

西藏盐湖卤水与其蒸发过程中溴含量 变化特征及意义



Pre-pub. online: www.
geojournals.cn/georev

王新元^{1,2)}, 张智彦³⁾, 黄圣³⁾, 陈文西¹⁾, 李胜群^{1,2)}, 崔金宝^{1,2)}, 赵元艺¹⁾

- 1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京, 100037;
- 2) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083;
- 3) 西藏国能矿业发展有限公司, 拉萨, 850000

内容提要: 溴素是我国重要的化工原料之一, 在环境科学和工业领域具有重要的研究和应用价值, 近年来随着溴素阻燃剂、溴盐等化工产品行情的看涨, 溴的需求量将持续增长。西藏盐湖卤水中的化学成分一直备受关注, 其中溴(Br)含量也是其中的一项重要指标, 然而目前对西藏盐湖中溴(Br)的分布规律和蒸发过程中溴的含量特征及意义鲜有研究。本文以西藏盐湖为研究对象, 研究卤水中溴的含量特征, 探讨其在蒸发过程中的变化。研究表明: ① 西藏盐湖卤水中溴质量浓度为 0.11~187.0 mg/L, 其中多数盐湖中富含 Br, 如扎仓茶卡(52.90 mg/L)、聂尔错(52.03 mg/L)盐湖卤水 Br 质量浓度高于溴的综合评价指标(50 mg/L); 扎布耶北湖(187.0 mg/L)、扎布耶南湖(177.8 mg/L)、当雄错(106.6 mg/L)盐湖卤水 Br 质量浓度高于扎布耶盐湖溴的边界品位(100 mg/L), 1年中, 扎布耶北湖与南湖在 10、11 月份溴质量浓度最高, 分别为 216.8 mg/L 和 272.8 mg/L; 当雄错在 7、8 月份溴质量浓度最高, 最高为 130.0 mg/L; ② 多数盐湖卤水中 Br 的主要补给来源可能为强烈活动的热泉, 经河水汇入并在盐湖卤水中富集, 其中结则茶卡盐湖卤水中 Br 大约 99% 的补给来源为河边温泉; ③ 盐湖卤水中 Br 含量虽远不及海水, 但在盐田卤水中如扎布耶各级盐田中 Br 质量浓度明显高于工业开采品位(300 mg/L)。在卤水自然蒸发浓缩过程中, 随着蒸失率的增大, Br 的含量有逐渐升高的趋势。溴含量高的盐湖及盐田卤水是对溴综合利用的潜在资源。

关键词: 西藏; 盐湖; 溴含量; 卤水; 分布规律; 蒸发过程

溴(Br)作为一种卤族元素, 具有广泛的应用领域, 是我国重要的化工原料之一, 在化工、医药、电子、消防安全等领域有广泛的用途(田赫等, 2018; Bzeih et al., 2018; Singh et al., 2020)。

溴素作为最早从海洋中成功分离提取的元素, 有“海洋元素”之称(王国强等, 2002)。溴在各地质体中均有分布, 但含量特别低, 地球的溴元素丰度仅为 3×10^{-6} 。水资源按照分布差异可以分为盐湖卤水、矿物盐卤水、地下卤水、油气田水和海水(Gao Maosheng et al., 2016; Ma Haiyan et al., 2018; Winid et al., 2018; 韩佳欢等, 2024)。由于海洋面积为地球面积的 3/4, 导致海水中溴的总量占到了溴资源的 99%, 其中海底火山的喷出物是海水中溴的主要补给来源(余疆江等, 2013)。因此, 海水是工艺提

取溴的最主要来源, 但是现在沿海地区溴资源面临着品位下降、资源枯竭的困境。我国溴资源的产量约 150 kt/a(柴子华等, 2018), 其开发利用主要集中在环渤海地区, 其中 90% 来自于山东省, 因地下卤水开采规模大、效率低, 导致资源日益匮乏, 其中莱州湾地下卤水溴含量已经不足原有的一半(公方薪等, 2017; 宋华玲等, 2024)。并且溴是不可再生资源, 在全球分布不均, 导致我国溴资源供不应求, 需从国外大量进口才能满足市场需求(王法, 2012), 2013年~2019年, 我国溴素进口量由 30 kt/a 增加到 60~80 kt/a(孔维刚等, 2021)。西藏盐湖卤水中 Li、B 资源是世界闻名的优势资源, 而溴含量却远不及海水和地下卤水高, 但其优点在于便于开发利用, 在生产锂等资源的同时对溴资源可综合回收利用,

注: 本文为第二次青藏高原综合考察研究专题“青藏高原盐湖铷、铯资源现状与远景评估”(编号: 2022QZKK0201)和中国地质科学院矿产资源研究所横向项目“西藏结则茶卡和龙木错盐湖资源动态变化与资源潜力研究”(编号: HE2202)联合资助的成果。

收稿日期: 2024-07-07; 改回日期: 2024-10-20; 网络首发: 2025-01-20; 责任编辑: 李明、章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.062

作者简介: 王新元, 男, 2000年生, 硕士研究生, 从事矿床地球化学研究; Email: 1366084347@qq.com。通讯作者: 陈文西, 男, 1977年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事沉积矿产与沉积矿盆地的调查及研究; Email: cwx0616@yahoo.com.cn。

所以,研究西藏盐湖溴资源特征,研发卤水提取溴的工艺迫在眉睫。

根据盐湖的含盐度,可将其分为狭义盐湖和广义盐湖,狭义盐湖的含盐度下限为 3.5%;广义盐湖的下限为 0.3%(郑绵平,2001)。近年来前人对西藏盐湖中 Mg、Li、Rb、Cs、B 等资源元素含量特征和物质来源展开过详细研究(Li Qingkuan et al., 2019; 余石勇等, 2022; Zheng Mianping et al., 2023; 周潇等, 2024),然而对溴的分布规律和蒸发过程中溴的含量特征及意义研究较少。因此,本文以西藏盐湖卤水及盐田卤水为例,对 28 个盐湖进行卤水采样并测量盐湖及盐田卤水溴质量浓度,探讨盐湖卤水中溴的含量特征及其在蒸发过程中的变化,对比分析不同盐湖卤水中 Br 的质量浓度变化和分布,以及这些变化对工业开发应用的潜在意义,为西藏盐湖产业的综合开发利用及资源的可持续发展提供科学依据。

1 西藏盐湖概况

西藏是我国盐湖最集中的区域,也是世界上海拔最高、面积范围最广、数量最多、类型最齐全的盐湖分布区。据统计,在西藏现有的 2000 多个湖泊中,有近 500 个是盐湖,其中面积大于 1 km² 的有

234 个,约占整个西藏盐湖面积的 99%,其中藏北(羌塘)高原有 218 个,藏南山地有 14 个,藏东大峡谷有 2 个(郑绵平等,1989;郑喜玉等,2002)。

西藏盐湖地区受到印度板块与欧亚板块的碰撞影响,这一地质构造作用导致了地壳的抬升和断裂,形成了湖泊、峡谷和山脉,同时也促使地下水上升并补给了这些盐湖。冈底斯山—念青唐古拉山从西向东横亘青藏高原中部,将其以北地区的内流区汇集在盆地的低地,并在这些低地形成了盐湖。此外,西藏气候干旱是盐湖发育的有利条件,并且从藏南山地到藏北高原,干旱化程度逐步加深,盐湖的数量也随之增多。同时,西藏地壳内还发育了部分熔融层,并在断层活动的控制下,在地表上产生了强烈的地热异常。目前为止,西藏地区已发现 600 多个温泉,经岩浆热液及高温水岩相互作用,使其中含有丰富的盐类及其他高值化元素(Li、B、Rb、Cs、Br 等),为该地区的盐湖提供了丰富的物质资源(郑绵平等,1989)。总之,西藏地区具有独特的盐湖群,是由构造—气候—物源三者耦合控制下形成的特殊资源(李庆宽等,2023)。

随着藏北高原的“暖湿化”,近几年来,盐湖的面积急剧扩大,水体的淡化现象十分明显,例如藏北结则茶卡盐湖面积由 2010 年的 112.93 km² 扩张至

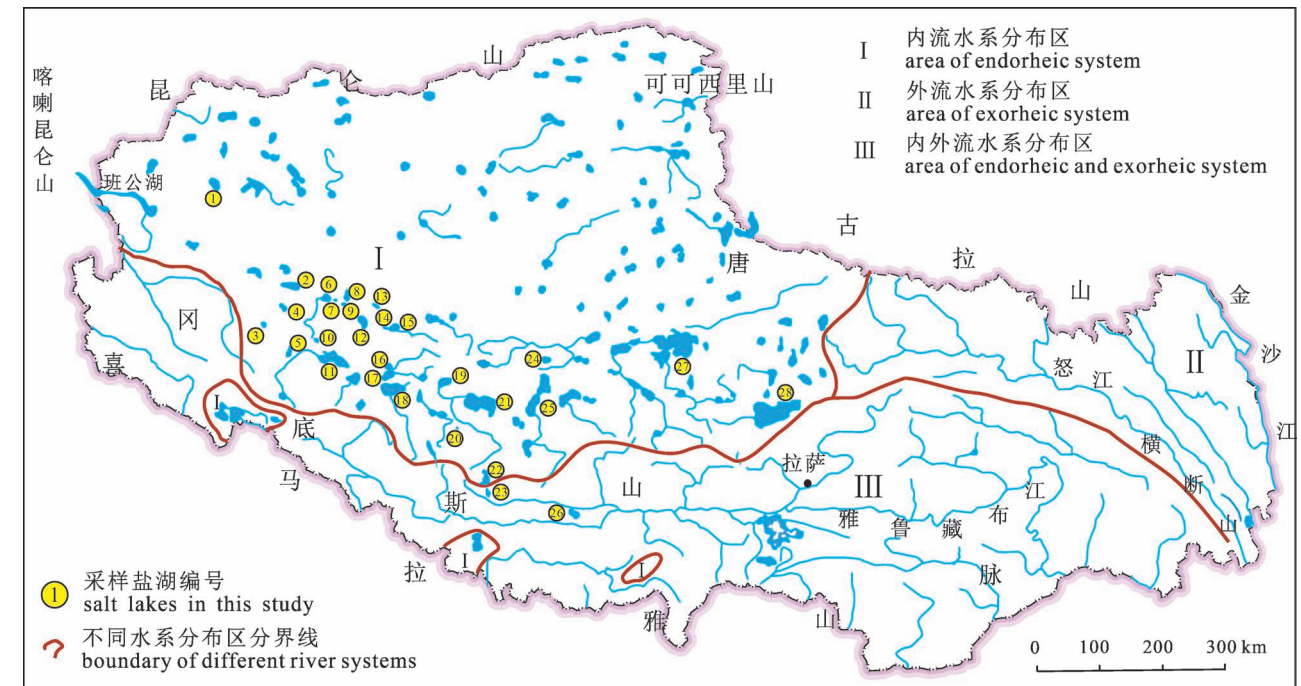


图 1 西藏水系分布及本文采样的盐湖位置图(底图据李庆宽等, 2023), 盐湖编号 1~ 28 与表 7 对应

Fig. 1 The map of the distribution of rivers in Xizang (Tibet) and this paper sampling location of salt lake (base map according to Li Qingkuan et al., 2023&), salt lake marked as No. 1~No. 28 correspond to Table 7

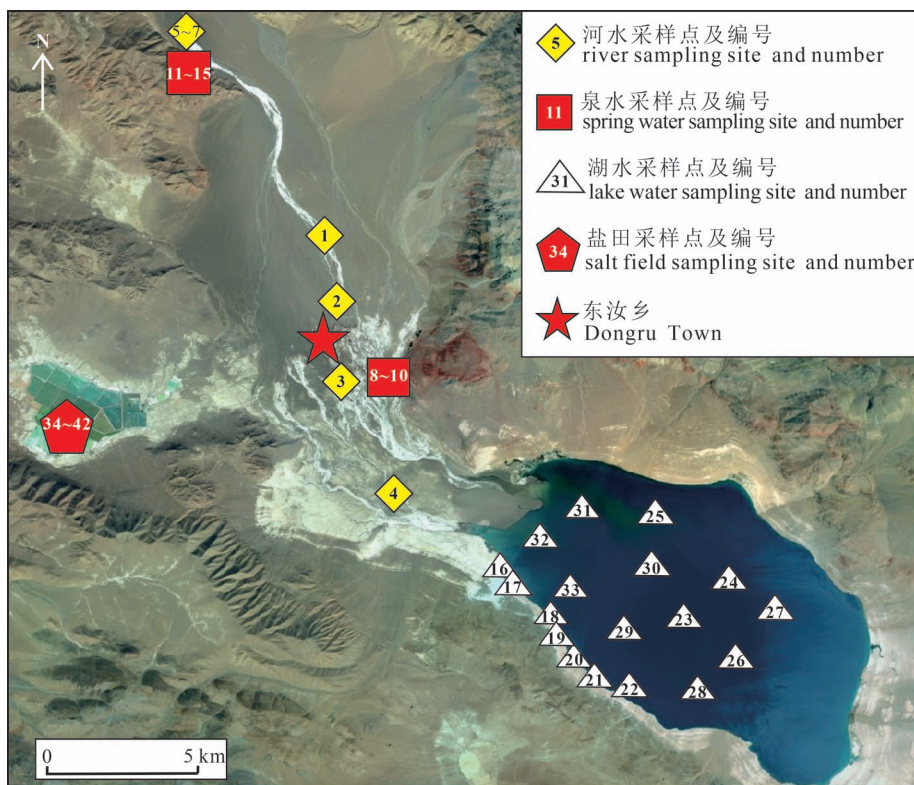


图2 西藏结则茶卡盐湖、盐田卤水及其补给水系采样位置分布图(陈文西等, 2023^①)

Fig. 2 Distribution map of sampling location in salt lake, salt field brine and its supplying water system from Jiezechaka, Xizang (Tibet) (Chen Wenxi et al., 2023^①)

2023年的 118.16 km^2 ,扩大了 5.23 km^2 ,年增长率为 $0.40 \text{ km}^2/\text{a}$ (陈文西等, 2023^①),甚至一些盐湖已经变成了咸水湖(Zhang Guoqing et al., 2020)。除

了富含石盐,芒硝,天然碱等常见盐类矿物的普通盐湖,西藏还有许多富含K、Li、B、Rb、Cs、Br等高价元素特种盐湖(郑绵平等, 1989),具有巨大的开发潜力。

2 样品采集与测试

2.1 样品采集

2022年1月至2023年7月对结则茶卡、扎布耶、当雄错等28个盐湖(图1)卤水样品进行采集(表1~表3),其中对结则茶卡进行网格状采样,对扎布耶南湖与北湖及当雄错进行定点年度半月采样,对其余盐湖沿湖边进行采样。同时对结则茶卡盐湖补给水系进行样品采集(表1,图2、图3)。

此外,还对结则茶卡和扎布耶两个正在使用太阳池技术生产碳酸锂精矿的盐湖盐田卤水进行样品采集(表1、表4,图2、图3)。在样品采集前先用待采水样洗涤采样瓶3次,每件样品采集500 mL各两瓶。采样时利用GPS记录坐标点位,并现场测量温度、流量参

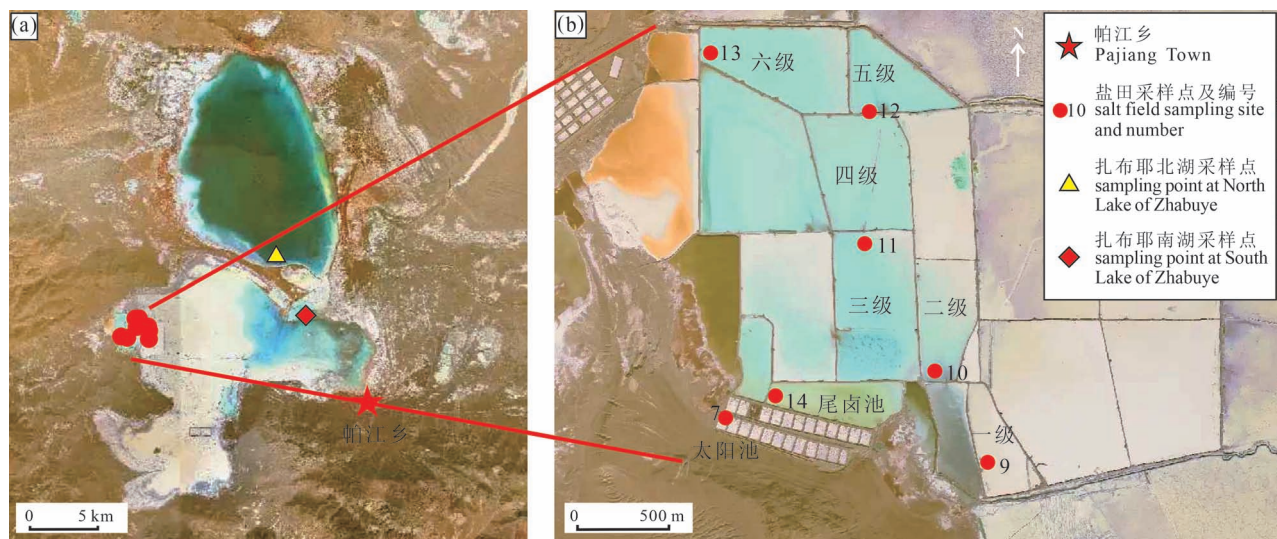


图3 西藏扎布耶盐湖盐田卤水采样位置分布图(赵元艺等, 2023^②)

Fig. 3 Distribution map of sampling location of brine in salt lake salt field of the Zhabuye Lake, Xizang (Tibet) (Zhao Yuanyi et al., 2023^②)

表 1 西藏结则茶卡补给水系与盐湖、盐田卤水 Br、Li、Rb、Cs 质量浓度 (mg/L)
 Table 1 The mass concentration (mg/L) of Br, Li, Rb and Cs in supply water system, salt lake and salt field brine from Jiezechaka, Xizang (Tibet)

序号	样号	采样位置	Br	Li	Rb	Cs	采样日期	序号	样号	采样位置	Br	Li	Rb	Cs	采样日期				
1	HRQ-1-1	河边泉水	0.36	4.21	0.65	0.78	2022-05-30	32	JZ-5-S-3	结则茶卡 盐湖卤水	43.05	150.6	5.16	0.83	2023-04-13				
2	HRQ-1-2		0.43	4.23	0.22	0.60		33	JZ-6-S-1		43.8	142.6	5.51	0.87					
3	HRQ-1-3		0.50	4.21	0.20	0.59		34	JZ-6-S-2		43.1	134.5	5.21	0.85					
4	HRQ-1-4		0.42	4.02	0.19	0.56		35	JZ-6-S-3		29.9	132.6	4.70	0.78					
5	HRQ-1-5		0.41	4.36	0.20	0.59		36	JZ-7-S-1		42.05	164.1	6.00	0.92					
6	SBQ-1-1	山边泉水	ND	0.11	ND	ND	2022-05-31	37	JZ-7-S-2		40.3	142.9	5.16	0.82		2023-04-13			
7	SBQ-1-2		ND	0.11	ND	ND		38	JZ-7-S-3		39.5	142.9	4.98	0.79					
8	SBQ-1-3		ND	0.11	ND	ND		39	JZ-8-S-1		39.6	149.5	5.52	0.86					
9	QSH-1-1	河水	ND	0.06	ND	ND	2022-05-30	40	JZ-8-S-2		39.15	137.1	5.54	0.88			2023-04-13		
10	QSH-1-2		ND	0.06	ND	ND		41	JZ-8-S-3		40.15	139.4	5.63	0.93					
11	QSH-1-3		ND	0.06	ND	ND		42	JZ-9-S-1		50.5	177.8	6.74	1.06					
12	JZCK-6-1		34.46	131.1	4.67	0.74		43	JZ-9-S-2		42.3	155.0	5.44	0.87					
13	JZCK-6-2		33.39	129.0	4.31	0.68		44	JZ-9-S-3		39.65	148.9	5.30	0.84					
14	JZCK-7-1	33.90	130.6	4.79	0.76	45	JZ-10-S-1	44.65	159.6		5.46	0.90	2023-04-15						
15	JZCK-7-2	33.92	128.5	5.10	0.81	46	JZ-10-S-2	39.5	137.3		4.99	0.82							
16	JZCK-9-1	34.71	133.1	4.51	0.71	47	JZ-10-S-3	39.55	136.5		4.77	0.77							
17	JZCK-9-2	34.63	134.1	4.75	0.74	48	JZ-11-S-1	37.65	130.1		4.82	0.76							
18	JZ-1-S-1	39.30	163.4	6.46	1.02	49	JZ-11-S-2	36.95	126.8		4.74	0.78							
19	JZ-1-S-2	36.15	134.9	4.98	0.80	50	JZ-12-S-1	43.6	169.4		5.76	0.90							
20	JZ-1-S-3	35.30	132.9	5.19	0.82	51	JZ-12-S-2	38.4	146.4		4.82	0.79							
21	JZ-2-S-1	结则茶卡 盐湖卤水	45.60	133.2	5.97	0.99	2022-06-03	52	JZ-12-S-3		41.25	155.3		4.84				0.79	2023-04-15
22	JZ-2-S-2		41.70	139.3	5.36	0.84		53	JZCK-11-1		85.14	339.2		11.08				1.60	
23	JZ-2-S-3		40.15	137.3	5.06	0.80		54	JZCK-11-2-1		150.5	559.2		21.43				3.12	
24	JZ-3-S-1	38.45	163.8	6.08	0.94	55	JZCK-11-2-2	152.7	559.2		21.55	3.12							
25	JZ-3-S-2	44.20	152.8	5.32	0.84	56	JZCK-11-3-1	184.1	666.8		24.34	3.53							
26	JZ-3-S-3	41.75	141.0	4.95	0.79	57	JZCK-11-3-2	195.7	675.6		25.09	3.57							
27	JZ-4-S-1	42.80	164.1	5.68	0.90	58	JZCK-11-4-1	165.5	790.4		30.42	4.31							
28	JZ-4-S-2	43.75	150.8	5.35	0.84	59	JZCK-11-4-2	165.8	795.2		31.34	4.53							
29	JZ-4-S-3	42.95	145.8	5.46	0.87	60	JZCK-11-5-1	185.0	904.0		35.30	5.08							
30	JZ-5-S-1	43.50	170.2	6.43	1.00	61	JZCK-11-5-2	183.8	908.8		35.82	5.13							
31	JZ-5-S-2	42.30	150.5	5.47	0.86														

注:Li、Rb、Cs 数据依据陈文西等,2023^①;ND 表示低于实验检出限,未检出;结则茶卡盐湖卤水 TDS 为 93.86 g/L。

表 2 西藏结则茶卡补给水系与盐湖、盐田卤水 Br、Li、Rb、Cs 质量浓度平均值 (mg/L)

Table 2 The average mass concentration (mg/L) of Br, Li, Rb and Cs in the supply water system, salt lake and salt field brine from Jiezechaka, Xizang (Tibet)

序号	类型	样品数	Br	Li	Rb	Cs
1	河水	3	0.00	0.06	0.00	0.00
2	山边泉水	3	0.00	0.11	0.00	0.00
3	河边泉水	5	0.42	4.21	0.29	0.63
4	盐湖卤水	41	39.94	145.0	5.29	0.84
5	10号盐田	1	85.14	339.2	11.08	1.60
6	3号防渗膜盐田	2	151.6	559.2	21.49	3.12
7	5号防渗膜盐田	2	189.9	671.2	24.71	3.55
8	7号防渗膜盐田	2	165.7	792.8	30.88	4.42
9	12号冻碱池	2	184.4	906.4	35.56	5.10

数。现场对样品进行密封保存用于室内分析测试。

2023年4月12日取当雄错盐湖卤水 191.42 L, 2023年5月6日在扎布耶北湖抽水口, 取卤水 4 桶, 共计 87.42 L。于 2023年4月~6月在当雄错野外观测站, 分别对当雄错、扎布耶盐湖卤水做自然蒸发实验, 取卤水分别放于 5 个塑料盆中, 置于当雄错野外观测站室外的架子上, 此架子高出地面 1 m, 开始自然蒸发, 并取原卤水样。历时 44 d, 扎布耶卤水蒸发试验结束, 自然蒸发时当地日平均温度为 11.1 °C, 其中取液样 23 个; 历时 58 d, 当雄错卤水自然蒸发结束, 自然蒸发时当地日平均温度为 10.4 °C, 其中取液样 28 个(表 5、表 6)。

2.2 样品测试

Br 的测定: 根据标准 (DZ/T0064. 46-2021)。采用溴酚红分光光度法测定 Br 元素质量浓度。实验步骤为取水样 10.0 mL 于 25.0 mL 容量瓶中, 加入乙酸—乙酸铵缓冲溶液 0.5 mL, 在摇动下滴加酚红溶液 3 滴。加氯胺 T 溶液 0.3 mL, 摇匀。静置氧化 1 min (准确记录时间) 后, 立即加入硫代硫酸钠溶液 5 滴, 摇匀。用纯水稀释至刻度, 摇匀。放置 5 min 后, 于分光光度计 590 nm 波

长处, 用 5 cm 比色杯, 以试剂空白作参比, 测量吸光度。本方法定量限为 0.10 mg/L, 测定范围为 0.10 ~ 2.0 mg/L, 溴质量浓度高于此范围可稀释后测定。实验仪器为紫外可见分光光度计, 型号为上海元析 UV-8000T。

样品分析测试在中国地质科学院矿产资源研究所完成。

3 西藏盐湖卤水及蒸发过程中溴含量特征

3.1 西藏盐湖卤水中 Br 含量

3.1.1 西藏典型盐湖卤水中 Br 含量特征

西藏盐湖卤水中溴质量浓度为 0.11 ~ 187.0 mg/L (表 7)。其中扎布耶北湖卤水中 Br 质量浓度为 153.5 ~ 216.8 mg/L (平均为 187.0 mg/L); 扎布耶南湖卤水中 Br 质量浓度为 105.2 ~ 272.8 mg/L (平均为 177.8 mg/L) (表 3、表 7), 且都高于扎布耶盐湖锂矿床液体矿 Br 的边界品位 (100 mg/L)。当雄错盐湖卤水中 Br 质量浓度为 74.0 ~ 130.0 mg/L (平均为 106.6 mg/L) (表 3、表 7), 达到扎布耶盐湖锂矿床液体矿 Br 的边界品位 (100 mg/L)。扎布耶、当雄错两个盐湖为长观卤水样品溴的数据, 1 年中, 扎布耶北湖与南湖在 10、11 月份溴质量浓度最

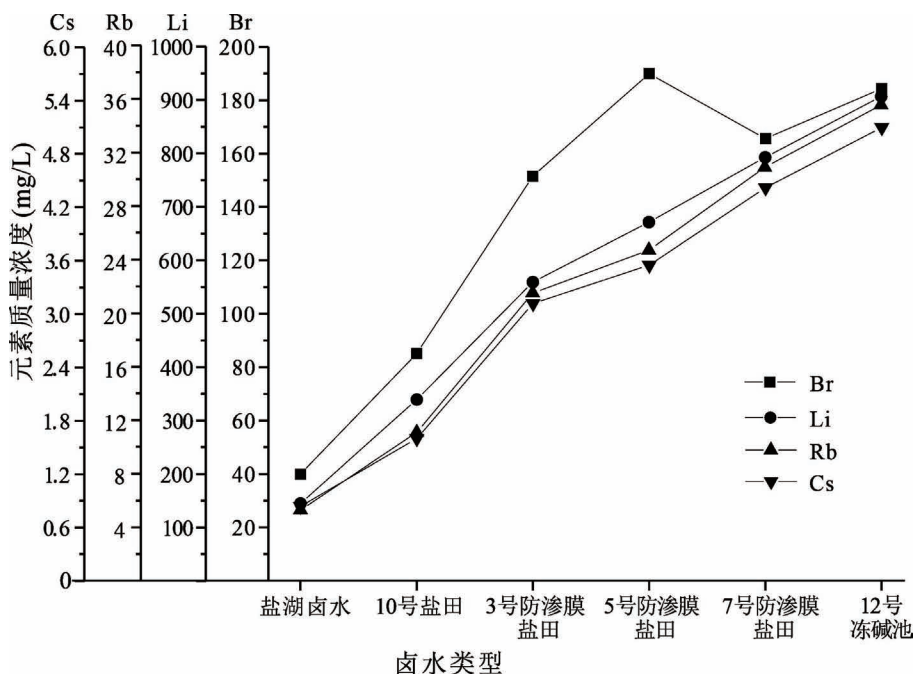


图 4 西藏结则茶卡不同盐田卤水中 Br、Li、Rb、Cs 质量浓度 (mg/L)

Fig. 4 The mass concentration (mg/L) of Br, Li, Rb and Cs in different salt fields brine of Jiezechaka, Xizang (Tibet)

序号	编号	盐湖名称	样号	Br	Li	Rb	Cs	TDS (g/L)	采样日期	序号	编号	盐湖名称	样号	Br	Li	Rb	Cs	TDS (g/L)	采样日期	
38			MMC-1-1	23.7	667	18.74	18.43			112		当雄错南	DXHU01220515	79.40	263.6	41.57	1.37		2022-05-15	
39			MMC-2-1	44.6	644	19.26	18.72			113			DXHU01220601	116.4	257.9	19.46	0.65		2022-06-01	
40	12	麻米错	MMC-3-1	53.3	685	18.94	18.73	104.3	2023-07-05	114			DXHU01220615	93.6	263.0	19.78	0.66		2022-06-15	
41			MMC-4-1	53.7	659	19.34	19.06			115			DXHU01220701	122.4	264.1	16.92	0.57		2022-07-01	
42			MMC-5-1	41.3	678	18.94	18.74			116			DXHU01220715	113.2	271.6	18.18	0.60	126.7	2022-07-15	
43	13	吓嘎错	XGC-1-1	30.1	1.48	0.08	0.03	14.83	2023-07-08	117			DXHU01220801	89.6	256.8	17.55	0.58		2022-08-01	
44			JK-1-1	34.4	229.9	4.47	1.83			118			DXHU01220815	130.0	285.4	19.33	0.66		2022-08-15	
45			JK-2-1	34.7	226.1	4.16	1.79			119			DXHU01221118	95.8	275.6	18.81	0.63		2022-11-18	
46	14	基布 茶卡	JK-3-1	36.2	226.6	4.11	1.75	42.14	2023-07-05	120			DXHU01221201	95.2	286.0	18.45	0.61		2022-12-01	
47			JK-4-1	38.0	223.4	4.34	1.81			121			DXHU01221212	109.4	265.8	18.91	0.64		2022-12-12	
48			JK-5-1	36.0	225.0	4.00	1.71			122			DXHU02220101	106.4	297.8	19.55	0.66		2022-01-01	
49			JK-6-1	21.6	226.1	4.03	1.73			123			DXHU02220115	112.8	298.4	20.69	0.69		2022-01-15	
50			LGC-1-1	46.2	240.7	8.82	11.40			124			DXHU02220201	114.4	313.4	20.25	0.68		2022-02-01	
51			LGC-2-1	54.2	236.9	8.30	11.31			125			DXHU02220215	119.6	276.7	19.10	0.64		2022-02-15	
52			LGC-3-1	45.4	244.0	8.91	11.84			126	24		DXHU02220301	118.8	292.5	19.86	0.66		2022-03-01	
53			LGC-4-1	48.0	228.8	7.51	10.04			127			DXHU02220315	123.2	272.1	17.96	0.60		2022-03-15	
54	15	拉果错	LGC-5-1	44.0	246.2	8.48	11.50	47.92	2023-07-04	128			DXHU02220401	120.6	272.1	19.59	0.65		2022-04-01	
55			LGC-6-1	41.2	216.0	7.51	10.43			129			DXHU02220415	121.4	273.3	17.90	0.61		2022-04-15	
56			LGC-7-1	44.8	238.5	8.40	11.24			130			DXHU02220501	119.4	263.6	19.17	0.63	133.3	2022-05-01	
57			LGC-8-1	50.0	228.2	8.17	10.98			131			DXHU02220515	124.8	265.3	18.18	0.59		2022-05-15	
58			LGC-9-1	59.6	229.9	8.31	11.54			132			DXHU02220601	125.4	274.4	19.27	0.65		2022-06-01	
59			LGC-10-1	53.0	241.3	8.43	11.73		2023-07-05	133			DXHU02220615	123.2	265.3	18.71	0.63		2022-06-15	
60			ZBHU01220107	177.7	494	30.07	8.97		2022-01-07	134			DXHU02220701	128.4	277.9	20.19	0.68		2022-07-01	
61			ZBHU01220216	187.2	537.5	28.69	8.51		2022-02-16	135			DXHU02220715	114.8	267.6	18.96	0.64		2022-07-15	
62			ZBHU01220317	153.5	502	26.02	7.90		2022-03-17	136			DXHU02220801	124.6	268.1	19.77	0.67		2022-08-01	
63			ZBHU01220328	176.8	473.5	25.99	7.75		2022-03-28	137			DXHU02220815	99.4	275.0	19.89	0.67		2022-08-15	
64			ZBHU01220412	200.9	477.5	27.11	8.11		2022-04-12	138			DXHU02221118	113.2	267.6	19.59	0.66		2022-11-18	
65			ZBHU01220509	157.5	447	25.44	7.45		2022-05-09	139			DXHU02221201	107.6	261.3	19.33	0.64		2022-12-01	
66			ZBHU01220523	164.2	473.5	26.53	7.93		2022-05-23	140			DXHU02221212	95.8	273.3	20.23	0.68		2022-12-12	
67	16	扎布耶 北湖	ZBHU01220608	189.0	491.5	27.86	8.38	239.1	2022-06-08	141	25	当惹雍错	DRYG01	5.94	11.82	0.54	0.05	9.33	2023-07-29	
68			ZBHU01220624	207.3	498	27.76	8.28		2022-06-24	142			DRYG02	5.17	11.18	0.51	0.05		2023-07-15	
69			ZBHU01220713	161.8	512.5	30.42	8.97		2022-07-13	143	26	金措湖	JCH-1-1	26.30	ND	ND	ND	16.83	2023-07-31	
70			ZBHU01222728	167.6	55	31.61	9.39		2022-07-28	144	27	色林错	SLC01	1.69	8.38	0.24	ND	9.31	2023-07-31	
71			ZBHU01222812	201.8	531	29.97	8.77		2022-08-12	145	28	纳木错	NMC	0.11	0.36	ND	ND	1.47	2023-08-01	
72			ZBHU01220823	205.5	527	29.88	8.75		2022-08-23			综合评价指标		50~60						
73			ZBHU0122298	186.9	567	31.82	9.48		2022-09-08			扎布耶盐湖锂矿床液体矿品位		100						
74			ZBHU01222928	200.3	569	33.77	9.69		2022-09-28			工业开采品位		300						

注: * 代表捌千错样品 BQC-2-1 为沉锂卤液; ND 表示低于实验检出限, 未检出; Li、Rb、Cs 数据据赵元艺等, 2023^②; 盐湖编号同表 7、图 1。

表4 西藏扎布耶各级盐田卤水 Br 质量浓度 (mg/L)

Table 4 Br mass concentration (mg/L) of Brine in Zabuye salt field, Xizang (Tibet)

序号	样号	采样位置	Br	平均质量浓度	采样日期
1	ZBY-9-1	一级盐田	543.1	529.7	2023-05-08
2	ZBY-9-2		516.2		
3	ZBY-10-1	二级盐田	523.6	532.7	
4	ZBY-10-2		541.9		
5	ZBY-11-1	三级盐田	584.7	568.8	
6	ZBY-11-2		552.9		
7	ZBY-12-1	四级盐田	807.3	727.2	
8	ZBY-12-2		647.1		
9	ZBY-12-3	五级盐田	607.9	634.9	
10	ZBY-12-4		661.8		
11	ZBY-13-1	六级盐田	628.7	595.1	
12	ZBY-13-2		561.5		
13	ZBY-7-10	太阳池	2083	2032	
14	ZBY-7-11		1982		
15	ZBY-14-1	尾卤池	604.3	608.6	
16	ZBY-14-2		612.8		
综合评价指标			50~60		
扎布耶盐湖锂矿床液体矿边界品位			100		
工业开采品位			300		

注:样号及采样位置与图3中盐田采样点及编号一致

高,分别为 216.8 mg/L 和 272.8 mg/L;当雄错在 7、8 月份溴质量浓度最高,最高为 130.0 mg/L。西藏其他盐湖卤水中 Br 质量浓度大于 50 mg/L 的盐湖还有扎仓茶卡(52.90 mg/L)与聂尔错(52.03 mg/L);Br 质量浓度在 40~50 mg/L 的盐湖有结则茶卡(39.94 mg/L)、捌千错(42.49 mg/L)、麻米错(43.32 mg/L)、拉果错(48.64 mg/L);Br 质量浓度在 30~40 mg/L 的盐湖有色卡执(32.60 mg/L)、嚓勒错(37.60 mg/L)、别若则错(34.2 mg/L)、达热错(32.2 mg/L)、吓嘎错(30.1 mg/L)、基布茶卡(33.48 mg/L)、错锐错(30.10 mg/L)、打加芒错(36.40 mg/L);其余盐湖中 Br 质量浓度低于 30 mg/L,其中纳木错中 Br 质量浓度最低为 0.11 mg/L(表 3,表 7)。

3.1.2 结则茶卡及其补给水系中 Br、Li、Rb、Cs 含量

结则茶卡补给水系河水与山边冷泉中 Br、Rb、Cs 含量很低,低于实验检出限,Li 质量浓度分别为 0.06 mg/L 和 0.11 mg/L;河边热泉中 Br、Li、Rb、Cs 的质量浓度分别为 0.36~0.50 mg/L(平均为 0.42 mg/L)、4.02~4.36 mg/L(平均为 4.21 mg/L)、0.19

~0.65 mg/L(平均为 0.29 mg/L)、0.56~0.78 mg/L(平均为 0.63 mg/L)(表 1,表 2)。结则茶卡盐湖卤水中 Br、Li、Rb、Cs 的质量浓度分别为 29.90~50.50 mg/L(平均为 39.94 mg/L)、126.8~177.8 mg/L(平均为 145.0 mg/L)、4.31~6.74 mg/L(平均为 5.29 mg/L)、0.68~1.06 mg/L(平均为 0.84 mg/L)(表 1、表 2)。

3.2 西藏盐湖卤水蒸发过程中 Br 含量

扎布耶北湖卤水在自然蒸发过程中,原卤中 Br 的质量浓度最低为 90.00 mg/L,到蒸失率为 79% 时,浓缩到 420.0 mg/L,超过工业开采品位(300 mg/L),当蒸发结束蒸失率为 99% 时,Br 的质量浓度最高为 1590 mg/L;当雄错盐湖卤水在自然蒸发过程中,原卤中 Br 的质量浓度最低为 107.4 mg/L,到蒸失率为 84% 时,浓缩到 303.5 mg/L,超过工业开采品位(300 mg/L),当蒸发近于结束蒸失率为 96% 时,Br 的质量浓度最高为 645.0 mg/L。可见扎布耶与当雄错盐湖卤水在自然蒸发过程中,随着蒸失率逐渐增大,Br 的含量有逐渐升高的趋势(表 6,图 6)。

结则茶卡各级盐田卤水中 Br、Li、Rb、Cs 的质量浓度分别为 85.14~189.9 mg/L、339.2~906.4 mg/L、11.08~35.56 mg/L、1.60~5.10 mg/L(表 1,图 4),盐田卤水中的 Br、Li、Rb、Cs 含量明显高于盐湖卤水中含量;扎布耶各级盐田卤水中 Br 质量浓度为 529.7~2032 mg/L(表 4,图 5),盐田卤水中的 Br 质量浓度明显高于盐湖卤水中质量浓度,且超过工

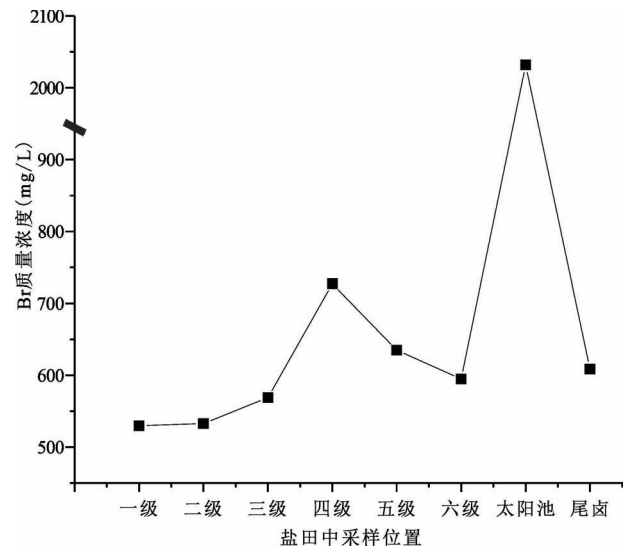


图5 西藏扎布耶不同等级盐田卤水中 Br 含量

Fig. 5 The mass concentration of Br in brine of the different grades of salt fields in the Zabuye Lake, Xizang (Tibet)

表5 西藏扎布耶蒸发卤水 Br、Li、Rb、Cs 质量浓度 (mg/L)

Table 5 Evaporated brine mass concentration (mg/L) of Br, Li, Rb and Cs from the Zabuye Lake, Xizang (Tibet)

序号	样号	蒸发率 (%)	Br	Li	Rb	Cs	采样日期
1	ZBY-0-20230512	0	90.00	548	28.59	8.58	2023-05-12
2	ZBY-1-20230519	25	102.0	741	43.87	12.89	2023-05-19
3	ZBY-2-20230526	49	134.0	520	25.48	7.60	2023-05-26
4	ZBY-3-20230527	54	246.8	590	30.16	8.79	2023-05-27
5	ZBY-4-20230528	58	285.2	601	33.47	9.83	2023-05-28
6	ZBY-5-20230529	61	389.6	670	35.58	10.46	2023-05-29
7	ZBY-6-20230530	66	249.6	685	35.29	10.24	2023-05-30
8	ZBY-7-20230531	68	234.8	714	38.93	11.14	2023-05-31
9	ZBY-8-20230601	71	215.6	767	44.48	12.88	2023-06-01
10	ZBY-9-20230602	75	237.2	891	47.24	13.84	2023-06-02
11	ZBY-10-20230603	79	420	1037	45.99	14.70	2023-06-03
12	ZBY-11-20230604	81	429	1210	46.86	18.88	2023-06-04
13	ZBY-12-20230605	85	468	1184	47.92	19.32	2023-06-05
14	ZBY-13-20230606	86	437	1418	55.17	21.82	2023-06-06
15	ZBY-14-20230607	87	626	1431	57.37	23.02	2023-06-07
16	ZBY-15-20230608	88	391	1404	59.72	24.10	2023-06-08
17	ZBY-16-20230609	89	452	1167	52.16	21.47	2023-06-09
18	ZBY-17-20230610	90	502	1128	62.55	25.54	2023-06-10
19	ZBY-18-20230612	92	519	1266	69.69	23.70	2023-06-12
20	ZBY-19-20230618	97	741	506.0	94.68	34.20	2023-06-18
21	ZBY-20-20230621	98	785	583.0	110.28	42.21	2023-06-21
22	ZBY-21-20230623	98	1278	879.0	155.43	66.56	2023-06-23
23	ZBY-22-20230625	99	1590	1042	224.94	101.4	2023-06-25

表6 西藏当雄错蒸发卤水 Br、Li、Rb、Cs 质量浓度 (mg/L)

Table 6 Evaporated brine mass concentration (mg/L) of Br, Li, Rb and Cs in the Dangxiong Lake, Xizang (Tibet)

序号	样号	蒸发率 (%)	Br	Li	Rb	Cs	采样日期
1	DXL0-20230412	0	107.4	262	19.72	0.65	2023-04-12
2	DXL2-20230419	27	111.8	300	23.79	0.77	2023-04-19
3	DXL3-20230426	40	132.4	424	31.64	1.02	2023-04-26
4	DXL4-20230503	54	262.0	534	44.37	1.42	2023-05-03
5	DXL5X1-20230510	72	143.2	458	34.87	1.15	2023-05-10
6	DXL6X1-20230512	74	133.8	468	36.36	1.20	2023-05-12
7	DXL7X1-20230513	75	150.2	485	38.40	1.27	2023-05-13
8	DXL8X1-20230514	76	142.4	499	41.37	1.33	2023-05-14
9	DXL9X1-20230515	77	162.4	516	41.16	1.36	2023-05-15
10	DXL10X1-20230516	79	161.0	558	47.26	1.53	2023-05-16
11	DXL11X1-20230517	79	238.5	569	45.22	1.44	2023-05-17
12	DXL12X1-20230518	80	156.6	608	45.60	1.44	2023-05-18
13	DXL13X1-20230519	82	273.5	601	48.69	1.56	2023-05-19
14	DXL14X1-20230520	82	120.8	633	47.70	1.68	2023-05-20
15	DXL15X1-20230521	83	148.0	685	51.12	1.63	2023-05-21
16	DXL16X1-20230522	84	250.0	688	50.54	1.84	2023-05-22
17	DXL17X1-20230523	84	303.5	696	51.76	1.82	2023-05-23
18	DXL18X1-20230524	85	290.5	688	49.37	1.74	2023-05-24
19	DXL19X1-20230525	85	264.0	756	45.98	1.95	2023-05-25
20	DXL20X1-20230526	86	279.0	790	46.68	1.99	2023-05-26
21	DXL21X1-20230527	88	362.0	852	49.00	2.12	2023-05-27
22	DXL22X1-20230528	89	367.5	927	53.30	2.29	2023-05-28
23	DXL23X1-20230529	90	368.5	971	58.11	2.54	2023-05-29
24	DXL24X1-20230530	90	393.5	1028	60.38	2.64	2023-05-30
25	DXL25X1-20230531	91	383.5	1082	63.45	2.76	2023-05-31
26	DXL26X1-20230601	92	386.5	1053	68.29	3.05	2023-06-01
27	DXL27X1-20230602	94	352.0	1240	80.14	3.63	2023-06-02
28	DXL28X1-20230604	96	645.0	1727	124.8	6.34	2023-06-04

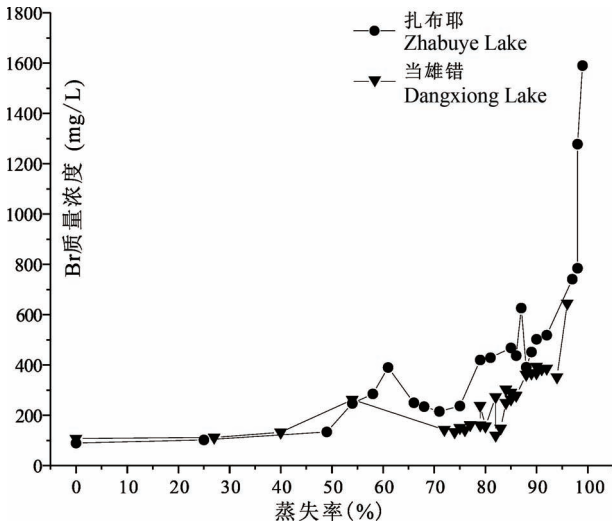


图6 西藏扎布耶与当雄错盐湖卤水自然蒸发过程中 Br 的富集规律

Fig. 6 Concentration rule of Br during natural evaporation of the salt lakes brine from the Zhabuye Lake and the Dangxiong Lake , Xizang (Tibet)

布特征及来源进行了详细研究(Fan Qishun et al. , 2010; Tan Hongbing et al. , 2011; 李玉文等, 2018; 刘溪溪等, 2020; 王春连等, 2020, 2021; Li Jiansen et al. , 2021; 薛燕等, 2022; 蔚昊学等, 2024)。其中四川盆地海相沉积卤水 Br 质量浓度最高, 跨度范围(345~2590 mg/L)较大, 平均质量浓度达到 1436 mg/L; 青海察尔汗盐湖卤水中 Br 质量浓度均超过 40 mg/L, 虽远不及其他盆地地下卤水 Br 含量高, 但其浓缩卤水及老卤中的 Br 质量浓度高于工业开采品位(300 mg/L), 是值得关注的资源(宋华玲等, 2024)。

虽然西藏部分盐湖中溴质量浓度低于溴的综合评价指标(50 mg/L), 如结则茶卡(39.94 mg/L)、色卡执(32.60 mg/L)、麻米错(43.32 mg/L)等, 但是在太阳池技术生产的结则茶卡盐湖盐田中溴的质量浓度为 85.14~189.9 mg/L, 可达到扎布耶盐湖溴的边界品位(100 mg/L)(表 2、表 7)。溴富集盐湖主要分布在西藏的北部及中部, 形成了 5 个高值中心, 从北到南分别为冈玛错(76 mg/L), 玛尔果茶卡(86 mg/L), 才玛尔错(87 mg/L), 扎布耶(北湖 187.0 mg/L、南湖 177.8 mg/L), 当雄错(106.6 mg/L)(图 8)。

另外西藏多数盐湖中富含溴元素, 如扎仓茶卡(52.90 mg/L)、聂尔错(52.03 mg/L)、孔孔茶卡(56.50 mg/L)、玉盘湖(74 mg/L)、茶拉卡错(55 mg/L)、龙木错(66 mg/L)、查那错(59 mg/L)、查波

业开采品位(300 mg/L)。

4 讨论

4.1 西藏盐湖卤水与其他含盐盆地卤水中 Br 的含量对比

前人对中国多个含盐盆地的卤水中溴含量、分

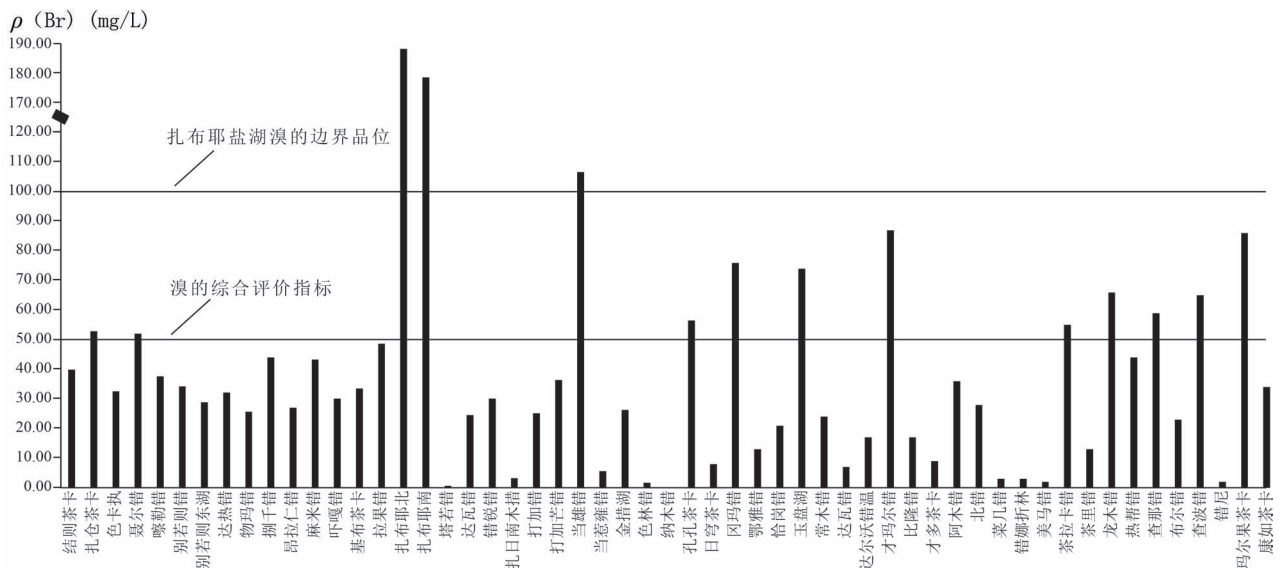


图7 西藏盐湖卤水中 Br 质量浓度 (mg/L)

Fig. 7 Br mass concentration (mg/L) in salt lake brine of Xizang (Tibet)

表 7 西藏盐湖卤水 Br 质量浓度均值 (mg/L)

Table 7 Mean mass concentration (mg/L) of Br in salt lake brine from Xizang (Tibet)

编号	盐湖名称	Br (mg/L)	样品数量	来源	编号	盐湖名称	Br (mg/L)	来源
1	结则茶卡	39.94	41	本 文	30	日穹茶卡	8	曹文虎等,2004
2	扎仓茶卡	52.90	7		31	冈玛错	76	
3	色卡执	32.60	1		32	鄂雅错	13	
4	聂尔错	52.03	6		33	恰岗错	21	
5	噶勒错	37.60	1		34	玉盘湖	74	
6	别若则错	34.20	1		35	加波错	2529	
7	别若则东湖	28.90	1		36	常木错	24	
8	达热错	32.20	1		37	达瓦错	7	
9	物玛错	25.70	1		38	达尔沃错温	17	
10	捌千错	42.49	11		39	才玛尔错	87	
11	昂拉仁错	27.07	6		40	比隆错	17	
12	麻米错	43.32	5		41	才多茶卡	9	
13	吓嘎错	30.10	1		42	阿木错	36	
14	基布茶卡	33.48	6		43	北错	28	
15	拉果错	48.64	10		44	菜儿错	3	
16	扎布耶北	187.0	19		45	错娜折林	3	
17	扎布耶南	177.8	16		46	美马错	2	
18	塔若错	0.70	2		47	茶拉卡错	55	
19	达瓦错	24.60	1		48	茶里错	13	
20	错锐错	30.10	1		49	卡错	5000	
21	扎日南木措	3.27	2		50	龙木错	66	
22	打加错	25.20	1		51	热帮错	44	
23	打加芒错	36.40	1		52	查那错	59	
24	当雄错	106.6	38		53	布尔错	23	
25	当惹雍错	5.56	2		54	查波错	65	
26	金措湖	26.30	1		55	错尼	2	
27	色林错	1.69	1		56	玛尔果茶卡	86	
28	纳木错	0.11	1		57	康如茶卡	34	
29	孔孔茶卡	56.50	29	崔金宝等,2023 ^⑥				

注:序号 34 加波错与序号 48 卡错 Br 质量浓度可能有误,本文未使用该数据。

表 8 西藏结则茶卡河边泉流速及流量

Table 8 Flow rate and discharge of river spring in Jiezechaka, Xizang (Tibet)

序号	测量长度(m)	时间(s)	平均时间(s)	宽度(m)	平均宽度(m)	水深(cm)			平均水深(m)	平均流速(m/s)
1	5	14.8		1.6		9	9	6		
2	5	15.01	15.36	1.57	1.71	7	8	10	0.09	0.33
3	5	16.28		1.94		12	10	8		

错(65 mg/L)8个盐湖卤水溴质量浓度高于溴的综合评价指标(50 mg/L)(表7,图7)。

4.2 西藏盐湖卤水中 Br 等组分的来源

前人未对结则茶卡盐湖 Br、Li、Rb、Cs 元素来源给予关注,本文通过对泉水、河水、盐湖卤水水化学和 Br、Li、Rb、Cs 元素含量分析及现代水文补给过程进行了系统研究(图2,图4),河边温泉中 Br、Rb、Cs 的元素质量浓度在同一数量级,Li 元素质量浓度较高,均值分别为 0.42 mg/L、4.21 mg/L、0.29 mg/L、0.63 mg/L,Cs 的质量浓度高于 Rb 的质量浓度(表2);而山边冷泉及未受温泉影响的清水河中 Br、Rb、

Cs 元素含量极低,低于检测限;结则茶卡盐湖卤水中 Br、Li、Rb、Cs 元素质量浓度均值分别为 39.94 mg/L、145.0 mg/L、5.29 mg/L、0.84 mg/L,Cs 的质量浓度低于 Rb 的质量浓度(表2)。可见结则茶卡盐湖卤水中 Br、Li、Rb、Cs 的主要补给来源为河边热泉,其中 Br、Rb、Cs 大约有 99% 的补给来源为河边温泉,其流量为 0.05 m³/s,年流量约 1576800 m³(表8),每年补给至湖区的 Br、Li、Rb、Cs 资源量分别为 0.66 t、6.64 t、0.46 t、0.99 t,经清水河携载汇入结则茶卡盐湖富集。截止到目前,结则茶卡盐湖面积为 118.16 km²,平均水深为 16.55 m,可算出结则茶

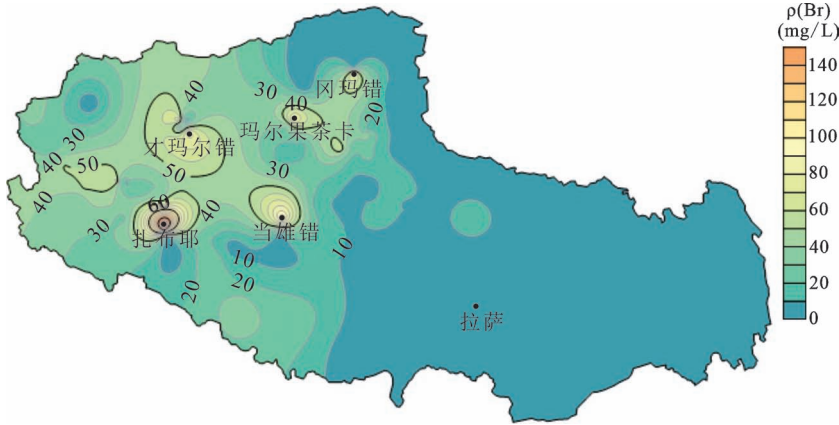


图8 西藏盐湖 Br 质量浓度等值线图(数据据表7;部分数据据蔚昊学等,2024)

Fig. 8 Contour map of mass concentration of Br in salt lake of Xizang (Tibet) (data are presented in Table 7; partial data according to Wei Haoxue et al., 2024&)

卡盐湖中溴的资源量为 78 kt(陈文西等,2023^①),如今藏北盐湖是由西藏古大湖演变而来,该古大湖最早形成时间约 10×10^4 a(赵希涛等,2002;朱大岗等,2004),按照河边泉的补给计算,符合结则茶卡溴的富集时间。结则茶卡盐湖溴、锂、铷元素补给量与湖水元素资源量之间存在巨大的差别,但铯元素含量相比于温泉并未明显富集,并且铷、铯元素质量浓度远低于锂元素质量浓度(表2,图9)。可见在湖水蒸发浓缩过程中,大量的铷、铯可能富集于湖区沉积物中,这与前人研究结论具有较好的一致性(郑喜玉等,1988;郑绵平等,1989;维洋冰等,2017;李庆宽等,2023)。

4.3 西藏盐湖卤水中 Br 的富集规律及开发建议

4.3.1 扎布耶南湖与北湖盐湖卤水中 Br 的含量特征及富集规律

扎布耶北湖卤水中 Br 的平均质量浓度为 187.0 mg/L,扎布耶南湖卤水中 Br 的平均质量浓度为 177.8 mg/L(表7)。可看出扎布耶北湖卤水中的 Br 质量浓度高于扎布耶南湖水中质量浓度。其原因可能为扎布耶南湖为半干盐湖,分为湖底卤水和地表卤水,湖底卤水还可再分为晶间卤水和“淤泥”卤水;北湖为盐水湖,以地表卤水为主,湖底广布淤泥卤水,在其南滨还有薄层盐类沉积,而赋有少量晶间卤水。而扎布耶盐湖卤水矿化度以南湖晶间卤水最高,此时,卤水中一部分的溴,以类质同像的形式替代氯化物的氯而进入固相的氯化物(主要为石盐和钾石盐)中,所以北湖卤水中的 Br 含量比南湖更高(郑绵平等,1989)。

4.3.2 扎布耶与当雄错盐湖卤水蒸发过程中 Br 的含量特征及变化

扎布耶与当雄错盐湖卤水中溴在整个蒸发过程中是一个富集的过程(图6),至蒸发结束,扎布耶盐湖卤水母液中溴的浓度由原卤的 90.00 mg/L 浓缩到 1590 mg/L,浓缩了 17.7 倍,而当蒸失率为 79% 时,浓缩到 420.0 mg/L,已经超过工业开采品位(300 mg/L)。当雄错盐湖卤水母液中溴的浓度由原卤的 107.4 mg/L 浓缩到 645.0 mg/L,浓缩了 6 倍,当蒸失率为 84% 时,浓缩到 303.5 mg/L,超过工业开采品位(300 mg/L)。当自然蒸发快要结束时,

溶液中有部分溴进入固相的氯化物中,这是由于溴与氯同为卤族元素,离子半径相近,溴为 0.196 nm,氯为 0.18 nm,故溴易以类质同像的形式替代氯化物的氯而进入卤水蒸发后期的石盐和钾石盐中(郑绵平等,2007),所以在自然蒸发结束之前,母液中的溴含量有一段降低的过程。当蒸失率在 80% 左右时,残卤中溴的含量即可达到溴的工业开采品位要求(300 mg/L)。

4.3.3 盐田卤水与蒸发过程中 Br 的含量特征及变化

结则茶卡盐田卤水中 Br 含量明显高于盐湖卤水,并且从泥田到更高等级的膜田卤水中锂、铷、铯含量表现出相同的富集趋势,而溴含量虽有富集的趋势,但在 5 号膜田中达到含量最高值(表2,图4)。说明 Br 与 Li、Rb、Cs 在卤水蒸发过程中具有不同的富集趋势。10 号泥田之后的卤水溴质量浓度高于溴的综合评价指标(50 mg/L),3 号膜田以后的盐田卤水溴质量浓度高于扎布耶盐湖溴的边界品位(100 mg/L),湖水铷质量浓度高于扎布耶盐湖卤水边界品位(3 mg/L)的要求,10 号泥田及以后的盐田卤水的铯质量浓度高于扎布耶盐湖的边界品位(1 mg/L)。

扎布耶太阳池生产过程中,卤水中的溴最高为太阳池中 2032 mg/L,各级盐田溴质量浓度为 529.7 ~ 2032 mg/L(表4),平均为 779 mg/L,超过溴的工业开采品位要求(300 mg/L)(表4,图9)。

可见在盐湖卤水蒸发过程中处于浓缩阶段,随

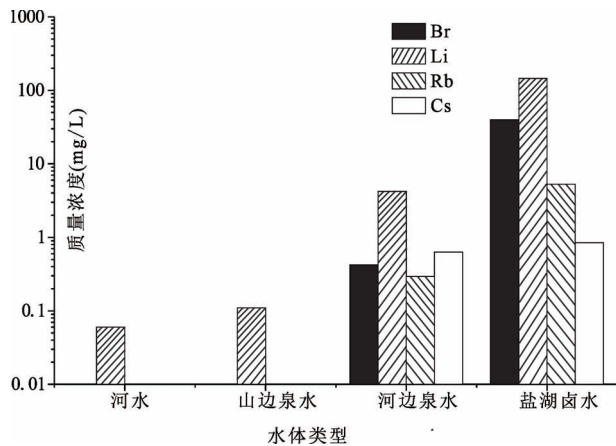


图9 西藏结则茶卡补给水系与盐湖卤水 Br、Li、Rb、Cs 质量浓度

Fig. 9 The mass concentration of Br, Li, Rb and Cs in supply water system and salt lake brine of Jiezechaka, Xizang (Tibet)

着蒸发浓缩,卤水中溴的含量不断增加,这不仅表现在结则茶卡与扎布耶盐田生产及扎布耶与当雄错盐湖卤水的自然蒸发过程中,也应该表现在西藏其他盐湖卤水蒸发过程中溴的含量变化特征。

4.3.4 西藏盐湖卤水中 Br 的开发建议

盐湖卤水在自然蒸发过程中,当蒸失率在 80% 左右时溴的质量浓度即可达到溴的工业开采品位要求 (300 mg/L),所以盐湖卤水在自然蒸发到蒸失率为 80% 时,便可对残卤进行溴的提取。另外通过盐田卤水蒸发方法可以提高盐湖卤水中溴的质量浓度 (表 2、表 4),以此来达到综合开采的要求,比如在开采结则茶卡盐湖盐田中锂资源的同时可以综合利用盐田中溴、铷、铯资源;在开采扎布耶盐湖盐田中锂资源时,建议对各级盐田特别是太阳池卤水中溴资源进行综合利用。总之,可以看出,尽管盐湖卤水溴含量不及海水和地下卤水高,但其优点在于便于开发利用,所以西藏盐湖及盐田卤水将成为溴资源开发利用的潜在资源。

5 结论

(1) 西藏部分盐湖中富含溴元素,如扎仓茶卡 (52.90 mg/L)、聂尔错 (52.03 mg/L)、孔孔茶卡 (56.50 mg/L)、冈玛错 (76 mg/L)、玉盘湖 (74 mg/L)、才玛尔错 (87 mg/L)、茶拉卡错 (55 mg/L)、龙木错 (66 mg/L)、查那错 (59 mg/L)、查波错 (65 mg/L)、玛尔果茶卡 (86 mg/L) 11 个盐湖卤水溴质

量浓度高于溴的综合评价指标 (50 mg/L);扎布耶北湖 (187.0 mg/L)、扎布耶南湖 (177.8 mg/L)、当雄错 (106.6 mg/L) 盐湖卤水溴质量浓度高于扎布耶盐湖溴的边界品位 (100 mg/L)。1 年中,扎布耶北湖与南湖在 10、11 月份溴质量浓度最高,分别为 216.8 mg/L 和 272.8 mg/L;当雄错在 7、8 月份溴质量浓度最高,最高为 130.0 mg/L。建议对扎布耶与当雄错盐湖溴含量最高的月份进行综合开采。

(2) 西藏多数盐湖卤水中 Br 的主要补给来源可能为区域强烈活动的热泉,结则茶卡盐湖卤水中 Br 大约 99% 的补给来源为河边温泉,经河流携带汇入盐湖中进行富集。

(3) 在盐湖卤水自然蒸发实验过程中,随着蒸失率的增大,Br 的含量有逐渐升高的趋势,从蒸发开始到结束扎布耶盐湖卤水母液中溴的质量浓度由原卤的 90.00 mg/L 浓缩到 1590 mg/L,浓缩了 17.7 倍,而当蒸失率为 79% 时,浓缩到 420.0 mg/L;当雄错盐湖卤水母液中溴的质量浓度由原卤的 107.4 mg/L 浓缩到 645.0 mg/L,浓缩了 6 倍,当蒸失率为 84% 时,浓缩到 303.5 mg/L,所以盐湖卤水在自然蒸发到蒸失率为 80% 时,便可对残卤进行溴的提取。在盐湖盐田卤水蒸发过程中处于浓缩阶段,盐田卤水中 Br 含量如扎布耶各级盐田中溴质量浓度明显高于工业开采品位 (300 mg/L),在开采扎布耶盐湖盐田中锂资源时,建议对其各级盐田特别是太阳池卤水中溴资源进行综合利用。

致谢:本项目在野外样品的采集过程先后得到巴珠、江白曲扎、洛桑多吉、土登多吉四位司机的帮助以及中国地质大学(北京)硕士研究生马殿哲和周潇的大力支持与帮助;样品的分析测试由中国地质科学院矿产资源研究所刘冠男副研究员完成;本文图 1 底图的原文件由中国科学院青海盐湖研究所李庆宽助理研究员提供;在此一并表示衷心的感谢。

注 释 / Notes

- ① 陈文西, 马殿哲, 王新元, 赵元艺. 2023. 西藏结则茶卡和龙木错地下卤水与湖相沉积物中锂资源研究——2023 年度报告. 中国地质科学院矿产资源研究所.
- ② 赵元艺, 孔凡翠, 陈文西. 2023. 青藏高原盐湖铷、铯资源现状与远景评估——2023 年度进展. 中国地质科学院矿产资源研究所, 中国科学院青海盐湖研究所.
- ③ 崔金宝, 叶传永, 赵元艺. 2023. 西藏重点盐湖资源评价. 中国地质科学院矿产资源研究所.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese)

with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

曹文虎, 吴蝉. 2004. 卤水资源及其综合利用技术. 北京: 地质出版社: 1~316.

柴子华, 李明明. 2018. 我国溴工业生产技术与展望. 盐科学与化工, 47(6): 1~4.

公方薪, 董勇, 王泽武, 赵奔腾, 孙跃明, 宗坤. 2017. 溴资源分布及开发概述. 山东化工, 46(20): 50~52.

韩佳欢, 郑绵平, 乜贞, 郭廷峰, 伍倩, 王云生, 崔政东, 丁涛. 2024. 我国深层地下卤水钾、锂资源及其开发前景. 盐湖研究, 32(2): 90~100.

孔维刚, 王登红, 刘喜方. 2021. 溴——变局之关键资源. 自然资源科普与文化, (2): 22~25.

《矿产资源工业要求手册》编委会. 2014. 矿产资源工业要求手册(2014年修订版). 北京: 地质出版社: 1~952.

李庆宽, 王建萍, 樊启顺, 秦占杰, 蔚昊学, 山发寿, 袁秦, 都永生. 2023. 西藏盐湖沉积物: 一种潜在的铷、铯资源. 地质学报, 97(10): 3410~3420.

李玉文. 2018. 柴达木盆地昆特依盐湖富钾卤水地球化学特征及成因. 导师: 山发寿. 西宁: 中国科学院大学硕士学位论文: 1~63.

刘溪溪, 岳鑫, 于小亮, 马喆, 路亮, 张晓冬, 马宗德. 2020. 柴达木盆地西北缘昆特依凹陷的双层钾盐成矿模式特征及成因. 湖泊科学, 32(1): 246~258.

宋华玲, 樊启顺, 李庆宽, 刘万平, 韩光, 韩春梅. 2024. 中国含盐盆地卤水溴元素分布与物源. 地质学报, 98(4): 1198~1210.

田赫, 李迎春, 蔡智奇, 宫青海. 2018. 环保型溴系阻燃剂研究进展. 工程塑料应用, 46(9): 142~147.

王春连, 刘丽红, 李强, 孟令阳, 刘成林, 张媛媛, 王九一, 余小灿, 颜开. 2020. 江西吉泰盆地卤水型锂钾矿物源区岩石地球化学特征及成因分析. 岩石矿物学杂志, 39(1): 65~84.

王春连, 孟令阳, 刘成林, 余小灿, 颜开, 刘思哈, 游超, 栗克坤, 滕晓华. 2021. 江陵凹陷古新世地下卤水型硼成因研究. 岩石矿物学杂志, 40(1): 1~13.

王法. 2012. 卤水提溴吹出液再利用的探讨. 盐业与化工, 41(6): 45~46.

王国强, 冯厚军, 张凤友. 2002. 海水化学资源综合利用发展前景概述. 海洋技术, 21(4): 61~65.

薛燕, 王春连, 刘殿鹤, 王九一, 颜开, 彭琰聪, 高绣纺. 2022. 江汉盆地潜江凹陷王场地区深层卤水水化学特征及成因研究. 地球学报, 43(3): 347~358.

蔚昊学, 李庆宽, 都永生, 秦占杰, 樊启顺, 唐发满, 杨佳忠, 甘仁香, 山发寿, 袁秦. 2024. 青藏高原盐湖卤水中溴的分布特征及来源初探. 湖泊科学, 36(3): 827~835.

余疆江, 郑绵平, 伍倩, 乜贞, 卜令忠. 2013. 卤水溴资源开发利用进展. 现代化工, 33(4): 47~51.

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. 地质学报, 96(6): 2195~2205.

赵希涛, 朱大岗, 吴中海, 马志邦. 2002. 西藏纳木错晚更新世以来湖泊发育. 地球学报, 23(4): 329~334.

郑绵平, 向军, 魏新俊, 郑元. 1989. 青藏高原盐湖. 北京: 北京科学技术出版社: 1~431.

郑绵平. 2001. 论中国盐湖. 矿床地质, (2): 181~189+128.

郑绵平, 邓月金, 乜贞, 卜令忠, 史世云. 2007. 西藏扎布耶盐湖秋季卤水25℃等温蒸发研究. 地质学报, 81(12): 1742~1749.

郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 李秉孝. 2002. 中国盐湖志. 北京: 科学出版社: 1~415.

周潇, 赵元艺, 陈文西. 2024. 青藏高原盐湖铷铯资源现状、富集规

律与提取技术. 地质论评, 70(2): 705~716.

朱大岗, 孟宪刚, 赵希涛, 邵兆刚, 杨朝斌, 马志邦, 吴中海, 王建平. 2004. 西藏纳木错和藏北高原古大湖晚更新世以来的湖泊演化与气候变迁. 中国地质, (3): 269~277.

Bzeih T, Zhang K, Khalaf A, Hachem A, Alami M, Hamze A. 2018. One-pot reaction between N-tosylhydrazones and 2-nitrobenzyl bromide: route to NH-free C2-arylindoles. Journal of Organic Chemistry, 84(1): 228~238.

Cao Wenhui, Wu Chan. 2004 #. Brine Resources and Their Comprehensive Utilization Technology. Beijing: Geological Publishing House: 1~316

Chai Zihua, Li Mingming. 2018#. Domestic manufacturing process and expectation of bromine industry. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 47(6): 1~4.

Fan Qishun, Ma Haizhou, Lai Zhongping, Tan Hongbing, Li Tingwei. 2010. Origin and evolution of oilfield brines from Tertiary strata in western Qaidam basin: Constraints from $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$ and water chemistry. Chinese Journal of Geochemistry, 29: 446~454.

Gao Maosheng, Hou Guohua, Guo Fei. 2016. Conceptual model of underground brine formation in the silty coast of Laizhou Bay, Bohai Sea, China. Journal of Coastal Research, (74): 157~165.

Gong Fangxin, Dong Yong, Wang Zewu, Zhao Benteng, Sun Yueming, Zong Kun. 2017#. Bromine Resources Distribution and Development Research Overview. Shandong Chemical Industry, 46(20): 50~52.

Han Jiahuan, Zheng Mianping, Nie Zhen, Guo Tingfeng, Wu Qian, Wang Yunsheng, Cui Zhengdong, Ding Tao. 2024#. Lithium and potassium resources of oilfield brine and development prospects in China. Journal of Salt Lake Research, 32(2): 90~100.

Li Jiansen, Chen Fukun, Ling Zhiyong, Li Tingwei. 2021. Lithium sources in oilfield waters from the Qaidam basin, Tibetan Plateau: Geochemical and Li isotopic evidence. Ore Geology Reviews, 139: 104481.

Li Qingkuan, Fan Qishun, Wang Jianping, Qin Zhanjie, Zhang Xiangru, Wei Haicheng, Du Yongsheng, Shan Fashou. 2019. Hydrochemistry, distribution and formation of lithium-rich brines in salt lakes on the Qinghai—Tibetan Plateau. Minerals, 9(9): 528.

Kong Weigang, Wang Denghong, Liu Xifang. 2021#. Bromine——A key resource for change. Scientific and Cultural Popularization of Natural, (2): 22~25.

Editorial Committee of the Mineral Resources Industry Requirements Manual. 2014#. Mineral Resources Industry Requirements Manual (2014 Revised Edition). Beijing: Geological Publishing House: 1~952.

Li Qingkuan, Wang Jianping, Fan Qishun, Qin Zhanjie, Yu Haoxue, Shan Fashou, Yuan Qin, Du Yongsheng. 2023#. Rubidium and cesium enrichment in lacustrine sediments from Tibetan salt lakes: A potential resource. Acta Geologica Sinica, 97(10): 3410~3420.

Li Yuwen. 2018#. The geochemical characteristics and origin of the potassium-rich brine from Kuntayi Salt Lake in the Qaidam basin. Supervisor: Shan Fashou. Xining: Master's thesis of the University of Chinese Academy of Sciences: 1~63.

Lin Yongjie, Zheng Mianping, Ye Chuanyong. 2017. Hydromagnesite precipitation in the Alkaline Lake Dujiali, central Qinghai—Tibetan Plateau: Constraints on hydromagnesite precipitation from hydrochemistry and stable isotopes. Applied geochemistry, 78: 139~148.

- Liu Xixi, Yue Xin, Yu Xiaoliang, Ma Zhe, Lu Liang, Zhang Xiaodong, Ma Zongde. 2020&. Characteristics and genesis of the double potash layer metallogenetic model of Kuntayi depression in the northwest margin of Qaidam basin. *Journal of Lake Sciences*, 32(1): 246~258.
- Ma Haiyan, Gong Wei, Yu Hongfa, Sun Wei. 2018. Durability of concrete subjected to dry—wet cycles in various types of salt lake brines. *Construction and Building Materials*, 193: 286~294.
- Song Hualing, Fan Qishun, Li Qingkuan, Liu Wanping, Han Guang, Han Chunmei. 2023&. Distribution and source of bromine in the brines from the salt-bearing basins in China. *Acta Geologica Sinica*, 98(4): 1198~1210.
- Singh N, Duan H, Tang Y. 2020. Toxicity evaluation of E-waste plastics and potential repercussions for human health. *Environment International*, 137: 105559.
- Tan Hongbing, Rao Wenbo, Ma Haizhou, Chen Jiansheng, Li Tingwei. 2011. Hydrogen, oxygen, helium and strontium isotopic constraints on the formation of oilfield waters in the western Qaidam basin, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40: 651~660.
- Tian Cheng, Li Yingchun, Cai Zhigi, Gong Qinghai. 2018&. Research progress on environmental-friendly brominated flame retardants. *Engineering Plastics Application*, 46(9): 142~147.
- Wang Chunlian, Liu Lihong, Li Qiang, Meng Lingyang, Liu Chenglin, Zhang Yuanyuan, Wang Jiuyi, Yu Xiaocan, Yan Kai. 2020&. Petrogeochemical characteristics and genetic analysis of the source area of brine type lithium—potassium ore sources area in Jitai basin of Jiangxi Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(1): 65~84.
- Wang Chunlian, Meng Lingyang, Liu Chenglin, Yu Xiaocan, Yan Kai, Liu Sihan, You Chao, Li Kekun, Teng Xiaohua. 2021&. A study of the genesis of Paleocene underground brine borondeposits in Jiangling depression. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 1~13.
- Wang Fa. 2012&. Discuss on the reutilization of waste solution from bromine extraction. *Journal of Salt and Chemical Industry*, 41(6): 45~46.
- Wang Guoqiang, Feng Houjun, Zhang Fengyou. 2002&. Developmental prospect on multipurpose utilization of sea water chemical resource. *Ocean Technology*, 21(4): 61~65.
- Winid B, Chruszcz-Lipska K, Uliasz-Misiak B, Solecki M L, Fafara Z, Matula R. 2018. Iodine and bromine occurrence in brines of the Fore—Sudetic Monocline. *Przemysl Chemiczny*, 97(6): 914~917.
- Xue Yan, Wang Chunlian, Liu Dianhe, Wang Jiuyi, Yan Kai, Peng Yancong, Gao Xiufang. 2022&. Hydrochemical characteristics and genesis of deep brines in Wangchang area, Qianjiang depression, Jiangnan basin. *Acta Geoscientia Sinica*, 43(3): 347~358.
- Yu Haoxue, Li Qingkuan, Qin Zhanjie, Fan Qishun, Tang Faman, Yang Quanzhong, Gan Renxiang, Shan Fashou, Yuan Qin. 2024&. Distribution characteristics and possible sources of bromine in salt lakes on the Qinghai—Xizang Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 36(3): 827~835.
- Yu Jiangjiang, Zheng Mianping, Wu Qian, Nie Zhen, Piao Lingzhong. 2013&. Development and utilization progress of brine bromine resource. *Modern Chemical Industry*, 33(4): 47~51.
- Yu Shiyong, Liu Meng, Zhao Yuanyi, Zheng Mianping. 2022&. Hydrochemical characteristics of large-scale lithium—boron mine basin in the Mami Co Saline Lake, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 96: 2195~2205.
- Zhang Guoqing, Yao Tandong, Xie Hongjie, Yang Kun, Zhu Liping, Shum C K, Bolch T, Yi Shuang, Allen S, Jiang Liguang, Chen Wenfeng, Ke Changqing. 2020. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms. *Earth-Science Reviews*, 208: 103269.
- Zhao Xitao, Zhu Dagang, Wu Zhonghai, Ma Zhibang. 2002&. The development of Nam Co Lake in Tibet since Late Pleistocene. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(4): 329~334.
- Zheng Mianping, Xiang Jun, Wei Xinjun, Zheng Yuan. 1989&. Saline Lakes on the Qinghai—Tibetan Plateau. Beijing: Beijing Science and Technology Press: 1~431.
- Zheng Mianping. 2001&. On Saline Lakes of China. *Mineral Deposits*, (2): 181~189+128.
- Zheng Mianping, Deng Yujin, Nie Zhen, Bu Lingzhong, Shi Shiyun. 2007&. 25°C-isothermal evaporation of autumn brines from the Zabuye Salt Lake, Tibet, China. *Acta Geologica Sinica*, 81(12): 1742~1749.
- Zheng Mianping, Xin Enyuan, Zhang Xuefei, Li Mingming, Che Dong, Bu Lingzhong, Han Jiahuan, Ye Chuanyong. 2023. Classification and mineralization of global lithium deposits and lithium extraction technologies for exogenetic lithium deposits. *China Geology*, 6(4): 547~566.
- Zheng Xiyu, Zhang Minggang, Xu Chang, Li Bingxiao. 2002&. Salt Lakes in China. Beijing: Science Press: 1~415.
- Zhou Xiao, Zhao Yuanyi, Chen Wenxi. 2024&. Rubidium and cesium resources current status, enrichment pattern and extraction technology in salt lakes of Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau, China. *Geological Review*, 70(2): 705~716.
- Zhu Dagang, Meng Xiangang, Zhao Xitao, Shao Zhaogang, Yang Chaobin, Ma Zhibang, Wu Zhonghai, Wang Jianping. 2004&. Evolution and climatic change of Nam Co of Tibet and an ancient large lake in the northern Tibetan Plateau since the Late Pleistocene. *Geology in China*, 31(3): 269~277.
- Acknowledgements:** This paper is supported by the Second Comprehensive Investigation and Research Project on the Tibetan Plateau "Rubidium and Cesium Resources Status and Prospective Assessment on the Tibetan Plateau Salt Lakes" (No. 2022QZKK0201) and the horizontal project of the Institute of Mineral Resources of the Chinese Academy of Geological Sciences "Research on Dynamic Changes and Resource Potential of Xizang Jiezechaka and Longmucuo Salt Lakes" (No. HE2202)
- First author:** WANG Xinyuan, male, born in 2000, master degree candidate, engaged in mineral deposit geochemistry research; Email: 1366084347@qq.com
- Corresponding author:** CHEN Wenxi, male, born in 1977, doctor, professor-level senior engineer, mainly engaged in investigation and research of sedimentary minerals and sedimentary mineral basins; Email: cwx0616@yahoo.com.cn

Characteristics and significance of change of bromine content in Xizang (Tibetan) salt lakes brine and its evaporation process

WANG Xinyuan^{1,2}), ZHANG Zhiyan³⁾, HUANG Sheng³⁾, CHEN Wenxi¹⁾, LI Shengqun^{1,2)},
CUI Jinbao^{1,2)}, ZHAO Yuanyi¹⁾

1) *Key Laboratory of Salt Lake and Environment, Ministry of Natural Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083;*

3) *Tibet Guoneng Mining Development Co., Ltd., Lhasa, 850000*

Objectives: Bromine is one of the important chemical raw materials in China, with important research and application value in environmental science and industrial fields. In recent years, with the bullish market of chemical products such as bromine flame retardants and bromine salts, the demand for bromine will continue to grow. The chemical composition of brine in Xizang (Tibetan) Salt Lakes has always attracted much attention, of which the content of bromine (Br) is also an important indicator. However, at present, there is little research on the distribution of bromine (Br) in Xizang (Tibetan) Salt Lakes and the content characteristics and significance of bromine in the evaporation process.

Methods: This paper takes Xizang (Tibetan) Salt Lakes as the research object, studies the content characteristics of bromine in brine, and discusses its changes in the evaporation process.

Results: The bromine mass concentration in the brine of Xizang (Tibetan) Salt Lakes is 0.11~187.0 mg/L, and most of the salt lakes are rich in Br, such as Zhacangchaka (52.90 mg/L) and Nieercuo (52.03 mg/L), whose Br mass concentration is higher than the comprehensive evaluation index of bromine (50 mg/L); the Br mass concentration in the brine of the Zhabuye North Lake (187.0 mg/L), the Zhabuye South Lake (177.8 mg/L), and the Dangxiong Salt Lake (106.6 mg/L) is higher than the boundary grade of bromine in the Zhabuye Salt Lake (100 mg/L). Within a year, the Zhabuye North Lake and the South Lake have the highest bromine mass concentration in October and November, with 216.8 mg/L and 272.8 mg/L, respectively; In July and August, the highest bromine mass concentration was found in the Dangxiong Lake, with a maximum of 130.0 mg/L.

Conclusions: The main supply source of Br supply in most salt lake brine is strongly active hot springs, which converge through river water and accumulate in salt lake brine. Among them, about 99% of Br supply in Jiezechaka salt lake brine comes from riverside hot springs; although the Br content in salt lake brine is far lower than that in seawater, the Br mass concentration in salt field brine, such as in various levels of salt fields in the Zhabuye Lake, is significantly higher than the industrial extraction grade (300 mg/L). During the natural evaporation and concentration process of brine, the content of Br gradually increases with the increase of evaporation rate. The mass concentration of bromine in the brine of the Zhabuye Salt Lake increases from 90.00 mg/L of the original brine to 420.0 mg/L when the evaporation rate is 79%; when the mass concentration of bromine in the brine of the Dangxiong Salt Lake increased from 107.4 mg/L of the original brine to a evaporation loss rate of 84%, it was concentrated to 303.5 mg/L. Salt lakes and salt field brine with high bromine content are potential resources for the comprehensive development and utilization of bromine.

Keywords: Tibet; salt lake; bromine content; brine; distribution pattern; evaporation process

Manuscript received on: 2024-07-07; Accepted on: 2024-10-20; Published online on: 2025-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.062

Edited by: LI Ming, ZHANG Yuxu

