

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.04.18

## 柴达木盆地盐湖物质来源识别

陈柳竹<sup>1,2</sup>, 马腾<sup>1,2</sup>, 马杰<sup>1,2</sup>, 杜尧<sup>1,2</sup>, 肖聪<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430074;

2. 生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 柴达木盆地是我国重要的盐矿资源战略基地, 深入认识其物质来源具有重要的科学及社会意义。本研究根据柴达木盆地盐湖、晶间卤水, 以及格尔木河流域地表水、地下水化学组成, 利用多元统计方法, 探讨盆地地区盐湖物质来源。结果显示: 从山前到湖区, 水体溶解性总固体逐渐增大, 微量组分含量也逐渐升高, 二者均表现为晶间卤水 > 盐湖 > 格尔木河流域水体; 阳离子变化趋势为: 补给源头由昆仑山雪融水以  $\text{Ca}^{2+}$  为主过渡到格尔木河流域以  $\text{Na}^+$  为主; 再到盐湖区以  $\text{Mg}^{2+}$  为主; 阴离子则以  $\text{HCO}_3^-$  为主逐步过渡到以  $\text{Cl}^-$  为主; 盐湖水和晶间卤水的化学组成差异显著。因子分析表明, 对于格尔木河流域河水和地下水, 岩石风化淋滤是其化学组分的主要来源。而岩石风化淋滤来源和深部水来源对柴达木盆地不同盐湖区化学组成的贡献率差异很大, 该差异取决于周围岩石的化学组成和深部水的存在及其化学组成, 以及断层是否导通为深部水补给盐湖提供了通道。

**关键词:** 水化学; 物质来源; 因子分析; 柴达木盆地

中图分类号: X141

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2015)04-0101-07

## Identification of material source for the salt lakes in the Qaidam Basin

CHEN Liuzhu<sup>1,2</sup>, MA Teng<sup>1,2</sup>, MA Jie<sup>1,2</sup>, DU Yao<sup>1,2</sup>, XIAO Cong<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** The Qaidam Basin is the important strategic base for salt resources in China. Understanding the material source for the salt lakes is of important scientific and social significance. In this study, the material source for the Qaidam Basin was studied by the multivariate statistical analysis based on chemical constitution of the salt lake water, intergranular brines, surface water and groundwater in the Golmud River. The results showed that both TDS and content of minor elements increase from the Piedmont to the salt lakes. The cation is dominated by  $\text{Ca}^{2+}$  for the meltwater,  $\text{Na}^+$  for the water in the Golmud River and  $\text{Mg}^{2+}$  for the water in salt lake area. The anion is gradually from  $\text{HCO}_3^-$  based to  $\text{Cl}^-$  based. TDS and minor elements contents show a trend that the intergranular brine is greater than the salt lake water, and the salt lake water is greater than the water from the Golmud River. Composition differences between the salt lake water and the intergranular brine are significant. Factor analysis shows that rock leaching is the main material source for the river water in the Golmud River and the groundwater. Contributions of rock leaching and deep water on chemical compositions of different regions varies greatly in the Qaidam Basin. This difference is controlled by chemical composition of the source rocks, existence of deep water and its compositions, and whether the fault may provide access to deep water recharge.

**Keywords:** hydrochemistry; material source; factor analysis; Qaidam Basin

收稿日期: 2014-07-24; 修订日期: 2014-10-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA062602); 国家自然科学基金(41372252); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07204-003-04)

第一作者: 陈柳竹(1990-)女, 博士研究生, 主要从事水-岩相互作用、环境同位素方面的研究。E-mail: liuzhuchen90@163.com

通讯作者: 马腾(1972-)男, 博士, 教授, 主要从事水文地球化学、同位素水文学方面的研究。E-mail: mateng@cug.edu.cn

柴达木盆地是中国三大内陆盆地之一,盆地内盐湖数量多,钠、钾、镁、锂等盐类资源丰富,储量均居全国首位,是我国主要的盐化工基地。深入认识盆地区盐湖的物质来源,对了解盐湖的形成演化、成盐规律和资源的开发利用具有重要意义。柴达木盆地盐湖的物质来源一直颇受争议,学者们通过构造地质、地球化学等证据对柴达木盆地盐湖的物质来源提出各自的观点<sup>[1-5]</sup>,如李润民<sup>[1]</sup>认为新近纪、古近纪盐类沉积、油田水、盐渍土和地下卤水为主要补给源;段振豪等<sup>[3]</sup>综合水化学、构造等资料得出其三个来源:通过河流补给的地表化学风化淋滤物质,通过断层补给的油田水和柴达木古湖的遗留物质,而否定了海水来源和新近纪、古近纪含盐系风化来源;李文鹏等<sup>[4]</sup>通过元素比值与水量分析认为盐分是四周长期风化淋滤及地下水、地表水不断搬运、溶解、析出演化过程的结果,不可能来源于深层卤水或油田水。但是,目前对柴达木盆地盐湖物质来源还缺乏统一的认识。

盆地区水体是盐类组分的主要载体,研究其水化学特征对于认识盆地区的物质来源具有直接的指示意义。多元统计方法克服了传统水文地球化学分析中揭示水化学信息的片面性,能够对反映水化学特征的组分进行综合分析,提取影响水化学场形成的主要因素,识别水体中化学组分的来源<sup>[6-7]</sup>。

本研究以柴达木盆地区为研究区,采集盐湖、晶间卤水以及格尔木河流域地表水、地下水,在分析其主要元素和微量元素组成的基础上,利用因子分析探讨水体化学特征,为进一步揭示盆地区盐湖物质来源提供新认识。

## 1 研究区概况

柴达木盆地位于我国青藏高原北部,气候干燥寒冷,雨少风多,为典型的大陆性气候。年均温度为 $1.3^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量仅 $10\sim 20\text{mm}$ ,年均蒸发量高达 $3\ 000\text{mm}$ 。盆地四周高山环抱,西北有阿尔金山,东北有祁连山,南为昆仑山,东为鄂拉山。宏观上盆地为不规则菱形的大型山间盆地,在这个广大的盆地内,分布着许多盐湖和干盐滩,具有“高山深盆”的成盐特点。盆地内断裂构造十分发育,主要呈NWW—SEE向展布(图1),控制着盆地的形成与演化<sup>[8]</sup>。盆地内地层出露较全,从中太古界至新生界均有出露,盆地周边山区以前第四纪地层为主,盆地内主要被新生界地层所覆盖。岩浆岩在山区广泛分布,且从酸性至超基性岩都有出露,受区域构造控制,沿断裂呈带状分布。

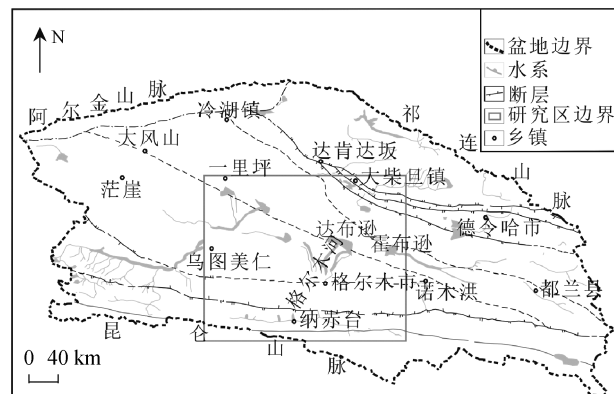


图1 柴达木盆地构造简图

Fig.1 Simplified geological structure map of the Qaidam Basin

柴达木盆地周边山区降水随海拔的增加而增大,而蒸发量则随海拔的下降而递增。围绕盆地的昆仑山与祁连山常年积雪,夏季融化的雪水成为盆地内地表地下径流的主要补给来源。盆地中分布着大小湖泊,它们是盆地内排泄的集中点,湖区强烈的蒸发是水体排泄的重要方式。其中达布逊湖是目前盆地尚存的最大盐点,它处于盆地第四纪沉积中心,也是当前盆地内最低洼的汇水中心,而格尔木河流域地表水和地下水则是该汇水中心的最大补给来源。

## 2 样品采集与测试

以达布逊湖为中心,于2013年8月在柴达木盆地区沿地表水地下水流向从山前到盐湖区采集格尔木河流域浅层地下水样品3个(KL-02、GG-01、GG-02)、地表水样品5个(KL-01、KL-03、GS-01、GS-02、GS-03),并采集晶间卤水样品4个(DT-01、DBXJ-01、CEHJ-01、CEHJ-02),盐湖样品4个(CD-01、DT-02、XT-01、DBX-01)。采样点分布见图2。

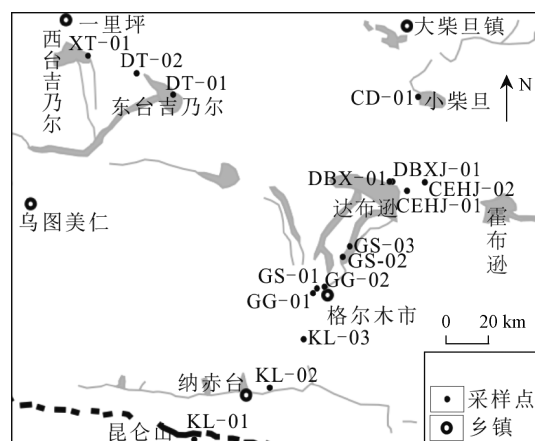


图2 采样点分布图

Fig.2 Location of the samples

采样前样品瓶用水样润洗3次,先采集2瓶50 mL水样,用0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤,其中一瓶加入优级纯  $\text{HNO}_3$  至  $\text{pH} < 2$ ,用于阳离子分析,另一瓶用于阴离子分析;然后采集500 mL水样于24 h内对碱度进行滴定。常规阴阳离子测试在中国地质大学(武汉)环境学院实验中心完成,其中阳离子采用 IR-IS

Intrepid II XSP型 ICP-AES测定,阴离子采用瑞士万通公司761 Compact IC进行测定,而盐湖水和晶间卤水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  则采用滴定法进行测定。微量组分(Br、I、B、Sr、Li、Rb、Cs)在中国地质科学院国家地质实验中心完成。测试结果见表1、表2。

表1 各种水体主量元素组成

Table 1 Major elements compositions of different kinds of water

样品类型	样品编号	TDS /( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{CO}_3^{2-}$
			/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )							
盐湖水	CD-01	73.08	356.70	1929.00	20540.00	491.20	1281.00	7047.00	41122.00	306.20
	DT-02	2.70	62.52	93.34	657.10	42.06	106.80	130.60	1542.00	61.24
	XT-01	9.99	129.90	283.40	5870.00	121.00	100.70	1204.00	5920.00	90.03
	DBX-01	284.50	641.30	64265.10	19400.00	4698.00	1220.00	23534.00	170758.00	0.00
晶间卤水	DT-01	356.91	160.30	27004.00	64900.00	13936.00	3039.00	99854.00	180440.00	0.00
	DBXJ-01	330.87	1303.00	36033.60	58140.00	2773.00	732.20	6244.00	254708.00	0.00
	CEHJ-01	461.37	14629.20	79517.10	8044.00	7174.00	884.80	1052.00	350069.00	0.00
	CEHJ-02	646.36	96192.00	71970.00	1633.00	1043.00	1068.00	491.30	473967.00	0.00
地下水	KL-02	0.52	50.01	27.24	48.43	3.69	238.90	64.40	86.01	0.00
	GG-01	0.55	33.57	29.90	66.85	3.68	231.10	81.91	105.50	0.00
	GG-02	0.52	32.68	30.21	62.95	4.03	203.00	80.66	108.90	0.00
地表水	KL-01	0.30	20.89	21.61	26.11	1.53	129.60	40.49	46.20	15.31
	KL-03	0.45	36.51	25.49	48.89	3.40	171.70	69.92	82.59	15.31
	GS-01	0.52	35.37	29.44	65.57	4.13	184.20	84.66	110.40	7.66
	GS-02	1.68	67.19	100.90	315.80	16.12	302.90	302.50	518.00	61.24
	GS-03	4.06	13.06	90.06	1240.00	42.23	343.50	877.00	1414.00	275.60

表2 各种水体微量元素组成

Table 2 Minor elements compositions of different kinds of water

样品类型	样品编号	/( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )						
		$\text{Br}^-$	$\text{I}^-$	$\text{B}^{3+}$	$\text{Sr}^{2+}$	$\text{Li}^+$	$\text{Rb}^+$	$\text{Cs}^+$
盐湖水	CD-01	23990.58	103.58	225027.80	6553.02	8414.57	80.35	1.200
	DT-02	306.24	15.21	4247.59	2375.36	1521.53	61.89	6.035
	XT-01	3981.59	7.19	16451.88	6123.12	5764.32	147.53	6.279
	DBX-01	21255.02	63.42	175151.16	57812.17	140345.66	1185.25	21.523
晶间卤水	DT-01	58824.66	191.13	1249497.05	647.93	875038.34	16772.54	542.346
	DBXJ-01	27081.30	72.73	141026.79	49606.52	100956.65	991.07	12.408
	CEHJ-01	40923.31	883.06	175660.34	380195.51	51574.24	1800.56	14.166
	CEHJ-02	162621.83	2957.59	274050.72	1609824.43	75122.91	99.53	5.008
地下水	KL-02	62.15	5.59	514.92	843.17	122.71	2.20	0.181
	GG-01	47.62	5.39	901.81	819.61	40.79	1.10	0.013
	GG-02	39.99	5.25	804.10	807.08	39.46	1.10	0.010
地表水	KL-01	24.77	2.32	157.65	332.62	20.41	0.63	0.025
	KL-03	85.97	5.91	1187.85	1124.81	189.31	4.57	0.103
	GS-01	66.18	5.81	813.26	946.36	190.27	4.47	0.133
	GS-02	137.12	23.62	3154.05	2601.53	188.64	4.74	0.056
	GS-03	231.41	107.74	9021.30	1850.33	356.78	7.11	0.085

### 3 水化学特征

从山前到湖区,水体溶解性总固体逐渐增大,格尔木河流域地表水和地下水溶解性总固体显著低于盐湖水和晶间卤水,而盐湖水溶解性总固体均普遍低于晶

间卤水。Piper图(图3)显示,从山前到湖区,水化学分区明显,体现了从补给区到排泄区的演化特征(图中箭头所示方向),由昆仑山雪融水(KL-01)阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$  为主过渡到格尔木河流域以  $\text{Na}^+$  为主,再到盐湖区以  $\text{Mg}^{2+}$  为主,而阴离子则从  $\text{HCO}_3^-$  为主逐步过渡到

以  $\text{Cl}^-$  为主。此外,盐湖水与晶间卤水的化学组成差异显著。对格尔木河流域水体来说,沿着流向溶解性总固体逐渐增大,一方面是因为水体中溶解组分逐渐增多,另一方面则是水体强烈蒸发浓缩作用的结果。而盆地不同区域盐湖水和晶间卤水的化学组成差异显著,这可能是不同地区盐湖的物质来源与演化阶段不同造成的。

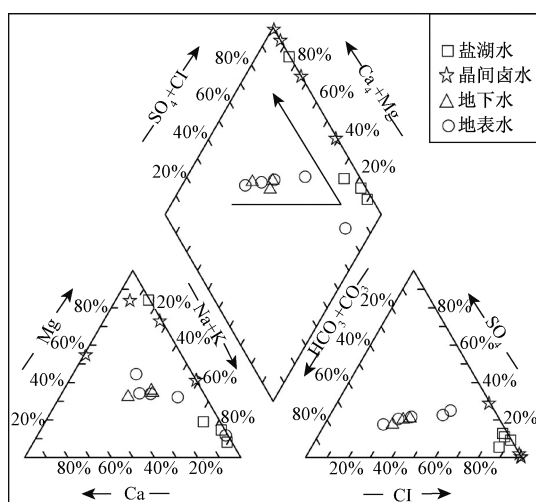


图3 不同水体水化学组成的 Piper 三线图解  
Fig.3 Piper Diagram for different kinds of waters

微量元素  $\text{Br}^-$ 、 $\text{I}^-$ 、 $\text{B}^{3+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Rb}^+$ 、 $\text{Cs}^+$  在柴达木盆地盐湖中储量很大(表2)不同水体中微量元素含量有如下特征:①总体上,从山前到湖区,沿着河流流向,水体中的微量元素含量逐渐增加;格尔木河流域地表水与地下水中微量元素含量显著低于盐湖水和晶间卤水;晶间卤水中的微量元素普遍比盐湖水更为富集。②不同微量组分含量在不同区域盐湖中差异显著。

其中, $\text{B}^{3+}$  和  $\text{Br}^-$  在小柴旦湖大量富集, $\text{B}^{3+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{Li}^+$  则在西台吉乃尔湖中大量富集,在达布逊湖中  $\text{Br}^-$ 、 $\text{I}^-$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  含量较高。③不同微量组分含量在不同区域晶间卤水中差异显著。如东台吉乃尔地区晶间卤水(DT-01)  $\text{Sr}^{2+}$  最低(647.93  $\mu\text{g/L}$ ),但碱金属离子  $\text{Li}^+$ 、 $\text{Rb}^+$ 、 $\text{Cs}^+$  含量最高(875 038.34  $\mu\text{g/L}$ 、16 772.54  $\mu\text{g/L}$ 、542.346  $\mu\text{g/L}$ );而在达布逊地区的晶间卤水(CEHJ-01、CEHJ-02)中, $\text{Li}^+$ 、 $\text{Rb}^+$ 、 $\text{Cs}^+$  含量较低,但  $\text{Br}^-$ 、 $\text{I}^-$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  含量却很高。

#### 4 因子分析

在 IBM SPSS Statistics 19 中,用主成分法确定因子载荷,提取 2 个公共因子,即  $F_1$ 、 $F_2$ ,其累计贡献率达到 84.389%,认为能够很好地反映原始数据的基本信息。为了更好地解释因子的实际含义,对因子用方差最大旋转法进行旋转,得到旋转后的因子载荷矩阵(表3)。

根据物质来源性质及补给方式,可将柴达木盆地可能的物质来源归纳为两种:一种是岩石风化淋滤来源,另一种是源于深部通过断裂补给的深部水(油田卤水、埋藏水)来源。

公因子  $F_1$  贡献率为 52.535%,其中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{B}^{3+}$ 、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Rb}^+$ 、 $\text{Cs}^+$  离子的荷载较大(0.822~0.983),且与  $F_1$  均呈正相关关系。推测公因子  $F_1$  表征岩石的风化淋滤作用补给。这是因为  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Rb}^+$ 、 $\text{Cs}^+$  为碱金属,化学性质很活泼, $\text{B}^{3+}$  属于类金属,化学性质与碱金属类似。在自然界中碱金属在岩石矿物中广泛存在,在漫长的地质历史时期岩石中这些易于溶解、迁出的元素,随地表水和地下水径流搬运到湖盆,成为湖盆最原始的物质来源。

表3 旋转后因子载荷矩阵

Table 3 Matrix of rotated factor loadings

指标	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{Br}^-$	$\text{I}^-$	$\text{B}^{3+}$	$\text{Sr}^{2+}$	$\text{Li}^+$	$\text{Rb}^+$	$\text{Cs}^+$	特征值	方差初 始贡献 率/%	方差累 积贡献 率/%
$F_1$	-0.095	0.238	0.822	0.913	0.928	0.985	0.272	-0.075	0.271	-0.034	0.973	-0.091	0.983	0.979	0.970	7.384	49.227	—
$F_2$	0.970	0.746	0.008	0.147	0.288	-0.032	0.872	-0.130	0.953	0.988	0.199	0.983	0.058	-0.008	-0.027	5.274	35.162	84.389

在柴达木盆地,花岗岩类的分布面积约占其外围山系总面积的 2/3 左右,其钾的平均含量为 3.55%,为地壳克拉克值的 1.7 倍,钠钾的平均比值为地壳克拉克值的 2 倍(表4)。由此可见,其外围山系是一个富钾钠的地球化学背景,对柴达木盆地钾的富集和钾盐沉积的形成起着重要的作用。此外,周边山系主要是由前古生界和古生界的变质岩和不同时期的花岗岩

组成,在这些岩石中含有相当高的硼<sup>[10]</sup>,最高含量可达 1 400  $\mu\text{g/g}$ <sup>[11]</sup>,这些山系应该是该区硼元素的主要来源。综合看来,因子  $F_1$  代表的应该是岩石风化淋滤作用补给。柴达木盆地盐湖大量接受周边水系的补给,水系中含有大量的陆源风化产物,长时间风化产物的积累及强烈的蒸发浓缩作用,使得盐分在柴达木盆地盐湖中广泛富集。

公因子  $F_2$  贡献率为 32.226%, 其中  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Br^-$ 、 $I^-$ 、 $Cl^-$  离子载荷较大 (0.746 ~ 0.988)。且均与  $F_2$  呈正相关关系。推测公因子  $F_2$  主要表征深部水补给来源。这是因为柴达木盆地具有为盐湖提供深部水补给的物质基础。该盆地油田水分布面积很大, 几乎覆盖整个盆地, 且研究显示该油田水具有  $CaCl_2$  型卤水特征<sup>[12]</sup>, 在达布逊盐湖区北缘亦发现  $CaCl_2$  型卤泉<sup>[3]</sup> (表 5), 这均为盆地区盐湖中  $Ca^{2+}$ 、 $Cl^-$  提供了充足的物质来源。此外,  $Br^-$  和  $I^-$  主要以分散状态存在于地质体中, 不形成矿物堆积, 并主要在海水和油田卤水中富集, 其在水中的含量分别为 67.3 mg/L 和

0.06 mg/L<sup>[13]</sup>。本次样品中盐湖水和晶间卤水中  $Br^-$  平均含量为 42.37 mg/L, 最高含量高达 162.62 mg/L,  $I^-$  平均含量为 0.54 mg/L, 最高含量为 2.96 mg/L, 这暗示了陆源风化产物不可能是盐湖区  $Br^-$  和  $I^-$  的唯一来源, 该区广泛存在的油田卤水才是盐湖区  $Br^-$  和  $I^-$  的主要来源。Sr 是典型的分散元素, 在自然界中主要以类质同象的形式分布在造岩矿物中, 而古卤水的 Sr 含量明显高于现代盐湖, 因此该区的深部卤水也是  $Sr^{2+}$  的重要载体。同时, 区域内断层发育, 亦为深部水补给盐湖提供了良好的通道。综上, 因子  $F_2$  代表了深部水补给来源。

表 4 青海省东昆仑-柴达木盆地北缘区岩石化学组成<sup>[9]</sup>

Table 4 Chemical compositions of rocks from eastern Kunlun-Northern Qaidam basin in Qinghai Province

岩带	样品数/ 个	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
		/%										
南祁连	127	64.48	0.57	14.96	1.00	3.69	0.08	3.21	4.01	3.09	3.16	0.14
柴北缘	179	67.02	0.40	14.71	1.27	2.67	0.11	1.91	3.49	3.53	3.19	0.12
东昆仑	458	69.61	0.37	13.55	0.90	2.53	0.06	1.31	2.39	3.34	4.07	0.10
可可西里-阿尼玛卿	29	62.60	0.47	16.24	1.28	3.62	0.10	2.70	4.65	3.83	1.88	0.13
宗务隆山-青海南山	174	71.36	0.28	13.98	1.13	1.55	0.06	1.04	1.51	3.80	3.71	0.12

表 5 柴达木盆地油田水及卤泉化学组成

Table 5 Chemical compositions of the oilfield water and the saline spring in the Qaidam basin

样品类型	TDS	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Br <sup>-</sup>	Li <sup>+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	B <sup>3+</sup>
	/(g · L <sup>-1</sup> )						/(mg · L <sup>-1</sup> )				
南翼山油田水 <sup>[14]</sup>	409.63	44.84	5.05	44.84	35.75	237.73	0.16	281	983	4450	3332
东陵湖泉水 <sup>[3]</sup>	528.10	52.68	97.61	1.61	0.58	373.80	0.87	70	46	1090	220

表 6 表示的是各样品在两个公共因子上的得分。因子得分反映了两种来源对各样品中化学组分的贡献, 得分越高, 则表明该公共因子所代表的来源样品化学组分的贡献越大。

表 6 样品因子得分

Table 6 Factor scores of samples

样品类型	样品编号	F <sub>1</sub> 得分	F <sub>2</sub> 得分
盐湖水	CD-01	0.19144	-0.04064
	DT-02	-0.41076	-0.43432
	XT-01	-0.34678	-0.40194
	DBX-01	0.32517	0.07089
晶间卤水	DT-01	3.60330	-0.15104
	DBXJ-01	0.25312	0.03412
	CEHJ-01	0.04385	0.91479
	CEHJ-02	-0.37296	3.49622
地下水	KL-02	-0.43591	-0.46923
	GG-01	-0.43713	-0.46991
	GG-02	-0.44206	-0.47169
地表水	KL-01	-0.44718	-0.46763
	KL-03	-0.43894	-0.46329
	GS-01	-0.44084	-0.46766
	GS-02	-0.38816	-0.41981
	GS-03	-0.25616	-0.25887

相对盐湖水和晶间卤水来说, 格尔木河流域的地下水和地表水在各因子上的得分都相对较低, 这说明  $F_1$  代表的岩石风化淋滤来源和  $F_2$  代表的深部水来源对这两种水体化学组分的贡献率都相对较低, 这也与这两种水体较低的 TDS 相一致。其中由于采集的地下水都位于冲洪积扇前部, 跨越范围较小, 沿地下水流向并没有明显的变化。而地表水样品涵盖了补给区雪融水至排泄区的溶解性总固体相对较高的水样, 能够反映从补给到排泄过程中河水化学组成的变化。沿河水流向, 因子  $F_1$  的得分逐渐增高, 因子  $F_2$  的得分也逐渐增高, 但变化幅度小于  $F_1$ 。这说明沿河水流向, 岩石风化淋滤补给和深部水补给对河水化学组成的贡献率均逐渐增大, 而周围岩石风化淋滤补给的贡献率大于深部水补给。因子  $F_1$  的得分逐渐增高, 一方面是因为河水中溶解的来自周围岩石淋滤作用的化学组分增多, 另一方面则是由于区内蒸发强烈, 水中离子不断浓缩。同时, 越靠近排泄区 (达布逊盐湖), 河水溶解盐壳中的盐分越多, 而这些盐分相当一部分是来源于深部水的, 所以因子  $F_2$  的得分也逐渐增加。

盐湖水和晶间卤水在因子  $F_1$  和因子  $F_2$  上的得分差异很大。这暗示了岩石风化淋滤来源和深部水来源对柴达木盆地不同区域盐湖化学组成的贡献率差异很大。岩石风化淋滤来源对盐湖区的贡献率取决于周围岩石的化学组成。而深部水对盐湖的贡献取决于两个条件:第一,深部水的存在及其化学组成;第二,断层是否为深部水对盐湖补给提供通道。相对来说,在因子  $F_2$  上得分比较高的盐湖,都处于断裂破碎带,盆地区广泛发育的深部卤水也为盐湖的补给提供了物质来源。综合来看,深部水对盐湖水和晶间卤水的贡献率为:达布逊湖东部 > 达布逊湖地区 > 小柴旦地区 > 西台吉乃尔湖区 > 东台吉乃尔湖区。由于深部水补给受其化学组成及构造控制,导致区域差异性很大,即使在达布逊湖东部或东台吉乃尔区域,很小范围内也会造成显著差异。而岩石风化淋滤补给作为柴达木盆地区盐湖普遍的物质来源,对达布逊湖贡献率最大,其次为东台吉乃尔湖区、达布逊湖东部、小柴旦湖区、西台吉乃尔湖区。

## 5 结论

(1) 从山前到湖区,水体 TDS 逐渐增大,表现为晶间卤水 > 盐湖水 > 格尔木河流域地表水和地下水。阳离子从补给源头昆仑山雪融水以  $Ca^{2+}$  为主过渡到格尔木河流域以  $Na^+$  为主,再到盐湖区以  $Mg^{2+}$  为主;而阴离子则从  $HCO_3^-$  为主逐步过渡到以  $Cl^-$  为主。

(2) 从山前到湖区,沿着河水流向,水体中的微量元素含量逐渐增加;格尔木河流域地表水、地下水中微量元素含量显著低于盐湖水和晶间卤水;晶间卤水中的微量元素普遍比盐湖水更为富集。不同微量组分含量在不同区域盐湖水和晶间卤水中的分布特征差异显著。

(3) 因子分析表明,离子  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $HCO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $B^+$ 、 $Li^+$ 、 $Rb^+$ 、 $Cs^+$  代表了盆地区岩石风化淋滤补给来源,离子  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Br^-$ 、 $I^-$ 、 $Cl^-$  代表了盆地区深部水补给来源。因子得分显示,格尔木河流域地表水和地下水中化学组分主要来源于岩石风化淋滤作用;而岩石风化淋滤来源和深部水来源对柴达木盆地区盐湖水和晶间卤水化学组成的贡献率差异很大,该差异取决于周围岩石的化学组成以及深部水的存在及其化学组成,以及断层是否导通为深部水补给盐湖形成通道。

## 参考文献:

[1] 李润民. 柴达木盆地察尔汗钾镁盐成矿地质条件

- [J]. 地质论评, 1983, 29(3): 262 - 267. [LI R M. The geological conditions for the formation of the Qarhan K-Mg saline deposit in the Qaidam Basin[J]. Geological Review, 1983, 29(3): 262 - 267. (in Chinese)]
- [2] 朱允铸, 李争艳, 吴必豪, 等. 从新构造运动看察尔汗盐湖的形成[J]. 地质学报, 1990, 64(1): 13 - 21. [ZHU Y Z, LI Z Y, WU B H, et al. The formation of the Qarhan saline lakes as viewed from the Neotectonic movement [J]. Acta Geologica Sinica, 1990, 64(1): 13 - 21. (in Chinese)]
- [3] 段振豪, 袁见齐. 察尔汗盐湖物质来源的研究[J]. 现代地质, 1988, 2(4): 420 - 428. [DUAN Z H, YUAN J Q. The origin of saline materials of Qarhan salt lake in Qaidam Basin, China [J]. Geoscience, 1988, 2(4): 420 - 428. (in Chinese)]
- [4] 李文鹏, 何庆成. 察尔汗盐湖物质来源的讨论[J]. 河北地质学院学报, 1993, 16(3): 254 - 263. [LI W P, HE Q C. Discussion on the origin of the materials in Qarhan salt lake[J]. Journal of Hebei College of Geology, 1993, 16(3): 254 - 263. (in Chinese)]
- [5] 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 D P, YU J Q, GAO C L, et al. Hydrogeochemical conditions and lithium brine formation in the four salt lakes of Qaidam Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(5): 783 - 792. (in Chinese)]
- [6] Matiatos I, Alexopoulos A, Godelitsas A. Multivariate statistical analysis of the hydrogeochemical and isotopic composition of the groundwater resources in northeastern Peloponnesus (Greece) [J]. Science of the Total Environment, 2014, 476: 577 - 590.
- [7] 徐芬, 马腾, 石柳, 等. 内蒙古河套平原高碘地下水的水文地球化学特征[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 8 - 15. [XU F, MA T, SHI L, et al. Hydrogeochemical characteristics of high iodine groundwater in the Hetao Plain, Inner Mongolia [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 8 - 15. (in Chinese)]
- [8] 朱永铸. 柴达木盆地新构造运动及盐湖发展演化[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 57 - 72. [ZHU Y Z. Neotectonic movement and salt lake evolution in Qaidam Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 57 - 72. (in Chinese)]
- [9] 张以弗. 1:50万青海省东昆仑-柴达木盆地北缘

- 区域地质图及金、银、铜、铅、锌矿产图说明书[R]. 1997. [ZHANG Y F. 1:500000 geological map of eastern Kunlun-northern Qaidam basin regional for Qinghai province and mineral map instructions for gold, silver, copper and zinc [R]. 1997. (in Chinese)]
- [10] 吴俐俐, 马文展, 唐渊. 青藏高原高硼卤水的水化学特征及其成因[J]. 地理研究, 1984, 3(4): 1 - 11. [WU L L, MA W Z, TANG Y. On the water-chemical properties and formative conditions of high-boron brine in Qinghai-Xizang plateau [J]. Geographical Research, 1984, 3(4): 1 - 11. (in Chinese)]
- [11] 孙大鹏. 柴达木盆地小柴旦湖硼酸盐的形成[J]. 矿物岩石, 1991, 11(4): 57 - 65. [SUN D P. Origin of borates in Xiao-Chaidan lake, Chaidam basin, China[J]. Mineralogy and Petrology, 1991, 11(4): 57 - 65. (in Chinese)]
- [12] 樊启顺, 马海州, 谭红兵, 等. 柴达木盆地西部油田卤水的硫同位素地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(2): 137 - 142. [FAN Q S, MA H Z, TAN H B, *et al.* Geochemistry Characteristics of Sulfur Isotope in Oilfield Brine of the Western Qaidam Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(2): 137 - 142. (in Chinese)]
- [13] 牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京市: 北京大学出版社, 1999: 218 - 221. [MOU B L. Geochemistry of Elements[M]. Beijing: Peking University Press, 1999: 218 - 221. (in Chinese)]
- [14] 李廷伟. 柴达木盆地西部油田卤水形成演化的水化学和锶同位素研究[D]. 西宁: 中国科学院研究生院(青海盐湖研究所), 2007. [LI T W. The origin analysis by hydro-chemical characters and Sr isotope of oil field brine in west of Qaidam Basin[D]. Xining: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Qinghai Institute of Salt Lakes), 2007. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华

(上接第84页)

- [9] 李国平, 谢正元, 沈殷, 等. 预应力锚具锚下病害原因分析及建议[J]. 预应力技术, 2011(2): 24 - 35. [LI G P, XIE Z Y, SHEN Y, *et al.* Analysis and recommendation of the disease under the prestressed anchorage device [J]. Prestress Technology, 2011(2): 24 - 35. (in Chinese)]
- [10] 陶浩, 段红杰, 刘建秀. 预应力锚具的强度性能破坏研究[J]. 机械设计, 2003, 20(8): 13 - 15. [TAO H, DUAN H J, LIU J X. Study on strength performance and destruction of prestressed anchor [J]. Journal of Machine Design, 2003, 20(8): 13 - 15. (in Chinese)]
- [11] 孙玉宁, 王永龙, 马宝安. 新型锚索锚具的研究[J]. 煤矿机械, 2008, 29(2): 125 - 127. [SUN Y N, WANG Y L, MA B A. Research on New Anchor Cable Anchorage [J]. Coal Mine Machinery, 2008, 29(2): 125 - 127. (in Chinese)]
- [12] 周慧英, 马宝安. 一种新型球面锚具[J]. 煤矿安全, 2007(9): 40 - 42. [ZHOU H Y, MA B A. A new-type wedge of spherical anchor [J]. Safety in Coal Mines, 2007(9): 40 - 42. (in Chinese)]
- [13] Gamboa E, Atrens A. Environmental influence on the stress corrosion cracking of rock bolts [J]. Engineering Failure Analysis, 2003(10): 521 - 558.
- [14] 罗强, 李亮. 应用于滑坡的拉力型锚索失效机理[J]. 山地学报, 2011, 29(3): 348 - 355. [LUO Q, LI L. Investigation into failure mechanism of prestressed anchor cables tension in controlling landslide [J]. Journal of Mountain science, 2011, 29(3): 348 - 355. (in Chinese)]
- [15] 安继儒, 刘耀恒. 新编中外金属材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. [AN J R, LIU Y H. A new Sino-foreign metals handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞