

马鸿颖,李洪普,安永为,等. 柴达木盆地大柴旦盐湖硼矿特征及成因研究[J]. 盐湖研究, 2024, 32(2): 54-61.

Ma H Y, Li H P, An Y W, et al. The Characteristics and Genesis of Boron Deposits in Da Qaidam Salt Lake, Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(2): 54-61.

DOI: 10.12119/j.yhyj.202402008

柴达木盆地大柴旦盐湖硼矿特征及成因研究

马鸿颖^{1,2}, 李洪普^{1,2*}, 安永为³, 仇新迪^{1,2}

(1. 青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室, 青海 格尔木 816099; 2. 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海 格尔木 816099; 3. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810016)

摘要:柴达木盆地是我国最大的盐湖产业基地, 大柴旦盐湖为盆地内重要的固液相硼矿床, 其卤水中富含硼、锂、钾、镁、钠、溴、碘等。通过勘查大柴旦地质背景和卤水储层地质特征, 分析大柴旦湖水(地表卤水)、潜卤水、承压卤水水文地质特征、水化学特征, 结果表明大柴旦地区硼、锂来源于地球深部, 断裂构造为导卤构造, 钾、钠、镁等盐类来源于周缘花岗岩, 新构造运动形成大柴旦断陷盆地接受沉积, 干旱的气候条件下沉积盐类地层, 随着地下水补给增加, 岩盐层溶解, 形成高矿化度卤水, 相应的硼、钾、锂等溶解于卤水之中, 形成卤水(液体硼矿)。

关键词: 卤水特征; 卤水成因; 液体硼矿; 大柴旦盐湖

中图分类号: P597.1; P619.2

文献标志码: A

文章编号: 1008-858X(2023)02-0054-08

我国是世界硼资源储量大国之一, 已经初步建立了完整的硼产业体系。目前发现的硼矿床成因类型有沉积变质再造型、盐湖型、地下卤水型、接触交代型、沉积型和火山沉积型等6种, 其中沉积变质再造型硼矿资源储量占总量的38.10%, 盐湖型硼矿资源储量占总量的52.36%, 其他类型占9.54%; 加强对盐湖卤水中硼资源的有效开发利用, 既能满足市场对硼酸的需求, 又有利于盐湖卤水钾、镁、锂等重要资源的高效开发和综合利用^[1-4]。近年来, 从盐湖卤水绿色、高效提硼工艺的研究已成为主流和主要的研究方向。然而, 我国硼矿石消费全球第一, 市场需求呈不断上升趋势, 硼矿勘查程度不高, 开发利用难度大, 可供持续开发利用的后备资源不足, 尤其是优质硼资源相对缺乏, 对外依存度高。因此, 加强卤水型硼矿调查评价与勘查工作, 促进我国硼矿产业升级、优化开发利用结构与布局、强化技术创新, 推进资源综合利用与保障硼资源供给具有重要意义^[5]。

青海大柴旦盐湖位于柴达木盆地北东缘的大柴旦内陆闭流性次级盆地, 呈北西—南东向的椭圆形分布于盆地的西南部, 汇水面积约2 130 km²。该盐

湖是一个固液相的硼矿床, 共伴生钾盐、石盐和镁盐、芒硝、锂和溴等, 成因复杂, 累计查明硼资源量334.1 × 10⁴ t(现保有量为222.82 × 10⁴ t), 规模为大型。将该矿床和国内外第四纪大型盐湖硼矿床(如我国西藏扎仓茶卡和聂尔错、青海小柴旦、美国Searles)、晚二叠纪海相盐类大型硼矿床(如德国Stassfurt)、第三纪火山沉积硼矿床(如土耳其bigadic、Sultancayir、Kestelek、kirka, 阿根廷Loma Blanca)相比, 经济价值较高^[6-9]。本次勘查从盆地的成矿地质背景、最新矿床地球化学资料入手, 对大柴旦湖液体硼床地质特征和成因进行了系统研究。

1 区域地质背景

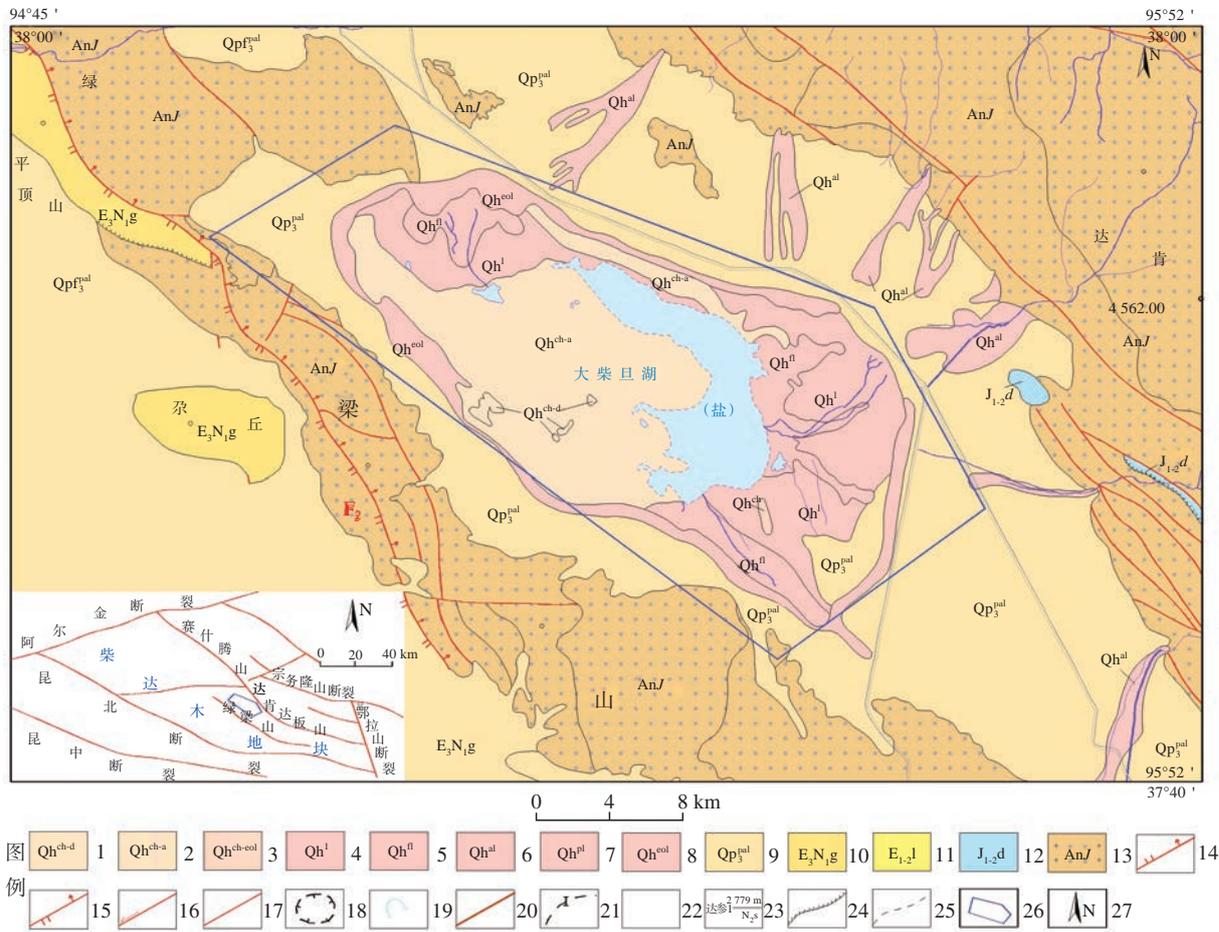
大柴旦盐湖大地构造位置属柴达木地块柴北缘二级反“S”型褶皱带, 北部和南部分别为达肯大坂山中间隆起和绿梁山中间隆起。区域地层自老至新出露前侏罗纪地层(震旦系、奥陶系、石炭系、三叠系)、下侏罗系、古近系和第四系。其中下侏罗系地层为三角洲相含砾砂岩与黑色页岩互层夹煤层, 古近系路乐河组 and 上、干柴沟组为陆相浅湖相砂岩、粉砂

收稿日期: 2022-08-04; 修回日期: 2022-11-12

基金项目: 青海省基金项目(2022-ZJ-734)

第一作者: 马鸿颖(1983-), 男, 工程师, 主要从事盐湖勘查与研究。Email: 343271128@qq.com。

通讯作者: 李洪普(1968-), 男, 教授级高工, 主要从事盐湖勘查与研究。Email: 745430898@qq.com。



图例 1-化学沉积,含芒硝淤泥(大柴旦湖底),2-石盐、粉砂、石膏,3-化学沉积、风积物,4-湖积物,5-沼泽沉积物,6-冲积物,7-洪积物,8-风积物,1-8全新世沉积物,9-晚更新世冲洪积物,10-上、下干柴沟组,11-大煤沟组(柴北缘含煤地层),12-老山基岩区,13-二叠世岩浆岩,14-泥盆世岩浆岩,15-奥陶世岩浆岩,16-正断层,17-逆冲断层,18-平移走滑断层,19-性质不明断层,20-角度不整合,21-地质界限,22-湖、河、溪,23-高程点,24-公路、研究区位置,25-(B-B')剖面位置、(SY₁)样品采集位置与编号,26-指北针。

图1 大柴旦盐湖硼矿区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of boron deposit in Dachaidan Salt Lake

岩、粉砂质泥岩等。第四系属山前冲洪积相砾岩、砂岩、含砾砂岩、粉砂岩沉积和湖相与盐湖相泥质粉砂岩及湖相、盐湖相沉积;全新统有风积、冲洪积的含砾砂、砂、粉砂等,沼泽沉积的淤泥、粉砂淤泥,湖积的砂、粉砂、含粘土的粉砂、粘土等,化学沉积的石盐、石膏、含石盐的粉砂、含芒硝的淤泥等。区域构造为达肯大坂山断裂系和绿梁山断裂系。达肯大坂山断裂系以北西向断层为主,最早发生于加里东后期,使太古界地层逆冲于古生界之上,后期的断裂承袭老断裂活动,并使早先断裂加深,至燕山期则明显的组成为北西 30°~65° 延展的叠瓦式断裂系,倾角 40°~75°。其后又被晚期北东向以平推为主的断层切割,断距一般在几十米至几百米不等,构造节理极

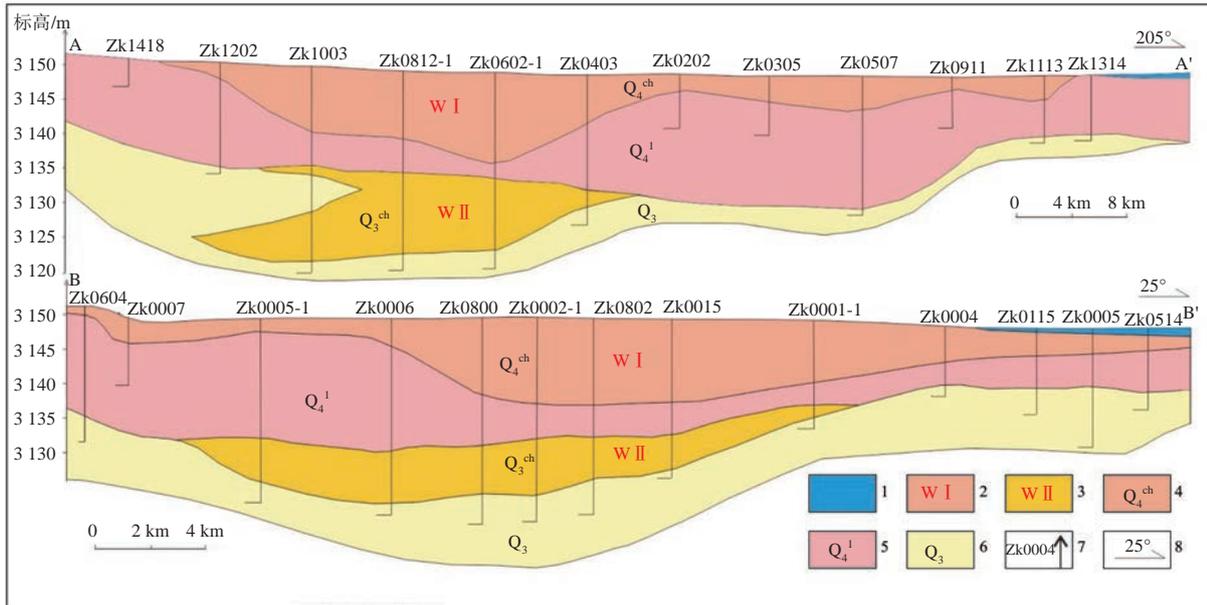
其发育。绿梁山断裂系由一系列北西西~北西及北东东向断裂组成,其断距一般在十几米至几百米不等,常常成为超基性岩体贯入的通道。第四纪,大坂山断裂系和绿梁山断裂系以断块性的脉动式差异运动为主,相对缓慢的穹状隆起为辅。主要表现有:达肯大坂山断块和绿梁山上运动、大柴旦盆地沉降等。达肯大坂山断块上升运动导致大幅度的断块上升,被切割的冰川沉积基底阶地高达 100~150 m,尤其在八里沟一带可达 200 m。而上更新世延续的上升则表现为洪积物以较大的坡度(3°~8°)沉积,其后又被河流切割成高 50 m 左右的阶地。在塔塔楼河中、晚更新世冲洪积基座阶地的根部,基岩逆冲洪积物之上,向西切断了冰川沉积,并在该沉积的前缘

八里沟留下了明显的断层三角面和断层陡坎,至温泉沟沟口由北西向转为北西西向。因此在温泉沟形成了水温达 70 °C 的温泉。推测该断裂是将基底锂、硼等元素运至地表的重要通道。绿梁山上升运动造成的上升幅度比达肯大坂山仅在现代河床中可见 3~4 级河床阶地,最高一级高度仅 30 m 左右,洪积物坡度(1°~3°)。大柴旦盆地沉降作用下,使大柴旦湖盆地呈北西~南东向展布,系受控于达肯大坂山和绿梁山的北西~南东向断裂作用。其东西两端新的穹状隆起则对大柴旦闭流盆地的形成起着重要作用。湖盆地在第四纪断裂期主要表现为强烈的沉降。

大柴旦盐湖的北、东、南三侧山区内岩浆岩分布广泛,类型繁多,最早始于晚奥陶世,止于二叠世末期。晚奥陶世以中、基性火山喷出岩为主。加里东

末期有中、酸性岩浆侵入岩,主要有黑云母花岗岩、蚀变闪长岩,一般呈岩株状、岩盆状侵入于太古界及寒武系地层中。华力西期岩浆活动达到高潮,除类型繁多的侵入岩外,伴有中、酸性火山岩、花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩及橄榄岩、辉长岩等超基性岩,呈岩脉或岩枝状侵入^[10]。

大柴旦盐湖为固液相硼矿床。固体硼矿床为第四纪硼酸盐型矿床,伴生石盐和芒硝。该矿床按形成环境又可分为湖泊硼酸盐矿床、湖滨地表硼矿床和湖沼沉积硼矿床。矿床中硼矿体分为粘土硼矿体、盐类硼矿体、含盐硼体、淤泥石膏硼体等。盐湖卤水为液体硼矿床,按其产出状态可划分地表卤水和晶间卤水(图 2)。晶间卤水根据水力性质,又可划分为晶间潜卤水层(第 I 晶间卤水层)和晶间承压卤水层(第 II 晶间卤水层)^[11]。



1-地表卤水,2-晶间潜卤水,3-晶间承压卤水,4-全新世化学盐沉积层,5-全新世湖相沉积层,6-晚更新世沉积层,7-钻孔位置及变化,8-剖面方向

图2 大柴旦湖矿层剖面图

Fig. 2 Section of Dachaidan Lake ore bed

2 样品采集、分析方法

样品采集具体位置见图 1、表 1。样品采集于地表浅坑中的晶间潜卤水,样品量一般 500 mL,采样前对采样瓶进行了 3 次洗涤。样品分析时用一次性塑料滴管吸取样品缓缓滴入小烧杯中,准确称取一定质量(一般为 20.0 g)的样品,移入 250 mL 容量瓶中定容;固体混匀后直接称取一定质量(一般为 20.0 g)

的样品,溶解后移入 250 mL 容量瓶中定容。检测方法:K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、Li⁺、Sr²⁺采用电感耦合等离子体发射光谱法;Cl⁻、B₂O₃采用容量法;Rb⁺、Cs⁺采用电感耦合等离子体质谱法;Br⁻、I⁻、NO₃⁻、F⁻采用分光光度法;密度用比重瓶法。样品分析由青海省柴达木综合地质矿产勘查院测试中心完成,检测质量满足 DZ/T 0130-1993《地质矿产实验室测试质量管理规范》的相关要求。

3 盐湖相(固体硼矿)特征

大柴旦盐湖地区地层为上更新统和全新统,盐类沉积主要赋存于上更新统和全新统的化学沉积层中(图1)。上更新统按成因类型可划分洪积、湖积、湖泊化学沉积三种类型。三种类型自边缘向中心依次呈环带状分布,粒度逐渐变小;上更新统洪积砂砾呈环带状分布于矿区外围,以北部和西南部较发育,呈向湖心的微缓倾斜状分布,主要由砾石和细砂组成。在湖盆中心,主要为湖积粘土、粉砂和湖泊化学沉积的石盐为主、芒硝和石膏、软钾镁矾等盐类矿物,湖积在下,湖泊化学沉积在上,二者呈连续过渡关系^[12,13]。

全新统成因类型有冲积、风积、湖泊机械沉积、湖泊化学沉积和湖沼沉积。冲积由粉砂、砂砾组成,主要分布在矿区东部和北部的一些小溪和冲沟中;风积为中—细砂,主要分布在矿区西部及西南部,另在东南部和中南部也有分布,常形成新月形沙丘和沙堆,在东南部见有高度达8 m的新月形活动沙丘;湖沼沉积主要分布于矿区北部、东部湖水外缘的湖泊机械沉积中,根据沉积物的矿物成分进一步分为沼泽沉积和盐泥坑沉积两种,前者为含腐植物的砂质粘土,后者为砂质粘土、淤泥、石膏、芒硝、石盐,部分含有钠硼石、硼砂、水方硼石,形成盐泥坑硼矿;湖泊化学沉积广泛分布于湖底和地表,根据沉积物的矿物成分可以划分为淤泥石膏、芒硝和石盐三种类型:淤泥石膏沉积是组成湖底盐类沉积中淤泥石膏层的主体,主要分布于矿区中部、东北部,厚度0.10~8.53 m, B_2O_3 含量0.6%~14%,

分布面积94.04 km²;芒硝沉积是组成湖底盐类沉积中芒硝层的主体,主要分布在矿区的中东部,矿区西南部则呈零星分布,沉积厚度0.20~9.86 m,3~4 m者居多, B_2O_3 含量0.7%~2.5%,分布面积56.15 km²;石盐层是组成湖底盐类沉积中石盐层的主体,主要分布于矿区的中西部,其厚度西部大于东部,最大16.90 m,向东逐渐变薄,至边缘最小为0.08 m,多在6~8 m, B_2O_3 含量0.6%~2.5%,分布总面积108.93 km²;湖泊机械沉积分布于湖泊化学沉积的外缘及湖底湖泊化学沉积的下部。在湖底它直接覆盖在上更新统盐类沉积之上,此类沉积的岩性以砂质粘土为主,次为含石膏砂质粘土和含盐砂质粘土^[13]。

硼酸盐层在水平分布上具有明显的分带性,湖区中部,以芒硝沉积区的硼酸盐和钠硼解石为主的

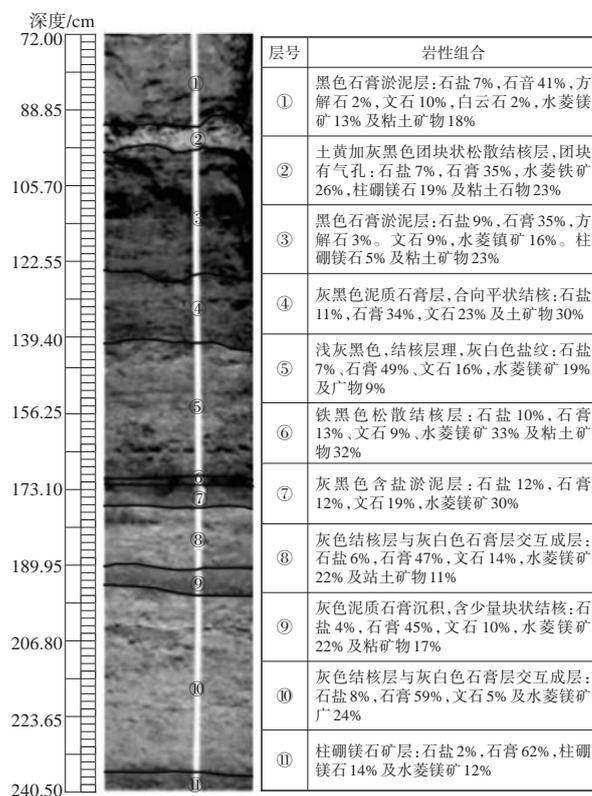


图3 大柴旦湖固体硼矿垂向分布特征^[29]

Fig. 3 Vertical distribution characteristics of solid boron deposits in dachaidan lake

石盐沉积。在湖区东北外缘地表卤水区以柱硼镁石为主的淤泥石膏硼酸盐沉积。在北部外缘(偏东)及湖表卤水的东部有湖滨地表钠硼解石、水方硼石和柱硼镁石分布。垂向上,硼酸盐的沉积分带现象。硼酸盐沉积期,下部为零星分散的硼为主要矿物的钠硼解石及柱硼镁石,上部为芒硝、石盐、石膏、泻利盐及软钾镁矾。后硼酸盐沉积期出现了三个明显的垂直分布区间:下部硼酸盐沉积区间,主要集中在全新统下部的碳酸盐粘土沉积中,含少量石膏和芒硝,硼酸盐以柱硼镁石为主,钠硼解石次之;中部硫酸盐沉积区间:这成盐区间也是硼酸盐形成的全盛阶段,在底部淤泥石膏中以柱硼镁石为主,钠硼解石次之,中部及上部含芒硝、钠镁矾及含芒硝淤泥中的硼酸盐则以钠硼解石为主,柱硼镁石次之;顶部氯化钠沉积区间:在氯化钠沉积区间的硼酸盐主要集中在石盐沉积层的底部,多半为钠硼解石,柱硼镁石少见(图3)。硼酸盐与含淤泥石膏、芒硝的石盐沉积关系密切。在纯石盐层中,基本上未出现硼酸盐沉积^[14-16]。

4 卤水(液体硼矿)特征

4.1 地表卤水(湖水)

地表卤水分布于矿区的东北部,平面上呈一头朝南东的镰刀状,在不同季节、不同年份表面卤水的动态变化比较大,其动态变化与卤水的稀释和浓缩密切相关。洪水期水位上升,湖面积扩大,卤水被稀释,部分固相被溶解,造成矿化度减小, B_2O_3 、LiCl、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Br^- 等普遍降低,唯有 Na^+ 含量升高;枯水期则与之相反。图1为卤水在年内布情况,从雨季至旱季,面积 22.92~44 km²,水深 0.20~0.70 m,矿化度 220~350 g/L, B_2O_3 含量 1 168.20~5 202.46 mg/L, LiCl 含量 412~1 776.13 mg/L, K^+ 含量 2 530~10 730 mg/L, Mg^{2+} 含量 7 688.50~35 549 mg/L, Na^+ 含量 72 400~109 400 mg/L, Br^- 含量 43.25~188.24 mg/L, F^- 含量为 11.30~17.39 mg/L, I^- 含量为 0.00~0.63 mg/L, 不含 Rb_2O 和 Cs_2O ^[17]。

4.2 晶间卤水

晶间卤水矿按其产出位置及水力性质划分为潜卤水矿层(W I)和承压卤水矿层(W II)。潜卤水层广泛分布于矿区中部,面积 130.18 km²,水位埋深 0.0~0.5 m,储卤层厚度 3~12.05 m,其总的变化趋势是:西南厚度达 12.05 m,湖水区次之,南部和东南部厚度仅 3 m。潜卤水储卤层为全新统盐类沉积,岩性包括石盐层、芒硝层、淤泥石膏层,上部石盐层结构较松散,孔隙度为 30%~40%,而下部的芒硝及淤泥石膏沉积具压实作用,孔隙度 20%~35%,卤水矿化度 321.4~357.1 g/L^[17], B_2O_3 含量 1 310~2 150 mg/L, LiCl 含量 600~1 260 mg/L, K^+ 含量 3 700~6 880 mg/L, Mg^{2+} 含量 11 170~25 950 mg/L, Na^+ 含量 83 200~107 300 mg/L, Br^- 含量 44~76 mg/L。因其间无隔水层,具有水力联系,且卤水水质变化不大,卤水化学组份也显示一定的垂直分异作用,下部组分含量高于上部(表1)。

表1 晶间潜卤水层组份垂直变化一览表

Table 1 Vertical variation of components in intercrystalline brine

采样点号	埋深/m	岩性	组份含量/(mg·L ⁻¹)					
			B_2O_3	LiCl	K^+	Mg^{2+}	Na^+	Br^-
SY ₁	0.00~3.10	石膏淤泥芒硝	1 780	710	4 360	13 050	107 300	69
	3.10~6.24	石膏淤泥	1 860	770	4 840	14 460	83 200	73
SY ₂	0.49~2.70	含砂石盐	1 570	930	4 710	21 100	88 300	44
	2.70~9.71	含淤泥芒硝石盐	1 590	860	4 810	22 130	87 200	44
	9.71~10.49	石膏白钠镁矾	2 000	1 070	6 000	25 950	88 900	49
SY ₃	0.15~1.92	石盐	1 790	960	5 620	19 720	88 900	67
	1.92~7.12	石膏白钠镁矾	2 100	1 260	6 880	24 530	84 700	71
SY ₄	0.13~3.16	石盐	1 310	600	3 700	11 170	105 500	66
	3.16~8.07	芒硝	2 150	910	5 420	18 020	82 800	76

承压卤水矿层分布于矿区西南部,水位埋深 0.05~1.72 m,厚度 3~10.10 m;储卤层为上更新统上部的盐类地层,层岩性为石盐、芒硝和石膏,中部以石盐为主,厚度较大,向边缘逐渐变薄,岩性以芒硝、石膏为主;卤水孔隙度平均值 32.40%,给水度平均值 24.62%;矿化度 223.3~387 g/L; B_2O_3 含量 1 452.49~2 763.50 mg/L, LiCl 含量 70.71~2 503.94 mg/L。从 B-B'剖面向西矿化度和各组份浓度普遍增大,矿化度 350 g/L 以上, B_2O_3 含量 2 763.50 mg/L, LiCl 含量 2 326.44 mg/L;而从 B-B'剖面向东矿化度和各组分浓

度降低,矿化度在 230 g/L 以下, B_2O_3 含量 1 452.49 mg/L, LiCl 含量 70.71 mg/L。本卤水矿层中还含有微量的 F^- 、 I^- 和 Rb_2O ,其中含量分别为 6.38、0.76 和 1.20 mg/L^[17]。

5 硼矿成因分析

5.1 硼的物质来源

大柴旦盐湖两侧的达肯大坂山断裂系和绿梁山断裂系非常发育,且在第四系仍有延续和活动,受其影响,在大柴旦湖与小柴旦湖之间有一条南北向的

断裂带通过,一直延伸到温泉沟并与北西西向断裂交汇。在大柴旦湖盆的北缘达肯大坂山南麓的温泉沟内分布有温泉群,共有 87 个泉眼,出露泉水的水温一般在 60~70 °C,最高可达 78 °C,在临区的雅沙图地区还分布有泥火山。大柴旦盐湖硼同位素地球化学特征研究表明,温泉沟水的 $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ 值为 3.996 2, $\delta^{11}\text{B}$ 为 -11.75‰;湖周边冷泉水 $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ 值为 3.976 5, $\delta^{11}\text{B}$ 为 -16.65‰;而地表卤水的 $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ 值为 4.060 0, $\delta^{11}\text{B}$ 为 +6.49‰;晶间卤水的 $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ 值为 4.007 25, $\delta^{11}\text{B}$ 为 +7.14‰^[18-20];充分说明大柴旦盐湖硼矿物以及地表卤水中富含重同位素,成矿元素硼的来源与温泉水有紧密的关联。另外,大柴旦盐湖属内陆封闭性干旱盆地的排泄区。从地下水补给、径流与排泄原理表明,大柴旦湖的主要补给水来自矿区北部,且各类补给淡水中硼、锂元素都来源于深部温泉水和泥火山水。这与青藏高原硼锂矿床的成矿物质来源问题提出的来自温泉、泥火山等深部岩浆物质相吻合^[21-23],与我国西藏扎仓茶卡和聂尔错、青海小柴旦、美国 Searles 第四纪大型盐湖硼矿床^[8,9]相似,所以我们认为大柴旦地区硼可能主要来源于地层深部。

5.2 硼矿形成地质条件

(1) 构造条件

大柴旦湖盆处于柴达木盆地北缘的北西向构造线上,湖盆的形成和发展受构造体的控制。由于南北向挤压而促使界山大坂和绿梁山-锡铁山在新生代大幅度上升,大柴旦断陷呈北西西向相对沉降。北东向平移断层斜切至盆地中间,把盆地分割成一系列次级断陷。盆地周边的河流向盆地中心汇聚,在大柴旦湖区断陷盆地的最低洼处形成了大柴旦湖,接受成盐物质的汇聚与成矿^[23]。

(2) 气候条件

大柴旦矿区自早更新世以来,气候高寒干旱,少雨多风,昼夜温差大,属典型的大陆荒漠干旱气候。据大柴旦上世纪 60 年代的气象资料显示,大柴旦矿区的多年平均降水量仅为 81.09 mm,多年平均气温 0.91 °C,区内主导风向为西风,最大风速 40 m/s,多年平均蒸发量为 2 184.95 mm。干冷和温暖交替是柴达木盆地第四纪古气候演化的基本模式,古气候自上新世中期以来经历了三次明显的变化:在上新世晚期(3.30~3.00 Ma; B.P),为凉寒-寒冷干燥气候;第四纪初(2.48~0.03 Ma; B.P)为频繁干冷~温暖交

替变化气候;距今 3 万年左右至今,气候变得极度干燥^[24-27]。正是在这三次干冷交替的气候条件,奠定了现今盆地极度干燥气候的基础。气候干寒、蒸发量远远大于降水量是盐湖沉积硼矿形成的必须条件,在此条件下含硼盐类物质在盆地中才得以汇集、浓缩及沉积成盐。矿区内在这种干旱的气候条件下沉积了硼矿及其它盐类矿物。

(3) 固液相硼矿床物质组分之间的平衡关系

矿区地表卤水和潜卤水浓度在 6~7 月(雨季)的变化范围为 242~261.3 g/L;9~10 月份(干旱期)的变化为 261~291 g/L,主要组分 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 B_2O_3 、Li、Cl 等具有相同的变化,其变化原因是石盐、芒硝和泻利盐等等盐类矿物的结晶和溶解所致,固体硼矿床和卤水之间构成一个水盐平衡体系,总的趋势是成盐作用仍继续发展着,而承压晶间卤水的浓度、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 B_2O_3 、Li、Cl 等组分随季节的变化不明显。固体硼矿和液体硼矿之间的关系是:当液体矿中的 B 元素达到饱和之后,就会结晶析出各种固体硼矿物,沉积后形成具有工业利用价值的固体硼矿床^[28-30]。

(4) 卤水的析盐规律

大柴旦湖晶间卤水的水化学类型为单一的硫酸镁亚型,为了利用相图分析卤水的成盐条件,根据水化学组成资料^[17](表 2),在 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} - H_2O 五元体系相图中位置见图 4。

表 2 不同位置化学组分相图指数计算表

Table 2 Calculation of phase diagram index of chemical components at different positions

组份含量/(mg·L ⁻¹)			相图指数			图点号
K ⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	2K ⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	
7000	27280	27120	5.99	75.12	18.89	1
10250	39010	24470	6.58	80.62	12.80	2
4500	23650	27690	4.36	73.78	21.86	3
7760	28190	20170	6.76	78.95	14.29	4
9450	39210	34620	5.77	77.02	17.21	5
8600	40970	26890	5.30	81.18	13.52	6

由图 4 分析,晶间卤水组成点均在泻利盐相区,并靠近钾石盐和光卤石相区,根据这种特点,该类型卤水进一步蒸发浓缩后以析出光卤石和水氯镁石为主,同时结晶路线沿着泻利盐和钾石盐的共饱和线进行时,可能析出少量的钾石盐,这与地层中的岩盐成分一致。

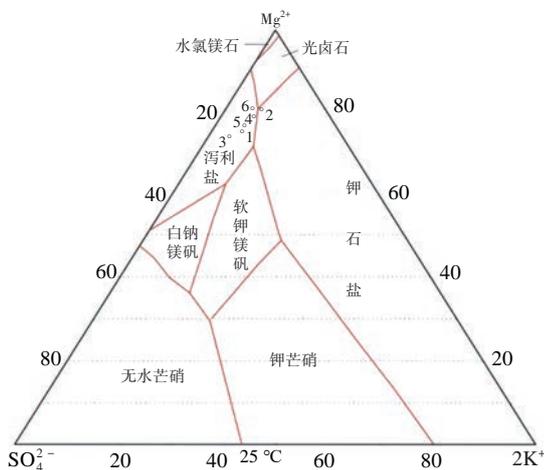


图4 矿区中晶间卤水在 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-}/H_2O 五元体系相图中位置

Fig. 4 position of intercrystalline brine in K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-}/H_2O phase diagram system

6 结论

1) 柴达木盆地大柴旦盐湖硼矿分布于封闭的山间盆地,固液相并存,由卤水湖、潜卤水、承压卤水和固体硼矿组成,潜卤水和承压卤水产于化学沉积物石盐芒硝和硼酸盐,是一个新类型的综合性硼酸盐矿床,B、Li、K、Mg、Na 和 Br 及硼酸盐等达到工业品位。

2) 大柴旦盐湖硼酸盐成盐沉积过程可分为晚更新世晚期成盐期和晚更新世末期-全新世成盐期。第一成盐期以粘土硼酸盐和盐湖硼酸盐为主;第二成盐期中为含盐粘土硼酸盐游泥石膏硼酸盐、芒硝硼酸盐和石盐硼酸盐。

3) 湖区的硼酸盐沉积从碳酸盐沉积阶段就开始,连续到氯化物,甚至钾盐(软钾镁矾)沉积阶段,以硫酸盐沉积阶段的中期最为发育,这时硼酸盐沉积占主要地位,形成硼酸盐矿。在各固体硼矿沉积阶段,蒸发浓缩的残余地下水形成卤水。

4) 大柴旦盐湖形成模式可以总结为盐湖外围的岩浆活动使深部富 B、Li 元素沿深大断裂运移至湖盆,经蒸发、浓缩、沉积成矿。

参考文献:

[1] 邵世宁,熊先孝. 中国硼矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 化工矿产地质, 2010, 32(2): 65-74.
 [2] 中国矿业报, 我国硼矿床成因类型分为六类[N]. 2020.11.06 (11: 38: 58) <http://www.geoeky.com/dxkp/9622.jhtml>
 [3] 雷风鹏, 朱朝梁, 卿彬菊, 等. 卤水提硼技术进展综述[J]. 无机

盐工业, 2018, 50(7): 1-5.

[4] Zhang R, Xie Y M, Song J F, et al. Extraction of boron from salt lake brine using 2-ethylhexanol [J]. Hydrometallurgy, 2016, 160: 129-136.
 [5] 张福祥, 赵莎, 刘卓, 等. 全球硼矿资源现状与利用趋势[J]. 矿产保护与利用, 2019, 第6期: 1-13.
 [6] 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, 1-345.
 [7] 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 等. 柴达木盆地大柴旦硼矿床地质特征及成矿机理[J]. 地质学报. 2015, 89(3): 659-670.
 [8] 姜盼武, 樊启顺, 秦占杰, 等. 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, 2021, 29(1): 44-55.
 [9] 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 等. 大柴旦盐湖化学沉积特征及其控制因素[J]. 盐湖研究. 2015, 23(1): 23-29.
 [10] 李洪普, 侯献华, 潘彤, 等. 柴达木盆地深层含钾卤水研究与利用[M]. 中国地质大学北京出版社. 2022, 1-209.
 [11] 李洪普, 侯献华, 郑绵平, 等. 柴达木盆地西部更新统深层砂砾型深层卤水成矿模式与找矿方向初探[J]. 湖泊科学, 2022, 34(3): 1043-1054.
 [12] 余俊清, 洪荣昌, 高春亮, 等. 柴达木盆地盐湖锂矿床成矿过程及分布规律[J]. 盐湖研究. 2018, 26(1): 7-14.
 [13] 闵秀云, 高春亮, 余俊清. 柴达木盆地大柴旦硼矿成矿年代研究[J]. 地质论评. 2015, 61(1): 355-356.
 [14] 何先虎, 余俊清, 张丽莎, 等. 大柴旦盐湖DCD03剖面的矿物学记录及其环境指示意义[J]. 盐湖研究. 2013, 21(4): 11-15.
 [15] (瑞典)霍坎松(Hakanson, L), (瑞典)杨松(Jansson, M). 湖泊沉积学原理[M]. 科学出版社. 1992, 1-150.
 [16] 沈吉, 王苏明. 湖泊沉积与环境演化[M]. 科学出版社. 2010, 1-484.
 [17] 任金润. 青海省大柴旦镇大柴旦湖硼矿矿区储量核查报告[R]. 青海中天硼锂矿业有限公司, 2011, 20-21.
 [18] 李俊周, 孙大鹏. 大柴旦盐湖硼同位素地球化学研究[J]. 地球化学, 1996, 25(3): 277-285.
 [19] Yang N, Wang G C, Shi Z M, et al. Application of multiple approaches to investigate the hydrochemistry evolution of groundwater in an arid region: Nomhon, northwestern China[J]. Water, 2018, 10(11): 1-18.
 [20] 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 等. 大柴旦盐湖硼矿床与国内外硼矿床的研究对比[J]. 盐湖研究, 2016, 24(4): 1-9.
 [21] Xie Y, Shao J L, Cui Y L, et al. Ground water circulation and hydrogeochemical evolution in Nomhon of Qaidam Basin, Northwest China[J]. Journal of Earth System Science, 2017, 126(2): 1-16.
 [22] 张彭熹, 陈克造, 于升松. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1987, 132-157.
 [23] 李洪普, 潘彤, 李永寿, 等. 柴达木盆地西部构造裂隙孔隙卤水地球化学组成及来源示踪[J]. 地球科学. 2022, 47(1): 36-44.
 [24] 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 等. 晚冰期以来大柴旦盐湖沉积记录的古气候演变及其尘暴事件[J]. 盐湖研究. 2019, 27(1): 40-51.
 [25] 韩佳君, 周训, 姜长龙, 等. 柴达木盆地西部地下卤水水化学特

- 征及其起源演化[J]. 现代地质. 2013, 27(6):1454-1464.
- [26] Zhu B Q, Wang X M, Rioual P. Multivariate indications between environment and ground water recharge in a sedimentary drainage basin in northwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 549(2):92-113.
- [27] 高春亮,张丽莎,余俊清,等. 大柴旦盐湖卤水演变及环境变化的矿物学记录[J]. 地球化学. 2011, 40(2):156-162.
- [28] Yu J Q, Gao C L, Cheng A Y, et al. Geomorphic, hydroclimatic and hydrothermal controls on the formation of lithium brine deposits in the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau, China[J]. Ore Geology Reviews, 2013, 50:171-183.
- [29] 张景涛,史浙明,王广才,等. 柴达木盆地大柴旦地区地下水水化学特征及演化规律[J]. 地学前缘. 2021, 28(4):194-205.
- [30] Wang J J, Liang X, Liu Y F, et al. Hydrogeochemical evolution along groundwater flow paths in the manas river basin, Northwest China[J]. Groundwater, 2019, 57(4):575-589.

The Characteristics and Genesis of Boron Deposits in Da Qaidam Salt Lake of Qaidam Basin

MA Hongying^{1,2}, LI Hongpu^{1,2*}, AN Yongwei³, QIU Xindi^{1,2}

(1. Qinghai Province Key Laboratory of Exploration Research of Salt Lake Resources in Qaidam Basin, Germ, 816099, China; 2. Qinghai Province Qaidam Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute, Germ, 816099, China; 3. Qinghai Provincial Geological Survey Institute, Xining, 810016, China)

Abstract: The Qaidam Basin is the largest industrial base in Salt Lake, and the Salt Lake Basin is an important solid-liquid boron deposit in the basin, which is rich in boron, lithium, potassium, magnesium, sodium, bromine, iodine and so on. In order to provide an important basis for the full development and application of Da Qaidam Salt Lake, through the study of dachaidan geological background, brine reservoir geological characteristics, based on the analysis of the hydrogeological and hydrochemical characteristics of the water (surface brine), buried brine and confined brine in the lake, it is considered that boron and lithium in the lake come from the deep part of the Earth, and the fault structure is a salt-conducting structure, the salts such as potassium, sodium and magnesium come from the peripheral granite, and the neotectonic movement formed the Da Qaidam faulted basin to accept the sediments, the formation of high salinity brine, the corresponding boron, potassium, lithium dissolved in the brine, the formation of brine (liquid boron ore).

Key words: Brine characteristics; Origin of brine; Liquid Boron ore; Da Qaidam Salt Lake