

# 青藏高原特种盐湖与深部火山-地热水的相关性

雒洋冰, 郑绵平, 任雅琼

中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

**摘要** 青藏高原特种盐湖形成于陆-陆碰撞带, 高原深部熔融物质, 自第三纪形成始至第四纪时期以来, 以火山-地热水形式向上地壳表层携出大量 B、Li、Cs 等成分。昂拉陵地区是青藏高原盐湖特殊组分 Li、B、K、Cs、Rb 含量最高的区域, 郑绵平等首次在该区域发现中新世火山-沉积二元结构, 火山后期与热液活动成为青藏高原盐湖特殊组分的主要来源。青藏高原第四纪地热水分布广泛, 全区由南往北划分为 5 条地热带, 其中狮泉河-雅鲁藏布布地热带(I)、班公湖-怒江地热带(II)、贵德-南祁连地热带(IV), 地热水中富含 B、Li、Cs、Rb、As, 这 3 条地热带周围分布的盐湖中也富集这些元素。青藏高原特种盐湖中 B、Li、Cs、Rb、As 等元素含量, 湖泊水化学带、地热带的特征系数, Rb/Cs、Ni/Co 系数以及同位素值, 与一般盐湖、海水中不同, 而与该区域地热水中相同; 同时, 特种盐湖水化学特征与地热带中特征具有较好的对应关系。青藏高原盐湖各补给水源中地热水的 Li、B、K、Rb、Cs 元素含量最高。综上表明, 青藏高原特种盐湖中富集的 Li、B、Cs 等元素, 与火山-地热水具有很高的相关性。

**关键词** 青藏高原; 特种盐湖; 地热水; 成矿相关性

青藏高原平均海拔在 4500 m 以上, 在广阔的高原上, 星罗棋布着大小湖泊, 据统计青藏高原 1 km<sup>2</sup> 以上盐湖有 352 个<sup>[1]</sup>。青藏高原盐湖是地球上海拔最高的盐湖区, 且盐湖矿产种类多样, 资源丰富。该区域除有巨量石盐、芒硝、镁盐及天然碱等的普通盐湖<sup>[1-2]</sup>外, 还有以富含集 Li、B、Rb、Cs 等元素为特征的特种盐湖<sup>[3-6]</sup>, 这些特种盐湖具有重大的经济价值和科学意义。

青藏高原特种盐湖主要是钾盐、镁盐、湖盐、锂、锶、硼及芒硝矿为主体的矿产富集区, 但在品位和蕴含量方面, 均以雅鲁藏布与班公湖-怒江地热带之间, 如班戈湖、扎布耶、扎仓茶卡、茶拉卡、杜佳里等盐湖<sup>[7-11]</sup>, 以及柴达木北缘的南祁连地热带附近大、小柴旦盐湖、东台吉乃尔、西台吉乃尔、一里坪等<sup>[12-14]</sup>为主体。且这些地热带周围分布的新近纪火山-地热水中也富含 Li、B、Rb、Cs 等元素<sup>[15-16]</sup>。因此, 研究地热水与青藏高原特种盐湖的相关性, 对于扩大寻找盐湖型硼、锂、铷、铯矿有着重要意义。

## 1 地质背景

青藏高原特种盐湖形成于陆-陆碰撞带<sup>[1]</sup>。自古新世以

来, 印度板块向北俯冲, 引起青藏高原南北向缩短和东西向扩张, 发育了一系列断陷洼地, 青藏高原盐湖即主要形成于这些构造断陷盆地。在这些断裂带有些地段发育局部熔融的岩浆囊, 并以热水形式在地表形成强烈地热异常带, 岩浆型地热水从深部携出大量 Li、B、As、Rb、Cs 等成分<sup>[1]</sup>, 这些地热带上的有些盐湖因受岩浆型火山-地热水的影响而富集这些元素<sup>[17]</sup>。

青藏高原盐湖特殊组分 Li、B、K、Cs、Rb 含量最高的区域是昂拉陵地区<sup>[18]</sup>, 郑绵平等首次在该区域发现中新世火山-沉积二元结构, 火山后期与热液活动成为青藏高原盐湖特殊组分的主要来源<sup>[18]</sup>。该区域的地热水和晚新生代火山, 与印度-欧亚陆-陆碰撞作用引起的重熔岩浆作用有密切的成因联系。强烈地热活动区域也是富硼锂铷铯(钾)特种盐湖的形成区域<sup>[16]</sup>。

## 2 水热活动

青藏高原地热水分布广泛, 是全球性强烈的地热异常区域之一<sup>[1-3, 8]</sup>。已知温泉点(群)达 600 多处, 局部还有泥火山水<sup>[1]</sup>。这些温泉和泥火山绝大部分形成于晚更新世中、晚期

收稿日期: 2017-02-10; 修回日期: 2017-04-22

基金项目: 国家自然科学基金联合重点基金项目(U1407027); 中国地质调查局地质大调查项目(1212011085524)

作者简介: 雒洋冰, 博士, 研究方向为盐湖学与盐类矿床地质, 电子邮箱: luoyangbing0319@126.com; 郑绵平(通信作者), 中国工程院院士, 研究方向为盐湖学与盐类矿床地质, 电子邮箱: zhengmp2010@126.com

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.12.006

以来,其成因与第四纪印度板块与青藏高原碰撞密切相关,高原地壳加剧的冲断作用,伴随的地壳热膨胀,使深部巨大热流延碰撞带形成的断裂系统上涌至地表。全区由南往北划分为5条地热带,如图1所示<sup>[1]</sup>。

1) 狮泉河-雅鲁藏布地热带(I)。此地热带呈北西西向,大致落于雅鲁藏布缝合线上。此地热带的水以富集B、Li、Cs、As、Cl为特色<sup>[17]</sup>。盐湖化学特征主要为碳酸盐型、硫酸钠亚型<sup>[1]</sup>。

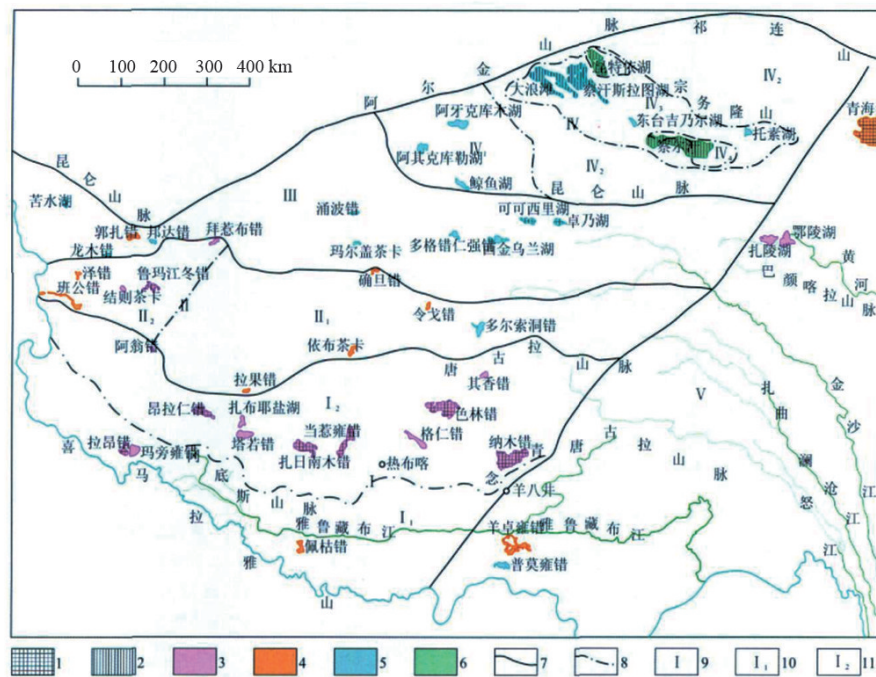
2) 班公湖-怒江地热带(II)。此地热带主体呈北西西向,大致落于班公湖-怒江缝合线上,在地热带南北两侧有一些温泉群呈线状延伸。此地热带以低温-高温热水富含B、Li、Cs、Rb、As、F等为特征。盐湖化学特征主要为硫酸钠亚型和碳酸盐型<sup>[1]</sup>。

3) 北羌塘-金沙江地热带(III)。此地热带主体大致落

于北北西向龙木错-金沙江缝合线,部分温泉群沿地热带两侧的北西、北东甚至南北向活动断裂向外呈树枝状散布。此地热带均为中温-低温温泉,含B、Li、Cs、Rb、As、F较低。盐湖化学特征主要为硫酸镁亚型。

4) 贵德-南祁连地热带(IV)。此地热带主体沿北西西南祁连缝合线-贵德断裂带分布。此地热带以低温-高温热水占优势,其中高温热水占43%<sup>[1]</sup>,B元素含量居全区第3位。除热水外,在南祁连雅沙图一带,沿断裂带见有成群小型泥火山出露,泥火山水B元素含量高。盐湖化学特征主要为氯化物型。

5) 北祁连-西宁地热带(V)。此地热带主体沿北西西中祁连下古生代缝合线-西宁北部断裂带呈分散状分布。温泉主要为低温-低中温热水,此地热带热水Li、B、As、Rb、Cs、F等含量为该区域最低。



1—咸水湖;2—干盐湖;3—碳酸盐型;4—硫酸钠亚型;5—硫酸镁亚型;6—氯化物型;7—水化学类型分界线;  
8—亚带分界线;9—碳酸盐型带;10—低矿化度亚带;11—高矿化度亚带

图1 青藏高原盐湖化学分带图<sup>[1]</sup>

Fig. 1 Map of hydrochemical zones of salt lakes in the Qinghai-Tibet Plateau

### 3 特种盐湖与热水的成矿相关性

#### 3.1 特种盐湖中元素特征与火山-热水的亲缘关系

青藏高原特种盐湖中Li、B、As、Rb、Cs等元素含量较一般盐湖高<sup>[9,19]</sup>,且含量超过海水,这些元素在该区域地热水中含量也较高<sup>[1]</sup>。近期发现,青藏高原热水Li、B、Cs正异常中心位于高原西部新近纪富Li、B、Cs、Rb的火山岩区<sup>[15-16]</sup>。

湖泊水化学带和地热带的  $\frac{Li \times 10^3}{\sum \text{盐}}$ 、 $\frac{Li \times 10^3}{K}$ 、 $\frac{B \times 10^3}{Cl}$ 、

$\frac{B_2O_3 \times 10^3}{\sum \text{盐}}$ 、 $\frac{K \times 10^3}{\sum \text{盐}}$ 、 $\frac{Rb \times 10^3}{\sum \text{盐}}$ 、 $\frac{Cs \times 10^3}{\sum \text{盐}}$ 、 $\frac{As \times 10^3}{\sum \text{盐}}$  等特征系数,由南往北均有降低的趋势<sup>[1]</sup>。该区湖水和相应地热水的水化学系数数值比较接近,并与国外已知Kizildere山链带地热水和Searles湖水化学系数较接近<sup>[20-21]</sup>,而与海相和一般陆相盐矿沉积水、油田水等相差甚远<sup>[1]</sup>。

Rb/Cs比值在该区域特种盐湖中较低,在与特种盐湖所在地热带热水中该比值也较低。该比值在地壳中为39~43,

在大洋水中为4000,在世界河水平均值中为22600<sup>[1]</sup>。在该区域各岩石中第三纪流纹岩(1.62)、第四纪沉积岩中最低(1.4~0.58)<sup>[1]</sup>。该区域特种盐湖中Ni/Co值>1<sup>[1]</sup>,通常认为Ni/Co比值>1指示沉积物为火山-热泉成因<sup>[22-24]</sup>。

该区域特种盐湖与相应地热水中同位素( $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 、 $\delta^{34}S$ )的值相一致<sup>[1]</sup>,与世界其他地热水区相同(如冰岛和索尔顿海地热水区)<sup>[25]</sup>,与海水和与海相相关的卤水以及一般内陆盐湖的值不同。

### 3.2 地热水对特种盐湖的稀散元素输入量

青藏高原特种盐湖的B、Li、Cs、Rb、K来自高原重熔岩浆,热泉是其输入盐湖中的主要载体<sup>[26-34]</sup>。这些热水沉积至晚在480 ka BP以来,即在西藏、特别羌南-喜马拉雅地区有大量沉积,迄今在雅鲁藏布南北两侧有强烈的水热活动及相应热水沉积<sup>[1,3]</sup>。这些古今热水活动均以富含B和稀碱元素为特征,不仅在现代高原热水的Li、B、Cs高含量集中在羌南-喜马拉雅地区以雅江段为中心,而且古热水沉积物钙华和硅华也有B和稀碱元素富集,羌南-喜马拉雅地区热泉每年还向

地表和湖泊输出Li 595 t, B 5370 t, Rb 105 t, Cs 365 t<sup>[6]</sup>。西藏地热带若按19 ka BP以来输出时间计(流入班戈湖温泉的古钙华<sup>14</sup>C年龄(19430±178) a BP<sup>[6]</sup>), Li、B、Cs输出量和组分含量按现代计,足够形成超过目前已知的西藏高原现代盐湖的Li、B、Rb、Cs等矿床资源量<sup>[6]</sup>,说明热水很可能是西藏盐湖矿床的主要物质来源。

柴达木盆地-可可西里为青藏高原锂硼盐湖另一个研究区域。柴达木的锂硼盐湖分布于中部南北对称的锂硼盐湖群<sup>[16]</sup>,有力地证明了火山热水为该类型特种盐湖的主要物质来源。南祁连富硼锂的泥火山(热水)构成大、小柴旦钠硼解石-柱硼镁石矿床<sup>[16]</sup>,可可西里火山-热水中富含Li<sup>[35]</sup>,地热水通过洪水河形成洪-那水系。洪-那水系多年平均的年径流总量为 $10.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[36]</sup>,是可可西里所有河流之首。洪-那水系的Li含量的平均值为0.727 mg/L<sup>[37]</sup>,比格尔木西河和布伦台处河Li含量高18倍<sup>[37]</sup>。导致在晚更新世后期以来,形成了别勒滩、一里坪、东台吉乃尔、西台吉乃尔富锂硼的特种盐湖群,如图2所示<sup>[16]</sup>。

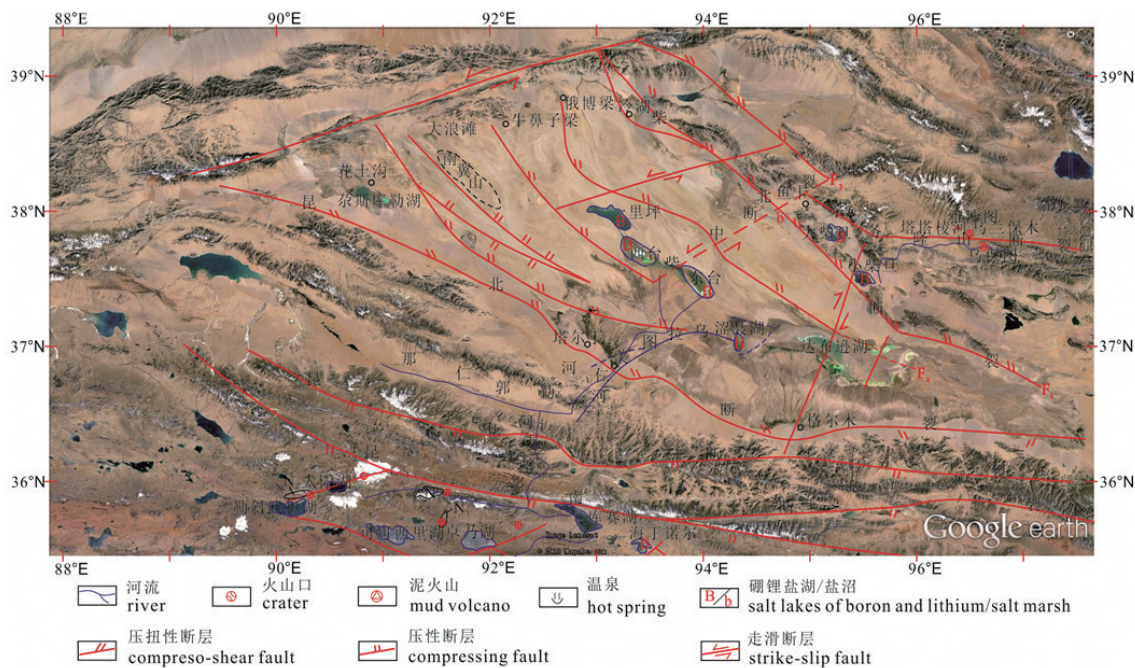


图2 柴达木盆地对称性硼/锂盐湖分布与物质来源关联<sup>[6]</sup>

Fig. 2 Association of salt lakes with symmetric distribution of boron/lithium and material source in Qaidam Basin

## 4 结论

1) 青藏高原特种盐湖形成于陆-陆碰撞带。青藏高原南北向缩短和东西向扩张,发育近东西向压性拗陷洼地,南北向张(扭)性断陷洼地和北西向、北东向扭性断裂控制的断陷盆地等,青藏高原盐湖盆地即主要形成于构造断陷盆地。在这些断裂带常发育地热水。如雅鲁藏布与班公湖-怒江以及柴达木北缘的南祁连地区附近,岩浆型地热水从深部携出大量Li、B、K、As、Rb、Cs等成分。

2) 青藏高原地热水分布广泛,已知温泉点(群)达600多处,局部还有泥火山水。这些温泉(泥火山)由南往北划分为5条地热带,其中狮泉河-雅鲁藏布地热带(I)、班公湖-怒江地热带(II)以及贵德-南祁连地热带(IV)热水中富含B、Li、Cs、Rb、As。青藏高原特种盐湖中B、Li、Cs、Rb、As、U等元素含量,湖泊水化学带和地热带的特征系数,Rb/Cs和Ni/Co比值以及同位素的值与一般盐湖和海水不同,与该区域地热水中相同。同时,特种盐湖水化学特征与地热水化学特征具

有较好的对应关系。

3) 从西藏及青海盐湖补给水源中的Li、B、K、Rb、Cs的元素含量分析发现,各水源中火山-地热水中这些元素的含量最高,说明热水是青藏高原盐湖Li、B、K、Rb、Cs矿床的主要物质来源。

### 参考文献(References)

- [1] 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.  
Zheng Mianping, Xiang Jun, Wei Xinjun, et al. Salt lakes in the Tibet [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press (in Chinese), 1989.
- [2] 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.  
Zheng Mianping, Liu Wengao, Xiang Jun, et al. On saline lakes in Tibet, China[J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57(2): 184-194.
- [3] 郑绵平. 水热成矿新类型——西藏铯硅华矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1995.  
Zheng Mianping. A new type of hydrothermal deposit: Cesium-bearing geyserite in Tibet[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [4] 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.  
Zheng Mianping, Liu Wengao. A new Li-mineral: Zabuyelite[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1987, 7(3): 221-226.
- [5] 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.  
Zheng Mianping, Liu Wengao. The discovery of a lithium-rich magnesianborate deposit in Tibet[J]. Geological review, 1982, 28(3): 263-266.
- [6] 郑绵平, 刘喜方, 赵文. 青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.  
Zheng Mianping, Liu Xifang, Zhao Wen. Tectonogeochemical and biological aspects of salt lakes on the Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(12): 1698-1708.
- [7] 高世扬, 李秉孝. 青藏高原盐湖硼酸盐矿物[J]. 矿物学报, 1982(2): 107-112.  
Gao Shiyang, Li Bingxiao. Borate minerals in saline lakes on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1982(2): 107-112.
- [8] 郑绵平, 刘喜方. 青藏高原盐湖湖水化学及其矿物组合特征[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1585-1600.  
Zheng Mianping, Liu Xifang. Hydrochemistry and minerals assemblages of salt lakes in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1585-1600.
- [9] 刘喜方, 郑绵平, 齐文. 西藏扎布耶盐湖超大型B/Li矿床成矿物质来源研究[J]. 地质学报, 2007, 81(12): 1709-1715.  
Liu Xifang, Zheng Mianping, Qi Wen. Sources of ore-forming materials of the superlarge B/Li deposit in Zabuye salt lake, Tibet, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(12): 1709-1715.
- [10] 牛新生, 刘喜方, 陈文西. 西藏北羌塘盆地多格错仁地区盐泉水化学特征及其物质来源[J]. 地质学报, 2014, 88(6): 1003-1010.  
Niu Xinsheng, Liu Xifang, Chen Wenxi. Hydrochemical characteristic and origin for salt springs water in Dogaicoring area of North Qiangtang Basin, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(6): 1003-1010.
- [11] 王丛山, 陈文西, 单福龙. 西藏雄巴地区中新世雄巴组砂岩地球化学特征及对物源区、构造背景的指示[J]. 地质学报, 2016, 90(6): 1195-1207.  
Wang Congshan, Chen Wenxi, Shan Fulong. Geochemical characteristic of the Xungba formation sandstones in the Xungba Basin, Tibet, and its constraints on provenance and tectonic setting[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(6): 1195-1207.
- [12] 高春亮. 柴达木盆地盐湖硼矿资源的形成和分布特征[J]. 盐湖研究, 2009, 17(4): 6-13.  
Gao Chunliang. Formation and distribution characteristics of boron resource in salt lakes of Qaidam Basin[J]. Journal of salt lake research, 2009, 17(4): 6-13.
- [13] 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 等. 柴达木盆地大柴旦硼矿床地质特征及成矿机理[J]. 地质学报, 2015, 89(3): 659-670.  
Gao Chunliang, Yu Junqing, Min Xiuyun, et al. Geological characteristics and mineralogical mechanism of the borate deposit of Da Qaidam salt lake in Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(3): 659-670.
- [14] 高春亮, 余俊清, 展大鹏, 等. 柴达木盆地盐湖硼矿资源的形成和分布特征[J]. 盐湖研究, 2009, 17(4): 6-13.  
Gao Chunliang, Yu Junqing, Zhan Dapeng, et al. Formation and distribution characteristics of boron resource in salt lakes of Qaidam Basin [J]. Journal of Salt Lake Research, 2009, 17(4): 6-13.
- [15] 郑绵平, 陈文西, 齐文. 青藏高原火山-沉积硼矿找矿的新发现与远景分析[J]. 地球学报, 2016, 37(4): 407-418.  
Zheng Mianping, Chen Wenxi, Qi Wen. New findings and perspective analysis of prospecting for volcanic sedimentary boron deposits in the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(4): 407-418.
- [16] 郑绵平, 张永生, 刘喜方, 等. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2123-2166.  
Zheng Mianping, Zhang Yongsheng, Liu Xifang, et al. Progress and prospects of salt lake research in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(9): 2123-2166.
- [17] 佟伟, 章铭陶, 张知非, 等. 西藏地热[M]. 北京: 科学出版社, 1981.  
Tong Wei, Zhang Mingtao, Zhang Zhifei, et al. Tibetan geothermal[M]. Beijing: Science Press, 1981.
- [18] Zheng M P, Zhang Y S, Yuan H R, et al. Regional distribution and prospects of potash in China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2011, 85(1): 17-50.
- [19] Lv Y Y, Zheng M P, Chen W X, et al. Origin of boron in the Damxung Co salt lake (central Tibet): Evidence from boron geochemistry and isotopes[J]. Geochemical Journal, 2013, 47(5): 513-523.
- [20] Smith G I. Origin of lithium and other components in the Searles Lake evaporates, California[C]//Lithium Resources and Requirements by the Year 2000. Virginia: US Geological Survey, 1976: 92-103.
- [21] Smith G I. Geology of Searles Lake: A guide to prospecting for buried continental salines[C]//2nd Symposium on Salt, Cleveland. Ohio: The Northern Ohio Geological Society, 1966: 169-180.
- [22] 文华国, 郑荣才, Qing Hairuo, 等. 青藏高原北缘酒泉盆地青西凹陷白垩系湖相热水沉积原生白云岩[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44(4): 591-604.  
Wen Huaguo, Zheng Rongcai, Qing Hairuo, et al. Primary dolostone related to the cretaceous lacustrine hydrothermal sedimentation in Qingxi sag, Jiuquan Basin on the northern Tibetan Plateau[J]. Science China(Earth Sciences), 2014, 44(4): 591-604.
- [23] Rosenthal Y, Lam P, Boyle E A, et al. Authigenic cadmium enrichments in suboxic sediments: Precipitation and postdepositional mobility [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 132(1):99-111.
- [24] Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. Chemical Geology, 2006, 232(1/2): 12-32.
- [25] 郑永飞. 热液矿床稳定同位素体系理论模式及其地球化学意义[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1994(4): 193-914.  
Zheng Yongfei. Hydrothermal deposit theory of stable isotope system mode and the geochemical significance[J]. Mineral Rock Geochemical Communications, 1994(4): 193-914.
- [26] 孔祥儒, 王谦身, 熊绍柏. 青藏高原西部综合地球物理与岩石圈结

- 构研究[J]. 中国科学(地球科学), 1996, 26(4): 348-358.
- Kong Xiangru, Wang Qianshen, Xiong Shaobai. The Tibetan Plateau in western integrated geophysical and lithosphere structure research [J]. Science in China (Earth Sciences), 1996, 26(4): 348-358.
- [27] Owens T J, Zandt G. Implications of crustal property variations for models of Tibetan Plateau evolution[J]. Nature, 1997, 387: 37-43.
- [28] Alsdorf D, Larry Brown K, Nelson D, et al. Crustal deformation of the Lhasa terrane, Tibet Plateau from project INDEPTH deep seismic reflection profiles[J]. Tectonics, 1998, 17(4): 501-519.
- [29] 丁林, 张进江, 周勇, 等. 青藏高原岩石圈演化的记录: 藏北超钾质及钠质火山岩的岩石学与地球化学特征[J]. 岩石学报, 1999, 15(3): 408-421.
- Ding Lin, Zhang Jinjiang, Zhou Yong, et al. Tectonic implication on the lithosphere evolution of the Tibet Plateau: Petrology and geochemistry of sodic and ultrapotassic volcanism in Northern Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(3): 408-421.
- [30] Kosarev G, Kind R, Sobolev S V, et al. Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet[J]. Science, 1999, 283: 1306-1309.
- [31] 苏伟, 彭艳菊, 郑月军, 等. 青藏高原及其邻区地壳上地幔S波速度结构[J]. 地球学报, 2002, 23(3): 1-20.
- Su Wei, Peng Yanju, Zheng Yuejun, et al. Crust and upper mantle shear velocity structure beneath the Tibetan Plateau and adjacent areas[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(3): 1-20.
- [32] 赵文津, INDEPTH项目组. 喜马拉雅山及雅鲁藏布江缝合带的深部结构与构造研究[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- Zhao Wenjin, INDEPTH team. The study on the deep structure of the Himalayans and Brahmaputra suture zone[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [33] 赵文津, 薛光琦, 赵逊, 等. INDEPTH-III地震层析成像—藏北印度岩石圈俯冲断落的证据[J]. 地球学报, 2004, 25(1): 1-10.
- Zhao Wenjin, Xue Guangqi, Zhao Xun, et al. Seismic imaging of the subducting Indian Lithosphere beneath North Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25(1): 1-10.
- [34] Tilmann F, Ni J, Iii S T I. Seismic imaging of the downwelling Indian lithosphere beneath central Tibet[J]. Science, 2003, 300(5624): 1424-1427.
- [35] 朱允铸, 李文生, 吴必豪, 等. 青海省柴达木盆地一里坪和东、西台吉乃尔湖地质新认识[J]. 地质论评, 1989, 35(6): 558-565.
- Zhu Yunzhu, Li Wensheng, Wu Bihao, et al. New recognition on the geology of the Yiliping lake and the east and west Taijnarl Lakes in the Qaidam Basin, Qinghai Province[J]. Geological Review, 1989, 35(6): 558-565.
- [36] 杨贵林, 张静娴. 柴达木盆地水文特征[J]. 干旱区研究, 1996, 13(1): 7-13.
- Yang Guilin, Zhang Jingxian. The hydrological features of Caidam Basin[J]. Arid Zone Research, 1996, 13(1): 7-13.
- [37] 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.
- Zhan Dapeng, Yu Junqing, Gao Chunliang, et al. Hydrogeochemical conditions and lithium brine formation in the four salt lakes of Qaidam Basin[J]. Journal of Lake Science, 2010, 22(5): 783-792.

## Metallogenic correlation of special salt lake and hydrotherm, Qinghai-Tibet Plateau, China

LUO Yangbing, ZHENG Mianping, REN Yaqiong

MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

**Abstract** The Qinghai-Tibet plateau special salt lakes are formed in the collision zone between two continental plates. The deep molten material of the Qinghai-Tibet plateau, since the tertiary formation and quaternary period, enjoys its unique composition (B, Li, Cs, As, K) diffused to upper crust surface in the form of hot water. The salt lakes in the Huan'ang area contain the highest contents of B, K, Cs, Rb in the Qinghai-Tibet plateau. Zheng et al. for the first time found the Miocene volcanic sedimentary dual structure, with the volcanic and hydrothermal activities as the main source of the Qinghai-Tibet plateau special components in the salt lake. The hot water in the Qinghai-Tibet plateau is widely distributed, the tropical geothermal water from south to north is divided into five kinds. The hot water in the tropical Shiquan river-Brahmaputra and the tropical Bangonghu-Nujiang and Guide-south Qilian, is rich in B, Li, Cs, Rb, and As. The salt lakes distributed surrounding these three tropical regions are also rich in these elements. The contents of Li, Cs, Rb, As and U elements, the chemical characteristics of the lake and ground water, the Rb/Cs and Ni/Co coefficients and the isotopic values in special salt lakes are different from those in the general salt lake and sea water, but are the same as those of the geothermal water in this area. At the same time, the water chemical characteristics of special salt lake and hot waters have a good corresponding relation. All water supplies of the Qinghai-Tibet plateau salt lake and hot water contain the highest level of Li, B, K, Rb and Cs elements. In conclusion, the Qinghai-Tibet Plateau special salt lakes are rich in Li, K and B elements and have a high correlation with the geothermal water.

**Keywords** Qinghai-Tibet Plateau; special salt lake; geothermal water; metallogenic correlation

(责任编辑 韩星明)