

西藏典型深水盐湖——龙木错地表卤水锂等组分空间分布、动态变化与控制因素*

赖礼兴¹ 叶传永^{2,3*} 黄圣⁴ 张智彦⁴ 赵元艺^{2,3} 王新元¹ 崔金宝¹ 杜光绪¹ 陈庆¹ 陈文西^{2,3*}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
2. 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;
3. 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部青藏高原盐湖野外科学观测研究站, 北京 100037;
4. 西藏国能矿业发展有限公司, 阿里 859700)

摘要 锂、硼、钾等战略性关键矿产在全球能源转型与高新技术领域具有不可替代的地位, 然而, 深水盐湖中多元素协同富集机制及其动态变化的驱动因素仍缺乏系统研究。。西藏龙木错盐湖作为典型的高海拔深水盐湖, 其卤水以富集锂(Li)、硼(B)、钾(K)、铷(Rb)、铯(Cs)为特征, 为揭示上述机制提供了理想研究对象。本研究通过2 km×2 km 网格采样, 结合水文-气候模型, 分析了2024年龙木错盐湖地表卤水中LiCl、B₂O₃、KCl、Rb₂O、Cs₂O的空间分布与垂向分异规律, 并探讨了2009–2024年间LiCl、B₂O₃、KCl含量动态变化的驱动因素。研究表明: 2024年龙木错盐湖卤水LiCl、B₂O₃、KCl平均含量分别为620.07 mg/L、441.44 mg/L和5.12 g/L; 垂向分异显著, 深层(>30 m) LiCl含量较表层(0–10 m)提升7.50%, Rb₂O、Cs₂O同步富集, 温跃层阻滞与缺氧环境是主要影响因素。平面上, 盐湖东部因蒸发浓缩作用形成LiCl、KCl高值区, 西北部受泉水稀释(年均流量3.41 m³/s)影响浓度降低; Rb₂O、Cs₂的分异则主要受黏土矿物吸附与热液输入控制。龙木错盐湖资源元素分布受“高海拔极端气候-板块构造-热液活动”三重耦合驱动, 垂向分异主要由物理阻隔影响, 平面分异受水文-地形差异控制。2009-2024年间, LiCl、KCl和B₂O₃含量分别下降21.87%、24.81%和28.83%, 冰川融化、泉水输入和降水补给是主要影响因素。该盐湖多元素协同富集机制为西藏盐湖资源高效开发提供了科学依据, 对缓解我国锂资源对外依存度具有重要战略意义。

关键词: 锂; 盐湖卤水; 深水盐湖; 控制因素; 西藏龙木错盐湖

Spatial distribution, dynamics and controlling factors of Lithium and other components in the surface brine of Longmu Co deep salt lake in Tibet, China

Lai Lixing¹, Ye Chuanyong^{2,3}, Huang Sheng⁴, Zhang Zhiyan⁴, Zhao Yuanyi^{2,3}, Wang Xinyuan¹, Cui Jinbao¹, Du Guangxu¹, Chen Qing¹ & Chen Wenxi^{2,3}

(1; China University of Geosciences(BeiJing), BeiJing 100083, P.R.China

(2; Key Laboratory of Salt Lake and Environment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, P.R.China

(3; Observation and Research Station, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, P.R.China;

4; Xizang Guoneng Energy Mining Development Co., Ltd, Ngari 859700, P.R.China)

*2025-07-26 收稿; 2025-10-23 收修改稿。

第二次青藏高原综合科学考察研究专题(2022QZKK0201)、中国地质调查项目(DD20230203601)联合资助。

**通信作者; E-mail: chuanyongye@163.com。

Abstract: Lithium, boron, and potassium are strategic critical minerals with irreplaceable roles in the global energy transition and high-tech industries. However, the mechanisms underlying multi-element co-enrichment in deep-water salt lakes and the driving factors of their dynamic changes remain poorly understood. As a typical high-altitude deep-water salt lake in Tibet, Longmu Co Salt Lake is characterized by the enrichment of lithium (Li), boron (B), potassium (K), rubidium (Rb), and cesium (Cs) in its brine, making it an ideal system for investigating these mechanisms. Based on 2 km×2 km grid sampling and hydroclimatic modeling, this study analyzed the spatial distribution and vertical differentiation of LiCl, B₂O₃, KCl, Rb₂O, and Cs₂O in the surface brine of Longmu Co Salt Lake in 2024 and explored the drivers of LiCl, B₂O₃, and KCl content dynamics from 2009 to 2024. The results indicated that in 2024, the average concentrations of LiCl, B₂O₃, and KCl in the brine were 620.07 mg/L, 441.44 mg/L, and 5.12 g/L, respectively. Significant vertical differentiation was observed, with LiCl content in the deep layer (>30 m) being 7.50% higher than in the surface layer (0–10 m). Rb₂O and Cs₂O also showed synchronous enrichment, primarily influenced by the thermocline barrier and anoxic conditions. Spatially, evaporative concentration led to high-value zones of LiCl and KCl in the eastern part of the lake, while spring discharge (average annual flow 3.41 m³/s) diluted concentrations in the northwest. The distribution of Rb₂O and Cs₂ was mainly controlled by clay mineral adsorption and hydrothermal inputs. Overall, elemental distribution in Longmu Co Salt Lake is driven by the tripartite coupling of “high-altitude extreme climate – tectonic plate activity – hydrothermal processes,” with vertical differentiation governed by physical barriers and planar differentiation shaped by hydrologic and topographic variability. From 2009 to 2024, the contents of LiCl, KCl, and B₂O₃ decreased by 21.87%, 24.81%, and 28.83%, respectively, largely due to glacier meltwater, spring inflow, and precipitation recharge. The multi-element co-enrichment mechanism elucidated here provides a scientific basis for the efficient development of salt lake resources in Tibet and holds strategic importance for reducing China’s dependence on imported lithium resources.

Keywords: Lithium; salt lake brine; deep lake; Controlling factors; Longmu Co Salt Lake

锂、硼、钾作为战略性关键矿产资源，以及铷、铯等重要战略资源，在全球能源转型和高新技术产业中具有不可替代的地位。锂是新能源电池的核心原料，硼广泛应用于核工业与新材料领域，钾是农业和化工的基石，而铷、铯则在量子技术、航天推进器等尖端领域展现出巨大潜力^[1-5]。我国是个多盐湖的国家，共有盐湖 1500 多个^[6]。截至 2024 年，中国已探明且具备经济开采价值的盐湖数量超过 150 个。全球范围内，锂资源需求因新能源汽车的爆发式增长持续攀升，预计 2030 年需求量将达 256 万吨碳酸锂当量^[7]，中国作为最大消费国，对外依存度高达 80% 以上，资源安全形势严峻。

西藏地区盐湖资源较为丰富并且是我国锂资源的重要赋存区^[8]，但由于地理气候等条件的限制，锂、钾产业化开发进程较慢^[9]。前人对西藏盐湖开展了大量研究^[10-13]，但在以下三方面仍存在不足：（1）垂向与平面分异机制：深水盐湖的锂等组分元素的垂向与平面分布？（2）多元素协同机制：Li、B、K 与 Rb、Cs 的地球化学行为差异显著，其平面分异受控于什么影响因素？（3）动态变化驱动因素：水体体积扩张与稀释效应对资源潜力的影响机制如何？

龙木错盐湖作为高寒深水盐湖的典型代表，其水深远超一般深水湖 6 m 的定义标准，该湖地表卤水以富集锂、硼、钾、铷、铯其特征，水文过程主要受冰川融水与泉水补给控制，对气候变化响应敏感，是探究多矿种盐湖动态变化规律、解析多因素驱动效应的理想天然实验室。本文通过对龙木错盐湖卤水进行定深、定点网格采样与测试，研究锂等组分垂向-平面分布特征，查明其动态变化规律，揭示控制因素。对深入认识该盐湖资源特征有重要意义。

1 地质背景

龙木错盐湖位于西藏西北缘阿里地区日土县，地理坐标 34°34′–34°39′N、80°20′–80°32′E，是西藏海拔最高的盐湖之一，湖面海拔 5002.0 m，处于羌塘地块与冈底斯地块构造过渡带的典型深水盐湖。该区域受龙木错-双湖缝合带与班公湖—怒江结合带西段控制，深大断裂发育，构造活动频繁，为盐湖的形成与演化提供了独特的动力背景。

龙木错盐湖能形成并维持平均水深 34.01 米、最大水深 72 米的深水环境，主要受以下地质-水文因素协同控制：构造上，该湖位于龙木错-双湖缝合带与班公湖-怒江结合带西段交汇处，新生代以来青藏高原的强烈隆升与地壳伸展作用导致湖盆基底持续沉陷，形成构造洼地，为深水环境提供了巨大的容纳空间；岩性上，湖盆基底由古生代至新生代沉积岩构成，北部出露古生代灰色厚层砾岩，南部发育早二叠世粉砂质泥岩与花岗闪长岩侵入体，第四系覆盖层以湖相蒸发盐类（石盐、芒硝）为主，局部发育冲洪积砂砾层（图 1），这些致密地层和蒸发岩层共同构成有效隔水层，显著减少卤水下渗损失，为维持深水环境提供了重要物质基础；水文上，尽管湖区蒸发强烈，但其汇水面积达 614.2 km²，主要接受冰川融水通过地下径流和西北侧泉水的稳定补给，形成动态平衡，使湖泊能长期维持深水环境而不退化为浅水盐湖或干盐滩。

地层分布与岩性特征表明，龙木错盆地的形成受该区域的沉积可能更多地受新特提斯洋打开和扩张的影响。晚侏罗世（J₃）生物碎屑灰岩与早侏罗世（J₁）砂砾屑微晶灰岩的广泛分布，表明该区域曾经历浅海陆棚至碳酸盐台地沉积环境。第四纪以来，高原隆升导致湖盆封闭，冰川融水与泉水补给主导水文循环，形成以地下水为核心的补给体系。湖底沉积物以灰黄色含细砾细砂粘土层为主，含石盐、芒硝及微量碳酸盐矿物，有机质含量极低，反映高寒干旱环境下强烈的化学沉积作用。

龙木错的水文-气候条件对其成矿作用具有决定性影响。本次观测结果表明，湖区年均气温-8.0℃，年降水量 75-100 mm，蒸发量高达 1200-1500 mm，强烈的蒸发-浓缩作用驱动卤水中 Li、B、K 等元素的富集。龙木错盐湖处于内流水系（图 1），汇水盆地面积 614.2 Km²，冰川融水通过地下径流补给湖泊，西北侧泉水输入显著，而地表径流不发育。

2 样品采集、测试与研究方法

2.1 样品采集

2024 年 3 月，参照《矿产地质勘查规范 盐类 第 2 部分：现代盐湖盐类》（DZ/T 0212.2—2020）勘查规范^[6]，对龙木错盐湖卤水采用 2 Km×2 Km 网格进行分层取样。先用华测 D270 便携式测深仪测量卤水深度，水深小于 1 m 时，采集 0.5 m 处样品；水深大于 1 m 时，采集表层（1 m）、中层（1/2 水深）和底层（湖底以上约 0.5 m）样品。使用盐湖卤水定深取样器进行取样（图 2a,b）。取样室，先保持阀门关闭，将取样器下放至测绳指示的目标深度，再拉动绳绳打开阀门取样。此流程有效避免了在下降过程中不同层位卤水的混合，确保所取样品完全来自目标水层，该取样器操作简便、取样效率高，在取样过程对卤水扰动小，各层位卤水混合较少，确保了实验数据的可靠性^[17]。在 25 个采样点共采集卤水样品 74 件（图 1c）。采样过程中精确记录采样点的经度、纬度、水深和样号。样品统一使用 500 mL 洁净容器装集（图 2），装瓶时去除气泡并用蜡烛封口，存放于阴凉避光处。

2.2 测试方法

采用等离子体发射光谱法（ICP-OES）测定 Li⁺、B₂O₃、K⁺含量；采用等离子体质谱法（ICP-MS）测定 Rb⁺、Cs⁺含量。测试方法符合 DZ/T 0130-2006《地质矿产实验室测试质量管理规范》，样品重复样合格率达 92.0% 以上。样品测试在河北冶金一局实验室完成。

2.3 湖表卤水面积计算方法

在地理空间数据云（<https://www.gscloud.cn/>）下载 Landsat 9 遥感影像（2024-04-11），经过大气校正、辐射定标后，计算 $NDWI = \frac{\text{float}(\text{band3} - \text{band5})}{(\text{band3} + \text{band5})}$ ，并进行重分类和裁剪处理，根据影像分辨率计算得到湖泊面积为 110.76 Km²。

2.4 数据处理与综合分析

将龙木错盐湖的锂等组分平均含量与最低工业品位、西藏扎布耶盐湖边界品位、柴达木盐湖平均值等进行对比分析，计算倍数关系。

在空间平面分异研究方面，利用 Origin 软件对采样点的元素含量数据进行空间插值，生成锂等组分含量的空间分布图。运用 SPSS26 软件对元素含量数据进行聚类分析，通过谱系图确定组分之间的相关性，将组分划分为不同组别。



图2 龙木错盐湖野外工作现场照片图(a:卤水定深采样, b:采集卤水样品, c:龙木错盐湖南侧被淹盐田, d:龙木错盐湖南侧气象观测站

Fig.2: Fieldwork site photos of Longmu Co Salt Lake (a-Fixed-depth brine sampling, b-Brine sample collection, c-Flooded salt pans on the south side of Longmu Co salt lake, d-Meteorological observation station on the south side of Longmu Co salt lake)

本研究结合多种方法探讨了控制因素。通过分析温跃层的水文地质特征, 研究其对锂等组分垂向分异的影响。结合地球化学行为分析, 探讨元素在不同环境条件下的溶解度和吸附性; 通过监测泉水补给流量、成分以及沉积物的地球化学特征, 分析水文-沉积过程对元素含量变化的影响, 收集青藏高原地区的气候数据, 探讨气候变化对盐湖水体体积和锂等组分含量的驱动作用。

3 结果

3.1 水深

龙木错盐湖地表卤水实测水深数据表明, 其最大深度为 72 m (点号 27L), 平均水深 34.01 m (表 1, 表 2)。区域水深分布呈现显著空间异质性: 西部坡度较缓 (水深变化范围 0 - 30m), 东南部与东北部坡度陡峭 (水深差异达 72 m), 其中 >50m 深水区占湖区总面积的 18.7%。25 个采样点中, 15 个点位水深 >30m, 占比 60%, 表明龙木错盐湖属于深水盐湖。

表 1 西藏部分盐湖水深表^[18-22]

Tab.1: Water Depth of Some Saline Lakes in Tibet

序号	盐湖名称	水深/m	参考文献
1	龙木错	34.01	本文
2	结则茶卡	17.01	尚红林等, 2019
3	麻米错	4.4	刘成林等, 2021
4	拉果错	16.07	李金生等, 2022
5	扎布耶南湖	2	郑喜玉, 2002
6	当雄错	12.4	凌媛, 2017

表 2 卤水取样点位、样品深度与组分含量测试结果 (TDS,KCl 为 g/L,其余为 mg/L)

Tab.2 Sampling points, sample depths, and element content analysis results of brine (TDS, KCl in g/L, others in mg/L)

点号	样号	深度/m	TDS	LiCl	B ₂ O ₃	KCl	Rb ₂ O	Cs ₂ O
35L	35L-H1	1	158.36	662.61	459.11	5.31	10.73	1.04
	35L-H2	5	155.10	649.17	452.35	5.24	11.43	1.11
	35L-H4	13	153.65	632.07	447.20	5.14	10.93	1.07
35H	35H-H1	1	194.41	624.14	442.37	5.10	10.83	1.06
	35H-H2	5	153.20	639.40	449.77	5.18	10.32	1.00
	35H-H4	12.8	157.90	647.34	456.86	5.31	10.81	1.04
31D	31D-H1	1	155.79	649.17	455.25	5.22	10.89	1.06
	31D-H4	15	154.88	646.12	456.54	5.31	11.00	1.06
	31D-H6	22	152.18	622.30	436.90	5.08	11.13	1.08
31H	31H-H1	1	154.93	630.24	443.34	5.10	11.14	1.07
	31H-H5	20	147.94	641.85	445.59	5.24	10.52	1.01
	31H-H10	43	154.04	662.61	465.87	5.35	11.02	1.07
31L	31L-H1	1	148.48	633.30	448.49	5.24	10.76	1.04
	31L-H5	20	150.80	616.81	440.12	5.06	11.29	1.09
	31L-H10	42.6	152.13	642.46	457.18	5.33	10.88	1.06
31P	31P-H1	1	151.56	619.86	438.18	5.08	10.94	1.05
	31P-H4	15	142.81	647.34	454.28	5.22	10.72	1.03
	31P-H8	35	157.34	641.24	458.79	5.16	10.92	1.04
27P	27P-H1	1	150.25	643.68	454.60	5.16	10.87	1.04
	27P-H4	15	140.90	643.07	470.70	5.24	10.77	1.04
	27P-H8	35	151.58	648.56	461.37	5.33	12.27	1.16
27L	27L-H1	1	146.22	632.69	450.74	5.14	10.90	1.04
	27L-H8	35	152.21	654.67	468.77	5.37	11.42	1.09
	27L-H16	72	158.85	681.54	484.22	5.62	12.13	1.17
27H	27H-H1	1	151.16	636.96	456.21	5.24	11.11	1.06
	27H-H7	30	155.66	635.74	459.76	5.31	11.39	1.09
	27H-H14	62	159.72	646.73	462.01	5.25	10.93	1.04
27D	27D-H1	1	152.22	589.69	427.56	4.88	10.95	1.04
	27D-H8	35	154.35	623.52	451.71	5.20	11.18	1.07
	27D-H15	70	152.76	652.84	463.30	5.31	11.36	1.08
23P	23P-H1	1	156.12	636.96	440.44	5.16	10.59	1.04
	23P-H2	5	149.30	657.72	453.96	5.31	10.86	1.06
	23P-H3	13	153.72	641.24	446.56	5.22	11.04	1.08
23L	23L-H1	1	152.14	616.81	442.37	5.10	10.94	1.04
	23L-H7	30	152.44	628.41	449.45	5.20	11.33	1.08
	23L-H14	64	155.79	630.24	455.25	5.27	11.71	1.13
23H	23H-H1	1	147.90	628.41	446.56	5.12	11.00	1.05
	23H-H7	30	159.23	616.81	447.84	5.12	11.54	1.10
	23H-H14	64	153.81	649.17	464.58	5.31	11.45	1.08

	23D-H1	1	154.27	632.69	450.42	5.20	11.16	1.06
23D	23D-H7	30	158.55	609.78	436.90	5.05	11.06	1.05
	23D-H14	61.7	152.69	632.69	451.71	5.16	11.06	1.05
	19L-H1	1	152.27	611.31	440.76	5.08	10.95	1.04
19L	19L-H5	20	151.00	602.03	434.32	5.01	11.26	1.07
	19L-H10	44	150.44	646.73	457.82	5.29	11.28	1.07
	15H-H1	1	145.17	596.90	432.71	4.99	10.69	1.01
15H	15H-H2	5	146.50	609.17	436.57	5.05	10.90	1.04
	15H-H3	9	153.27	609.54	433.68	5.06	11.50	1.09
	15L-H1	1	148.74	602.64	434.32	4.97	11.38	1.08
15L	15L-H5	20	156.06	610.58	438.83	5.08	10.50	1.00
	15L-H10	45	162.73	652.23	462.97	5.31	11.84	1.14
	15P-H1	1	138.80	541.51	396.65	4.51	9.97	0.95
15P	15P-H2	5	150.16	621.08	443.66	5.08	10.99	1.04
	15P-H4	11	153.84	635.13	447.20	5.18	11.67	1.09
	11P-H1	1	146.36	611.92	436.90	5.01	10.67	1.01
11P	11P-H3	10	151.86	616.81	441.73	5.06	11.36	1.07
	11P-H5	18	154.80	617.42	441.08	5.05	11.26	1.06
	11L-H1	1	150.91	623.52	443.01	5.08	10.92	1.03
11L	11L-H5	20	161.95	616.20	439.79	5.06	11.64	1.09
	11L-H9	38	167.96	647.95	462.97	5.25	11.64	1.10
	11H-H1	1	164.28	599.89	434.96	4.99	11.02	1.04
11H	11H-H3	10	166.44	626.58	448.49	5.12	11.35	1.06
	11H-H5	16	166.16	625.36	449.77	5.14	11.46	1.09
	7H-H1	1	169.86	631.46	447.20	5.14	10.82	1.02
7H	7H-H2	5	157.13	646.12	458.47	5.29	11.82	1.11
	7H-H4	14.2	157.54	637.57	452.99	5.25	11.16	1.06
	7L-H1	1	154.58	604.04	431.75	4.95	11.25	1.06
7L	7L-H4	15	149.60	632.07	449.45	5.18	11.58	1.09
	7L-H7	30	163.56	652.23	465.23	5.31	11.45	1.09
	7P-H1	1	161.54	609.85	435.61	5.05	10.78	1.01
7P	7P-H2	5	162.25	620.47	442.69	5.10	11.37	1.08
	7P-H4	14	165.08	627.80	444.62	5.18	11.29	1.07
3P	3P-H1	0.50	65.39	252.65	184.45	2.18	4.74	0.45
	3P-H2	1	64.06	267.49	190.79	2.28	4.80	0.46

注: B₂O₃为测试单位提供, LiCl,KCl,Cs₂O,Rb₂O 由 Li⁺、K⁺、Rb⁺、Cs⁺计算得到

3.2 LiCl 含量

全湖卤水 LiCl 平均浓度 620.07mg/L, 是最低工业品位 300mg/L^[23]的 2.07 倍, 是盐湖边界品位 150 mg/L 的 4.13 倍, 是柴达木盐湖平均值 630mg/L 的 0.98 倍^[24]。

LiCl 在 1m 处含量范围为 267.49-662.61mg/L, 平均值为 605.51mg/L, 含量呈现西低东高。在 5m 处含量范围为 609.17-657.72mg/L, 平均值为 634.74mg/L, 东南部含量较高。在 30-35m 含量范围为 609.78-654.67mg/L, 平均值为 634.55mg/L, 东南部和西部含量较高。

LiCl 在 0-10m 含量范围为 252.65-662.61mg/L, 平均含量为 602.40mg/L, 10-30m 含量范围为 602.03-652.23mg/L, 平均含量为 629.79mg/L, 大于 30m 含量范围为 623.52-681.54mg/L, 平均含量为 647.55mg/L, 随着深度的增加, LiCl 含量呈现出逐渐增加的趋势。

3.3 B₂O₃ 含量

全湖卤水 B₂O₃ 平均浓度 441.44mg/L, 是盐湖边界品位 400 mg/L^[23]的 1.10 倍, 是柴达木盐湖盐湖平均值 970mg/L 的 0.46 倍^[24]。

B₂O₃ 在 1m 处含量范围为 190.79-459.11mg/L, 平均值为 431.21mg/L, 含量呈现西低东高。在 5m 处含量范围为 436.57-458.47mg/L, 平均值为 448.21mg/L, 东部和西北部含量较高。在 30-35m 含量范围为 436.90-468.77mg/L, 平均值为 455.53mg/L, 东部含量较高。

B₂O₃ 在 0-10m 含量范围为 184.45-459.11mg/L, 平均含量为 428.50mg/L, 10-30m 含量范围为 434.32-470.70mg/L, 平均含量为 448.35mg/L, 大于 30m 含量范围为 451.71-484.22mg/L, 平均含量为 461.90mg/L, 随着深度的增加, B₂O₃ 含量呈现出逐渐增加的趋势。

3.4 KCl 含量

全湖卤水 KCl 平均浓度 5.12g/L, 是最低工业品位下限 0.5%^[23]的 1.03 倍, 是盐湖边界品位 0.3%的 1.71 倍, 是柴达木盐湖平均值 8.99g/L 的 0.57 倍^[24]。

KCl 在 1m 处含量范围为 2.29-5.34g/L, 平均值为 4.99g/L, 含量呈现西高东北低。在 5m 处含量范围为 5.09-5.34g/L, 平均值为 5.21g/L, 西北部含量较高。在 30-35m 含量范围为 5.08-5.40g/L, 平均值为 5.26g/L, 东南部和西部含量较高。

KCl 在 0-10m 含量范围为 2.19-5.34g/L, 平均含量为 4.97g/L, 10-30m 含量范围为 5.05-5.35g/L, 平均含量为 5.21g/L, 大于 30m 含量范围为 5.20-5.65g/L, 平均含量为 5.34g/L, 随着深度的增加, KCl 含量呈现出逐渐增加的趋势。

3.5 Rb₂O 含量

全湖卤水 Rb₂O 平均浓度 10.95mg/L, 是西藏盐湖平均值 5.78mg/L^[23]的 1.89 倍, 是盐湖边界品位 3 mg/L 的 3.65 倍, 是柴达木盐湖平均值 11.56mg/L 的 0.95 倍^[24]。

Rb₂O 在 1m 处含量范围为 4.08-11.38mg/L, 平均值为 10.64mg/L, 含量呈现西低东高。在 5m 处含量范围为 10.32-11.82mg/L, 平均值为 11.10mg/L, 西北部含量较高。在 30-35m 含量范围为 10.92-12.27mg/L, 平均值为 11.40mg/L, 东南部含量较高, 东部含量最低。

Rb₂O 在 0-10m 含量范围为 4.74-11.82mg/L, 平均含量为 428.50mg/L, 10-30m 含量范围为 10.50-11.67mg/L, 平均含量为 448.35mg/L, 大于 30m 含量范围为 10.90-12.32mg/L, 平均含量为 461.90mg/L, 随着深度的增加, Rb₂O 含量呈现出逐渐增加的趋势。

3.6 Cs₂O 含量

全湖卤水 Cs₂O 平均浓度 1.05mg/L, 是盐湖边界品位 1mg/L^[23]的 1.05 倍, 是柴达木盐湖平均值 0.036mg/L 的 29.17 倍^[24]。

Cs₂O 在 1m 处含量范围为 0.46-1.08mg/L, 平均值为 1.02mg/L, 含量呈现西低东高。在 5m 处含量范围为 1.00-1.11mg/L, 平均值为 1.06mg/L, 西北部和东南部含量较高。在 30-35m 含量范围为 1.04-1.16mg/L, 平均值为 1.08mg/L, 东南部含量较高, 西北部含量最低。

Cs₂O 在 0-10m 含量范围为 0.45-1.11mg/L, 平均含量为 1.01mg/L, 10-30m 含量范围为 1.00-1.10mg/L, 平均含量为 1.07mg/L, 大于 30m 含量范围为 1.04-1.17mg/L, 平均含量为 1.09mg/L, 随着深度的增加, Cs₂O 含量呈现出逐渐增加的趋势。

4 讨论

4.1 锂等组分垂向分层与驱动机制

龙木错盐湖地表卤水中 LiCl、B₂O₃、KCl、Rb₂O、Cs₂O 等组分的垂直分异呈现显著的层控特征(图 3-图 8)。随水深增加, LiCl、B₂O₃、KCl、Rb₂O、Cs₂O 的浓度整体呈上升趋势。表层卤水(0-10 m)至

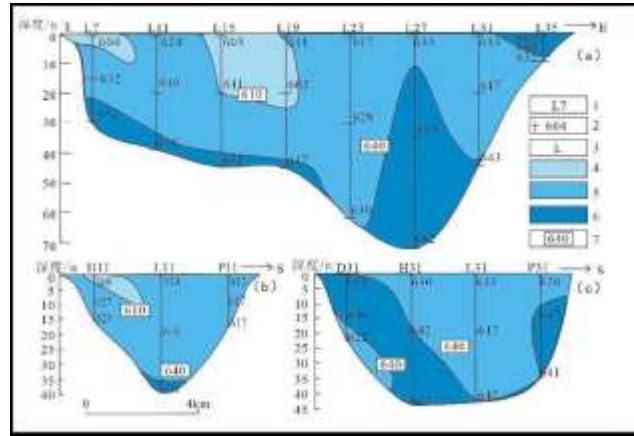


图3 龙木错盐湖3条剖面LiCl含量等值线图(a, b, c)(1: 点位, 2: LiCl含量, 3: 剖面编号, 4:含量小于610mg/L, 5: 含量介于610-640mg/L,6: 含量大于640mg/L, 7:含量界限)

Fig.3 Isoline maps of LiCl content in three profiles of Longmu Co salt lake(a, b,

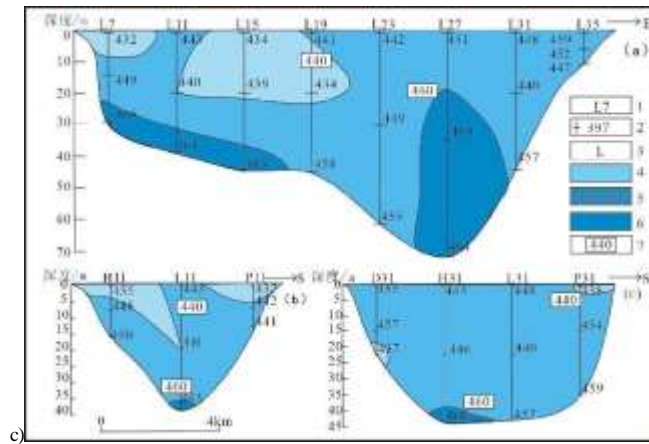


图4 龙木错盐湖3条剖面B2O3含量等值线图(a, b, c)(1: 点位, 2:B₂O₃含量, 3:剖面编号, 4:含量小于440mg/L, 5:含量介于440-460mg/L,6:含量大于460mg/L, 7:含量界限)

Fig.4 Isoline maps of B₂O₃ content in three profiles of Longmu Co salt lake(a, b, c)

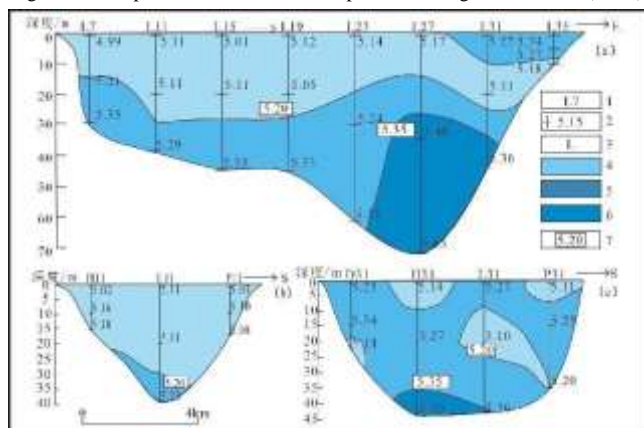


图5 龙木错盐湖3条剖面KCl含量等值线图(a, b, c)(1:点位, 2:KCl含量, 3:剖面编号, 4:含量小于5.20g/L, 5:含量为5.20-5.35g/L,6-含量大于5.35g/L, 7:含量界限)

Fig. 5 Isoline maps of KCl content in three profiles of Longmu Co salt lake(a, b, c)

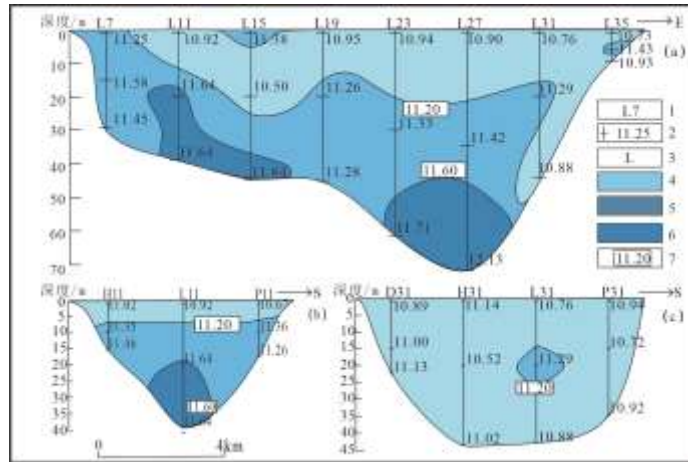


图6 龙木错盐湖3条剖面Rb₂O含量等值线图(a, b, c)(1:点位, 2:Rb₂O含量, 3:剖面编号, 4:含量小于11.20mg/L, 5:含量介于11.20-11.60 mg/L, 6:含量大于11.60mg/L, 7:含量界限)

Fig.6 Isoline maps of Rb₂O content in three profiles of Longmu Co salt lake(a, b, c)

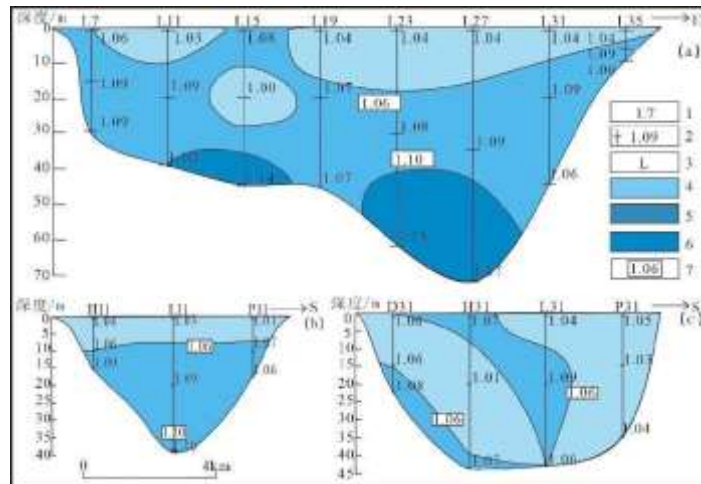


图7 龙木错盐湖3条剖面Cs₂O含量等值线图(a, b, c)(1:点位, 2:Cs₂O含量, 3:剖面编号, 4:含量小于1.06 (mg/L), 5:含量为1.06-1.10mg/L, 6:含量大于1.10mg/L, 7:含量界限)

Fig.7 Isoline maps of Cs₂O content in three profiles of Longmu Co salt lake(a, b, c)(1. Sampling point, 2. Cs₂O content, 3. Profile number, 4. Content less than 1.06 mg/L, 5. Content(1.06-1.10mg/L), 6. Content greater than 1.10 mg/L, 7. content limit)

深部 (>30 m) 的LiCl含量由602.40 mg/L升至647.55 mg/L, 增幅7.50%; B₂O₃、KCl、Rb₂O和Cs₂O亦分别由428.50 mg/L、4.97 g/L、10.63 mg/L、1.01 mg/L增至461.90 mg/L、5.34 g/L、11.41 mg/L、1.09 mg/L (表3)。

温跃层强烈阻碍上下层水体的垂向混合和对流交换^[25,26]。这使得表层水体受风力扰动、太阳辐射和大气交换的影响难以传递至深层, 而深层富集的高浓度离子(Li⁺, K⁺, Rb⁺, Cs⁺)向上扩散受限, 这是导致元素在深层持续累积并形成显著浓度梯度的物理基础。这种分层模式与青藏高原深水湖泊纳木错^[27]、巴松措^[28,29]的化学跃层结构相似。在温带地区, 湖泊的温跃层随着季节的变化呈现出明显的动态特征。湖泊受到季节变化而产生水温分层, 这是深水型湖泊较于浅水型湖泊的一个重要特征^[30]。高原强太阳辐射导致表层水体升温^[31], 形成密度梯度抑制垂向混合, 促使温跃层发育。

龙木错盐湖的垂直分异还受到太阳池特性的影响。太阳池作为一种特殊的盐度分层水体, 其结构特点包括热水层、非对流层和淡水层。热水层由富锂卤水组成, 具有较高的盐度和密度, 能够吸收和储存

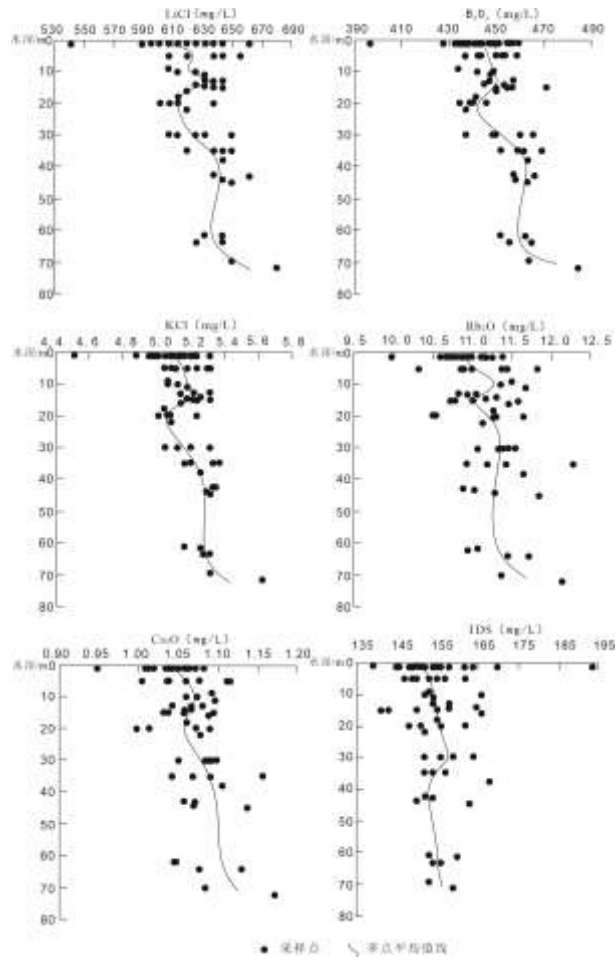


图 8 LiCl 等组分随水深变化

Fig.8 Variation of LiCl and other components with water depth

太阳能，从而增强表层水体的温度和盐度差异，进一步加剧温跃层的形成与稳定。非对流层的盐度从上至下呈梯度增加^[32]，起到了保温和分层隔离的作用，进一步阻碍了上下层水体的混合，使得深层高浓度离子得以持续累积。淡水层则主要用于保护盐梯度层不被破坏，维持整个系统的稳定。

盐湖高离子强度（TDS>100 g/L）显著降低溶解氧含量，抑制微生物矿化作用，削弱有机质分解对CO₂浓度的扰动，进而维持 pH 平衡^[33]。对比淡水湖泊巴松措（TDS<0.2 g/L）底层溶解氧可达 6.5 mg/L^[28]，龙木错盐湖底层缺氧环境更利于铷铯沉淀，可能导致铷铯在盐湖底部富集。

表 3 龙木错盐湖 2024 年不同深度卤水 LiCl、B₂O₃、KCl (g/L)、Rb₂O、Cs₂O 含量统计 (mg/L)

Tab.3. Statistics of LiCl, B₂O₃, KCl (g/L), Rb₂O, Cs₂O Content in Brine at Different Depths of Longmu Co salt lake in 2024 (mg/L)

深度 /m	类型	LiCl		B ₂ O ₃		KCl		Rb ₂ O		Cs ₂ O		样品数
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	
0-10	表层卤水	252.65-662	602.	184.45-459	428.	2.19-5.	4.9	4.74-11.8	10.6	0.45-1.	1.0	36
		.61	40	.11	50	34	7	2	3	11	1	
10-30	中部卤水	602.03-652	629.	434.32-470	448.	5.05-5.	5.2	10.50-11.	11.1	1.00-1.	1.0	23
		.23	79	.70	35	35	1	67	7	10	7	
>30	深部卤水	623.52-681	647.	451.71-484	461.	5.20-5.	5.3	10.9-12.3	11.4	1.04-1.	1.0	15
		.54	55	.22	90	65	4	2	1	17	9	

4.2 锂等组分平面分异特征与驱动机制

4.2.1 分类 利用 SPSS26 软件对表 1 进行聚类分析后，得到谱系图(图 9)，距离选择 25，可将各卤水组分分为相关性较强的两组：①LiCl、B₂O₃、KCl，②Rb₂O、Cs₂O。

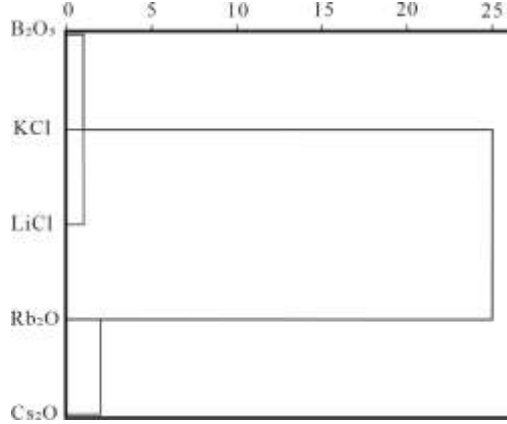


图 9 聚类分析谱系图

Fig. 9 Cluster Analysis Dendrogram

4.2.2 锂、硼、钾 龙木错盐湖地表卤水中 LiCl、B₂O₃、KCl 的平面分布呈现显著的平面差异(图 10)。LiCl 含量在东部洼地区域(662.61 mg/L)较西部泉水补给区(604.04 mg/L)高 9.7%，东部开阔湖区蒸发速率较高，形成蒸发驱动的边缘浓缩带；而西北部受泉水稀释(年均流量 3.41 m³/s，矿化度<0.5 g/L)影响，B₂O₃的分布表现为西北高值(484.22 mg/L)与西南低值(184.45 mg/L)的显著对比，与泉水输入溶质差异密切相关。KCl 含量在东南部(5.65 g/L)较东北部(4.89 g/L)高 15.5%，一方面反映岩浆岩风化输入的钾富集效应，另一方面地形低洼区(水力滞留时间>15 天)促进钾盐沉积。其分异主控于泉水补给与蒸发速率的空间差异，径流输入量与盐类富集程度呈显著负相关^[34]。

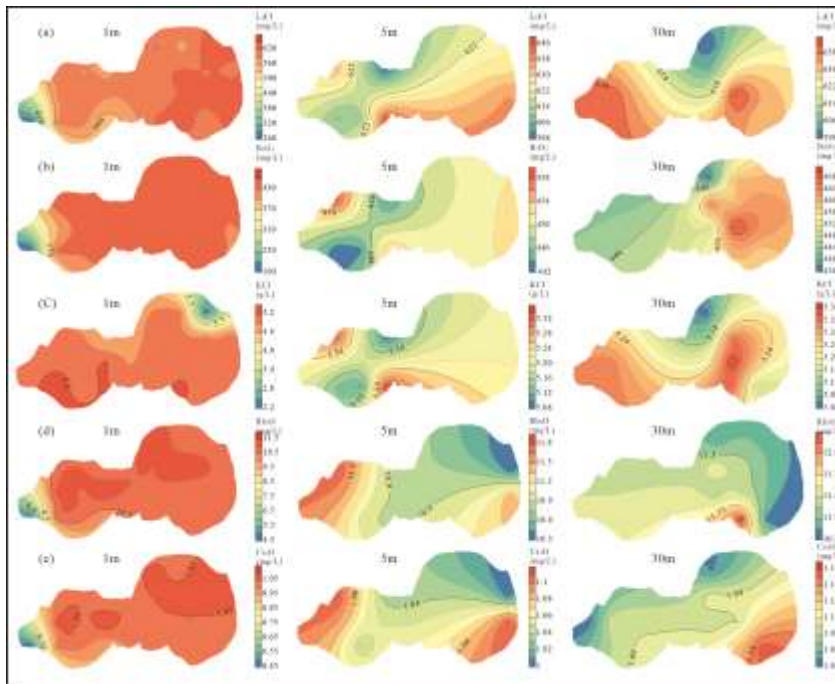


图 10 龙木错盐湖 1,5,30m 锂硼钾铷铯平面分布

Fig.10 Distribution of lithium, boron, potassium, rubidium, and cesium in Longmu Co Salt Lake at depths of 1, 5, and 30 m.

在高原干旱气候下,盐湖边缘区域因蒸发速率较高,优先析出溶解度较低的盐类(如石盐、芒硝),导致Li等元素在蒸发活跃区浓缩富集。类似的分带模式在扎布耶盐湖中亦有体现,其蒸发浓缩过程形成边缘高浓度环带^[35],表明蒸发分异是控制平面分异的核心机制。径流输入通过泉水稀释作用抑制西部成矿效率;地形约束则通过控制水力滞留时间影响元素积累。

4.2.3 铷铯 龙木错盐湖铷(Rb_2O)、铯(Cs_2O)的平面分异呈现显著的空间异质性(图10),其驱动机制与锂、硼、钾等元素存在本质差异。 Rb_2O 含量在东南部底部附近达峰值12.32 mg/L,较西北部(10.31 mg/L)高19.5%,主要受控于细粒黏土矿物(伊利石、蒙脱石)的选择性吸附。 Rb_2O 、 Cs_2O 的高值区显著集中于龙木错盐湖东南部(图10)。且两者呈现显著正相关关系,指示其具有共同的来源;该区恰好位于NNW向断裂F1与NEE向断裂F2的交汇部位(图1b),构造活动为深部流体上涌提供了良好通道,而研究区所处的班公湖-怒江缝合带,已知发育地热系统^[36-37],这一区域背景为深部富铯热液沿断裂通道上涌并导致铯、铷在东南部局部富集提供了有力支持。生物活动对铷、铯分布的影响微弱,表明其分异主要由无机地球化学过程主导。

地形约束与水文条件进一步强化铷、铯的分异格局。东南部区域水力滞留时间长,促进黏土矿物对 Rb^+ 的持续吸附,而西北部泉水补给(年均流量3.41 m³/s)通过稀释效应降低卤水铷浓度。与扎布耶浅水盐湖相比,龙木错盐湖深水环境因垂向分异抑制了铯的垂向扩散,使其平面分异更为显著。

铷、铯分异的特殊性体现在其地球化学行为的独立性。相较于 $LiCl$ 、 B_2O_3 受蒸发-径流耦合调控, Rb_2O 和 Cs_2O 的分布更多依赖吸附-热液协同作用。黏土矿物对 Rb^+ 、 Cs^+ 的高吸附性使其在沉积物-卤水界面富集^[38],在缺氧还原区优先沉淀^[39]。

4.3 锂钾硼动态变化与驱动因素

2009年 $LiCl$ 、 B_2O_3 、 KCl 含量分别为793.66 mg/L、620.23 mg/L、6806.16 mg/L^[15],2009-2024年间,龙木错盐湖地表卤水中 $LiCl$ 、 B_2O_3 、 KCl 的平均含量分别下降21.87%、28.83%和24.81%(图11)。龙木错盐湖水体体积显著增加,2009年盐湖平均水深27 m,面积100.91 Km²,水体体积约 2.72×10^9 m³^[15];2024年平均水深34.01 m,面积110.76 Km²,水体体积约 3.77×10^9 m³。据此计算,水体体积增加量为 1.04×10^9 m³,体积增加百分比约为38.27%。

理论上,若仅考虑水体体积增加,组分含量理论下降幅度约为38.27%。按此计算, $LiCl$ 、 B_2O_3 、 KCl 理论含量应分别降至约489.06 mg/L、382.47 mg/L、4205.87 mg/L。然而,2024年实际测得含量分别为620.07 mg/L、441.44 mg/L、5120 mg/L,实际含量下降百分比分别为21.87%、28.83%、24.81%,均低于理论值。

尽管2009-2024年间龙木错盐湖卤水中 $LiCl$ 、 B_2O_3 与 KCl 的质量浓度呈下降趋势,但其资源总量却实现增长,这一表观矛盾可通过“资源总量=质量浓度 \times 水体体积”的关系予以解释:以 $LiCl$ 为例,其资源总量上升,根本原因在于气候变暖驱动下的水体体积扩张(+38.27%)超越了浓度稀释(-21.87% - -28.83%)的效应。值得注意的是,西北部泉水(年均流量3.41 m³·s⁻¹)作为重要补给源,其本身含有一定浓度的 Li^+ 、 B_2O_3 与 K^+ ,在扩大湖容的同时亦持续输入成矿物质,部分缓解了纯稀释作用对资源总量的削减。这表明在高寒盐湖系统中,水体规模与外部溶质通量是评估资源潜力的关键变量,龙木错盐湖正由传统“蒸发浓缩型”向“气候驱动的扩容-溶质补给型”资源成藏模式转变。

这一现象由青藏高原冰川消融、多年冻土退化、积雪变化、湖泊扩张及降水增加等多重气候因素共同驱动^[40-44],气候变暖导致青藏高原升温速率(0.4 $^{\circ}C/10a$)显著高于全球平均水平^[45],降水量增加^[46],通过地表径流输入低矿化度水(<0.5 g/L),进一步加剧稀释效应。尽管蒸发量上升强化浓缩作用,但融水与降水输入的体积扩张主导了净稀释效应。元素降幅差异受地球化学行为特异性控制, $LiCl$ 的溶解度大于 KCl ,在太阳能蒸发过程中, KCl 会从浓缩的卤水中沉淀出来,而大部分锂仍留在溶液中^[47],25 $^{\circ}C$ 下,持续蒸发导致卤水中矿物沉淀顺序依次为:石盐、碱式碳酸钠、扎布耶石、格莱泽石、光卤石和硼砂^[48],说明卤水蒸发过程中, B_2O_3 含量下降最为显著, KCl 次之, $LiCl$ 最低。 Li^+ 因离子半径小与黏土矿物结合能力弱,更易受水文稀释主导; B_2O_3 在碱性条件下被蒙脱石和伊利石强吸附^[49],显著缓冲了稀释速率。

水文-沉积过程进一步强化了锂等组分动态差异。西北部泉水补给稀释卤水，LiCl 含量下降，温跃层阻滞限制垂向混合^[50]，加速 LiCl 向沉积相迁移。相较之下，B₂O₃因吸附在垂向分布中更趋稳定。本次工作结果表明，龙木错盐湖西侧泉水补给流量为 3.41m³/s，Li⁺含量为 0.375mg/L，B₂O₃ 含量为 0.0115g/L，K⁺含量为 0.02155g/L，利用 ¹⁴C 对龙木错盐湖的年龄测定数据为 8850±170aBP^[51]，据此计算得到 LiCl 资源潜力与本次调查结果^[49]相符合。龙木错主要补给来源泉水的 B₂O₃ 含量大于 LiCl 的含量，而盐湖卤水中 LiCl 含量大于 B₂O₃ 的含量，龙木错盐湖，结则茶卡，麻米错盐湖泉水中硼的补给含量远大于锂的补给含量，盐湖中的 LiCl 含量大于 B₂O₃ 的含量（表 4），B₂O₃ 含量减少则因碱性条件下黏土矿物（蒙脱石、伊利石）的强吸附作用^[49,53]，导致液相 B₂O₃ 向沉积相迁移。

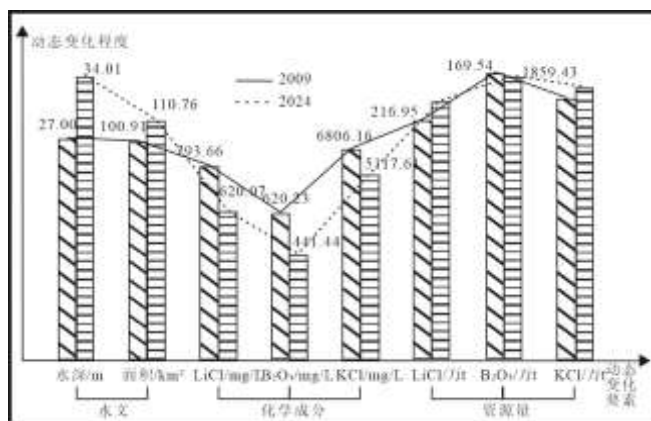


图 11 龙木错盐湖地表卤水含量动态变化(2009 年数据据[15])

Fig.11 Dynamic changes in surface brine content of Longmu Co salt lake

表 4 西藏主要盐湖泉水与盐湖锂硼钾含量¹⁾[52,54-59]

Table 4 Salt Lake Replenishment and Salt Lake Content

序号	盐湖名称	泉水 mg/L			卤水 g/L			参考文献
		LiCl	B ₂ O ₃	KCl	LiCl	B ₂ O ₃	KCl	
1	龙木错	2.25	11.5	41.16	0.620	0.441	5.118	本文
2	结则茶卡	25.44	48.78	120.75	1.152	0.831	5.118	赵元艺等, 2025; 张宁等, 2013
3	麻米错	5.64	14	6.341	4.08	1.282	10.505	郑喜玉, 2002; 余石勇等, 2022
4	拉果错	0.054	7.7	3.743	1.608	2.529	4.966	吕光荣,2013
5	扎布耶南湖	6.6	61	47.75	7.188	7.46	66.315	王玉凤, 2015
6	扎布耶北湖	6	31	15.28	3.84	5.55	39.957	王玉凤, 2015
7	当雄错	5.82	44.5	43.357	2.226	2.52	17.018	伍倩等, 2013; 雒洋冰等, 2016;

1) LiCl, KCl 由 Li⁺, K⁺ 计算得来。

5 结论

(1) 龙木错盐湖地表卤水中关键元素组分 (LiCl、B₂O₃、KCl、Rb₂O、Cs₂O) 的资源分布呈现明显的垂向分层与平面分异特征。2024 年测试结果表明, LiCl 平均含量为 620.07 mg/L, B₂O₃ 为 441.44mg/L, KCl 为 5.12 g/L, Rb₂O 为 10.95mg/L, Cs₂O 为 1.05mg/L, 均达到工业开采品位。

(2) 垂向分异特征显著, LiCl 含量从表层 602.40 mg/L 增至深层 647.55 mg/L (增幅 7.5%), Rb₂O 和 Cs₂O 同步富集, 深层均值分别达 11.41 mg/L 和 1.09 mg/L。垂向分异则主要由温跃层阻滞和缺氧环境主导, 温跃层阻碍上下层混合, 促进 Li⁺、Rb⁺、Cs⁺ 下沉富集。

(3) 平面分布上, 东部洼地因高蒸发速率形成 LiCl (662.0 mg/L) 和 KCl (5.65 g/L) 浓缩带, 而

西北部受泉水稀释(年均流量 3.41 m³/s)导致 LiCl 含量较低; B₂O₃与溶质输入差异呈现西北高值(484.22 mg/L)。

(4) 2009—2024 年间, 龙木错盐湖地表卤水中 LiCl、B₂O₃、KCl 的平均含量分别下降了 21.87%、28.83% 和 24.81%。这一现象主要由气候变化驱动的外源输入稀释与地球化学过程差异共同调控。实际含量下降百分比低于理论值, 与蒸发浓缩作用、地球化学行为差异、水文-沉积过程以及泉水补给的影响等因素有关。

致谢 论文野外卤水样品采集过程中, 得到四川资源集团集团孙健的大力协助, 样品由冶金一局邹国庆等同志测试, 在此表示衷心的感谢。

6 参考文献

- [1]Lin DZ. Uses of Lithium and Its Resource Exploitation. *China Safety Science Journal*, 2004(9): 76–80, 98.DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2004.09.017.[林大泽. 锂的用途及其资源开发. *中国安全科学学报*, 2004,(9):76-80+98.]
- [2]Liu R, Xue XX, Jiang T, et al. The Current Situation and Development of Boron and Boride. *Materials Reports*, 2006,(6):1-4.[刘然, 薛向欣, 姜涛, 等. 硼及其硼化物的应用现状与研究进展. *材料导报*, 2006,(6):1-4.]
- [3]Zheng M P, Qi W, Zhang Y S. Present situation of potash resources and direction of potash search in China. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25 (11) : 1239- 1246.[郑绵平, 齐文, 张永生. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析. *地质通报*, 2006,(11):1239-1246.]
- [4]Goodenough J B, Park K S. The Li-ion rechargeable battery: a perspective. *Journal of the American Chemical Society*, 2013, 135(4): 1167-1176.
- [5]Zuo ZH, Wang Z, Liu TQ. High-precision time-keeping technology based on rubidium atomic clock. *Integrated Circuits and Embedded Systems*. 2024,24(02):70-73.[左兆辉, 王铮, 刘铁强. 基于铷原子钟的高精度守时技术. *集成电路与嵌入式系统*, 2024,24(2):70-73.]
- [6]Zheng MP. On Saline Lakes of China. *Mineral Deposits*, 2001,(02):181-189+128.[郑绵平. 论中国盐湖. *矿床地质*, 2001,(02):181-189+128.]
- [7]Nie Z, Wu Q, Ding T, et al. Research progress on industrialization technology of lithium extraction from salt lake brine in China. *Inorganic Chemicals Industry*, 2022,54(10):1-12.DOI:10.19964/j.issn.1006-4990.2022-0542.[乜贞, 伍倩, 丁涛, 等. 中国盐湖卤水提锂产业化技术研究进展. *无机盐工业*, 2022,54(10):1-12.]
- [8]Zhao YY, Zheng MP, Bu LZ, et al., Study on Salt Pan Technology of Lithium Salt Extracting from Carbonate-type Saline Lakes, Tibet. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*. 2005,(02):1-6+9.DOI:10.16570/j.cnki.issn1673-6850.2005.02.001.赵元艺, 郑绵平, 卜令忠, 等. 西藏碳酸盐型盐湖卤水锂盐提取盐田工艺研究. *海湖盐与化工*, 2005,(2):1-6+9.
- [9]Xu L, Yang YH, Yan SQ, et al. Lithium Extraction from Clay-Type Ore in China: Status and Prospects *China Geological Survey Journal*, 2023, 10(4): 1–10. doi: 10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.002.[徐璐, 杨耀辉, 颜世强, 等. 我国黏土型锂矿提锂研究现状及前景展望. *矿产综合利用*, 2023,(4):12-18.]
- [10]Li YY, Di XL, Gao J. The Status of Saline Lake Lithium Resources and Its Present Situation of Exploitation *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2005,(05):31-35.DOI:10.16570/j.cnki.issn1673-6850.2005.05.010. [李昱昀, 狄晓亮, 高洁. 国内外盐湖卤水锂资源及开发现状. *海湖盐与化工*, 2005,(5):31-35.]
- [11]Meng K, Shi X H, Wang E, et al. High-altitude salt lake elevation changes and glacial ablation in Central Tibet, 2000–2010. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(5): 525-534.doi: 10.1007/s11434-011-4849-5
- [12]Ding T, Zheng M, Nie Z, et al. Impact of regional climate change on the development of lithium resources in Zabuye salt lake, Tibet. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 865158.[https://doi.org/10.3389/feart.2022.865158]
- [13]Ding T, Zheng M, Peng S, et al. Lithium extraction from salt lakes with different hydrochemical types in the Tibet Plateau. *Geoscience Frontiers*, 2023, 14(1): 101485.[https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101485.]
- [14]Zheng MP. On Saline Lakes of China. *Acta Geologica Sinica*, 1983,(02):184-194.DOI:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.1983.02.008.[郑绵平, 刘文高, 向军, 等. 论西藏的盐湖. *地质学报*, 1983,(2):184-194.]

- [15]赵福龙, 王国富, 李林山, 等. 西藏自治区日土县龙木错盐湖矿区地表卤水锂钾硼矿资源储量核实报告, 西藏阿里圣拓矿业有限责任公司, 2009.
- [16] DZ/T 0212.2-2020, 矿产地质勘查规范 盐类 第2部分: 现代盐湖盐类.
- [17]聂勇, 朱琳, 王厚庭. 简便易用的盐湖卤水定深取样器. 西部探矿工程, 2005, (12): 208.
- [18]尚红林, 刘兴旺, 熊先孝等. 中国矿产地质志 硼矿卷. 北京: 地质出版社, 2019.
- [19]Liu CL, Yu XC, Yuan XY, et al. Characteristics, distribution regularity and formation model of brine-type Li deposits in salt lakes in the world. *Acta Geologica Sinica*. 2021, 95(7): 2009–2029. [刘成林, 余小灿, 袁学银, 等. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型. 地质学报, 2021, 95(7): 2009–2029. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021230.]
- [20]李金生, 李兴, 张庆松, 等. 西藏改则县吉布茶卡-拉果错盐湖锂矿控矿因素分析. 地质找矿论丛, 2022, 37(4): 437–446.
- [21]郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 李秉孝. 中国盐湖志. 北京: 科学出版社, 2002.
- [22]凌媛. 青藏高原湖泊记录的典型时段古气候变化. 中国地质大学, 2017.
- [23]《矿产资源工业要求手册》编委会. 矿产资源工业要求手册 (2014年修订版). 北京: 地质出版社, 2014.
- [24]郑喜玉, 唐渊, 徐昶等. 西藏盐湖. 北京: 科学出版社, 1988.
- [25]Huang L, Wang JB, Zhu LP et al. Water temperature and characteristics of thermal stratification in Nam Co, Tibet. *J. Lake Sci.* 2015, 27(4): 711–718. DOI: 10.18307/2015.0420. [黄磊, 王君波, 朱立平, 等. 2015年纳木错水温变化及热力学分层特征初步研究. 湖泊科学, 2015, 27(4): 711–718.]
- [26]Chang F, Hou P, Wen X, et al. Seasonal stratification characteristics of vertical profiles and water quality of Lake Lugu in Southwest China. *Water*, 2022, 14(16): 2554.
- [27]Wang JB, Zhu LP, Daut Gerhard, et al, Zhen Xiaolin. Bathymetric survey and modern limnological parameters of Nam Co, central Tibet. *Lake Sci.*, 21(01): 128–134. 王君波, 朱立平, Gerhard Daut, 等. 西藏纳木错水深分布及现代湖沼学特征初步分析. 湖泊科学, 2009, 21(1): 128–134.
- [28]罗珍. 西藏巴松措水化学时空变化特征及其控制因素[学位论文]. 西藏大学, 2021.
- [29]Luo Z, Ren ZLM, Chen HL, et al. Warm season water temperature and water quality characteristics of Basong Lake, Tibet. *Environmental Ecology*, 2021, 3(04): 37–42. [罗珍, 仁增拉姆, 陈虎林, 等. 西藏巴松措暖季水温与水质变化特征. 环境生态学, 2021, 3(04): 37–42.]
- [30]Wang LJ, Yu H, Niu Y, et al. Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer. *ENVIRONMENTAL SCIENCE*. [王琳杰, 余辉, 牛勇, 等. 抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征. 环境科学, 2017, 38(4): 1384–1392. DOI: 10.13227/j.hjcx.201607165.]
- [31]Lei Y, Yao T, Yang K, et al. Contrasting hydrological and thermal intensities determine seasonal lake-level variations—a case study at Paiku Co on the southern Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(6): 3163–3177.
- [32]Zhao YY, Li BT, Jiao C, et al. An analysis of fluid inclusion homogenization temperature of halite from Bieletan salt playa lake in Qinghai and its geological significance. *Mineral Deposits*, 2010, 29(4): 684–696. DOI: 10.16111/j.0258-7106.2010.04.001. [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. 矿床地质, 2010, 29(4): 684–696.]
- [33]Li H Y, Zhang H C, Chang F Q, et al.. 2018. Discovery of bacteriopheophytin-t3 in lacustrine deposits from Lake Zigetang on the central Tibetan Plateau and its paleoenvironmental significance. *Science China Earth Sciences*, 60: 2171–2180, doi: 10.1007/s11430-017-9107-9. [李华勇, 张虎才, 常凤琴, 等. 青藏高原中部兹格塘错沉积物中厌氧光合细菌叶绿素的发现及意义. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(1): 51–61.]
- [34]Wang HX, Qin HW, Qiao SW, et al. Effect of the yellow river runoff into the sea on the salinity of the waters near the estuary. *Coastal Engineering*, 2022, 41 (2) : 115–127. [王海霞, 秦华伟, 乔守文等. 黄河入海径流对河口海域盐度影响研究. 海岸工程, 2022, 41 (2) : 115–127.]
- [35]Jiang X, Hao S, Li F, et al. Tracking seasonal evaporation of arid Ebinur Lake, NW China: isotopic evidence. *Environmental Earth Sciences*, 2024, 83(18): 543.
- [36]Dong T, Tan HB, Zhang WJ, et al. Geochemical Distribution of Lithium in saline Lakes in Tibet. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2015, 43(03): 230–235. [董涛, 谭红兵, 张文杰等. 西藏地区盐湖锂的地球化学分布规律. 河海大学学报(自然

- 科学版),2015,43(03):230-235.]
- [37]Chi Peng, Hu Guangping, Zhang Tianping, et al. B-rich Deposit Features and Causes of Zhacang Chaka Salt Lake . *Journal of Salt Lake Research*, 2013, 21(04): 21-28.[迟鹏,胡广平,张天平,等.扎仓茶卡盐湖硼矿富(10) B 矿床特征及成因探讨.盐湖研究,2013,21(04):21-28.]
- [38]Li ZY,Hou DB,Chang H,et al. Research progress on the types, distribution, genesis, enrichment regulation, separation and extraction techniques of rubidium and cesium resources in China. *China Mining Magazine*, 2025, 34 (2) : 265-283.[李峥岩,侯殿保,常宏等.中国铷铯资源类型、分布、矿床成因、富集规律及分离提取技术研究进展.中国矿业, 2025, 34 (2) : 265-283.]
- [39]金承黎,易发成,李玉香.粘土矿物在核废物处理中的应用.矿产综合利用,2003,(5):35-38.
- [40]Yao T, Xue Y, Chen D, et al. Recent third pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, 2019 ,100(3): 423-444.
- [41]Immerzeel M M, Lutz A F, Andrade M,et al. Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 2020,577: 364-369.
- [42]Zhang GQ, Yao D, Shum C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5550-5560.
- [43]Yan L J, Jiao Y H. Dynamic changes of saline lakes in Xizang and its response to climate fluctuations from 1973 to 2017[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2024, 32(1):1-9.DOI: 10.12119/j.yhj.202401001.[闫立娟,焦叶红.1973—2017年西藏盐湖湖面动态变迁及对气候波动的响应.盐湖研究,2024,32(1):1-9.]
- [44]Han J J, Chen L, Wang J P, et al. An examination of salt lake area dynamics and their underlying influencing factors in China over the past 44 years.*Journal of Salt Lake Research*, 2025, 33 (2) : 35-46.DOI: 10.3724/j.yhj.2024065.[韩进军,陈亮,王建萍等.近44年我国盐湖面积变化及其影响因素研究.盐湖研究,2025,33(02):35-46.]
- [45]Cheng GD, Lin Z, Ren L,et al.Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau.*J Lake Sci*,2019,64(27):2783-2795.doi: 10.1360/TB-2019-0191[程国栋,赵林,李韧等.青藏高原多年冻土特征、变化及影响.科学通报,2019,64(27):2783-2795.]
- [46]孟慧美.气候变化背景下青藏高原草地植被生产力动态研究[学位论文].西藏大学,2024.
- [47]Pfennig B W. Principles of inorganic chemistry[M]. John Wiley & Sons, 2021.
- [48]Nie Z, Wu Q, Bu L, et al. Experimental study of the Tibetan Dangxiong Co salt lake brine during isothermal evaporation at 25° C. *Carbonates and Evaporites*, 2020, 35(1): 5.
- [49]Keren R, Mezuman U. Boron adsorption by clay minerals using a phenomenological equation. *Clays and clay minerals*, 1981,29(3): 198-204.
- [50]Rovelli L, Dengler M, Schmidt M, et al. Thermocline mixing and vertical oxygen fluxes in the stratified central North Sea. *Biogeosciences*, 2016,13(5): 1609-1620.
- [51]Li BY. The Last Greatest Lakes on the Xizang (Tibetan) Plateau. *Acta Geographica Sinica*.,2000,(02):174-182.[李炳元.青藏高原大湖期.地理学报,2000,(2):174-182.]
- [52]赵元艺, 陈文西, 赖礼兴, 等.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[学位论文],中国地质科学院矿产资源研究所,2025.
- [53]Singh S P N, Mattigod S V. Modeling boron adsorption on kaolinite. *Clays and Clay minerals*, 1992, 40(2): 192-205.
- [54]Zhang N, YUAN JJ, DONG JG, et al. Laws of Crystallization of the Brine in Jiezechaka Lake in Tibet at 15 °C through Evaporation and Concentration. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2013, 28(6): 44-48.[张宁,袁建军,董景岗,等.西藏结则茶卡盐湖卤水 15°C蒸发浓缩析盐规律研究.天津科技大学学报,2013,28(06):44-47+78.]
- [55]余石勇.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[学位论文].中国地质科学院.,2022.
- [56]吕光荣.西藏自治区改则县拉果错盐湖地质特征及成因研究[学位论文].中国地质大学(北京),2013.
- [57]王玉凤.西藏扎布耶盐湖湖水化学特征研究[学位论文].济南大学,2015.
- [58]Wu Q, Zheng MP, Nie Z, et al. Experiment Study of Solar Evaporation of Brine from the Dangxiong Cuo Salt Lake in Tibet in

Winter. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(03): 433-440. [伍倩, 郑绵平, 乜贞, 等. 西藏当雄错盐湖卤水冬季日晒蒸发实验研究. *地质学报*, 2013, 87(03): 433-440.]

[59] Luo YB, Zheng MP. Origin of Boron in the Dangxiong Co Salt Lake, Tibet, China. *Acta Geologica Sinica*. 2016, 90(8): 1900-1907. [雒洋冰, 郑绵平. 西藏当雄错盐湖卤水中硼的来源研究. *地质学报*, 2016, 90(8): 1900-1907.]