文章编号：0258-7106（2023）02-0411-14 Doi: 10. 16111/j. 0258-7106. 2023. 02. 011

西藏麻米错富硼锂盐湖成矿物质平衡计算与物质来源*

郑 浩，赵海香**，谭红兵
(河海大学地球科学与工程学院，江苏 南京 211100)

摘 要 麻米错盐湖是西藏境内发育的特大型锂矿床之一，目前对该盐湖的Li、B来源仍存在一定争议。文章系统采集麻米错盐湖水及周边补给水体样品，分析其主量元素特征，并使用多种水化学手段进行讨论，同时对盐湖水、河水及地热水进行蒸发模拟。结果表明，研究区河水及泉水中的主要离子受控于流域内岩石风化作用，其中碳酸盐岩矿物与蒸发岩矿物贡献最大，其次是硅酸盐矿物。文章对补给水体输入盐湖的Li、B资源进行定量计算，得出单纯通过河水和泉水的输入无法形成盐湖目前的探明储量。选择西藏地区最为富Li的地热水同补给水体按照一定比例混合后进行蒸发模拟，发现其析盐序列与盐湖水的析盐序列存在很大程度上的重叠，以上均证明麻米错盐湖中的Li、B资源除受到周边河水及泉水的补给外，还受到地热水的补给。

关键词 地球化学；锂资源；水化学；物源；蒸发模拟；麻米错盐湖
中图分类号：P618.71 **文献标志码**：A

Calculation of ore-forming material balance and material source of Li-B rich brines in Mami Co Lake, Tibet

ZHENG Hao, ZHAO HaiXiang and TAN HongBing
(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China)

Abstract

Mami Co Salt Lake is one of the super-large lithium ore salt lakes developed in Tibet. However, there are still disputes about the sources of Li in this area. In this study, we systematically collected several samples from Mami Co Salt Lake water and surrounding recharge water bodies and analyzed major element characteristics. A variety of hydrochemical methods are used for discussion, and the salt evolution sequence of salt lake water, river water and geothermal water evaporation simulation process is studied at the same time. The results show that the main ions in the river water and spring water in the study area are controlled by the weathering of rocks in the basin, in which carbonate and evaporate minerals contribute the most, followed by silicate minerals. Through quantitative calculation of Li and B balance, we found that the current proved resource reserves of the salt lake cannot be reached only by the input of river water and spring water, indicating that there is another important recharge source of Li and B in Mami Co Salt Lake. Due to the strong hydrothermal activity in the northern Tibetan plateau where the salt lake is located during the geological history, geothermal water contributes to salt lake resources. We select the most Li-rich geothermal water in Tibet to mix with rivers and springs in the study area in a certain proportion, and simulate the evaporation process by PHREEQC software. It is found that there is big overlap in the aspect of evolution sequence between the mixed water body and salt lake water. The

http://www.kcdz.ac.cn/

* 本文得到国家自然科学基金项目（编号：41872074）资助
第一作者简介 郑 浩，男，1996年生，硕士研究生，研究方向为矿床地球化学。Email：1663688506@qq.com
** 通讯作者 赵海香，女，1983年生，博士，副研究员，主要从事岩石与矿床地球化学研究与教学工作。Email：zhaohx@hhu.edu.cn
收稿日期 2022-06-28；改回日期 2022-09-14。赵海杰编辑。

salt evolution sequence of the mixed water body composed of river water and spring water is very different from that of salt lake water. It shows that Mami Co Salt Lake in the study area is not only supplied by surrounding rivers and springs, but also by geothermal water.

Key words: geochemistry, lithium resources, hydrochemistry, source, evaporation simulation, Mami Co Salt Lake

自21世纪以来,环保问题以及新旧能源转换问题已成为全球热点,搭载新能源电池的交通工具以及新型环保材料得到快速发展,Li作为重要的能源金属,在全球的需求量不断增加,已成为中国的战略性矿产资源之一(郑绵平等,2016;刘成林等,2021;Kondo et al., 2022)。麻米错是西藏自治区锂资源量最大的盐湖,位于阿里地区改则县,卤水中氯化锂资源量达到250万t,超过已经开发的扎布耶盐湖,是世界少数几个锂资源量超过百万吨的盐湖之一(赵元艺,2013)。

麻米错盐湖大型矿产资源从发现到如今盐湖的即将开发,前人的工作主要集中于盐湖资源勘查及开发,但关于其所蕴藏的大型Li、B资源的来源问题仍存在争论,主要集中于古地热水、岩石风化和深部水岩反应等。连玉秋等(1994)最早认为麻米错盐湖主要成矿元素受到地热水的补给,将湖水和地热水中的B、Li、K等进行水化学系数对比发现两者接近,且在盐湖湖底发现较厚的钙华壳,以上证据都证明麻米错盐湖历史上有过强烈的水热活动且主要成矿元素受到地热水的补给。但后面的研究者却提出了不同的观点,李文娟(2015)对麻米错盐湖矿床及周边区域地质特征进行了详细的研究,认为盐湖的成矿元素主要来源于蚀源区的岩石风化和水解作用,提出了麻米错盐湖古大湖演化的环状湖盆成盐演化模式。迟鹏等(2016)根据前人研究对麻米错盐湖矿床成因及矿床特征进行分析,同样认为麻米错盐湖来源于本区的岩石在风化、剥蚀、搬运、淋滤水解的盐分,像B、Li等元素主要来源于地壳深部,其次是蚀源区岩性中元素的淋滤水解迁移。余石勇等(2022)首次对麻米错盐湖区域进行详细的水化学特征研究,认为河水和泉水主要离子来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化,盐湖中的成矿物质来源于岩石风化和深部水岩反应,以河水和泉水为运移介质补给盐湖。

综上所述,麻米错盐湖作为西藏地区目前锂资源量最大的盐湖,探讨其成矿物质来源问题对盐湖的系统性研究及对日后寻找同类型盐湖至关重要。因此,本研究将在前人工作的基础上综合利用水化学手段以及使用PHREEQC软件进行蒸发模拟,对麻米错盐湖的物源进行限定,以期查明盐湖Li、B来源,深入了解藏北地区富硼锂盐湖的形成机制。

1 麻米错盐湖区域地质概况

麻米错盐湖是西藏境内锂资源量最大的盐湖,位于阿里地区改则县麻米乡西北侧。地理坐标介于东经83°29'~83°35',北纬32°01'~32°11',湖面海拔高度4342 m,湖面面积约110.4 km^2,湖深2~5 m,整体外形呈人眼状孤立盐湖。

麻米错盐湖盆地范围内主要河流为冬隆藏布,干流全长65 km,常年补给麻米错盐湖,支流发育,发源于盐湖西南方向的隆格尔山脉。盐湖西南部泉眼众多,有多处冷泉溢出,形成泉集河汇入盐湖。研究区属高原亚寒带季风气候区,降雨集中在7、8月份,其余月份为旱季,降雨稀少(余石勇等,2022)。

麻米错盐湖构造单元位于冈底斯-念青唐古拉山板块和羌塘-三江复合板块缝合带(班公错-怒江缝合带)地区(图1a)。从构造位置看,它既是冈底斯北缘火山岩浆弧的弧后盆地,又是羌塘-三江复合板块南缘火山岩浆弧的弧后盆地,具有复合板块的特征,在形成演化过程中既与班公-怒江多岛洋盆的发展演化有关,也与雅鲁藏布江带的演化有关(李文娟,2015)。

麻米错盐湖地层属冈底斯-腾冲地层区的措勤-申扎地层分区(王冠,2010)。区内出露地层主要有石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系、新近系和第四系,其中白垩系在研究区内分布最广,其次是第四系(图1b)。白垩系主要为下白垩统多尼组(岩性主要为灰色-深灰色砂砾岩,含较多的灰岩夹层)、下白垩统郎山组(岩性主要为深灰色泥晶灰岩和厚层状微晶灰岩)和上白垩统竞柱山组(岩性主要为一套紫灰色、紫红色薄层-中层-厚层含砾砂

http://www.kcdz.ac.cn

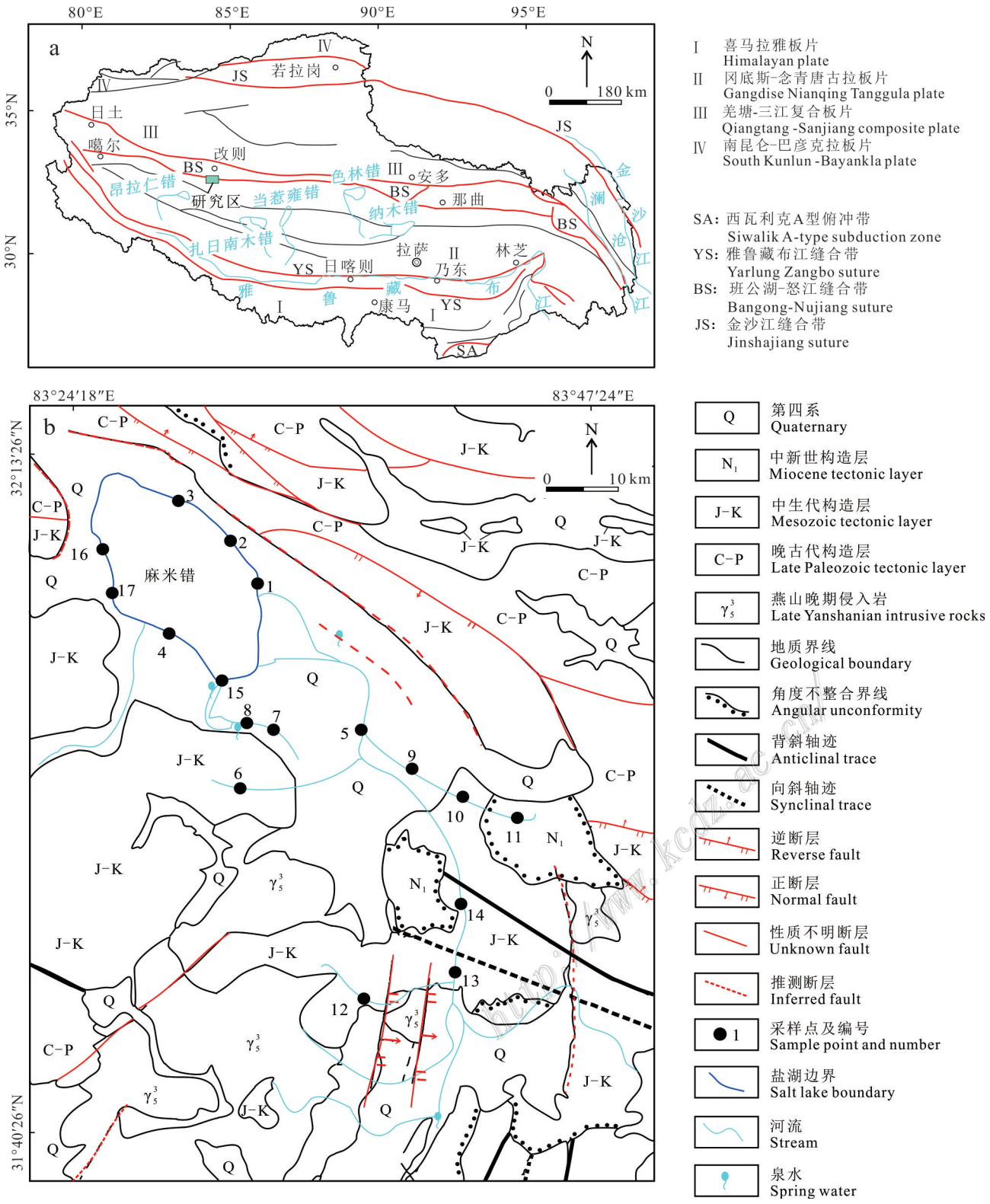

图 1　西藏构造简图(a)和麻米错盐湖区域地质简图(b)(据刘登忠等,2005;陈玉禄等,2005 修改)

Fig.1　Structural sketch of Tibet (a) and geological sketch of Mami Co Salt Lake area (b) (modified by Liu et al., 2005; Chen et al., 2005)

岩的碎屑岩组合)(王冠,2010)。第四纪沉积物广泛分布于河道和湖盆,主要由盐沼沉积、湖相化学沉积、湖相碎屑沉积、冲洪积和坡洪积组成(余石勇等,2022)。

2 样品采集、测试分析和模拟计算

2.1 样品采集及测试分析

研究者于2021年5月对麻米错盐湖盆地流域进行系统考察并采集了盐湖水、补给河水和泉水样品。水样均由在实验室预先清洗过的高密度聚乙烯窄口瓶收集。采样前，先用样品水体润洗3次，水样经0.45 μm醋酸纤维膜过滤，用于测定阳离子的样品酸化后密封保存，测定阴离子的样品直接密封保存，以备后续测试分析。本次研究共采集样品15件，具体采样位置见图1b。其中1~4为湖水样品，5~14为河水样品，15~17为泉水样品。

所有样品现场使用便携式多参数分析仪(PONSEL)测量水温、pH和TDS值，使用滴定法测定HCO_3^-(误差±0.2%以内)。阴离子(Cl^-、SO_4^{2-})浓度测定采用离子色谱仪(ICS-2000)；阳离子(Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+)浓度采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES，Thermo iCAP6300)测定，Li^+和B^{3+}浓度稀释后采用ICP-MS测定，误差<5%。

2.2 蒸发模拟

PHREEQC软件是由美国地调局研发的一款可以用来计算多种低温水文地球化学反应的软件，内置Pitzer模型数据库，非常适合盐湖卤水这种高离子强度水盐体系计算(Liu et al., 2002; 2004；Parkhurst et al., 2013)。

本研究利用PHREEQC软件对研究区水体进行蒸发模拟，根据矿物析出的先后顺序，对比各水体之间的析盐序列，以此来研究麻米错盐湖Li、B来源问题。

3 结 果

3.1 主量离子组成特征

麻米错盐湖水、河水及泉水水化学组成见表1。麻米错盐湖水的pH范围在8.71~8.90，属于弱碱性水，溶解性总固体(TDS)范围为96.80~106.70 g/L，平均值为100.12 g/L。与世界河水平均矿化度(0.12 g/L)相比，河水样品TDS(0.13~0.62 g/L)普遍较高。盐湖西南部泉水发育，泉水样品pH范围为8.32~9.10，TDS范围为0.28~0.67 g/L，同样高于世界河水

表1 麻米错盐湖及周边水体水化学成分表(ρ(B)/mg/L)

Table 1 Hydrochemical compositions (ρ(B)/mg/L) of Mami Co Salt Lake and surrounding water

点号	类型	pH	TDS	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Li^+	B^{3+}
1	湖水	8.73	97.92	24906.97	4567.00	2739.42	209.66	51631.22	13438.84	1153.49	617.02	412.15
2		8.71	99.04	26030.36	4749.75	2846.36	215.40	62028.85	12998.50	1113.19	612.63	360.32
3*		8.90	106.70	30200.00	5600.00	3390.00	233.00	53100.00	14100.00	67.00	740.00	448.15
4*		8.90	96.80	27200.00	5190.00	3120.00	232.00	48100.00	12700.00	104.00	680.00	398.15
平均值		8.81	100.12	27084.33	5026.69	3023.95	222.52	53715.02	13309.34	609.42	662.42	404.69
5	河水	9.73	0.62	61.72	8.87	16.91	42.30	66.07	43.20	240.87	1.97	3.65
6		9.58	0.18	5.90	1.00	2.80	36.85	3.81	20.67	96.68	0.02	0.19
7		9.84	0.13	4.84	0.84	2.56	26.07	3.52	14.55	81.82	0.03	0.13
8		9.47	0.27	27.38	6.91	8.28	32.37	15.17	23.95	136.34	0.41	0.72
9*		8.18	0.19	9.50	1.40	13.10	45.90	6.66	22.30	181.00	0.03	0.26
10*		8.10	0.25	3.90	0.93	7.91	52.00	3.10	24.80	159.00	0.01	0.12
11*		8.05	0.17	6.13	0.94	9.00	49.40	3.41	16.90	179.00	0.004	0.16
12*		7.77	0.16	2.83	5.20	7.10	41.30	2.01	65.70	79.60	0.0044	0.07
13*		8.01	0.33	61.20	12.10	10.40	44.80	87.10	44.40	157.00	1.63	7.27
14*		8.36	0.21	34.70	6.20	14.40	50.00	36.50	40.20	196.00	0.47	3.20
平均值		8.71	0.25	21.81	4.44	9.25	42.10	22.74	31.67	150.73	0.46	1.58
15	泉水	9.10	0.28	24.21	4.06	7.93	20.47	12.06	22.86	125.51	0.50	0.94
16*		8.32	0.45	89.10	12.20	29.70	39.10	88.60	91.60	223.00	1.18	3.42
17*		8.34	0.67	164.00	20.80	30.20	41.70	228.00	121.00	206.00	2.85	5.25
平均值		8.59	0.47	92.44	12.35	22.61	33.76	109.55	78.49	184.84	1.51	3.20

注："*"表示数据来源于余石勇等，2022；TDS单位为"g/L"。

http://www.kcdz.ac.cn/

平均TDS,现场测量泉水温度低于10℃。

盐湖水阳离子中Na^+为优势离子,其次为K^+;阴离子中Cl^-为优势离子,其次为SO_4^{2-},其主要离子含量顺序为$Cl^- > Na^+ > SO_4^{2-} > K^+ > Mg^{2+} > HCO_3^- > Ca^{2+}$。河水主要阳离子为$Ca^{2+}$,其次为$Na^+$;主要阴离子为$HCO_3^-$,其次为$SO_4^{2-}$,主要离子含量顺序为$HCO_3^- > Ca^{2+} > SO_4^{2-} > Cl^- > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$。本次采样的泉水样品主要阳离子为$Na^+$,主要阴离子为$HCO_3^-$,主要离子含量顺序为$HCO_3^- > Cl^- > Na^+ > SO_4^{2-} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$。

总体而言,随着蒸发浓缩过程的进行,盐湖水的主要离子浓度远远高于河水与泉水。河水样品从上游到下游离子含量有增加的趋势。泉水样品的各离子含量与河水样品相比略大。

3.2　Li、B离子特征

麻米错盐湖水样品平均$\rho(Li^+)$为614.83 mg/L,平均$\rho(B^{3+})$为386.24 mg/L;河水平均$\rho(Li^+)$为0.61 mg/L,平均$\rho(B^{3+})$为1.17 mg/L;泉水的平均$\rho(Li^+)$为1.51 mg/L,平均$\rho(Li^+)$为3.20 mg/L。

由图2可知,麻米错盐湖中的$\rho(Li^+)$与藏北其他主要盐湖相比浓度最高,$\rho(B^{3+})$也比较高。泉水样品$\rho(Li^+)$、$\rho(Li^+)$浓度高于河流样品,两者均高于世界河水平均的$\rho(Li^+)$、$\rho(B^{3+})$(其中$\rho(Li^+)$约为0.002~0.023 mg/L,$\rho(B^{3+})$约为0.001~0.201 mg/L),同样高于同处西藏地区的20条河流平均的$\rho(Li^+)$、$\rho(B^{3+})$(其中$\rho(Li^+)$约为0.211 mg/L,$\rho(B^{3+})$约为1.09 mg/L)(张燕飞,2016;张湘如,2020)。

4　讨　论

4.1　水化学类型

从图3可以看出麻米错盐湖水样品主要集中于阴阳离子三角图右下角,阳离子中Na^++K^+占比超过80%,阴离子中Cl^-占比超过80%,远远超过河水和泉水的样品浓度,受到蒸发浓缩作用的强烈影响,Na^+、Cl^-是湖水的主要离子。根据库尔纳可夫-瓦良什科分类法(Valyashko,1955)将盐湖水分为碳酸盐型、硫酸盐型(硫酸镁亚型和硫酸钠亚型)、氯化物型,经计

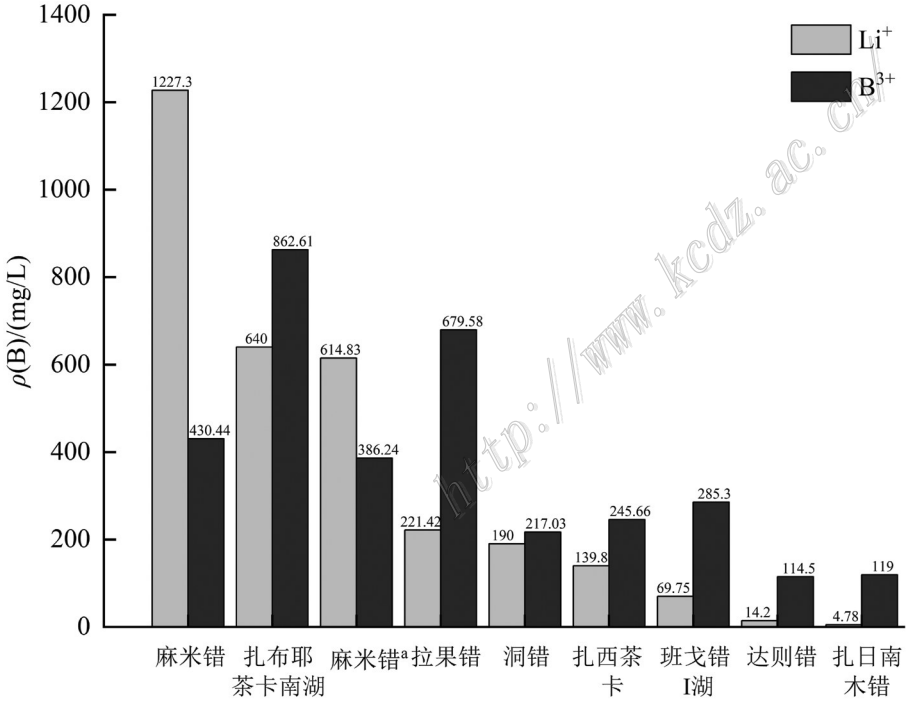

图2　麻米错盐湖与藏北主要盐湖硼锂离子浓度对比图

(麻米错a为本次采集的样品;扎布耶茶卡南湖数据引自王玉凤(2015);拉果错盐湖数据为本次采样;其余盐湖数据引自郑喜玉等,2002)

Fig. 2　Comparison of boron and lithium ion concentrations between Mami Co Salt Lake and major salt lakes in northern Tibet

(Mami Co^a is the sample collected in this paper; The data of Zabuyechakanan lake is quoted from Wang (2015); The data of Lago Co Salt Lake is from this sampling; Other salt lake data are quoted from Zheng et al.(2002)

http://www.kcdz.ac.cn/

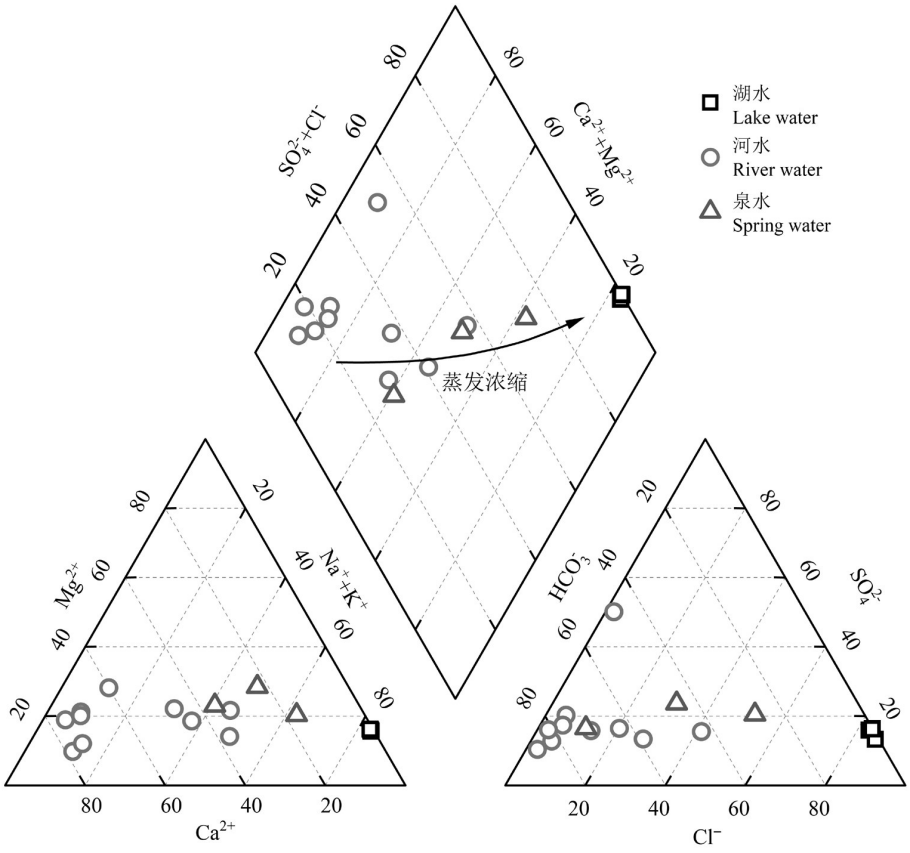

图3 麻米错盐湖水体样品三线图

Fig. 3 Three line diagram of Mami Co Salt Lake water sample

算得出麻米错盐湖为硫酸钠亚型(见表2)。

河水样品分布比较分散,大部分靠近湖岸的河水样品中Ca^{2+}与HCO_3^-占比高(图3),约为60%~80%,可能流经的区域主要为碳酸盐岩区;远离湖岸的样品Ca^{2+}和SO_4^{2-}占比较高,可能主要受碳酸盐矿物和蒸发岩溶解的影响;样品从远离湖岸到靠近湖岸,水化学类型从HCO_3^--Ca^{2+}型到HCO_3^--Na^+型变化,说明受蒸发岩和硅酸盐矿物风化的影响增大。

泉水样品主要落在阴阳离子三角图的中部(图3),补给小河流的泉水样品相较于其他样品Ca^{2+}、HCO_3^-占比高,其余样品Na^++K^+与HCO_3^-占比较大,认为受蒸发岩和碳酸盐矿物风化溶解作用影响较大,主要水化学类型为HCO_3^-(Cl^-)-Na^+(Ca^{2+})型。在中间菱形图(图3)中可以看出泉水与河水样品有部分重叠,且总体上泉水离子含量大于河水,说明河水受到泉水一定量的补给。

表2 麻米错盐湖水化学类型

Table 2 Hydrochemical types of Mami Co Salt Lake

样品	特征系数				水化学类型
	Kn1	Kn2	Kn3	Kn4	
1	0.080	1.267	28.551	1.807	硫酸钠亚型
2	0.074	1.179	26.876	1.697	硫酸钠亚型
3	0.080	1.014	25.344	2.001	硫酸钠亚型
4	0.095	0.992	22.987	2.208	硫酸钠亚型

4.2 离子来源分析

Pearson相关性分析对于讨论水体离子之间的相关程度起着重要的作用(Şehnaz et al., 2020)。表3列出河水及泉水各离子相关性系数。在河水样品中,TDS与Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、HCO_3^-、Li^+呈现出显著相关性,说明这5种离子主要控制河水的矿化度;Na^+、K^+、Cl^-与Li^+、B^{3+}都有极高的相关性,说明Li^+、B^{3+}与这3种离子来源相似;Mg^{2+}与HCO_3^-的相关系数为0.909($p<0.01$)相关性极其显著,说明Mg^{2+}受碳酸盐矿物的影响较大。在泉水样品中Na^+、K^+与TDS相关性显著,说明这2种离子主要控制泉水的矿化度;Li^+、B^{3+}与Cl^-显著相关(相关系数分别为0.997、0.968,$p<0.05$),说明泉水中的Li^+、B^{3+}可能来源于蒸

http://www.kcdz.ac.cn/

表 3　河水和泉水离子相关性系数

Table 3　Ion correlation coefficients of river water and spring water

参数	类型	TDS	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Li^+	B^{3+}
TDS		1									
Na^+		0.804**	1								
K^+		0.631	0.904**	1							
Mg^{2+}		0.655*	0.660*	0.52	1						
Ca^{2+}	河水	0.122	0.111	0.05	0.569	1					
Cl^-		0.720*	0.969**	0.894**	0.583	0.172	1				
SO_4^{2-}		0.304	0.386	0.637*	0.359	0.227	0.426	1			
HCO_3^-		0.680*	0.608	0.341	0.909**	0.608	0.528	0.028	1		
Li^+		0.888**	0.966**	0.854**	0.611	0.077	0.949**	0.407	0.579	1	
B^{3+}		0.556	0.909**	0.873**	0.502	0.217	0.975**	0.424	0.437	0.858**	1
TDS		1									
Na^+		1.000*	1								
K^+		0.998*	1.000*	1							
Mg^{2+}		0.839	0.855	0.868	1						
Ca^{2+}	泉水	0.886	0.899	0.91	0.996	1					
Cl^-		0.996	0.992	0.989	0.784	0.838	1				
SO_4^{2-}		0.955	0.964	0.971	0.962	0.983	0.923	1			
HCO_3^-		0.725	0.746	0.763	0.983	0.962	0.657	0.896	1		
Li^+		0.986	0.981	0.975	0.737	0.796	0.997*	0.893	0.601	1	
B^{3+}		0.988	0.992	0.995	0.914	0.947	0.968*	0.99	0.824	0.948	1

注:“*”表示p<0.05;“**”表示p<0.01。

发岩的溶解。

利用Gibbs图可以直观反映麻米错盐湖水化学演化主要受到哪种作用类型的控制(Gibbs,1970; 沈回归等,2022)。由图4a、b可以看出,蒸发结晶作用主要影响麻米错盐湖水样品;河水大部分样品落在岩石风化区域内,反映了河水中的离子组分主要来源于流域内岩石风化作用;泉水样品主要落在$Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$虚线外,水中Na^+含量大于Ca^{2+},说明泉水的主要组分除受水岩作用外还受到其他作用的影响。

在研究自然界水体组分来源时,讨论各组分的含量及比例关系能更好地帮助我们了解水体溶解物质的可能来源(李玉龙等,2021)。尽管麻米错盐湖东南方向有麻米乡和2个村庄,人员较多,但相对来说工业少,对环境影响较小,因此溶解物质来源于人类活动的部分可以忽略。在排除人类活动的影响下,研究区水体中主要组分来源于岩石风化作用的贡献,根据地球化学组成的差异,通常可以将溶解物质分为硅酸盐矿物、碳酸盐矿物和蒸发岩溶解(张文杰,2016; Zhang et al., 2019)。下面笔者通过讨论各离子组分的比例关系定性地分析离子的来源。

对于水体中的Cl^-来说,在没有其他氯化物型水体输入的情况下,主要由蒸发岩风化淋滤输入;而Na^+来源相对复杂,既有蒸发岩的淋滤溶解,也存在硅酸盐矿物的输入。由图5a中可以看出河水与泉水样品全部落在靠近$\gamma(Na^+)/\gamma(Cl^-)$比为1∶1的线上方,而且表现出极好的相关性(河水$R^2$=0.972;泉水$R^2$=0.999),说明水体中的$Na^+$主要来源是蒸发岩的溶解,但也有硅酸盐矿物溶解的输入。

图5b中$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^- + SO_4^{2-})$比值变化显示,河水和泉水大部分样品落在1∶1线上和线下附近,而且也表现出良好的线性关系,指示河流在向盐湖补给过程中有着石膏的溶解。由于样品点多数落在1∶1线下,说明SO_4^{2-}除了石膏溶解输入外,还存在其他矿物的溶解。由于在风化过程中硅酸盐矿物几乎不提供明显的SO_4^{2-},说明河流中的SO_4^{2-}存在芒硝($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$)的溶解输入。

在风化过程中HCO_3^-主要由大气CO_2参与矿物溶解形成,一般在硅酸盐类风化为主的地区HCO_3^-含量较低,但是以碳酸盐类为主的地区HCO_3^-含量则很高;前面讨论了研究区水体中阴离子主要以HCO_3^-为主,说明水体中的HCO_3^-主要是碳酸盐矿物

http://www.dzkx.ac.cn/

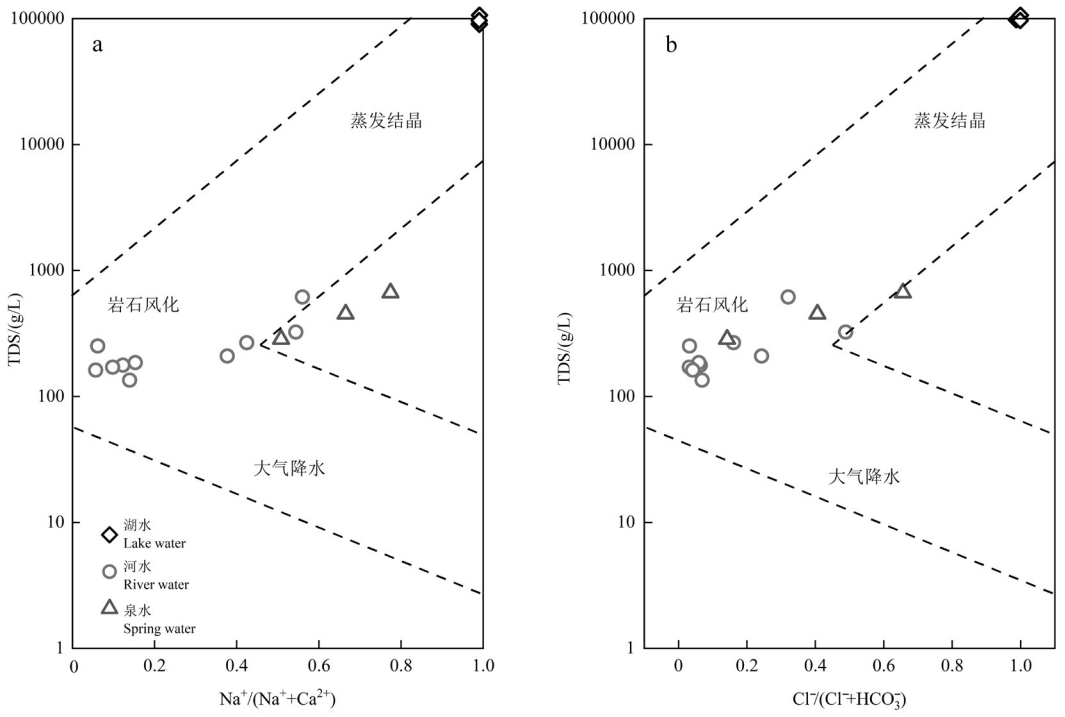

图4 麻米错盐湖水体样品Gibbs图

Fig. 4 Gibbs diagram of Mami Co Salt Lake water sample

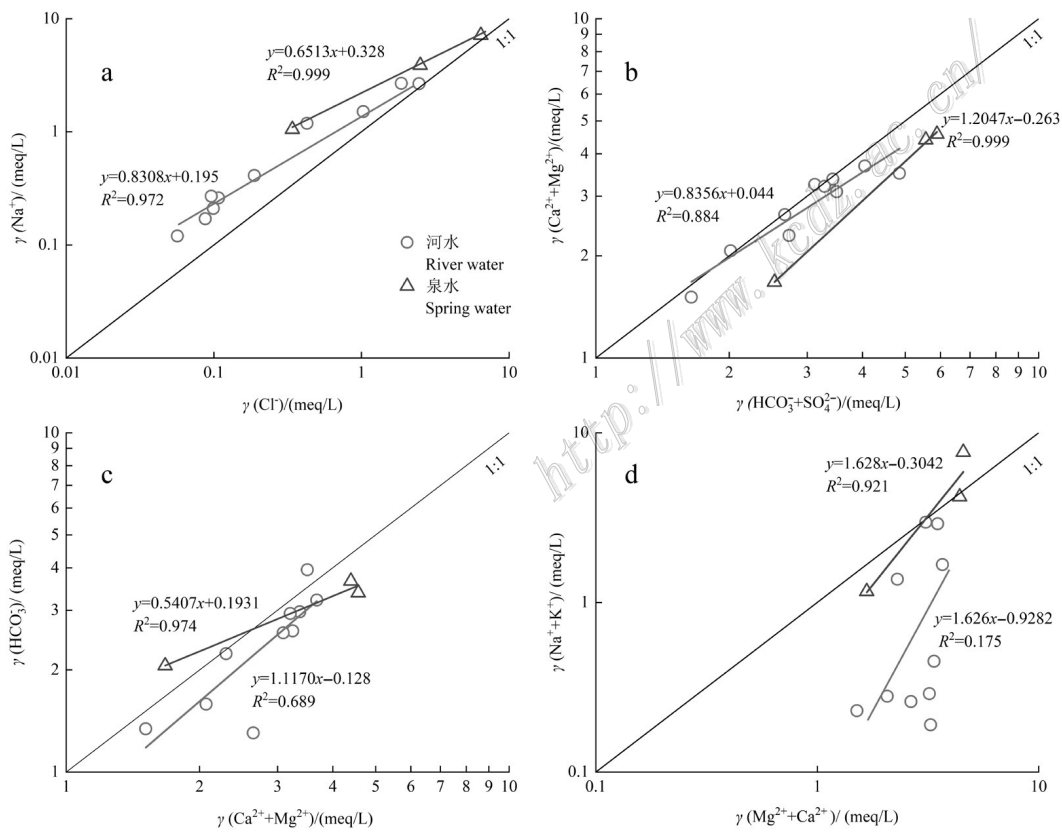

图5 麻米错盐湖水体主要离子对比图(a~d)

Fig. 5 Comparison of main ions in water body from Mami Co Salt Lake (a~d)

风化的结果。碳酸盐矿物的风化是Ca^{2+}、Mg^{2+}的主要来源之一,但是除了碳酸盐矿物外,还有硅酸盐矿物风化的贡献。图5c比值关系图显示河水与泉水大部分样品落在1∶1线下附近,泉水有部分样品落在1∶1线上,河水样品的相关性一般,说明碳酸盐和硅酸盐风化溶解都对河水中的Ca^{2+}、Mg^{2+}有显著作用。

河水中的K^+主要是由硅酸盐矿物的溶解提供,图5d中纵坐标$\gamma(Na^++K^+)$表示水体中硅酸盐矿物风化的贡献,横坐标表示碳酸盐矿物与硅酸盐矿物的共同贡献,图5d中泉水样品显示较好的相关性,说明硅酸盐矿物提供了泉水中主要的Na^+和K^+,碳酸盐矿物和硅酸盐矿物共同提供了Ca^{2+}和Mg^{2+};河水样品显示出较差的相关性,说明硅酸盐矿物的溶解不是河水中Na^+、K^+主要来源,大部分河水样品落在1∶1线下,说明硅酸盐矿物也提供了部分Na^+,碳酸盐矿物主要提供了河水中的Ca^{2+}、Mg^{2+}。

4.3　主要离子来源计算

通过以上分析表明,研究区流域内不同岩石风化类型对水体溶解质具有明显的影响,即使处于同一流域内,岩石类型的变化直接决定了河水与泉水的水化学组分。因此,对研究区流域内的水体岩石风化进行定量化的研究,进而确定水体中不同来源的溶解物质的贡献比率尤为关键。

根据碳酸盐矿物、硅酸盐矿物、蒸发岩风化过程对河流离子的贡献关系计算,得出研究区河水中主要离子来自硅酸盐矿物的风化比例介于7.2%~61.5%,平均约为22.7%;来自碳酸盐矿物的风化比例介于19.4%~78.6%,平均约为56.6%;来自蒸发盐矿物的比例介于14.2%~64.6%,平均值约为34.8%。泉水中主要离子来自硅酸盐矿物的风化比例介于20.0%~72.2%,平均约为46.5%;来自碳酸盐矿物的风化比例介于1.8%~26.7%,平均约为15.4%;来自蒸发盐矿物的比例介于28.7%~94.8%之间,平均值约为65.1%。由此可见,研究区河水中的主要离子来源于碳酸盐矿物,其次为蒸发岩和硅酸盐矿物的风化,从上游到下游硅酸盐矿物和碳酸盐矿物风化的贡献比例逐渐增加,蒸发岩风化的贡献比例逐渐减小;泉水中的主要离子来源于蒸发岩和硅酸盐矿物的风化,碳酸盐矿物风化贡献较少。

4.4　水体输入盐湖的硼锂资源量计算

研究区的河流与泉水样品中的Li、B含量普遍较高。图6为研究区补给水体样品$c(Li)$-$c(Cl^-)$、$c(B^{3+})$-$c(Cl)$关系图,从图6a、b中可以看出河水与泉水样品中的Li^+-Cl^-、B^{3+}-Cl^-的相关性都很显著,之前讨论中Na^+与Cl显示出明显正相关,说明河水中的Li、B来源与Na^+、Cl^-离子来源有关,所以水体中的Li、B来源很可能是河水淋滤蒸发岩获得。泉水样品中平均$\rho(Li^+)$、$\rho(B^{3+})$分别为1.51 mg/L、3.20 mg/L,与河水的平均$\rho(Li^+)$为0.46 mg/L、$\rho(B^{3+})$为1.58 mg/L相比明显偏高,说明泉水中的Li、B除了有岩石风化的贡献外,还有其他来源的补给。

通过水盐平衡,可以计算冬隆藏布河水和泉水向盐湖输入的硼锂总量,计算方程如下(Tan et al., 2012):

$$\sum W=Q\times C\times 10^{-6}$$

$\sum W$表示的是河流或泉水每年输入盐湖的B或Li的总量,单位为吨(t);C是河水或泉水中B或Li的年浓度(以mg/L为单位的年平均值);Q是以m^3/y为单位的年平均流量。

计算结果表明,麻米错盐湖区的河水和泉水每

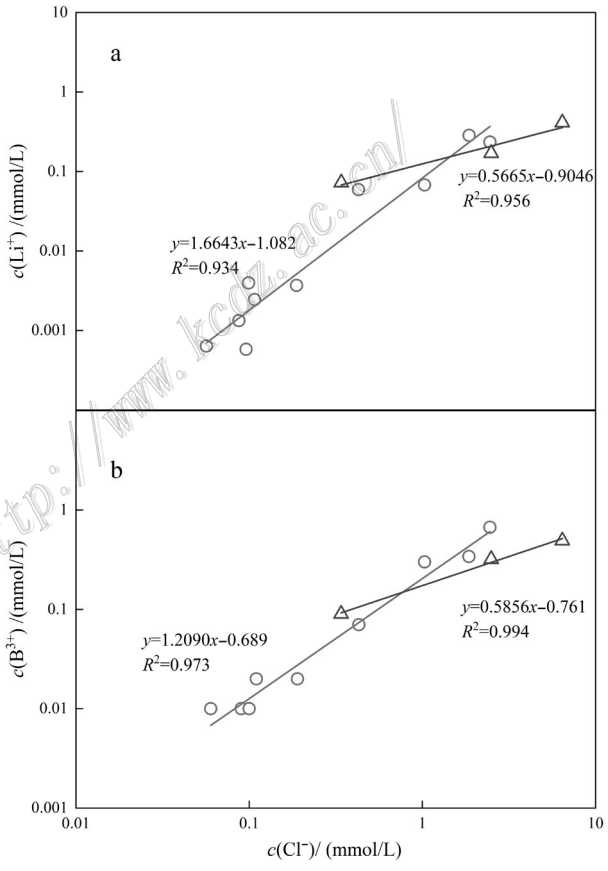

图6　麻米错盐湖水体样品Li-Cl、B-Cl关系图

Fig. 6　Relationship between Li-Cl、B-Cl in water samples from Mami Co Salt Lake

http://www.kcgz.ac.cn/

年向盐湖输入的Li和B的总量分别为505.50 t和985.73 t(表4)。而盐湖目前的LiCl和固体硼矿石的探明储量分别为2.50×10^6 t、3.69×10^7 t。根据李文娟(2015)描述麻米错盐湖的开始形成含硼矿物(硼镁石、钠硼解石等)距今约4000年。假设盐湖形成有B、Li资源的时间至今有4000年,并且计算中没有考虑水体总黏土矿物的吸附或蒸发岩沉淀而损失的B和Li的量,计算得到的总补给量小于探明储量,而探明储量仅仅占远景资源量很小的一部分,整个湖盆Li、B资源量远远大于探明资源量,说明河水与泉水并不是盐湖的唯一补给源。藏北内流水系的盐湖或咸水湖的形成常常伴随着强烈的水热活动,一些盐湖附近往往出现热泉、温泉或者大片古泉华。如扎仓茶卡盐湖受到班公湖-怒江构造带深大断裂控制,湖岸沿断裂带方向有钙华断续延伸40多公里,湖边还发现有温泉(郑喜玉,1982);扎布耶盐湖北湖湖水中有数百个钙化岛至今仍有泉水在活动,湖周边均有大量的钙华分布(赵元艺等,2010)。以上都说明藏北高原历史上的水热活动分布范围和规模的确比现代大,因此,水热流体所携带的盐分是某些盐湖的重要物质来源(佟伟等,1981;刘喜方等,2007)。而且在麻米错湖底、麻米错盐湖东南部约30 km处冬隆藏布河中游东岸阶地之上(余石勇,2022)及附近拉果错盐湖西南岸也发现了古钙华的存在,说明地质历史时期发育的地热可能是麻米错Li、B等成矿物质的重要来源。

4.5 地热水的补给

4.5.1 盐湖水蒸发析盐模拟

Pitzer模型的提出为高浓度水盐相互作用体系的定量化应用研究提供了强有力的工具和手段,不少研究者使用该模型对高浓度水盐体系进行了地球化学模拟研究(Felmy et al., 1986; 刘兴起等,2003; 齐文等,2007; Kohfahl et al., 2015;艾子业等,2018)。

本次研究使用PHREEQC软件中的Pitzer模型数据库对麻米错盐湖水(样品1)进行蒸发析盐模拟,模拟按照蒸发1 kg水样(约55.51 mol)进行,温度为5℃,设定二氧化碳分压$P=10^{-3.4}$。模拟过程中假设:① 麻米错盐湖形成以来的补给水体化学组成与流量不变;② 蒸发过程中,达到饱和的矿物析出沉淀后从溶液中分离,不与所剩溶液发生化学反应。

由于湖水矿化度远高于补给水体的矿化度,初始状态下,方解石、白云石、菱镁矿3种矿物已经过饱和沉淀出来。模拟所得蒸发析盐序列如下所示,先析出的矿物排在前面。

(1) 石膏

(2) 石膏+芒硝

(3) 石膏+芒硝+钙芒硝+石盐

(4) 石膏+芒硝+钙芒硝+石盐+杂卤石

(5) 石膏+芒硝+钙芒硝+石盐+杂卤石+白钠镁矾+泻利盐

(6) 石膏+芒硝+钙芒硝+石盐+杂卤石+白钠镁矾+泻利盐+钾石盐

(7) 石膏+芒硝+钙芒硝+石盐+杂卤石+白钠镁矾+泻利盐+钾石盐+钾芒硝

(8) 石膏+芒硝+钙芒硝+石盐+杂卤石+白钠镁矾+泻利盐+钾石盐+钾芒硝+钾盐镁矾+硫酸锂钾

(9) 石膏+芒硝+钙芒硝+石盐+杂卤石+白钠镁矾+泻利盐+钾石盐+钾芒硝+钾盐镁矾+硫酸锂钾+一水硫酸锂

(10) 石膏+芒硝+钙芒硝+石盐+杂卤石+白钠镁矾+泻利盐+钾石盐+钾芒硝+钾盐镁矾+硫酸锂钾+一水硫酸锂+硬石膏

(10) 石膏+芒硝+钙芒硝+石盐+杂卤石+白钠镁矾+泻利盐+钾石盐+钾芒硝+钾盐镁矾+硫酸锂钾+一水硫酸锂+硬石膏+硼酸盐矿物(钠硼解石)

测试结果显示,首先析出来的矿物为石膏,此时已经蒸发了约46.65%的水;蒸发约61.67%的水时芒硝出现;此后,在逐渐失水很少的情况下钙芒硝、石盐、杂卤石等矿物相继出现;硫酸锂钾在蒸发约88.01%的水时开始析出,随后在蒸发约94%的水时硫酸锂析出;硼酸盐矿物(由于Pitzer模型数据库中缺少硼酸盐矿物的相关物种数据,结合麻米错盐湖实际沉积的矿物认为模拟析出的硼酸盐矿物主要为

表4 河流和泉水输入盐湖的B和Li资源的计算量

Table 4 Calculation amount of B and Li resources of rivers and springs into Salt Lake

补给源	Q^a/m³/y	C_{Li}/mg/L	C_B/mg/L	W_{Li}/t	W_B/t
河水	1.08×10^8	0.46	1.58	297.73	549.81
泉水	4.22×10^7	0.82	3.20	207.77	435.92
年输入总量				505.50	985.73
探明储量[b]				2.50×10^6	3.69×10^7
累积时间(年)				4000	4000
总补给量				2.02×10^6	3.94×10^6

注:Q^a为本次野外勘查测量所得;探明储量[b]W_{Li}中指的是LiCl的探明储量,W_B指的是固体硼矿石(包括B_2O_3)的探明储量,数据引自余石勇(2022)。

http://www.kcdz.ac.cn/

钠硼解石,下同)在蒸发约97.2%的水时开始析出。在实际情况下,盐湖周边除有本次模拟析出的方解石、石膏、芒硝、石盐等常见矿物外,还有大量的钠硼解石、库水硼解石、多水硼镁石等含硼矿物以及含锂矿物(连玉秋等,1994),由于数据库缺失相关矿物的物种数据,本次模拟并未给出。

4.5.2　河水与泉水二端员混合水体蒸发析盐模拟

冬隆藏布河水是麻米错盐湖地区唯一长期性补给河流,提供了大量的水源补给。由于在实际的补给过程中河水会和泉水混合后补给盐湖,所以在此按照补给比例将样品(样品5和样品15)混合后进行蒸发模拟,按照流量(见表4)设定混合比例约为4:1。模拟条件与盐湖水一致。

河水和泉水混合析盐序列如下所示,方解石与白云石在蒸发了约2%的水时就已经析出。

(1) 方解石+白云石

(2) 方解石+白云石+芒硝

(3) 方解石+白云石+芒硝+硼酸盐矿物

(4) 方解石+白云石+芒硝+硼酸盐矿物+钙水碱

(5) 方解石+白云石+芒硝+硼酸盐矿物+钙水碱+石盐

(6) 方解石+白云石+芒硝+硼酸盐矿物+钙水碱+石盐+钾石盐

模拟结果显示,混合水体析出的矿物种类相较于盐湖水来说数量非常少,硼酸盐矿物在蒸发约99.98%的水时才析出,后续矿物都是在逐渐失水的很少的情况下相继出现。析盐种类与盐湖水蒸发析盐种类相比,矿物种类很少,且析盐序列也不一致。模拟结果指示河水与泉水的混合水体不是盐湖成盐物质的唯一来源。

4.5.3　河水、泉水与地热水三端员混合水体蒸发析盐模拟

由于麻米错盐湖盆地为班公湖-怒江构造带控制的新生代构造断陷盆地,而且藏北高原地史时期曾有大规模的水热活动,所以我们推测麻米错盐湖除有河水与泉水的补给外,还应该有地热水的补给(佟伟等,1981;张红亮,2010;徐刚等,2020;Pan et al., 2021)。由于无法获取地史时期地热水的化学成分,考虑到麻米错盐湖作为目前西藏地区所发现的超常规富锂盐湖,色米温泉代表整个西藏地区现代温泉最富集Li的类型且发育大量硅华和钙华(佟伟等,2000),所以笔者选择西藏富Li的色米现代温泉(离子含量见表5)来进行混合蒸发模拟。考虑到河流与泉水的径流量比例约为4:1,假定热泉水补给量与冷泉水接近,设定三端元混合比例为4:1:1进行蒸发模拟。

3种水体混合析盐序列如下所示,在蒸发约2%的水时,方解石与白云石已经析出。

(1) 方解石+白云石

(2) 方解石+白云石+菱镁矿

(3) 方解石+白云石+菱镁矿+硼酸盐矿物

(4) 方解石+白云石+菱镁矿+硼酸盐矿物+石膏

(5) 方解石+白云石+菱镁矿+硼酸盐矿物+石膏+芒硝

(6) 方解石+白云石+菱镁矿+硼酸盐矿物+石膏+芒硝+钙芒硝

(7) 方解石+白云石+菱镁矿+硼酸盐矿物+石膏+芒硝+钙芒硝+石盐

(8) 方解石+白云石+菱镁矿+硼酸盐矿物+石膏+芒硝+钙芒硝+石盐+钾石盐

(9) 方解石+白云石+菱镁矿+硼酸盐矿物+石膏+芒硝+钙芒硝+石盐+钾石盐+硫酸锂钾

模拟结果显示,在蒸发约99%的水时硼酸盐矿物开始出现,后续矿物在失水很少的情况下逐步出现。将三端元混合水体的析盐序列与盐湖水析盐序列相比发现有很大一部分矿物组合吻合,而与二端元析盐序列相比有较大不同。在与盐湖水的析盐序列对比中发现,硼酸盐矿物在三端元混合水体析盐序列中出现的比较靠前,而在盐湖水析盐序列中出现较晚,含锂矿物硫酸锂钾在两者的析盐序列中同样出现的较晚。出现这种情况我们认为在盐湖水中主量元素浓度高出Li、B几十倍甚至上百倍,导致前期主要出现主量矿物,而三端元混合水体中主量元素的浓度与Li、B相比不是很大,所以主量矿物会出

http://www.kcdz.ac.cn/

表5　色米地热水水化学组成

Table 5　Chemical composition of Semi geothermal water

	ρ(B)/mg/L								
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Li^+	B^{3+}
色米地热水	976.00	139.20	0.04	1.55	869.82	97.30	1145.86	44.79	626.60

现比较靠后。

总体而言，有地热水加入的混合水体析盐序列在某种程度上接近于盐湖水的析盐序列。虽然析盐序列与盐湖水相比存在一定的差异，但选取的地热水毕竟不是麻米错盐湖的直接补给源，所以我们推测，藏北地史时期很有可能有大量类似色米温泉这类高温富Li温泉发育，并补给麻米错盐湖。所以古地热水是麻米错盐湖Li、B资源的另一重要补给源。

5 结 论

（1）研究区不同水体的水化学类型不同，根据库尔纳可夫-瓦良什科分类法，麻米错盐湖水化学类型为硫酸钠亚型；在Piper图中冬隆藏布河水离盐湖水体由远及近大致变化为$SO_4^{2-}\cdot HCO_3^-$-Ca型→HCO_3^--Na·Ca型→HCO_3^--Ca型；泉水的水化学类型为Cl·HCO_3^--Na·(Mg)。泉水的水化学类型更接近于湖水。

（2）Gibbs图以及离子比例关系研究表明，麻米错盐湖的补给水体主要由流域岩石风化控制；通过离子来源计算表明补给河水的主量离子来源于碳酸盐矿物的淋滤风化，其次为蒸发岩和硅酸盐矿物；泉水的主量离子来源于蒸发岩和硅酸盐矿物。通过资源量计算得知，盐湖周边的河水和泉水并不是盐湖Li、B资源的唯一补给源，说明盐湖的Li、B还应有其他来源补给。

（3）蒸发模拟研究发现，河水和泉水混合水体的析盐序列与湖水的析盐序列存在较大差距，进一步确认了河水和泉水的混合水体不是麻米错盐湖的唯一补给源；而有地热水加入的混合水体的析盐序列在某种程度上与盐湖水存在重叠，一些典型矿物组合如硼酸盐矿物、硫酸锂钾等更容易析出，证实深部古地热水是麻米错盐湖Li、B的另一重要补给源。

致 谢 本研究在野外工作、室内实验以及成文过程中得到薛飞老师、丛培鑫博士、杨俊颖硕士、张煜道硕士的帮助，评审专家对本文提出诸多宝贵意见和建议，提高了本文质量，在此一并感谢。

References

Ai Z Y, Li Y S, Tang Q L, Cheng H D, Li J, Zhou T L, Zhang X Y, Lü X C and Cai W N. 2018. Preliminary study on the source of formation ore fluids of polyhalite in Kunty Playa based on hydrogeochemical simulation[J]. Salt Lake Research, 26(4): 44-50(in Chinese with English abstract).

Bandini G, Caposciutti G, Marracci M, Buffi A and Tellini B. 2022. Characterization of lithium-batteries for high power applications[J]. Journal of Energy Storage, 50: 104607.

Chi P, Kang X B, Feng S B, Zhou Y and Wang T Z. 2016. Characteristics and genesis analysis of Mamico salt lake boron deposit[J]. Earth, (9): 44(in Chinese with English abstract).

Chen Y L, Zhang K Z, Gou Y D and Wen J H. 2006. Wuma sheet I44C004004 1/250 000 regional geological survey report[R]. Internal report1. 62p(in Chinese).

Felmy A R and Weare J H. 1986. The prediction of borate mineral equilibria in natural waters: Application to Searles lake, California[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 50(12): 2771-2783.

Gibbs R J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 172(3985): 870.

Kohfahl C, Post V E A, Hamann E, Prommer H and Simmons C T. 2015. Validity and slopes of the linear equation of state for natural brines in salt lake systems[J]. Journal of Hydrology, 523: 190-195.

Kondo T. 2022. Recent electroanalytical applications of boron-doped diamond electrodes[J]. Current Opinion in Electrochemistry, 32: 100891.

Li W J. 2015. Geological characteristics and metallogenic model of Mamico salt lake in Gaize Tibet[D]. Supervisor: Yang Z X. Chengdu: Chengdu University of Technology. 12-52p(in Chinese with English abstract).

Li Y L, Miao W L, Zhang X Y, He M Y, Tang Q L, Yang K Y, Li Y S, Han J L and Zhao X. 2021. Hydrochemical characteristics and salt-formation elements sources of Li-rich brines in Kushui lake, West Kunlun[J]. Earth Science, 46(11): 4161-4174(in Chinese with English abstract).

Lian Y Q and Guan H Z .1994. New discoveries and significance of boron deposits of Mami saline lake in Tibet[J]. Geology of Tibet, (1): 170-178(in Chinese with English abstract).

Liu C L, Yu X C, Yuan X Y, Li R Q, Yao F J, Shen L J, Li Q and Zhao Y Y. 2021. Characteristics, distribution regularity and formation model of brine type Li deposits in salt lakes[J]. Journal of geology, 95 (7): 2009-2029(in Chinese with English abstract).

Liu D Z and Tao X F. 2005. Report on regional geological survey of Sailipu sheet H44C001004 1/250 000[R]. Internal report. 222p(in Chinese).

Liu X F, Zheng M P and Qi W. 2007. Sources of ore-forming materials of the superlarge B and Li deposit in Zabuye salt lake, Tibet, China[J]. Journal of Geology, 81: 1709-1715(in Chinese with English abstract).

Liu X Q, Cai K Q and Yu S S. 2002. Geochemical simulation of formation and evolution of salt lakes and their water sources in Qardam basin: Application of Pitzer's model[J]. Geochimica, 31: 501-507.

Liu X Q, Cai K Q and Yu S S. 2003. Geochemical simulation of the formation of brine and salt minerals in Chaka salt lake based on

http://www.kcdz.ac.cn/

Pitzer model[J]. Chinese Science (Earth Science), (3): 247-254(in Chinese with English abstract).

Liu X Q, Cai K Q and Yu S S. 2004. Geochemical simulation of the formation of brine and salt minerals based on Pitzer model in Caka salt lake[J]. Science in China（Series D）: Earth Sciences, 47 (8): 720-726.

Pan S, Kong Y L, Wang K, Ren Y Q, Pang Z H, Zhang C, Wen D G, Zhang L Y, Feng Q D, Zhu G L and Wang J Y. 2021. Magmatic origin of geothermal fluids constrained by geochemical evidence: Implications for the heat source in the northeastern Tibetan plateau[J]. Journal of Hydrology, 603: 126985.

Parkhurst D L. 2013. Description of input and examples for Phreeqc version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations[R]. Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center. 1p.

Qi W and Zheng M P. 2007. Simulation with Pitzer model of lake brine evolution of Zabuye salt lake, Tibetan plateau[J]. Chinese Journal of Geology, (12): 1734-1741(in Chinese with English abstract).

Sehnaz S, E Sener, A Davraz and Varol S. 2020. Hydrogeological and hydrochemical investigation in the Burdur saline lake basin, Southwest Turkey[J]. Geochemistry, 80(4): 125592.

Shen H G, Rao W B, Tan H B, Guo H Y, Wen C , Zhang X Y and Tuo W Q. 2022. Chemical characteristics, influencing factors and human health risks of groundwater in an alpine watershed[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 50(6): 9-17(in Chinese with English abstract).

Tan H B, Chen J, Rao W B, Zhang W J and Zhou H F. 2012. Geothermal constraints on enrichment of boron and lithium in salt lakes: An example from a river-salt lake system on the northern slope of the eastern Kunlun mountains, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 51: 21-29.

Tong W, Zhang M T, Zhang Z F, Liao Z J, You M Z, Zhu M X, Guo G Y and Liu S B. 1981. Geothermal energy in Tibet[M]. Beijing: Science Press. 59-192p(in Chinese).

Tong W, Liao Z J, Liu S B, Zhang Z F, You M Z and Zhang M T. 2000. Tibetan hot spring chronicle[M]. Beijing: Science Press. 45-46p (in Chinese).

Valyashko M G. 1955. Basic chemical types of natural waters and the conditions producing them[J]. Records of the Academy USSR, 102: 315-318.

Wang G. 2010. Tectonic characteristics and formation mechanism of Cangmucuo-Duosang north-south graben in Tibet[D]. Supervisor: Tao X F. Chengdu: Chengdu University of Technology. 25-27p(in Chinese with English abstract).

Wang Y F. 2015. Study on the water chemical characteristics in Zhabuye Salt Lake, Tibet[D]. Supervisor: Zhou B H. Jinan: Jinan University. 48p(in Chinese with English abstract).

Xu G, Wu K Y, Wang P, Chen Y D, Li X Y, Hu L, Liu Z C and Li H. 2020. Hydrogeochemical characteristics of the geothermal field in Wenquan basin, northern Tibet[J]. China Karst, 39 (3): 299-310(in Chinese with English abstract).

Yu S Y, Liu M, Zhao Y Y and Zheng M P. 2022. Hydrochemical characteristics of large-scaler lithium-boron mine basin in Mamico salt lake, Tibet[J]. Journal of Geology, 96(6): 2195-2205(in Chinese with English abstract).

Yu S Y 2022. Hydrochemistry of lithium ore in Mamico salt lake and chronology and geochemistry of travertine, Tibet[D]. Supervisor: Zhao Y Y. Chinese Academy of Geological Sciences. 1-46p(in Chinese with English abstract).

Zhang H L. 2010. Study on the geological background of hydrothermal activities in North Tibet[D]. Supervisor: Wang G H. Beijing: China University of Geosciences. 14p(in Chinese with English abstract).

Zhang W J. 2016. Source and enrichment of boron and lithium in a typical river-salt lake system from the northern slope of the eastern Kunlun Mountains[D]. Supervisor: Tan H B. Nanjing: Hohai University. 41p(in Chinese with English abstract).

Zhang X R, Fan Q S, Li Q K, Du Y S, Qin Z J, Wei H C and Shan F S. 2019. The source, distribution, and sedimentary pattern of K-rich brines in the Qaidam basin, western China[J]. Minerals, 9(11): 655.

Zhang X R. 2020. Boron isotope fractionation of carbonates in salt lakes and its tracer to the evolution of the Qarhan Salt Lake[D]. Supervisor: Gao D L and Fan Q S. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Qinghai Salt Lake Institute, Chinese Academy of Sciences). 4p(in Chinese with English abstract).

Zhang Y F. 2016. Distribution and origin of some typical elements in geothermal systems in Tibetan-western Yunnan geothermal belt[D]. Supervisor: Tan H B. Nanjing: Hohai University. 96-97p(in Chinese with English abstract).

Zhao Y Y, Cui Y B and Zhao X T. 2010. Geological and geochemical features and significance of travertine in travertine-island from Zabuye salt lake, Tibet[J]. Geological Bulletin, 29(1): 124-141(in Chinese with English abstract).

Zhao Y Y .2013. Comprehensive development of experimental brine resources in Mamico salt lake[J]. Chemical Minerals and Processing, 42(11): 1 (in Chinese with English abstract).

Zheng M P, Zhang Y S, Liu X F, Qi W, Kong F J, He Z, Jia Q X, Bu L Z, Hou X H, Wang H L, Zhang Z, Kong W G and Lin Y J. 2016. Progress and prospects of salt lakes research in China[J]. Journal of Geology, 90(9): 2123-2166 (in Chinese with English abstract).

Zheng X Y. 1982. The distribution characteristics of B and Li in the brine of Zhacang Chaka salt lake, Tibet[J]. Oceans and Lakes, (1): 9(in Chinese with English abstract).

Zheng X Y, Zhang M G, Xu C and Li B X. 2002. China salt lake annals[M]. Beijing: Science Press. 2-415p(in Chinese).

附中文参考文献

艾子业, 李永寿, 唐启亮, 程怀德, 李俊, 周同亮, 张西营, 吕学成, 蔡

http://www.dzkx.ac.cn

万宁. 2018. 基于水文地球化学模拟的昆特依盐湖杂卤石成矿流体来源初步研究[J]. 盐湖研究, 26(4): 44-50.

迟鹏, 康晓波, 冯士彬, 周阳, 王天泽. 2016. 麻米错盐湖硼矿矿床特征及矿床成因分析[J]. 地球, (9): 44.

陈玉禄, 张宽忠, 勾永东, 文建华. 2006. 物玛幅 I44C004004 1/250 000 区域地质调查报告[R]. 内部报告. 162 页.

李文娟. 2015. 西藏改则县麻米错盐湖地质特征及成矿模式[D]. 导师:阳正熙. 成都:成都理工大学. 12-52 页.

李玉龙, 苗卫良, 张西营, 贺茂勇, 唐启亮, 杨凯源, 李永寿, 韩继龙, 赵雪. 2021. 西昆仑地区苦水湖富锂盐湖水化学特征及成盐元素来源[J]. 地球科学, 46(11): 4161-4174.

连玉秋, 关宏钟. 1994. 西藏麻米盐湖硼矿的发现及其意义[J]. 西藏地质, (1): 170-178.

刘成林, 余小灿, 袁学银, 李瑞琴, 姚佛军, 沈立建, 李强, 赵元艺. 2021. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型[J]. 地质学报, 95(7): 2009-2029.

刘登忠, 陶晓风. 2005. 赛利普幅 H44C001004 1/250 000 区域地质调查报告[R]. 内部报告. 222 页.

刘喜方, 郑绵平, 齐文. 2007. 西藏扎布耶盐湖超大型 B、Li 矿床成矿物质来源研究[J]. 地质学报, (12): 1709-1715.

刘兴起, 蔡克勤, 于升松. 2003. 基于 Pitzer 模型的茶卡盐湖卤水及盐类矿物形成的地球化学模拟[J]. 中国科学(地球科学), (3): 247-254.

齐文, 郑绵平. 2007. 西藏扎布耶盐湖卤水演化的 Pitzer 模型模拟[J]. 地质学报, (12): 1734-1741.

沈回归, 饶文波, 谭红兵, 郭宏业, 温川, 张西营, 拓万全. 2022. 高寒区典型流域地下水化学特征、影响因素及健康风险[J]. 河海大学学报(自然科学版), 50(6): 9-17.

佟伟, 廖志杰, 刘时彬, 张知飞, 又懋正, 章铭陶. 2000. 西藏温泉志[M]. 北京:科学出版社. 45-46 页.

佟伟, 章铭陶, 张知非, 廖志杰, 由懋正, 朱梅湘, 过帼颖, 刘时彬. 1981. 西藏地热[M]. 北京:科学出版社. 59-192 页.

王冠. 2010. 西藏仓木错-多桑南北向地堑构造特征及成因机制探讨[D]. 导师: 陶晓风. 成都: 成都理工大学. 25-27 页.

王玉凤. 2015. 西藏扎布耶盐湖水化学特征研究[D]. 导师: 周保华. 济南: 济南大学. 48 页.

徐刚, 伍坤宇, 王鹏, 陈永东, 李兴彦, 胡林, 刘子畅, 李海. 2020. 藏北温泉盆地地热田水文地球化学特征研究[J]. 中国岩溶, 39(3): 299-310.

余石勇, 刘孟, 赵元艺, 郑绵平. 2022. 西藏麻米错盐湖大型锂硼矿盆地水化学特征[J]. 地质学报, 96(6): 2195-2205.

余石勇. 2022. 西藏麻米错盐湖锂矿水化学与钙华年代学和地球化学特征[D]. 导师: 赵元艺. 北京: 中国地质科学院. 1-46 页.

张红亮. 2010. 藏北水热活动的地质背景研究[D]. 导师: 王根厚. 北京: 中国地质大学(北京). 14 页.

张文杰. 2016. 东昆仑山北坡典型河流-尾闾湖系统 B、Li 物源与富集机制[D]. 导师: 谭红兵. 南京: 河海大学. 41 页.

张湘如. 2020. 盐湖碳酸盐硼同位素的分馏机理及其对察尔汗成盐过程的反演[D]. 导师: 高东林, 樊启顺. 北京:中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所). 4 页.

张燕飞. 2016. 藏-滇地热系统典型元素分布与物源研究[D]. 导师: 谭红兵. 南京: 河海大学. 96-97 页.

赵元艺, 崔玉斌, 赵希涛. 2010. 西藏扎布耶盐湖钙华岛钙华的地质地球化学特征及意义[J]. 地质通报, 29(1): 124-141.

赵元艺. 2013. 麻米错盐湖试验卤水资源综合开发[J]. 化工矿物与加工, 42(11): 1.

郑绵平, 张永生, 刘喜方, 齐文, 孔凡晶, 乜贞, 贾沁贤, 卜令忠, 侯献华, 王海雷, 张震, 孔维刚, 林勇杰. 2016. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望[J]. 地质学报, 90(9): 2123-2166.

郑喜玉. 1982. 西藏扎仓茶卡盐湖卤水硼、锂的分布特征[J]. 海洋与湖沼, (1): 9.

郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 李秉孝. 2002. 中国盐湖志[M]. 北京:科学出版社. 2-415 页.

http://www.kcdz.ac.cn