

# 青藏高原南部地热型锂资源

王晨光<sup>1</sup>, 郑绵平<sup>1\*</sup>, 张雪飞<sup>1</sup>, 叶传永<sup>1</sup>, 伍倩<sup>1</sup>, 陈双双<sup>3</sup>, 黎明明<sup>1</sup>, 丁涛<sup>1</sup>, 杜少荣<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院地质矿产资源研究所, 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

3. 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广州 510275

**摘要** 高温地热水中含有丰富的锂资源, 世界各国对其中锂资源的开发利用的研究越来越多。对青藏高原丰富的地热资源中富锂地热资源进行了综述, 得出其具有以下特点: (1) 构造控制强烈, 地热型锂资源主要分布在雅江缝合带两侧及其南部地区强烈活动的高温地热田中, 受到沿近 NS 向正断层发育的裂谷或地堑盆地的强烈控制; (2) 品质好, 锂含量可高达 239 mg/L; Mg/Li 非常低, 多数富锂地热系统 Mg/Li 介于 0.03~1.48; Li/TDS 相对较高且介于 0.25%~1.14% (扎布耶富锂盐湖为 0.19%; 玻利维亚乌尤尼盐湖为 0.08%~0.31%); 持续稳定排放数十年, 部分达到工业品位 (32.74 mg/L); 伴生可以综合利用的 B、Cs 和 Rb 元素等; (3) 规模大: 据不完全统计, 当前锂含量达到或超过 19 mg/L 的富锂温泉至少有 19 处, 年排出金属锂约 4281 t, 折合碳酸锂 25686 t, 并且最新钻孔数据表明地热田深部潜力巨大; (4) 属于非火山型, 火山岩缺失; (5) 深部来源成因, 富锂地热系统的形成与印度和欧亚大陆碰撞引起的地壳深部部分熔融密切相关, 深部熔融岩浆为富锂地热系统提供了稳定的热源, 富锂的母地热流体沿着青藏高原南部广泛发育的断裂带上涌至地表形成高温富锂热泉。由此, 认为青藏高原南部广泛发育的高温富锂地热资源是一种非常有价值、值得开发利用的地热型锂资源, 随着地热水中锂提取技术的不断提升, 青藏高原南部地热型锂资源有望成为一种可有效开发利用的锂矿床新类型——地热型锂矿床。

**关键词** 青藏高原南部; 地热; 锂资源

近几年, 随着电动汽车的推广和普及, 世界锂资源的需求不断增长, 面对锂价格的不断上涨<sup>[1-2]</sup>,

全球范围内锂矿的勘查保持持续的活跃态势<sup>[3]</sup>。富锂地热水中的锂资源越来越受到关注<sup>[4-5]</sup>, 有学者

收稿日期: 2020-04-01; 修回日期: 2020-04-13

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(91962219); 中国地质局地质调查项目(DD20160054); 国家重点研发计划项目(2017YFC0602802, 2017YFC0602806); 北京地之光新能源技术研究院有限公司科研项目

作者简介: 王晨光, 博士, 研究方向为地热成矿学、盐类矿床学、矿物学、岩石学、矿床学, 电子信箱: ChengguangWangCAGS@163.com; 郑绵平(通信作者), 中国工程院院士, 研究员, 研究方向为盐湖学, 电子信箱: zhengmp2010@126.com

引用格式: 王晨光, 郑绵平, 张雪飞, 等. 青藏高原南部地热型锂资源[J]. 科技导报, 2020, 38(15): 24-36; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.15.003

甚至指出地热水中的锂资源量可达  $2 \text{ Mt}^{[6-7]}$ 。盐湖卤水锂为世界锂的需求贡献了  $3/4$  的资源量,多数学者都认为地热水是富锂盐湖卤水中锂的重要来源<sup>[4,8-16]</sup>。因此,许多学者开展了从富锂地热水中提取和利用锂原料的研究工作,认为富锂地热水将会成为满足锂资源需求不断上涨的有效途径之一<sup>[17-21]</sup>。中国西藏地热资源丰富,研究历史悠久,针对富锂地热资源的研究较早。1960年,郑绵平就在西藏的班戈湖南部发现了富锂热泉,并对其成因进行过初步研究,此外,还对羊八井地热田中的锂资源量进行了初步估算,获得锂资源量  $39 \text{ 万 t}^{[22]}$ 。近几十年,西藏地热资源中的热能得到了有效的开发和利用,但对其中的锂资源研究与利用没有给予足够的重视。随着中国经济产业转型,高新技术产业的迅猛发展,对锂资源的需求量正在逐年快速增加,加之国际锂需求市场的不断扩大和富锂的矿物原料的不足,从任何富锂水中提取锂都是有效的解决办法<sup>[23]</sup>。因此,在近年国内外锂资源的勘探、开发和市场动态变化的背景下,为了提高中国西藏高温富锂地热田中锂资源的研究、开发和利用程度,郑绵平等基于其几十年对青藏高原盐湖资源评价工作经验<sup>[14,16,24-25]</sup>及对世界范围内其他高温富锂地热田开发利用现状的了解,提出了地热水也是锂矿

的构想,并针对这一构想开展了有针对性的野外和室内研究工作,在这些工作的基础上提出地热型锂矿资源的概念,认为随着提取技术的不断进步,地热型锂资源有望成为一种新的矿床成因类型。

本文通过对前人相关研究资料的吸收和总结<sup>[13,22,26-41]</sup>,加上野外重点地区(古堆等地热田)的调查研究,对青藏高原南部富锂地热资源的分布、规模、成因类型和开发利用前景作一简要汇总。

## 1 青藏高原南部高温富锂地热资源特点

青藏高原南部西藏高温富锂地热资源多分布在雅鲁藏布江缝合带两侧及南北向裂谷两侧主断裂与次级断裂的交叉部位(图1),与世界其他高温富锂地热田相比,周围地层火山岩缺失,地表泉口温度多高于  $70^\circ\text{C}$ ,接近当地水的沸腾温度,多属于高温非火山型地热田,并且受到小规模次级断裂的强烈控制,如羊八井地热田<sup>[35]</sup>、古堆地热田(图2)<sup>[42]</sup>。天然水中锂含量非常低,世界主要河流中锂的含量不到  $0.01 \times 10^{-6}$ <sup>[42]</sup>,古堆地区普通冷泉水锂含量为  $0.017 \times 10^{-6}$ <sup>[43]</sup>。中国发布的盐湖卤水矿最低工业品位为  $\text{LiCl } 200 \text{ mg/L}$ (折合  $\text{Li}$  离子  $32.74 \text{ mg/L}$ ),边界

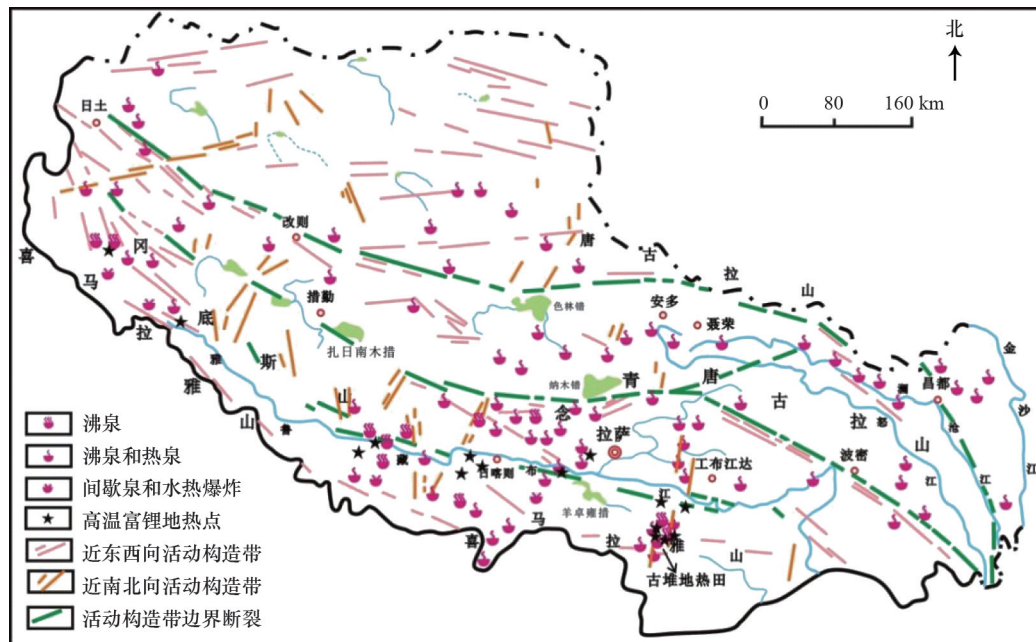


图1 青藏高原南部西藏热泉点及富锂地热系统(点)分布<sup>[25]</sup>

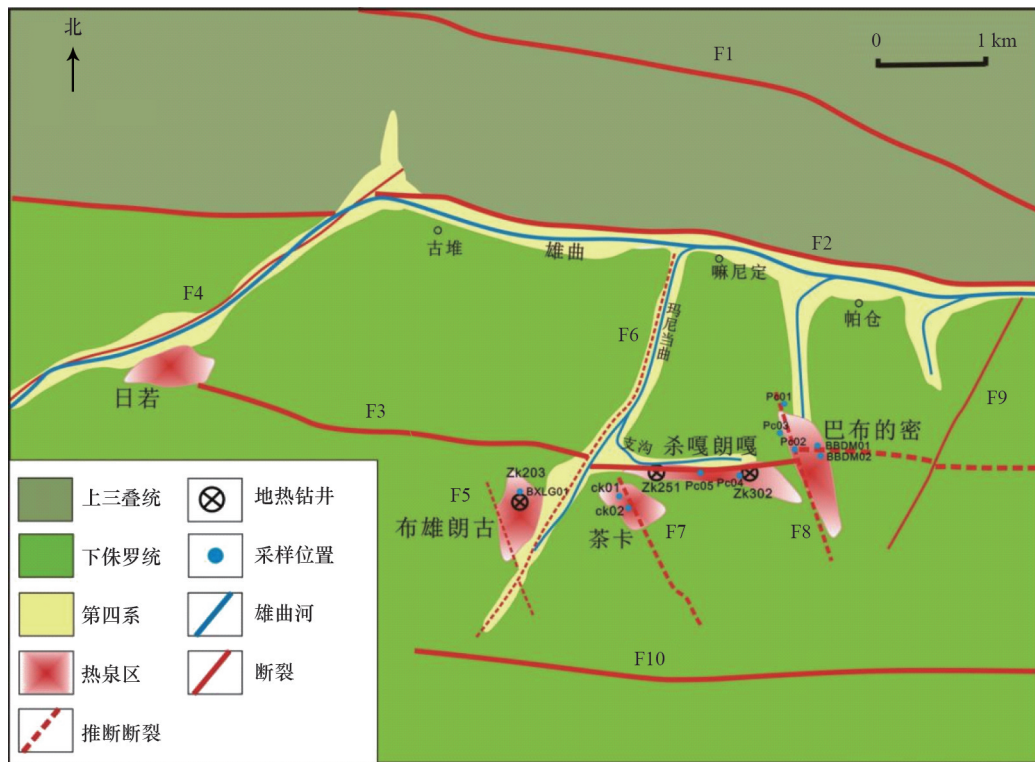


图2 西藏古堆地热田地质简图及样品分布<sup>[40-41, 43-44]</sup>

品位为 150 mg/L (折合 Li 离子 24.56 mg/L)。相比之下,青藏高原南部部分地热水中锂含量非常高,部分达到可利用的工业品位,如碱海子热泉锂离子含量高达 239 mg/L (考察发现其有后期蒸发富集作用发生),竹墨沙热泉 Li 离子含量高达 65.40 mg/L (野外考察发现其发育于雅鲁藏布江边,雨季江水多淹没泉区),莫落江沸泉 Li 离子含量高达 50 mg/L 等(表 1)。此外,中国青藏高原南部高温富锂地热水多具有 Mg/Li 非常低,介于 0.03~1.48,平均值为 0.43 的特点。这种特征非常有利于工业化开采利用,虽然大部分高锂地热水的总矿化度(total dissolved solids, TDS)都不高,但其 Li/TDS 却并不低,有的高达 1.14%,而西藏最富锂的盐湖扎布耶富锂盐湖 Li/TDS 也不过为 0.19%,世界范围内最富锂的玻利维亚乌尤尼(Uyuni)盐湖的 Li/TDS 也不过为 0.08%~0.31%,因此,青藏高原南部西藏高温富锂地热水中锂含量所占比例非常高,并且据郑绵平等<sup>[14]</sup>、佟伟等<sup>[20]</sup>报道,青藏高原南部大部分的富锂地热水都数十年稳定的排出(图 3),具有稳定的热源和锂源,但至今,多数富锂地热水资源都汇入地

表径流,造成很大的浪费。此外,近些年施工的羊八井钻孔深部地热水锂含量具有明显增高的趋势,表明在高温富锂地热田深部有希望找到更加富锂的地热资源。

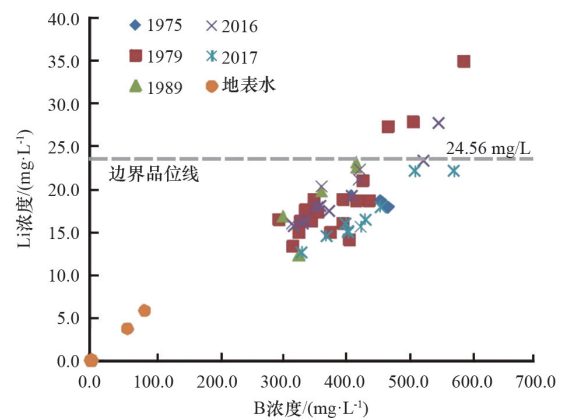


图3 西藏古堆地热田 1975—2017 年硼锂变化趋势及关系图<sup>[37,40,43]</sup>

从 1956 年起,许多学者先后在西藏开展了大范围的地热地质调查,并发现雅鲁藏布地热带地热水富含 B、Li、Cs、Rb 等元素<sup>[25]</sup>。1995 年,郑绵平通过对西藏地热田泉华的研究中发现了泉华中铯的异

表1 青藏高原南部西藏富锂地热系统(点)特征

序号	温泉名称	样品编号	海拔/m	温度/℃	Mg/(mg·L <sup>-1</sup> )	Li/(mg·L <sup>-1</sup> )	Mg/Li	TDS/(mg·L <sup>-1</sup> )	Li/TDS/%	HBO <sub>2</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	Rb/(mg·L <sup>-1</sup> )	Cs/(mg·L <sup>-1</sup> )	主要水化学类型	参考文献
1	莫落江沸泉	—	4900	86	1.50	50.00	0.03	6240	0.80	1917.00	1.85	30.60	Cl-CO <sub>3</sub> -Na	
2	多果曲热泉	—	4860	72	12.50	20.30	0.62	4330	0.47	1180.00	1.25	23.00	HCO <sub>3</sub> -Cl-Na	
3	色米沸泉	—	4400	86	4.17	35.00	0.12	4340	0.81	1750.00	2.45	51.50	Cl-CO <sub>3</sub> -HCO <sub>3</sub> -Na	
4	拉布朗沸泉	—	4400	85	nd	23.75	—	4470	0.53	1965.00	2.10	58.00	Cl-CO <sub>3</sub> -HCO <sub>3</sub> -Na	
5	拉旺孜热泉	—	3910	63	7.28	21.30	0.34	2610	0.82	565.00	0.70	2.40	Cl-HCO <sub>3</sub> -Na-Ca	
6	卡乌曲灿	—	4700	62	2.08	19.80	0.11	2496	0.79	500.00	3.62	27.20	Cl-HCO <sub>3</sub> -CO <sub>3</sub> -Ca	佟伟等 <sup>[37]</sup>
7	查托岗温泉	—	4066	37	6.00	19.80	0.30	3280	0.60	550.00	2.90	23.80	—	
8	金噶曲灿	—	4462	57	14.40	23.80	0.61	2910	0.82	315.00	2.70	0.93	Cl-HCO <sub>3</sub> -Na-Ca	
9	查巴曲珍	—	4000	41	10.40	27.80	0.37	4180	0.67	585.00	2.25	14.10	Cl-CO <sub>3</sub> -Na	
11	竹墨沙热泉	—	3520	45	17.10	65.40	0.26	10611	0.62	2045.00	13.50	99.80	—	
12	日若沸泉	—	4440	10	11.20	35.00	0.32	3070	1.14	590.00	1.90	9.60	—	
16	碱海子	—	4100	na	34.38	239.00	0.14	95330	0.25	1478.00	6.95	0.53	Cl-CO <sub>3</sub> -Na	
19	巴布的密沸泉	PC01	4449	74	3.8	16.1	0.24	2182.4	0.74	455.58368	0.7	3.4	Na-Cl	本文
20	巴布的密沸泉	PC02	4605	81	3.6	15.7	0.23	2206.4	0.71	481.88472	0.8	3.5	Na-Cl	本文
21	巴布的密沸泉	PC03	4605	70	3	16.5	0.18	2255.4	0.73	490.68936	0.8	3.6	Na-Cl	本文
27	巴布的密沸泉	BBDM01	4520	80	8.6	12.7	0.68	2316.6	0.55	376.79344	0.8	3.6	Na-HCO <sub>3</sub> -Cl	本文
28	巴布的密沸泉	BBDM02	4520	20	9.2	14.6	0.63	2282.6	0.64	420.59088	0.7	2.6	Na-Cl	本文
22	杀嘎朗嘎沸泉	PC04	4645	85	3.4	18	0.19	2649.6	0.68	516.9904	0.9	3.4	Na-Cl	本文
23	杀嘎朗嘎沸泉	PC05	4630	84	3.6	22.2	0.16	2981.1	0.74	648.38272	1.2	5.2	Na-Cl	本文
16	杀嘎朗嘎地热钻井	ZK302	4630~4700	204	32.3	27.8	1.16	3324.9	0.84	621.06576	—	—	Na-Cl	王思琪 <sup>[43]</sup>
17	杀嘎朗嘎地热钻井	ZK251	4630~4700	163	23.4	22.4	1.04	2798.3	0.80	480.75592	—	—	Na-Cl	王思琪 <sup>[43]</sup>
24	布雄朗古沸泉	BXLG 01	4488	83	4	22.2	0.18	2996.1	0.74	578.28424	0.9	3.9	Na-Cl	本文
18	布雄朗古地热钻井	ZK203	4630~4700	175.5	30.1	20.4	1.48	2902.5	0.70	412.12488	0	0	Na-Cl-HCO <sub>3</sub>	王思琪 <sup>[43]</sup>
25	茶卡热泉	CK01	4433	70	6.8	15	0.45	2472.8	0.61	459.986	0.8	3.6	Na-HCO <sub>3</sub> -Cl	本文
26	茶卡热泉	CK02	4501	68	5.6	15.2	0.37	2303.3	0.66	459.986	0.8	3.3	Na-Cl	本文

常富集,并在随后系统的研究后提出了西藏水热成矿新类型——铯硅化矿床新类型<sup>[25]</sup>。通过总结前人的研究成果,发现富锂地热系统中也都同样发育有浓度的B、Cs、Rb等可以综合利用的资源,无疑又增加了青藏高原南部高温富锂地热资源的开发利用价值。此外,青藏高原南部部分高温富锂地热水还大量排出As(色米南岸6.6 mg/L<sup>[25,38,43]</sup>,最高记录为青藏高原南部莫落江热泉126 mg/L<sup>[37]</sup>)、Sb(色米1.40

mg/L<sup>[25,38,43]</sup>)、W(塔格架、色米和古堆的含量变化范围为289.1~1103 μg/L<sup>[31]</sup>)、Hg(0.006 mg/L<sup>[25,38,43]</sup>)等有害元素,通过高温地热田这些有害元素地球化学特征和分布规律的研究,不仅可以有效控制有害元素对中国三江源头的污染,甚至可能将其综合利用起来。在不久的将来,高温富锂地热田中这些金属元素开发利用所产生的价值,有可能与地热田热能开发利用产生的价值相媲美。

## 2 青藏高原南部西藏高温富锂地热资源的分布和规模

中国高温富锂地热资源主要分布在西藏地区,尤其以青藏高原南部地区最为丰富(图1)。自20世纪50年代初期,西藏地矿局等先后在这些地区进行了大范围与地热地质有关或其他矿产地质调查研究之后,其大规模的地热活动越来越受到科学界的广泛重视,调查发现西藏的现代中、高温地热资源主要分布在青藏高原南部,泉华常见硅华,水化学类型以Na-Cl为主(表1),西藏已发现各类地热显示区(点)近700处<sup>[37-41]</sup>,高温地热系统(温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$ )共57处,中高温地热系统的地热水中普遍具有较高的锂含量,尤其是雅鲁藏布江两侧及青藏高原南部地热水富含B、Cs、Li、Rb等元素<sup>[25,38,43]</sup>,之后在对塔格架地热田深入研究中,郑绵平首次指出西藏多处地热水的Cs、Li、Rb和B的含量已达到单项综合利用指标(如昂仁县色米地热显示区温泉中Li含量高达 $35\text{ mg/L}$ <sup>[25,38,43]</sup>),并对其资源量做了初步的估算<sup>[16]</sup>。Grimaud等<sup>[45]</sup>详细研究了西藏的300个热泉,并发现许多地热田产出富硼、锂和铯的地热水。尽管世界许多地热田的地热水中都富集有大量的锂元素,但在青藏高原,许多地热水显示出B、Rb、Cs等元素的异常富集达到了经济利用水平<sup>[45]</sup>。李振清<sup>[46]</sup>和锥洋冰<sup>[13]</sup>认为西藏的热水活动与相应的活动构造基本一致,其中的青藏高原南部高温热水活动区从西到东又可以划分为当雄错-古错水热带、申扎-定结水热带、那曲-亚东水热带和桑日-错那水热带(图1),这与郑绵平等<sup>[14]</sup>关于西藏第四纪盆地及线性构造略图的表述基本一致。而早在1960年,郑绵平就在对班戈湖南部含锂温泉的研究中,认为西藏各个地热带迄今仍有大量的B、Li、K、F携出,在此基础上,又对富锂温泉与火山、浅成岩浆的关系进行了探讨<sup>[47]</sup>。根据佟伟等<sup>[37]</sup>所编著的《西藏温泉志》对西藏高锂地热水进行了统计(表1),根据其不完全统计,对有流量报道且锂含量达到或超过 $19\text{ mg/L}$ 的19处富锂地热系统1年的锂和硼排出量进行了计算,结果显示1年的锂排出量有 $4281\text{ t}$ 之巨,折合碳酸锂 $25686\text{ t}$ ,硼排出

量有 $91882\text{ t}$ 之多(表2),这足以说明西藏高温富锂地热水的巨大开发利用潜力。国内外众多学者均认为富锂盐湖中的锂也是来自地热水<sup>[9,17,48]</sup>,这进一步说明了地热水中锂资源的重要性和推动地热资源研究、开发和利用的迫切性。此外,西藏多数高锂地热水常常伴生高含量的Rb、Cs、B等可以综合利用的资源(表1),这将进一步提高地热型锂资源的开发利用价值。

通过对前人研究资料的综合分析发现,据不完全统计,西藏共发育达到边界品位的富锂地热点有7处,而锂含量达到或超过 $19\text{ mg/L}$ 的富锂温泉至少有19处(图1),而锂离子含量达到 $15\text{ mg/L}$ 以上的热泉就有26处,分别是莫落江沸泉、多果曲热泉、色米沸泉、拉布朗沸泉、拉旺孜热泉等,这些高温富锂地热系统发育位置见图1,其水化学特征如表1所示;通过对其中的布雄朗古沸泉、杀嘎朗嘎沸泉、巴布的密沸泉开展了野外调查与研究,发现古堆地热田除了发育有这几个热泉之外,还有茶卡热泉和日诺热泉,并受到构造的强烈控制,热泉区发育在断裂交汇最近位置(图2)。对古堆地热田42年以来B、Li数据进行投图发现(图3),最近42年以来,其地热水B、Li含量基本稳定,地表水含量与地热水差别明显。此外,还发现其地热水硼、锂含量与地表水基本成线性关系,表明了二元混合的特征,说明地表热泉是深部富含锂、硼的母地热流体与地表水混合的结果,进一步说明深部富锂母地热流体的存在。从总体上看,不仅青藏高原南部西藏高温富锂地热资源规模较大,且富含B、Rb、Cs等可以综合开发利用的元素,深部潜在的高温富锂地热资源进一步增加和提升了其开发利用价值。

## 3 青藏高原南部西藏高温富锂地热资源的成因

世界锂资源供给的 $2/3$ 都是依靠富锂卤水中锂的提取,而多数的富锂地热系统都赋存在这些富锂盐湖卤水的周边,并对陆相富锂盐湖的形成起着非常重要的作用,如世界著名的智利阿塔卡马(Atac-

表2 青藏高原南部部分高温富锂地热系统Li、B资源量估算

序号	编号	温泉名称	海拔/m	涌水量/(L·s <sup>-1</sup> )	Li/(mg·L <sup>-1</sup> )	HBO <sub>2</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	锂排放/(t·a <sup>-1</sup> )	硼排放/(t·a <sup>-1</sup> )
1	ZGR10	莫落江沸泉	4900	1	50	1917	38	3023
2	ZBR8	多果曲热泉	4860	5	20.3	1180	77	3777
3	ZNR5	色米沸泉	4400	3	35	1750	79	5795
4	ZNR6	拉布朗沸泉	4400	—	23.75	1965	0	0
5	ZXTM11	拉旺孜热泉	3910	1.5	21.3	565	24	569
6	ZS'G1	卡乌曲灿	4700	20	19.8	500	300	6244
7	ZS'G2	查托岗温泉	4066	3	19.8	550	45	1030
8	ZGYZ1	金噶曲灿	4462	10	23.8	315	180	2364
9	ZRB2	查巴曲珍	4000	5	27.8	585	105	2564
10	ZNMA4	绒玛热泉	4900	—	20	—	0	0
11	ZNQ3	谷露间歇喷泉	4720	8	25.2	205	153	1303
12	ZDX14	羊八井地热田	4200	—	28.6	273	0	0
13	ZND1	卡布桑臭水	4280	0.01	19.4	385	0	2
14	ZQS1	竹墨沙热泉	3520	—	65.4	2045	0	0
15	ZCM4	日若沸泉	4440	68	35	590	1801	44283
16	ZCM5-1	布雄朗古沸泉	4400	10	27.9	510	211	4487
17	ZCM5-4	杀噶朗噶沸泉	4600	70	21.1	304	1118	14160
18	ZCM5-5	巴布的密沸泉	4630	10	19.8	365	150	2279
19	ZBX16-4	碱海子	4100	—	239	1478	0	0
合计							4281	91882

ama)盐湖、玻利维亚乌尤尼盐湖、阿根廷翁布雷穆埃尔托(Hombre Muerto)盐湖、美国“银峰”(Silver Peak)盐湖、美国西尔斯(Searles)盐湖等。Bradley等<sup>[49]</sup>在对构成陆相富锂卤水成矿模型的基本特征总结中,重点强调了地热活动的重要作用,Munk等<sup>[9]</sup>进一步将地热活动对陆相富锂盐湖的控制作用总结为以下5点:(1)地热水提供了从富锂岩中淋滤锂所需要的水来源;(2)地热水可能直接提供了来自浅部岩浆热液或岩浆活动的富锂热液;(3)地热水可以通过浅部地下的蒸馏和沸腾作用来提高水中锂的浓度;(4)地热水引起的水对流循环可能是促使锂从源区到聚集区运移的有效方式;(5)地热水可以形成富锂的黏土矿物,若其后期在富黏土区发生了热液的淋滤和运移,便提供了形成富锂卤水的潜在来源。可见,地热活动对富锂盐湖卤水成矿的重要作用。因此,近年来,许多学者都对高温富锂地热流体的形成开展了广泛的研究。通过大量的文献调研发现,控制地热田形成的关键因素一是热源,二是构造形成的对流或地热水上升

的通道,而形成地热资源的热源又有两种形式:首先是近代活动的活火山,例如南美安第斯山脉普遍发育的活火山,其周边往往发育有众多地热田;其次是深部熔融岩浆热源,这种热源在世界地热田中也广泛发育,例如美国的索尔顿海地热田<sup>[50-53]</sup>、中国的玛旁雍错地热田、羊八井地热田<sup>[26]</sup>、羊易地热田、古堆地热田等<sup>[31-32]</sup>,地质历史上强烈的构造活动造成的区域性深大断裂构成了质量热量传递通道,使深部热能迁移至较浅层位,形成地热田和地热显示区,尤其是不同方向的断裂相互切割的地区<sup>[43]</sup>,构造作用和火山作用提供了通道系统和驱动地下水对流循环的热量,是从大量岩石中浸出锂的必要条件<sup>[8]</sup>,大的地热田往往是沿着大的深断裂带分布的,尤其是多期次断裂的交叉点位置,如现今美国加利福尼亚州的索尔顿海地热田位于活跃的圣安德烈亚斯断层之上<sup>[50]</sup>,并叠加了之后的SAF-IF走滑伸展<sup>[51]</sup>,其与玻利维亚和智利最具生产力的盐湖一样富含锂<sup>[4]</sup>,西藏地区的高温地热显示区多分布于深大断裂附近,尤其是近东西向与近南北向

深大断裂相互切割交汇的地段(图1、图2),此外新西兰的 Taupo Geothermal Field 地热田、美国的黄石公园地热田(Yellowstone Geothermal Field)、冰岛的 Geysir geothermal field 地热田<sup>[54-56]</sup>等也都具有此类特征。在合适的热源和活动构造条件下,高温地热水的形成有两种路径,一种是大气降水或冰川融水沿着断裂带下渗,随着下渗深度的逐渐增加,越来越靠近深部高温岩体,并逐渐被加热,加热后的冷水浮力增大,沿着断裂上升地表,形成热泉,密集发育的热泉形成了地热田;另一种途径是大气降水或冰川融水沿着断裂带下渗到一定深度后,再与上升的岩浆热水混合,形成高温深部热储,混合的热储水再沿着断裂上升到地表形成热泉或热田,这两种不同方式形成的地热水在水化学特征上具有明显的区别,Chowdury 等<sup>[57]</sup>指出 B、F、As、Li 和 Cs 与岩浆结晶演化的最后一个阶段密切相关,基于实验研究<sup>[58-59]</sup>和对花岗岩中微量元素的分析<sup>[45]</sup>,有学者指出富含 K、Rb、Cs、B、Li、F 和 Cl 的岩浆水可以在花岗岩演化的最后阶段释放出来,从青藏高原南部高温富锂地热水特征来看,其多为中性或碱性的 Na-Cl 型水,富含 B、Li、Rb、Cs、F 等特征性元素,同时热田区多有酸性地热水发育且富含  $\text{SO}_4^{2-}$ ,此外,Cl 离子含量与其他特征性离子多具有很好的线性关系,古堆地热田即有如此特征<sup>[31-33]</sup>。表明青藏高原南部高温富锂地热水多有深部岩浆流体的混入,众多地球物理的研究结果也证明了深部可能有岩浆岩体或岩浆熔融体的存在<sup>[60-66]</sup>。

世界范围内所有已经形成的地热田或热泉基本都受到以上因素所控制,但并不是所有的地热田都可以产生大量的富锂地热流体,富锂的地热田有其独特的特征,其唯一的区别就是锂的来源,全球各国不同的学者大都对这一问题进行过研究,虽仍有争议,但多数学者认为其来源基本有两个。

1) 高温热水与富锂岩石(多数为凝灰岩等火山岩,如南美的 Vide 盐湖、美国的银峰湖)发生水岩反应,淋滤出其中的锂,如玻利维亚的乌尤尼盐沼,其周围广泛分布与第四纪流纹岩火山岩有关的热泉<sup>[8]</sup>,其热泉水含有异常高的锂含量,并被认为是卤水中锂的主要来源<sup>[4,8,10]</sup>;而早在 1983 年,郑绵平

就在其研究《论西藏盐湖》中提到了其 1960 年西藏野外工作中发现的班戈湖南部的含锂热泉的成因问题,其中就提到伦坡拉盆地火山岩沉积层的溶滤水中锂硼含量很高,并认为西藏中南部的新生代酸性火山岩是本区盐湖硼锂组分的重要来源<sup>[4]</sup>。2014 年, Araoka 等<sup>[67]</sup>通过对内华达州多个富锂盆地(Silver Peak playa, Clayton Valley brine field, Alkali Lake, Columbus Salt Marsh)的系统锂同位素研究,发现内华达州盆地锂的富集主要是通过当地地热活动相关的高温热水与富锂凝灰岩或火山玻璃的水岩反应淋滤其中的锂形成的,其周边的地热水中锂的含量高达  $36 \times 10^{-6}$ ,这表明了高温地热水与富锂岩石的水岩反应淋滤作用对富锂地热水形成的重要性。

2) 深部熔融岩浆分异结晶后期高温汽水溶液携出(由于锂在岩浆系统中是中度不相容的元素,因此在岩浆分异过程中通常聚集在残余熔体中<sup>[68]</sup>),如美国的索尔顿海地热田<sup>[50-53]</sup>、青藏高原南部措美县的古堆地热田<sup>[33,69]</sup>、羊八井地热田<sup>[26]</sup>等。青藏高原南部地区广泛发育的高温高锂地热田,未见相关火山岩发育,即可能与 Francheteau 等<sup>[70]</sup>报道的引起青藏高原南部高热流的侵入岩有关<sup>[48]</sup>,Tan 等<sup>[71]</sup>利用氢氧同位素数据解释了西藏主要高温地热系统地下热水的循环过程,主要受到地下水的快速循环及残余岩浆水的升流作用,且在多数情况下,在距离热泉不远的地方都可以观察到花岗岩露头<sup>[48]</sup>,如古堆地热田东南部数十公里处发育有成岩时代为 12~17 Ma 的富电气石花岗岩<sup>[72]</sup>。强烈活动的地热水流体通过在长英质富锂岩石地层中如花岗岩而发生水岩反映淋滤出了其中的锂或直接与富锂的岩浆期后流体混合形成了青藏高原南部的高温富锂地热水,高温的地热水流体比传统的低温流体更能溶解岩石中的锂<sup>[73]</sup>,郑绵平通过对青藏高原全区的湖水成分趋势面分析,发现高原现代湖泊 B、Li、K 和 Cs 等元素丰度具有以冈底斯—雅鲁藏布为高值中心向外递减的特征,构成了青藏高原 B、Li、Cs 地球化学异常区,其成因与班怒构造带和雅鲁藏布西段聚敛带深部岩浆熔融体为中心通过火山和地热水向表层扩散有关<sup>[16]</sup>。

近年来,随着研究工作的不断深入和通过研究国内外近几十年的文献资料,并与南美“锂三角”周边正在形成的高温富锂地热水对比,从整体上看,西藏富锂盐湖的形成经过了多次的“预富集”过程,而高温富锂地热水的发育是其中重要一环,早期富锂洋壳在俯冲过程中熔融形成富锂岩浆完成了初始的富集,富锂岩浆沿着深大断裂上升过程中逐渐冷却结晶,在结晶分异晚期锂进一步在汽水热液中富集,随着印度与欧亚大陆的进一步碰撞抬升,在不同的地质条件下,部分富锂岩浆热液形成了富电气石-锂辉石花岗岩,部分富锂岩浆热液沿断裂带上升并与下渗地表水混合,沿着断裂带渗出地表,形成富锂地热水,部分地热水汇入盐湖,通过进一步地表的蒸发浓缩富集作用形成富锂盐湖,大部分富锂地热水汇入地表径流。

#### 4 青藏高原南部西藏高温富锂地热水资源开发利用前景

世界各国学者针对地热水中锂的提取和开发都做了许多研究,例如1975年,Hazen Research Incorporated公司就对地热水中金属离子的提取和回收进行了初步的研究<sup>[34]</sup>;1978年,Reno Metallurgy Research Center<sup>[74]</sup>,SRI International公司<sup>[75]</sup>对地热水提取锂进行了中试研究;1984年,Schultze和Bauer<sup>[76]</sup>报道了其可以将Salton Sea地热发电厂废水中99%的锂提取出来;Salton Sea地热发电厂甚至报道了其从地热水提取锂的中试工厂的建立及其商业开发计划<sup>[77]</sup>;波兰的RabkaZdroj地热田其地热水中锂的含量并不是最高的,其锂含量范围为10~16 mg/L<sup>[77]</sup>,但是该国对从富锂地热水中提取锂的研究却较为领先,截至目前,已有报道的有两种方法,分别是混合电容去电离子法(hybrid capacitive deionization)和应用有聚丙烯酸的天然或合成沸石法(natural and synthetic zeolites applying poly acrylic acid)<sup>[77]</sup>;Ziya等<sup>[78]</sup>对土耳其不同类型地热水中锂含量及其提取方法进行了综合对比,并认为直接将富锂地热水中的锂沉淀为锂盐、通过膜滤器分离以

及通过离子交换树脂捕获形式进行提取锂比较适合;中国学者也在不断推进地热水中锂的提取技术研究,并且已经取得了一定的研究成果,Sun等<sup>[79]</sup>提出了一种基于新型磷酸铁锂电化学技术从地热水中绿色回收锂的方法,经过8个吸附-解吸循环, $\text{Li}^+$ 的回收率高达90.65%,另外,在锂回收的整个过程中仅消耗了电能,没有使用或产生有机溶剂或其他有毒试剂,所有这些特性使上述方法成为从地热水中回收 $\text{Li}^+$ 的绿色且非常有前景的方法,Wang等<sup>[80]</sup>报道了通过EGDE交联的球形CTS/LMO(EGDE cross-linked spherical CTS/LMO)技术来对低锂含量的地热水中的锂进行选择提取,并认为这种方法具有非常好的稳定性和选择性,并且在5次循环后吸附容量的衰减不超过1.1%,以上从地热水中提取锂的方法,总结起来包括电化学、溶剂萃取、结晶沉淀<sup>[81]</sup>、离子交换<sup>[82]</sup>、吸附<sup>[2,83]</sup>、含无机吸附剂的聚合物膜<sup>[84]</sup>或以上多种方法的组合<sup>[19,85-86]</sup>,在所有上述方法中,溶剂萃取和离子交换吸附得到了最广泛的深入研究<sup>[79]</sup>。但是截至目前,针对富锂地热流体中锂的提取技术的研究仍然有待加强,郑绵平基于在西藏铯硅化矿床中铯的提取经验,通过前期对富锂地热水蒸发浓缩实验过程中锂的浓度和其他化学成分的变化规律,并结合青藏高原南部高温富锂地热水区地形地质等特征,认为单纯的蒸发浓缩效率太低,不能满足当前的开发利用需求。前期的探索研究,认为针对青藏高原南部的高温富锂地热水,膜法和吸附法仍然是非常有前景和值得考虑的,尤其是铝系物质或沸石类吸附剂等天然无污染的吸附剂,甚至还可以考虑天然物质和人工合成物质相结合的吸附剂,不仅可以绿色无污染,还可以增加人为的可控性,根据不同的地热水化学组分和类型,进行适当的调整,提高提取锂效率的同时降低能耗。此外,郑绵平<sup>[87]</sup>通过对索尔顿海地热田(Salton Sea geothermal)、克什米尔的Puga地热田、新西兰的Taupo地热田和西藏现在正在发育的低盐度Li、B、Cs、Rb等稀碱金属地热流体的对比研究,认为低盐度的地热流体也是一种特殊的成矿流体,也是成矿作用一个新的领域。

## 5 结论

地热型锂资源是一种新型的锂资源,世界范围内广泛分布,潜在储量巨大,各国学者相继对地热型锂资源开展了研究,应引起中国学者的广泛重视。中国地热型锂资源主要分布在青藏高原南部西藏地区,受到南北向伸展构造和近东西向雅鲁藏布江缝合带的明显控制,中国高温富锂地热水具有Mg/Li比低, Li/TDS较高,数十年持续稳定的排出,部分达到工业品位,伴生高B、Cs、Rb等可综合利用元素的特点。此外,从总体上看,当前中国青藏高原南部高温富锂地热水每年排出金属锂规模较大,深部潜在资源丰富,具有较大的开发利用价值。雅鲁藏布江两侧及青藏高原南部地区火山活动发育较弱,深部上地壳部分熔融引起的岩浆作用对高温富锂地热水的发育至关重要。随着当代技术的不断进步,从富锂地热水中提取锂的技术逐渐多样,方法逐渐成熟,将来对高温富锂地热水中锂等资源的开发不仅会产生其应有的经济价值,而且会有利于降低其中有害元素对环境的污染。综上所述,中国青藏高原南部广泛发育的高温富锂地热资源是一种非常有价值的、值得开发利用的地热型锂资源,并且近地表富锂稀碱等矿质地热流体也是一种现代的低盐度热液成矿流体,通过对其成矿作用的研究,有助于加深对低温热液成矿作用的理解和区域深部找矿勘查。

### 参考文献(References)

- [1] Martin G, Rentsch L, Höck M, et al. Lithium market research—Global supply, future demand and price development[J]. *Energy Storage Materials*, 2016, 6: 171–179.
- [2] Park J K. Principles and applications of lithium secondary batteries[M]. New York: Wiley, 2012.
- [3] 刘丽君, 王登红, 高娟琴, 等. 国外锂矿找矿的新突破(2017~2018年)及对我国关键矿产勘查的启示[J]. *地质学报*, 2019, 93(6):1479–1488.
- [4] Campbell M G. Battery lithium could come from geothermal waters[J]. *New Scientist*, 2009, 204(2738): 23–23.
- [5] Tomaszewska B, Szczepań S A. Possibilities for the efficient utilisation of spent geothermal waters[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2014, 21(19): 11409–11417.
- [6] Gruber P W, Medina P A, Keoleian G A, et al. Global lithium availability—A constraint for electric vehicles?[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2011, 15: 760–775.
- [7] Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, et al. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 48(5): 55–69.
- [8] Ericksen G E, Vine J D, Ballón A R. Chemical composition and distribution of lithium-rich brines in salar de Uyuni and nearby salars in southwestern Bolivia[J]. *Energy*, 1978, 3(3): 355–363.
- [9] Munk L A, Bradley D C, Hynek S A, et al. Origin and evolution of Li-rich brines at Clayton Valley, Nevada, USA[C]//11th SGA Biennial Meeting. Antofagasta: SGA, 2011: 217–219.
- [10] Shcherbakov A V, Dvorov V I. Thermal waters as a source for extraction of chemicals[J]. *Geothermics*, 1970, 2(2): 1636–1639.
- [11] Tan H, Chen J, Rao W, et al. Geothermal constraints on enrichment of boron and lithium in salt lakes: An example from a river-salt lake system on the northern slope of the eastern Kunlun Mountains, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 51(12): 21–29.
- [12] 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(50): 171–183.
- [13] 雒洋冰, 郑绵平, 任雅琼. 青藏高原特种盐湖与深部火山-地热水的相关性[J]. *科技导报*, 2017, 35(12): 44–48.
- [14] 郑绵平, 刘文高, 向军, 等. 论西藏的盐湖[J]. *地质学报*, 1983, 57(2): 184–194.
- [15] 郑绵平, 向军, 魏新俊, 等. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1989.
- [16] 郑绵平, 郑元, 刘杰. 青藏高原盐湖及地热矿床的新发现[J]. *中国地质科学院院报*, 1990(1): 151.
- [17] Cetiner Z S, Özgür D, Özdilek G, et al. Toward utilising geothermal waters for cleaner and sustainable production: Potential of Li recovery from geothermal brines in Turkey[J]. *International Journal of Global Warming*, 2015, 7(4): 439.

- [18] Hano T, Matsumoto M, Ohtake T. Recovery of lithium from geothermal water by solvent extraction technique [J]. *Solvent Extraction & Ion Exchange*, 1992, 10: 195–206.
- [19] Jeongeon P, Hideki S, Syouhei N, et al. Lithium recovery from geothermal water by combined adsorption methods[J]. *Solvent Extraction & Ion Exchange*, 2012, 30: 398–404.
- [20] Krotscheck E, Smith R A. Separation and recovery of lithium from geothermal water by sequential adsorption process with  $l\text{-MnO}_2$  and  $\text{TiO}_2$ [J]. *Ion Exchange Letters*, 2012, 32: 2219–2233.
- [21] Yanagase K, Yoshinaga T, Kawano K, et al. The recovery of lithium from geothermal water in the Hatchobaru area of Kyushu, Japan[J]. *Bulletin of The Chemical Society of Japan*, 1983, 56: 2490–2498.
- [22] 郑绵平, 刘文高. 西藏发现富锂镁硼酸盐矿床[J]. *地质论评*, 1982, 28(3): 263–266.
- [23] Guo Q, Wang Y, Liu W. Hydrogeochemistry and environmental impact of geothermal waters from Yangyi of Tibet, China[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2009, 180(1): 9–20.
- [24] 郑绵平, 刘文高. 新的锂矿物——扎布耶石[J]. *矿物学报*, 1987, 7(3): 221–226.
- [25] 郑绵平. 水热成矿新类型[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [26] Guo Q, Wang Y, Liu W. Major hydrogeochemical processes in the two reservoirs of the Yangbajing geothermal field, Tibet, China[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2007, 166(3): 255–268.
- [27] Tan H, Su J, Xu P, et al. Enrichment mechanism of Li, B and K in the geothermal water and associated deposits from the Kawu area of the Tibetan plateau: Constraints from geochemical experimental data[J]. *Applied Geochemistry*, 2018, 93: 60–68.
- [28] Guo Q H, Wang Y X, Liu W. O, H, and Sr isotope evidences of mixing processes in two geothermal fluid reservoirs at Yangbajing, Tibet, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 59: 1589–1597.
- [29] Guo Q, Wang Y. Geochemistry of hot springs in the Tengchong hydrothermal areas, Southwestern China[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2012, 215–216: 61–73.
- [30] Guo Q, Liu M, Li J, et al. Fluid geochemical constraints on the heat source and reservoir temperature of the Banglazhang hydrothermal system, Yunnan-Tibet Geothermal Province, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 172: 109–119.
- [31] Guo Q, Li Y, Luo L. Tungsten from typical magmatic hydrothermal systems in China and its environmental transport[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 657: 1523–1534.
- [32] Guo Q, Planer-Friedrich B, Liu M, et al. Magmatic fluid input explaining the geochemical anomaly of very high arsenic in some southern Tibetan geothermal waters[J]. *Chemical Geology*, 2019, 513: 32–43.
- [33] Wang C G, Zheng M P. Hydrochemical characteristics and evolution of hot fluids in the Gudui geothermal field in Comei County, Himalayas[J]. *Geothermics*, 2019, 81: 243–258.
- [34] Zheng W, Tan H, Zhang Y, et al. Boron geochemistry from some typical Tibetan hydrothermal systems: Origin and isotopic fractionation[J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 63: 436–445.
- [35] 多吉. 典型高温地热系统——羊八井热田基本特征[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(1): 42–47.
- [36] 李建康, 刘喜方, 王登红. 中国锂矿成矿规律概要[J]. *地质学报*, 2014, 88(12): 2269–2283.
- [37] 佟伟, 廖志杰. 西藏温泉志[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [38] 佟伟, 章铭陶, 张知非, 等. 西藏地热[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [39] 张知非, 沈敏子, 赵凤三. 西藏古堆高温水热系统的地下状况[M]/地热专辑(第二辑). 北京: 地质出版社, 1989: 134–140.
- [40] 郑绵平, 刘喜方. 青藏高原盐湖化学及其矿物组合特征[J]. *地质学报*, 2010, 84(11): 1585–1600.
- [41] 郑淑蕙, 张知非, 倪葆龄, 等. 西藏地热水的氢氧稳定同位素研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1982(1): 99–106.
- [42] Morozov N P. Geochemistry of the alkali metals in rivers [J]. *Geokhimiya*, 1969, 6(3): 729–739.
- [43] 王思琪. 西藏古堆高温地热系统水文地球化学过程与形成机理[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [44] 刘昭, 陈康, 男达瓦. 西藏古堆地热田地下热水水化学特征[J]. *地质论评*, 2017(Suppl 1): 353–354.
- [45] Grimaud D, Huang S, Michard G, et al. Chemical study of geothermal waters of Central Tibet (China)[J]. *Geothermics*, 1985, 14(1): 35–48.
- [46] 李振清. 青藏高原碰撞造山过程中的现代热水活动[D]. 北京: 中国地质科学院, 2002.

- [47] Evans K R. Lithium—Chapter 10[M]//Gunn G. 2014—Critical metals handbook. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2014.
- [48] Munk L A, Hynek S A, Bradley D, et al. Lithium brines: A global perspective[J]. *Review Economic Geology*, 2016, 18: 339–365.
- [49] Bradley D, Munk L, Jochens H, et al. A preliminary deposit model for lithium brines[R]. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2013.
- [50] Brothers D S, Driscoll N W, Kent G M, et al. Tectonic evolution of the Salton Sea inferred from seismic reflection data[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(8): 581–584.
- [51] Karakas O, Dufek J, Mangan M T, et al. Thermal and petrologic constraints on lower crustal melt accumulation under the Salton Sea Geothermal Field[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 467: 10–17.
- [52] Lachenbruch A H, Sass J, Galanis S. Heat flow in southernmost California and the origin of the Salton Trough [J]. *Journal of Geophysical Research—Solid Earth*, 1985, 90: 6709–6736.
- [53] Schmitt A K, Hulen J B. Buried rhyolites within the active, high-temperature Salton Sea geothermal system[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 178: 708–718.
- [54] Elderfield H, Greaves M J. Strontium isotope geochemistry of icelandic geothermal systems and implications for sea water chemistry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45: 2201–2212.
- [55] Jones B, Renaut R W, Torfason H, et al. The geological history of Geysir, Iceland: A tephrochronological approach to the dating of sinter[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(6): 1241–1252.
- [56] Geilert S, Vroon P Z, Keller N S, et al. Silicon isotope fractionation during silica precipitation from hot-spring waters: Evidence from the Geysir geothermal field, Iceland[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, 164: 403–427.
- [57] Chowdhury A N, Handa B K, Das A K. High lithium, rubidium and cesium contents of thermal spring water, spring sediments and borax deposits in Puga Valley, Kashmir, India[J]. *Geochemical Journal*, 1974, 8: 61–65.
- [58] Fuge R. On the behaviour of fluorine and chlorine during magmatic differentiation[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1977, 61(3): 245–249.
- [59] Webster E A, Holloway J R. The partitioning of REE's, Rb and Cp between silicic melt and a CI fluid[OL]. *EOS*, 1980, 61: 1152.
- [60] Brown L D, Zhao W, Nelson K D, et al. Bright spots, structure, and magmatism in southern Tibet from indepth seismic reflection profiling[J]. *Science*, 1996, 274: 1688–1690.
- [61] Chen L, Booker J R, Jones A G, et al. Electrically conductive crust in Southern Tibet from INDEPTH magnetotelluric surveying[J]. *Science*, 1996, 274: 1694–1696.
- [62] Kind R, Ni J, Zhao W, et al. Evidence from earthquake data for a partially molten crustal layer in Southern Tibet [J]. *Science*, 1996, 274: 1692–1694.
- [63] Makovsky Y, Klempner S L, Ratschbacher L, et al. INDEPTH wide-angle reflection observation of P-wave-to-S-wave conversion from crustal bright spots in Tibet[J]. *Science*, 1996, 274: 1690–1691.
- [64] Nelson K D, Zhao W, Brown L D, et al. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of project INDEPTH results[J]. *Science*, 1996, 274: 1684–1688.
- [65] Wei W B, Jin S, Ye G F, et al. Conductivity structure and rheological property of lithosphere in Southern Tibet inferred from super-broadband magnetotelluric sounding [J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 2010, 53: 189–202.
- [66] 谭捍东, 魏文博, Martyn U, 等. 西藏高原南部雅鲁藏布江缝合带地区地壳电性结构研究[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(4): 685–690.
- [67] Davis J R, Friedman I, Gleason J D. Origin of the lithium-rich brine, Clayton Valley, Nevada[J]. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1986, 1622: 131–138.
- [68] Zhang L, Chan L H, Gieskes J M. Lithium isotope geochemistry of pore waters from Ocean Drilling Program Sites 918/919, Irminger Basin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(14): 2437–2450.
- [69] Wang C G, Zheng M P, Zhang X F, et al. O, H, and Sr isotope evidence for origin and mixing processes of the Gudui geothermal system, Himalayas, China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, doi: 10.1016/j.gsf.2019.09.013.
- [70] Francheteau J, Jaupart C, Shen X J, et al. High heat flow in southern Tibet[J]. *Nature*, 1984, 307(5946): 32–36.
- [71] Tan H, Zhang Y, Zhang W, Kong N, Zhang Q, Huang J. Understanding the circulation of geothermal waters in the Tibetan Plateau using oxygen and hydrogen stable

- isotopes[J]. *Applied Geochemistry*, 2014, 51: 23–32.
- [72] Liu M L, Guo Q H, Wu G, et al. Boron geochemistry of the geothermal waters from two typical hydrothermal systems in Southern Tibet (China): Daggyai and Quzhuomu [J]. *Geothermics*, 2019, 82: 190–202.
- [73] Chagnes A, Światowska J. *Lithium Process Chemistry* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [74] Berthold C E. Magmamax No. 1 Geothermal minerals recovery pilot plant, engineering design[R]. Reno, Nevada: Hazen Research, Reno Metallurgy Research Center, 1978.
- [75] Farley E P, Watson E L, Macdonald D D, et al. Recovery of heavy metals from high salinity geothermal brine [R]. Nevada: SRI International, 1980.
- [76] Schultze L E, Bauer D J. Recovering lithium chloride from a geothermal brine[R]. Reston, Virginia: United States Bureau of Mines, Fort Meade in Maryland, 1984.
- [77] Małgorzata W, Gracja F, Iwona O, et al. Investigations of the possibility of lithium acquisition from geothermal water using natural and synthetic zeolites applying poly (acrylic acid) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 821–830.
- [78] Ziya S C, Özgür D, Göksel Ö, et al. Toward utilizing geothermal waters for cleaner and sustainable production: Potential of Li recovery from geothermal brines in Turkey[J]. *International Journal of Global Warming*, 2015, 7 (4): 439.
- [79] Sun S, Yi X P, Li M L, et al. Green recovery of lithium from geothermal water based on a novel lithium iron phosphate electrochemical technique[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247: 119178.
- [80] Wang H S, Cui J, Li M L, et al. Selective recovery of lithium from geothermal water by EGDE cross-linked spherical CTS/LMO[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 389: 124410.
- [81] Pauwels H, Brach M, Fouillac C. Lithium recovery from geothermal waters of Cesano (Italy) and Cronembourg (Alsace, France) [C]//12th New Zealand Geothermal Workshop. Orléans: Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 1990: 117–123.
- [82] Nishihama S, Onishi K, Yoshizuka K. Selective recovery process of lithium from seawater using integrated ion exchange methods[J]. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 2011, 29(3): 421–431.
- [83] Miyai Y, Ooi K, Katoh S. Recovery of lithium from seawater using a new type of ion-sieve adsorbent based on  $MgMn_2O_4$ [J]. *Separation Science and Technology*, 1998, 23(1–3): 179–191.
- [84] Chung K S, Lee J C, Kim W K, et al. Inorganic adsorbent containing polymeric membrane reservoir for the recovery of lithium from seawater[J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 325(2): 503–508.
- [85] Flexer V, Baspineiro C F, Galli C L. Lithium recovery from brines: a vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing[J]. *Science Total Environment*, 2018, 639: 1188–1204.
- [86] Song J F, Nghiem L D, Li X M, et al. Lithium extraction from Chinese salt-lake brines: Opportunities, challenges, and future outlook[J]. *Environmental Science–Water Research & Technology*, 2017, 3: 593–597.
- [87] Zheng M P. Preliminary discussion of low-salinity hydrothermal fluid mineralization[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(Suppl 2): 141–143.

## Geothermal-type lithium resources in Southern Tibetan Plateau

WANG Chenguang<sup>1</sup>, ZHENG Mianping<sup>1\*</sup>, ZHANG Xuefei<sup>1\*</sup>, YE Chuanyong<sup>1</sup>, WU Qian<sup>1</sup>, CHEN Shuangshang<sup>3</sup>, LI Mingming<sup>1</sup>, DING Tao<sup>1</sup>, DU Shaorong<sup>1</sup>

1. MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037 China
2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

**Abstract** The high-temperature geothermal water contains abundant lithium resources, and the development and the utilization of the geothermal-type lithium resources are increasingly paid attention around the world. This paper reviews the lithium-rich geothermal resources among the geothermal resources on the Qinghai-Tibet Plateau, and it is concluded that these resources have the following characteristics: (1) strong structural control: the lithium-rich geothermal spots in Southern Tibetan Plateau are often found in the intensely active high-temperature geothermal fields and are distributed on both sides of the Yarlung Zangbo suture zone and its southern part, strongly controlled by north-south trending rifts or grabens formed by E - W extension; (2) good quality: the lithium concentration is up to 239 mg/L; the Mg/Li ratio is extremely low and ranges from 0.03 to 1.48 for most of the lithium-rich geothermal fluid; the Li/TDS value is relatively high and ranges from 0.25%–1.14% (Zhabuye lithium-rich salt lake: 0.19 %; Salar de Uyuni (Bolivia): 0.08–0.31%); the continuous discharge is stable at least for several decades, in some parts reaches the industrial grades (32.74 mg/L: according to the industrial grades of Salt lake brine), and in addition, the elements such as B, Cs, and Rb are rich and can be comprehensively utilized; (3) large scale: according to incomplete statistics, there are at least 16 lithium-rich hot springs with lithium concentration of 19 mg/L or more, and the total discharge of lithium metal is about 4281 tons every year, equivalent to 25686 tons of lithium carbonate, moreover, drilling data show that the depth is still very promising; (4) lack of volcanism (non-volcanic geothermal system); (5) deep origin: the formation of lithium-rich geothermal resources are closely related to the deep crust partially melting caused by the collision of the Indo-Asia continent, the deep molten magma provides a stable heat source for the high-temperature lithium-rich geothermal field and the lithium-rich parent geothermal fluid rushes to the surface to form hot springs along the extensively developed tectonic fault zones in Southern Tibetan Plateau. Therefore, the widely developed high-temperature lithium-rich geothermal resources in the southern Qinghai-Tibet Plateau are valuable and worthy lithium resources. With the continuous advancement of the lithium extraction technologies on lithium-rich geothermal fluid, the lithium resource in Southern Tibetan Plateau is becoming a promising new type of mineral deposit—the geothermal-type lithium deposit and will be effectively exploited.

**Keywords** Southern Tibetan Plateau; geothermal; lithium resources ●



(责任编辑 刘志远)