

柴达木盆地盐湖锂矿床成矿过程及分布规律

余俊清^{1,2}, 洪荣昌^{1,2,3}, 高春亮^{1,2}, 成艾颖^{1,2}, 张丽莎^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008;
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)



作者简介: 余俊清(1954-), 男, 博士(TUD, Germany), 研究员, 博导, 专业研究方向: 地球化学、第四纪地质、湖泊沉积与环境变化。Email: junquyu@isl.ac.cn。

摘要:柴达木盆地盐湖蕴藏 230×10^4 t 锂, 集中分布在别勒滩、东西台等4个盐湖, 占我国卤水锂资源总量~80%, 战略资源地位不言而喻。近年来提锂技术及工程化研究倍受重视, 而对盐湖锂矿成因和分布规律的了解凸显不足, 锂矿资源流失严重与之不无关联。研究查明, 昆仑山高温热泉群含锂泉水长期注入洪—那河, 流入终端盐湖, 蒸发富集成矿; 锂的年输入通量748.8 t, 结合区内盐湖锂矿总储量保守估算, 成矿期始于14 ka BP之后; 洪—那河早期主要流向别勒滩, 在山前冲积扇向北推进、扇前河改道北流后, 方才形成含锂河水当前分配格局。据此, 破解了别勒滩锂矿在研究区储量最大的原由。还查明了锂矿床仅存在于别勒滩, 而在达布逊等3个区段不能成矿的原因。阐明了锂的来源与新生代火山喷发岩、深部岩浆房、昆仑大断裂活动有关, 以及含锂热水持续远程输送至盐湖成矿的地貌和水文气候动因。企业应当根据锂的分布规律和矿床特征, 迅速转变钾肥生产模式。

关键词:盐湖卤水锂矿; 锂矿成因; 水热活动; 西风带水文气候; 流域地貌

中图分类号: P618.71; TQ131.11

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2018)01-0007-08

柴达木盆地以蕴藏丰富石油天然气和盐湖钾盐等矿产资源闻名于世。盆地1/4面积由于盐滩和盐湖覆盖, 察尔汗盐湖是我国最大的钾盐矿床和钾肥生产基地, 对于农业大国意义非同一般。近年来, 在各国新能源战略中锂的地位显著、价格飙升, 动力锂离子电池需求迅猛增长。因此, 从盐湖卤水中提锂备受关注, 研究工作受到高度重视, 工程化步伐有所加快。由于长期偏重盐湖钾矿资源勘探开发的历史原因, 对盐湖锂矿成因和分布规律的研究和认知缺乏应有深度, 以致在大规模开采含钾卤水时忽视了对共生含锂卤水的有效保护, 锂矿资源流失严重。为了查明盐湖锂矿形成的主控因素和分布规律, 我们开展了格尔木河、洪水河—那陵格勒河(洪—那河)系等主要河流, 以及它们的终端盐湖——察尔汗大盐湖、东台吉乃尔(东台)、西台吉乃尔(西台)、一里坪等盐湖的

多次考察、系统取样和综合研究。

前辈科学家基于1995年以前的研究结果提出了以下两种学说: 1) 盆地西部早期盐湖的含锂残存卤水经一里坪、东台、西台盐湖东迁至察尔汗盐湖, 构成锂的重要来源; 深部含锂卤水沿深大断裂上涌, 与残存卤水相互掺杂, 促进了锂的富集成矿^[1]。2) 距今三万年前的构造运动, 将“古昆仑湖”和“古那陵格勒湖”贯通并切口注入察尔汗湖区, 经蒸发浓集形成钾锂矿床^[2]。然而, 这两种学说都无法解答盐湖锂矿为何只在别勒滩却不能达布逊以东的3个盐湖区形成的原因。鉴于柴达木盆地盐湖锂矿资源具有极高的经济价值, 摸清其成因和分布规律不仅在成矿理论方面意义重大, 而且是盐湖资源开发利用的不同阶段中必须了解和掌握的重要基础资料。

收稿日期: 2018-02-28

基金项目: 国家自然科学基金委—青海省联合重点基金项目(U1407206); 国家自然科学基金面上项目(41471013, 41171171)

1 锂的分布特征

为了摸清盐湖中锂的主要来源,本研究从勘查格尔木河、洪—那河系等主要河流及其终端盐湖表卤和关联地下卤水的锂含量分布特征入

手,旨在厘清河流锂含量及锂输入通量与终端盐湖卤水中锂离子含量及锂储藏量之间的关系。鉴于盐湖表卤和关联地下卤水经历了多年采矿后,多地基本失去了原始化学组成的特征,需要选取和参考开采卤水之前的盐湖表卤和地下卤水的数据和资料。

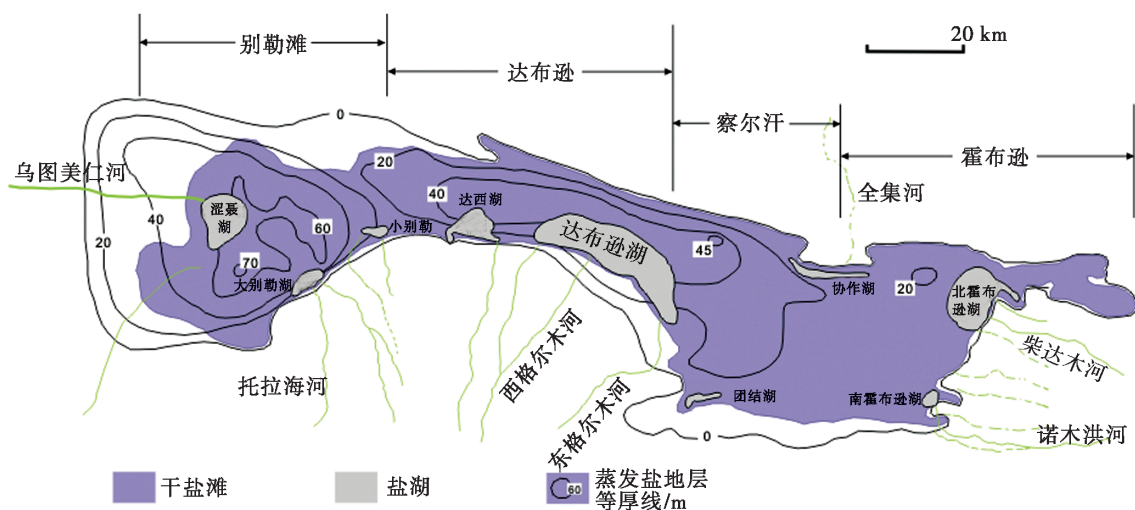


图 1 察尔汗大盐湖(开发前)蒸发盐地层厚度^[3]及其 4 个区段中盐湖和汇入河流(水化学参数见表 1)

Fig. 1 Qarhan Playa with isobaths of evaporite strata prior to exploitation^[3] and its designated four zones. The distribution of saline lakes on the edge of the playa is associated with river inflows (Refer to Table 1 for chemical parameters)

结果显示,察尔汗大盐湖最西部的别勒滩盐湖区(图 1)主要接受来自乌图美仁河(乌图河)水的常年补给,其终端盐湖涩聂湖的锂含量在 106 ~ 191 mg/L 范围内变化。涩聂湖位于别勒滩干盐湖西部,在开采卤水之前,干盐湖地下卤水距地表通常仅为十几至几十厘米,丰水期盐湖地表卤水补给地下卤水,旱季时盐湖地下卤水回补涩聂湖。在近地表浅层蒸发作用下,别勒滩干盐湖地层晶间卤水的锂离子含量高于涩聂湖,其北部地下卤水的锂离子含量更是高达 300 ~ 600 mg/L(图 2)。调查发现,洪—那河水在东昆仑山出山口附近的锂含量平均达到 0.727 mg/L,比格尔木河水锂含量高 20 倍左右。乌图河水向东流入涩聂盐湖和别勒滩,河水锂的平均含量达到 0.779 mg/L。地貌调查发现,乌图河超过 80% 的径流量源自洪—那河水经由山前 I 级冲积扇地表和地下渗流水的补给。锂含量较高的乌图河水汇入涩聂盐湖后,长期蒸发作用使得涩聂湖锂离子含量平均达到 106 mg/L。不断接

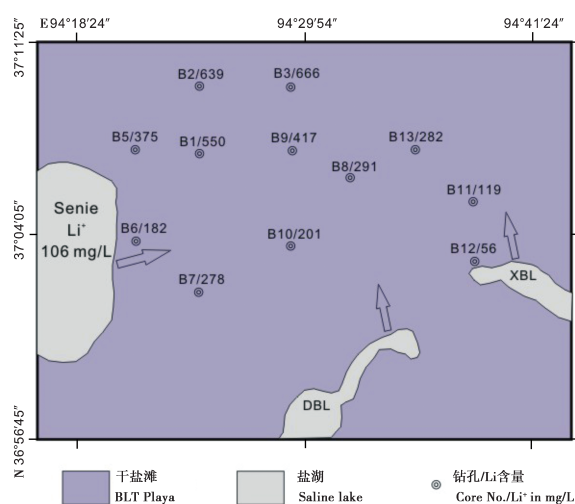


图 2 涩聂湖及其东部干盐滩钻孔号/晶间卤水 Li^+ 平均含量(数据来源^[4])

Fig. 2 Senie Lake and Biele Tan Playa; core number/interstitial brine Li^+ concentration (Data from Tian^[4])

受涩聂湖高锂含量湖水渗流补给的别勒滩盐湖地层晶间卤水的锂含量逐渐提高,平均达到 201 mg/L,展现了从河水—盐湖—晶间卤水锂离子浓度逐步升高的正相关关系。

区内锂含量低的河流及其终端盐湖情况可用察尔汗大盐湖最东部的河流—盐湖—干盐湖系统例示。柴达木河水锂离子含量近乎为零(表 1,图 1),其终端湖北霍布逊湖及其关联盐湖区地下卤水的锂离子含量分别低至 11.2 mg/L 和 10.3 mg/L。锂含量如此之低,与洪—那水系及其终端盐湖形成鲜明反差。这种情形同样发生在格尔木河及其终端盐湖系统。

格尔木河是径流量仅次于洪—那河的第二大河流,是汇入达布逊和察尔汗两个盐湖区的主要

地表和地下径流(图 1)。从格尔木河出山口至盐湖一带形成巨大的山前冲积扇。东、西格尔木河等多条长年河流和许多季节性河流呈扇型注入察尔汗盐湖,在其南部边缘形成区内最大的地表卤水湖——达布逊盐湖。格尔木河在昆仑山区河水锂离子平均含量为 0.035 mg/L,仅为洪—那河水系锂离子含量的 1/20。其终端盐湖——达布逊盐湖 1958 ~ 1966 年间实测锂离子平均含量 33.4 mg/L,按 1980 年 6 月实测数据,达布逊和察尔汗盐湖晶间卤水锂含量分别为 26 mg/L 和 15.6 mg/L(表 1),低于达布逊盐湖永久性地表卤水的锂含量。这里地表和地下卤水的锂浓度远没有达到 100 mg/L 工业级卤水锂矿床的浓度标准,仅为别勒滩盐湖区卤水锂含量的 1/10 ~ 1/20。

表 1 察尔汗大盐湖 4 个区段地表和地下盐湖卤水、入流河水的化学参数

Table 1 Chemical parameters of surface and underground brines and inflowing rivers of the four zones of Qarhan Playa

区 段	水 体	采样 时间	pH 值	矿化度 /(g·L ⁻¹)	离子含量/(mg·L ⁻¹)		水化学类型	资料 来源
					K ⁺	Li ⁺		
别勒滩 区段	别勒滩晶间卤水	1980.6	6.5	358	23 183	124	硫酸镁亚型	①
	涩聂湖水	1980.6	7.1	332.2	7 266	191	硫酸镁亚型	①
	乌图美仁河水	1987	8.1	0.72	18.26	0.42		③
	大别勒湖水	1980.6	7.0	362.9	8 466	37	硫酸镁亚型	①
	托拉海河水	1987	7.1	0.37	12	0.026 [*]	氯化物型	③
	小别勒湖水	1980.6	6.2	386.9	18 928	66.3	硫酸镁亚型	②
达布逊 区段	盐湖晶间卤水	1980.6	6.7	331.8	19 037	26	氯化物型	①
	达布逊湖水	1980.6	5.3	470.2	712.8	88.4	硫酸镁亚型	①
	西格尔木河	1987	7.9	0.34	4.15	0.03		③
	东格尔木河	1987	6.7	0.76	9.3	0.04	硫酸镁亚型	③
	达西湖	—	7.4	262	3 400	—	硫酸镁亚型	②
察尔汗 区段	盐湖晶间卤水	1980.6	7.0	321.5	12 110	15.6	硫酸镁亚型	①
	团结湖湖水	1980.6	5.4	425.3	7 222	59	硫酸镁亚型	①
	协作湖水	1980.6	5.5	358.5	7 724	28.6	氯化物型	①
	全集河水	1987	7.5	0.36	14.94	0.12	氯化物型	③
霍布逊 区段	盐湖晶间卤水	1980.6	6.7	311.2	2 957	10.3	氯化物型	①
	南霍布逊湖水	—	7.9	313	3 627	13.83	氯化物型	②
	诺木洪河	1987	8.0	0.37	1.49	0		③
	北霍布逊湖水	—	7.5	310	790	11.2	氯化物型	②
	柴达木河	1987	8.2	0.38	3	0		③

①青海盐湖研究所;②青海第一水文地质队;③化学矿产地质研究院

按照目前的河系特征,洪—那河含锂河水除了小部分通过地表和地下径流汇入乌图河,流入涩聂湖和别勒滩盐湖,大部分径流量汇入台吉乃尔河,并沿着台吉乃尔 II 级冲积扇,经由东台吉乃尔河(东台河)和西台吉乃尔河(西台河)以及它们不断游移的支流分别流入东台和西台盐湖(图 3)。东台、西台盐湖面积、水深等参数随着洪—那河的季/年/十年/百年等不同尺度流量的变化而变化,地表卤水锂离子含量也相应地随之波动变化。以东台盐湖为例,在 1959 年 4 月至 1960 年 4 月间,湖水面积在 $116 \sim 173 \text{ km}^2$ 的范围

内变化,湖水锂离子含量发生的相应变化范围为 $353.6 \sim 150 \text{ mg/L}$ 。在洪—那河流量剧增的春夏两季汛期,部分湖水沿着苦水沟溢流,汇入一里坪盐湖,其汇流量受洪—那河系径流量的控制。径流量低的年份,一里坪盐湖成为几乎完全干涸的干盐滩;丰水年份中,一里坪盐湖可连续多年被湖水覆盖。一里坪盐湖的这种水文特性,决定了其含盐地层和地下卤水的特征:含盐地层比区内其它盐湖的厚度小且横向岩相变化大;含盐地层中地下卤水锂含量相对较高,达到 $212.8 \sim 491.1 \text{ mg/L}^{[1]}$,但锂矿储量相对较小(表 2)。

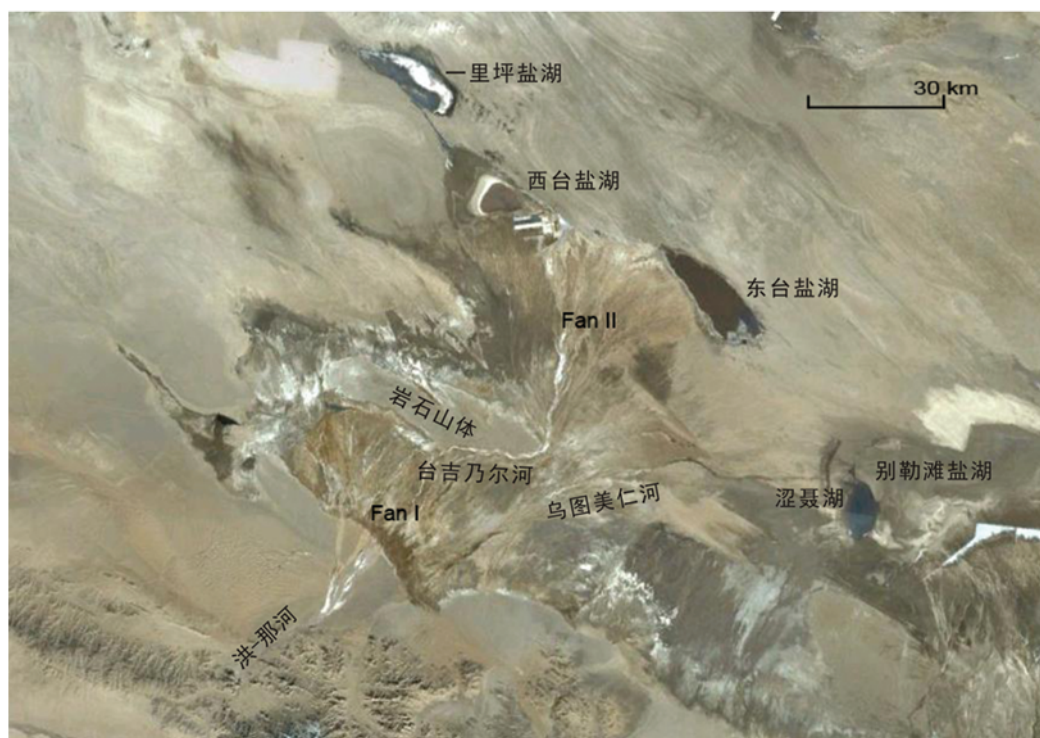


图 3 洪—那河山前冲积扇、扇前河—台吉乃尔河、台吉乃尔河冲积扇、乌图美仁河,以及终端盐湖一里坪、东台、西台、别勒滩(包含涩聂湖)

Fig. 3 Satellite image showing H - N River fluvial Fan I, Taijinaier River Fan II, Wutumeiren River, and their terminal salt lakes of Yiliping, Dong Taijinaier, Xi Taijinar, and Bieletan (including Senie saline lake)

总之,洪—那河是流入柴达木盆地流量最大的河流,洪—那河系锂离子含量高达 0.7 mg/L 以上,凡是受其常年补给的终端盐湖,其地表卤水和晶间卤水的锂离子含量皆较高,都已经达到卤水锂矿的工业品位浓度。其它河流,包括径流量第二大河格尔木河,因其河水锂离子平均含量低至

0.035 mg/L ,仅为洪—那河的 $1/20$,其终端盐湖的锂离子含量皆较低,远不能达到卤水锂矿床 100 mg/L 工业浓度标准。上述察尔汗大盐湖锂的分布特征在大规模抽取别勒滩含锂卤水和明渠输送至察尔汗盐田之后,改变很大毋庸置疑,具体现状有待调查。

表 2 区内各盐湖锂矿储量和总储量
Table 2 Lithium reserves in the salt lakes of the YLP, XT, DT and BLT

盐湖名	一里坪 (YLP)	西台吉乃尔 (XT)	东台吉乃尔 (DT)	别勒滩* (BLT)	总储量
锂矿储量 Li × 10 ³ /t	67.3	504.9	466.2	1 267.0	2 295.7

资料来源:曹文虎,吴禅,等^[5]; * 青海盐湖集团 (2008)

2 锂的来源

本项研究在查明了洪—那河水系含锂河水输入与锂矿分布特征关系后,聚焦勘查和研究了洪—那河锂的来源和输入通量。水样测试结果显示,河水的平均锂离子含量 0.727 mg/L。取那陵河水 12.75 × 10⁶ t 平均流量计算,入盆锂输入通量为 748.8 t/a^[3,6]。

盐湖锂的来源通常与火山喷发岩有关,例如南美乌尤尼盐湖,其周边地带分布有大量锂含量较高的火山喷发凝灰岩。然而,在一里坪、东台、西台至别勒滩盐湖区及其周边地带不存在火山喷发岩。调查发现,在洪—那河水系的洪水河上游河谷及其汇流区内有中、新生代火山口和中酸性火山喷发岩地层分布,火山岩露头区距离东台盐

湖的距离超过 380 km。著名的昆仑左旋活动大断裂呈近东西走向位于洪水河北侧(图 4)。昆仑大断裂在布喀大阪山附近呈马尾状向西展开,其中一条活动断裂沿着勒斜武旦湖至太阳湖一线与昆仑大断裂交汇。特别引人注目的是,位于这两大断裂交汇区及布喀大阪山南麓的热泉群有大约 150 处喷水口,沿着昆仑大断裂的一条破碎带绵延了 1.5 km。昆仑大断裂 2001 年再次活动,引发 8.1 级大地震,断层破碎带切穿热泉群区(参见^[3])。热泉水锂离子含量高达 96 mg/L^[7],经多年涌流汇集成永久性湖泊,其富锂湖水经由河道流入洪水河,致使洪水河上游河水锂离子含量高达 8.5 mg/L,中游河水 2.04 mg/L^[2]。研究发现,太阳湖与洪水河呈现季节性连通,由此判断太阳湖水锂离子含量达到 0.3 mg/L 的原因也与热泉水的输入有关^[3]。

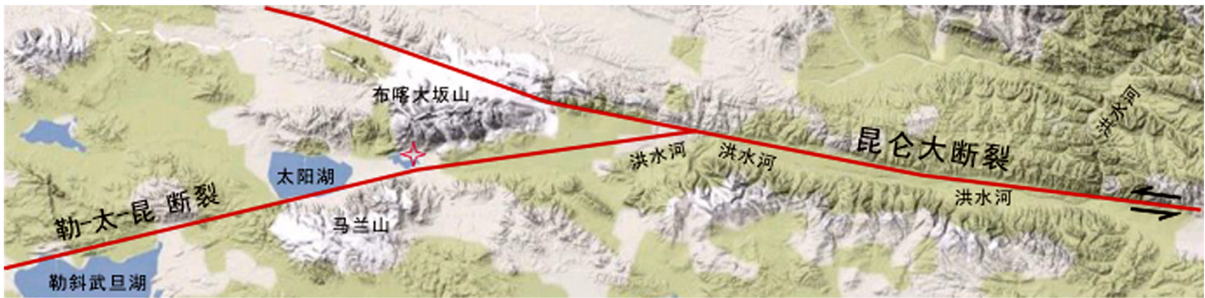


图 4 十字星指示水热场位于布喀大阪山麓昆仑大断裂(Kunlun Fault)活动断层交汇地带,含锂热水经由 150 个热泉口喷涌地表形成湖泊并注入洪水河(H - river)
Fig.4 The red star indicates the location of a geothermal field lying at the foot of Mt. Buka Daban and in the area where two active faults of the Kunlun Fault converged. Hot spring waters rich in Li⁺ eject from 150 vents, forming a lake from which drains into H - river

本项研究认为,区内火山岩风化侵蚀等地表作用对洪—那河水锂的贡献不大,可以忽略不计。受昆仑大断裂新构造运动及地震频繁发生的影响,洪水河谷地带的水热场(hydrothermal field)发育,含锂热泉水大量涌出,是洪水河水锂的主要来

源。热泉水 Li、B、As 的浓度分别高达 96 mg/L, 180 mg/L, 46 mg/L^[7]。据此推断,这些规模较大的水热场的形成及其高温热水经由 150 多个泉口的不断喷发或上涌,很可能与深部岩浆房有关联。锂直接来源于岩浆溶液可能性存在,但有待研究

证实。另一种可能是深部热源引发的对流促成高温热水从火山岩层中溶滤出大量的锂,经由活动水热场通道输送、热泉喷口喷涌到地表。300 ~ 350 °C 以上高温热水对区内火山岩溶蚀产生的大量锂离子经由热泉喷出地表,很可能构成洪水河和盐湖锂的主要起源^[3]。区内几条活动断裂交汇地带的断层错动和地震活动频繁,有利于水热场活动的持续。热泉群位于布喀大阪山麓,流域内年降水量 > 260 mm,加上夏季冰雪融水,有利于地表水的下渗补给。洪水河上游区海拔 4 880 m,与东台等盐湖区形成大于 2 190 m 的高程落差;构造作用形成的南北走向的洪水河谷切穿昆仑山,将含锂河水源源不断地输入柴达木盆地低洼地带的盐湖,在极端干旱的气候条件下蒸发富集,形成卤水锂矿床。

隶属洪—那河系的那陵格勒河锂离子含量很低,仅为 0.04 mg/L^[2],与格尔木河锂含量相近^[4]。调查未见有火山喷发岩在那陵河流域出露,说明这里不构成盐湖锂的源区。因此,与格尔木河相似,那陵河水对柴达木盆地盐湖锂矿的形成没有实质性贡献。

3 锂的富集成矿过程

上述结果已经证明,凡是接受洪—那水系含锂河水补给的地表盐湖和干盐湖晶间卤水都能形成卤水锂矿床。这些盐湖包括:涩聂湖和别勒滩盐湖、东台、西台和一里坪盐湖。在讨论富集成矿过程之前有必要澄清,西部残余含锂卤水或深层地下含锂卤水上涌补给是否构成重要贡献。假如存在重要贡献,那么达布逊和察尔汗两个盐湖区必定也能形成卤水锂矿床。这是因为,来自西部的残余含锂卤水必定也会抵达察尔汗大盐湖的达布逊和察尔汗盐湖区;况且,这里也是深层地下含锂卤水上涌补给的主要区段。然而,锂的分布特征已经证明,这两个盐湖区皆未能形成卤水锂矿床。因此可以肯定,洪—那河含锂河水的注入是区内 4 个盐湖锂矿床形成的决定性物源。

锂资源勘探结果(表 2)显示,区内锂矿总储量 229.57×10^4 t ($1\,408.3 \times 10^4$ t LiCl)。假定洪—那河系输入柴达木盆地锂离子输入通量 748.8 t/a 保持不变,再扣除通量的 50% 作为输送

过程和进入盐湖后的各种损耗,照此估算锂资源的形成时间只需 6 000 a 左右,保守估算不应超过 14 ka。如果按照“昆仑古湖”和“那陵格勒古湖”因三万年前决口致使大量含锂卤水汇入察尔汗大盐湖之学说^[2]估算,总量会比实际查明的锂矿资源总量至少高 3 倍以上。而且,照此学说达布逊和察尔汗盐湖区就不会不存在锂矿床。

本项研究发现,含锂河水季节性集中汇流进入终端盐湖和随后的蒸发浓集作用是区内盐湖锂矿最主要的成矿作用过程。观测结果显示,一年中春、夏两季频发洪水,经由洪—那河水系汇入东台、西台、涩聂等盐湖后,湖水变深、湖面扩张,并且迅速稀释盐湖地表卤水 Li、K 等元素的离子浓度;由于盐湖区降水量 < 30 mm/a,洪水期过后强烈的蒸发作用使得 Li、K 离子浓度又会迅速上升。图 5 对此给出了直观的展示:春季洪水期大量含锂河水汇入使得西台盐湖 Li^+ 经稀释作用降低至 < 200 mg/L,随后的蒸发作用使得 Li^+ 升高,6 月份达到 > 600 mg/L,7 ~ 8 月份更多河水流入使得 Li^+ 含量迅速降低,回到接近 200 mg/L 低值。正是这种季节尺度过程年复一年的循环往复,最终富集成矿。

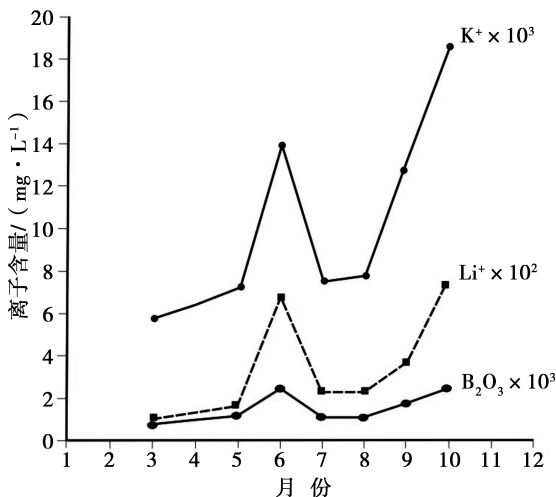


图 5 西台吉乃尔盐湖 Li^+ 、 K^+ 、 B_2O_3 月平均含量变化曲线(2001 年)^[8]

Fig. 5 Monthly measured Li^+ 、 K^+ 、 B_2O_3 concentrations of Xi Taijinaier Lake in 2001^[8]

十年至百年尺度上的研究结果显示,含锂河水汇流量越大,越有利于盐湖卤水锂资源量的增

大。以1989年夏季五十年/百年一遇特大洪水事件为例,昆仑山区径流引发的特大洪水造成涩聂湖异常扩大,增大了对干盐滩地下卤水的补给;涩聂湖水和别勒滩晶间卤水被稀释及锂离子浓度的降低只是短暂过程,在强烈的蒸发浓集作用下,卤水 Li^+ 浓度很快恢复常态。对东台、西台和一里坪沉积系统而言,该尺度上的洪水只会使得东台盐湖较长时间被相对较深的地表卤水覆盖,更多的地表卤水会向西溢流,造成一里坪干盐湖完全被卤水覆盖,强烈的蒸发作用会促使一里坪富集更多的锂。总之,在洪—那河流域水循环及其终端盐湖水量平衡的基本构架下,各盐湖季节至百年尺度上都以浅水水位波动为主要格调,由此决定了含锂河水入流量越大,越有利于区内各盐湖锂储量的增长。

本项研究针对内区沉积系统和流域水循环特征,分析和研究了千年尺度水文气候条件对终端盐湖锂矿富集过程的影响后认为,早—中全新世相对暖期更有利于锂的富集和锂矿资源量的增大。尽管洪水河流域同受西风带干旱气候主控,但地形效应决定了海拔越高,降水量越大^[6]。洪水河上游流域年平均降水量 $>260\text{ mm}$,比盐湖区高100倍左右。我们发现,相对暖期时地面温度增高,大气垂向对流增强,在山地地形因素影响下的大气冷凝作用增强,致使山区降水量增加。受更多下渗地表水的影响,含锂热泉水进入洪水河的排放量增加,导致更多的锂经由洪—那河系输入终端盐湖。需要强调指出的是,地面气温升高在昆仑山区会增加降水量,而在盐湖区则变得更加干旱,蒸发作用增强,更有利于盐湖蒸发加剧、盐类矿物的沉积,以及卤水中锂离子的富集。高山区和盆地区对气温的差动反应在相对暖期中更加放大,既会加剧盐湖蒸发盐矿物的沉积作用,也有利于锂的富集成矿^[3]。

4 锂的分布规律与资源保护

如图1所示,别勒滩盐湖是在形成最上层15 m左右厚度含盐地层时,才与其东部的达布逊盐湖区贯通并逐步行成统一的察尔汗大盐湖。换言之,在上部15 m含盐地层沉积形成之前,别勒滩是一个完全独立的封闭沉积盆地,与达布逊盐

湖区没有水力联系。研究发现,正是因为别勒滩与达布逊之间的地下隆升阻隔了含锂河水向达布逊盐湖区东迁,洪—那河含锂河水经地表和地下渗流汇入别勒滩盐湖,经过长期蒸发作用富集成矿,形成研究区内最大的、钾锂共生的卤水锂矿床,锂储量达到 $126.7 \times 10^4\text{ t Li}$ 。地下隆升阻隔含锂河水东流,造成了达布逊及其以东盐湖区不能形成锂矿。

按照目前含锂河水的分配格局和上述成矿机理,东台、西台和一里坪盐湖的锂矿储量应当远大于别勒滩,为何实际情况却是3个盐湖锂储量之和也不及别勒滩的锂储量,地貌学研究结果对此给出了答案。在昆仑山前冲积扇逐步向终端盐湖推进的过程中,扇前河在早期主要向东流向别勒滩盐湖;在扇前河向北推移至台吉乃尔河目前的位置后,受到岩石山体的阻挡,东流河道在山体东端尖灭处被洪水切口,河水改道北流。从此,洪—那河大约70%径流量流向东台和西台盐湖,开始了台吉乃尔河冲积扇的形成,并且逐步向东台、西台盐湖北部地带推进。正是由于洪—那河的含锂河水早期主要流入别勒滩盐湖,加上乌图河后期的继续补给,使得别勒滩盐湖成为柴达木盆地储量最大的钾锂共生矿床,其锂储藏量接近全球卤水锂矿藏的平均规模量($145 \times 10^4\text{ t}$)。研究还发现,察尔汗大盐湖近2/3的含钾卤水矿储藏在别勒滩盐湖含盐地层中的原因,同样与洪—那河水系的上述演变过程紧密关联^[3]。

察尔汗大盐湖从2008年起全面进入年产百万吨级钾肥生产阶段,最近几年钾肥年生产量接近 $500 \times 10^4\text{ t}$,需要大量利用来自别勒滩盐湖区的含锂卤水。在实施大规模抽卤及生产钾肥后如何依据研究区锂的分布规律和矿床特征,有效避免锂的流失,过去和现在都是十分紧迫的重大任务。当前,除了要尽快解决提锂的关键技术问题,在保证卤水充分提锂的基础上尽快提高产能,还必须立即转变(钾锂共生)卤水的钾肥生产模式,确保珍贵盐湖锂矿资源的有效保护。尽管这种转变可能会受到错综复杂因素的制约,实施不易,但是尊重科学、按客观规律办事,方能亡羊补牢,避免更多的资源流失及经济损失。国家目前正在大力促进和推动的产业转型升级,实为天赐良机。

参考文献:

- [1] 张彭熹,等. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京:科学出版社,1987: 235.
- [2] 朱允铸,李争艳,吴必豪,等. 从新构造运动看察尔汗盐湖的形成[J]. 地质学报,1990,14(1):13-21.
- [3] Yu J Q, Gao C L, Cheng A Y, *et al.* Geomorphic, hydroclimatic and hydrothermal controls on the formation of lithium brine deposits in the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 50: 171-183.
- [4] 田润,韩凤清,马海州,等. 察尔汗盐湖别勒滩区段晶间卤水的主要离子分布特征. 盐湖研究, 2007, 15(3): 7-13.
- [5] 曹文虎,吴禅,等. 卤水资源及其综合利用技术[M]. 北京:地质出版社,2004: 316.
- [6] 展大鹏,余俊清,高春亮,等. 柴达木盆地四盐湖卤水锂资源形成的水文地球化学条件[J]. 湖泊科学, 2010, 22(5): 783-792.
- [7] 李炳元. 青海可可西里地区自然环境[M]. 北京:科学出版社,1996: 260.
- [8] 张炳文,李正焕,杨智琛,等. 青海省大柴旦镇西台吉乃尔湖锂矿矿区勘探报告[M]. 西宁:青海省金星矿业有限公司, 2002: 284.

Lithium Brine Deposits in Qaidam Basin: Constraints on Formation Processes and Distribution Pattern

YU Jun-qing^{1,2}, HONG Rong-chang^{1,2,3}, GAO Chun-liang^{1,2}, CHENG Ai-ying^{1,2}, ZHANG Li-sa^{1,2}

- (1. *Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China*; 2. *Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining, 810008, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China*)

Abstract: Salt lakes in Qaidam Basin contained 2.3 million tons lithium, most of which were reserved in Bieletan, Dong Taijinaier, Xi Taijinaier and Yiliping, accounting for nearly 80% brine lithium found in China. In the past decade great attention has been paid to the study of extraction methods and manufacturing technology for the strategic resource, but studies on the origin and mode of formation of the lithium brine deposit remained limited. This has partially led problems regarding protection from some losses of Li in the manufacturing processes of potash production. Our recent investigation found that (1) ~150 hot-spring vents of a hydrothermal fields provide Li-rich water as the distal source of lithium transported by H-N River runoff draining into terminal saline lakes where Li-brine deposit was formed by a long-term evaporative enrichment process. (2) The beginning of Li-brine deposit formation was not earlier than 14 ka BP, estimated based on the Li-flux of 748.8 t/a and total Li reserve in salt lakes. (3) Li-bearing waters of H-N River drained most into Senie Lake and Bieletan Playa during the early stage of Fan I northward progradation and the present-day distribution pattern of Li-bearing water commenced following Taijinaier River shifted its water course draining toward DT, XT and Yiliping. The geomorphic evidence sheds light on the cause of more than half of the total Li-resource reserved in Bieletan. The puzzle regarding why the Dabuxun adjacent to Bieletan had no Li-deposit is solved by finding the evidence that Bieletan was an isolated basin from Dabuxun due to a subsurface rise, which blocked passage of Li-bearing water. We found evidence that the origin of Li is associated with Cenozoic volcanics, the function of a deep-underground magmatic chamber and neotectonic activities of the Kunlun Fault. The formation of the Li-brine deposit was overall enabled by distal supply of lithium via H-N River and the contrasting hydroclimatic conditions between high-altitude Kunlun Mountains and hyperarid Qaidam Basin. The knowledge of understanding the characteristics of the depositional system and distribution pattern of the Li-brine deposit is fundamental and helpful for establishing mature manufactural processes of the co-existing Li – and K-brine deposit.

Key words: Lithium brine deposit; Lithium origin; Hydrothermal activity; Westerlies hydroclimate; Watershed geomorphology