



移动阅读

谭红兵, 石智伟, 丛培鑫, 等, 2023. 西藏地热系统 B、Li、Rb 和 Cs 元素空间分布规律与超常富集机制[J]. 沉积与特提斯地质, 43(2): 404–415. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02001)

TAN H B, SHI Z W, CONG P X, et al., 2023. The spatial distribution law of B, Li, Rb and Cs elements and supernormal enrichment mechanism in Tibet geothermal system[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(2): 404–415. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02001)

## 西藏地热系统 B、Li、Rb 和 Cs 元素空间分布规律与超常富集机制

谭红兵, 石智伟, 丛培鑫, 薛飞, 陈国辉

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 西藏地热资源异常丰富, 属于地中海—喜马拉雅地热带的重要组成部分。地热系统最为典型的地球化学特征是大部分地热泉或与之相应的泉华沉积物超常富集 B、Li、Rb、Cs 等元素, 具有重要的矿产资源意义。有关这些特征元素来源与水化学演化成因机制, 长期存在争议, 在理论上缺乏系统论述。本文基于多年野外考察与数据积累, 以及对前人研究成果的系统总结, 提出了西藏地热系统特征元素组合与富集成因模式, 宏观板块构造与微观地球化学分布规律结合, 揭示了其成因机制。数据综合分析表明, B、Li、Rb、Cs 元素在空间上的分布富集规律总体具有同步性, 主要集中分布于雅鲁藏布江缝合带与南北向断裂带交汇区的高温地热系统。B 同位素、元素组合、水循环特征及大量地球物理证据表明物源受控于岩浆残余流体, 水-岩作用难以作为唯一物源支撑地热系统如此大规模的特征元素超常富集。结论提出西藏地热系统超常富集的元素受控于板块俯冲碰撞、地壳局部重熔、重熔型岩浆流体分异演化、地下水深循环等一系列内外生地质耦合作用过程。本文对西藏地热系统元素超常富集成因机制的解释, 有利于增强人们对高温地热系统除水资源与热能意义之外, 也同时关注矿产资源价值, 实现“水-热-矿”于一体的系统理解, 也对未来正确评价地热水体或沉积物矿产资源价值有理论指导意义。

**关键词:** 西藏; 地热; 稀有元素; 富集机制; 板块构造; 岩浆作用

中图分类号: P592

文献标识码: A

## The spatial distribution law of B, Li, Rb and Cs elements and supernormal enrichment mechanism in Tibet geothermal system

TAN Hongbing, SHI Zhiwei, CONG Peixin, XUE Fei, CHEN Guohui

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** The Tibet Plateau hosts the very typical geothermal resources in the world, which belongs to the main part of the Mediterranean-himalayan geotropics. The most typical characteristic is that these geothermal springs show unusual enrichment of many rare and dispersed elements such as B, Li, Rb, and Cs. Correspondingly, large-scale travertine or silica sinters are widely deposited in almost all geothermal fields. Some of the silica sinters show an unusual enrichment of Cs that formed a new type of Cs deposit. However, the origin of those enriched elements and their enrichment mechanism in geothermal water has remained unclear. This study based on the long observation in the field as well as accumulated datasets, and previous literature summarized for the geothermal system in the Tibetan Plateau, is in an attempt to provide new insights into the origin and mechanism of the enrichment of these typical elements. Geochemical datasets show an unusual and coincident enrichment of B, Li, Rb and Cs in the high-temperature

收稿日期: 2022-11-08; 改回日期: 2022-12-13; 责任编辑: 曹华文; 科学编辑: 曹华文

作者简介: 谭红兵 (1972—), 男, 博士, 教授, 从事地热和盐湖矿产资源研究。E-mail: [tan815@sina.com](mailto:tan815@sina.com)

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察 (2022QZKK0202) 与国家自然科学基金 (41872074, U22A20573)

geothermal springs as well as silica sinters along Yaluzangbu Suture in Tibet. Depleted B isotope and elemental association, groundwater deep circulation as well as much geophysical evidence indicate the dominant source likely originates from residual magmatic fluids derived from crustal partial remelting while water-rock interaction itself seems difficult to develop so large-scale enrichment of these elements. It can thus be concluded that the plate collision and thrust, crustal partial remelting and magmatic fluids differentiation and evolution during the upwelling and groundwater deep circulation synergistically play effects on the unusual enrichment of typical elements. This study will strengthen a comprehensive understanding of the unique geothermal system for both water resources-energy-minerals in Tibet, in particular, help people focus on special minerals dissolved in geothermal water. In addition, the study will also instruct to well assess the values of mineral resources of geothermal water or deposits.

**Key words:** Tibet; Geothermal system; Rare metals and B elements; Enrichment mechanism; Plate tectonics; Magmatic fluids

## 0 引言

西藏地热资源丰富,集“水—热—矿”于一体,具有重要的综合开发利用价值和科学研究意义。作者多年的调查研究表明,相对于世界上其他地热田,西藏地热系统最为显著的特征是大部分温泉水或与之相应的泉华沉积物罕见富集一些稀有、分散性元素如 B、Li、Rb、Cs 等(Zhang et al., 2015; Elenga et al., 2021)。地质界学者对此也长期给予极大关注,特别是对其矿产资源价值开展了一系列评价研究(郑绵平等, 1995; 赵平等, 1998、2001; 赵元艺等, 2010)。普遍认为西藏地热田除热能开发利用外,一些超常富集元素不但自身可能具有潜在综合开发利用前景(Grimaud et al., 1985; 郑亚新等, 1992; 郑绵平等, 1995; 徐则民等, 1997; 李振清等, 2006),而且也是盐湖资源的主要物源(郑绵平等, 1995; 朱允铸和吴必豪, 1990; 赵元艺等, 2010; Tan et al., 2012)。其中富集的硼是许多化工及医药行业不可缺少的材料,锂资源则被誉为金属新贵,价值堪比黄金,被许多国家列为战略性资源,铷铯等也是航空、航天、5G 等高新技术产业发展不可替代的金属资源,这些新型资源正成为国际矿床学研究的新生增长点。因此,本文聚焦西藏地热系统 B、Li、Rb 和 Cs 等元素富集规律、成因机制开展基础理论研究,对正确认识地热系统水化学演化过程,指导评价这些独特矿产资源价值意义重大。

西藏地热系统独特的化学组成,特别是显著富集的 B、Li、Rb 和 Cs 等典型元素来源不外乎:高温条件下强烈的水-岩作用、封存水的混入以及地壳内岩浆热液组分的混入。由于整个西藏基岩不同的各地区,地热水中都表现出 Li 和 B 等一定程度的富集特点,很难完全用淋滤过程来解释(佟伟等, 1981)。郑绵平等(1989)经过长期考察研究提出西

藏水体 B 和 Li 等最初来源如以岩石淋滤为主,则要保持目前这种稳定的 B 和 Li 浓度及热泉流量,所需溶滤的岩石体积将巨大到难以想象的程度,对此本课题组张燕飞(2016)在其博士论文中通过定量模拟得到进一步证实,另外单纯水-岩作用也难以解释地热水极为偏负的硼同位素分布特征(Zhang et al., 2015)。如来自封存水,一方面构造运动这么强烈的地区很难在各个构造单元都如此大规模保存此类水体,也不可能漫长的地史演化过程中持续供源,而且地热水 Na/Cl 和 Cl/Br 比值等各类水化学参数与海水相差甚远, B、Li 和 Sr 同位素等都不支持这种来源(Elenga et al., 2021)。因此,除藏东局部地带外,西藏各个区域地热系统大规模富集的 B、Li、Rb 和 Cs 等元素基本可以排除封存水这种来源。相比之下,国际上许多研究推断地热水及其沉积物或可能补给的盐湖 B、Li、Rb 和 Cs 等元素的罕见富集与中上地壳岩浆活动密切相关(Chowdhury et al., 1974; Nicholson, 1993; Bartier, 2002)。侯增谦等(2001)、赵平等(1998、2001)在长期从事西藏水热地质研究中也认为地热与近代岩浆活动有关,特别是提出印度板块差异俯冲与地幔岩石圈板片撕裂,形成类似“窗口”的构造,极有利于幔源热流上涌提供热能,引起西藏很多区域中下地壳熔融(侯增谦等, 2006; Li et al., 2018)。青藏高原能够形成独特的硅华铯矿及常见硫磺沉积具有岩浆硫同位素特征,可能也与地壳中普遍发育局部熔融体产生的流体演化有关(Brown et al., 1996; 张锡根, 1998; 侯增谦和李振清, 2004; 赵元艺等, 2010)。国际上许多专著也明确阐述了地热水中特殊的化学成分如果没有岩浆残余流体输入,很难用其他源或地球化学过程解释(Nicholson 1993; Bartier 2002; Gupta and Roy 2007)。

然而,世界各地,尤其我国境内长白山一带、

云南腾冲及东南沿海包括环台湾岛与岩浆活动有关的地热田很多,但鲜有类似西藏地热系统的独特水化学特征。由此可见,西藏地热系统水化学演化成因机制,必然存在独特的地质、地球化学演化过程。本文基于前期大量调查研究及数据资料分析总结,试图建立西藏地热系统 B、Li、Rb 和 Cs 等元素富集演化模式,揭示板块构造、岩浆活动、地下水深循环多重过程耦合作用下的地热水化学成因机制。

## 1 西藏地热系统地质基本概况

西藏地热异常区在全球尺度上隶属地中海—喜马拉雅地热带东延部分(侯增谦等,2001)。新生代以来,印度板块与欧亚板块碰撞,印度板块插入其下沿北东向俯冲,导致青藏高原快速隆升。随着两大板块碰撞俯冲,导致地壳局部重熔,特别是地壳局部熔融的岩浆不断向地壳浅部运移,为地热资源的形成提供了良好的热源(佟伟,1981;Liao,2018)(图1)。在此构造与热源背景条件下,晚新生代以来沿雅鲁藏布江和班公湖—怒江缝合带,以及一系列南北向断裂带形成了大量的高温间歇泉、沸泉以及规模巨大的硅华、钙华沉积(图1)。目前,班公湖-怒江缝合带地热活动日趋减弱甚至消亡,而雅鲁藏布江缝合带及南北两侧仍然有各种类型大规模水热活动(赵元艺等,2010;Wang et al.,2017)。

## 2 西藏地热系统 B、Li、Rb 和 Cs 元素空间分布富集规律

依据本课题组采样分析数据,并参考《西藏温泉志》中的大量数据(佟伟等,2000),通过克里金插值法,做出 B、Li、Rb 和 Cs 元素的空间等值线分布图,可以看出西藏地热系统超常富集 B、Li、Rb 和 Cs 等元素的空间分布规律(图2)。由等值线图可见,这些元素在空间上的分布总体具有一定的同步性,主要集中富集在雅鲁藏布江缝合带附近高温地热系统中,特别是 8 条南北向断裂带与雅江缝合带交汇区是重点富集区,从西向东调查确认这些元素浓度全部或部分显著较高的地热景区依次有莫落江、多果曲、色米、查托岗、卡乌、查巴曲珍、谷露、古堆地热异常带及竹墨沙等,这些地热泉大部分 B、Li、Rb 和 Cs 元素出现超常富集特征(表1),一些热泉 Li 或 Cs 达到卤水资源边界品位甚至工业开采品位,但 TDS 不到盐湖卤水的 1%。相比之下,

班公湖—怒江缝合带及以北现今仍然活动的地热泉基本没有出现 B、Li、Rb 和 Cs 异常富集特征。另外,地热泉富集的元素空间分布规律也与雅江缝合带平行的岩浆岩带有一定的对应关系,特别是藏南喜马拉雅地区近年来发现许多淡色花岗岩中出现稀有金属元素异常富集或矿化现象(秦克章等,2021;Cao et al.,2022),相应地错那—桑日断裂带南段古堆一带发育的地热泉这些元素也超常富集。

## 3 西藏地热系统 B、Li、Rb 和 Cs 元素富集的主控物源分析

与世界上比较著名的富 B、Li、Rb 和 Cs 等矿产资源的高温地热田相比,如安第斯山脉发育的智利 El Tatio、阿根廷 Puna 高原、墨西哥 El Chichón 火山地热系统及中国云南腾冲,青藏高原地热田有其独特性。El Tatio、El Chichón 和 Puna 高原地热都与第四纪强烈的火山喷发和岩浆活动密切相关,腾冲地热已被证明有大量幔源岩浆活动的信息(赵慈平等,2012;Hua et al.,2019)。然而,青藏高原自第四纪以来却罕见有火山喷发,大量 He 同位素也证实幔源岩浆脱气除对雅鲁藏布江缝合带、羊八井—当雄盆地一些地热泉有一定影响外,其它区域都没有发现明显幔源岩浆活动的信息(Hoke et al.,2000;Klemperer et al.,2022)。但是,从前述分析的地球化学特征来看,西藏地热系统与其它有岩浆活动或地壳熔融的区域有许多相似之处。如青藏高原大规模发育的高温地热田,特别是羊八井 ZK4002 钻孔 1500 米处实测钻孔温度 262.3℃,1850 m 米深度监测温度可达 329.8℃(王贵玲和蔺文静,2020),其它区域估算的热储温度也大多超过 150℃。一般而言,大规模高温地热系统的形成往往与幔源岩浆流体或壳源岩浆加热密不可分。从野外考察来看,西藏大部分地热泉周围沉积了巨厚的硅华或钙华,如谷露地热区发育有大量古老硅华体,硅华台地露头厚度最大 15 m,钻探揭示硅华台地中心厚度超过 30 m,地表露头最老泉华年龄可达 690 ka(郑绵平等,1995)。当然,由于后期剥蚀或有些泉华沉积深埋地下,以及当时测年技术的限制,这个年龄不一定代表最老,可见热泉喷发经历了漫长的地质演化过程。如此大规模的硅华或钙华沉积在塔格架、羊八井、查布、山南古堆等很多高温沸泉周围随处可见,由此表明曾经地热喷发规

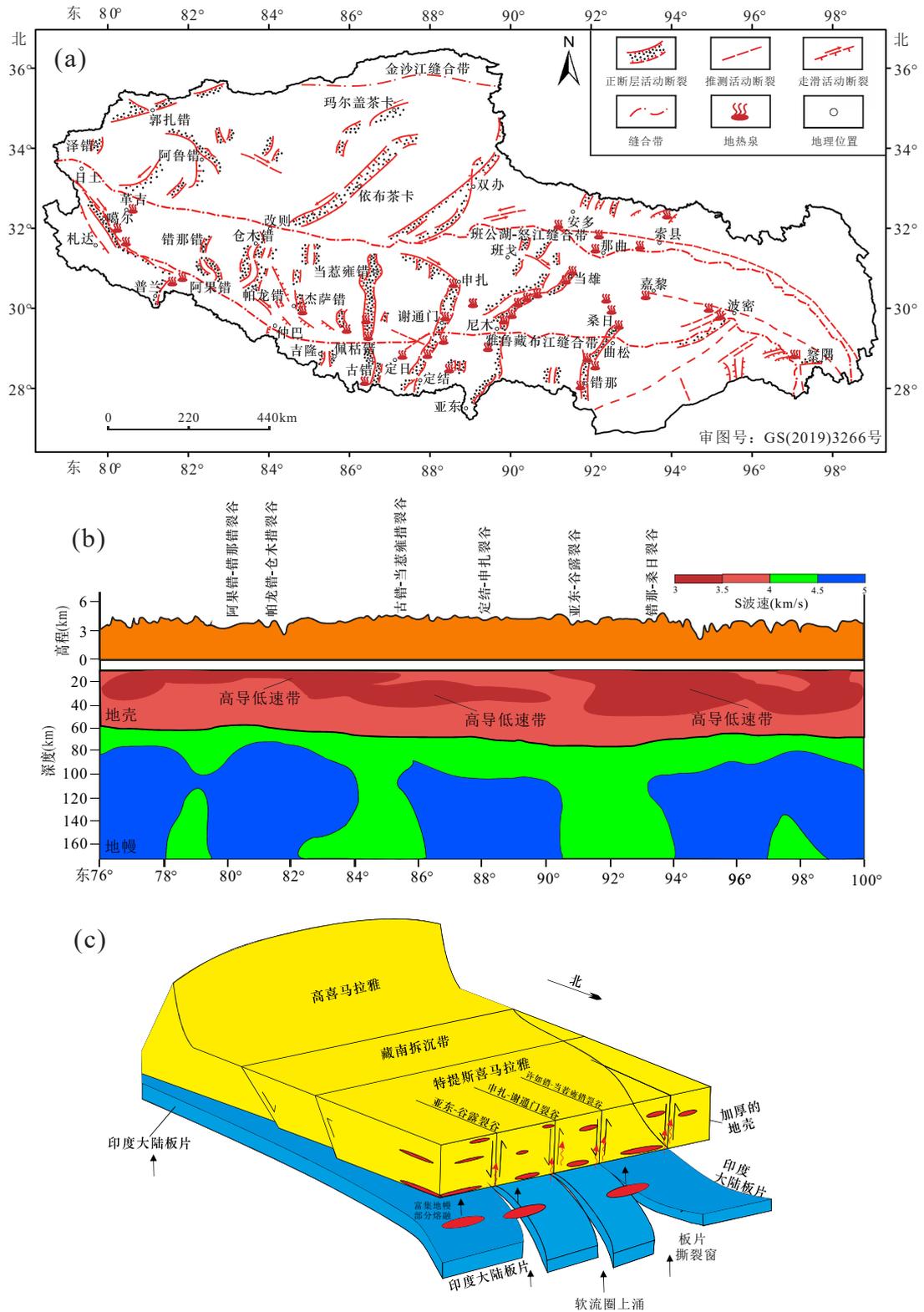


图 1 西藏主要地热带分布 (a)、对应的地壳南北向断裂带地球物理异常 (b) 与藏南中部壳幔地质构造模型 (c) (据文献 Wang et al., 2017; Li et al., 2018; 侯增谦等, 2006 重新绘制)

Fig. 1 The main geotectonic distribution of Tibet (a), the corresponding geophysical anomalies of the North-South fault zone of the crust (b) and the crust-mantle geological structure model of central South Tibet (c) (Modified from Wang et al., 2017; Li et al., 2018; Hou et al., 2006)

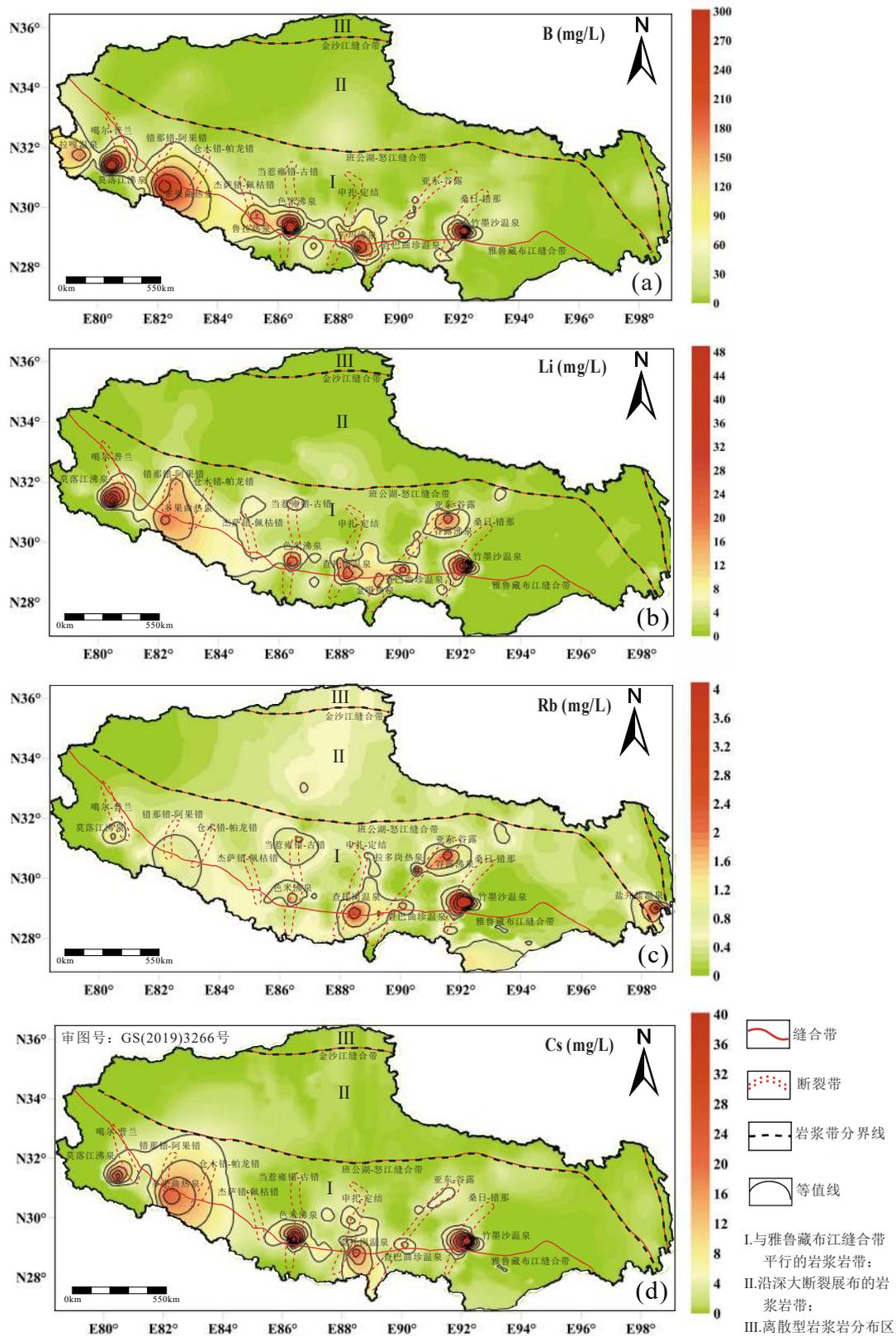


图2 西藏地热水 B (a)、Li (b)、Rb (c) 和 Cs (d) 元素空间分布等值线图 (数据来源于本课题组及佟伟等, 2000; 岩浆岩带的划分依据张朝锋等, 2018)

Fig. 2 Contour maps of B (a), Li (b), Rb (c), and Cs (d) in geothermal springs in Tibet (Most data from the authors and from Tong et al., 2000; the division of magmatic zone is based on Zhang et al., 2018)

表 1 超常富集区主要地热泉特征元素组成  
Table 1 Geothermal data of unusual enrichment of typical elements

地热泉名称	B/mg·L <sup>-1</sup>	Li/mg·L <sup>-1</sup>	Rb/mg·L <sup>-1</sup>	Cs/mg·L <sup>-1</sup>
莫落江	472.68	50.00	1.85	30.60
多果曲	290.96	20.30	1.25	23.00
色米	626.60	44.79	2.89	60.98
拉布朗	484.52	23.75	2.10	58.00
查托岗	145.90	20.97	1.66	13.09
卡乌	147.60	23.31	1.75	14.95
拉旺孜	171.90	24.47	0.80	14.51
查巴曲珍	144.25	27.80	2.25	14.10
谷露	50.55	25.20	2.75	5.70
古堆-布雄朗古	115.89	27.90	1.70	8.60
古堆-巴布的密	101.59	19.30	1.35	6.00
古堆: 巴布日苏	112.93	18.75	2.40	11.30
古堆-杀嘎朗嘎	106.03	21.10	1.50	5.60
古堆-茶卡	81.37	12.40	1.30	5.80
竹墨沙	506.75	57.90	7.72	59.82

模比现今更大。那么,这么大规模、长时期自然喷发,且水循环更新速率较快的高温地热田(Wei et al., 1982; Tan et al., 2014),热源不可能以放射性热源或断层摩擦生热为主,必然存在稳定的高温热源才能维持如此大规模、长期的水热活动。地球物理探测资料表明西藏高温地热田中—下地壳,甚至上地壳局部存在有地壳部分熔融体,特别是勘探揭示羊八井热田区 5~15 km 深部可能有一岩浆房(Feng et al., 2012),从而推测羊八井等地热田的热源与近代岩浆活动密不可分(Duo et al., 2005; Li et al., 2006; Guo et al., 2012)。由此可见,虽然构造背景相差很大,但西藏水热活动与安第斯型地热田地质特征有相似之处。青藏高原一些地热田下部也可能存在地壳重熔作用引起的岩浆活动并上涌,中上地壳存在的残余岩浆流体与深循环地下水混合可能是引起地热水中各类强不相容元素富集的物源控制机制(Elenga et al., 2021)。

围绕以上假设和各类地质证据,近年来我们对西藏地热系统富集的 B、Li、Rb 和 Cs 等元素物源机制开展了地球化学溯源研究,这些元素浓度异常及各类同位素分布特征,也可以很好地解释除高温系统水-岩作用外,地壳重熔型残余岩浆流体分异演化更是地热系统一些元素超常富集的主控物源。首先,西藏地热水富集的元素组合以典型不相容元素为主,且化合价为一价的稀碱金属元素 Li、Rb 和 Cs 等最为富集,而与水-岩反应更为密切的 Sr、

Mg 和 Ca 等二价元素相对亏损(Elenga et al., 2021)。事实上,自然界的各类水体,包括地球上储水最多的海洋,B、Li、Rb 和 Cs 浓度都很低,青藏高原地热水 B、Li 和 Rb 浓度普遍比海水高 10~100 倍,Cs 浓度比海水高 10 000 倍以上。另外,世界上有很多盐湖或咸水湖,但绝大多数并未出现这类元素同时富集现象。唯独我国的青藏高原和安第斯山脉一些有地热活动的高原出现这些元素富集的盐湖资源。可见,自然水体在一般的地质条件下很难出现这类元素的一致富集。另外,水-岩作用一般会使得水体中二价阳离子如 Mg、Ca 和 Sr 等浓度增高,但一般不会有稀有元素(如 Li、Rb 和 Cs 等)、B 等异常富集(Brugger et al., 2005),如青藏高原实测热储温度超过 300℃ 的羊八井钻孔热水,各类稀有、分散元素与其它热储温度相对低得多的热泉水并没有很大的差别,二价离子 Sr、Ca、Mg 在较低温度的热泉中反而比最高温度的钻孔水更高(Elenga et al., 2021; 张燕飞, 2016)。这些特征一致表明水-岩作用主要对 Sr、Ca 和 Mg 等二价碱土金属元素有显著影响,对一价态的稀有元素等影响并不大,不是控制性物源。不相容元素异常富集,是演化晚期的残余岩浆流体富集的典型成分。其次,西藏地热水有一个十分显著的特征,即地热水 B 同位素分布相对比较集中,表现为显著偏负特征,且 B 浓度越高,B 同位素越偏负(Zhang et al., 2015)。富 B 地热泉  $\delta^{11}\text{B}$  值一般变化于-10%左右,与安第斯

山脉 Puna 高原现代活动的热泉水值(-15.3~-10.4%)十分接近(Kasemann et al., 2003)。高温条件下地壳重熔形成岩浆与原岩之间 B 同位素分馏效应很小(Aggarwal et al., 2000),大量研究也证实壳源熔体与结晶的电气石之间无大的 B 同位素分馏,因此认为岩浆成因电气石 B 同位素组成可以代表地壳重熔作用形成熔体的值(Fernando et al., 2012)。不同区域其值变化范围较大,但总体上根据电气石估算壳源熔融岩浆值与陆壳平均 B 同位素值接近,如 Slovakia Hnilec 岩浆成因电气石  $\delta^{11}\text{B}$  值分布于-10.3~-17.1%,这一变化范围基本代表了岩浆成因电气石的 B 同位素值(Jiang et al., 2008),也可近似地代表地壳重熔形成岩浆的变化范围。青藏高原除班公湖-怒江缝合带及以北因水热活动正在消减,温泉水 B 同位素因水-岩作用相对占主导而倾向于偏正外,雅鲁藏布江缝合带及以南绝大多数地热水 B 同位素值正好介于地壳重熔型岩浆值这一变化范围,表明 B 等可能源自岩浆活动。因为一般富集稀有金属元素的云母类花岗岩往往不会同时富集 B,因此更可能为地壳重熔来源的电气石伟晶岩或淡色花岗岩岩浆,再经历更高程度演化分异产生的岩浆流体上涌作为主要物源。至于近年来喜马拉雅地区发现的富稀有金属元素的花岗岩带(秦克章等, 2021),与同样富集这些元素的高温地热带之间的物源关系,目前并无确切的结论,仍在深入研究中,特别是色米、藏南、亚东-谷露断裂带都可见到大规模分布的淡色花岗岩、电气石花岗伟晶岩等,作者认为地热系统富集的元素更可能属于深部这类花岗岩重熔产生的岩浆,或者岩浆进一步演化结晶分异,形成喜马拉雅大规模分布的淡色花岗岩,而高度富集这类元素的残余岩浆流体与深循环地热水混合,为地热系统这些元素的进一步富集提供了物源。

#### 4 板块运动控制 B、Li、Rb、Cs 元素富集

青藏高原大规模地热资源形成的热源机制,依据近年来藏南地质研究成果,由于印度板块差异俯冲与地幔岩石圈发生撕裂,南北向断裂带对应的深部地球物理特征推断,幔源热流沿撕裂的类似“窗口”上涌提供足够的热能引起中下地壳熔融(侯增谦等, 2006; Li et al., 2018; Liu et al., 2020; Shi et al., 2020)(图 1),可能是西藏地热系统的主控热源。大范围新生代岩浆岩的出露,也侧面说明该区岩浆

活动强烈,新近纪岩浆活动为该区地热提供了充足的热量(张朝锋等, 2018)。自上世纪 80 年代初中法联合对青藏高原进行地球物理调查以来,1992 年多国开展的 INDEPTH 项目、1994 年中国科学院地球物理研究所物探测量,以及 2002 年中美合作开展的 Hi-Climb 地震探测项目,都表明青藏高原中地壳、甚至上地壳普遍存在高导低速体,特别是在普莫雍错和羊卓雍措测得平均热流  $91 \text{ mW/m}^2$  和  $146 \text{ mW/m}^2$  的高值(Kind et al., 1996; Brown et al., 1996; Nelson et al., 1996; Hoke et al., 2000; Duo et al., 2005; Feng et al., 2012)。一些专家认为这些高导低速体很可能类似于溶解了很多矿物成分的液态物质,因为板块俯冲过程中的化学作用会产生大量盐水溶液。对这些高导低速体虽然有多种可能解释,但认为自大陆碰撞之后,地壳发生较大规模重熔作用形成的局部熔融体是最合理的解释(郑绵平等, 1995)。这类局部熔融体不仅可为西藏水热活动提供巨大的热源,而且也可携带出大量成矿物质。

除了地球物理证据之外,根据地热泉较低的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  同位素比值也可推断地热异常区下方可能存在壳内熔融层。羊八井高温地热田区 2000 米左右测井表明地层温度大于  $300^\circ\text{C}$ ,结合地球物理测量推断 5~15 km 深度范围存在局部熔融体,是高温地热的主导热源,特别是亚东-谷露裂谷系地震测量发现的亮斑及电导率异常被认为是地壳 15 km 左右岩浆房之上存在的大量水流体引起(Makovsky, 1999; Li et al., 2003; Klemperer et al., 2013)。近期,我们通过数值模拟也佐证了羊八井-当雄断裂带上地壳 10-15 km 深处地壳重熔岩浆流体对热源的贡献,特别是合理解释了冷水下渗循环至 5~15 km 左右被加热为超高温地热水的原因(Su et al., 2022)。由此可见,印度板块俯冲插入欧亚板块之下,是引起下地壳局部重熔的主要驱动因素,在印度板块俯冲到现今的班公湖-怒江缝合带下方后(<16 Ma),形成强烈的水热活动,但是随着俯冲板片回撤,北部很多高温地热泉活动减弱消亡,只留下大量古泉华沉积,而雅鲁藏布江缝合带及山南一系列南北向裂谷带水热活动加强,并持续至今,活动依然强烈。青藏高原与安第斯山脉都存在板块俯冲过程,也都发育大量高温地热泉和第四纪以来形成的盐湖,这些热泉或盐湖都出现稀有元素以及 B 等的超常富集,特别是形成了独具特色的特大型盐湖硼、锂矿、

伴生铷铯矿等。由此可见, 板块俯冲、地壳加厚、局部重熔是控制西藏地热资源丰富, 同时罕见富集 B、Li、Rb 和 Cs 等元素不可缺少的构造背景和物源基础。

## 5 西藏地热系统 B、Li、Rb 和 Cs 元素富集模式与演化机制

世界上地热资源很多, 一般非岩浆型或与火山作用无关的地热很少会出现 B、Li、Rb 和 Cs 等元素同时富集, 如澳大利亚典型非岩浆型地热田 Paralana 热泉 (Brugger et al., 2005), 中国北方陕西 (Qin et al., 2005)、天津 (Minissale et al., 2008) 等地热水都表现为很强的水—岩作用特征, 但 B 和 Li 浓度却很低, 几乎与一般天然水没有显著的差别。即使有幔源岩浆流体混合或火山喷发型地热田, 也并非都会富集这类稀有元素, 有些幔源岩浆直接脱气或通过火山作用形成的地热, 如西加拿大大陆边缘许多地热田, Li 浓度很低, 变化范围仅为 0.05~0.6 mg/l; 墨西哥 Los Azufres 热田安山岩水的混合比例虽然很高, 但却并没有出现比青藏高原地热更为富集稀有、分散元素的情况 (Birkle et al., 2001)。中国云南腾冲热海高温地热田 He 同位素估算也至少有 50% 幔源流体混合, 虽然稀有元素或一些分散性元素浓度比区域其它水体高很多, 但相对于西藏地热泉, B、Li、Rb 和 Cs 等浓度都要低 1~2 个数量级。对此, 作者认为, 这是由岩浆流体演化路径不同导致出现截然不同的情况, 因此提出如图 3 所示的演化富集模式, 除水—岩作用外, 在有岩浆作用参与下, 地热水体 B、Li、Rb、Cs 的富集演化模式可分三种类型 (图 3 温泉 I—III 型):

(1) 地壳重熔型岩浆作用: 青藏高原稀有、分散元素比较富集的地热系统具有典型的大地构造背景, 即位于板块俯冲—碰撞带上, 碰撞造山过程中一个板块俯冲插入另一板块之下, 产生了加厚的岩石圈, 并使中—下地壳, 甚至局部上地壳不同程度熔融。西藏中南部地壳中普遍存在的高导低速带, 往往被认为与地壳熔融或流体聚集有关。大规模水热活动区普遍认为存在这种壳源重熔岩浆作为背景热源, 地壳局部重熔时 B、Li、Rb 和 Cs 等元素作为不相容活泼元素总是优先进入熔体中得到进一步富集, 在岩浆流体继续向上侵入的过程中又不断从各类富稀有、分散元素岩石 (如淡色花岗岩、伟晶岩等) 和局部熔体中淋滤萃取出典型不相容

元素, 同时流体中相容元素或典型造岩元素随着温度、压力的降低结晶沉淀优先进入固相, 而不相容元素相对不断富集于流体中, 可以想象当这类高度演化分异的残余流体到达上地壳或热储层时, 这些元素将会超常富集, 一般 B、Li、Rb 和 Cs 元素中的全部或部分浓度均大于 1 mg/l, 普遍大于 10 mg/l, 甚至更高 (图 3 温泉 I 型)。

(2) 幔源岩浆脱气与早期岩浆为主型: 由于原始幔源岩浆本身并不富集质量数比较轻的元素如 B、Li、Rb、Cs 等 (牟保磊, 1999), 如果幔源岩浆未经历强烈的壳内岩浆演化分异过程, 仅仅通过脱气过程或挥发分向上运移弥散, 然后与深循环水混合或直接喷出地表的话, 则热泉水会出现  $^3\text{He}/^4\text{He}$  同位素比值很高 ( $>1 \text{ Ra}$ ), 高挥发性元素如 Cl、S、F、B、As、Hg、Sn、Pb 和 Sb 等相对浓度显著增高特征, 但难以使地热水中出现 B、Li、Rb 和 Cs 等元素的一致性显著富集 (图 3 温泉 II 型), 如我国长白山、东南沿海等火山活动或幔源岩浆脱气作用较强的地热带, 虽然属于高温地热系统, 但这些元素都不富集, 如长白山温泉 B 浓度变化范围为 0.138~1.314 mg/l, Li 浓度为 0.109~0.559 mg/l (张希友等, 2006), 比西藏地热温泉普遍低 1~2 个数量级。另外, 如果幔源岩浆通过火山作用或者上涌侵入上地壳过程并未经历地壳局部重熔, 岩浆分异演化不充分, 地下水深循环过程主要依靠高温条件水—岩交换从岩石中萃取出这些元素, 那么即使地热系统有这种早起或原始岩浆流体的混入, 使 B、Li、Rb 和 Cs 等元素浓度高于一般天然水体, 但不会出现类似西藏地热系统的超常富集成矿现象 (图 3 温泉 III 型), 云南腾冲地区的地热系统除强烈的水岩作用外, 可能就类似这种较大比例幔源岩浆流体参与的水化学演化模式, 地热泉这些元素基本浓度变化范围分别为: B (0.004~10.44 mg/l)、Li (0.29~10.44 mg/l)、Rb (0.006~1.396 mg/l)、Cs (0.001~0.839 mg/l) (张燕飞, 2016), 普遍比长白山地热泉浓度高, 但比西藏低 1 个数量级左右。

综上所述, 西藏地热系统 B、Li、Rb 和 Cs 元素超常演化富集的成因机制可概括为: 自 45 Ma 以来, 印度板块向北俯冲与欧亚板块相撞并插入欧亚大陆之下, 导致软流圈上涌热侵蚀作用随着板块运动的持续而延续至今 (Guillot et al., 1997)。俯冲碰撞过程中, 导致青藏高原快速隆升, 板块强烈的活动造成的构造变形, 特别是地幔岩石圈撕裂引发热

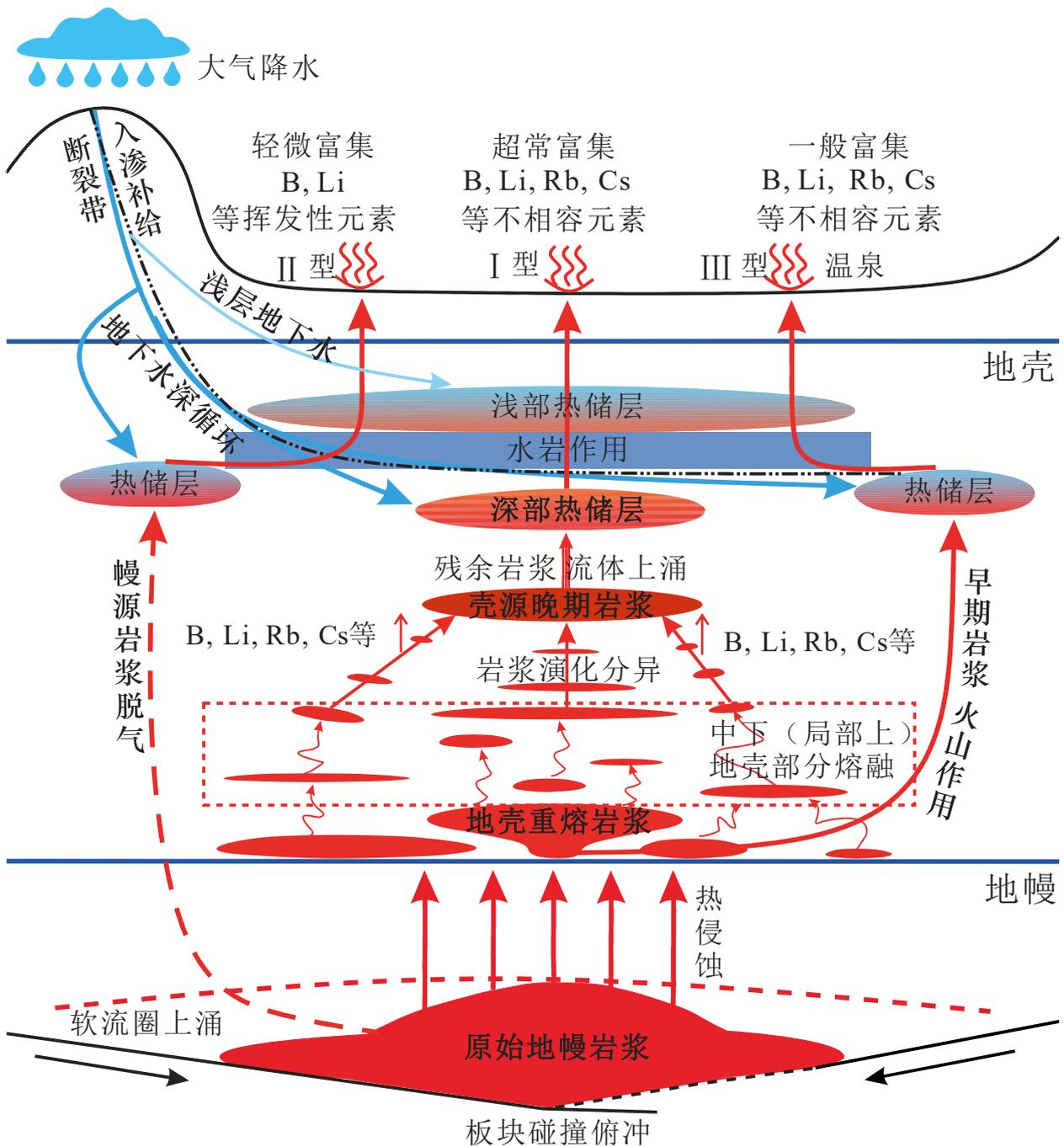


图3 西藏地热系统B、Li、Rb、Cs元素超常富集演化模型

Fig. 3 Evolution mode of geothermal systems for unusual enrichment of B, Li, Rb, and Cs in the Tibet

侵蚀作用的发生,使中—下地壳重熔产生重熔型岩浆,并沿缝合带或南北向张性断裂带上升至中地壳,甚至上地壳形成不同深度局部带状熔融体。重熔作用过程中,不相容活泼元素总是优先进入流体富集在这些局部带状熔融体中,在壳源重熔岩浆流体继续向上分异演化侵入的过程中,又不断从地壳局部熔融体和富B、Li、Rb和Cs元素岩石(如电气石

花岗岩等)中萃取出各类稀有、分散元素,同时流体中相容元素如一些二价碱金属类、重金属等随着温度、压力的降低结晶沉淀进入固相。经历高度演化分异的残余流体到达上地壳浅层时,这些元素就会极度富集。另一方面,板块俯冲碰撞驱动高原隆升过程,使高峻山脉与裂谷或盆地之间形成超过1000 m,甚至数千米的水头差,发育一系列南北

向张性深大断裂,从而使高海拔山区降水或冰雪融水在重力作用下垂直入渗参与深部循环(Tan et al., 2014)。在壳源重熔岩浆房或岩浆囊作为主要热源驱动下,深循环地下水温度不断增加,同时与来自深源的富矿质元素流体混合,形成高温高压地热水。地热水以各种形式泉或地热开发井排泄地表,由于温度、压力急剧降低沉淀析出泉华,其中 Cs 等元素倾向于优先进入硅华富集形成铯硅华矿床,其他元素则更倾向于保留在地热水中,然后直接或通过河流间接输入盐湖,进一步蒸发浓缩形成 B 和 Li 等元素极为富集的盐湖卤水矿床。当然,这一过程不可否认高温体系水—岩作用的贡献,但对于罕见富集这些元素的地热系统,来自地壳局部重熔型残余岩浆流体的贡献更大。

## 6 结论

1)西藏地热系统普遍富集 B、Li、Rb 和 Cs 等元素,特别是雅鲁藏布江缝合带与一系列南北向断裂带交汇区许多高温地热泉,除 B 和 Li 元素富集外,也显著富集 Rb 和 Cs 等元素。

2)地壳重熔产生的岩浆,进一步演化分异并从围岩不断淋滤萃取出 B、Li、Rb 和 Cs 等典型不相容元素,最终侵入上地壳与深循环地下水混合,是这类元素在西藏地热系统超常富集的主控物源。

3)西藏地热系统超常富集的元素受控于板块俯冲碰撞、地壳重熔、岩浆流体分异演化、地下水深循环等一系列内外生地质耦合作用过程,最终排泄地表的地热水体才会出现数百、上千倍,甚至更高于一般水体的 B、Li、Rb 和 Cs 等元素富集与组合。相反,单纯的水—岩作用或幔源岩浆脱气过程很难使地热水体同时超常富集这类元素。

## References

- Aggarwal J K, Palmer M R, Bullen T D, et al., 2000. The boron isotope systematics of Icelandic geothermal waters: 1. Meteoric water charged systems[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 64 (4) : 579 – 585 .
- Bartier E., 2002. Geothermal energy technology and current status: an overview[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6 (1) : 3 – 65 .
- Birkle P, Merkel B, Portugal E, et al., 2001. The origin of reservoir fluids in the geothermal field of Los Azufres, Mexico - isotopical and hydrological indications[J]. *Applied Geochemistry*, 16 (14) : 1595 – 1610 .
- Brown L. D., Zhao W. J., Nelson K. D., et al., 1996. Bright spots, structure, and magmatism in southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling. [J]. *Science*, 274: 1688 – 1690 .
- Brugger J, Long N, Mcphail D C, et al., 2005. An active amagmatic hydrothermal system: The Paralana hot springs, Northern Flinders Ranges, South Australia[J]. *Chemical Geology*, 222 (1-2) : 35 – 64 .
- Cao H W, Pei Q M, Santosh M, et al., 2022. Himalayan leucogranites: A review of geochemical and isotopic characteristics, timing of formation, genesis, and rare metal mineralization[J]. *Earth-Science Reviews*, 234: 104229 .
- Chowdhury A N, Handa B K, Das A K, 1974. High lithium, rubidium and cesium contents of thermal spring water, spring sediments and borax deposits in Puga valley, Kashmir, India[J]. *Geochemical journal*, 8 (2) : 61 – 65 .
- Duo J, 2005. High-temperature geothermal systems: Characteristics of Yangbajing geothermal fields, China[J]. *Geotherm. Energy*, 2: 10 – 14 .
- Elenga H I, Tan H, Su J, et al., 2021. Origin of the enrichment of B and alkali metal elements in the geothermal water in the Tibetan Plateau: Evidence from B and Sr isotopes[J]. *Geochemistry*, 81 (3) : 125797 .
- Feng Z J, Zhao Y S, Zhou A C, et al., 2012. Development program of hot dry rock geothermal resource in the Yangbajing Basin of China[J]. *Renewable Energy*, 39 (1) : 490 – 495 .
- Fernando T, Michael W, Francisco V, 2012. The boron isotope geochemistry of tourmaline-rich alteration in the IOCG systems of northern Chile: implications for a magmatic-hydrothermal origin [J]. *Miner Deposita*, 47: 483–499.
- Grimaud D, Huang S, Michard G, et al., 1985. Chemical study of geothermal waters of Central Tibet (China) [J]. *Geothermics*, 14 (1) : 35 – 48 .
- Guillot S, Sigoyer J D, Lardeaux J M, et al., 1997. Eclogitic metasediments from the Tso Moriri area (Ladakh, Himalaya) : evidence for continental subduction during India-Asia convergence[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 128 (2-3) : 197 – 212 .
- Guo Q H, 2012. Hydrogeochemistry of high-temperature geothermal systems in China: A review[J]. *Applied Geochemistry*, 27 (10) : 1887 – 1898 .
- Gupta H K, Roy S, 2007. Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century[M]. Elsevier, Amsterdam.
- Hoke L, Lamb S, Hilton D R, et al., 2000. Southern limit of mantle-derived geothermal helium emissions in Tibet: implications for lithospheric structure[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 180 (3-4) : 297 – 308 .
- Hou Z Q, Li Z Q, Qu X M, et al., 2001. Uplift process of the Qinghai-Tibet Plateau since 0.5 Ma: Evidence from hot water activity in the Gangdise belt[J]. *Science In China (Series D)*, 31 (B12) : 27 – 33 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q and Li Z Q, 2004. Possible location for underthrusting front of the Indus Continent: Constraints from Helium Isotope of the Geothermal Gas in southern Tibet and eastern Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, (4) : 482 – 493 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Zhao Z D, Gao Y F, et al., 2006. Tearing and dischro-

- subduction of the Indian continental slab: Evidence from Cenozoic Gangdese volcano-magmatic rocks in south Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (4) : 761–774.
- Hua Y J, Zhang S X, Li M K, et al., 2019. Magma system beneath Tengchong volcanic zone inferred from local earthquake seismic tomography[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 377 (JUN.1) : 1–16.
- Jiang S Y, Radvanec M, Nakamura E, et al., 2008. Chemical and boron isotopic variations of tourmaline in the Hnilec granite-related hydrothermal system, Slovakia: Constraints on magmatic and metamorphic fluid evolution[J]. *Lithos*, 106 (1-2) : 1–11.
- Kasemann S A, Meixner A, Erzinger J, et al., 2003. Boron isotope composition of geothermal fluids and borate minerals from salar deposits (central Andes/NW Argentina) [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 16 (8) : 685–697.
- Klemperer, S L, Zhao, P, Whyte C J, et al., 2022. Limited underthrusting of India below Tibet: 3He/4He analysis of thermal springs locates the mantle suture in continental collision[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119 (12) : e2113877119.
- Kind R, Ni J, Zhao W J, et al., 1996. Evidence from earthquake data for a partial melt crustal layer in Southern Tibet[J]. *Science*, 274: 1692–1694.
- Klemperer S L, Kennedy B M, Sastry S R, et al., 2013. Mantle fluids in the Karakoram fault: Helium isotope evidence[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 366: 59–70.
- Li J T, Song X D, 2018. Tearing of Indian mantle lithosphere from high-resolution seismic images and its implications for lithosphere coupling in southern Tibet[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115 (33) : 8296–8300.
- Li S H, Unsworth M J, Booker J R, et al., 2003. Partial melt or aqueous fluid in the mid-crust of Southern Tibet? Constraints from INDEPTH magnetotelluric data[J]. *Geophysical Journal International*, 153 (2) : 289–304.
- Li Z Q, Hou Z Q, Nie F J, et al., 2006. Enrichment of Element Cesium during Modern Geothermal Action in Tibet, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80 (9) : 1457–1464.
- Li Z Q, Hou Z Q, Nie F J, et al., 2006. Enrichment of element Cesium during modern geothermal action in Tibet, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80 (6) : 1457–1464 (in Chinese with English abstract).
- Liao Z J, 2018. Thermal Springs and Geothermal Energy in the Qinghai-Tibetan Plateau and the Surroundings[J]. *Springer Hydrogeology*: 23–38.
- Liu, Z, Tian, X, Yuan, X, et al., 2020. Complex structure of upper mantle beneath the Yadong-Gulu rift in Tibet revealed by S-to-P converted waves[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 531: 115954.
- Makovsky Y, Klemperer S L, Ratschbacher L, et al., 1999. Midcrustal reflector on INDEPTH wide-angle profiles: An ophiolitic slab beneath the India-Asia suture in southern Tibet?[J]. *Tectonics*, 18 (5) : 793–808.
- Minissale A, Borrini D, Montegrossi G, et al., 2008. The Tianjin geothermal field (north-eastern China) : Water chemistry and possible reservoir permeability reduction phenomena[J]. *Geothermics*, 37 (4) : 400–428.
- Mu B L, 1999. *Element Geochemistry*[M]. Beijing: Peking University Press, 1–227.
- Nelson K D, Zhao W, Brown L D, et al., 1996. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of project INDEPTH results[J]. *science*, 274 (5293) : 1684–1688.
- Nicholson K, 1993. *Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques*[M]. Springer-Verlag.
- Qin D J, Turner J V, Pang Z H, 2005. Hydrogeochemistry and groundwater circulation in the Xi'an geothermal field, China[J]. *Geothermics*, 34 (4) : 471–494.
- Qin K Z, Zhou Q F, Zhao J X, et al., 2021. Be-rich mineralization features of Himalayan leucogranite belt and prospects for lithium-bearing pegmatites in higher altitudes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95 (10) : 3146–3162 (in Chinese with English abstract).
- Shi, D, Klemperer, S. L, Shi, J, et al., 2020. Localized foundering of Indian lower crust in the India-Tibet collision zone[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117: 24742–24747.
- Su J B, Tan H B, 2022. The genesis of Rare-alkali metal enrichment in the geothermal anomalies controlled by faults and magma along the northern Yadong-Gulu rift[J]. *Ore Geology Reviews*, 147: 104987.
- Tan H B, Chen J, Rao W B, et al., 2012. 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*, 51: 21–29.
- Tan H B, Zhang Y F, Zhang W J, et al., 2014. Understanding the circulation of geothermal waters in the Tibetan Plateau using oxygen and hydrogen stable isotopes[J]. *Applied Geochemistry*, 51: 23–32.
- Tong W, 1981. *Tibet Geothermal*[M]. Beijing: Science Press, 1–118.
- Tong W, Liao Z J, Liu S B, et al., 2000. *Thermal Springs in Tibet*[M]. Beijing: Science Press.
- Wang G L and Lin W J, 2020. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (7) : 1923–1937 (in Chinese with English abstract).
- Wang S Q, Lu C, Nan D W, et al., 2017. Geothermal resources in Tibet of China: current status and prospective development[J]. *Environmental Earth Sciences*, 76 (6) : 239.
- Wei K, Lin R, Wang Z, 1982. Isotopic composition and tritium content of waters from Yangbajing geothermal area, Xizang (Tibet), China[C]//Proc. 5th Internat. Conf. Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology. Nikko National Park, Japan.
- Xu Z M, Yong Z Q, Sun S X, 1997. The hydrogeochemical features of langjiu geothermal field in Tibet[J]. *Journal Of Guilin Institute Of Technology*, 17 (1) : 63–69 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W J, Tan H B, Zhang Y F, et al., 2015. Boron geochemistry from some typical Tibetan hydrothermal systems: origin and isotopic fractionation[J]. *Applied Geochemistry*, 63: 436–445.
- Zhang C F, Shi Q L, Zhang L J, 2018. Discussion on the relationship between Cenozoic magmatic activity and geotherm in Tibetan Plateau[J]. *Geological Survey Of China*, 5 (2) : 18–24 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X G, 1998. Sulfur Mineralization On Of Modern Geothermal System In Yangbajing Basin Of Xizang[J]. *Geology Of Chemical Minerals*,

- (1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y F, 2016. Distribution and origin of some rare and dispersed elements in geothermal systems in Tibetan–Western Yunnan Geothermal Belt[D]. Nanjing: Doctoral Thesis of Hohai University.
- Zhang X Y, Li G Z, 2006. The geologic and geochemical characteristics of the Changbai Mountain geothermal field[J]. *Jilin Geology*, 25 (3): 25–30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y F, Tan H B, Zhang W J, et al., 2015. A new geochemical perspective on hydrochemical evolution of the Tibetan geothermal system[J]. *Geochemistry International*, 53 (12): 1090–1106.
- Zhao C P, Ran H, Wang Y, 2012. Present-day mantle-derived helium release in the Tengchong volcanic field, Southwest China: Implications for tectonics and magmatism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (4): 1189–1204 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P, Duo J, Liang T L, et al., 1998. Gas geochemical characteristics of Yangbajing geothermal field in Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, (7): 691–696 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P, Kennedy M, Duo J, et al., 2001. Noble gases constraints on the origin and evolution of geothermal fluids from the Yangbajing geothermal field, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (3): 497–503 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y Y, Cui Y B, Zhao X T, 2010. Geological and geochemical features and significance of travertine in travertine-island from Zhabuye salt lake, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29 (1): 124–141 (in Chinese with English abstract).
- Zheng M P, Xiang J, Wei X J, et al., 1989. Salt Lake in Qinghai–Tibet Plateau[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1–470.
- Zheng M P, Wang Q X, Duo J, et al., 1995. A New Type of Hydrothermal Deposit: Cesium–Bearing Geysers in Tibet[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–62.
- Zheng Y X, Zhang M T, Zhu B Q, et al., 1992. The characteristics of rare-alkali metal of the Tibetan geothermal system and the potential of its exploitation and utilization[J]. *Journal Of Natural Resources*, 7 (3): 249–257 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y Z, Wu B H, 1990. The formation of the qarhan saline lakes as viewed from the neotectonic movement[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 64 (1): 13–21 (in Chinese with English abstract).
- 过程—来自冈底斯带热水活动的证据[J]. *中国科学 (D辑)*, 31 (B12): 27–33.
- 侯增谦, 李振清, 2004. 印度大陆俯冲前缘的可能位置: 来自藏南和藏东活动热泉气体 He 同位素约束[J]. *地质学报*, (4): 482–493.
- 侯增谦, 赵志丹, 高永丰, 等, 2006. 印度大陆板片前缘撕裂与分段俯冲: 来自冈底斯新生代火山-岩浆作用证据[J]. *岩石学报*, 22 (4): 761–774.
- 李振清, 侯增谦, 聂凤军, 等, 2006. 西藏地热活动中铯的富集过程探讨[J]. *地质学报*, 80 (6): 1457–1464.
- 牟保磊, 1999. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1–227.
- 秦克章, 周起凤, 赵俊兴, 等, 2021. 喜马拉雅淡色花岗岩带伟晶岩的富铍成矿特点及向更高处找锂[J]. *地质学报*, 95 (10): 3146–3162.
- 佟伟, 1981. 西藏地热[M]. 北京: 科学出版社, 1–118.
- 佟伟, 廖志杰, 刘时彬, 等, 2000. 西藏温泉志[M]. 北京: 科学出版社.
- 王贵玲, 蔺文静, 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. *地质学报*, 94 (7): 1923–1937.
- 徐则民, 雍自权, 孙世雄, 1997. 西藏朗久地热田水文地球化学特征[J]. *桂林工学院学报*, 17 (1): 63–69.
- 张朝锋, 史强林, 张玲娟, 2018. 青藏高原新生代岩浆活动与地热关系探讨[J]. *中国地质调查*, 5 (2): 18–24.
- 张锡根, 1998. 西藏羊八井现代地下水热水系统硫矿的成矿作用[J]. *化工矿产地质*, (1): 1–10.
- 张燕飞, 2016. 藏-滇地热系统稀散元素分布与物源研究[D]. 南京: 河海大学博士毕业论文.
- 张希友, 李国政, 2006. 长白山地热田地质及地球化学特征[J]. *吉林地质*, 25 (3): 25–30.
- 赵慈平, 冉华, 王云, 2012. 腾冲火山区的现代幔源氦释放: 构造和岩浆活动意义[J]. *岩石学报*, 28 (4): 1189–1204.
- 赵平, 多吉, 梁廷立, 等, 1998. 西藏羊八井地热田气体地球化学特征[J]. *科学通报*, (7): 691–696.
- 赵平, Kennedy M, 多吉, 等, 2001. 西藏羊八井热田地热流体成因及演化的惰性气体制约[J]. *岩石学报*, 17 (3): 497–503.
- 赵元艺, 崔玉斌, 赵希涛, 2010. 西藏扎布耶盐湖钙华岛钙华的地质地球化学特征及意义[J]. *地质通报*, 29 (1): 124–141.
- 郑绵平, 向军, 魏新俊, 等, 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1–470.
- 郑绵平, 王秋霞, 多吉, 等, 1995. 水热成矿新类型: 西藏铯硅华矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1–62.
- 郑亚新, 章铭陶, 朱炳球, 等, 1992. 西藏地热系统的稀碱金属特征及开发利用潜力[J]. *自然资源学报*, 7 (3): 249–257.
- 朱允铸, 吴必豪, 1990. 从新构造运动看察尔汗盐湖的形成[J]. *地质学报*, 64 (1): 13–21.

## 附中文参考文献

侯增谦, 李振清, 曲晓明, 等, 2001. 0.5Ma 以来的青藏高原隆升