

柴达木盆地水—岩硼含量分布特征及其富集区域物源讨论

姜盼武^{1,2,3}, 樊启顺^{1,2}, 秦占杰^{1,2}, 都永生^{1,2}, 张湘如^{1,2,3}, 李庆宽^{1,2}, 马正明^{1,2,3}

(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)

摘要:柴达木盆地盐湖是我国重要的硼资源富集区和成矿区。针对盆地内不同盐湖硼资源富集程度的差异性, 采集柴达木盆地北缘河水和泉水样品, 分析其硼和锂含量、矿化度和 pH 值, 结合柴达木盆地不同流域补给水及蚀源区岩石已有的硼锂含量, 总结盆地水—岩体系硼锂含量地球化学特征, 并对柴达木盆地北缘富硼盐湖物源进行了探讨。结果表明, 柴达木盆地北缘祁连山流域水体和岩石硼含量均较阿尔金山和昆仑山流域高, 而其锂含量均较昆仑山那棱格勒河流域低, 显示柴达木盆地北缘水—岩相对富硼贫锂的地球化学特征。综合对比柴达木盆地不同流域硼锂资源分布, 显示出整个盆地硼锂含量的不均一性和不同步性特征。针对柴达木盆地北缘富硼盐湖的物源研究, 主要归纳为祁连山系围岩(含电气石花岗岩)的风化淋滤、深部富硼地下水补给和含盐风成沉积溶滤输入成因, 其中深部富硼地下水补给为最主要的来源。

关键词:柴达木盆地; 硼含量地球化学; 热水水; 水—岩作用; 含盐风成沉积; 物质来源

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2021)01-0044-12

硼是一种重要的非金属元素, 也是亲石元素, 在自然界中多以络阴离子形式存在于造岩矿物中^[1]。硼及其化合物具有耐高温、耐磨损、高强度、质轻和催化性等特殊物理化学性质, 已被广泛应用于化工、建材、医药、机械、冶金、核工业和新材料等领域^[2-5]。

全球硼资源集中在环太平洋和地中海构造带内^[6], 主要分布在土耳其、美国、俄罗斯、智利和中国, 约占世界总储量的 97%^[7]。中国硼矿资源储量约占全球的 8%, 资源量(以 B_2O_3 计)为 3 828.68 万吨^[8]。近年来中国对硼资源的需求日益增加, 对外依存度持续上升, 由 2001 年的 20% 增长至 2016 年的 79%, 出现硼资源的供需不平衡^[8]。中国硼矿资源主要分布在东北和西北地区的辽、吉、青、藏四省区, 大体上分为辽东—吉南沉积变质型硼矿成矿带、青藏高原盐湖型硼矿成矿带以及江苏六合冶山—广西钟山黄宝砂卡

岩型硼矿成矿带^[9-10]。随着硼矿资源的不断开采和利用, 目前高品位硼矿主要集中在青藏高原盐湖型成矿带^[11], 硼矿资源量约占全国的 50%^[12]。

柴达木盆地位于青藏高原北部, 分布有大量盐湖型硼矿资源, 是我国重要的硼矿工业生产区。资源勘查表明, 已发现的大型盐湖型硼矿床 5 处, 分别为大柴旦、小柴旦、一里坪、西台吉乃尔和察尔汗盐湖; 中、小型盐湖型硼矿床多处^[12]。硼矿(以 B_2O_3 计)总资源量为 1 677.03 万吨^[13], 占现代盐湖型硼资源的 60% 左右^[14]。柴达木盆地已知矿床矿点数量多, 找矿前景良好, 为全国最大的硼矿远景区^[15]。因此, 研究和总结柴达木盆地补给水及蚀源区岩石硼含量分布特征、富硼区域的物质来源, 对柴达木盆地硼资源的形成机制、找矿前景等有着重要的意义。本文采集柴达木盆地北缘不同河流和富硼水样品, 分析其矿化度、pH 值、

收稿日期: 2019-11-01; 修回日期: 2020-03-23

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0805); 青海省创新平台建设专项(2020-ZJ-T06); 青海省科技厅应用基础研究项目(2020-ZJ-734)

作者简介: 姜盼武(1995-), 男, 主要研究方向盐湖地球化学。Email: 1215755900@qq.com。

通信作者: 樊启顺(1980-), 男, 博士, 研究员, 主要从事盐湖地球化学方面的研究工作。Email: qsfan@isl.ac.cn。

硼和锂含量,结合盆地其它流域水体和岩石的硼含量数据,总结柴达木盆地水岩体系硼地球化学特征,以期对柴达木盆地富硼区域物质来源进行初步探讨。

1 柴达木盆地地质背景

柴达木盆地是中国内陆大型的山间盆地之一(图1A),盆地平均海拔为2 800 m,面积约为 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地的四周为高大的山系所包围,主要为北部的祁连山、西北部的阿尔金山和南部的昆仑山,构成了一个轴向为北西—南东向的菱形向心汇水盆地^[16]。

从构造来看,柴达木北缘是由五个北西—南东向近平行的构造单元组成(图1A),从北向南依次为阿拉善地块、北祁连造山带、祁连地块、北柴达木变质带和柴达木地块^[17]。祁连地块是覆盖在前寒武纪基底之上的古生代沉积层序所形成的叠瓦逆冲断层带,基底由花岗岩片麻岩、大理岩、角闪岩和少量麻粒岩组成^[18]。北柴达木变质带为大陆型超高压变质带,平行于北祁连造山带,由含榴辉岩和石榴石—橄榄岩的岩层组成,在北缘延伸400 km^[18]。柴达木盆地北缘构造以断裂为

主,褶皱不发育,岩浆活动频繁。各时期的岩浆均有出露,包括前吕梁期的花岗岩、加里东期和海西期酸性至超基性岩及印支期含电气石斑状花岗岩和燕山期花岗斑岩,尤其以印支期含电气石的斑状花岗岩分布最广^[16,19-20]。

大、小柴旦盐湖位于柴达木盆地北缘祁连地区与北柴达木超高压变质带之间(图1B),它们的卤水硼含量为盆地盐湖之最,且在湖底沉积有全球少有分布的柱硼镁石矿层,是我国发现的主要的固体硼酸盐盐湖矿床^[19,21]。热泉出露于柴达木盆地北缘祁连山系达肯达坂山,以地下潜流的形式补给大柴旦盐湖(图1B)。达肯达坂山山区的变质岩和火成岩发育了一系列断裂构造,为山区裂隙潜水的形成提供了基本条件,尤其为深循环的地热水形成提供了良好条件,从而形成大柴旦北部北麓温泉带^[20]。祁连地块的深成岩为奥陶纪—志留纪的花岗岩^[22],这些古生代的花岗岩被普遍认为是热泉流体的储源岩^[18]。塔塔棱河位于柴达木盆地北缘祁连地块,为大、小柴旦盐湖的重要补给源,河流上游分布有沉积型硼矿(居红土硼矿)及多处富硼泥火山(乌兰保姆)(图1B),是造成河水富硼的主要原因^[11,20]。

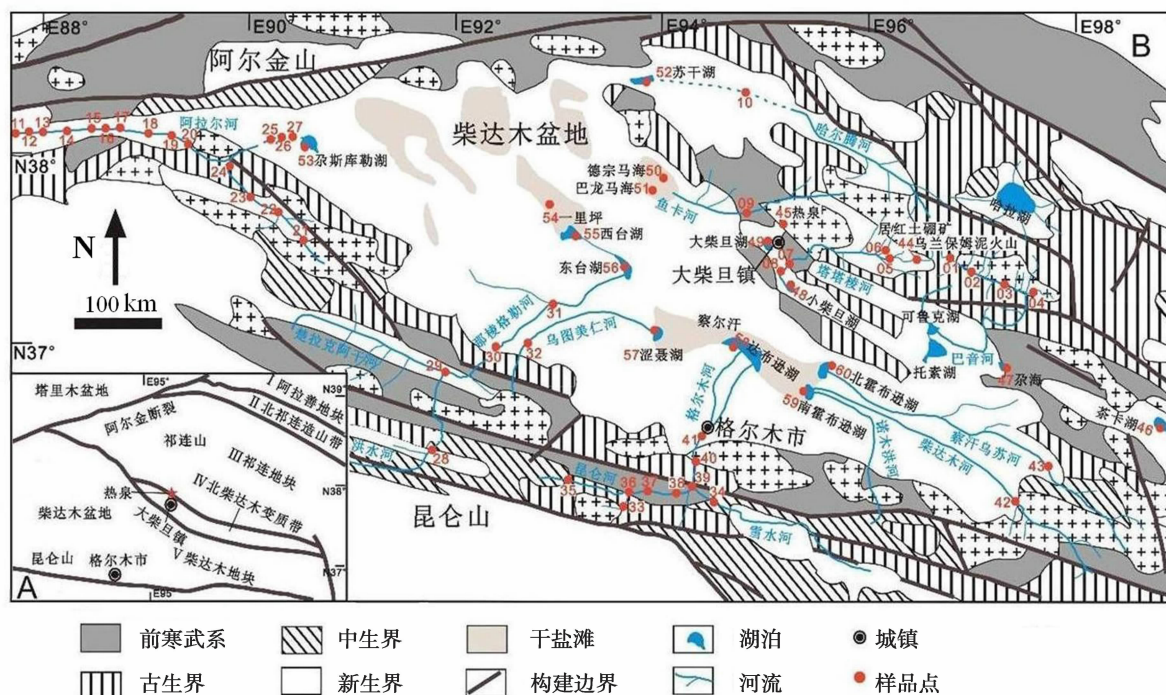


图1 柴达木盆地地质图和样品分布

Fig. 1 Geological map of Qaidam Basin and sampling points

2 样品采集与测试

2018 年 9 月采集巴音河河水 4 件(图 1 中编号为 01 ~ 04)、塔塔棱河上游河水 2 件(编号为 05 ~ 06);2019 年 7 月采集塔塔棱河下游河水 2 件(编号为 07 ~ 08)、鱼卡河河水 1 件(编号为 09)和哈尔腾河河水 1 件(编号为 10)、热泉水 1 件(编号为 45)。野外采样过程中利用水质分析仪(YSI)现场测试水体的 pH 值,样品采集后于 24 h 内用通过 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤,过滤之后在用于阳离子分析的样品中加入超纯硝酸酸化至 $\text{pH} < 2$,用于阴离子分析的样品不添加保护剂,然后储存于聚乙烯瓶中密封避光保存待测。所用的聚乙烯塑料瓶事先均在实验室经过高纯度的 HCl 溶液和超纯水清洗干净并干燥。室内对所采样品的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 以及 B^{3+} 、 Li^+ 含量进行测定,矿化度(TDS)为所有离子含量相加(包含 HCO_3^-),测试结果见表 1。测试在中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心完成,测试仪器为 NexION2000B 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),测试精度 $< 2\%$ 。

3 结果与讨论

3.1 柴达木盆地不同流域河水和尾间盐湖卤水硼含量分布特征

如表 1 和图 2 所示,柴达木盆地祁连山、阿尔金山和昆仑山流域河水的硼锂含量均高于世界主要河流平均硼(10.2 $\mu\text{g/L}$)、锂(1.8 $\mu\text{g/L}$)值^[23]。总体来看,除昆仑山流域那棱格勒河外,祁连山流域是柴达木盆地相对较为富硼的流域(图 2),该流域硼含量最高的河流为塔塔棱河(0.87 mg/L),河流中上游大致沿南祁连断裂带发育,该区域不仅汇集富硼泥火山水(176.44 mg/L)(表 1),而且还沉积有居红土等硼矿。同时,祁连山流域达肯达坂山出露富硼热泉水,硼含量高达 46.30 mg/L (表 1)。昆仑山那棱格勒河流域为柴达木盆地富锂的流域(图 2),

该流域主要受上游洪水河支流的补给,洪水河锂含量高达 2.04 mg/L ,受周围的火山及断裂活动有关的温泉热水的补给所致^[24-28]。因此,柴达木盆地富硼锂河流与富硼锂地下水补给密切相关。阿尔金山流域发育的河流少,目前尚无锂含量数据报道,其硼含量低。

通过柴达木盆地不同流域河水及尾间盐湖硼锂含量对比(图 2 和 3),发现各流域及其尾间盐湖硼锂含量分布具有不均一性和不同步性。硼资源集中分布于盆地北部河水、热泉水和泥火山水及尾间盐湖中(大、小柴旦盐湖和马海盐湖),而锂资源则集中分布于盆地南部那棱格勒河流域及其尾间盐湖中(一里坪、东台吉乃尔盐湖、西台吉乃尔盐湖和涩聂湖),造成盆地资源差异性分布的主要原因是受补给水的硼锂含量高低所致(图 2)。从祁连山和昆仑山流域硼锂资源分布来看,两个流域虽然均因受到富硼锂地下水补给而使部分河流富硼锂,但二者硼锂含量无明显相关性,呈现出既伴生又不同步性变化的特征(图 2)。

通过对不同流域河水 pH 值和矿化度对比,发现柴达木盆地河流的 pH 在 7.7 ~ 8.9 之间,均呈弱碱性。祁连山流域河流较阿尔金山和昆仑山流域偏中性,平均 pH 值为 7.9(图 2)。从矿化度来看,大部分河流主干矿化度大于 500 mg/L ,属于较高矿化度河水,而支流矿化度则小于 500 mg/L ,属于中等矿化河水。柴达木盆地不同流域河水矿化度均比世界河流平均值高(65 mg/L)^[29]。如图 2 所示,硼锂含量随矿化度的变化而变化,呈现良好的对应关系。河水中硼锂含量随矿化度增高,说明除物源补给之外,强烈的蒸发作用也是引起流域资源元素富集的原因。

3.2 柴达木盆地外围山系岩石硼含量分布特征

在地壳厚度范围内,柴达木盆地基岩建造出露的总厚度平均为 36 km,其中新生代沉积占总质量的 10%,中生界以前的岩石(基底岩石)占总质量的 90% 以上^[16]。因此,基岩的硼、锂含量对柴达木盆地硼、锂区域丰度具有重要的意义。根据柴达木盆地外围基底各类岩石的 132 个样品的分析结果和计算,外围基底岩石中平均硼含量为 58×10^{-6} ,平均锂含量为 61.3×10^{-6} ^[16],分别为地壳平均含量^[1](硼为 12×10^{-6} ,锂为 $32 \times$

表 1 柴达木盆地不同流域河水及其尾间盐湖卤水硼锂含量、矿化度对比

Table 1 Comparison of boron and lithium content and salinity in different river catchments and their rump salt lake's brine in Qaidam Basin

流 域	编号	河流	pH	B ³⁺	Li ⁺	TDS
				/(mg·L ⁻¹)	/(mg·L ⁻¹)	/(g·L ⁻¹)
祁连山流域	01	巴音河	7.79	0.38	0.05	0.70
	02	巴音河	7.82	0.28	0.02	0.45
	03	巴音河	7.75	0.33	0.04	0.74
	04	巴音河	7.80	0.57	0.04	0.41
	05	塔塔棱河	7.71	0.87	0.05	0.83
	06	塔塔棱河	7.97	0.74	0.05	0.78
	07	塔塔棱河	7.99	0.78	0.07	0.48
	08	塔塔棱河	8.14	0.85	0.05	0.56
	09	鱼卡河	8.07	0.52	0.02	0.31
	10	哈尔腾河	8.13	0.27	0.02	0.46
阿尔金山流域 ^[30]	11	库拉木拉克萨伊河	8.90	0.04	—	0.62
	12	库拉木拉克萨伊河	8.10	0.02	—	0.36
	13	库拉木拉克萨伊河	8.20	0.03	—	0.44
	14	库拉木拉克萨伊河	8.30	0.02	—	0.35
	15	库拉木拉克萨伊河	8.20	0.05	—	0.35
	16	库拉木拉克萨伊河	8.30	0.12	—	0.33
	17	库拉木拉克萨伊河	8.20	0.12	—	0.33
	18	库拉木拉克萨伊河	8.30	0.12	—	0.38
	19	库拉木拉克萨伊河	8.40	0.23	—	0.58
	20	库拉木拉克萨伊河	8.00	0.43	—	1.05
	21	阿提阿特坎河	8.40	0.09	—	0.49
	22	阿提阿特坎河	8.30	0.08	—	0.45
	23	阿提阿特坎河	8.40	0.14	—	0.61
	24	阿提阿特坎河	8.20	0.28	—	0.64
	25	阿拉尔河	8.30	0.34	—	0.87
	26	阿拉尔河	8.30	0.33	—	0.84
	27	阿拉尔河	8.30	0.39	—	0.90
昆仑山流域	28	洪水河中游 ^[24]	—	4.69	2.04	1.32
	29	那棱格勒河 ^[26]	8.37	1.33	0.48	0.72
	30	那棱格勒河 ^[26]	8.15	1.73	0.66	0.65
	31	那棱格勒河 ^[26]	8.11	1.40	0.52	0.70
	32	乌图美仁河 ^[26]	8.48	2.03	0.74	0.92
	33	小南川河 ^[26]	8.15	0.38	0.09	0.22
	34	雪水河 ^[26]	7.93	1.44	0.12	0.95

续表 1:

流 域	编号	河 流	pH	B ³⁺	Li ⁺	TDS
				/(mg · L ⁻¹)	/(mg · L ⁻¹)	/(g · L ⁻¹)
昆仑山流域	35	昆仑河 ^[26]	8.18	0.12	0.11	0.30
	36	昆仑河 ^[26]	8.18	0.15	0.11	0.32
	37	昆仑河 ^[26]	8.19	0.16	0.09	0.35
	38	昆仑河 ^[26]	8.38	0.15	0.11	0.33
	39	格尔木河 ^[26]	8.35	0.20	0.08	0.36
	40	格尔木河 ^[26]	8.34	0.23	0.09	0.37
	41	格尔木河 ^[26]	8.15	0.85	0.07	0.63
	42	柴达木河 ^[26]	8.32	0.26	0.11	0.69
	43	察汗乌苏河 ^[26]	8.21	0.17	0.18	0.66
柴达木盆地北缘 深部富硼地下水	44	乌兰保姆泥火山 ^[20]	—	176.44	—	5.13
	45	大柴旦热泉	7.93	46.29	3.65	1.32
尾闾盐湖卤水	46	茶卡湖* ^[16]	6.80	44.28	8.80	322.92
	47	尕斯库勒湖 ^[16]	8.28	26.39	12.50	90.75
	48	小柴旦湖 ^[16]	7.80	1253.18	36.20	175.20
	49	大柴旦湖 ^[16]	7.95	506.43	90.70	275.11
	50	德宗马海湖 ^[16]	7.42	343.10	17.00	355.90
	51	巴龙马海湖 ^[16]	7.40	86.94	4.00	314.08
	52	苏干湖 ^[20]	8.90	29.08	—	32.25
	53	尕斯库勒湖 ^[16]	7.56	106.45	24.60	333.24
	54	一里坪* ^[16]	7.32	224.06	262.00	327.73
	55	西台吉乃尔湖 ^[16]	7.77	309.41	199.00	336.84
	56	东台吉乃尔湖 ^[16]	7.75	226.20	159.00	331.92
	57	涩聂湖 ^[16]	7.10	265.48	191.00	332.25
	58	达布逊湖 ^[16]	5.32	321.65	88.40	470.18
	59	南霍布逊湖 ^[20]	7.80	7.50	—	312.69
	60	北霍布逊湖 ^[20]	7.50	21.58	—	243.07

* 为晶间卤水

10⁻⁶)的 4.8 倍和 1.9 倍,表明柴达木盆地是显著的富硼区。按照不同区域来看(祁连山地区、阿尔金山地区、昆仑山地区),外围山系基底岩石硼锂富集程度又有所差异。

祁连山地区的样品主要取自温泉沟、冷泉沟、绿梁山、锡铁山及塔塔棱河一带,共 55 件岩石样品,主要为下古生界各类变质岩,包括各类片麻岩、片岩、板岩、大理岩等,还有海西期的花岗岩和下古生界、中生界的石灰岩、泥岩、砂岩、砂砾岩

等。经过计算,祁连山地区基底岩石平均硼含量为 103 × 10⁻⁶,是地壳平均含量的 8.6 倍;平均锂含量为 32 × 10⁻⁶,与地壳平均含量相当^[16]。阿尔金山地区的岩石样品主要取自海西石棉矿北山和当金山口至阿克塞一带,共 32 件岩石样品,主要为下古生界各类变质岩,包括各类片岩、千枚岩、大理岩、页岩等,还有下古生界和上古生界角砾岩、灰岩、岩浆岩等。经过计算,阿尔金山地区基底岩石平均硼含量为 41 × 10⁻⁶,平均锂含量为

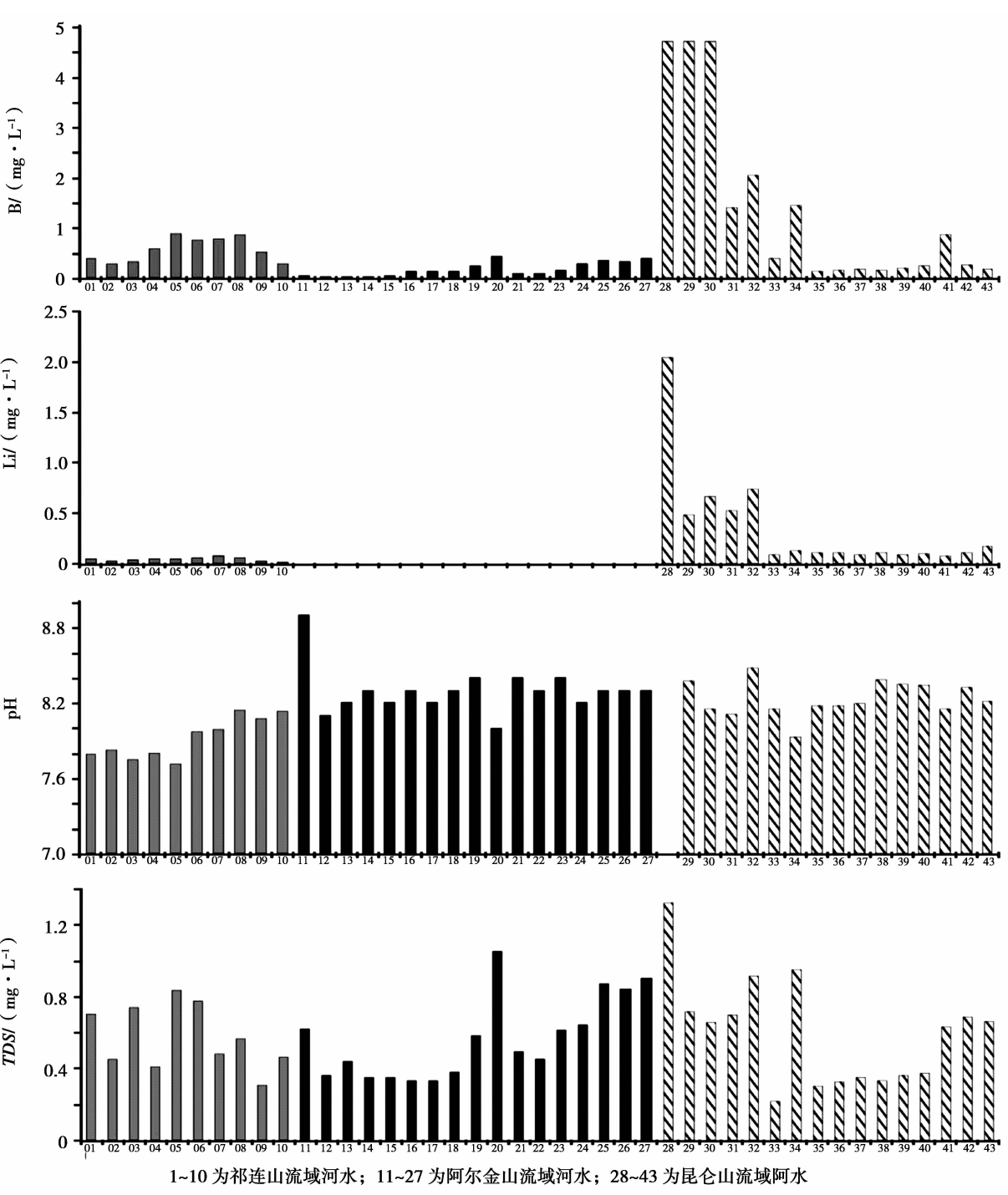


图 2 柴达木盆地不同流域河水硼锂含量、pH 及矿化度对比

Fig. 2 Comparison of boron and lithium content, pH and salinity of river water in different catchments in Qaidam Basin

99×10^{-6} [16], 分别为地壳平均含量的 3.4 倍和 3.1 倍。昆仑山地区的岩石样品主要取自格尔木至昆仑山口的一带, 共 45 件岩石样品, 主要为下古生界各类变质岩, 包括各类片岩、石英岩、板岩等, 还有下古生界和上古生界的各类灰岩、岩浆岩、砂砾岩等。经过计算, 昆仑山地区基底岩石平均硼含量为 14×10^{-6} , 平均锂含量为 108×10^{-6} [16], 分别为地壳平均含量的 1.2 倍和 3.4 倍。

对比显示, 盆地外围山系中祁连山地区基底岩石的平均硼含量要明显高于阿尔金山地区和昆仑山地区(图 4), 其中最为富硼的是电气石花岗岩(2640×10^{-6})(表 2); 平均锂含量却明显低于

阿尔金山地区和昆仑山地区(图 4),这与盆地内不同流域河水及尾间盐湖卤水硼含量分布特征一致,说明补给水体的硼含量、蚀源区岩石的硼含量和尾间盐湖富硼密不可分。

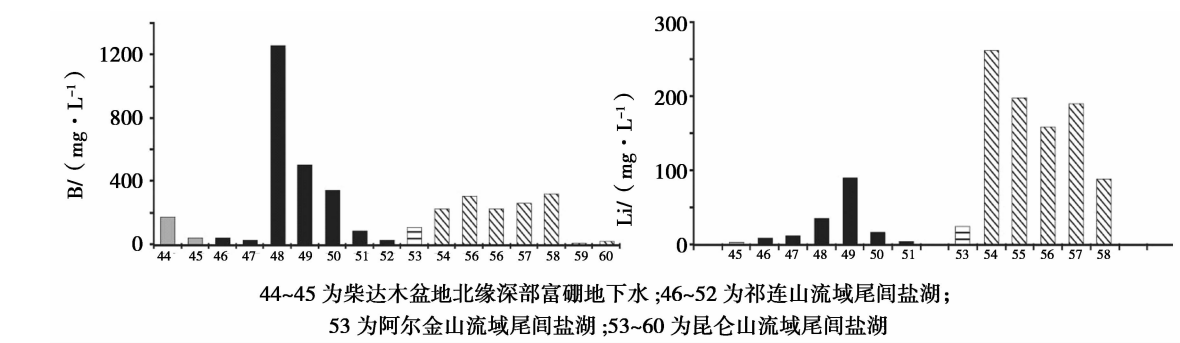


图 3 柴达木盆地富硼水和盐湖卤水硼锂含量对比

Fig. 3 Comparison of boron and lithium content of boron-rich water and salt lake's brine in Qaidam Basin

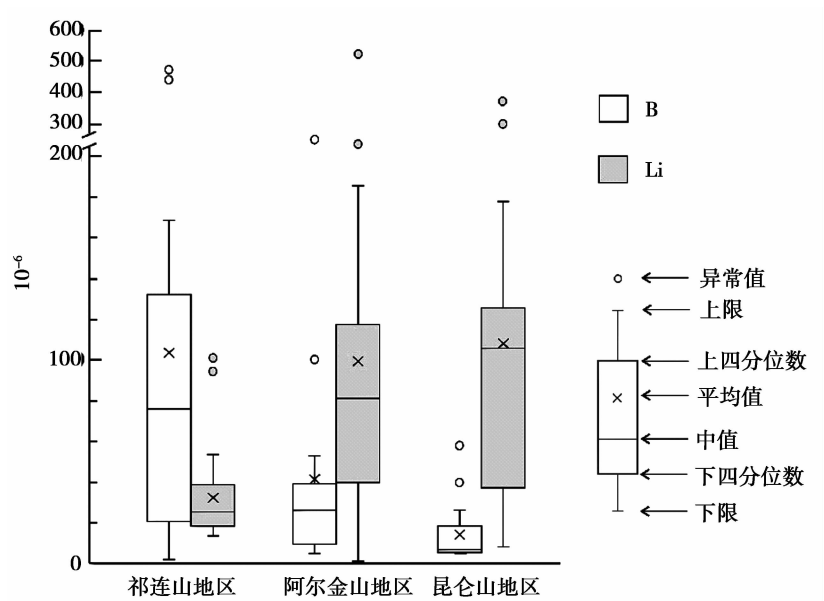


图 4 柴达木盆地外围山系基底岩石硼锂含量对比^[16]

Fig. 4 Comparison of boron and lithium content in basement rocks of mountains in the periphery of Qaidam Basin

表 2 柴达木盆地北缘岩石硼含量^[31]

Table 2 Boron content of rocks in the northern margin of Qaidam Basin

地 层	岩 性	硼含量平均值/ $\times 10^{-6}$	硼含量/地壳平均值 ^[1]
第四系	砂砾层	34	2.83
	地表含盐粘土、粘土、砂土	667	55.58
第三系	砂砾层、泥岩、泥灰岩	48	4
白垩系	砂砾岩、砂泥岩	47	3.92
侏罗系	砂岩、页岩、煤层	50	4.17
三叠系	灰岩、砂岩、板岩	88	7.33
二叠系	千枚岩、板岩	49	4.08
石炭系	变质砂岩、大理岩	108	9

续表 2:

地 层	岩 性	硼含量平均值/ $\times 10^{-6}$	硼含量/地壳平均值 ^[1]
奥陶系	石灰岩、页岩	12	1
寒武系	石灰岩、大理岩、 片岩、千枚岩	49	4.08
震旦系	凝灰砂岩、凝灰板岩、 砂岩、砂砾岩、灰岩	53	4.42
元古界	花岗片麻岩、角闪片麻岩、 绿色片岩	100	8.33
花岗岩	电气石花岗岩	2 640	220
	花岗岩	58	4.83
	花岗伟晶岩	93	7.75
	闪长岩、辉岩	15 ^a	1.25
	蛇纹岩、橄榄岩	54 ^e	4.5
	安山岩、英安岩、凝灰岩	15 ^e	1.25

3.3 柴达木盆地北缘富硼区域物源分析

柴达木盆地北缘盐湖能形成大型硼矿床,与
该区富硼的地球化学背景和特殊的补给来源有
关^[19]。前人对其富硼物源进行了大量研究,主要
提出岩石风化淋滤和汇聚、深部富硼地下水补给、
山区含盐风成沉积溶滤输入等成因。

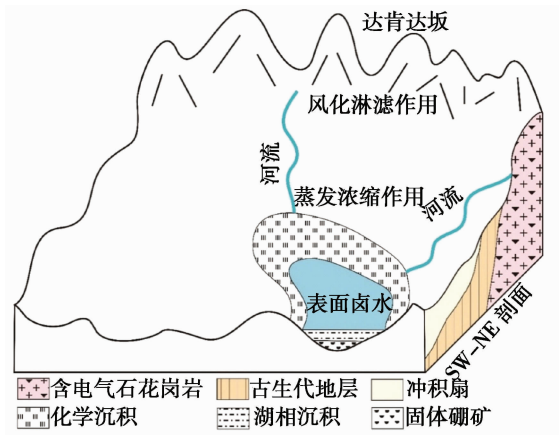


图 5 含电气石花岗岩风化淋滤富硼模式图

Fig. 5 Boron – rich model of weathering and leaching
of tourmaline – bearing granite

1) 岩石风化淋滤和汇聚成因 作为陆相碎屑
岩型的盐湖,蚀源区岩石风化无疑是盐分的普遍
来源^[20]。柴达木盆地北缘山区各地层岩石均较
为富硼(图 4 和表 2),同时柴达木盆地北缘的达
肯达坂山是中国西部出露最大的花岗岩体(面积

达 2 200 km²)^[32],其中各时期的岩浆均有出露,
尤其以印支期电气石花岗岩分布最广^[16,19-20]。
该区含电气石花岗岩硼含量非常高,平均含量达
到 2 640 $\times 10^{-6}$ (表 2),远远高于正常花岗岩的
硼含量,出露面积达 800 km²,构成硼的异常
区^[33]。在漫长的地质年代中,经历着物理—化学
风化作用过程,有相当数量的硼被迁移汇入到湖
泊中,但淋滤实验和迁移量还有待进一步验
证^[20]。Vengosh 等研究报道,从围岩及沉积物中
快速淋滤的流体具有低 $\delta^{11}\text{B}$ 值和较高 B/Cl 比
值^[34],这种负相关性也在柴达木盆地北缘河水
和大柴旦热泉水的 $\delta^{11}\text{B}$ – B/Cl 值得到验证^[35],表明
柴达木盆地北缘河水从围岩和地层中淋滤出相当
数量的硼,对尾间盐湖富集成矿起到一定的作用。

2) 深部富硼地下水补给成因 柴达木盆地北
缘断裂非常发育,主要为 NW – NWW 向。达肯达
坂山北麓,热泉沿构造破碎带溢出地表,呈群体产
出,泉水硼含量达 46.29 mg/L(表 1),以潜流
的形式注入到大柴旦盐湖中。塔塔棱河为大、小柴
旦盐湖的重要补给源,其中、上游断裂发育,分布
有泥火山(乌兰保姆泥火山)(图 1),其硼含量高
达 176.44 mg/L(表 1),并有古温泉水沉积硼矿
床(居红土硼矿床)和多个硼矿化点等,均沿
NWW 向呈串珠状分布,与区内主断裂构造方向
一致。这些来自深部的富硼水体及硼矿点是塔塔
棱河河水中硼的重要来源^[11,20]。

据郑绵平等报道,柴达木盆地北缘热泉水、泥火山水与雅鲁藏布江某些“岩浆型”地热水相似,因此指出这种类似于“岩浆型”地热水中的硼、锂资源可能主要来自于深部重熔岩浆(图6)^[20,36]。据张彭熹等对柴达木盆地内各类天然水(包括大柴旦热泉水)中 δD 和 $\delta^{18}O$ 分析,表明大柴旦热泉

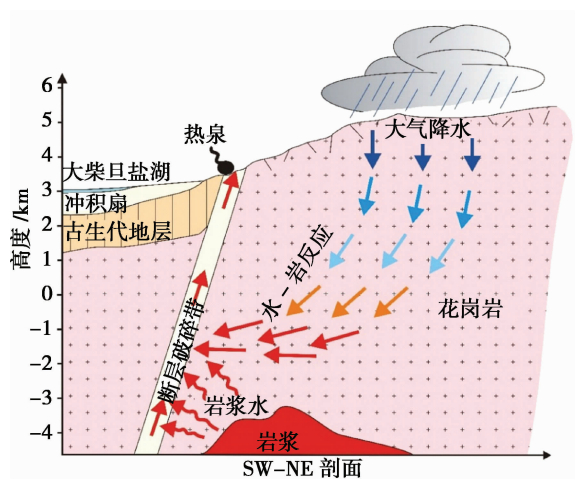


图6 深部地下水补给富硼模式图

Fig. 6 Boron-rich model of deep groundwater recharge

水应为雨水溶液,经断裂带下渗流入深部,增温后以热水的方式返回地面(图6)^[16]。李建森等研究表明,大柴旦热泉水具有极低的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值特征,低于周围冷泉水和河水的同位素组成值。通常积雪和冰雹等冰雪降水具有较低的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值,而雨水的同位素组成值则较高,因此推断热泉水的水体的来源以冰雪融水为主(图6)^[37]。

Stober等认为大柴旦热泉北部花岗岩,由于它巨大的出露面积(图1),很有可能向下延伸很深,而成为热泉的储源岩(图6)^[18],并且大柴旦热泉水中的硼、锂、氟的含量与矿化度关系非常密切,因此大柴旦热泉水为典型的来自花岗岩深层裂隙含水层的水^[18,38-39]。野外观察发现大柴旦热泉附近的花岗岩发生了强烈的水热蚀变,推断水体在深部储库和沿断裂上涌的过程中与围岩发生着强烈的水岩交换反应,从而为水体提供了硼等资源(图6)^[18]。硼在岩浆分异作用过程的晚期富集,分散在造岩矿物中,尤以进入到斜长石、钾长石较多^[1,40],因此大柴旦热泉水中硼可能来自于花岗岩中的长石溶解或转变为粘土矿物的过程^[18]。

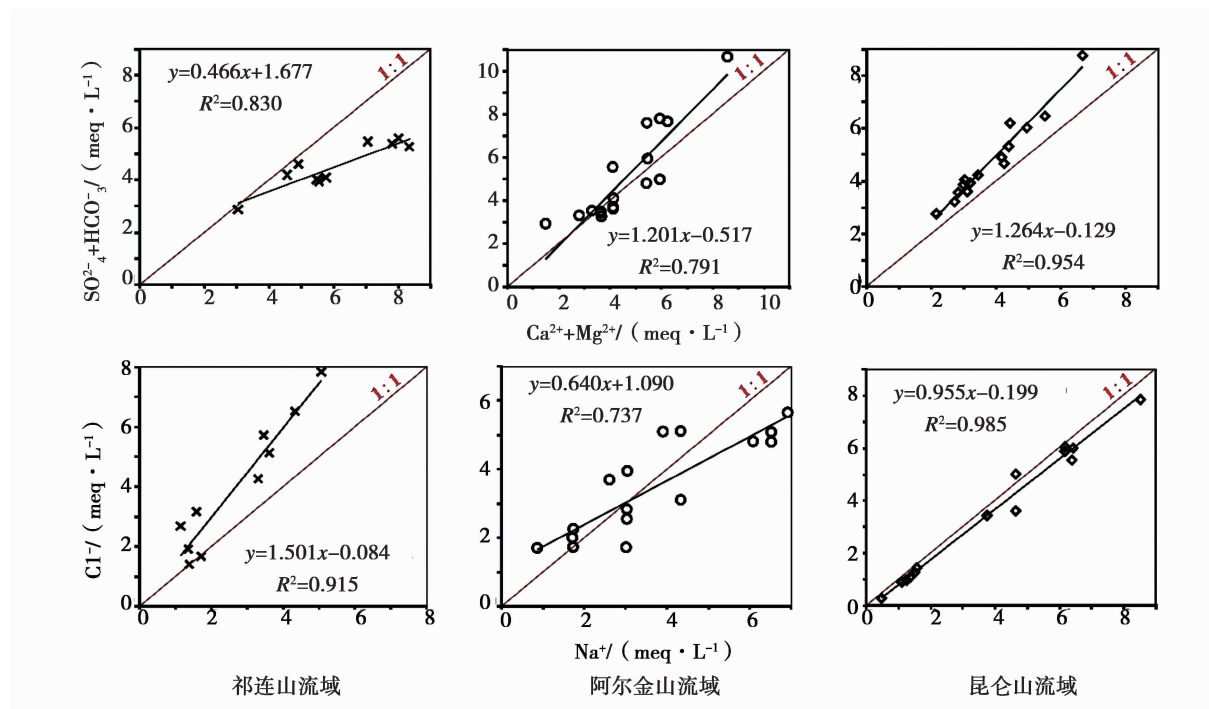


图7 柴达木盆地祁连山、阿尔金山和昆仑山流域主量元素对比及相关性分析

Fig. 7 Comparison and correlation analysis of major elements in the Qilian Mountain, Altyn Mountain and Kunlun Mountain catchments of Qaidam Basin

3)山区含盐风尘沉积溶滤输入成因 柴达木盆地西部分布着大面积“干盐滩”,广泛发育第三纪巨厚含盐地层(图1),均较为富集硼、锂等资源元素^[16]。目前,超过三分之一的盆地表面正在被快速侵蚀,盆地西部裸露的基岩和大面积分布的雅丹地貌就是明显的证据^[41-42]。盆地内主导风向为西北风春季和冬季的强风将大量的沙尘带到盆地的东南部^[43]。来自沙尘暴的沙尘输入是干旱区河流搬运物质的一个重要来源^[44-46],邻近的干盐湖的物质活动也可能对河水产生重要影响^[46]。

Stober 等测定了大柴旦热泉和附近河水的 Cl/Br 值分别为 550 和 673,均远远高于大气降水、花岗岩裂隙水及浅层地下水等水体的 Cl/Br 值^[18]。来自盐类沉积溶解水具有极高的 Cl/Br 值,约为 1 000^[38,47],这说明 Cl/Br 值异常高的大柴旦热泉水可能溶解了大量盐类矿物。野外调查显示,在祁连山高海拔地区的山坡上分布有风成沉积,推断来自柴达木盆地风成沙沉积中盐类矿物溶解后通过花岗岩裂隙渗入地下汇入热泉水,提高了热泉水的硼含量。

含盐风成沉积溶滤输入同样在柴达木盆地北缘的河水中也得到了验证,通过分析柴达木补给河流的主量元素之间的关系发现(图7),柴达木盆地补给河流的($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)与($\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$)之间、 Na^+ 与 Cl^- 之间具有较强的相关性,说明蒸发盐的溶解为祁连山流域河水主量离子提供了重要的溶质。在内陆河中蒸发盐的溶解是其溶质化学组成的重要来源^[46]。含盐风尘输入同样也在降水中得到了体现,据柴达木地质队资料,柴达木盆地北缘大、小柴旦地区大气降水的盐分含量高达0.03 g/L,硼含量高达0.5 mg/L^[20]。由于频繁严重的沙尘暴中含有盐类物质,导致降水中元素的高含量,矿化度最大值甚至可以达到1 000 mg/L^[44,48]。综上所述,柴达木盆地频繁的沙尘活动,使得盐类矿物在祁连山地区形成风成沉积,在大气降水的作用下,风成沉积中含硼的盐类矿物溶解汇入河流或沿着岩体的裂隙下渗至深部,最后随热泉或泥火山岩裂隙通过上涌出露地表补给盐湖,对富集成矿起到一定作用(图8)。

岩石风化淋滤和汇聚成因、深部富硼地下水补给成因和山区含盐风尘沉积溶滤输入成因都对柴达木盆地北缘富硼盐湖富集成矿具有一定作

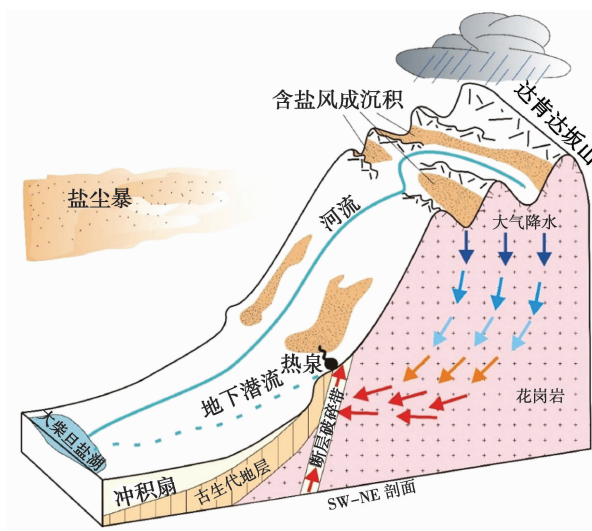


图8 山区含盐风成沉积溶滤富硼模式图

Fig. 8 Boron-rich model of saline aeolian deposit leaching input in mountainous area

用,但岩石风化淋滤和汇聚成因、山区含盐风尘沉积溶滤输入成因的贡献量有待进一步研究。据目前塔塔棱河与柴达木盆地北缘热泉的流量和硼含量推算,深部富硼地下水输入大柴旦盐湖的硼资源量在 1.54×10^7 t以上,接近或超过大柴旦盐湖硼的资源量^[20]。因此深部富硼地下水补给可能为柴达木盆地北缘富硼区域的主要物质来源。

4 结 论

通过对比柴达木盆地不同流域补给水体及其尾间盐湖、周围山系基岩硼、锂含量,主要获得以下结论。

1)柴达木盆地受来自深部的富硼锂地下水补给的河水是控制尾间盐湖硼锂含量的主导因素。柴达木盆地不同流域补给河水硼锂含量分布不均匀。昆仑山流域主要为那棱格勒河呈现富硼锂特征,是由那棱格勒河上游的洪水河受热泉补给所致,而祁连山流域河流总体呈现出相对富硼贫锂特征。

2)祁连山地区岩石的硼含量最高(柴达木盆地北缘为富硼异常区),而锂含量明显低于昆仑山和阿尔金山地区,并与水体呈现的硼含量分布特征相对应。

3)柴达木盆地北缘富硼盐湖的物源归纳为如下三种,表层岩石和地层的风化淋滤,主要为柴

达木盆地北缘大面积出露的含电气石花岗岩的风化淋滤;深部富硼地下水补给,大气降水沿花岗岩的裂隙下渗和上涌的过程中与围岩发生水—岩交换反应,使水体富硼,或直接来源于地下熔融岩浆产生的富硼岩浆水;含盐风成沉积溶滤输入,Cl/Br 比值和 Cl/Na 比值皆证明柴达木盆地北缘补给水体受到了含盐风成沉积的影响。

参考文献:

- [1] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等.元素地球化学[M].北京:科学出版社,1984.
- [2] Garrett D. Borates; Handbook of Deposits, Processing, Properties and Use[M]. California: Academic Press, 1998.
- [3] 郑学家. 硼化合物生产与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [4] 申军. 我国硼资源及硼化学工业综述及其展望[J]. 现代化工, 2013, 33(5): 6-7.
- [5] 唐尧,陈春琳,熊先孝,等. 世界硼资源分布及开发利用现状分析[J]. 现代化工, 2013, 33(10): 1-4.
- [6] 李空. 全球硼矿资源分布与潜力分析研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [7] USGS. Mineral commodity summaries[R]. Virginia State: United States Geological Survey, 2016: 38-39.
- [8] 袁建国,屈云燕,刘秋颖,等. 中国硼矿资源供需趋势分析[J]. 中国矿业, 2018, 27(5): 9-12.
- [9] 宋叔和. 中国矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [10] 赵鸿. 我国硼矿床的类型及工业利用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- [11] 张雪飞. 雅沙图地区居里土硼矿及周围泥火山硼矿化点矿物学与成因研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2014.
- [12] 林勇杰,郑绵平,刘喜方. 青藏高原盐湖硼矿资源[J]. 科技导报, 2017(12): 79-84.
- [13] 魏新俊. 柴达木盆地盐湖钾锂资源概况及开发前景[J]. 青海国土经略, 2002, (s1): 64-69.
- [14] 邵世宁,熊先孝. 中国硼矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 化工矿产地质, 2010, 32(2): 65-74.
- [15] 王莹,熊先孝,孙小虹,等. 中国硼矿成矿地质特征及资源潜力分析[J]. 化工矿产地质, 2014, 36(1): 38-42.
- [16] 张彭熹. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [17] Yang J, Xu Z, Song S, et al. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Palaeozoic ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt, NW China[J]. Sciences de la Terre et Des Planetes, 2001, 333(11): 719-724.
- [18] Stober I, Zhong J, Zhang L, et al. Deep hydrothermal fluid - rock interaction: the thermal springs of Da Qaidam, China[J]. Geofluids, 2016, (16): 711-728.
- [19] 杨谦. 青海省柴达木盆地大、小柴旦盐湖硼矿床地质概况[J]. 青海国土经略, 1983, (3): 40-65.
- [20] 郑绵平. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 科学技术出版社, 1989.
- [21] 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.
- [22] Yin A, Rumelhart P, Butler R, et al. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation[J]. Geological Society of America Bulletin, 2002, 114(10): 1257-1295.
- [23] Gaillardet J, Viers J, Dupré B. Trace elements in river waters[J]. Treatise Geochem, 2003, 5(s1): 195-235.
- [24] Zhu Y, Li Z, Wu B, et al. The Formation of the Qarhan Saline Lakes as Viewed in the Light of Neotectonic Movement[J]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 1990, 3(3): 247-260.
- [25] Yu J, Zhang L, Gao C, et al. Geomorphic and hydroclimatic controls on the formation of evaporite deposits in the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau, China[J]. Ore Geology Reviews, 2012, 50(2013): 171-183.
- [26] 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.
- [27] 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, (6): 68-75.
- [28] 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.
- [29] Meybeck M, Helmer R. The quality of rivers: From pristine stage to global pollution[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1989, 75(4): 283-309.
- [30] Han J, Jiang H, Xu J, et al. Hydraulic connection affects uranium distribution in the Gas Hure salt lake, Qaidam Basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(5): 4881-4895.
- [31] 李家桢. 大柴旦盐湖硼、锂分布规律[J]. 盐湖研究, 1994, 2(1): 18-24.
- [32] Wu C, Wooden J, Yang J, et al. Granitic Magmatism in the North Qaidam Early Paleozoic Ultrahigh - Pressure Metamorphic Belt, Northwest China[J]. International Geology Review, 2006, 48(3): 223-240.
- [33] 邱盛南,李衍霖. 青海某地硼酸盐矿床控制因素的初步探讨[J]. 青海国土经略, 1979, (1): 55-64.
- [34] Vengosh A, Kolodny Y, Starinsky A, et al. Coprecipitation and isotopic fractionation of boron in modern biogenic carbonates[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1991, 55(10): 2901-2910.
- [35] 肖应凯,Shirodkar P V, 刘卫国,等. 青海柴达木盆地盐湖硼同位素地球化学研究[J]. 自然科学进展, 1999, 9(7): 616-618.
- [36] 郑绵平. 中国矿床—温泉喷气硼矿床: 青海雅沙图硼矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [37] 李建森,董华庆,姜有旭,等. 大柴旦温泉沟泉的地球化学成因[J]. 盐湖研究, 2017, 25(02): 55-59.
- [38] Stober I, Bucher K. Origin of salinity of deep groundwater in

- crystalline rocks[J]. Terra. Nova. ,1999,11(4):181–185.
- [39] Seelig U, Bucher K. Halogens in water from the crystalline basement of the Gotthard rail base tunnel (central Alps) [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(9):2581–2595.
- [40] Grew E, Anowitz L. Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry[J]. Mineralogical Society of America, 1996, 33:862.
- [41] Heermance R, Pullen A, Kapp P, *et al.* Climatic and tectonic controls on sedimentation and erosion during the Pliocene – Quaternary in the Qaidam Basin (China) [J]. Geological Society of America Bulletin, 2013, 125(5–6):833–856.
- [42] Rohrmann A, Heermance R, Kapp P, *et al.* Wind as the primary driver of erosion in the Qaidam Basin, China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2013, 374:1–10.
- [43] Qiang M, Lang L, Wang Z. Do fine – grained components of loess indicate westerlies: Insights from observations of dust storm deposits at Lenghu (Qaidam Basin, China) [J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74(10):1232–1239.
- [44] Feng Q, Liu W, Su Y, *et al.* Distribution and evolution of water chemistry in Heihe River basin [J]. Environmental Geology, 2004, 45(7):947–956.
- [45] Zhu G, Su Y, Feng Q. The hydrochemical characteristics and evolution of groundwater and surface water in the Heihe River Basin, northwest China [J]. Hydrogeology Journal, 2008, 16(1):167–182.
- [46] Wu W. Hydrochemistry of inland rivers in the north Tibetan Plateau: Constraints and weathering rate estimation [J]. Science of The Total Environment, 2016, 541:468–482.
- [47] Davis S, Whittemore D, Fabryka – Martin J. Uses of chloride/bromide ratios in studies of potable water [J]. Ground Water, 1998, 36(2):338–50.
- [48] Ma J, Zhang P, Zhu G, *et al.* The composition and distribution of chemicals and isotopes in precipitation in the Shiyang River system, northwestern China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 436–437(2012):92–101.

The Distribution Characteristics of Boron in Water-Surrounding Rocks in Qaidam Basin and Discussion on the Source of Its Enrichment Area

JIANG Pan-wu^{1,2,3}, FAN Qi-shun^{1,2}, QIN Zhan-jie^{1,2}, DU Yong-sheng^{1,2},
ZHANG Xiang-ru^{1,2,3}, LI Qing-kuan^{1,2}, MA Zheng-ming^{1,2,3}

(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: The salt lakes in Qaidam Basin (QB) are important boron-rich and metallogenic area in China. According to the heterogeneity of boron concentrations in different salt lakes in the QB, this paper collected river and spring samples from the northern margin of Qaidam Basin (NQB) and analyzed the contents of boron and lithium, total dissolved solids (TDS) and pH values. Combined with the previously published data of boron and lithium contents in river waters-surrounding rocks from different catchments of QB, the geochemical characteristics of boron and lithium content in the water-rock system of the basin were summarized. Meanwhile, the source of boron-rich fluids in the NQB was also discussed. The results indicate that the boron contents in water and rocks in the Qilian Mountain catchment in NQB are higher than those in the Altyn and Kunlun Mountain catchments. On the contrary, the lithium contents in waters and rocks in the Qilian Mountain catchment are lower than those in the Nalenggele River of the Kunlun Mountain catchment. This comparison takes on a geochemical characteristic of boron-rich and lithium-poor in NQB, implying that boron and lithium resources from different catchments of QB are heterogeneous and asynchronous. The source of boron-rich fluids in NQB is summarized as the weathering and leaching of the surrounding rock (tourmaline-bearing granite) of the Qilian Mountains, recharging from boron-rich deep waters and the saline aeolian deposit leaching input.

Key words: Qaidam Basin; Boron contents; Hot springs; Water-rock interaction; Saline aeolian deposit; Source