青藏高原典型盐湖硼矿床成矿条件对比 与矿床模式研究

洪荣昌^{1,2,3},高春亮^{1,2},余俊清^{1,2},闵秀云^{1,3},成艾颖^{1,2},张丽莎^{1,2},徐虹⁴

(1. 中国科学院青海盐湖研究所,中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室,

青海 西宁 810008; 2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室,青海 西宁 810008;

3. 中国科学院大学,北京 100049;常山县国土资源局,浙江常山 324200)

摘 要:选取青藏高原扎仓茶卡和大柴旦典型盐湖硼酸盐矿床,分别从区域地质背景、气候条件、区域水文 地球化学、同位素地球化学以及硼地球化学特征等方面开展研究。结果表明,扎仓茶卡和大柴旦盐湖固体 硼酸盐矿床的形成受控于硼自身内在地球化学特性以及外在控制条件,特别是构造运动、第四纪以来的干 旱气候条件以及丰富的物源等控制因素,青藏高原盐湖硼酸盐矿床的形成是内外条件耦合的结果。基于扎 仓茶卡和大柴旦盐湖硼酸盐矿床的成矿条件和成矿模式的研究,确立青藏高原高寒干旱盐湖区盐湖硼酸盐 矿床成矿模式为高山—深盆—浅水成矿模式。

关键词:盐湖硼矿床;成矿条件;成矿模式;扎仓茶卡;大柴旦盐湖;青藏高原 中图分类号:P611.2⁺2
文献标识码:A
文章编号:1008 - 858X(2017)01 - 0008 - 11

引 言

我国4个盐湖区^[1]盐类矿产资源丰富,其 中尤以钾盐资源最负盛名。察尔汗和罗布泊等 盐湖作为我国最早开发的大型钾盐生产基地得 到深度的勘探,相关地质与地球化学等方面的 研究工作主要是针对钾盐矿床的分布和沉积特 征、成矿条件以及成矿模式^[2-32]。然而,硼酸 盐矿物在青藏高原盐湖中被发现以来^[33-34], 盐湖硼矿逐渐在我国的硼矿开采中占有重要的 地位。值得一提的是,青藏高原第四纪盐湖硼 矿与土耳其西安纳托利亚、美国加利福尼亚和 南美地区等第三纪火山沉积硼矿床在成矿条件 和成矿模式等方面均存在有一定的差异 性^[35-42]。 青藏高原位于欧亚大陆腹地,是世界上平 均海拔最高的高原。由于高原特殊的高寒干旱 气候环境,成为中国主要的成盐区之一。青藏 高原盐湖区盐湖水化学类型齐全,成分复杂,以 盛产钾镁盐湖和富硼锂特种盐湖而闻 名^[43-44]。西藏盐湖和柴达木盆地盐湖在自然 地理、区域地质、气候条件以及区域水文地球化 学等方面存在着一定的差异,使得青藏高原盐 湖在具有高寒干旱区共性特征的基础上各具特 色,并且在盐湖成盐演化过程中也各不相同。 本文选取青藏高原上典型的硼酸盐盐湖扎仓茶 卡和大柴旦,对两个盐湖硼酸盐矿床成矿条件 开展对比分析,研究结果对于认识青藏高原高 寒干旱区盐湖的成盐演化过程和建立成矿模式 具有重要的参考价值。

收稿日期:2015-07-03;修回日期:2015-11-11

基金项目:国家自然科学基金一青海联合基金项目(U1407206);国家自然科学基金面上项目和青年项目(41501052, 41471013);中国科学院"西部之光"西部博士资助项目共同资助

作者简介:洪荣昌(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为盐湖地球化学与环境变化。Email:986112871@qq.com。 通信作者:高春亮。Email:gaochunliang2007@163.com。

1 自然地理和区域地质背景

1.1 扎仓茶卡

扎仓茶卡是一个现代内陆新类型硼酸盐盐 湖^[45-46],位于西藏自治区革吉县境内,地理坐 标 32°30′~32°38′N,82°10′~82°36′E(图1)。 扎仓茶卡受控于班公湖—怒江大断裂,其间有 NE和 NW 向断裂,从而构成本区 NWW 向的狭 长多级断陷湖盆。伴有多期基性和中酸性侵入 岩,地热活动强烈,构成了班公湖—怒江多金属 成矿带和重要的盐湖硼锂成矿带^[43,47]。第四 纪以来,在青藏高原隆升过程中,深部硼锂元素 不断向上运移,湖盆分异趋于明显;加之冈底斯 山脉阻挡了印度洋暖湿气流,气候干旱致使湖 水咸化,湖泊中出现了大量盐类化学沉积和硼 酸盐沉积^[47]。湖盆内自东向西分布着达热布 错、别若则错、都曲湖、扎仓茶卡 I 湖、扎仓茶卡 Ⅱ湖和扎仓茶卡Ⅲ湖(图1),这几个小湖呈明 显的串珠状排列,而扎仓茶卡位于湖盆的西部 边缘低洼处^[48]。

扎仓茶卡湖盆南北两侧为中高山地貌,南 面为海拔 5 000 m 左右的中高山区,相对高度 在 500~600 m。湖盆出露岩性主要为燕山晚 期的花岗闪长岩,其次为侏罗系超基性岩系等, 并因受到花岗闪长岩的侵入而发生局部变质。 盆地北部为海拔 4 500~4 600 m 的中高山区, 相对高度在 300 m 左右,主要由白垩纪晚期基 性岩和红色碎屑岩层组成(图1)。沉积物多由 砂、砾组成,夹有砂质粘土,至最低 I 级阶地均 由碳酸盐粘土和硼酸盐构成,高出现代湖面5~ 8 m^[43,48]。



图 1 扎仓茶卡矿区地质略图^[47] Fig. 1 Geological map of the Zhacang Chaka

1.2 大柴旦盐湖

大柴旦盐湖是一个现代内陆新类型硼酸盐 盐湖,位于柴达木盆地北部次级盆地内,地理坐 标37°46′~37°55′N,95°02′~95°22′E。大柴旦 湖盆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,褶皱不发 育(图2)。NW-NWW 向逆冲断层组是本区最 主要的一组断裂,见于达肯大坂山、绿梁山、绿 草山和锡铁山。断裂走向以 NW 为主,倾向 NE,北盘上升,为新生代复活逆冲断裂^[43,49]。

盆地外围山系分布元古界变质岩系、震旦 系、寒武系、中下奥陶系、石炭系、二叠系以及三 叠系;盆地边缘有小面积的白垩系、侏罗系和第 三系分布;第四系分布于山麓至湖盆区。湖区 内岩浆活动频繁,各时期的岩浆岩均有出露,其 中以中生代含电气石花岗岩分布最为广泛。各 时期的花岗岩体大面积分布于大柴旦北部达肯



1—全新统;2—上更新统;3—中更新统;4—下更新统;5—上第三系;6—下第三系;7—第三系;8—白 垩系;9—侏罗系;10—三叠系;11—二叠系;12—石炭系;13—志留系;14—奥陶系;15—下古生界;16— 元古界;17—中生界含电气石花岗岩;18—上古生界花岗闪长岩;19—断层;20—现代盐湖;21—河流;22—温泉; 23—近期隆起;24—城镇

图2 大、小柴旦盐湖区域地质图^[43]



大坂山区,包括前吕梁期花岗岩、加里东期和海 西期酸性至超基性岩,以及印支期含电气石斑 状花岗岩和燕山期花岗斑岩^[43,48-49]。

2 气候背景

2.1 扎仓茶卡

扎仓茶卡湖区属于南羌塘亚寒带高寒草原

半干旱气候区,据阿里地区气象局资料,该地区 一年之中季节变化不明显,仅有夏季和冬季之 分。年平均气温-1℃以下,年温差和日温差 大,全年降水量相当少,并且季节性强。年降水 量为 120 mm 左右,年 蒸发量高达 2 200 mm^[47]。

2.2 大柴旦盐湖

西风带气候和雨影效应致使大柴旦地区极

度干旱,湖区属于内陆高原温带极度干旱气候 区。一年之中季节变化不明显,仅有夏季和冬 季之分。年平均气温为0℃左右,日温差大。 年降水量仅为60~80 mm,年平均蒸发量高达 1 800 mm。

3 区域水文地球化学特征

3.1 扎仓茶卡

扎仓茶卡湖盆补给水,包括大气降水、地表

表1 扎仓茶卡湖区不同水体的水化学成分^[47]

Table 1 Hydrochemical compositions of different water bodies in Zhačang Chaka region mg·L							L				
水体	地点	Na ⁺	K^+	Ca ²⁺	Mg^{2} +	Cl -	SO_4^2 -	HCO_3^-	B_2O_3	Rb^+	Cs^+
泉水	湖边	245.40	66. 50	50.87	31.30	494. 30	157.00	252.60	13.90	_	0.06
温泉水	湖边	868. 50	165.55	36.73	127.00	253.50	287.00	146. 50	25.60	0.27	0.15
河水	—	33.15	4.05	34. 15	9.70	20.70	66.00	130.60	6.05	—	—
降水	湖区	5.60	0.80	1.70	0.80	1.70	2.20	22.00	0.24	—	—





扎仓茶卡I湖和Ⅲ湖的湖表卤水很少,经常 处于半干涸状态,其水深常在5~15 cm 范围内 变动;Ⅲ湖有常年湖表卤水,最大水深超过1.2 m (图3)。扎仓茶卡湖表卤水和晶间卤水丰富,略 呈碱性,pH 值为7~8,总矿化度为230~ 350 g/L^[50]。这些卤水中赋存48 种化学组分, 主要组分为 Na⁺、Mg²⁺、K⁺、Ca²⁺、Cl⁻等^[43]。 除上述主要组分外, B₂O₃、Li⁺、Rb⁺、Cs⁺和 As³⁺等稀散元素含量较高(表 2)。总体来说, 扎仓茶卡是一个半干涸的盐湖,湖水水位和水 化学演化处在一个相对浅水的沉积环境,蒸发 盐类矿物沉积尤其是硼酸盐矿物沉积形成受浅 水蒸发效应控制。

河水、地下潜水和温泉水等淡水补给,其化学组

成和矿化度以温泉水最高,天然降水的矿化度 和含盐组分最低(表1)。在扎仓茶卡卤水中,

B₂O₃矿物质来源中地下水约占68.07%,地表

河水约为 29.32%, 而大气降水约为 2.61%^[47]。地下水尤其是温泉水盐分来源具

有陆相特征,这在元素运移主要载体水质上也 有充分的显示(表1),陆相成因的地热溶液是

形成硼矿资源的物源基础。

3.2 大柴旦盐湖

大柴旦盐湖是一个常年性水体,外观呈不 规则新月形,最大水深通常不足1m(图4);无 常年性河流入湖,湖水水位和水化学的变化受 控于周围众多山前冲积扇地表径流和地下潜流 补给,尤其受山区汇水盆地春季融水量和夏季 降水量的大小以及湖区蒸发量的控制。因此, 不同时间尺度上该盐湖水体的水量平衡决定了 它在不同时期的水化学特征和湖底沉积物的矿 物组合特征。

盐湖研究

第25卷

		表 2 扌	儿仓茶卡卤水水化	之学成分[50]			
	Table	2 Hydrochemica	l compositions of l	ake brine of Zhaca	ang Chaka	mg • L^{-1}	
化学	Ι	湖	П	湖	Ⅲ湖		
成分	湖表卤水	晶间卤水	湖表卤水	晶间卤水	湖表卤水	晶间卤水	
Na ⁺	1.06×10^{5}	4. 16×10^4	7.08×10^4	7. 13 $\times 10^4$	9. 40×10^4	8. 80 × 10^4	
K *	1.09×10^{4}	9.90 × 10^4	1.29×10^{4}	1.75×10^{4}	1.02×10^{4}	1.56×10^{4}	
Ca ² +	0.28×10^{3}	0. 19×10^{3}	0.27×10^{3}	0. 12×10^3	0.27×10^{3}	0.02×10^{3}	
Mg^{2+}	8. 37 $\times 10^3$	8. 53 × 10 3	9. 95 $\times 10^3$	1.28×10^{4}	8. 43×10^3	1.40×10^{4}	
Cl -	1.78×10^{5}	8. 56 × 10^4	1.51×10^{5}	1.45×10^{5}	1.69×10^{5}	1.72×10^{5}	
SO_4^2 -	3. 48×10^4	0. 43 $\times 10^{4}$	4. 21 × 10^4	1.55×10^{4}	2. 38 $\times 10^4$	2. 98 × 10 ⁴	
HCO_3^-	0.23×10^{3}	0. 46 $\times 10^3$	0.30×10^{3}	0. 36×10^3	0.25×10^{3}	0.29×10^{3}	
B_2O_3	1.37×10^{3}	1.99×10^{3}	1.87×10^{3}	2. 30×10^3	1.22×10^{3}	1.69×10^{3}	
Li ⁺	5. 25×10^2	5. 53 $\times 10^{2}$	6. 30×10^2	7. 80 × 10^2	8.00 × 10^2	1.21×10^{3}	
Rb^+	9.00	—	16.00	—	16.90		
Cs^+	1.80	—	3.80	—	4.40	—	
As ^{3 +}	3.15	—	2.60	—	1.70	—	



图 4 大柴旦盐湖湖表卤水的深度和硼含量等值线^[43] Fig. 4 Depth and boron content chorisogram of surface brine of Da Qaidam salt lake

大柴旦盐湖水体及地下卤水中的硼含量居 柴达木盆地各类盐湖之首,高达500~ 800 mg/L,是海水硼含量的110~180 倍。在大 柴旦盐湖东北距离湖区10 km的达肯大坂山南 麓,在花岗片麻岩的断裂破碎带中有一系列泉 水溢出带(图5),高含硼热泉水(>40 mg/L) 的长期汇入和强烈的蒸发浓集作用,造成了大 柴旦盐湖卤水的高硼含量。正是这种高硼卤水 的存在为该盐湖区固体硼矿的形成提供了基 础。

第1期



图 5 大柴旦北部山麓温泉沟含硼温泉水 Fig. 5 Boron-bearing thermal spring water from Wenquangou of northern Da Qaidam region

4 硼同位素地球化学特征

西藏自治区地勘局第五地质大队于 2011 年对扎仓茶卡硼矿石开展了硼同位素研究。研 究发现,硼矿石 δ^{11} B 值处在 - 29.06×10⁻³至 14.45×10⁻³之间,平均值为 - 3.95×10^{-3[47]}。 与此同时,对处于相同大地构造位置的聂尔错 盐湖(扎仓茶卡南侧)硼镁石开展的硼同位素 研究发现,硼矿石 δ^{11} B 值处在 - 29.06×10⁻³ 至 14.45×10⁻³之间,平均值为 - 7.69× 10^{-3[47]}。两者 δ^{11} B 值分布区间相同,硼源均属 陆相无疑。扎仓茶卡位于班公湖—怒江缝合 带,带内岩浆物质以及蚀变热液等提供了大量 含硼矿物,地下热水主要以泉的形式携带硼等 成矿元素组分迁移到地表进入湖盆。

对大柴旦盐湖及其外围水系的硼同位素组 成研究发现,盐湖卤水中的 δ^{11} B 值变化范围在 4.96×10⁻³至9.11×10⁻³之间,平均值为6.51 ×10^{-3[52]},比海水的硼同位素值(40.53× 10⁻³)低得多,硼源属陆相成因。

5 矿床地质特征和成矿条件

5.1 扎仓茶卡

扎仓茶卡硼矿床可以分为阶地硼矿和湖底

硼矿,阶地硼矿主要绕湖分布,呈水平似层状产 出,而湖底硼矿呈富集的窝状、透镜体或分散状 分布^[43]。阶地硼矿石以库水硼镁石以及库水 硼镁石—柱硼镁石为主,在表层有时含有钠硼 解石和柱硼镁石。湖底硼矿主要见于Ⅱ湖,硼 矿石以柱硼镁石和钠硼解石为主。柱硼镁石呈 不连续的透镜体和窝状集合体,其厚度在 0.1 ~1.0 m,该矿层呈灰色致密块体,生长于淤泥 或淤泥芒硝中。钠硼解石常见于湖滨地带,赋 存于石盐层或黑色淤泥中^[43]。显然,硼矿层是 在特定的水文地球化学条件和湖泊环境中形成 的。



图 6 大柴旦盐湖湖底胶结块状柱硼镁石矿层 Fig. 6 Cemented massive pinnoite deposit in subbottom of Da Qaidam salt lake

5.2 大柴旦盐湖

大柴旦盐湖东部湖滨地带出现钠硼解石, 湖底则为柱硼镁石矿层;另外,东北部的泉水溢 出区的湖沼地带盐泥坑中也见有零星分布的钠 硼解石。常年水体底部硼矿层以胶结块状柱硼 镁石为主,其平均厚度在70 cm 左右,埋深为 2~2.5 m。7 m 厚的盐湖沉积地层中只有两层 硼矿层,B₂O₃含量约为3%~16%,属于中低品 位硼矿层,主要分布在现代盐湖水体东部近岸 一带约10 km²的范围内(图6)。湖底柱硼镁石 矿层的主要特征表明,该硼矿层是特定盐湖环 境下形成的。

5.3 成矿条件

以大柴旦湖底特色柱硼镁石矿层为例,汇 水盆地山区地层中硼的克拉克值较高,尤其是 大量高硼含量热泉水汇入大柴旦盐湖后,在强 烈的蒸发作用下不断富集是形成该湖高硼含量 卤水资源的主要原因^[7,43]。此种高硼含量卤 水资源的形成与柴达木盆地盐湖卤水锂资源的 富集成矿和形成过程非常相似^[53-54]。湖底硼 矿层样品 XRD 分析数据表明,该矿层主要盐类 共生矿物组合为柱硼镁石 + 水菱镁矿 + 石盐。 石盐和水菱镁矿的大量沉积,说明当时气候较 为干旱。由此推断,湖底特色柱硼镁石硼矿层 的生成有其特定的条件。卤水硼含量经蒸发浓 集后升高,又遇干旱气候致使湖水变浅,在此背 景下入湖含硼泉水与富镁硼盐湖卤水发生稀释 掺杂,致使 CO₃²⁻水解产生 OH⁻,卤水呈弱碱 性—碱性,B₄O₇²⁻与 OH⁻反应生成 BO₂⁻。除部 分 Mg²⁺参与生成水菱镁矿,大部分则与偏硼酸 根(BO₂⁻)反应形成胶体状柱硼镁石,后经压实 逐渐形成致密块状柱硼镁石。

另据 XRD 分析结果,湖底硼矿层除柱硼镁 石以外,还有相当比例的碎屑矿物。由于碎屑 矿物是由地表径流带入盐湖,这从一个侧面提 供了含硼淡水稀释作用形成柱硼镁石的证据。 在大柴旦盐湖沉积剖面(DCD02 和 DCD03)的 薄层中都出现过柱硼镁石,说明只要出现前面 指出的水文地球化学条件和湖泊环境,随时都 可能沉积柱硼镁石矿层,这是因为在过去几千 年中没有在湖底沉积硼矿层,卤水中的硼含量 达到了最高。还需指出的是,通过研究大柴旦 湖底沉积剖面 DCD02 中的柱硼镁石、水菱镁矿 和石膏的相关性(图 7)发现,柱硼镁石矿层沉 积前期,石膏含量较高;柱硼镁石矿层沉积成矿 时,石膏含量相对较低,而水菱镁矿有一定的含 量。



图 7 柴达木盆地大柴旦盐湖柱硼镁石与水菱镁矿及石膏的相关性示意图 Fig. 7 The correlation between pinnoite and hydromagnesite, gypsum from Da Qaidam salt lake

6 成矿模式

封闭型或半封闭型汇水盆地和极度干旱的 气候条件,致使汇集于地形洼地的天然水体蒸 发浓缩,形成蒸发盐类化学沉积,而固体硼酸盐 矿物可以发生于蒸发盐类矿物沉积的各个阶 段。不同区域的汇水盆地在区域构造背景、区 域气候以及区域水文地球化学等方面存有一定 的差异性,使得区内盐湖在成盐演化和沉积矿 物组合特征上各不相同,但决定一个盐湖能否 形成硼酸盐矿床,除受构造背景和气候条件控 制外,成矿物质来源(特别是硼元素)和硼富集 过程中各种地质作用也是重要的控制因素。

扎仓茶卡和大柴旦盐湖都位于我国内陆青 藏高原高寒干旱盐湖区,远离海洋,大陆性气候 明显,加之巨大山系的屏障作用,区域气候极度 干旱。在如此的高山深盆成盐环境中,湖水水 位和水化学演化处在一个相对浅水的沉积环境,有利于盐湖成盐成硼。在构造位置上,扎仓 茶卡和大柴旦盐湖都为流域的尾闾湖,并且汇 水盆地都是封闭式的,有利于成矿元素硼的富 集。在物质源区补给规模上,大柴旦盐湖相比 扎仓茶卡盐湖,其补给水中硼含量要高得多,这 也使得大柴旦盐湖形成了规模相对巨大的硼矿 床(表3)。

	Table 3 The box	oron deposit compariso	n between Zhacang Chaka	and Da Qaidam	salt lake
矿床地点	水化学类型	主要硼矿物	矿体产状	储量/×104 t	工业价值
扎仓茶卡	硫酸镁亚型	库水硼镁石、 多水硼镁石、 柱硼镁石	似层状、局部呈窝状	137.6	综合性大型硼矿床
大柴旦盐湖	硫酸镁亚型	柱硼镁石、 钠硼解石	块状、鸡窝状、透镜体状	630. 0	综合性大型硼矿床

表3 扎仓茶卡与大柴旦盐湖硼矿床对照表

扎仓茶卡和大柴旦盐湖固体硼酸盐矿物的 形成无疑受控于硼自身内在地球化学特性及其 外在控制条件,构造运动除了控制扎仓茶卡和 大柴旦成盐盆地外,还控制着盐类成矿物质的 来源和盐类矿床的形成演化。伴随着新构造运 动的强烈发生和第四纪以来干旱气候的持续发 展,致使湖水不断蒸发浓缩,卤水中 B,O,不断 富集,在特定的水文地球化学条件和湖泊环境 中,在湖区的不同地带,由于不同的成矿作用机 理形成了不同的硼酸盐矿物或硼矿床。因此, 青藏高原盐湖硼酸盐矿床的形成是内外条件耦 合的结果,扎仓茶卡和大柴旦盐湖硼矿床成矿 模式为高山—深盆—浅水成矿模式(图8)。





7 结 论

扎仓茶卡和大柴旦盐湖同处在青藏高原高 寒干旱区,均为典型的高原内陆封闭盆地,在相 同或相似的外在控制条件下,两个盐湖在硼酸 盐成矿模式上表现出一定的相似性。不过,因 两个盐湖水化学特性的差异致使盐湖硼酸盐矿 物的种类和矿物组合特征等方面表现出一定的 差异性。

1)柱硼镁石硼矿层的生成有其特定的条件。卤水硼含量经蒸发浓集后升高,又遇干旱 气候致使湖水变浅,在此背景下入湖含硼泉水 与富镁硼盐湖卤水发生稀释掺杂,致使 CO_3^{-} 水 解产生 OH^- ,卤水呈弱碱性—碱性, $B_4O_7^{2-}$ 与 $OH^-反应生成 BO_2^{-}$ 。除部分 Mg^{2+} 参与生成水 菱镁矿,大部分则与偏硼酸根(BO_2^{-})反应形成 胶体状柱硼镁石,后经压实逐渐形成致密块状 柱硼镁石。

2) 扎仓茶卡和大柴旦盐湖固体硼酸盐矿 床的形成受控于硼自身内在地球化学特性以及 外在控制条件,特别是构造运动、第四纪以来的 干旱气候条件以及丰富的物源等控制因素,青 藏高原盐湖硼酸盐矿床的形成是内外条件耦合 的结果。通过开展不同地区盐湖硼矿床的对比 研究发现,青藏高原盐湖硼酸盐矿床成矿模式。

致谢:硼酸盐矿物的 XRD 分析由中国科学院青海盐湖研究所杨波老师和韩丽协助完成;审稿 专家对论文提出建设性意见,在此一并致以诚 挚谢意。

参考文献:

- [1] 郑绵平.论中国盐湖[J].矿床地质,2001,20(2): 181-189.
- [2] 袁见齐,霍承禹.青海察尔汗盐湖钾盐矿床成因的若干问题[J].地球科学,1981(1):207-213.
- [3] 袁见齐,霍承禹,蔡克勤.高山深盆的成盐环境——种新的成盐模式的剖析[J].地质评论,1983,29(2): 159-165.
- [4] 袁见齐,霍承禹,蔡克勤.干盐湖阶段的沉积特征兼论 钾盐矿层的形成[J].地球科学一武汉地质学院学报,

1985, 10(4):1-9.

- [5] 李润民.柴达木盆地察尔汗钾镁盐成矿地质条件[J].地 质评论,1983,29(3):262-268.
- [6] 吴必豪,段振豪,关玉华,等.柴达木盆地察尔汗干盐 湖钾镁盐的沉积[J].地质学报,1986,(3):286-296.
- [7] 张彭熹,陈克造,于升松.柴达木盆地盐湖[M].北京: 科学出版社,1987:92-151.
- [8] 孙大鹏, Lock D E. 柴达木盆地钾盐沉积的形成问题 [J]. 中国科学(B 辑), 1988, (12): 1323-1333.
- [9] Lowenstein T K, Spencer R J, Zhang P X. Origin of ancient potash evaporates: Clues from the modern nonmarine Qaidam Basin of Western China[J]. Science, 1989, 245: 1090 - 1092.
- [10] 许靖华, 钱作华, 连卫, 等. 中国察尔汗湖钾盐蒸发泵 成因[J]. 化工地质, 1991, (4):1-7.
- [11] 王弭力, 刘成林, 焦鹏程. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 1-342.
- [12] 王弭力,刘成林,焦鹏程.罗布泊盐湖钾盐矿床调查科研进展与开发现状[J].地质论评,2006,52(6):757-764.
- [13] 王弭力,刘成林,焦鹏程,等.罗布泊罗北凹地超大型 钾盐矿床特征及其开发前景[J].矿床地质,1998,17 (增刊):433-435.
- [14] 王弭力,刘成林,杨智琛,等.罗布泊罗北凹地特大型
 钾矿床特征及其成因初探[J].地质论评,1997,43
 (3):249.
- [15] 刘成林,陈永志,陈伟十,等.罗布泊盐湖更新世晚期 沉积钙芒硝包裹体特征及古气候意义探讨[J].矿物学 报,2006,26(1):94-98.
- [16] 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 等. 罗布泊断陷带内形成富 钾卤水机理研究[J]. 矿床地质, 2010, 29(4): 602 - 608.
- [17] 刘成林, 焦鹏程, 王弭力, 等. 罗布泊盐湖巨量钙芒硝 沉积及其成钾效应分析[J]. 矿床地质, 2007, 26(3): 322-329.
- [18] 刘成林, 焦鹏程, 王弭力, 等. 新疆罗布泊第四纪盐湖 上升流体及其成钾意义[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 386-392.
- [19] 刘成林,马黎春,焦鹏程,等.罗布泊盐湖化学沉积序
 列及其控制因素[J].矿床地质,2010,29(4):625-630.
- [20] 刘成林,王弭力.罗布泊第四纪沉积环境演化与成钾作用[J].地球学报—中国地质科学院院报,1999,2(增刊):264-270.
- [21] 刘成林,王弭力,焦鹏程.新疆罗布泊盐湖氢氧锶硫同 位素地球化学及钾矿成矿物质来源[J].矿床地质, 1999,18(3):268-275.
- [22] 刘成林,王弭力,焦鹏程,等.罗布泊第四纪卤水钾矿 储卤层孔隙成因与储集机制研究[J].地质论评,2002, 48(4):437-444.

- [23] 刘成林,王弭力,焦鹏程,等.罗布泊杂卤石沉积特征
 及成因机理探讨[J].矿床地质,2008,27(6):705-713.
- [24] Wang M, Liu C, Jiao P, et al. Minerogenic theory of the superlarge Lop Nur potash deposit, Xinjiang, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2005,79(1):53-65.
- [25] Wang M, Pu Qi, Liu C, et al. Quaternary climate and environment in the Lop Nur, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74(2): 273 278.
- [26] 焦鹏程,刘成林,王珥力,等.罗布泊盐湖钾盐矿床形成的地球化学研究[J].矿床地质,2006,25(增刊): 225-228.
- [27] Liu C, Wang M, Jiao P, et al. Features and formation mechanism of faults and potash-forming effect in the Lop Nur Salt Lake, Xinjiang, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(6): 936-943.
- [28] 马黎春,李保国,蒋平安,等.罗布泊"大耳朵"湖区钾 元素地球化学与富集机理[J].矿床地质,2010,29 (4):616-624.
- [29] 马黎春,刘成林,焦鹏程,等.新疆典型干盐湖成钾条
 件对比与指标模型初探[J].矿床地质,2010,29(4):
 593-601.
- [30] 孟贵祥, 严加永, 吕庆田, 等. 罗布泊盐湖盆地结构新 发现及找钾意义[J]. 矿床地质, 2010, 29(4): 609-615.
- [31] 赵元艺,李波涛,焦鹏程,等.青海别勒滩干盐湖石盐 流体包裹体均一温度分析及地质环境意义[J].矿床地 质,2010,29(4):684-696.
- [32] 宣之强, 焦鹏程, 刘成林, 等. 新疆罗布泊钾盐矿床成
 因类型探讨[J]. 化工矿产地质, 2011, 33(1): 21-26.
- [33] 曲懿华,谢先德,钱自强,等.章氏硼镁石——种新发现的含水镁硼酸盐矿物[J].地质学报,1964,44(3): 351-356.
- [34] 曲懿华,韩蔚田,钱自强,等.三方硼镁石——种新硼 酸盐矿物[J].地质学报,1965,45(3):298-305.
- [35] Alonso R N, Helvaci C, Sureda R J, et al. A new Tertiary borax deposit in the Andes [J]. Mineralium Deposita, 1988, 23: 299 – 305.
- [36] Bowser C J, Dickson F W, Rau J L. Chemical zonation of the borates of Kramer, California [C]//Second Symposium on Salt – V. 1, Geology, geochemistry, mining. Cleveland: Northern Ohio Geol. Soc. ,1966,122 – 132.
- [37] Garrett D E. Borates-Handbook of Deposits, Processing, Properties and Use[M]. San Diego: Academic Press, 1998: 1-483.

- [38] Helvaci C. A review of the mineralogy of the Turkish borate deposits[J]. Mercian Geol., 1978,6(4): 257 – 270.
- [39] Helvaci C, Yagmurlu F. Geological setting and economic potential of the lignite and evaporite-bearing Neogene basins of western Anatolia, Turkey[J]. Israel Journal of Earth Science, 1995, 44(2): 91 – 105.
- [40] Helvaci C, Orti F. Sedimentology and diagenesis of Miocene colemanite-ulexite deposits (western Anatolia, Turkey)
 [J]. Journal of Sedimentary Research, 1998, 68(5):1021 1033.
- [41] Palmer M R, Helvaci C. The boron isotope geochemistry of the Kirka borate deposit, western Turkey [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17):3599 - 3605.
- [42] Tanner L H. Borate formation in a perennial lacustrine setting: Miocene-Pliocene Furnace Creek Formation, Death Valley, California, USA[J]. Sedimentary Geology, 2002, (148): 259 – 273.
- [43] 郑绵平,向军,魏新俊,等.青藏高原盐湖[M].北京:北 京科学技术出版社,1989: 306-329.
- [44] 郑绵平,刘喜方.青藏高原盐湖水化学及其矿物组合特征[J].地质学报,2010,84(11):1585-1600.
- [45] 郑绵平,金文山. 我国某一个新类型硼酸盐矿床的初步 研究[J]. 中国地质,1964, (2): 24-30.
- [46] 郑绵平, 刘文高. 西藏发现富锂镁硼酸盐矿床[J]. 地质 评论, 1982, 28(3): 263-266.
- [47] 迟鹏, 胡广平, 张天平, 等. 扎仓茶卡盐湖硼矿富¹⁰B 矿 床特征及成因探讨[J]. 盐湖研究, 2013, 21(4): 21-28.
- [48] 高世扬,宋彭生,夏树屏,等.盐湖化学一新类型硼锂
 盐湖[M].北京:科学出版社,2007:340-381.
- [49] 杨谦.青海省柴达木盆地大、小柴旦盐湖矿床地质概况 [J].青海地质,1983,(3):38-63.
- [50] 郑喜玉. 西藏扎仓茶卡盐湖卤水硼、锂的分布特征[J]. 海洋与湖沼, 1982, 13(1): 26-34.
- [51] 郑喜玉, 唐渊, 徐昶, 等. 西藏盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1988:54-55.
- [52] 李俊周,孙大鹏.大柴达木盐湖硼同位素地球化学研究 [J].地球化学,1996,25(3):277-285.
- [53] 展大鹏,余俊清,高春亮,等.柴达木盆地四盐湖卤水 锂资源形成的水文地球化学条件[J].湖泊科学,2010, 22(5):783-792.
- [54] Yu J, Gao C, Cheng A, 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.

Minerogenetic Conditions and Pattern of Typical Salt Lake-type Borate Deposits on Qinghai-Tibetan Plateau

HONG Rong-chang 1,2,3 , GAO $\rm Chun-liang ^{1,2}$, YU $\rm Jun-qing ^{1,2}$, MIN $\rm Xiu-yun ^{1,3}$,

CHENG Ai-ying^{1,2}, ZHANG Li-sha^{1,2}, XU Hong⁴

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources,

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

2. Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment of Qinghai Province, Xining, 810008, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 4. Changshan County

Land and Resources Bureau, Changshan, 324200, China)

Abstract: The geological setting, climate conditions, regional hydrogeochemistry, isotope geochemistry and boron geochemical characteristics of typical borate deposit in Zhacang Chaka and Da Qaidam salt lake on Qinghai-Tibetan Plateau were presented. The results show that borate deposit of Zhacang Chaka and Da Qaidam salt lake controlled by its own inherent geochemical characteristics and external conditions, especially tectonic movement, arid climate since Quaternary period and abundant provenances, the formation of salt lake-type borate deposits on Qinghai-Tibetan Plateau are the results of coupled inherent and external conditions. Based on the study of minerogenetic conditions and pattern of borate deposits in Zhacang Chaka and Da Qaidam salt lake, we establish a minerogenetic pattern of borate deposits on Qinghai-Tibetan Plateau as a high mountain-deep basin-shallow water pattern.

Key words: Salt lake-type borate deposit; Minerogenetic condition; Minerogenetic pattern; Zhacang Chaka; Da Qaidam salt lake; Qinghai-Tibetan Plateau

《盐湖研究》征集合作办刊单位的启事

《盐湖研究》在各界朋友精心呵护下,如今已成长为颇具影响力的专业学术宣传交流平台,依据这一期刊平台为各类专业人员和机构赢得了应有的声誉,同时本刊也受到各级主管单位的认可。 为进一步拓展《盐湖研究》期刊学术宣传交流平台的作用,发挥期刊多年形成的品牌优势,创新办 刊模式,根据《期刊出版管理规定》及其他法律、法规的规定,在平等互利、协商一致的基础上,现面 向盐湖资源领域相关机构征集合作办刊单位,共同将这一期刊平台做大做强。合作可采取三种模 式:一般协办、理事协办和常务理事协办。《盐湖研究》编辑部根据不同模式提供相应价值的服务, 以协议方式确定双方权利责任,有意向的单位可以依据各自的需求灵活选择相应的合作模式;同时 本刊也诚邀相关企业、高校、科研院所在本刊刊登广告,本刊广告经营许可证号为:6300004000195, 联系电话:0971-6301683。

《盐湖研究》编辑部