第 39 卷　第 1 期
2024 年 3 月:019－025

地　质　找　矿　论　丛
Contributions to Geology and Mineral Resources Research

Vol. 39　No. 1
Mar. 2024:019－025

doi:10.6053/j.issn.1001－1412. 2024. 01. 003

西藏西北部盐湖卤水富矿因素及成矿机理

高建国,罗波,潘增龙,贺勇刚
(四川省冶金地质勘查院,成都 610051)

摘要: 青藏高原盐湖区是我国四大现代盐湖区之一,矿产资源十分丰富,所含的资源量及潜在经济价值巨大,其盐湖卤水成矿机制一直是众多学者研究的重点。对西藏西北部 37 个湖泊地表卤水进行系统采样和分析测试的结果表明,这些盐湖地表卤水中氯化锂的平均品位为 0.19～748.20 mg/L,其中洞错盐湖成矿潜力较大,矿床地表卤水锂矿可达中型规模;此外,加琼错、懂布错、别若则错及热帮错同样具有较好的开发利用价值。通过对盐湖卤水成矿条件综合研究分析认为,西藏西北部盐湖卤水成矿可能与新特提斯洋壳俯冲及印度-欧亚大陆碰撞作用关系密切。

关键词: 盐湖卤水;氯化锂;富矿因素;成矿机理;西藏西北部

中图分类号: P611.4　**文献标识码:** A

0　引言

卤水资源的开发利用既能提供丰富的生产、生活资料,又能促进当地经济发展。西藏北部是我国现代盐湖主要分布地区之一,也是世界最早发现和利用盐湖矿产的地区,我国盐湖卤水锂资源约占世界盐湖卤水锂资源的 1/3,主要分布在青藏高原的柴达木盆地[1-3]。随着西藏地区各种矿产资源的逐步开发利用及世界卤水资源的需求量急剧增长,近年来西藏盐湖资源成为人们关注的焦点。西藏地区盐湖水化学类型齐全,元素组成复杂,且卤水矿产资源丰富,综合利用价值大,是研究高原盐湖成盐演化过程的极佳场所。但是,由于西藏盐湖数量庞大,面积大小不一且分布极不均匀,从而导致西藏地区大部分盐湖的勘查工作程度较低,加之缺少系统性的区域成矿理论。因此,对于我们研究西藏盐湖矿产的成矿条件及后续找矿工作产生了较大的阻碍。

鉴于此,本文将对西藏西北部盐湖卤水富矿因素与成矿机理进行探讨,通过构造地貌学和水文地球化学等方面的特征论述盐湖的成因,分析盐湖矿质元素富集的主要因素,并阐述西藏高原的形成过程对盐湖成盐演化的控制作用,旨在完善盐湖矿床成因理论,为西藏的盐湖研究提供基础依据。

1　区域地质背景

西藏湖泊主要集中在 80°—90°E、30°—36°N 之间的藏北高原(昆仑山以南,冈底斯山—念青唐古拉山以北的地区)。湖泊分布很不均,藏南和藏东的湖泊极少,阿里地区和那曲市是湖泊的集中分布区。受多次升降构造运动影响,古湖盆及大泛湖盆长期迁移、退缩,形成多级湖阶地和沙堤,在平面上呈现出小湖群呈 EW 向串珠状分布的特征。据统计,全区面积大于 1 km^2 的盐湖有 392 个,总面积为 11883.31 km^2,占全区湖泊总面积 38.6%;其中面积 1～50 km^2 的盐湖数量约占 80%①。根据现代湖面的海拔高度可将盐湖的分布分为 3 级台面:Ⅰ级台面的高程为 4900 m 以上,Ⅱ级台面的高程为 4500～4900 m,Ⅲ级台面的高程为 4500 m。西藏西北部盐湖的湖面高度多为 4500 m 以上,少数超过 5000 m,形成以湖表卤水型锂矿为主,钾、硼、铷、

收稿日期: 2023－09－04;　**改回日期:** 2024－01－21;　**责任编辑:** 余和勇

基金项目: 四川省冶金地质勘查院 2022 年科技创新项目“西藏自治区西北部盐湖选区”项目资助。

作者简介: 高建国(1996—),男,助理工程师,硕士研究生,主要从事矿物学、岩石学、矿床学的研究。通信地址:四川省成都市成华区地勘路 6 号,四川省冶金地质勘查院;邮政编码:610051。E-mail:506778257@qq.com

铯、溴等多组分共生为特点的特种盐湖矿产地，代表性盐湖有扎布耶盐湖、扎仓茶卡Ⅱ湖、拉果错、鄂雅错等，均具有较大的综合开发潜力。

此外，由于地质构造、地形地貌、气候、水文等因素的控制，西藏湖泊在地域上具有明显的纬向区域分带性。以冈底斯山—念青唐古拉山构造带、班公错—怒江构造带和龙木错—金沙江构造带为界线分割，由南到北可分为 4 个区：藏南外流-内流湖区（Ⅰ区）、羌南内流湖区（Ⅱ区）、羌北内流湖区（Ⅲ区）和可可西里内流湖区（Ⅳ区）[4]。其中，以羌北内流湖区（Ⅲ区）的盐湖个数最多、面积最大，盐湖率可达 55.96%（盐湖率＝盐湖面积/湖泊总面积）。

2 研究区盐湖特征

研究区的湖泊位于 30°—34°N、81°—90°E 之间的藏西北高原，主要涉及那曲市的班戈县、尼玛县，阿里地区的改则县、措勤县和日土县等地区。其中最大的湖泊为昂拉仁错，面积可达 508.26 km^2，最小的湖泊为加琼错，面积仅为 5.17 km^2，它们大多位于Ⅱ级台面（4500～4900 m），多分布于羌南内流湖区（Ⅱ区）。这些湖泊盆地的形成同大型断裂构造带控制的断陷盆地或洼地关系密切，整体呈条带状或串珠状近 EW 向排列，与区域构造线方向基本一致。根据盐湖卤水的基本化学成分可分为 3 种类型：碳酸盐型、硫酸盐型和氯化物型[5]，西藏地区以碳酸盐型和硫酸盐型为主。研究工作中共调查了 37 个湖泊（图 1），其中，位于硫酸钠亚型盐湖带（Ⅱ-2）共 8 个；高矿化度碳酸盐型盐湖带（Ⅰ-1）共 29 个。其中 LiCl 平均品位＞300 mg/L 的湖泊仅有洞错和加琼错，其余均＜150 mg/L，懂布错、别若则错及热帮错 3 个湖泊的 LiCl 平均品位为 100～150 mg/L（表 1）。典型盐湖特征如下：

（1）洞错盐湖。位于西藏自治区阿里地区改则县洞错乡境内，湖面高程为 4395 m，盐湖面积为 105.97 km^2。盐湖盆地呈椭圆状，盐湖北西侧可见极薄层的石盐、芒硝、钾镁矾等化学沉积分布。盐湖的矿化度为 35.65～42.60 g/L，平均 40.38 g/L；卤水中 $\rho(LiCl)$＝304.36～355.83 mg/L，平均 341.35 mg/L；$\rho(B_2O_3)$＝426～492 mg/L，平均 475.00 mg/L；$\rho(KCl)$＝3353.97～4120.68 mg/L，平均 3878.70 mg/L。该湖的矿化度较高，成矿潜力较大，估算其地表卤水锂矿可达中型规模。

（2）加琼错盐湖。位于西藏自治区那曲市尼玛县中仓乡境内，湖面高程为 4598 m，盐湖面积为 5.17 km^2。盐湖盆地呈近似椭圆形，北西侧可见厚 0.1～1.5 m 的化学沉积物分布，主要由片状石膏及蜂窝状钙钠石组成。盐湖的矿化度为 53.47～55.35 g/L，平均 54.41 g/L；卤水中 $\rho(LiCl)$＝732.93～763.47 mg/L，平均 748.20 mg/L；$\rho(B_2O_3)$＝790～815 mg/L，平均 802.5 mg/L；$\rho(KCl)$＝5098.69～5270.30 mg/L，平均 5184.50 mg/L。但该盐湖的湖水面积较小，且水深有限，其地表的卤水锂矿成矿规模较小。

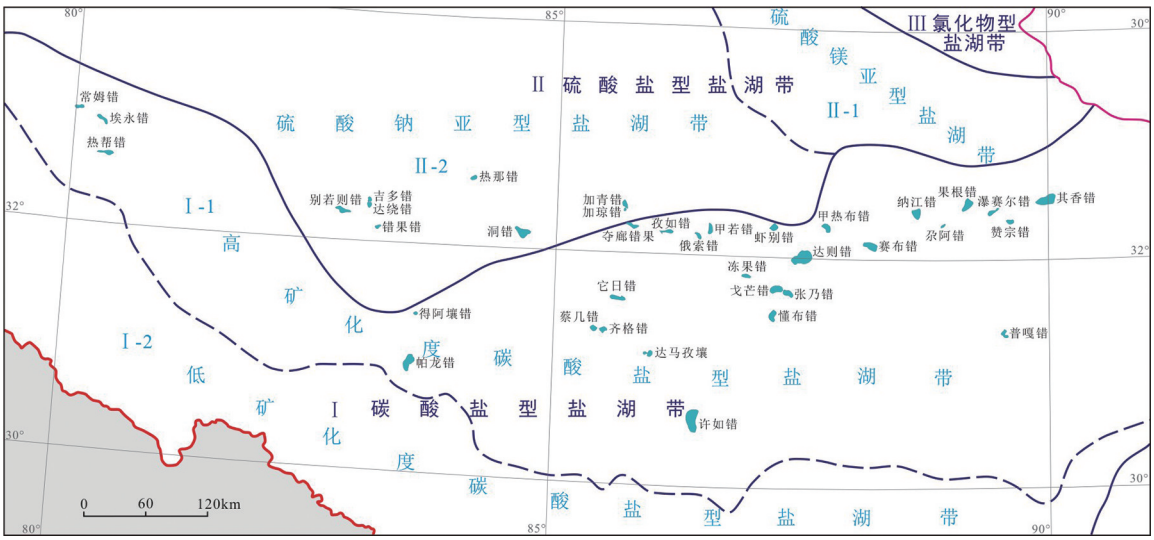

图 1 西藏西北部盐湖水化学类型分带图（据注释①修改）

Fig. 1 Map showing Hydrochemical zoning of salt lakes in Northwest Tibet

表 1　藏西北湖泊地表卤水主要化学成分平均值

Table 1　The average chemical composition of surface brine of the salt lakes

湖泊名称	采样个数	矿化度	ρ/(mg/L)			pH 值	密度
			LiCl	KCl	B_2O_3		ρ/(g/cm³)
洞错	9	40.38	341.35	3878.70	475.00	9.08	1.026
戈芒错	2	8.59	37.62	548.51	59.80	9.53	1.001
张乃错	2	5.81	24.35	369.06	39.10	9.45	0.999
懂布错	3	22.12	144.65	2024.66	117.3	9.63	1.011
虾别错	5	6.30	55.43	404.70	417.70	9.40	0.999
达则错	14	18.47	54.33	873.60	248.00	9.83	1.009
甲热布错	7	9.36	33.63	359.81	351.00	9.69	1.001
赛布错	8	5.59	7.05	175.55	148.70	9.37	0.998
果根错	8	6.89	13.42	214.61	51.10	9.43	0.999
尕阿错	3	2.72	5.85	120.99	29.60	9.37	0.996
纳江错	2	1.31	3.38	33.82	10.60	8.78	0.995
普嘎错	6	12.65	13.77	697.72	41.70	9.11	1.005
赞宗错	4	42.89	54.57	1776.39	159.50	8.78	1.028
瀑赛尔错	5	7.46	10.49	104.18	47.80	9.46	0.999
达绕错	5	2.20	2.56	58.27	16.40	9.12	0.995
别若则错	5	16.75	109.37	734.04	494	8.88	1.007
错果错	3	0.27	0.19	3.92	0.81	8.40	0.993
吉多错	2	15.00	55.01	658.87	271	9.15	1.005
热那错	3	15.83	51.39	615.13	254	9.15	1.007
其香错	9	31.25	61.45	922.54	266	9.93	1.020
常姆错	4	41.12	79.40	2279.54	863.25	9.21	1.030
埃永错	2	0.74	1.16	11.71	11.25	9.79	0.999
热帮错	7	47.03	113.08	2996.89	999.86	9.25	1.036
蔡儿错	2	1.25	1.83	51.57	22.50	8.55	0.998
齐格错	2	1.12	2.84	22.31	15.35	8.75	0.999
达马孜壤	3	1.78	2.22	54.15	14.47	8.56	0.999
许如错	4	3.08	46.45	138.62	236.25	9.02	1.000
它日错	3	1.62	2.69	32.61	9.05	8.77	0.999
甲若错	4	13.27	53.64	550.58	265.00	9.65	1.008
俄索错	4	21.69	80.23	1359.52	369.03	9.29	1.015
冻果错	2	0.57	0.27	6.64	1.09	7.96	0.998
加青错	2	5.16	54.33	228.81	163.00	9.25	1.002
加琼错	2	54.41	748.20	5184.50	802.50	9.59	1.039
夺廊错果	2	5.39	11.33	124.51	143.00	9.35	1.002
孜如错	2	8.15	8.80	214.51	149.50	9.57	1.005
帕龙错	2	3.32	2.60	133.66	97.65	9.39	1.001
得阿壤错	2	0.73	7.09	25.55	31.95	8.40	0.999

3　数据来源及分析处理

本次研究包括西藏西北部的 37 个湖泊,工作手段以湖泊的地表卤水采样为主,根据不同湖泊面积的大小,随机在每个湖泊的各个部位和不同深度采取体积为 550 mL 的地表卤水,经过充分混合密封后,送往西南冶金测试中心进行分析测试。本次共采集地表卤水样 154 件,分析测试项目为 Li^+、K^+、B_2O_3、矿化度、pH 值和密度等 6 项,文中将其转换为 LiCl 和 KCl 进行统计。所有样品的测试均按照《岩石矿物分析》中的相关规范要求进行,其中,Li^+、K^+、B_2O_3 的体积质量采用电感耦合等离子体发射光谱法进行测定。

4　讨论

4.1　富矿因素分析

4.1.1　盐湖构造环境

研究认为,青藏高原开始隆升始于印度-欧亚大

陆 45 Ma 碰撞以后，且现今的面貌是 3～4 Ma 以来快速隆升的结果[6]，西藏盐湖成盐事件最早发生于晚更新世末期，成盐盆地主要为构造湖盆，印度-欧亚大陆碰撞形成以 EW 向构造为主导的冈底斯构造带，这些 EW 向构造带控制着西藏构造地貌、水热及矿产资源等。西藏西北部的环境变化特征与青藏高原地貌的形成及演化关系密切[7]。

此外，印度-欧亚大陆碰撞造山作用产生了一系列盆地-山岭结构，从而形成良好的封闭湖盆环境。本次研究的湖泊主要位于班公湖—怒江构造带附近，受近 EW 向构造控制而呈串珠状展布，同时受构造挤压作用出现大量 SN 向或斜向断裂，从而形成众多沟谷和汇水盆地。本次研究中各项矿质元素品位较高的加琼错盐湖具有良好的构造地貌，该湖三面环山，南西侧为季节性水系（图 2），且未见明显的外流水系分布，从而形成了良好的封闭汇水湖盆，有利于各种矿质元素的富集成矿。

4.1.2 成矿物质来源

研究表明，始新世末，新特提斯残留洋已经全部撤离西藏，全区进入了陆相沉积环境[8-9]，因此，海洋不可能成为盐湖的物质来源。本文研究认为，盐湖成矿物质来源主要包括：陆地蚀源区岩石风化淋滤的雨（雪）水及地下水补给是盐湖物质的主要来源，来自地壳深部的温热泉水是盐湖物质的重要来源。

本次研究发现，绝大部分湖泊周边都会形成不同的第四纪化学沉积物，这些沉积物可能直接影响到盐湖的成矿元素组成，如普嘎错的含锂钾白云石（图 3a）、加琼错的石膏及单斜钠钙石等（图 3b）。新特提斯洋壳在俯冲过程中发生脱水、脱挥发分作用，洋壳以及上覆沉积物中的成矿物质熔融富集形成初始岩浆[10]，这些岩浆通过侵入或喷出作用到达地表浅部，锂元素具有较高的溶解性，在风化淋滤作用将锂元素带出并汇聚（图 3c），为地表富锂卤水提供最主要的矿质来源。此外，风化剥蚀的岩石形成碎粒及粉末，受强风的吹扬作用，含有盐分的尘土随雨水沉降于地表或渗入地下，西藏的大气降水中多含硼、锂等矿质元素，从而持续补给湖泊中的盐分。由于碰撞造山作用形成的一系列裂谷，藏北高原发育纵横交错的内流水系，这些水系长期持续的为藏西北内陆盐湖提供大量的成盐元素。

青藏高原属全球性的地热异常区域，其盐湖卤水的形成与周边出现大量温热泉活动关系密切[11-12]。羌南—喜马拉雅地区热泉向地表和湖泊输入的锂、硼等矿质元素足以超过目前西藏高原现代盐湖锂和硼等矿产已知的资源量[13]。本次研究盐湖所处的班公错—怒江构造带及其次级活动构造也是地热异常分布区，这些地层深部的热液以热水泉为媒介，源源不断地补给盐湖丰富的盐类矿物。例如：虾别错盐湖西侧可见数个温泉进水口（图 3d），水流较缓，味咸苦涩，两侧可见少量灰色含锂泥灰，这些温泉水长期为盐湖提供丰富的矿质元素。

4.1.3 长期持续的高温气候

盐湖的形成除了封闭的湖盆环境和丰富的物源补给外，长期持续干燥的气候也是其形成的必要条件[14]。世界主要锂富集区河流和多数热泉化水体中锂等元素汇集到盐湖中，但富锂卤水的形成还需要经过蒸发富集浓缩过程。由于印度-欧亚大陆碰撞造山作用，西藏地区形成了高原地貌环境，高原挡住了大洋水汽的到达，导致青藏高原内部干旱气候盛行，使得古泛期（距今 3～4 万年前）的大湖蒸发退缩，演变成由众多小湖泊组成的湖群，并逐步形成西藏现今的盐湖格局。

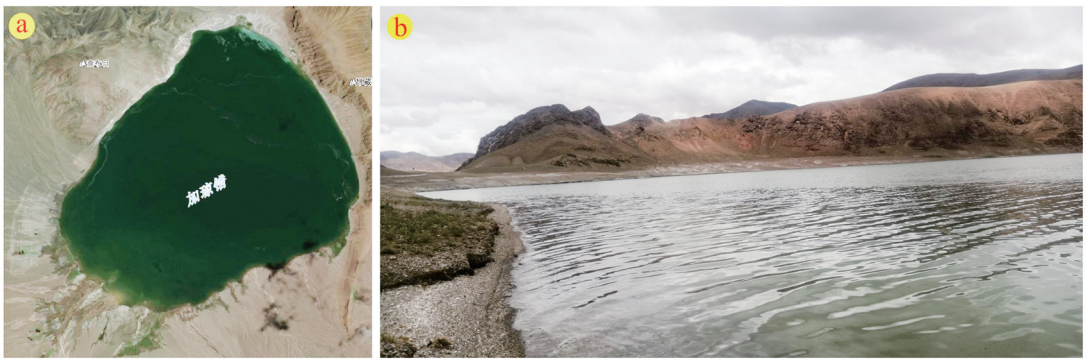

图 2 构造湖盆环境

Fig. 2 Map showing the tectonic basin environmentt

a. 加琼错盐湖卫星图像；b. 加琼错湖盆景观照片

图 3　成矿物质来源

Fig. 3　Map showing material resources of Li ore

a. 普嘎错盐湖化学沉积物;b. 加琼错盐湖化学沉积物;
c. 其香错进水口;d. 虾别错温泉进水口

青藏高原的降雨量分布不均匀,东多西少,南多北少。冈底斯山—念青唐古拉山以北至昆仑山—唐古拉山以南地区气候干燥,年平均气温为 0.9℃,日照时数多。其中,西藏高原北部属于寒冷的干旱-半干旱高原季风气候,西藏西北部年降水量不足 50 mm,年蒸发量远大于降雨量,是盐湖形成的极佳场所。然而,最新研究表明,近 40 年来,由于受到气候变化等因素影响,西藏整体降雨量呈增加的趋势,而蒸发量逐年的下降幅度较大,这使得以大气降水为补给源的湖泊呈扩张的趋势[15],这可能是导致西藏盐湖品位有所下降的重要原因。

4.2　成矿机理浅析

前人总结世界盐湖的特点发现,大洋板块向大陆俯冲或/和陆-陆碰撞作用是盐湖卤水锂成矿共同的动力学背景[11]。研究区的湖泊主要位于班公湖—怒江缝合带及其次级构造带处,这些盐湖的形成同新特提斯洋壳俯冲及印度-欧亚大陆碰撞造山和青藏高原隆起后地貌变化关系密切,从而形成明显同区域构造线方向基本一致的条带状或串珠状排列的盐湖群。

综合上述讨论,我们总结了西藏西北部盐湖卤水锂矿成矿规律(图 4):新特提斯洋板片俯冲过程中,富水洋壳发生脱水脱挥发分作用,洋壳以及上覆沉积物中矿质成分随流体进入地幔楔并发生部分熔融,形成初始岩浆,向上运移过程中不断分异结晶,这些岩浆侵入和喷出至地表浅部形成富矿岩石并引起大量温热泉水活动,高温水-岩反应将地壳中大量锂等成矿物质释放出来。此外,由于印度-欧亚大陆碰撞造山作用形成高原地貌,来自印度洋的暖湿气流受到喜马拉雅山脉的阻断,山区与盆地之间数千米的高程落差以及雨影效应致使盆地内的气候条件极端干旱,且碰撞造山作用能形成盆地-山岭结构,青藏高原内出现大量的封闭汇水盆地,在与主应力平行的方向形成一系列沟谷。最后,早期形成的富矿岩石在长期的风化作用及雨(雪)水的淋滤作用下,以地表(地下)水及温热泉水的形式不断聚集于封闭的汇水盆地中,在长期持续的干旱气候条件下,矿质元素不断浓缩富集,并逐步由淡水湖变为咸水湖,最终形成盐湖卤水矿床。

5　结论

(1)本文研究的 37 个盐湖主要分布于西藏西北

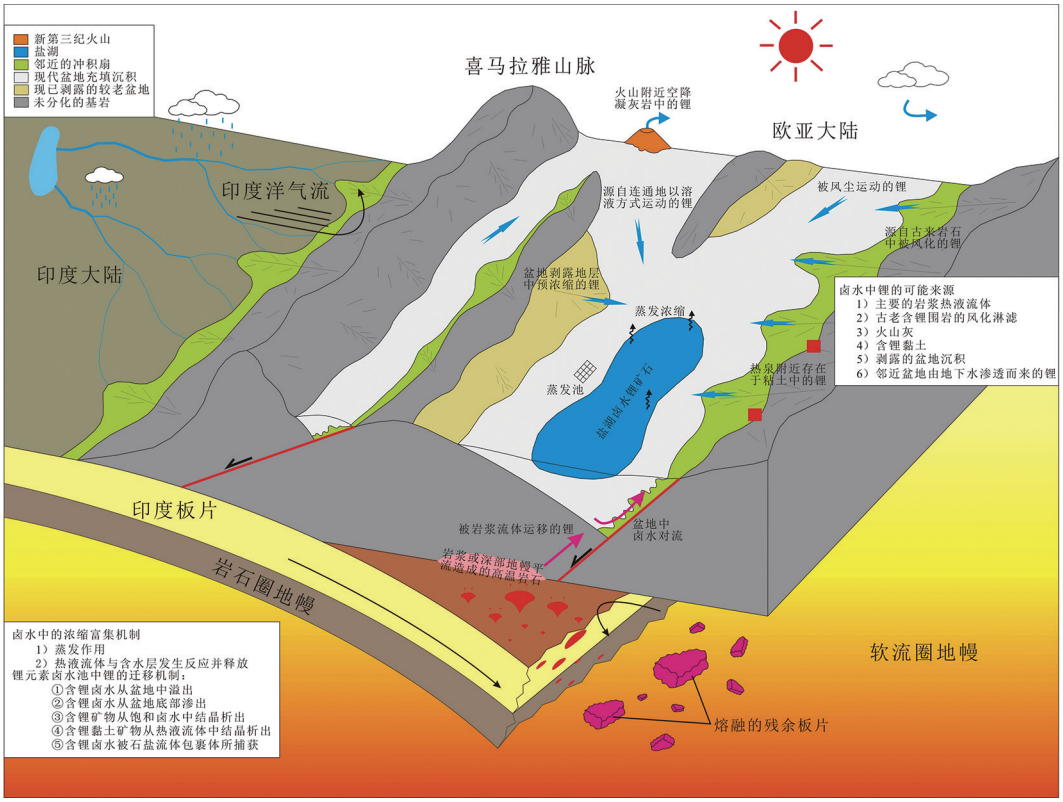

图 4 西藏西北部盐湖卤水锂成矿模式图(据文献[16]修改)

Fig. 4 The Li ore-forming model of salt lake brine of the Northwest Tibett

部，主要分布于羌塘南内流湖区(Ⅱ区)，水化学类型主要为高矿化度碳酸盐型，这些盐湖的地表卤水矿化度在 0.27～54.41 g/L，卤水中氯化锂w(LiCl)＝0.19～748.20 mg/L，其中洞错盐湖地表卤水矿床规模可达中型。近年来受气候变化等影响，西藏西北部盐湖出现了不同程度的湖水淡化。

(2)西藏盐湖的形成主要与新特提斯洋壳俯冲及印度-欧亚大陆碰撞造山作用有关。碰撞造山作用既阻断了来自大洋的水汽进入青藏高原，又形成了封闭的汇水湖盆环境。富水洋壳的俯冲作用产生的岩浆活动形成大面积的富矿岩石，同时引发大量温热泉活动，加之富矿岩石在风化淋滤作用下通过雨(雪)水和地下水的补给，大量成矿物质汇聚进入汇水湖盆，在长期持续的高温条件下最终形成盐湖。

注释：

① 西藏地质矿产勘查开发局第五地质大队. 西藏现代盐湖矿产[R]. 拉萨：西藏自治区地质矿产勘查开发局，2013.

参考文献：

[1] 高春亮，余俊清，闵秀云，等. 全球盐湖卤水锂矿床的分布特征及其控制因素[J]. 盐湖研究，2020，28(4)：48－55.

[2] 孙艳伟. 西藏鄂雅错盐湖卤水地球化学特征及成矿机理[D]. 成都：成都理工大学，2017：1－61.

[3] 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[D]. 北京：中国地质大学，2013：1－85.

[4] 马景露，钟康惠，王恒宇. 西藏自治区盐湖矿产工作区预测[J]. 四川建材，2016，42(2)：268－270.

[5] 郭佩，李长志. 含油气盆地蒸发盐矿物成因类型及其地质意义[J]. 古地理学报，2022，24(2)：210－225.

[6] 杨立强，张中杰，王光杰，等. 青藏高原的隆升过程与地球动力学模型研究进展[J]. 地球物理学进展，2001，16(1)：70－81.

[7] 中国科学院青藏高原考查队. 西藏地热[M]. 北京：科学出版社，1981.

[8] 魏国齐，贾承造，施央申，等. 塔里木新生代复合再生前陆盆地构造特征与油气[J]. 地质学报，2000，74(2)：123－133.

[9] 张克信，王国灿，陈奋宁，等. 青藏高原古近纪—新近纪隆升与沉积盆地分布耦合[J]. 地球科学，2007，32(5)：583－597.

[10] Giggenbach W F. Variations in the chemical and isotopic composition of fluids discharged from the Taupo Volcanic Zone New Zealand [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research，1995，68：89－116.

[11] 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[J]. 地质学报，2021，95(7)：2009－2029.

[12] 郑绵平，刘喜方. 青藏高原盐湖水化学及其矿物组合特征[J]. 地质学报，2010，84(11)：1585－1600.

[13] 郑绵平,刘喜方,赵文.西藏高原盐湖的构造地球化学和生物学研究[J].地质学报,2007,81(12):1698-1708.

[14] Munk L A,Hynek S A,Bradley D C,*et al*. Lithium brines:A global perspective [J]. Reviews in Economic Geology,2016,18:339-365.

[15] 闫立娟,郑绵平,齐路晶.青藏高原湖泊湖面变迁及影响因素[J].科技导报,2017,35(6):83-88.

[16] Bradley D,Munk L A,Jochens H,*et al*. A preliminary deposit model for lithium brines [R]. US Geological Survey Open File Report,2013-1006.

Concentration factor and ore-forming mechanism of salt lake brine in the Northwest Tibet

GAO Jianguo, LUO Bo, PAN Zenglong, HE Yonggang

(*Sichuan Metallurgical Geological Exploration Institute*, *Chengdu* 610051, *China*)

Abstract: Salt Lake area of Qinghai-Tibet plateau is one of the four salt lake areas in China with abundant mineral resources and huge potential ore volume and economic value. The ore-forming mechanism is always the focus of many scholars. Brine samples collected from 37 salt lakes in the Northwest Tibet are analysed. The average Li chloride of surface water of the lakes is 0.19～478.29 mg/L. Dongcuo salt Lake is with ore-forming potential. The surface water with ore deposit Li grade reaches a medium size Li deposit. In addition the Jiaqiongcuo. Dongbucuo, Bieruozecuo and Rebangcuo lakes are also potential for exploitation. Comprehensive analysis of ore-forming condition of the lake brine shows that the Li ore formation of lake brine in the Northwest Tibet may be closely related to seduction of Neotethy oceanic crust and Indo-Eurasian continent collision.

Key Words: Salt lake brine; Li chloride; enrichment factor; ore-forming mechanism; the Northwest Tibet