

# 青藏高原盐湖硼矿资源

林勇杰<sup>1,2</sup>, 郑绵平<sup>1,2</sup>, 刘喜方<sup>2</sup>

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

**摘要** 青藏高原赋有丰富的盐类矿产资源, 尤以富含硼为其重要特征之一, 形成地球上独特的外生硼成矿带, 为中国已知最有远景的外生硼矿产区。青藏高原盐湖硼矿资源分为固体类型和液体类型, 液体硼矿居多且有较大资源远景, 但目前以开发利用固体硼矿为主。青藏高原盐湖不同水化学类型硼矿具有不同矿物组合和有用矿物, 因此盐湖固体硼矿矿石类型繁多。目前, 青藏高原已发现的硼酸盐矿物有 14 种, 盐湖固体硼矿矿石类型分为硼砂型、镁硼酸盐-钠硼解石型、柱硼镁石-库水硼镁石型、库水硼镁石型和钠硼解石-柱硼镁石型。中国硼矿资源量虽大, 但可利用资源十分有限, 供需矛盾十分突出, 因此推进青藏高原富硼盐湖的综合开发利用和扩大找硼研究工作, 具有重要的科学与经济意义。

**关键词** 青藏高原; 盐湖; 硼矿资源

硼矿是重要的非金属矿产之一, 硼及其化合物因其特殊的物理化学性质而被广泛运用, 是冶金、建材、机械、电器、化工、轻工、核工业、医药、农业等领域的基础原料, 主要用于玻璃、玻璃纤维、陶瓷、洗涤剂 and 农用化肥等<sup>[1-4]</sup>。

中国对青藏高原盐湖的了解和硼矿的开采利用历史悠久, 西藏自公元 6 世纪就已开始利用硼砂, 是世界上最早发现和利用硼砂的地区。公元 720 年, 藏文《四部医典》中就有关于硼砂用于治病的记载<sup>[5]</sup>。据考证, 公元 8 世纪, 阿拉伯化学家的著作中也有关于西藏硼砂的记载。公元 13 世纪, 西藏的硼砂已远销到欧洲。大约公元 970 年的《日华子诸家本草》药典中亦记载, 硼砂从“青海湖周围天然产地传入中原地区”<sup>[6]</sup>。从清朝乾隆到民国年间, 西藏人民一直没有间断对硼砂的开采<sup>[7]</sup>。西藏解放后, 盐湖硼矿的大规模开采延续至今。

中国是硼矿资源储量大国, 据美国地质调查局 2016 年统计, 中国的硼矿资源储量居土耳其、美国、俄罗斯、智利之后, 位列第 5 位<sup>[8]</sup>。青藏高原拥有得天独厚的盐湖资源, 在广阔的高原上, 大小湖泊星罗棋布。据统计, 全区大于 1 km<sup>2</sup> 的湖泊共有 1612 个, 其中有各类盐湖 352 个<sup>[9]</sup>。该区湖泊水化学类型齐全, 在青藏高原盐湖的形成和发展过程中, 沉积了丰富的盐类矿产资源, 除赋有巨量的石盐、芒硝、镁盐以及天然碱等的普通盐湖外, 还有以富 K、B、Li、Cs 等元素为特征的特种盐湖等。据不完全统计, 青藏高原地区已发现的盐湖硼矿产地达 113 处, 其中大型硼矿 15 处, 中型硼矿 13 处, 小型硼矿 85

处, 显示了青藏高原地区盐湖硼矿的巨大潜力<sup>[10-11]</sup>。由于近年来盐湖找矿调查的不断突破, 目前青藏高原的硼矿资源量约占全国的 50%, 青藏高原将成为中国最重要的硼资源后备基地。

## 1 青藏高原盐湖硼矿资源特征

青藏高原第四纪硼矿有盐湖型、盐沼型和温泉(喷气)型, 目前已知最有意义的类型是盐湖型<sup>[12]</sup>。青藏高原的盐湖硼矿在各种水化学类型中均有发育, 如图 1 所示, 多产于东西向新生代构造活动区内, 且硼酸盐矿物大多沉积于第四纪盐湖湖底沉积中或湖岸盐坪上, 部分以硼液态赋存于湖面卤水和晶间卤水中, 呈固液相硼矿共存。青藏高原盐湖硼矿主要集中分布在西藏北部和柴达木盆地, 液体硼矿居多且有较大资源远景, 但尚未大量开发, 目前以开发利用固体硼矿为主。

### 1.1 柴达木盐湖硼矿资源特征

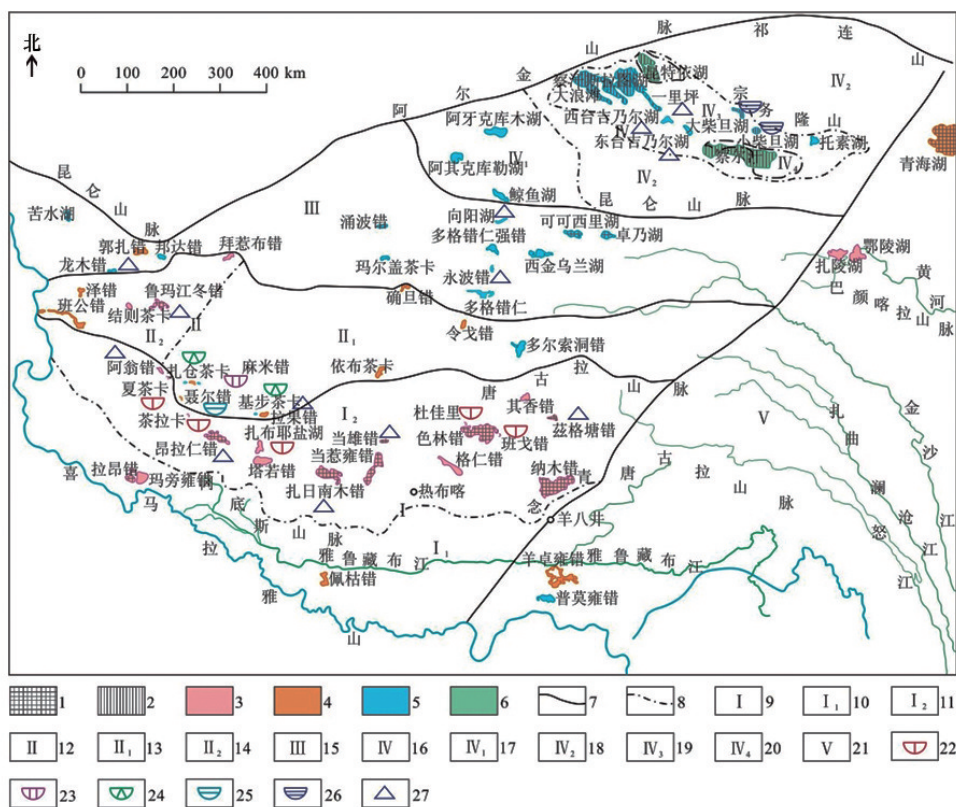
柴达木盆地位于青藏高原北部, 是中国内陆大型的山间盆地之一, 为中、新生代形成的大型断陷盆地。柴达木盆地有盐湖 28 个, 其中有硼矿分布的盐湖有 10 个, 且主要分布在青藏高原盐湖水化学分带中的硫酸镁亚型亚带。柴达木盆地盐湖相沉积固体硼矿主要分布在盆地北缘山间盆地的大柴旦盐湖和小柴旦盐湖, 而盐湖液体硼矿平均含硼量在区域上呈明显的北高南低变化态势, 由盆地最北缘的大柴旦盐湖和小柴旦盐湖湖区, 至盆地中南部的一里坪、西台吉乃尔、

收稿日期: 2017-02-10; 修回日期: 2017-04-26

基金项目: 国家自然科学基金青海联合基金重点项目(U1407027); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160054)

作者简介: 林勇杰, 博士研究生, 研究方向为盐类矿床地球化学, 电子信箱: linyongjie2014@163.com; 郑绵平(通信作者), 中国工程院院士, 研究员, 研究方向为盐类学与盐类矿床学, 电子信箱: zhengmp2010@126.com

引用格式: 林勇杰, 郑绵平, 刘喜方, 等. 青藏高原盐湖硼矿资源[J]. 科技导报, 2017, 35(12): 77-82; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.12.012



1—咸水湖;2—干盐湖;3—碳酸盐型;4—硫酸钠亚型;5—硫酸镁亚型;6—氯化物型;7—水化学类型分界线;8—亚带分界线;9—碳酸盐型带;  
10—低矿化度亚带;11—高矿化度亚带;12—硫酸钠亚型带;13—硫酸钠亚型带;14—硫酸钠-碳酸盐亚型带;15—硫酸镁亚型带;  
16—氯化物-硫酸盐型带;17—库木库里硫酸镁亚型带;18—硫酸钠亚型带;19—硫酸镁亚型带;20—氯化物型亚带;21—硫酸钠亚型外泄区;  
21—硫酸钠亚型外泄区;22—硼砂型;23—镁硼酸盐-钠硼解石型;24—柱硼镁石-库水硼镁石型;25—库水硼镁石型;  
26—钠硼解石-柱硼镁石型;27—卤水型

图1 青藏高原盐湖硼矿分布

Fig. 1 Distribution of boron deposits in salt Lakes of Qinghai-Tibet Plateau

东台吉乃尔及察尔汗, 卤水平均含硼量呈降低趋势<sup>[13-14]</sup>。该区由于火山热水通过洪水河和南祁连山热泉期补给, 形成了柴达木盆地独有的以大柴旦湖、小柴旦湖和东台吉乃尔、西台吉乃尔、一里坪等湖液态硼锂矿为南北对称的硼(锂)盐湖群<sup>[15-16]</sup>。

柴达木盆地硼矿资源丰富, 但是矿区较为分散, 且多为中低品位硼矿。区内有大型盐湖硼矿床5处, 分别为大柴旦盐湖、小柴旦盐湖、一里坪盐湖、西台吉乃尔盐湖和察尔汗盐湖; 中型盐湖硼矿床1处, 即东台吉乃尔盐湖; 小型盐湖矿床有4处, 分别为居红土硼矿、靠条灶火硼矿、南八仙及马海硼矿、开特米里克硼矿; 矿点1处(夏日成硼矿)以及矿化点11处。截至目前, 柴达木盆地已勘查矿床的B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>总资源量位1677.03万t, 其中固体硼矿产于大柴旦和小柴旦湖底, 两湖勘查查明的B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>资源量达到639.07万t; 液体硼矿主要产于察尔汗盐湖、东台吉乃尔湖、西台吉乃尔湖、一里坪、大柴旦和小柴旦湖卤水中, 与液体钾矿、锂矿共生, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>资源量达

1037.96万t<sup>[17]</sup>。

### 1.2 西藏盐湖硼矿资源特征

青藏高原湖泊星罗棋布, 有盐湖近500个, 盐湖面积约8225 km<sup>2</sup>。由于西藏高原构造活动强烈, 深部来源补给导致盐湖稀有金属和硼含量较高, 其锂硼资源远景位居全国前列<sup>[9]</sup>。该区盐湖以碳酸盐型和硫酸钠亚型为主, 其次为硫酸镁亚型, 局部在多格错仁等地发现氯化物型。以硼砂为主的固体硼矿主要分布在碳酸盐型盐湖, 本区已发现有12个碳酸盐型盐湖硼矿, 其中大型硼矿4个, 小型硼矿8个<sup>[12]</sup>; 其他矿石类型的固体硼矿主要分布在硫酸钠亚型和硫酸镁亚型盐湖, 如扎仓茶卡、聂尔错和基步茶卡等; 而液体硼矿在上述几种水化学类型湖泊中均有分布。

目前, 西藏地区已调查的B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>达到边界工业品位以上的盐湖硼矿108处, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>资源量为4768.27万t, 储量78.38万t, 固体硼矿16处, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>资源储量1377.21万t, 主要的盐湖固体硼矿有扎布耶、扎仓茶卡、聂尔错、茶拉卡、麻米错、加波错、

班戈湖等;而液体硼矿主要有扎仓茶卡、麻米错、拉果错、龙木错、结则茶卡、向阳湖、永波错、当雄错、班戈湖 III 湖、其香错、鄂雅错、仓木错、达则错、阿翁错等<sup>[10-11]</sup>。

## 2 青藏高原盐湖硼酸盐矿物及硼矿矿石类型

1965年,谢先德和郑绵平等首编了中国第一部有关硼酸盐矿物的系统著作《硼酸盐矿物》,为中国硼矿的研究与发展奠定了基础。目前,国内外已发现了80余种硼酸盐矿物,而青藏高原已发现的硼酸盐矿物有14种,即硼砂、柱硼镁石、库水硼镁石、钠硼解石、水方硼石、多水硼镁石、三方硼砂、板硼石、三方硼镁石、章氏硼镁石、三方硼镁石等,其中水碳硼石、章氏硼镁石、三方硼镁石为新发现的硼酸盐矿物<sup>[18-22]</sup>。青藏高原盐湖不同水化学类型硼矿,具有不同矿物组合和有用矿物<sup>[12]</sup>。硼砂、三方硼砂主要分布于碳酸盐型盐湖中,柱硼镁石、多水硼镁石、库水硼镁石、钠硼解石及其他镁硼酸盐和钠钙硼酸盐多分布于硫酸盐型盐湖中<sup>[23]</sup>。目前,青藏高原盐湖发现的第四纪盐湖固体硼矿的矿石类型主要有:硼砂型,如茶拉卡、夏茶卡、杜佳里、班戈湖、扎布耶盐湖;镁硼酸盐—钠硼解石型,如麻米错;柱硼镁石—库水硼镁石型,如基步茶卡、扎仓茶卡;库水硼镁石型,如聂尔错;钠硼解石—柱硼镁石型,如大柴旦、小柴旦盐湖。按上述分类顺序,列举若干代表性矿床。

### 2.1 杜佳里湖硼矿

杜佳里盐湖位于那曲地区尼玛县境内,该湖湖水类型为碳酸盐型,固体硼酸盐矿以硼砂为主,有3个富矿层位,多同芒硝伴生在一起,局部地段硼砂可单独成层。第1富矿层和第2富矿层多为粉末状块体硼砂,呈灰绿色、灰白色至灰黑色,  $B_2O_3$  含量为20%~30%,大部分为0.01~0.1 mm 细微粒硼砂和0.001~0.1 mm 的氯酸钠镁石或其他盐类矿物(微粒芒硝、碱)构成。第3富矿层除以粉末状块体硼砂为主外,并含有板状粗粒硼砂或中细粒“砂糖状”硼砂,这2种矿石类型含  $B_2O_3$  较高,一般为25%~35%,但该层矿石分布较零散<sup>[12]</sup>。

### 2.2 麻米错硼矿

麻米错盐湖位于西藏阿里地区改则县境内,湖水类型为硫酸盐型,该湖是西藏北部的一个固液并存的大型硼、锂矿床,其中固体硼矿以钠硼解石矿为主,还包括硼镁石矿和硼泥矿。该湖有2个成盐期(碳酸盐成盐期和硫酸盐成盐期)和3个成矿阶段,即含硼酸盐碳酸盐成矿阶段、硫酸盐亚类湖水沉积硼镁石、硫酸镁亚类湖水沉积钠硼解石。该矿有4个钠硼解石矿体,3个硼镁石矿体,9个硼泥矿体。钠硼解石矿体呈北西—南东向展布,层状—似层状,矿体长1400 m,宽200~500 m,分布面积约0.56 km<sup>2</sup>,矿体厚度较大,且  $B_2O_3$  品位较高,为6.70%~25.18%,品位与厚度正相关。硼镁石矿体呈北西—南东向薄层状展布,向北西方向矿体插入硼泥矿中,矿体长800 m,宽100~300 m,矿层厚度0.30~1.30 m,面积0.12 km<sup>2</sup>,矿层品位16.45%~24.51%。硼泥矿矿体平面呈半月形,

环湖分布,似层状—层状,矿体长10.5 km,宽0.4~2.8 km,厚度0.30~4.90 m,矿层品位2.05%~13.30%<sup>[23]</sup>。

### 2.3 扎仓茶卡硼矿

扎仓茶卡位于西藏阿里地区革吉县境内,为青藏高原首次发现的柱硼镁石—库水硼镁石矿床<sup>[24]</sup>。该湖湖水类型为该硼矿床包括固体硼矿和液体硼锂钾矿,其固体硼矿床分阶地(砂堤)硼矿和湖底硼矿2种。阶地硼矿主要赋存于湖相 I 级阶地(砂堤)上部,围绕现代盐湖边缘和干湖之间的横堤分布。该主矿层自下而上其矿物组合有明显变化,底部至下部原生硼矿物有库水硼镁石,呈砂糖状、块状集合体,偶见多水硼镁石小透镜体,由0.5~1 mm 细长柱状单晶构成,往中上部库水硼镁石渐为柱硼镁石交代,至顶部柱硼镁石又为钠硼解石交代。扎仓茶卡 II 湖湖底表面多为盐层和湖水的覆盖。2000年6月,郑绵平等发现沿 II 湖湖缘的湖底有厚层镁硼矿,并与芒硝密切共生,有3层镁硼矿层。上—中部为主矿层,上部硼矿层相当于阶地(砂堤)硼矿,分布稳定,厚度数十厘米至3 m,其 <sup>14</sup>C 年龄从(5030±110)~7100 a BP;中部硼矿层厚度数十厘米至2.5 m,其 <sup>14</sup>C 年龄为7950~(9100±140) a BP;下部硼矿层为少量镁硼矿<sup>[24-27]</sup>。

### 2.4 聂尔错硼矿

聂尔错位于西藏阿里地区革吉县境内,该湖是青藏高原已知最年青和保存较好的富锂镁硼矿床。该湖湖水类型为硫酸钠亚型,镁硼矿床赋存于盐湖底部、湖泊周围及湖中盐盘、泥盐坪的中上全新统化学沉积层中,有3个含矿层,中上含矿层为主要可采矿层,下含矿层为次要含矿层;矿石类型包括粒状集合体库水硼镁石矿、含芒硝库水硼镁石矿、蜂窝状、块状柱硼镁石和混合类型矿石等4种。前2种为主要开采矿石,后2种为次要开采矿石。粒状集合体库水硼镁石呈层状、似层状或透镜状产出,  $B_2O_3$  含量一般在24%~30%之间,最高可达33.46%。蜂窝状、块状柱硼镁石具块状或多孔的蜂窝状构造,主要成分为柱硼镁石,其次为微—细晶粒状结构的库水硼镁石,常含黏土碳酸盐团块与钙屑,  $B_2O_3$  含量为28%左右,最高可达30%以上,分布范围极为有限,难以构成独立矿体。含芒硝库水硼镁石矿呈成层或似层状产出,主要为细晶—微晶库水硼镁石构成,  $B_2O_3$  含量在24%~29%之间,此类矿石约占矿石总量的70.41%,属区内主要工业矿石类型之一。混合类型矿石可分为黏土碳酸盐类库水硼镁石矿和芒硝类库水硼镁石矿,这2种类型的矿石  $B_2O_3$  一般在10%~24%之间,后者甚至部分低于10%。

聂尔错盐湖卤水中锂硼等元素含量也达到工业品位,卤水锂硼矿床规模为中型矿床<sup>[27-30]</sup>。聂尔错硼矿床位于班—怒缝合带边缘的山间盆地,与其南部雄巴早中新世火山沉积区相邻,聂尔错西北部主河——响河即源自该区,长期接受其火山沉积和热水的硼锂物质的补给<sup>[30-31]</sup>。

### 2.5 大柴旦盐湖硼矿

大柴旦湖位于青海海西蒙古族藏族自治州境内,湖水类

型为硫酸镁亚型,主要成矿时代是晚更新世末期—全新世。大柴旦硼矿包括湖底固体硼矿、液体矿及湖滨固体硼矿3种。湖底固体硼矿主要矿体赋存于湖底,有小部分矿体分布于湖滨地带(I级低阶地),前者除了赋存固体硼矿外,还有丰富的含硼、锂、钾等盐类的晶间卤水和地表卤水;后者原认为以水方硼石-钠硼解石为主矿石,以后青海硼厂采出的原矿经郑绵平鉴定,原矿应以柱硼镁石为主,其次为钠硼解石,因其硼体脱离水体出露地表,除主要有钠硼解石、柱硼镁石、石膏和石盐等矿物之外,还发育少量原生及次生硼矿物,如水方硼石/多水硼镁石、库水硼镁石、以及新硼酸盐矿物的水碳硼石、章氏硼镁石、三方硼镁石等。湖底固体硼矿早已开采殆尽。大柴旦硼矿的主矿体——“芒硝硼矿”矿体,包括钠硼解石、柱硼镁石,以及石盐、芒硝、无水芒硝(少量)、钙芒硝、石膏、白钠镁矾、泻利盐、软钾镁矾、水钙芒硝等十余种盐类矿物,下部主矿层也共生大量的芒硝等冷相矿物。湖滨硼矿分布于湖区东部和西南部的湖滨阶地和缓坡地等,由于近岸湖底上部矿层局部上升或受湖水切割形成,因矿层裸露地表,在表生作用下发生次生变化和硼矿富集<sup>[9,32]</sup>。

### 3 青藏高原盐湖硼矿资源开发

#### 3.1 盐湖硼矿资源开发现状

青藏高原盐湖的硼资源大规模开发始于20世纪50年代,1958—1963年,西藏地区班戈湖-杜佳里湖曾大量开采优质硼砂,累计产出天然富硼矿粗硼砂约15万t。1960年,西藏由于当地硼矿开发的收入,曾达到财政自给。目前西藏固体硼矿大量开采区主要集中在扎布耶、扎仓茶卡、聂尔错、基布茶卡等地。扎仓茶卡于20世纪80年代发现,该矿为优质镁硼矿,开采 $B_2O_3$ 品位 $\geq 30\%$ ,由于成为替代进口的硬硼钙石制作玻纤的优质原料,2000年以来被众多小企业无序式开采,采富弃贫,矿体回收率较低。基步茶卡硼矿最先由郑绵平于1982年发现,1989年地质科学院盐湖中心将该湖硼矿资源调查交西藏矿管所,尔后由个体企业开采,其硼矿资源已基本开采殆尽。聂尔错镁硼矿最早在2000年由郑绵平指导发现,经普查估算矿区硼镁矿储量达中型<sup>[27-30]</sup>。从2003年开始由西藏阿里聂尔错硼业开发有限公司开采,尔后由于市场行情不好而暂停开采。西藏的硼矿产品主要运往内地用于玻纤行业,其次用于硼酸生产和陶瓷行业。柴达木盆地的盐湖硼矿资源开发亦始于20世纪50年代,但一直处于“零打碎敲”的状态,未形成规模。该区具有一定规模的固体硼矿开发利用主要是大柴旦盐湖硼矿区,但由于长期的采富弃贫式开采,致使地表钠硼解石富矿和柱硼镁石富矿已基本采空,有些矿区资源已被严重破坏,仅湖底尚存大量贫矿<sup>[34]</sup>。

截至目前,青藏高原盐湖硼矿资源的开发利用主要是固态矿石,而高原盐湖尚有大量的液体硼矿资源未得到开发利用。近期,西藏的结则茶卡和龙木错盐湖卤水的综合开发利用顺利进行,麻米错盐湖试验卤水锂硼钾综合开发扩大试验

也顺利完成,而青海一里坪盐湖盐湖资源综合利用项目也进展顺利。

#### 3.2 盐湖硼矿资源开发意义

硼矿是中国重要的矿产资源矿种。中国硼矿资源虽然丰富,但经过多年的开发利用,中国东北的硼镁矿资源已近枯竭。目前,储量巨大的硼铁矿由于技术和成本制约,尚未大规模地开发利用。2013年中国硼砂和硼酸的自给率分别仅为28%和54.7%,而2014年硼矿原产量63.59万t,比2013年降低4%。据专家预测,在未来一段时间内,中国的硼资源消费量将持续上升,中国的硼资源可能在2020—2026年达到需求峰值,届时需求总量可能达到70万~80万t<sup>[33]</sup>。因此,目前能供工业加工利用的硼矿已经不能保证中国工业发展的需要,优质硼镁石矿资源也即将面临枯竭,而随着国民经济的快速发展,硼矿产品将长期依赖进口,供求矛盾十分突出。

21世纪以来,郑绵平领导地质科学院盐湖中心在青藏高原调查发现了一大批富硼盐湖。中国青藏高原尚有大批富硼盐湖,对富硼盐湖的固液相找矿和综合开发利用,并大力推进火山沉积硼矿的预测找矿工作<sup>[35]</sup>,有利于缓解中国目前对硼矿资源的需求,减少对外依存度,保障中国硼矿化工行业的平稳发展。同时,青藏高原富硼盐湖的绿色综合开发利用,为拉动青海、西藏的经济发展、解决当地人民(尤其是藏族同胞)就业起到了重要作用,例如由于扎仓茶卡硼矿的开发,盐湖硼矿业的收入曾占阿里地区年财政收入的50%。因此,推进青藏高原富硼盐湖的综合开发利用和扩大找硼研究工作,将具有重要的科学和经济意义。

### 4 结论

青藏高原赋有丰富的硼矿资源,液体硼矿居多且资源远景较大,但目前主要以开发利用固体硼矿为主。青藏高原不同水化学类型盐湖硼矿具有不同矿物组合和有用矿物,因而盐湖固体硼矿矿石类型繁多。中国硼矿资源远景虽大,但目前可利用硼矿资源十分有限,供需矛盾十分突出。因此,扩大青藏高原找硼研究工作和推进富硼盐湖的综合开发利用将具有重要意义。

#### 参考文献(References)

- [1] 陶连印, 郑学家. 硼化合物的生产与应用[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1992.  
Tao Lianyin, Zheng Xuejia. Production and application of boron compounds[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1992.
- [2] Garrett D E. Borates handbook of deposits, processing, properties, and use[M]. California: Academic Press, 1998: 401-427.
- [3] 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): 38-42.  
Shen Jun. Overview of boron resources and boron industry at home and abroad[J]. Industrial Minerals & Processing, 2013(3): 38-42.
- [4] 郑学家. 硼及硼酸盐产品开发和前景[J]. 无机盐工业, 2005, 37

- (4): 1-3.  
Zheng Xuejia. Development and application of boron and borate[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2005, 37(4): 1-3.
- [5] 宇妥·元丹贡布. 四部医典[M]. 马世林, 罗达尚, 毛继祖, 等译. 上海: 上海科学技术出版社, 1997.  
Yutok Yonten Gonpo. The four medical tantras[M]. Ma Shilin, Luo Dashang, Mao Jizu, et al, trans. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1997.
- [6] 章鸿钊. 古矿录[M]. 北京: 地质出版社, 1954: 185.  
Zhang Hongzhao. Ancient mineral records[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1954: 185.
- [7] 李约瑟. 中国科学技术史: 第5卷[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 435-436. Joseph Needham. Science and civilisation in China: Vol 5[M]. Beijing: Science Press, 1990: 435-436.
- [8] USGS. Mineral commodity summaries[R]. Virginia State: United States Geological Survey, 2016: 38-39. .
- [9] 郑绵平, 向军, 魏新俊, 等. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 科学技术出版社, 1989: 9-10.  
Zheng Mianping, Xiang Jun, Wei Xinjun, et al. Salinelake on the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1989: 9-10.
- [10] 郑绵平, 刘喜方, 刘俊英, 等. 西藏羌塘盐湖资源调查评价[R]. 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所, 2003.  
Zheng Mianping, Liu Xifang, Liu Junying, et al. Investigation and evaluation on the resources of saline lake in Tibet[R]. Beijing: Institute of mineral resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 2003.
- [11] 刘喜方, 郑绵平, 贾沁贤, 等. 青藏高原重要盐湖资源远景调查成果报告[R]. 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所, 2011.  
Liu Xifang, Zheng Mianping, Jia Qinxian, et al. A survey report on the resources of the important saline lake in Qinghai Tibet Plateau[R]. Beijing: Institute of mineral resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 2011.
- [12] 郑绵平, 刘文高, 陈秉模, 等. 西藏盐湖硼矿研究报告[R]. 北京: 中国科学技术情报研究所, 1974.  
Zheng Mianping, Liu Wengao, Chen Bingmo, et al. A study on boron ore of saline lake in Tibet[R]. Beijing: Institute of Scientific and Technical Information of China, 1974.
- [13] 李家桢. 柴达木盆地盐湖卤水硼的区域集散特征及集散区划[J]. 盐湖研究, 1993(4): 21-33.  
Li Jiayan. Regional gather-disperse characteristics and region dividing of boron in brines of salt lakes in Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Science, 1993(4): 21-33.
- [14] 高春亮, 余俊清, 展大鹏, 等. 柴达木盆地盐湖硼矿资源的形成和分布特征[J]. 盐湖研究, 2009, 17(4): 6-13.  
Gao Chunliang, Yu Junqing, Zhan Dapeng, et al. Formation and distribution characteristics of boron resource in salt lakes of Qaidam Basin [J]. Journal of Salt Lake Science, 2009, 17(4):6-13.
- [15] 郑绵平, 张永生, 刘喜方, 等. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2123-2166.  
Zheng Mianping, Zhang Yongsheng, Liu Xifang, et al. Progress and prospects of salt lake research in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(9): 2123-2166.
- [16] Zheng M P, Zhang Y S, Liu X F, et al. Progress and prospects of salt lake research in China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2016, 90(4): 441-442.
- [17] 魏新俊. 柴达木盆地盐湖钾硼锂资源概况及开发前景[J]. 青海国土经略, 2002(增刊): 64-69.  
Wei Xinjun. General situation and development prospect of potassium boron in salt lake in Qaidam Basin[J]. Management & Strategy of Qinghai Land & Resources, 2002(Suppl): 64-69.
- [18] 高世扬, 李秉孝. 青藏高原盐湖硼酸盐矿物[J]. 矿物学报, 1982(2): 29-34.  
Gao Shiyang, Li Bingxiao. Borate minerals in saline lakes on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Mineralogical Sinica, 1982, (2): 29-34.
- [19] 谢先德, 钱自强, 刘来保. 水碳硼石——一种新硼酸盐矿物[J]. 地质科学, 1964, 5(1): 91-100.  
Xie Xiande, Qian Ziqiang, Liu Laibao. Carboborite: A new boric carbonate mineral[J]. Acta Geological Sinica, 1964, 5(1): 91-100 .
- [20] 曲一华, 谢先德, 钱自强, 等. 章氏硼镁石——一种新发现的含水镁硼酸盐矿物[J]. 地质学报, 1964, 44(3): 351-356.  
Qu Yihua, Xie Xiande, Qian Ziqiang, et al. Hungchaoite: A new hydrous borate mineral[J]. Acta Geologica Sinica, 1964, 44(3): 351-356.
- [21] 曲一华, 韩蔚田, 钱自强, 等. 三方硼镁石——一种新硼酸盐矿物[J]. 地质学报, 1965, 45(3): 298-305.  
Qu Yihua, Han Weitian, Qian Ziqiang, et al. Trigonmagneborite: A new borate mineral[J]. Acta Geologica Sinica, 1965, 45(3): 298-305.
- [22] 谢先德, 郑绵平, 刘来保. 硼酸盐矿物[M]. 北京: 科学出版社, 1965: 1-270.  
Xie Xiande, Zheng Mianping, Liu Laibao. Borate mineral[M]. Beijing: Science Press, 1965: 1-270.
- [23] 马东方, 陈红旗, 甘建辉. 西藏自治区改则县麻米区麻米错矿区盐湖硼矿普查地质报告[R]. 拉萨: 西藏地矿局第五地质大队, 1995.  
Ma Dongfang, Chen Hongqi, Gan Jianhui. Geological survey report of boron deposit of Mami saline lake in Tibet[R]. Lasa: The Fifth Team Bureau of Geology and mineral Resources of Tibet, 1995.
- [24] 郑绵平, 金文山. 我国某地一个新类型镁硼酸盐矿床的初步研究[J]. 中国地质, 1964(2): 26-32.  
Zheng Mianping, Jin Wenshan. 1964. Preliminary study of a new type of magnesian borate deposits in China[J]. Geology in China, 1964(2): 26-32.
- [25] 郑绵平, 刘文高. 西藏发现富锂镁硼酸盐矿床[J]. 地质论评, 1982, 28(3):263-266.  
Zheng Mianping, Liu Wengao. The discovery of a lithium-rich magnesium borate deposit in Xizang (Tibet)[J]. Geological Review, 1982, 28 (3): 263-266.
- [26] 郑绵平. 西藏自治区革吉县扎仓茶卡II湖湖东缘镁硼矿区详查报告[R]. 北京: 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 2002.  
Zheng Mianping (lead author). Detailed survet report on Mg-B mining area on the eastern margin of lake II in Chagcam Caka, Geji County, Tibet Autonomous Region[R]. Beijing: R & D Center for Saline Lake and Epithermal Deposit, Chinese Academy of Geological Sciences, 2002.
- [27] 郑绵平, 杨生玺, 杨谦, 等. 西藏自治区革吉县聂尔错东南缘镁硼矿区普查中间地质报告[R]. 北京: 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 2003.  
Zheng Mianping, Yang Shengxi, Yang Qian, et al. Geological report on general surveyin Mg-B mining area on the southeastern margin of Lake Nyer, Geji County, Tibet Autonomous Region[R]. Beijing: R & D Center for Saline Lake and Epithermal Deposit, Chinese Academy of Geological Sciences, 2003.
- [28] 郑绵平, 齐文, 张永生, 等. 西藏自治区革吉县聂尔错东南缘镁硼矿床详查区资源估算地质报告(2003.6—2004.9)[R]. 北京: 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 2004.

- Zheng Mianping, Qi Wen, Zhang Yongsheng, et al. Geological report on resource estimation in detailed survey area of Mg-B deposits on the southeastern margin of Lake Nyer, Geji County, Tibet Autonomous Region(2003.6-2004.9) [R]. Beijing: R & D Center for Saline Lake and Epithermal Deposit, Chinese Academy of Geological Sciences, 2004.
- [29] 郑绵平, 曹建科, 张放军, 等. 西藏自治区革吉县聂尔错硼矿床详查报告[R]. 北京: 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 2004.
- Zheng Mianping, Cao Jianke, Zhang Fangjun, et al. Detailed survey report on boron Deposit in Lake Nyer, Geji County, Tibet Autonomous Region[R]. Beijing: R & D Center for Saline Lake and Epithermal Deposit, Chinese Academy of Geological Sciences, 2004.
- [30] 刘喜方, 郑绵平. 西藏聂尔错镁硼矿地质特征及成矿机制[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1601-1612.
- Liu Xifang, Zheng Mianping. Geological features and metallogenic mechanism of the Nie'er Co magnesium borate deposit, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1601-1612.
- [31] 郑绵平, 袁鹤然, 张永生, 等. 中国钾盐区域分布与找钾远景[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1523-1553.
- Zheng Mianping, Yuan Heran, Zhang Yongsheng, et al. Regional distribution and prospects of potash in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1523-1553.
- [32] 金文山, 郑绵平, 赵百武. 青海大小柴旦湖硼矿岩石学和矿物学的初步研究[R]. 北京: 地质科学研究院, 1964.
- Jin Wenshan, Zheng Mianping, Zhao Baiwu. Preliminary study on petrology and mineralogy in Dachaidan and Xiaochaidan lakes, Qinghai Province[R]. Beijing: Academy of Geological Sciences: the 5th and the 6th divisions, 1964.
- [33] 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.
- Tang Yao. Status boron resources exploration potential analysis of supply and demand[J]. Land and Resources Information, 2015(3): 24-28.
- [34] 王秋霞, 马化龙, 曹进成. 青藏硼矿资源的开发现状与合理利用建议[J]. 矿产保护与利用, 2007(4): 6-8.
- Wang Qiuxia, Ma Hualong, Cao Jincheng. Development status and protective suggestion on boron minerals in Qinghai & Tibet[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2007(4): 6-8.
- [35] 郑绵平, 陈文西, 齐文. 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, 2016, 37(4): 407-418.
- Zheng Mianping, Chen Wenxi, Qi Wen. New findings and perspective analysis of prospecting for volcanic sedimentary boron deposits in the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(4): 407-418.

## Boron Resource of Salt Lakes in Qinghai-Tibet Plateau

LIN Yongjie<sup>1,2</sup>, ZHENG Mianping<sup>1,2</sup>, LIU Xifang<sup>1</sup>

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

2. MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environment, Institute of Mineral Resource, CAGS, Beijing 100037, China

**Abstract** The Qinghai-Tibet Plateau has rich salt lake resources, especially the boron resources in salt lakes, as the most promising localities of born deposits in China. The boron resources of salt lakes in the Qinghai-Tibet Plateau are divided into two types, i.e., the solid type and the liquid type, and the amount of liquid boron resource is predominant, however, the mostly utilized are the solid boron resources. The boron deposits in salt lakes of different subtypes have different mineral combinations, with various types of solid boron ore. At present, fourteen borate minerals have been found in the Qinghai-Tibet Plateau, and the solid boron ore can be divided into five types: the borax type; the Mg-borax-ulexite type; the pinnoite-kurnakovite type; the kurnakovite type; the uelxite-pinnoite type. China is rich in boron resources, but the exploitable boron resources are rather limited, with an imbalance between the supply and the demand. The exploitation and the utilization of the boron deposits of salt lakes in the Qinghai-Tibet Plateau have important scientific and practical significance.

**Keywords** Qinghai-Tibet Plateau; salt lake; boron deposits

(责任编辑 韩星明)