

柴达木盆地盐湖硼矿资源的形成和分布特征

高春亮^{1,2}, 余俊清¹, 展大鹏^{1,2}, 张丽莎¹, 成艾颖^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 柴达木盆地盐湖富含硼矿资源, 有沉积型和矿化水两种类型。盐湖卤水硼矿在方向性变化上呈北高南低的态势。固体硼酸盐矿床的成矿时间为晚更新世到全新世, 并以全新世为主。固体硼矿主要分布在盆地北缘的大、小柴旦盐湖, 马海干盐湖也有零星分布, 卤水硼矿床的形成受控于丰富的硼物质来源、闭流汇水盆地和干旱的气候条件; 稳定的物理化学环境、低温条件、稀释掺杂作用、生物作用、盐湖水体化学类型及其它相关成盐机制则对固体硼酸盐沉积矿床的形成起着重要的作用。

关键词: 柴达木盆地; 盐湖; 硼矿资源; 形成; 分布特征

中图分类号: P571

文献标识码: A

文章编号: 1008—858X(2009) 04—0006—08

1 前言

柴达木盆地是我国内陆大型的山间盆地之一。它处于北纬 $35^{\circ}55' \sim 39^{\circ}10'$, 东经 $90^{\circ}00' \sim 98^{\circ}20'$ 之间, 位于青藏高原的东北侧。盆地四周为高大山系所围绕, 构成了一个不规则的菱形向心汇水盆地^[1], 周围的山区降水较为充沛, 为盆地盐湖提供了水源和成矿物质。盆地内有盐湖 43 个, 湖表卤水及晶间卤水的矿化度都超过了 $50 \text{ g/L}^{[2]}$, 主要的盐湖分布如图 1。在整个柴达木盆地盐湖的形成和发展过程中, 沉积了极为丰富的盐类矿产。

硼矿资源是柴达木盆地盐湖中的一种重要的矿产资源, 有液体卤水硼矿和固体硼酸盐矿床之分, 液体卤水硼矿以湖表卤水和晶间卤水这两种类型为主, 并且很多盐湖的卤水硼矿有很高的品位, 达到了工业开采的价值, 如东、西台吉乃尔盐湖等。固体硼酸盐矿床以大、小柴旦盐湖硼矿为典型代表, 不仅规模大、分布广、种类多, 并且品位很高, 达到了工业开采价值。

但是, 高品位的固体硼矿资源在上世纪的规模开发中已消耗殆尽, 如今剩下的多属于中低品位的硼矿。

针对目前柴达木盆地盐湖硼矿资源的现状, 很有必要研究和总结其分布特征和形成机制, 这对以后的硼矿开采、找矿前景以及综合利用等会有很大的帮助, 也为以后更深入研究工作奠定基础。

2 硼矿资源在柴达木盆地盐湖的分布特征

硼矿资源在柴达木盆地现代盐湖的分布集中于两个地区: 一是盆地中部—台吉乃尔湖一带; 二是盆地北缘以大、小柴旦盐湖为中心的狭长地区。盆地内有大型矿床 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, 它们的储量占青海省的 97.1%。中型矿床有 1 处(东台吉乃尔盐湖), 小型矿床有 4 处。2007 年, 累计探明储量 $1.1741 \times 10^7 \text{ t}$ (以 B_2O_3 计算), 保有储量

收稿日期: 2009—07—05 修回日期: 2009—08—31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40571173 和 40871008)

作者简介: 高春亮 (1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地球化学。E-mail: gaochunliang2007@163.com

间上没有明显的分异。此外,赋存在孔隙卤水中 B_2O_3 的平均含量低于晶间卤水^[9-10]。一里坪盐湖第Ⅰ卤水矿层赋存于全新统岩层中,

B_2O_3 的含量为 $500 \sim 1.100 \times 10^3 \text{ mg/L}$ 第Ⅱ卤水矿层产于上更新统上部地层中, B_2O_3 的含量为 $500 \sim 1.200 \times 10^3 \text{ mg/L}$ ^[8]。

表 1 大柴旦盐湖湖水各区段硼 (B_2O_3)含量^[6]
Table 1 The content of boron(B_2O_3) in each zone of Daqaidam salt lake mg/L

时 间	北部区段	中部区段	南部区段
1961年 6月	2.400×10^3	2.900×10^3	2.700×10^3
1961年 8月	4.000×10^3	5.258×10^3	3.772×10^3

4)察尔汗干盐湖卤水硼矿。察尔汗干盐湖可分为 4 个区段,从东到西依次为霍布逊段、察尔汗段、达布逊段和别勒滩段,但以别勒滩晶间卤水 B_2O_3 的含量为最高^[11]。

2.2 固体硼酸盐矿床的分布规律

柴达木盆地盐湖相沉积硼酸盐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,以钠硼解石和柱硼镁石为主。柴达木盆地硼酸盐矿床的成矿时间为晚更新世至全新世,且以全新世为主^[12]。

1)大柴旦盐湖固体硼矿。大柴旦盐湖的固体硼矿床按成因可分为湖泊化学沉积硼矿床和湖沼沉积硼矿床两类^[12-14]。湖区内的成盐过程可分为晚更新世晚期成盐期和全新世成盐期,硼酸盐也相应地出现与之对应的两个成盐期。在第一成盐期中出现粘土硼酸盐(B_1)和盐类硼酸盐(B_2);在第二成盐期中出现含盐粘土硼酸盐(B_3)、卤泥石膏硼酸盐(B_4)、芒硝硼酸盐(B_5)以及石盐硼酸盐(B_6)。

大柴旦盐湖湖区第一期沉积范围较小,其中粘土硼酸盐(B_1)沉积分布范围很小,并且零星分散,而盐类硼酸盐沉积(B_2)的上部基本上都是盐。湖区中部,湖表卤水的南面,是以钠硼解石为主的石盐(B_6)和芒硝沉积区的硼酸盐沉积。前者略偏西南,后者略偏东北位置。以柱硼镁石为主的淤泥石膏硼酸盐沉积(B_4)分布在湖区东北外缘地表卤水内。在湖表卤水的东部和北部外缘(偏东)有湖滨地表钠硼解石、柱硼镁石和水方硼石的分布。

大柴旦湖区硼酸盐沉积垂直分布于下部的

第一成盐期和第二成盐期。第一成盐期的下部硼酸盐沉积主要是钠硼解石,在底板零星分散。钠硼解石沉积的上部包括石膏、芒硝、石盐、泻利盐,甚至软钾镁矾沉积中的硼酸盐。除钠硼解石外,同时还出现柱硼镁石。第二成盐期的硼酸盐沉积在垂直分布上出现有 3 个明显的区间,即上部氯化钠沉积区间、中部硫酸盐沉积区间以及下部碳酸盐沉积区间。

现如今,湖底硼矿床只见有柱硼镁石矿床,几乎见不到钠硼解石矿床,大柴旦硼化工业基地正在对柱硼镁石矿床进行挖掘开采。大柴旦盐湖具体的硼矿床地质如图 2。

2)小柴旦盐湖固体硼矿。小柴旦盐湖固体硼矿以钠硼解石和柱硼镁石为主,湖底钠硼解石分布于湖区南缘的富矿区,断续长 7 km ,宽 $0.4 \sim 0.8 \text{ km}$ 。钠硼解石一般呈团块状和薄层状,部分细砂被柱硼镁石胶结而成为含柱硼镁石的细砂结核,厚度一般不小于 1.8 m ^[15]。柱硼镁石主要与文石共生,有时也能见到白云石。钠硼解石主要与石盐和芒硝共生,有时也能见到与文石、方解石共生,并且柱硼镁石沉积一般都分布在钠硼解石矿体的底部^[16]。如今,小柴旦盐湖富矿区已经采空,贫矿因杂质太多而未被开采利用。小柴旦盐湖矿区地质图如图 3。

3)马海干盐湖固体硼矿。马海固体硼矿床位于马海盐湖盐类沉积区的东南缘,分布面积约 100 km^2 。硼矿不均匀分布于盐坑中的下部或边缘。盐坑剖面自上而下分为含砂石盐层、含粘土芒硝层、含芒硝及石膏的砂质粘土层和砂质粘土层 4 层,中间两层有钠硼解石和硼

砂夹杂其中。矿体呈透镜状, 少数为层状, 产状 水平或倾斜, B_2O_3 含量为 $1.5\% \sim 9.8\%^{[16]}$ 。

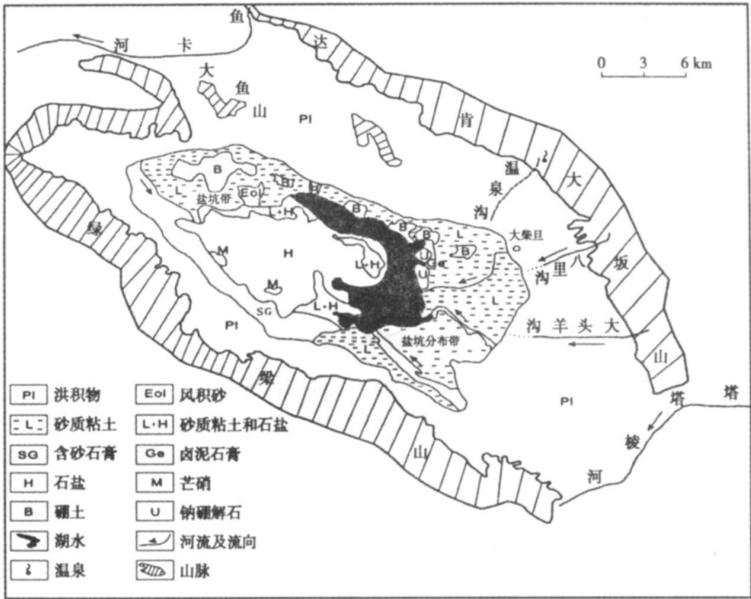


图 2 大柴旦盐湖硼矿床地质略图

Fig 2 Geological outline of Boron deposit in Da Qaidam salt lake

3 柴达木盆地盐湖硼矿资源的形成

3.1 柴达木盆地硼矿资源的成因类型

柴达木盆地硼矿床类型有沉积型和矿化水两类, 而盐湖硼矿床有湖泊化学沉积硼矿床、湖沼化学沉积硼矿床、盐渍土硼矿床和盐湖卤水矿床 4 种类型, 以湖泊化学沉积硼矿床为主要类型。柴达木盆地硼矿床的具体分类情况如表 2。

3.2 柴达木盆地盐湖卤水硼矿资源的形成

柴达木盆地的地形是西北高东南低, 自第四纪以来盆地新构造运动总的趋势也是西北抬升而中南部下沉, 第三纪晚期形成的含盐沉积裸露地表遭受风化侵蚀, 在含盐地层中的盐类物质, 包括硼元素被溶解而搬运到湖泊中。

柴达木盆地盐湖卤水硼矿的形成条件主要有:

- 1) 盐湖处在有大量硼物质来源的闭流汇水盆地内。柴达木盆地四周及其内部深大断裂的发育, 使得盆地成了一个封闭的汇水断陷盆地。盆地四周深大断裂的反复活动, 形成了自新生代以来的高山深盆的地质环境。盆地四周

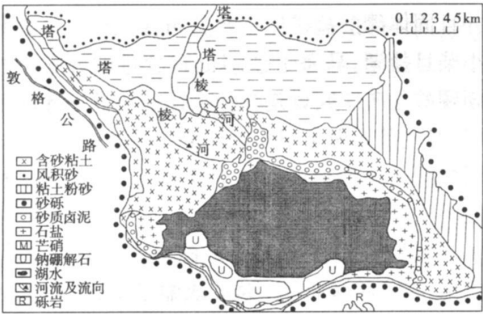


图 3 小柴旦盐湖硼矿床地质略图

Fig 3 Geological outline of Boron deposit in Xiao Qaidam salt lake

总而言之, 柴达木盆地盐湖硼酸盐沉积可初步分为 3 个阶段。第一成硼阶段——相当于早期碳酸盐发育阶段, 极少量的柱硼镁石产于粘土石膏层中, 偶见到钠硼解石。第二成硼阶段——相当于芒硝发育阶段后大半期至石盐发育阶段早期, 有些剖面见有芒硝及白钠镁矾时, 则相当于粘土石膏发育后半期至石盐发育早期。第三成硼阶段——钙质柱硼镁石结核形成时期, 生成于近湖滨水底。

高大山系岩石中的硼元素易溶于水, 通过水分子的扩散作用而转移到水中。盆地内无论是深部热水还是油田水和河水均相对富集硼, 这就给盆地内的盐湖带来了大量的硼物质来源。

表 2 柴达木盆地硼矿床类型^[13]
Table 2 Types and characteristics of the borate deposits in Qaidam basin

类型	亚类	矿物成分	规模大小
沉积型	湖泊化学沉积硼矿	柱硼镁石—钠硼解石	大型
	湖沼化学沉积硼矿	硼砂—钠硼解石	小型或矿化点
	油田水沉积硼矿	钠硼解石	矿化点
	矿泉水沉积硼矿	钠硼解石	中型或矿化点
	盐渍土硼矿	钠硼解石硼土	矿化点
矿化水	盐湖卤水	湖表卤水、晶间卤水	大型
	油田水	矿化含硼水	矿化
	矿泉水	矿化含硼水	矿化
	泥火山水	矿化含硼水	矿化

以大、小柴旦盐湖为例, 它们位于柴达木盆地东北边缘的山间盆地中, 并各自为一个独立的闭流汇水盆地。它们所在区域在大 地构造位置上属于“祁连山边缘凹陷带”, 区内构造以断裂为主, 褶皱不甚发育, 岩浆活动频繁^[13]。深部地下热水、温泉水都含有大量的硼离子, 并且源源不断往湖区输送。周围补给河流如鱼卡河和塔塔棱河等河水中也含有丰富的硼离子, 它们共同为大柴旦盐湖及小柴旦盐湖提供了丰富的硼物质来源。

2)盐湖所在区域的气候条件非常干旱。根据张彭熹等^[17]对柴达木盆地盐类沉积剖面的研究得知, 自上新世和晚更新世至今的古气候是以干旱为主, 中间有短期非干旱的波动气候条件。在气候相对潮湿的条件下, 随径流不断地往湖泊中补充硼物质, 而在干旱季节由于蒸发作用使得湖泊中的硼聚集, 如此的反反复复, 才形成了规模巨大的卤水硼矿床。

柴达木盆地现代盐湖卤水硼矿床的形成与自新生代以来盆地内的新构造运动和古气候旋回这两大因素紧密相关。第三纪末期在盆地西部中心地带形成了蒸发岩, 硼第一次在卤水中集中, 进入第四纪早期寒冷而相对潮湿的气候条件, 使得含有硼的沉积盐类或盐层溶解并向盆地中心地带迁移, 最终进入到湖泊中。进入到晚更新世, 在总体干旱的气候格局下, 蒸发聚集而形成丰富的卤水硼矿床。

3.3 柴达木盆地盐湖固体硼酸盐矿床的形成

柴达木盆地盐湖卤水硼矿为固体硼酸盐矿床的形成提供了丰富的物质基础。据统计, 柴达木盆地盐湖已发现的硼酸盐类矿物有 14 种, 并且固体硼酸盐矿床主要分布在大柴旦盐湖和小柴旦盐湖, 马海干盐湖也有少量的分布。盐湖硼酸盐矿床究竟是在什么样的条件下才能形成, 对此前人做了很多的研究工作, 得出了固体硼酸盐矿床形成的一些表生条件, 并提出了相关的成盐机制。

1)稳定条件。无论是湖表卤水还是晶间卤水, 在介稳条件下, 硼被浓缩富集, 不以固体硼酸盐的形式析出^[18-23]。另一方面, 利用不同的卤水进行静止放置实验可以获得不同的固体硼酸盐^[24-28]。孙大鹏等^[26-27]利用小柴旦盐湖硼矿坑水和湖表卤水, 在封闭的广口瓶中于室内常温条件下放置, 获得了钠硼解石。

孙大鹏^[16]研究了小柴旦盐湖硼酸盐的形成, 认为是在湖滩沉积物(碳酸盐结核、砂质沉积)被埋藏后的成岩过程中, 在富硼地下孔隙水所处的稳定物理化学环境下形成的。另外, 大柴旦盐湖湖底的浸染状盐类硼矿、蜂窝状硼矿以及小柴旦的层状硼矿都是一个很好的例证^[29]。

事实表明, 硼酸盐的析出是需要一个稳定的物理化学环境, 这种稳定的介质物理化学环

境在盐湖的晶间卤水、泥质碎屑沉积物的孔隙水和裂隙水中以及很深的稳定湖水中存在, 硼酸盐矿物大都与碳酸盐(粘土或淤泥)及卤泥石膏共生。

2) 低温条件。低温条件有利于某些盐类矿物自卤水中析出, 如钾石盐、光卤石等。从大、小柴旦盐湖硼酸盐的矿物共生组合来看, 有些硼酸盐矿物如钠硼解石常与芒硝共生, 特别是常与芒硝和软钾镁矾共生, 而这两种矿物均属于低温条件下的产物。大柴旦盐湖东部湖滨带地表冬季由于毛细作用形成的由硼砂、芒硝和碳酸盐组成的硼土也是一个很好的例证。

为查明低温条件下硼酸盐的析出情况, 高世扬等^[30-31]利用饱和卤水进行冷冻试验, 获得了三方硼镁石。孙大鹏等^[24-25]对不同浓度的石盐阶段卤水加入泉水或温泉水混合, 然后进行冷冻蒸发, 获得了以多水硼镁石为主的镁硼酸盐。以上实验都说明了在低温条件下可促使盐湖硼酸盐自卤水中析出。

3) 稀释掺杂作用。掺杂作用在自然界是普遍存在的, 很多盐类矿物的析出与地下水的稀释或其它水体的混入掺杂有密切关系。

美国 Bowse 等^[32]研究了加利福尼亚克拉茂(Kramer)第三纪硼矿床, 认为钠硼解石在地下水和埋藏的湖水影响下, 由硼砂转变而来。

柳大纲等^[33]最早在大柴旦盐湖地表卤水底部沉积物中发现柱硼镁石, 并认为是经过补给淡水的稀释而沉淀析出的。张彭熹^[1]认为深部水的补给稀释促使大、小柴旦盐湖以及马海干盐湖形成了硼酸盐等固体矿床。高世扬等^[34]的稀释实验也获得了以多水硼镁石为生的镁硼酸盐。小柴旦盐湖湖底硼矿的挖掘, 让我们对掺杂作用有了重要的认识。该硼矿大多是一些孤立的桶状和巢状硼矿体, 说明与地下涌泉活动有密切关系。根据对达肯大坂山热泉古阶地的泉华分析, 大、小柴旦盐湖硼酸盐沉积的形成与地下热水有重要的关系。

4) 生物成硼作用。生物成硼作用是一种对硼矿成因新的认识, 对它的研究还处在初步阶段。夏文杰等^[35]认为在小柴旦盐湖湖滩岩中柱硼镁石胶结包壳砂粒层为原生白云石, 其沉积主要与嗜盐菌藻作用有关, 其中一些白云

石藻屑和藻团块的形成与蓝绿藻明显有关。包壳砂粒为柱硼镁石, 呈基底胶结, 它的形成不可能晚于同生阶段, 柱硼镁石的形成同样应与蓝绿藻的活动有密切关系。郑绵平^[14]在扎布耶盐湖、班戈湖和大柴旦盐湖都发现了多种嗜盐菌藻, 并对生物成硼作用也作了初步的探讨。

5) 盐湖水体化学类型。硼酸盐的形成与盐湖卤水的化学类型、组成、溶液 pH 值等是紧密关联的。就目前盐湖已发现的硼酸盐, 仅存在于硫酸盐型(包括硫酸镁亚型和硫酸钠亚型)和碳酸盐型水体中。但在柴达木盆地内没有发现碳酸盐型卤水^[36], 水化学类型都为硫酸镁亚型^[2]且富含卤水硼矿的东、西台吉乃尔盐湖迄今没有发现固体硼酸盐矿床, 氯化物型的盐湖如察尔汗盐湖也没有发现固体硼酸盐矿床的存在。因此, 盐湖水体化学类型是形成硼酸盐矿物的一个重要前提。

曲懿华等^[37]指出大柴旦盐湖的多种硼酸盐矿物沉积时, 卤水需呈碱性环境。并且提出硼酸盐矿物的析出不是简单地与某种组分浓度成正变关系, 而是与盐类组分种类、浓度比值、溶液 pH 值及硼酸根的存在状态有关。孙大鹏等^[24, 26-27, 38]对此也做了比较细致的研究工作。

大柴旦盐湖随着高品位硼矿的开采, 盐湖卤水组分种类、浓度比值等发生了相应的变化, 致使硼矿的组成发生了较大的变化, 由以钠硼解石、水方硼矿为主的硼矿转化为以柱硼镁石为主的硼矿, 这一现象值得我们重视。

6) 溶蚀交代成盐机理。大柴旦湖区的硼酸盐样品在显微镜下观察到石膏晶体溶蚀的同时, 在石膏晶体被溶蚀处及其周围有纤维状钠硼解石共生的现象, 说明在特定的条件下, 石膏晶体的局部溶解, 使进入溶液中的 Ca^{2+} 浓度大到足以形成纤维状钠硼解石。

7) 其它成盐机制。郑大中^[39]认为, 氢硼化物迁移形成硼矿床的机制可以合理解释盐湖硼矿床的成因。刘志宏等人^[40]通过对库水硼镁石和柱硼镁石形成过程的研究, 提出了一种复盐相转化成盐的实验解释。

以上这些表生条件及其成盐机制制约了硼酸盐矿物的形成, 但具体的成矿机理还不够明确。柴达木盆地盐湖最重要的两种硼酸盐矿物

是钠硼解石和柱硼镁石。对于钠硼解石,在低温条件下,在低硫酸盐富 NaCl 的溶液中更有利于其生成,并且与石膏晶体溶蚀交代形成纤维状钠硼解石。而对于柱硼镁石,是在常温下,在含碳酸盐、低镁的 $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-NaCl}$ 碱性溶液中才能形成,所以常见到柱硼镁石和碳酸盐(粘土或淤泥)共生。

4 结语与展望

在柴达木盆地盐湖硼矿资源的整个形成过程中,丰富的硼物质来源、闭流汇水盆地、干旱的气候条件、盐湖水体化学类型、地下水活动、硼的迁移和富集、低温条件和稳定的物理化学环境都起着重要的作用;嗜盐菌藻等生物对硼酸盐的形成也有一定的促进作用。Kiano 等人^[41]根据实验结果指出硼酸盐一硼易于与文石共沉淀而不是与方解石共沉淀,说明盐湖中的文石沉积作用可以富集硼,也是有利于硼酸盐的进一步形成。另外,一些成盐机制也让我们更深刻地认识了盐湖硼酸盐的形成和相转化。

不同的硼酸盐矿物其形成机制是不一样的,钠硼酸盐、镁硼酸盐以及钠钙硼酸盐的形成机制各异,并且在特定条件下,它们可以进行相转化而可能形成新的硼酸盐矿物。盐湖硼酸盐沉积矿床的形成是一个错综复杂的过程,在认清了其形成条件某些方面的同时,仍还有很多细致的研究工作要做。

参考文献:

- [1] 张彭熹,等.柴达木盆地盐湖[M].北京:科学出版社,1987
- [2] 郑喜玉,张明刚,徐昶,等.中国盐湖志[M].北京:科学出版社,2002
- [3] 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
- [4] 李家桢.柴达木盆地盐湖卤水硼的区域集散特征及集散区域[J].盐湖研究,1993,1(4):21-33
- [5] 吴俐俐,马文展,唐渊.青藏高原高硼卤水的水化学特征及其成因[J].地理研究,1984,3(4):1-11
- [6] 李家桢.大柴旦盐湖硼、锂分布规律[J].盐湖研究,1994,2(1):18-24
- [7] 李家桢.大柴旦盐湖硼、锂分布规律(续)[J].盐湖研究,1994,2(2):20-28
- [8] 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
- [9] 张西营,马海州,高东林,等.柴达木盆地西台吉乃尔盐湖矿区卤水水化学特征[J].盐湖研究,2007,15(2):12-20
- [10] 张西营,马海州,高东林,等.采卤初期西台吉乃尔盐湖矿区卤水中钾、锂、硼化学动态变化[J].湖泊科学,2007,19(6):727-734
- [11] 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,2007,15(3):7-13
- [12] 杨谦.青海柴达木盆地的盐类矿产及其分布规律[J].地球科学—中国地质大学学报,1988,13(1):49-58
- [13] 杨谦.柴达木盆地硼矿[J].沉积学报,1989,7(2):117-123
- [14] 郑绵平,向军,等.青藏高原盐湖[M].北京:北京科学技术出版社,1989
- [15] 杨谦.青海省柴达木盆地大、小柴旦盐湖矿床地质概况[J].青海国土经略,1983(37):38-63
- [16] 孙大鹏.柴达木盆地小柴旦湖硼酸盐的形成[J].矿物岩石,1991,11(4):57-65
- [17] 张彭熹,张保珍.柴达木地区近三百万年来古气候环境演化的初步研究[J].地理学报,1991,46(3):327-335
- [18] 陈敬清,刘子琴,符廷进.东台吉乃尔湖间晶卤水 25°C 等温蒸发与天然蒸发试验[J].盐湖研究,1980(4):71-82
- [19] 张宝全,刘铸唐,符廷进,等.东台吉乃尔盐湖卤水的相化学研究(1) 25°C 等温蒸发实验[J].盐湖研究,1994,2(2):57-61
- [20] 高世扬,李秉孝.青藏高原盐湖硼酸盐矿物[J].矿物学报,1982(2):107-112
- [21] 高世杨,李国英.盐卤硼酸盐化学(I)一含硼盐卤天然蒸发过程中硼酸盐的行为[J].高等学校化学学报,1982,3(2):141-148
- [22] 关晓燕,任金润,叶天伟.大柴旦盐湖卤水的现场扩大蒸发试验初探[J].吉林地质,2005,24(2):66-71
- [23] Sun D P, Li B X, Ma Y H, et al. An investigation on evaporating experiments for Qinghai lake water, China[J]. Journal of Salt Lake Research, 2002, 10(4): 1-12
- [24] Sun D P, Gao Z H, Dong J H. An Investigation on Borate from Natural Brines[J]. Kexue Tongbao, 1982, 27(6): 649-654
- [25] Sun D P, Gao Z H, Ma Y H, et al. Origin of the borate deposits under the condition of hypergenesis[J]. Journal of Salt Lake Research, 2002, 10(1): 45-60
- [26] 孙大鹏,马育华,单兰娣.自天然卤水获得钠硼解石的初步研究[J].科学通报,1990(15):1171-1173
- [27] 孙大鹏,马育华.自青藏高原盐湖卤水获得钠硼解石的研究[J].盐湖研究,1999,7(4):59-62
- [28] 高世扬,赵金福,薛方山,等.盐卤硼酸盐化学 II.从含

硼浓缩氯化镁卤水中析出的六硼酸镁 $2\text{MgO} \cdot 6\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [J]. 化学学报, 1983 41(3): 217—221.

[29] 孙大鹏, 高章洪, 王克俊. 青藏高原盐湖硼酸盐形成问题[J]. 沉积学报, 1984 2(4): 111—127.

[30] 高世扬, 刘化国, 牟振基. 盐卤硼酸盐化学 VII. 盐卤在天然冷冻析盐过程中硼酸盐的行为 [J]. 无机化学, 1987, 3(2): 113—116

[31] 高世扬, 赵金福, 薛方山. 含硼氧化镁饱和卤水的冷冻实验 [J]. 盐湖研究, 1998 6(1): 1—10

[32] Bowser C J, Dickson F W, Rau J L. Chemical zonation of the borates of Kramer, California [J] // Second Symposium on Salt— V 1, Geology, geochemistry, mining Cleveland Northern Ohio Geol Soc., 1966 122—132

[33] 柳大纲, 高世扬. 大柴旦盐湖地表卤水底部沉积中硼酸盐的发现 [J]. 盐湖研究, 1995 3(1): 1—9

[34] 高世扬, 冯九宁. 盐卤硼酸盐化学 XI. 不同含硼浓缩卤水的稀释实验 [J]. 无机化学学报, 1992 8(1): 68—70

[35] 夏文杰, 李秀华, 青海小柴旦盐湖湖滩岩中原生白云石的发现及其意义 [J]. 沉积学报, 1986, 4(2): 19—26

[36] 吴俐俐. 青藏盐湖高硼卤水的水化学特征 [J]. 武汉化工学院学报, 1983(Z1): 29—40.

[37] 曲懿华, 韩蔚田. 大柴旦盐湖硼酸盐矿物形成环境的探讨 [J]. 矿物岩石, 1981(21): 86—93.

[38] 孙大鹏, 董继和, 王克俊, 等. 自青藏高原盐湖高浓度卤水获得镁硼酸盐 [J]. 矿物岩石, 1991, 11(2): 5—9.

[39] 郑大中. 硼氢化物是形成硼矿床的重要迁移形式 [J]. 盐湖研究, 2000 8(4): 1—7

[40] 刘志宏, 胡满成, 高世扬, 等. 库水硼镁石和柱硼镁石形成过程的实验研究 [J]. 地球化学, 2003 32(6): 569—572

[41] Kitano Y, Okumura M, Idogaki M. Coprecipitation of borate—boron with calcium carbonate [J]. Geochemical Journal 1978, 12(3): 183—189

Formation and Distribution Characteristics of Boron Resource
in Salt Lakes of Qaidam Basin

GAO Chun-liang², YU Jun-qing², ZHAN Da-peng², ZHANG Li-sha¹, CHENG Ai-yin²

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Boron resource is rich in salt lakes of Qaidam basin, has two types which are sedimentary and mineralizing water. The trend is that the north is higher than the south in directional change in the boron resource of salt lakes. Borate deposit was precipitated in late Pleistocene epoch and Holocene epoch, mainly in Holocene epoch. Borate deposit is mainly distributed in Da Qaidam and Xiao Qaidam lakes which were located in Qaidam Basins northern margin. Some are fragmentary distributed in Mahai salt playa. Formation of boron brine is controlled by the abundance of boron source, closed catchment basin and the arid climate. Stable physicochemical environment, low temperature condition, diluting and doping effect, biological effect, hydrochemical type of salt lakes and other formation mechanism play the important roles in the formation of borate deposit.

Key words: Qaidam basin; Salt lake; Boron resource; Formation distribution characteristic