扎仓茶卡盐湖硼矿富^{10}B矿床特征及成因探讨

迟 鹏,胡广平,张天平,余 超,陈晓深,李玉昌,
李 志,刘朝强,徐志忠,李 勇
(西藏自治区地勘局第五地质大队,青海 格尔木 816000)

摘 要:硼在自然界有两种稳定同位素^{11}B和^{10}B,天然丰度分别为80.22%和19.78%。^{10}B对具有强辐射能力的伽马射线具有良好的阻挡作用,^{10}B的热中子的吸收截面大,在多种领域均有广泛应用。扎仓茶卡盐湖沉积硼矿床^{10}B含量均值高于天然丰度值,富硼镁石矿石硼含量高,杂质少,属优质硼矿资源,具有特殊的社会经济价值,具备核用硼源加工供应基地的基本条件。在总结扎仓茶卡盐湖硼矿富^{10}B矿床特征的基础上,对硼的富集及其同位素分馏机理进行了必要探讨。

关键词:扎仓茶卡;盐湖硼矿;富^{10}B矿床
中图分类号:P597 文献标识码:A 文章编号:1008-858X(2013)04-0021-08

1 自然地理特征及区域地质背景

扎仓茶卡盐湖位于西藏自治区革吉县境内,地理坐标北纬32°30′~32°38′,东经82°10′~82°36′,湖面高程4 450 m。受大陆性季风控制,年平均气温-1℃以下,年降水量120 mm左右,蒸发量为2 200 mm。黑(那曲)—阿(狮泉河)公路东西向贯通本区,交通便利。

扎仓茶卡大地构造属班公湖—怒江缝合带西段,岩相以蛇绿混杂岩建造为主,断裂构造发育,并形成了一系列拗陷盆地,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钾成矿带。

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,气候旱化,湖水咸化,湖泊中出现了大量盐类化学沉积。在扎仓茶卡含盐沉积厚度约16 m。

扎仓茶卡由3个盐湖构成,总面积121.5 km^2;由东向西分别为Ⅰ湖、Ⅱ湖、Ⅲ湖,沿构造线呈NWW向展布,湖间为湖积阶地分隔。湖区出露侏罗系上统—白垩系,是第四系下的基岩;有燕山期花岗闪长岩和辉长辉绿岩侵入。含硼矿地层为全新世湖相沉积,为灰白色粘土(粘土质碳酸盐)—硼酸盐层,沿湖滨分布(图1)。

扎仓茶卡湖底沉积以Ⅱ湖研究程度较高。其中,晚更新世中、晚期为土黄—棕黄色含碳酸盐粘土、砂质粘土;全新世早、中期为黑色—蓝灰色灰泥(淤泥),以细分散粘土为主,并含碱土金属碳酸盐、可溶盐类和有机碳;全新世晚期为灰色—灰白色盐层,中、下部以芒硝为主,其次为菱镁矿等镁碳酸盐,顶部出现白色石盐层,近底部和上部近石盐层处见有硼酸盐层富集,按矿物含量可达10%~50%。

收稿日期:2013-05-13;修回日期:2013-07-20
基金项目:全国矿产资源潜力评价项目资助
作者简介:迟 鹏(1982-),男,工程师,主要从事地质找矿工作。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

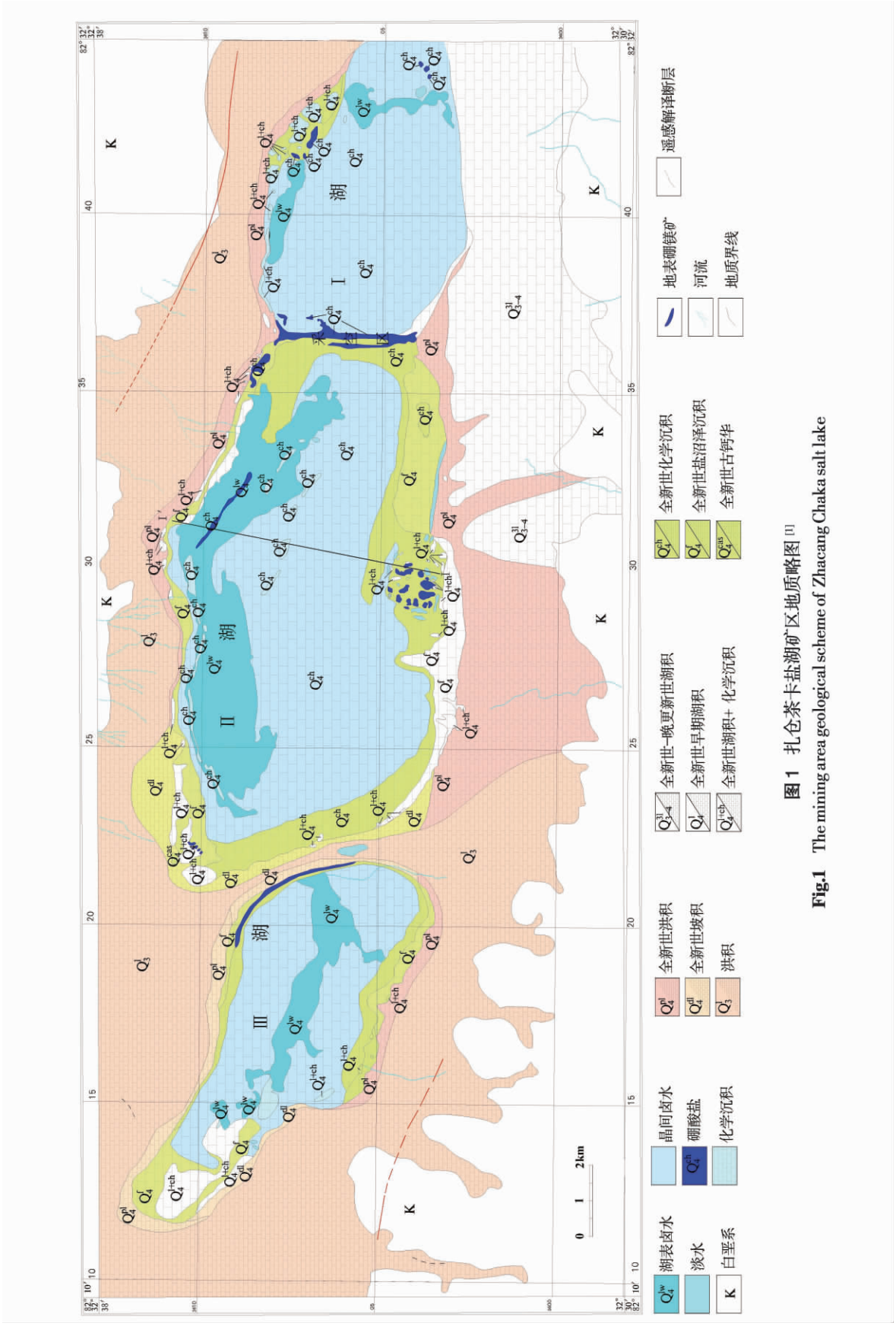

图 1 扎仓茶卡盐湖矿区地质略图 [1]

Fig.1 The mining area geological scheme of Zhacang Chaka salt lake

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　扎仓茶卡矿体特征

2.1　固体矿

固体盐类矿体包括全新世早期阶地和早、晚两期的湖底沉积两种型式。早期阶地盐类矿物主要为硼酸盐,含少量无水芒硝、石盐和石膏等,主要为含钠或钙的硼酸盐矿物,即库水硼镁石、柱硼镁石、多水硼镁石和钠硼解石等,并以库水硼镁石和柱硼镁石为主,因次生柱硼镁石比重的不同,显现出矿物组分、结构构造上的垂向变化。全新世早期形成硼酸盐矿层之后,晚期的硼酸盐矿物除多水硼镁石外,柱硼镁石在沉积层中呈不规则聚集体大量产出。

固体矿主要分布在Ⅰ湖、Ⅱ湖滨岸地带。Ⅰ湖有Ⅰ—Ⅰ、Ⅰ—Ⅱ两个矿体,Ⅱ湖有Ⅱ—Ⅰ、Ⅱ—Ⅱ、Ⅱ—Ⅲ和Ⅱ—Ⅳ4 个矿体。Ⅰ—Ⅰ矿体位于Ⅰ湖东北缘,Ⅰ—Ⅱ矿体位于Ⅰ湖东面湖滨,B_2O_3含量分别为 26 %、30.81%,硼同位素^{10}B平均丰度值分别为 20.09%、20.08%,现两个矿体已基本采完。

Ⅱ—Ⅰ矿体位于Ⅱ湖东侧,为致密坚硬的硼镁石,为富硼矿体,B_2O_3平均品位 28.43%,^{10}B丰度值平均 19.91%;走向近南北向,矿体长 3 ~ 4 km,宽 1 ~ 2 km,厚 0.49 m,矿体顶板主要为灰—灰黄色碳酸盐粘土,局部为 0.2 ~ 0.4 m 厚的石盐、芒硝层,底板为灰黑色淤泥,现正在开采利用。Ⅱ—Ⅱ矿体位于Ⅱ湖北缘,为灰白色硼镁石,东西断续延伸 1 ~ 2 km,厚约 0.38 m,B_2O_3含量 2.00% ~ 6.00%,目前无开采利用价值。Ⅱ—Ⅲ矿体位于Ⅱ湖北西部湖泥中,以硼镁石为主,B_2O_3平均为 26.60%,^{10}B平均丰度值 19.87%;东西长约 5 km,南北宽30 ~ 50 m,厚 0.37 m,该矿体分上下两层,已开采利用。Ⅱ—Ⅵ矿体分布于Ⅱ湖南部,以圆状聚积,面积约 1.5 km^2,矿体厚约 0.40 m,B_2O_3平均 27.00%,^{10}B丰度值平均 19.92%左右,该矿体中富矿已采完。

Ⅲ湖东侧湖滨矿体呈长条状分布,长约 4.5 km,宽 20 ~ 50 m,属于贫矿体,B_2O_3含量 1.5% ~ 5.0%,目前无实际开发利用价值。

2.2　液体矿

液体矿包括湖表卤水和晶间卤水,其主要组分为 Na^+、Mg^{2+}、K^+、Cl^-、SO_4^{2-},所占比重顺序 $Cl^- > Na^+ > SO_4^{2-} > Mg^{2+} > K^+$;晶间卤水含盐度是湖表卤水的 1.6 ~ 2.2 倍,硼是湖表卤水的 1.7 ~ 2.1 倍,锂、钾是湖表卤水的 2 倍左右。卤水水质变化,从 20 世纪 80 年代起较 20 世纪 60 年代已有较为明显的浓缩变化趋势(表 1),卤水中硼、锂、钾等元素组分含量数倍于工业品位要求,极具综合开发利用价值。

按照库尔纳科夫—瓦里亚什科分类法,扎仓茶卡属于硫酸盐型,Ⅰ湖、Ⅱ湖表卤水水化学类型为硫酸钠亚型,Ⅲ湖为硫酸镁亚型,3 个湖晶间卤水均为硫酸镁亚型。现扎仓茶卡已呈半干枯状态,化学盐类沉积发育。由于湖周淡水不断注入,湖表卤水大体由湖岸向中心含盐量递增,盐类物质在湖心地段相当富集(图 2)。

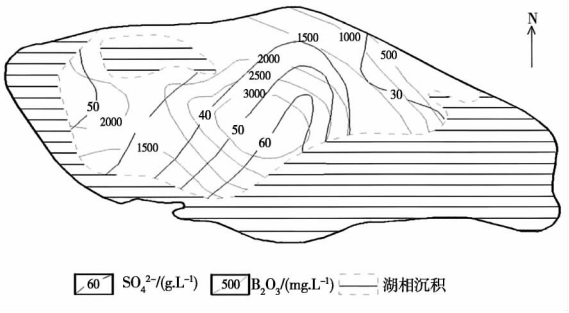

图 2　扎仓茶卡Ⅱ湖湖表卤水 SO_4^{2-}、B_2O_3 含量等值线图

Fig. 2　SO_4^{2-} and B_2O_3 chorisogram of Zhacang Chaka Ⅱ lake brine

扎仓茶卡卤水组分以富 B、Li、Cs 而贫 Br、I 为特征,各类元素(离子)与海水有明显不同(表 2)。其中,硼是海水富集的 16 倍,$B \times 10^3/Cl$系数为 13.26;锂是海水富集的 481 倍,$Li \times 10^3/Cl$ 系数为 5.44;钾是海水富集的 4.9 倍,$K \times 10^3/Cl$ 系数为 102.77;而 Br、I 仅为海水的 0.3 倍左右。扎仓茶卡卤水中,B_2O_3矿物质来源中地下水约占 68.07%,河水约 29.32%,大气降水约 2.61%;Li^+、K^+矿物质来源,地下水分别为 68.17%、81.75%,河水为 28.43%、10.16%,大气降水为 3.40%、

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

8.09%[2]。地下水尤其是温泉水盐分来源具陆相特征，这在元素运移主要载体水质上也有充分显示(表3)，陆相成因的地热溶液是形成硼、锂、钾等盐类矿产的物源基础。

表1 卤水化学特征

Table 1 Chemical characteristics of Zhacang Chaka salt lake brine mg/L

水类	取样时间	矿化度/(g·L^{-1})	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Li^+	B_2O_3	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}
地表卤水	1961年6月	111.92 (3)	41 433.3 (3)	6 299.3 (3)	7 693.3 (3)	131.3 (3)		1 116.4 (3)	31 746.3 (3)	21 733.3 (3)	683.3 (3)	1 003.3 (3)
	1992年8月	224.03 (3)	66 636.4 (3)	10 266.7 (3)	6 800.8 (3)	183.1 (3)	426.7 (3)	1 704.3 (3)	104 736.7 (3)	38 116.7 (3)	2 202.5 (2)	98 (1)
	2011年11月	226.61 (6)	65 831.5 (6)	10 070.8 (6)	65 832.1 (6)	294.3 (6)	457.8 (6)	1 532.4 (6)	115 559.1 (6)	26 357.6 (6)	0.0 (6)	0.0 (6)
晶间卤水	1961年8月	267.42 (9)	67 176.7 (9)	16 822.2 (9)	13 144.4 (9)	136.7 (9)		2 301.9 (9)	121 411.1 (9)	41 811.1 (9)	80 (9)	941.1 (9)
	1982年8月	351.58 (4)	90 186.3 (4)	20 035.0 (4)	15 545.5 (4)	111.2 (4)	893 (4)	2 611.2 (4)	162 625 (4)	57 232.5 (4)	1 989.8 (4)	

注：括号内为样品个数

表2 扎仓茶卡湖卤水与同浓度海水化学组分比较

Table 2 Chemical components comparison of Zhacang Chaka salt lake brine with equal concentration sea water

化学组分	海水平均含量/(mg·L^{-1})	II湖平均含量/(mg·L^{-1})	II湖卤水与海水同浓度比值	化学组分	海水平均含量/(mg/·L^{-1})	II湖平均含量/(mg/·L^{-1})	II湖卤水与海水同浓度比值
总盐度/(g·L^{-1})	35.98	296.91	0.899 4	K	390.64	15 848.57	4.917 7
Na	10 794.00	80 093.49	0.056 4	Mg	1 387.80	11 797.77	1.030 4
Ca	411.20	191.4	480.646 3	Rb	0.123 4	18.9	18.564 9
Li	0.174 8	693.14	1 584.718 8	Sr	8.224	2.398	0.035 3
Cs	0.000 514	6.72	189.836 1	U	0.003 084	0.017	0.668 2
As	0.003 084	4.83	0.112 0	CO_3^{2-}	6.168	98	1.925 9
Si	3.084	2.85	1.735 5	SO_4^{2-}	2 723.172	49 040	2.182 8
HCO_3^-	143.92	2 060.67	0.855 2	B_2O_3	152 263	2 046.18	16.289 0
Cl	19 532.00	137 807.14	0.338 4	I	0.061 68	0.167	0.328 2
Br	66.82	186.57	0.281 7	HPO_4^{2-}	0.222 98	15.54	8.447 6
F	1.336 4	3.106	0.000 2	NO_3^-	31.03	1.617	0.006 3
NO_2	23.0	0.029	1.000 3	Al	0.010 28	0.06	0.707 5
Fe	0.010 28	0,057	0.672 1	Ti	0.001 03	0.02	2.353 6
Mn	0.002 06	1.79	105.325 1	Ba	0.030 84	0.02	0.078 6
Be	0.000 000 6	0.002 5	505.050 5	Co	0.000 103	0	0
Cr	0.000 051 4	0.22	518.806 7	Cu	0.003 084		
Ga	0.000 030 8	0.12	472.255 0	Ni	0.002 06	0.23	13.533 4
Pb	0.000 030 8	0.04	157.418 3	Th	0.000 051 4	0	0
V	0.002 06	0.02	1.176 8	Zn	0.010 28		
La	0.000 010 3	0.05	588.408 4	Ce	0.000 005 1	0.21	4 991.087 3
Nd	0.000 002 8	0.108	4 675.324 7	Sm	0.000 000 45		
Gd	0.000 000 7	0.115	19 913.419 9	Dy	0.000 000 91	0.01	1 332.001 3
Y	0.000 308 4	0.047	18.472 7	Yb	0.000 000 82		
Sc	0.000 041 1	0.07	206.444 0	Bi	0.000 020 6	<0.003	
Cd	0.000 103	0	0	Mo	0.010 28	0.11	1.297 0
Nb	0.000 010 3	3.055	35 951.775 05	Ta	<0.000 002 5	0.01	
W	0.000 103	0.021	24.713 2	Sb	0.000 514	<0.002	
Sn	0.000 822	<0.003		Ge	0.000 061 7		
Zr	0,000 026	0.000 4	1.864 8	pH	8.2	9.07	

注：海水含量主要根据 Stower K S 的数据计算

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　扎仓茶卡地区不同水体的水化学成分和水化学类型特征

Table 3　Chemical components and types of different water bodies in Zhacang Chaka area　　mg/L

水类	地点	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Li^+	Rb^+	Cs^+	Cl^-	SO_4^{2-}
泉	湖边	245.4	66.5	50.87	31.3	0.2	–	0.06	494.3	157
温泉	湖边	868.5	165.55	36.73	127	0.85	0.27	0.15	253.5	287
河水		33.15	4.05	34.15	9.7	0.18	–	–	20.7	66
降水	湖区	5.6	0.8	1.7	0.8	0.01	–	–	1.7	2.2
水类	地点	CO_3^{2-}	HCO_3^-	B_2O	Br	I	F^-	P	水化学类型	
泉	湖 边	16	252.6	13.9	0.1	<0.1	–	–	重碳酸钙镁型	
温泉	湖边	53.9	146.5	25.6	5.55	<0.1	3.05	–	氯化钠型	
河 水		–	130.6	6.05	<0.1	<0.04	–	–	重碳酸硫酸钠钙镁型	
降 水	湖 区	–	22	0.24	–	–	–	–	重碳酸钠型	

3　矿石类型质量特征

扎仓茶卡盐湖硼酸盐沉积中,还含有少量的无水芒硝、石盐和石膏等,6 种含镁、钠或钙的硼酸盐矿物为柱硼镁石、库水硼镁石、多水硼镁石、钠硼解石、板硼石和硼砂等,柱水硼镁石和库水硼镁石是主要矿物。

表 4　扎仓茶卡部分硼镁石矿 B_2O_3、^{10}B 丰度值及矿石矿物含量一览表

Table 4　B_2O_3, ^{10}B abundance and mineral content of partial ascharite minerals in Zhacang Chaka area

分析结果 样品编号	B_2O_3 /%	^{10}B /%	矿物名称及含量
ZⅡ12JZK4 – H1	25.03	20.0	硼镁石 90%、石盐 4%、石英 1%、文石 5%
ZⅠ14JZK2 – H1	29.00	19.6	硼镁石 82%、石盐 3%、石英 2%、白云石 1%、白云母 12%
ZⅡ12ZK00 – H1	28.38	20.1	硼镁石 89%、文石 7%、石盐 3%
ZⅡ12ZK03 – H1	26.52	20.0	硼镁石 84%、石盐 1%
ZⅡ10JZK6 – H1	27.01	19.9	硼镁石 87%、文石 11%、石盐 1%、石英 1%
ZⅡLZK01 – H1	25.03	20.1	硼镁石 82%、石盐 3%、文石 8%、水菱镁矿 5%、方解石 1%
ZⅡ12JZK2 – H1	30.98	19.8	硼镁石 86%、石盐 1%、水菱镁矿 11%、石膏 2%
ZⅡ12JZK3 – H1	31.48	19.9	硼镁石 98%、石盐 2%、
ZⅡ12ZK03J – H1	32.22	20.1	硼镁石 96%、石盐 2%、石英 1%
ZⅡ12ZK05 – H1	33.21	20.1	硼镁石 88%、石盐 3%、石英 1%、石膏 8%
ZⅡ10JZK3J – H1	35.57	19.8	硼镁石 85%、石盐 4%、石英 1%、水菱镁矿 11%
ZⅡ12ZK02 – H1	30.73	19.7	硼镁石 85%、石盐 1%、石英 1%、文石 2%、水菱镁矿 10%
ZⅠ14JZK7 – H1	35.44	19.6	硼镁石 88%、石盐 5%、石英 1%、文石 2%、水菱镁矿 5%
ZⅡ10ZK00J – H1	32.47	20.1	硼镁石 91%、石盐 4%、石英 1%、文石 3%
ZⅠ14JZK4 – H1	15.61	20.2	硼镁石 50%、石膏 38%、石英%、石盐 7%
ZⅠ14JZK0 – H1	13.14	20.0	硼镁石 60%、石盐 11%、石英 4%、石膏 25%
ZⅡLZK05 – H1	2.35	20.1	文石 96%、方解石 4%
ZⅡLZK13J – H1	1.36	19.97	文石 86%、石英 4%、方解石 4%、石膏 6%

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

硼镁石矿石以致密块状、条带状结构为主，灰白色—纯白色，质地坚硬、性脆，B_2O_3含量一般为20%～36%；其次为稠密浸染状和层纹状，矿石中B_2O_3含量相差较大，一般在2%～30%之间。2011年^{10}B资源调查探明固体富硼镁石矿石资源量约4.20×10^6t，B_2O_3平均品位26.00%；硼镁石硼同位素^{10}B含量19.60%～20.30%（核工业北京地质研究院分析测试研究中心测试，表4），平均丰度值19.89%。同位素^{10}B的含量不随B_2O_3含量高低而变化，而与硼矿的矿物组合有一定的相关性，当硼矿的矿物组合为硼镁石＋石膏＋其它矿物时，其^{10}B的含量大多在20.0%以上；硼矿的矿物组合为硼镁石＋石盐或文石＋其它矿物时，其^{10}B的含量变化较大，变化区间在19.60%～20.20%之间，硫酸盐石膏的存在有利于硼酸盐中^{10}B的富集。

扎仓茶卡硼镁石矿中金属氧化物等杂质含量低，其中K_2O 0.07%～1.216%，Na_2O 0.914%～8.551%，CaO 0.201%～0.872%，MgO 0.403%～2.701%，SiO_2 0.032%～0.064%，Fe_2O_3含量0.0%～0.001%，Al_2O_3含量0%～0.004%，属易选矿石，有利于硼的提纯。

4 富^{10}B硼镁矿石的发现意义及^{10}B富集条件探讨

4.1 富^{10}B硼镁矿石的发现意义

2010年西藏自治区阿里兆源矿物科技开发中心对扎仓茶卡盐湖Ⅱ湖北岸矿区的硼矿进行了勘查，固体硼镁石同位素^{10}B的丰度值为19.97%～20.003%，高于硼同位素^{10}B的天然丰度19.78%[3]。2011年西藏自治区国土资源厅对扎仓茶卡盐湖^{10}B同位素资源进行调查，硼镁矿硼同位素^{10}B丰度值为19.60%～20.30%，平均19.89%，属于富^{10}B硼天然工业硼矿床。

硼深加工碳化硼粉末产品时，国际通用类型1标准硼同位素要求$^{10}B\geqslant19.6\%$，类型2标准$^{10}B\geqslant19.4\%$，扎仓茶卡^{10}B同位素平均丰度值大于国际^{10}B含量要求，且富硼镁石矿杂质含量低、纯度高、资源量大，可为我国特殊用硼源提供了资源保障，意义重大[4]。

4.2 ^{10}B富集条件探讨

a）自然界中硼同位素的分布特征　地壳中硼含量为0.001%，有两种稳定同位素^{11}B和^{10}B，天然丰度分别为80.22%和19.78%，$\delta^{11}B(‰)=[(^{11}B/^{10}B)_{样品}/(^{11}B/^{10}B)_{标准}-1]\times1\,000=4.051\,72\pm0.001\,15$。硼主要赋存于地球表层，尤其是海水、海相沉积物及海水交代岩石中，地壳及地幔含量甚微。已有研究资料表明，在非海相蒸发岩型矿物以及部分热液电气石中，$\delta^{11}B$较小常常表现为负值，而在一些与海相环境有关的地质体中，$\delta^{11}B$较大则常常表现为正值[5]。海水中$\delta^{11}B$值较大，并且比较稳定，其分布区间为38.678×10^{-3}～40.076×10^{-3}，平均39.5×10^{-3}；而陆源水中的$\delta^{11}B$值变化较大，分布范围-15.9×10^{-3}～17×10^{-3}。不同源区硼酸盐硼同位素组成变化显著，海相蒸发沉积硼酸盐$\delta^{11}B=18\times10^{-3}$～$32\times10^{-3}$，平均$25\times10^{-3}$，而非海相的蒸发沉积硼酸盐$\delta^{11}B=-31\times10^{-3}$～$10\times10^{-3}$，平均$-10\times10^{-3}$[6-7]。海底沉积物和大洋蚀变玄武岩的硼同位素组成也明显高于陆壳岩石，且分布区间窄；大陆热泉水及热泉沉积物中的硼同位素组成变化很大，与地热系统所处的大地构造位置、岩性特征及水岩作用有关。

b）盐湖和硼酸盐矿床中硼同位素的组成特征　硼作为一种成盐元素在盐湖卤水和盐湖沉积物中广泛分布。李俊周等[8]测定的柴达木盆地盐湖及外围水系$\delta^{11}B=4.96\times10^{-3}$～$9.11\times10^{-3}$，平均$6.51\times10^{-3}$，而盐湖沉积物的$\delta^{11}B=-17.78\times10^{-3}$～$2.94\times10^{-3}$；肖应凯等[9]测定的柴达木盆地中盐湖卤水的$\delta^{11}B=-6.1\times10^{-3}$～$31.4\times10^{-3}$，平均$9.6\times10^{-3}$；王庆忠等[10]研究大柴旦盐湖卤水的$\delta^{11}B=-13.0\times10^{-3}$～$16.3\times10^{-3}$，小柴旦盐湖卤水$\delta^{11}B=-12.2\times10^{-3}$～$23.0\times10^{-3}$，马海盐湖卤水$\delta^{11}B=-6.4\times10^{-3}$～$3.5\times10^{-3}$。这些研究结果表明盐湖硼源均属陆相来源，其$\delta^{11}B$值远小于海水及相应的海相沉积物。

2011年西藏自治区地勘局第五地质大队

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对扎仓茶卡盐湖硼同位素^{10}B开展调查,重点针对盐湖富硼矿石,并兼顾了贫矿矿石采集,测试分析了 110 件样品,硼矿石 $\delta^{11}B = -29.06 \times 10^{-3} \sim 14.45 \times 10^{-3}$,平均值 -3.95×10^{-3}。同时,对于处于相同大地构造位置的聂耳错盐湖(扎仓茶卡南侧)硼镁石矿石进行测试(10 件样品),$\delta^{11}B = -29.06 \times 10^{-3} \sim 14.45 \times 10^{-3}$,$\delta^{11}B$ 平均值 -7.69×10^{-3},两者 $\delta^{11}B$ 分布区间相同,硼源均属陆相无疑。硼矿的 $\delta^{11}B$ 值也与柴达木盆地盐湖盐类沉积矿物接近,这与卤水蒸发沉积硼同位素分异及硼源地质背景有关,均归于构造成因湖盆。扎仓茶卡位于班公湖—怒江缝合带中,带内岩浆物质及蚀变热液等提供了大量含 B 矿物,是硼同位素在此富集分馏的基础,地下热水主要以泉的形式携带 B 等成矿元素组分迁移到地表进入湖盆。

c) 富硼矿石硼同位素的分馏机理　硼源特征是控制硼同位素分馏诸多因素中的主要因素。在相同的硼源条件下,硼同位素的分馏受到水—岩交换反应的影响[11]。在封闭体系中,水溶液淋滤岩石中部分的硼,可大量富集^{11}B;在开放体系中,岩石中的硼被大量淋滤流失,$\delta^{11}B$ 值明显降低。在重熔、脱水反应中硼被大量排出,并优先排出重硼同位素,随着变质程度由低到高,岩石中硼含量及同位素组成 $\delta^{11}B$ 值由高变低。热液活动中硼同位素分馏主要由热液对岩石的淋滤和矿物的沉淀造成,以致 ^{10}B 在蚀变矿物中趋于较富,而^{11}B 在热水中则相对聚集。扎仓茶卡的 3 个盐湖明显呈带状排列,是班公湖—怒江板块缝合带中的次级盆地,出现有大量的水热活动,成为有利的成矿条件,是硼大量富集和同位素组成分馏的基础。

硼同位素分馏也受温度、压力的影响。温度增加和压力增大,分馏系数 α 相应减少。

通常硼在水溶液中,主要为三次配位的 $B(OH)_3$和四次配位的 $B(OH)_4^-$,其分布主要受 pH 值的控制。硼同位素的分馏受控于体系中 $B(OH)_3$和 $B(OH)_4^-$的相对含量,重同位素^{11}B主要富集在 $B(OH)_3$中,而轻同位素^{10}B 主要富集于 $B(OH)_4^-$中。当 pH < 7 时,溶液中以 $B(OH)_3$为主; 当 pH > 10 时,则以 $B(OH)_4^-$为主。扎仓茶卡盐湖卤水初期 pH 值明显呈碱性,卤水相对富集 $B(OH)_4^-$,这是形成富^{10}B硼酸盐等固体矿的化学基础。由于早期沉积时卤水硼浓度不高,形成不了富硼矿石,并常伴生芒硝,且底部有大量镁碳酸盐沉积,推测当时盐湖化学类型为硫酸钠亚型,这种固液动态平衡可降低环境中的 pH 值至弱碱性甚至到中性,卤水中硼 $B(OH)_4^-$含量也相应变低,硼酸盐硼同位素^{10}B 也随之波动减少; 中后期卤水中硼浓度较高,发生大量硼酸盐矿物沉积并共生芒硝,且底板含石膏,推测当时古湖水为硫酸钠—硫酸镁亚型水,为碱性环境无疑(现盐湖卤水 pH = 9.07),这一盐类沉积环境中 pH 值在碱性区间波动,控制着卤水中 $B(OH)_3$、$B(OH)_4^-$相对浓度,但总体相对富集 $B(OH)_4^-$,使得扎仓茶卡硼酸盐沉积富集硼同位素^{10}B。

以往有关$^{11}B/^{10}B$ 比值、硼同位素分馏以及固液相平衡的研究表明,在天然水溶液中,较轻的硼同位素^{10}B 优先进入粘土矿物中[12],由此推论这种沉积作用可使扎仓茶卡中 $B(OH)_4^-$被吸附进入固体矿物中,硼同位素进行了重新分配,并在适宜的碱性环境下相对富集 $B(OH)_4^-$离子,形成富^{10}B的固体盐类矿。

5　结论及存在的问题

扎仓茶卡盐湖固体硼矿床中硼镁石矿石硼同位素^{10}B 丰度均值为 19.89%,高于其自然丰度值 19.78%,属富^{10}B 盐湖硼矿床,且富硼矿石资源量大,杂质含量低,易于选矿加工,是优质的硼矿源提供地。

扎仓茶卡富^{10}B 盐湖硼矿床的形成源于所处班公湖—怒江缝合带西段特定的大地构造位置,水热活动输出的液体富含大量的硼及稀碱金属元素,B 元素在由热液输送至地表并进入湖盆过程中环境改变,经水—岩交换反应、吸附等地质作用及碱性环境条件下 $B(OH)_4^-$大量富集,最终使盐类固体矿物富集^{10}B,形成硼镁石富^{10}B 硼矿。其硼源是富^{10}B 盐湖硼矿床的形成的基础,盐湖卤水碱性环境是同位素分馏的主要控制条件。

扎仓茶卡盐湖卤水硼同位素的测试分析,轻、重 B 同位素组成的富集规律,富^{10}B 形成机

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

理均应进一步研究;班公湖—怒江缝合带地热系统热水中硼同位素的测试资料相对缺少,也有待继续开展调查。

致谢:本文在撰写中得到中科院青海盐湖研究所于升松研究员的指导,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 余超,胡广平,辛连福,等. 西藏自治区革吉县扎仓茶卡盐湖矿区富^{10}B资源调查报告[R]. 格尔木:西藏地勘局第五地质大队,2012.

[2] 郑绵平. 西藏自治区革吉县扎仓茶卡矿区盐湖硼矿详查报告[R]. 北京:地质矿产部地质研究所西藏盐湖调查队,1988.

[3] 张卫江. 富集硼10同位素的应用[C]. 天津:第四届中国核学会省市"三核"论坛,2007.

[4] 徐志忠,甘建辉,郗秋勇,等. 西藏自治区硼矿资源潜力评价成果报告[R]. 拉萨:西藏自治区地质调查院,2012.

[5] 祝朝辉,张乾,朱笑青,等. 中国SEDEX型矿床成矿流体硼、硅、氦-氩同位素组成研究评述[J]. 矿物岩石地球化学通报,2006,25(3):279-284.

[6] 肖应凯,肖军,赵志琦,等. 延庆杨户庄第四纪有孔虫的非海相生存环境硼和锶同位素证据[J]. 科学通报,2008,53(7):801-806.

[7] 黄思静,曾允孚. 四川成都盆地某深层富钾卤水的地球化学特征及成因[J]. 沉积学报,1997 15(3):67-71.

[8] 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.

[9] 肖应凯,Shirodkar P V,刘卫国,等. 青海柴达木盆地盐湖硼同位素地球化学研究[J]. 自然科学进展,1999,9(7):612-618.

[10] 王庆忠,肖应凯,张崇耿,等. 青海和西藏的某些天然硼酸盐矿物的硼同位素组成[J]. 矿物岩石地球化学通报,2001,20(4):364-366.

[11] 程家龙,赵永鑫,柳丰华. 硼同位素在矿床学中的应用研究[J]. 地质找矿论丛,2010,25(1):65-71.

[12] 孙爱德. 硼氯同位素化学及其同位素分馏的研究[D]. 西宁:中国科学院青海盐湖研究所博士学位论文,2004.

^{10}B-rich Deposit Features and Causes of Zhacang Chaka Salt Lake

CHI Peng, HU Guang-ping, ZHANG Tian-ping, YU Chao, CHEN Xiao-shen,
LI Yu-chang, LI Zhi, LIU Chao-qiang, XU Zhi-zhong, LI Yong
(*No.5 Brigade of Xizang Autonomous Region Geological Prospecting Bureau, Golmud*, 816000, *China*)

Abstract: Boron has two kinds of stable isotopes in nature, ^{11}B and ^{10}B, of which the natural abundances being 80.22% and 19.78%. With significant blocking function to strongly radioactive gamma-ray and bigger absorption cross-section of ^{10}B for thermal neutrons than other protective materials, boron has been widely used in industrial, equipment and medicine fields. The content of ^{10}B of the salt lake sedimentary boron ore in Zhacang Chaka area is much higher than the natural abundance boron. Containing high boron content and less impurity, rich-szaibelyite ore in Zhacang Chaka with particular social and economic value, belongs to high-quality boron ore resources and can be the processing supply base of special boron source. Based on the analysis of the ^{10}B-rich deposit features in Zhacang Chaka, this paper discusses the enrichment of boron and isotope fractionation mechanism.

Key words: Zhacang Chaka; Saline lake magnesium-borate minerals; ^{10}B-rich deposit

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net