晚古生代裂谷内。

中国有 216 处硼矿矿产地,其中,超大型 7 处,大型 31 处,中型 51 处,小型 54 处,矿点 73 处(图 1)。根据徐志刚等(2010)的中国成矿区带划分方案,全国 216 个硼矿矿产地主要分布在:① III-56 辽东(台隆)Fe-Cu-Pb-Zn-Au-U-硼-菱镁矿-滑石-石墨-金刚石成矿带(矿产地 58 处,占比 26.85%);② III-37 羌南(地块/前陆盆地)Fe-Sb-B(Au)成矿带( $J_2; N_1; Q$ )(矿产地 43 处,占比 19.91%);③ III-40 班公湖-怒江(缝合带)Cr 成矿带( $J$ )(矿产地 21 处,占比 9.72%);④ III-25 柴达木盆地 Li-B-K-Na-Mg-盐类-石膏-石油-天然气成矿区( $Kz$ )(矿产地 16 处,占比 7.41%);⑤ III-41 狮泉河-申扎(岩浆弧)W-Mo-(CuFe)-硼-砂金成矿带( $E_1; Q$ )(矿产地 15 处,占比



图 1 中国小型及以上硼矿矿产地分布图

Fig.1 Distribution map of small and above boron deposits in China

6.94%)(尚红林等,2019)。

### 1.1.2 时间分布特征

中国硼矿的成矿时代从古到新依次为古元古代、中元古代、晚古生代、中生代及新生代。全国216个硼矿产地,新生代居首,矿产地占56.78%,查明资源储量占52.76%;其次为古元古代,矿产地占27.64%,查明资源储量占43.31%;中生代矿产地占10.05%,查明资源储量占3.85%;晚古生代矿产地占4.02%,查明资源储量占0.04%;中元古代矿产地占1.51%,查明资源储量占0.04%。

中国硼矿成矿时代具有一定规律性。沉积变质型硼矿形成于古元古代和中元古代,多为古元古代;现代盐湖型硼矿均形成于新生代;地下卤水型硼矿形成于中生代和新生代,以新生代为主;矽卡岩型硼矿均形成于中生代;海相火山岩型硼矿形成于晚石炭纪。

## 1.2 中国硼矿床成矿系列

中国共厘定出硼矿床成矿系列17个(含矿床成矿亚系列16个及矿床式10个),按构造-成矿旋回将全国硼矿床成矿系列分为5个。

(1) 古元古代硼矿床成矿系列,分布于辽宁省和吉林省,对应的成矿系列为辽东-吉南裂谷区与古元古代火山-沉积-侵入岩浆-变质作用有关的Fe、Cu、Pb、Zn、Au、Co、Ni、Ag、B、S、U、菱镁矿、滑石矿、岫玉、石墨矿床成矿系列,集中分布于辽宁省内的古元古代裂谷区及吉林省内吉南地区。

(2) 中元古代硼矿床成矿系列,分布于天津市,属于华北地台中、东部与中、新元古代构造旋回岩浆-沉积作用有关的Fe、Ti、V、Mn、Pb、Zn矿床成矿系列组。

(3) 晚古生代硼矿床成矿系列,分布在新疆维吾尔自治区,属于准噶尔南缘与华力西构造旋回沉积、岩浆作用有关Fe、Cr、Ti、Mn、Cu、Zn、Mo、W、Sb、As、Au、铂族金属、多金属、石油、天然气、油页岩、磷、高岭土、硫铁矿、膨润土、石灰岩、重晶石、透闪石玉、滑石、硼、叶腊石、沸石及石墨、红柱石矿床成矿系列组。

(4) 中生代硼矿床成矿系列,分布在四川、广东、湖南和浙江,涉及3个矿床成矿系列、4个矿床成矿亚系列。

(5) 新生代硼矿床成矿系列,分布在湖北、青海、西藏、新疆和甘肃5个省区,有10个矿床成矿系列、8个矿床成矿亚系列。

## 2 成矿区带

### 2.1 成矿区带划分

按照《中国成矿区带划分方案》I、II、III级成矿区带划分方案(陈毓川,1999a;1999b;陈毓川等,2010a;徐志刚等,2010),在综合研究与总结全国硼矿成矿规律基础上,依照硼矿的成矿构造、成矿规律和现代沉积硼矿受近代地理环境、气候影响等特征,将中国硼矿划分为14个III级成矿区带(表1,图2)。由于现代盐湖型硼矿的特殊性,部分硼矿III级成矿区带跨全国II级成矿省。

### 2.2 硼矿集区

矿集区是指在一定范围内矿床密集产出的区域,在此区域内,按一定空间分布着不同矿种或不同类型的大型或超大型矿床,以及中小型矿床、矿化点和矿化信息。

在硼矿III级成矿区带的基础上,按空间分布、矿床成因和矿床规模及密度等因素将中国硼矿划分了11个矿集区(表2,图3)。

## 3 典型矿床预测模型

预测模型的建立需要充分考虑成矿地质背景与环境、成矿物质来源及矿床地质特征,综合分析并提取各矿床预测要素、主要赋矿岩性等信息,组合形成各矿床预测评价模型(叶天竺等,2007;陈毓川等,2010b;肖克炎等,2013;朱裕生等,2013)。在硼矿资源预测中,深入研究硼矿床与富硼地层、构造、含硼变质建造、化探异常等的关系,选取不同类型硼矿床中的典型矿床,开展矿床地质特征、矿床成矿要素及成矿模式、预测要素及评价模型等系统性分析研究,建立典型矿床的成矿模式和预测模型(Zartman et al., 1981; Yang et al., 2015; Yu et al., 2015; Li et al., 2016; Ma et al., 2016; Zhang et al., 2016; Xiao et al., 2017; Zhang et al., 2017; Lyu et al., 2019; Agterberg, 2021)。

### 3.1 沉积变质型硼矿

以凤城式翁泉沟铁硼矿床为例。该矿床成矿时代为古元古代,大地构造位置属于华北陆块区胶东古陆块胶辽古裂谷,成矿层位为古元古界辽河群里尔峪岩组。沉积建造方式为海相沉积火山岩-碳酸盐岩建造,里尔峪岩组角闪岩相层状变质建造为斜长浅粒岩层、角闪透辉变粒岩、白云石大理岩-钙镁

表 1 中国硼矿成矿区带划分表(据尚红林等,2019)

Table 1 Division of boron mineralization belts in China (from Shang et al., 2019)

成矿域	成矿省	硼矿Ⅲ级成矿区带	对应全国Ⅲ级成矿区带	Ⅲ级成矿区带名称	典型矿床
古亚洲成矿域 (I-1)	准噶尔成矿省 (II-2)	Ⅲ B-1	Ⅲ-5	准噶尔盆地石油-天然气-U-煤-盐类-膨润土成矿区 (Mz-Kz)	玛纳斯钾盐矿(伴生硼)
	准噶尔成矿省 (II-2)	Ⅲ B-2	Ⅲ-6	准噶尔南缘 Cu-Mo-Au-W-Fe-Cr-Mn-稀有-硼-沸石-石墨-透闪石玉-滑石成矿带(V <sub>m</sub> )	西西尔塔格硼矿
	塔里木成矿省 (II-4)	Ⅲ B-3	Ⅲ-15	敦煌(地块)Au-磷-芒硝成矿区(Pz <sub>1</sub> ;Q)	敦煌市西湖硼矿点
	塔里木成矿省 (II-4)	Ⅲ B-3	Ⅲ-14	磁海-公婆泉 Fe-Cu-Au-Pb-Zn-Mn-W-Sn-Rb-V-U-P 成矿带(Pt <sub>2</sub> ;Pt <sub>3</sub> <sup>1</sup> ;C <sub>6</sub> ;C <sub>1</sub> ;Vm;V <sub>1</sub> ;I-Y)	(仅做了预测)
秦祁昆成矿域 (I-2)	阿尔金-祁连成矿省(II-5)	Ⅲ B-4	Ⅲ-19	阿尔金 Au-Cr-石棉-和田玉成矿带(An-ε;Pz <sub>1</sub> ;C)	乌苏硝钾盐矿(伴生硼)
	昆仑(造山带)成矿省(II-6)	Ⅲ B-5	Ⅲ-24	柴达木北缘 Pb-Zn-Mn-Cr-Au-白云母成矿带(C;V <sub>m-1</sub> )	大柴旦硼矿、察尔汗钾锂硼矿
	昆仑(造山带)成矿省(II-6)	Ⅲ B-6	Ⅲ-25	柴达木盆地 Li-B-K-Na-Mg-盐类-石膏-石油-天然气成矿区(K <sub>2</sub> )	西台吉乃尔锂硼矿、南翼山硼矿
特提斯成矿域 (I-3)	喀喇昆仑-三江(造山带)成矿省(II-9)	Ⅲ B-7	Ⅲ-33	金沙江(缝合带)Fe-Cu-Pb-Zn成矿带(T <sub>3</sub> ;E <sub>2</sub> -N <sub>1</sub> )	
		Ⅲ B-7	Ⅲ-35	喀喇昆仑-羌北(弧后前陆盆地)Fe-Au-石膏成矿带(J;Q)	龙木错硼矿
		Ⅲ B-7	Ⅲ-37	羌南(地块/前陆盆地)Fe-Sb-B(Au)成矿带(J <sub>2</sub> ;N <sub>1</sub> ;Q)	才玛尔错硼矿、查波错硼矿、依布茶卡硼矿、朋彦错硼矿、雀日茶卡硼矿
	冈底斯-腾冲(造山带)成矿省(II-10)	Ⅲ B-7	Ⅲ-40	班公湖-怒江(缝合带)Cr成矿带(J)	杜佳里硼矿、扎仓茶卡硼矿
		Ⅲ B-7	Ⅲ-41	狮泉河-申扎(岩浆弧)W-Mo-(CuFe)-硼-砂金成矿带 (E <sub>1</sub> ;Q)	扎布耶茶卡硼矿、拉果错硼矿、当雄错硼矿、麻米错硼矿
		Ⅲ B-7	Ⅲ-42	班戈-腾冲(岩浆弧)Sn-W-Be-Li-Fe-Pb-Zn-白云母成矿带(Y)	班戈错硼矿
		Ⅲ B-7	Ⅲ-43	拉萨地块(冈底斯岩浆弧,含日喀则弧前盆地)Cu-Au-Mo-Fe-Sb-Pb-Zn成矿带(Ye-m;K <sub>1</sub> <sup>3</sup> ;N <sub>1</sub> <sup>2</sup> )	
华北陆块成矿省(II-14)	Ⅲ B-8	Ⅲ-56	辽东(台隆)Fe-Cu-Pb-Zn-Au-U-硼-菱镁矿-滑石-石墨-金刚石成矿带	高台沟硼矿、凤城翁泉沟铁硼矿、宽甸杨木杆子硼矿	
	Ⅲ B-9	Ⅲ-57	华北地台北缘东段 Fe-Cu-Mo-Pb-Zn-Ag-Mn-U-磷-煤-膨润土成矿带	东水厂锰硼矿	
	Ⅲ B-10	Ⅲ-69	长江中下游 Cu-Au-Fe-Pb-Zn-(Sr-W-Mo-Sb)-硫铁矿-石膏成矿带	长兴和平硼矿	
滨太平洋成矿域 (I-4)	扬子成矿省 (II-15)	Ⅲ B-11	Ⅲ-71	武功山-杭州湾 Cu-Pb-Zn-Ag-Au-W-Sn-Nb-Ta-Mn-海泡石萤石-硅灰石成矿带	(仅做了预测)
		Ⅲ B-12	Ⅲ-72	江汉-洞庭(断陷)膏盐油气成矿区(Kz)	潜江凹陷盐(硼)矿
	华南成矿省 (II-16)	Ⅲ B-13	Ⅲ-74	四川盆地 Fe-Cu-Au-石油-天然气-石膏-钙芒硝-食盐-煤-煤层气成矿区(T <sub>1,2</sub> ;J <sub>1</sub> ;K <sub>2</sub> ;Kz)	自贡邓井关卤水硼矿
			Ⅲ-83	南岭中、南段 W-Sn-Mo-Be-REE-(Pb-Zn-Au)成矿带 (Ym <sup>1</sup> ;Y <sub>1</sub> <sup>1</sup> ;Q)	常宁县七里坪硼矿、连平大顶硼矿、阳山九龙坪硼矿
			Ⅲ-80	浙闽粤沿海 Pb-Zn-Cu-Au-Ag-W-Sn-Nb-Ta-叶腊石-明矾石-萤石成矿带(Ym;Y <sub>1</sub> <sup>1</sup> )	(仅做了预测)
华南成矿省 (II-16)	Ⅲ B-14	Ⅲ-82	永安-梅州-惠阳(拗陷)Fe-Pb-Zn-Cu-Au-Ag-Sb成矿带(Ym)	(仅做了预测)	
		Ⅲ-84	粤中(拗陷)RM-Sn-W-U-Au-Ag-Cu-Pb-Zn-水晶-萤石-高岭土成矿带(Ye;Q)	(仅做了预测)	
	Ⅲ-85	粤西-桂东南 Sn-Au-Ag-Cu-Pb-Zn-Fe-Mo-W-Nb-Ta-Mn-硫铁矿成矿带	(仅做了预测)		



图2 中国硼矿Ⅲ级成矿区带划分图

1—成矿省界线;2—硼矿Ⅲ级成矿区带及编号

Fig. 2 Classification of grade III metallogenic belts of boron deposits in China

1—Second grade metallogenic province; 2—Boron deposit grade III metallogenic belts and numbering

硅酸盐岩、黑云变粒岩、斜长角闪岩等。变质作用对原始矿源层的硼元素起到了改造富集作用,主要表现为硼镁铁矿、硼镁石的形成和原生硼矿的纤维硼镁石化。短轴背、向斜构成的穹窿状复式背斜构造使两翼里尔峪组变化,局部达到翻转,为板硼镁石、硼镁铁矿在有利的构造部位富集成矿。该矿床的成矿物质来源主要为火山喷发物质及陆源碎屑物。

翁泉沟铁硼矿床形成分为成矿物质喷出和物理化学分选、铁质-硼质-镁质同沉积成矿、铁硼矿变质富集成矿3个阶段。其中,元古宙早期,太古宙克拉通发生断陷,形成封闭-半封闭裂谷盆地。沿裂陷轴发育中基性海底火山,形成凝灰质沉积,海水酸化溶解铁质、钙镁质,硼元素以  $H_3BO_3$  或  $B(OH)_4$  形式存在于温热海水中。在海底火山喷发的间歇期,海水

降温、pH值升高、气候干燥等因素使铁-镁-硼等发生同构造化学沉积-沉积成矿。随后,海底火山再次喷发,沉积形成了硼铁矿层的顶板位置及其上面凝灰质的辽河群里尔峪岩组一段上层变粒岩和二段粒岩夹变粒岩段等上覆岩层。古元古代末期,随着结晶基底沿裂谷的古火山口-线活化-塑性底辟上侵,硼铁矿层同整个辽河群一道经受了角闪-绿片岩相变质作用,形成穹窿状短轴构造。原始铁硼矿物变质为硼镁铁、硼镁石、磁铁矿等,并活化迁移到构造虚脱部位富集成矿。

翁泉沟式铁硼矿床的铁、硼共生是标志性特征,因此,硼元素化探异常对凤城式翁泉沟铁硼矿床定位指示和定量预测均具有重要意义。由于条痕状混合花岗岩,既是控矿构造核部,又是古火山口的定

表 2 中国硼矿矿集区  
Table 2 Boron ore concentration areas in China

成矿省		硼成矿区带		矿集区	
编号	名称	编号	名称	编号	名称
II-6	昆仑(造山带)成矿省	III B-5	柴达木北缘成矿带	1	大小柴旦矿集区
		III B-6	柴达木盆地成矿区	2	茫崖南翼山矿集区
				3	台吉乃尔湖矿集区
II-9、 II-10	喀喇昆仑-三江(造山带)成矿省、 冈底斯-腾冲(造山带)成矿省	III B-7	冈底斯-念青唐古拉成矿带	4	结则茶卡矿集区
				5	拉果错矿集区
				6	查波错矿集区
				7	达则错矿集区
II-14	华北陆块成矿省	III B-8	辽东(隆起)成矿带	8	凤城-宽甸矿集区
II-15	扬子成矿省	III B-13	四川盆地成矿区	9	集安高台沟矿集区
II-16	华南成矿省	III B-14	南岭西段成矿带	10	邛崃平落坝矿集区
				11	常宁七里坪矿集区



图 3 中国硼矿矿集区及Ⅲ级预测区分布图

1—地下卤水型;2—沉积变质型;3—矽卡岩型;4—现代盐湖型;5—硼矿矿集区

Fig. 3 Distribution of boron ore concentration areas and grade III prediction areas in China

1—Underground brine type; 2—Sedimentary metamorphic type; 3—Skarn type; 4—Modern salt lake type; 5—Boron ore concentration areas

位条件,并且是硼铁矿的间接底板,所以也是重要预测要素。

按照预测要素,以翁泉沟铁硼矿床磁法、化探综合剖面图(地质剖面叠加磁法、化探剖面)为基础,绘制出了矿体与对应磁异常线、硼量等值线在垂向上的吻合程度,建立了典型矿床预测模型图(图4a、b)。

### 3.2 现代盐湖型硼矿

以大柴旦式大柴旦盐湖硼矿床为例,该矿床的盐类沉积时代为第四纪上更新世—全新世。大地构造位置位于柴达木中间地块之北部,南部祁连地槽褶皱带之南缘,为柴达木北部过渡带的一部分。大柴旦盐湖化学沉积型硼矿床分为湖底硼矿床和湖滨地表硼矿2种,前者岩石自然类型为淤泥石膏硼矿、芒硝硼矿及石盐硼矿、含盐黏土硼矿、盐类硼矿;后

者以水方解石、钠硼解石为主要矿物的硼矿产于湖滨地表,共生盐类矿物有石盐、芒硝、石膏及碳酸盐矿物。沉积作用主要为蒸发-化学沉积作用。补给条件为周边河流的补给、集中的大气降水补给、深部循环水的越流补给。

地表湖水的水化学类型为硫酸镁亚型,矿化度330~350 g/L,湖水比重1.21~1.24,有用组分含量: $w(\text{KCl})$ 为0.69%~1.20%, $w(\text{B}_2\text{O}_3)$ 平均2.13~2.45 g/L, $w(\text{Li}^+)$ 平均125.64~133.27 mg/L。晶间卤水的水化学类型为硫酸镁亚型,矿化度一般在320 g/L左右,卤水比重1.21~1.25,属高矿化饱和型卤水,富含 $\text{K}^+$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Li}^+$ 等盐类矿物。下盐层物源补给方向受四周河水补给,上盐层物源补给方向主要为自东向西补给。

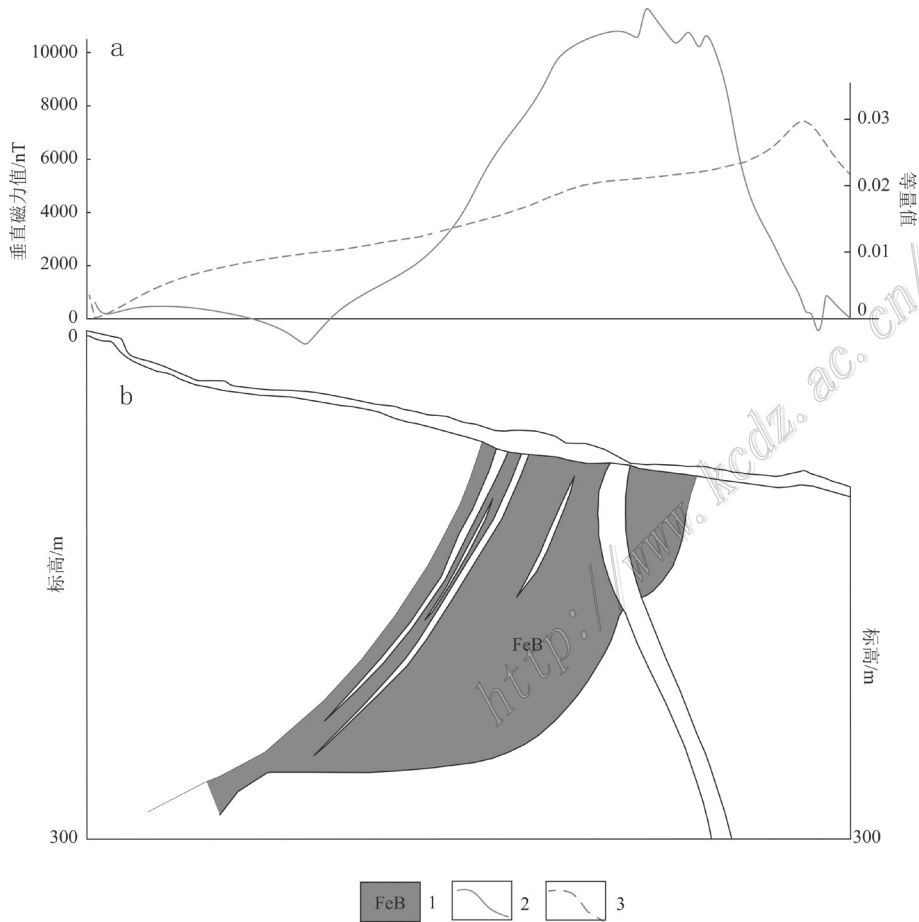


图4 辽宁省凤城翁泉沟式铁硼预测模型(a)及矿床剖面图(b)(据辽宁省地质矿产调查院,2012)

1—铁硼矿体;2—垂直磁力等值线;3—硼量等值线

Fig. 4 Prediction model (a) and cross section (b) of the Wengquangou type Fe-B deposit in Fengcheng, Liaoning Province (after Liaoning Institute of Geology and Mineral Resources Survey, 2012)

1—Iron-boron ore body; 2—Vertical magnetic intensity curve; 3—Boron content



在30~15万年前期(中更新世末期)的柴达木运动以后(约在晚更新世早期),处于山间凹地中的大、小柴旦湖已经形成。在晚更新世早、中期,大柴旦湖盆地主要为浅湖、滨湖相碎屑沉积,直到晚更新世晚期开始有盐类沉积,即大柴旦湖第一成盐期(下部盐层)。此时,大柴旦湖受四周河水补给,且在早期的均衡运动条件下,形成石盐沉积,主要分布于盐类沉积区的中部,向边缘逐渐过渡为芒硝、淤泥石膏,中心部位底部见有白钠镁矾并含硼矿层,形成了同心圆式的所谓“牛眼式”成盐(成矿)模式。当形成上盐层前(即晚更新世末期),大柴旦湖东、西发生了差异运动,大柴旦湖东侧发生隆起,塔塔林河被迫向东偏移,以小柴旦湖为最低侵蚀基准面,横切胜利口东侧,补给小柴旦湖。由于东侧隆起,导致大柴旦湖地形东高西低,水流自东往西补给,湖水自东向西运移,因此,大柴旦湖沉积上部盐层时,盐类沉积自东往西为石膏→石膏石盐→芒硝石盐→石盐,形成所谓“泪滴式成矿模式”。

大柴旦盐湖硼矿床,卤水水化学特征、硼元素化探异常对矿床定位指示和定量预测均具有重要意义。重力异常可以确定湖盆沉降区位置,遥感色异常可以确定盐类沉积物和卤水水体的范围,也是重要的预测要素。矿床预测模型见图5a、b。

## 4 找矿远景

### (1) 硼矿资源量预测方法

本次预测采用叶天竺等2007年提出的矿床模型综合地质信息预测方法(叶天竺等,2007),根据全国化工矿产资源潜力评价项目成果,全国各省区在建立了本省区不同预测类型典型矿床预测模型和区域预测模型基础上,圈定了最小预测区。各类型预测区资源量估算方法采用体积估计法,取500 m以浅、1000 m以浅、2000 m以浅分别估算资源量,采用此方法进行资源量估算的同时,还运用矿床地质经济模型法(品位-吨位模型法)估算资源量,以印证结果的合理性及可靠程度。

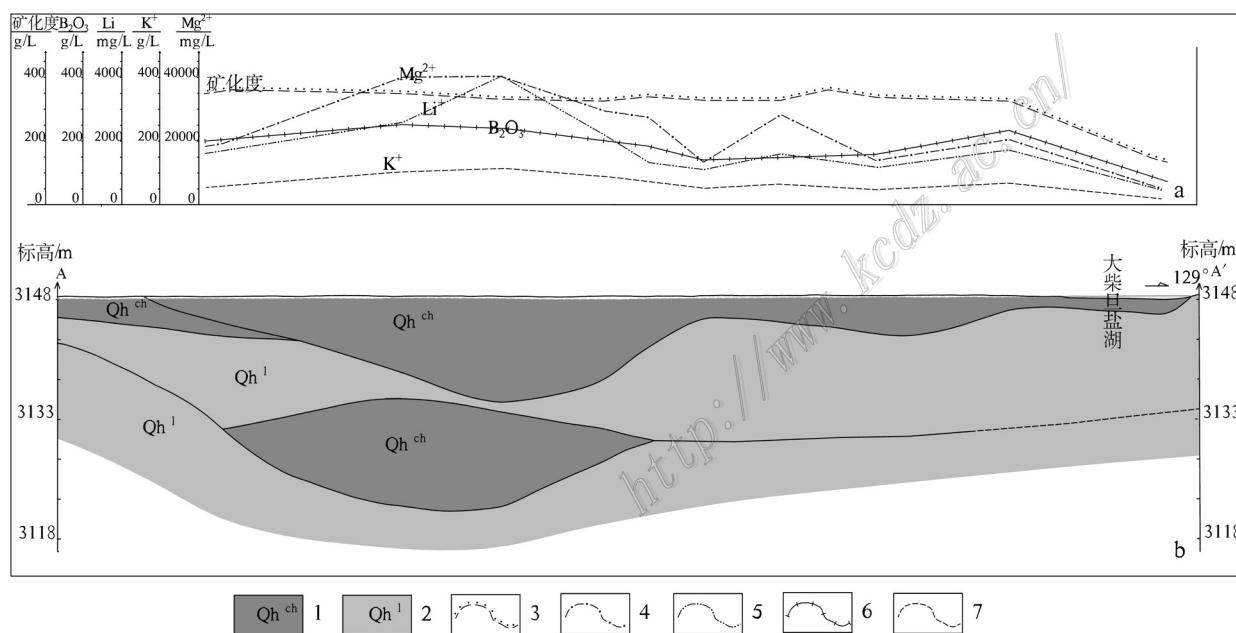


图5 青海省海西州大柴旦硼矿床预测模型(a)及剖面图(b)(据青海省地质矿产勘查开发局,2013)

1—湖泊化学沉积,石盐、芒硝、石膏淤泥、含砂石膏;2—湖泊机械沉积,含石膏砂质黏土、砂质黏土;3—矿化度等值线;4—Mg量等值线;  
5—Li量等值线;6— $B_2O_3$ 量等值线;7—K量等值线

Fig. 5 Prediction model (a) and cross section (b) of the Dachaidan boron deposit in Haixi, Qinghai Province (after Qinghai Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2013)

1—Lake chemical deposition, halite, mirabilite, gypsum silt, sand-bearing gypsum; 2—Lake mechanical deposition, gypsum bearing sandy clay, sandy clay; 3—Salinity; 4—Mg content; 5—Li content; 6— $B_2O_3$  content; 7—Potassium content

### (2) 全国硼矿3级成矿预测区

按照统一技术要求和圈定原则,在全国硼矿资源潜力评价成果的基础上,将全国硼矿圈定48个3级预测区,其中,现代盐湖型3级预测区22个,矽卡岩型3级预测区20个,沉积变质型3级预测区3个,地下卤水型3级预测区3个(图3)。

### (3) 全国硼矿找矿远景区划分

在划分了全国14个硼矿成矿区带、11个矿集区的基础之上,根据近几年通过危机矿山深部找矿、地质大调查和商业性勘查对辽-吉裂谷带、青藏地区、四川盆地和两广地区等主要硼矿富集区资源调查、勘探、评价资料,并结合成矿规律研究及矿产预测研究成果,划分出全国硼矿重要的找矿远景区10个(表3)。

## 5 硼矿未来勘查部署建议

根据中国硼矿地质特征,充分考虑中国硼矿资源开发利用现状,未来规划以及经济社会发展需求,

从全国层面考虑,坚持当前急需与长远需求相结合的原则,适度超前部署勘查工作;坚持突出重点类型、重点区域的原则,对那些成矿条件好、选冶性能好的类型优先勘查;坚持不同层次部署工作的原则,根据成矿地质条件和原有工作程度,统筹安排硼矿勘查工作。依照勘查工作部署原则,对硼矿远景区进行分类,划分了8个优先勘查区(表4)。

## 6 结论

(1) 中国硼矿的主要类型有现代盐湖型、沉积变质型、地下卤水型、矽卡岩型和海相火山岩型,以前3种为主,占总资源量的98.3%。截至目前,全国共有硼矿产地216处,其中超大型7处,大型31处,中型51处,小型54处,矿点73处。截至2016年,查明资源储量7575.69万t( $B_2O_3$ )。根据中国硼矿成矿规律,将中国硼矿划分为14个Ⅲ级成矿区带和11个矿集区。在划分矿产预测类型的基础上,选取了

表3 中国硼矿重要找矿远景区一览表(据尚红林等,2019)

Table 3 List of important boron prospecting potential areas in China (data from Shang et al., 2019)

成矿省		硼矿成矿区带		重要找矿远景区	
编号	名称	编号	名称	编号	名称
Ⅱ-6	昆仑(造山带)成矿省	ⅢB-6	柴达木盆地成矿区	ⅢB-6-1	青海海西州
Ⅱ-14	华北陆块成矿省	ⅢB-8	辽东(隆起)成矿带	ⅢB-8-1	辽宁营口-宽甸
Ⅱ-6	昆仑(造山带)成矿省	ⅢB-5	柴达木北缘成矿带	ⅢB-5-1	青海冷湖
Ⅱ-16	华南成矿省	ⅢB-14	南岭中、南段成矿带	ⅢB-14-1	湖南水口山-上堡
				ⅢB-7-1	西藏自治区仲巴县
				ⅢB-7-2	西藏自治区尼玛县
				ⅢB-7-3	西藏自治区革吉县
				ⅢB-7-4	西藏自治区改则县
				ⅢB-7-5	西藏自治区班戈县1
				ⅢB-7-6	西藏自治区班戈县3
Ⅱ-10	冈底斯-腾冲(造山带)成矿省	ⅢB-7	冈底斯-念青唐古拉成矿带		

注:西藏自治区班戈县有3个找矿远景区,其中1号和3号为表中所列的重要找矿远景区。

表4 全国硼矿优先勘查区(据尚红林等,2019)

Table 4 High priority exploration areas of boron deposits in China (data from Shang et al., 2019)

编号	优先勘查区名称	物探	化探	遥感	勘查	预期成果/ $10^4$ t
B63002	青海油泉子地下卤水型硼矿	重力	无	推断解译地质构造	钻探	14143.92
B21001	辽宁夹皮沟-红石砬子沉积变质型硼矿	磁测	B地球化学测量	不建议	探槽、钻探	3257.74
B54012	西藏扎布耶茶卡现代盐湖型硼矿	1:10万重力测量	1:5万遥感解译	1:5万遥感解译	勘探工作	807.50
B63001	青海昆特依现代盐湖型硼矿	重力	无	推断解译地质构造	钻探	646.90
B54010	西藏依布茶卡现代盐湖型硼矿	1:10万重力测量	1:5万遥感解译	1:5万遥感解译	详查工作	310.41
B54011	西藏麻米错现代盐湖型硼矿	1:10万重力测量	1:5万遥感解译	1:5万遥感解译	勘探工作	291.46
B54013	西藏班戈错现代盐湖型硼矿	1:10万重力测量	1:5万遥感解译	1:5万遥感解译	勘探工作	253.23
B22001	吉林高台沟沉积变质型硼矿					

现代盐湖型和沉积变质型典型硼矿床进行了详细解剖,并分别建立了典型矿床预测模型。

(2) 结合成矿规律研究及矿产预测研究成果,全国划分出硼矿重要找矿远景区10个,优先勘查区8个,未来中国硼矿的勘查重点应该在青海油泉子(地下卤水型)、昆特依(现代盐湖型)、辽宁夹皮沟-红石砬子(沉积变质型),西藏扎布耶茶卡、依布茶卡、麻米错、班戈错(现代盐湖型),吉林高台沟(沉积变质型)等地区。

(3) 中国发现的大多数硼矿床(点)工作程度偏低,大中型矿的勘探深度浅,小型矿床(点)多停留在地表评价阶段,对与成矿有关的控矿岩体、控矿构造大比例尺度研究甚少,难以正确认识资源潜力,未来应继续加强硼矿成矿地质背景总结研究。另外,还应继续加强西部盐湖型硼矿的找矿勘查和开发利用研究,以弥补中国东部产能降低带来的缺口。盐湖型硼矿主要分布在西藏盐湖区和青海盐湖区,矿床研究程度较低,存在较大的资源潜力。对于品位较低的硼矿应加强低成本选矿技术的开发,进一步完善现有硼矿综合利用技术。

(4) 近来有学者在湘南地区芙蓉锡矿床中发现硼矿化,该发现可能预示着湘南地区乃至华南与高分异花岗岩有关的钨锡多金属矿集区有着良好的硼矿成矿潜力,在今后的找矿过程中,需加强与钨锡多金属共伴生的硼矿化研究工作。

**致谢** 感谢“中国矿产地志”项目组全体成员的辛勤付出,感谢导师杨忠芳教授及各位专家在审稿过程中对本文提出的宝贵修改意见!

## References

- Agterberg F. 2021. Aspects of regional and worldwide mineral resource prediction[J]. *Journal of Earth Science*, 32(2): 279-287.
- Cao Y, Tang Y, Yao M J, Shang P Q, Zou Z D, Qiu G Y and Xiong X X. 2018. Geological characteristics and resource potential of sulfur deposits in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(3): 179-195 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y C. 1999a. Prospective evaluation of mineral resources in main metallogenic belts of China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Chen Y C. 1999b. Metallogenic system and regional metallogenic evaluation in China (Vol.1 and Vol.2) [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Chen Y C and Wang D H. 2010a. Technical requirements for the study of important minerals and regional metallogenic regularity[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Chen Y C and Wang D H. 2010b. Classification scheme of important mineral prediction types[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Fu Y G, Hu G Y, Li Y H, Fan C F, Hou K J and Zhao Y. 2018. LA-MC-ICP-MS U-Pb zircon ages of paleoproterozoic migmatitized granites from the Houxianyu Borate deposit, eastern Liaoning constraints on the evolution of the Borate deposits[J]. *Geological Review*, 64(2): 405-417(in Chinese with English abstract).
- Hu M T and Wang P J. 1993. Geological characteristics and metallogenic regularity of boron deposits in Jiaodong-Jinan area[J]. *Chemical Geology*, 15(3): 161-168(in Chinese with English abstract).
- Huang F, Wang D H, Chen Y C, Wang Y, Xu Z G, Zhu M Y and Chen Z H. 2020. An overview of over 100 years of research achievements and compilation of the first “Annals of Geology of Mineral Resources of China” [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 94(1): 1-8+340+9-17(in Chinese with English abstract).
- Jiao S, Zheng H Y, Qu Y Y, Liu B Q and Han B B. 2020. Supply and demand situation of global boron resources[J]. *Land and Resources Information*, (10): 85-89(in Chinese with English abstract).
- Li C, Wang Y, Li H Y, Wu W B, Feng J and Wang Y M. 2020. Geological characteristics and prospecting criteria of Songshu boron deposit in Dashiqiao City, Liaoning Province[J]. *Journal of Mineral Exploration*, 11(6): 1160-1165(in Chinese with English abstract).
- Li R X, Wang G W and Emmanuel J M C. 2016. GeoCube: A 3D mineral resources quantitative prediction and assessment system[J]. *Computers and Geosciences*, 89: 161-173.
- Lin Y J, Zheng M P and Liu X F. 2017. Boron resource of salt lakes in Qinghai-Tibet plateau[J]. *Science and Technology Review*, 35(12): 77-82(in Chinese with English abstract).
- Liu J D, Xiao R G, Wang S Z and Wang C Z. 2005. Metallogenic geological characteristics and prospecting of Zhuanmiao boron deposit in Kuandian, Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 14(2): 126-131(in Chinese with English abstract).
- Lyu X and Gong E. 2019. Intelligent clustering analysis model for mining area mineral resource prediction[J]. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 37(39): 1-8.
- Ma Y Y, Wang X and Fan J Z. 2016. Application research on quantitative prediction of mineral resources based on the grey relational analysis algorithm with dual hesitant fuzzy information[J]. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 13(10): 7333-7335.
- Qi L J, Zheng M P, Wu G P, Zhang X F and Du S R. 2014. Metallogenic characteristics and prospecting direction of boron deposits in Qaidam basin: A case study of Hake basin in Yashatu area[J]. *Science and Technology Review*, 32(35): 50-60(in Chinese with English abstract).
- Qi Y S, Wang X and Huang B. 2009. Geological characteristics of boron deposits in Tieli-Tonghe area of Heilongjiang Province[J]. *Ji-*

- lin Geology, 28(3): 56-57+61(in Chinese with English abstract).
- Shang H L, Liu X W, Xiong X X, Wang B Q, Cao Y, Dongye M X, Wang W W and Wang Y. 2019. Mineral geology of China·boron ore volume[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Shao S N and Xiong X X. 2010. Discussion on main boron ore concentration areas and resource potential in China[J]. Geology of Chemical Minerals, 32(2): 65-74(in Chinese with English abstract).
- Shen B F, Zhang K and Bi J H. 2020. Geological characteristics of double metallogenic belts in Paleoproterozoic Liaoji active belt[J]. Mineral Deposits, 39(1): 1-18(in Chinese with English abstract).
- Wang C Z, Xiao R G, Liu J D, Fei H C, Wang W W, Zhou H C and Liu J Q. 2006. Characteristics of boron ores and relationship between the ores and host rocks in Liaodong-Jinan boron deposits[J]. Mineral Deposits, 25(Supp.): 277-280(in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Xiong X X, Sun X H, Cao Y and Shang P Q. 2014. Metallogenic geological characteristics and resource potential analysis of boron deposits in China[J]. Chemical Mineral Geology, 33(1): 38-42(in Chinese with English abstract).
- Wu W J, Shi B and Li Y B. 2016. Geological characteristics and metallogenic prospect evaluation of boron deposits in Kuandian area[J]. Abstract Edition: Natural Science, (2): 204-204(in Chinese with English abstract).
- Xiao K Y, Lou D B, Sun L, Yin J N, Cong Y and Zhang T T. 2013. Collected model of potential evaluation for important national mineral resources in China[J]. Journal of Geology, 37(3): 341-348(in Chinese with English abstract).
- Xiao K Y, Xing S W, Leon B, Sun L, Li N, Yin J N, Cui N and Cong Y. 2017. The China national mineral assessment initiative[J]. Ore Geology Reviews, 91: 1084-1093.
- Xu Z G and Zhu M Y. 2015. Discussion about division schemes of mineral resources and commodity of China[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1321-1345(in Chinese with English abstract).
- Xu Z G, Chen Y C, Wang D H and Chen Z H. 2010. Division scheme of metallogenic zones in China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Yang J, Agterberg F P and Cheng Q M. 2015. A novel filtering technique for enhancing mineralization associated geochemical and geophysical anomalies[J]. Computers and Geosciences, 79: 94-104.
- Ye T Z, Xiao K Y and Yan G S. 2007. Methodology of deposit modeling and mineral resource potential assessment using integrated geological information[J]. Earth Science Frontiers, 14(5): 11-19 (in Chinese with English abstract).
- Yu P P, Chen J P, Zheng X and Yu M. 2015. 3D prospecting information mining and quantitative prediction of mineral resources based on geological models[J]. Advanced Materials Research, 3696: 269-274.
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics—the model[J]. Tectonophysics, 75: 135-162.
- Zhang F X, Zhao S, Liu Z, Jing H P, Zhang W Y, Dong Y T and Wang F X. 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 S H, Xiao K Y, Zhu Y S and Cui N. 2017. A prediction model for important mineral resources in China[J]. Ore Geology Reviews, 91: 1094-1101.
- Zhang Z Z, Jiang G Y, Wang X W and Zhang J F. 2016. Development and utilization of the World's and China's bulk mineral resources and their supply and demand situation in the next twenty years[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 90(4): 1370-1417.
- Zhu Y S, Xiao K Y, Ma Y B and Ding J H. 2013. Review and status of mineralization belt study in China[J]. Journal of Geology, 37(3): 349-357(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 曹焯, 唐尧, 要梅娟, 商朋强, 邹振东, 邱国玉, 熊先孝. 2018. 中国硫矿资源预测模型及资源潜力分析[J]. 地学前沿, 25(3): 179-195.
- 陈毓川. 1999a. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川. 1999b. 中国成矿体系与区域成矿评价(上、下册)[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 王登红. 2010a. 重要矿产和区域成矿规律研究技术要求[M]. 北京: 地质出版社.
- 陈毓川, 王登红. 2010b. 重要矿产预测类型划分方案[M]. 北京: 地质出版社.
- 付燕刚, 胡古月, 李延河, 范昌福, 侯可军, 赵悦. 2018. 辽宁后仙峪硼矿区混合岩的LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年龄: 对硼矿成矿演化的制约[J]. 地质论评, 64(2): 405-417.
- 胡墨田, 王培君. 1993. 辽东-吉南地区硼矿床地质特征及成矿规律[J]. 化工地质, 15(3): 161-168.
- 黄凡, 王登红, 陈毓川, 王岩, 徐志刚, 朱明玉, 陈辉. 2020. 百年勘查成果与成矿规律之集大成——首部《中国矿产地质志》研编阶段性进展概述[J]. 地质学报, 94(1): 1-8+340+9-17.
- 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.
- 李超, 王冶, 李海洋, 吴文彬, 冯坚, 王彦明. 2020. 辽宁大石桥市松树硼矿地质特征及找矿标志[J]. 矿产勘查, 11(6): 1160-1165.
- 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.
- 刘敬党, 肖荣阁, 王生志, 王翠芝. 2005. 辽宁宽甸砖庙硼矿区成矿地质特征及找矿[J]. 地质与资源, 14(2): 126-131.
- 齐路晶, 郑绵平, 武国朋, 张雪飞, 杜少荣. 2014. 柴达木盆地外生硼矿床成矿特征与找矿方向探讨——以雅沙图地区阿克盆地为例[J]. 科技导报, 32(35): 50-60.
- 齐永生, 王旭, 黄斌. 2009. 黑龙江省铁力—通河地区硼矿地质特征

- [J]. 吉林地质, 28(3): 56-57+61.
- 尚红林, 刘兴旺, 熊先孝, 王炳铨, 曹焯, 东野脉兴, 王文武, 王莹. 2019. 中国矿产地质志·硼矿卷[M]. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 沈保丰, 张阔, 毕君辉. 2020. 辽吉古元古代活动带的双成矿带地质特征[J]. 矿床地质, 39(1): 1-18.
- 王翠芝, 肖荣阁, 刘敬党, 费红彩, 王文武, 周红春, 刘敬青. 2006. 辽东吉南硼矿矿石特征及其与容矿岩石的关系[J]. 矿床地质, 25(S1): 277-280.
- 王莹, 熊先孝, 孙小虹, 曹焯, 商朋强. 2014. 中国硼矿成矿地质特征及资源潜力分析[J]. 化工矿产地质, 33(1): 38-42.
- 吴文骥, 时彬, 李艳斌. 2016. 宽甸地区硼矿地质特征及成矿远景评价[J]. 文摘版: 自然科学, (2): 204-204.
- 肖克炎, 娄德波, 孙莉, 阴江宁, 丛源, 张婷婷. 2013. 全国重要矿产资源潜力评价模型汇总[J]. 地质学刊, 37(3): 341-348.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉. 2010. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社.
- 徐志刚, 朱明玉. 2015. 关于中国矿产种类划分方案的讨论[J]. 矿床地质, 34(6): 1321-1345.
- 叶天竺, 肖克炎, 严光生. 2007. 矿床模型综合地质信息预测技术研究[J]. 地学前缘, 14(5): 11-19.
- 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.
- 朱裕生, 肖克炎, 马玉波, 丁建华. 2013. 中国成矿区带划分的历史与现状[J]. 地质学刊, 37(3): 349-357.