

文章编号: 0258-7106(2014)05-1003-08

西藏北羌塘盆地友谊泉水化学特征及成盐指示*

牛新生, 刘喜方, 陈文西

(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 羌塘盆地是侏罗系海相找钾工作的目标区域。对该盆地泉水的水化学进行研究可对其找钾前景做出有效评价。羌塘盆地友谊泉地区发育有一系列地表泉水, 在野外采集了11个泉眼的水体样品, 在室内对这些水样进行了化学成分、氢和氧及锶同位素测定。泉水的 Cl^- 含量分别与 Na^+ 、矿化度呈正相关关系, 钠氯系数接近于1, 溴氯系数较低, 显示出泉水具有溶滤特征; 钾盐系数和钾氯系数较大, 指示出较为明显的含钾异常。泉水的氢、氧同位素数据点落在全球大气降水线和区域降水线附近, 表明泉水受大气降水所补给; 锶同位素数据指示泉水中的矿物质可能来源于夏里组 and/或索瓦组。此外, 古地理、古气候资料显示, 羌塘盆地在侏罗纪期间长期处于干旱气候条件, 并于夏里期在北羌塘出现了一个相对封闭的潮坪-泻湖环境。这些证据表明, 羌塘盆地内的侏罗系具备较为有利的成盐成钾条件, 而夏里组的条件相对较好。

关键词 地球化学; 羌塘盆地; 水化学; 稳定同位素; 侏罗系; 西藏

中图分类号: P619.211

文献标志码: A

Hydrochemical characteristics and evaporate-generating indicators of Youyiquan area in North Qiangtang Basin, Tibet

NIU XinSheng, LIU XiFang and CHEN WenXi

(MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The Qiangtang Basin is an objective area for exploration of Jurassic marine potash deposits. The potash-prospecting perspective can be estimated effectively according to research on hydrochemistry of springs in the basin. There is a series of springs in the Youyiquan area in North Qiangtang Basin. In this study water of 11 springs was sampled, and chemical components, δD and $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ were measured in laboratory. Content of Cl^- has positive correlation with content of Na^+ and mineralization. Also, $n(\text{Na}^+)/n(\text{Cl}^-)$ is close to 1 and $\text{Br}^- \cdot 10^3/\text{Cl}^-$ is lower than 1. All of these data indicate that spring water is from leaching water in the strata. Hydrogen and oxygen isotopic data of spring water fall near lines of the global atmospheric precipitation and regional precipitation, which indicates that spring water is supplied by atmospheric precipitation. Strontium isotopic data of spring water suggest further that mineral components of water may come from Xiali Formation and/or Suowa Formation. Moreover, paleogeographic and paleoclimatic data imply that the Qiangtang Basin was under arid climatic conditions in Jurassic and a relatively closed lagoon existed in North Qiangtang Basin during the Xiali Stage. These data indicate that Jurassic strata of the Qiangtang Basin have favorable conditions for the for-

* 本文得到国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(编号: 2011CB403003)和中国地质调查项目(编号: 1212011220791)的联合资助
第一作者简介 牛新生, 男, 1980年生, 博士, 助理研究员, 主要从事碳酸盐岩沉积学及找矿研究工作。Email: xsh-niu@foxmail.com
收稿日期 2014-06-21; 改回日期 2014-08-18。许德焕编辑。

mation of evaporite and Xiali Formation seems to be the most favorable strata for evaporite formation.

Key words: geochemistry, Qiangtang Basin, hydrochemistry, stable isotope, Jurassic, Tibet

全球钾盐资源量统计表明,中国钾盐资源储量仅占世界钾盐储量的 2.21% (U. S. Geological Survey, 2013),钾盐资源的短缺严重制约了中国农业的可持续发展,解决问题的根本办法就是寻找到更多的钾盐资源。

迄今,中国的钾盐资源主要分布在青海的察尔汗盐湖和新疆的罗布泊,占中国钾盐资源储量的 90% 以上,均为陆相液态矿床。相对于陆相钾盐矿床,古代海相钾盐矿床通常规模较大,如著名的俄罗斯涅帕寒武纪钾盐矿床、加拿大萨斯喀彻温泥盆纪钾盐矿床和欧洲蔡希斯坦盆地二叠纪钾盐矿床,等等(袁见齐, 1982; 钱自强等, 1994)。中国海相盆地众多,在海相盆地中开展找钾工作势在必行,羌塘盆地是新一轮海相钾盐找矿工作的重要目标区域(郑绵平等, 2010)。

水化学找钾是钾盐找矿的主要方法之一,因其简单实用而得到了广泛的应用(袁见齐, 1963; 1975; 支霞臣, 1981; 于升松, 1994; 林耀庭, 1995; 黄思静等, 1997; 马万栋, 2006; 伯英等, 2013; 张玉淑等, 2013)。由于钾盐矿物易溶于水,地下水流经钾盐矿体时溶解了相应的钾盐矿物,最终出露于地表,因此,通过研究泉水的化学成分,可获得地下钾盐矿体的相关信息。北羌塘盆地位于藏北高原,大部分地区为无人区,地质工作程度相对较低,特别是钻探资料较少。解读泉水的地球化学信息可以用较低的成本认识盆地深部的地质情况,进而推断矿物质的来源层位,为钾盐找矿工作提供支持。

本文对北羌塘盆地友谊泉地表泉水进行了水化学成分分析及氢、氧和锶同位素测试,结合相关的岩相古地理、古气候等资料,以探讨羌塘盆地的找钾前景。

1 地质背景

羌塘盆地位于青藏高原中北部,南北宽约 300 km,东西长约 640 km,夹持于可可西里-金沙江缝合带与班公湖-怒江缝合带之间(王成善等, 2004; 王剑等, 2009),EW 向延伸的中央隆起带将该盆地分为 2 个次级盆地,即北羌塘盆地和南羌塘盆地(图 1)。

羌塘盆地内发育有泥盆纪以来完整的沉积序

列,其中,侏罗系发育最全、分布面积最广,是中国陆上侏罗系面积最大的海相沉积盆地(赵政璋等, 2000; 王成善等, 2001)。同时,该盆地内的侏罗系也是该区域内最主要的成盐层系,向西可与乌兹别克斯坦的侏罗系成盐层系相对比(郑绵平等, 2010),是羌塘盆地海相找钾的主要目标层位。

区内的侏罗系自下而上依次为那底岗日组、雀莫错组、布曲组、夏里组和索瓦组。那底岗日组为一套酸性火山岩及凝灰岩,见灰绿色流纹状火山角砾岩、玻基流纹岩、灰紫色凝灰岩;雀莫错组自下而上可分为 3 段,下部为一套紫红色中厚层块状复成分砾岩、含砾岩屑砂岩、岩屑砂岩,中部为灰色薄层-中厚层状泥晶灰岩、砂屑灰岩,上部为紫红色薄-中层状泥岩、钙质粉砂岩、长石岩屑砂岩,顶部见多层石膏;布曲组为灰色中厚层状泥晶灰岩、生物灰岩夹少量砂岩、泥岩;夏里组也可分为 3 段,下部为一套杂色薄-中层状钙质泥岩、页岩、白云岩及石膏,中部为中厚层鲕粒灰岩夹介屑灰岩、砾屑灰岩、白云岩,向上为泥灰岩和砂岩,上部为杂色钙质泥岩、钙泥质粉砂岩夹薄-中厚层状石膏;索瓦组为一套灰色薄-中层状泥晶灰岩、鲕粒灰岩和石膏层。

2 样品采集与测试

友谊泉位于北羌塘盆地那底岗日 NE 方向,龙尾湖 SW 侧 10 km 处。其附近发育有一系列呈线状分布的泉眼,每个泉眼为一个采样点,样品点 D12105-1 至 D12111-1 位于索瓦组地层中,样品点 D12112-1 至 D12114-1 位于夏里组地层中,样品点 D12104-1 位于各泉眼泉水汇集处。本研究对这些泉水分别进行了采集,采样点 D12105-1 至 D12114-1 自 SE 向 NW 排列,共计采集了 11 个样品(图 1)。

在野外现场,每个泉眼的泉水经过滤后采集 1000 mL 水样,用聚乙烯塑料瓶密封保存,运回室内后,将每个水样分为 3 份,分别用于化学成分分析及氢、氧和锶同位素测定。水样化学成分分析中, Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 使用等离子体色谱仪测定, Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 使用等离子体光谱仪测定, Br^- 使用等离子体质谱仪测定(表 1),测试单位为国家地质实验测试中心;水样的氢、氧同位素使用

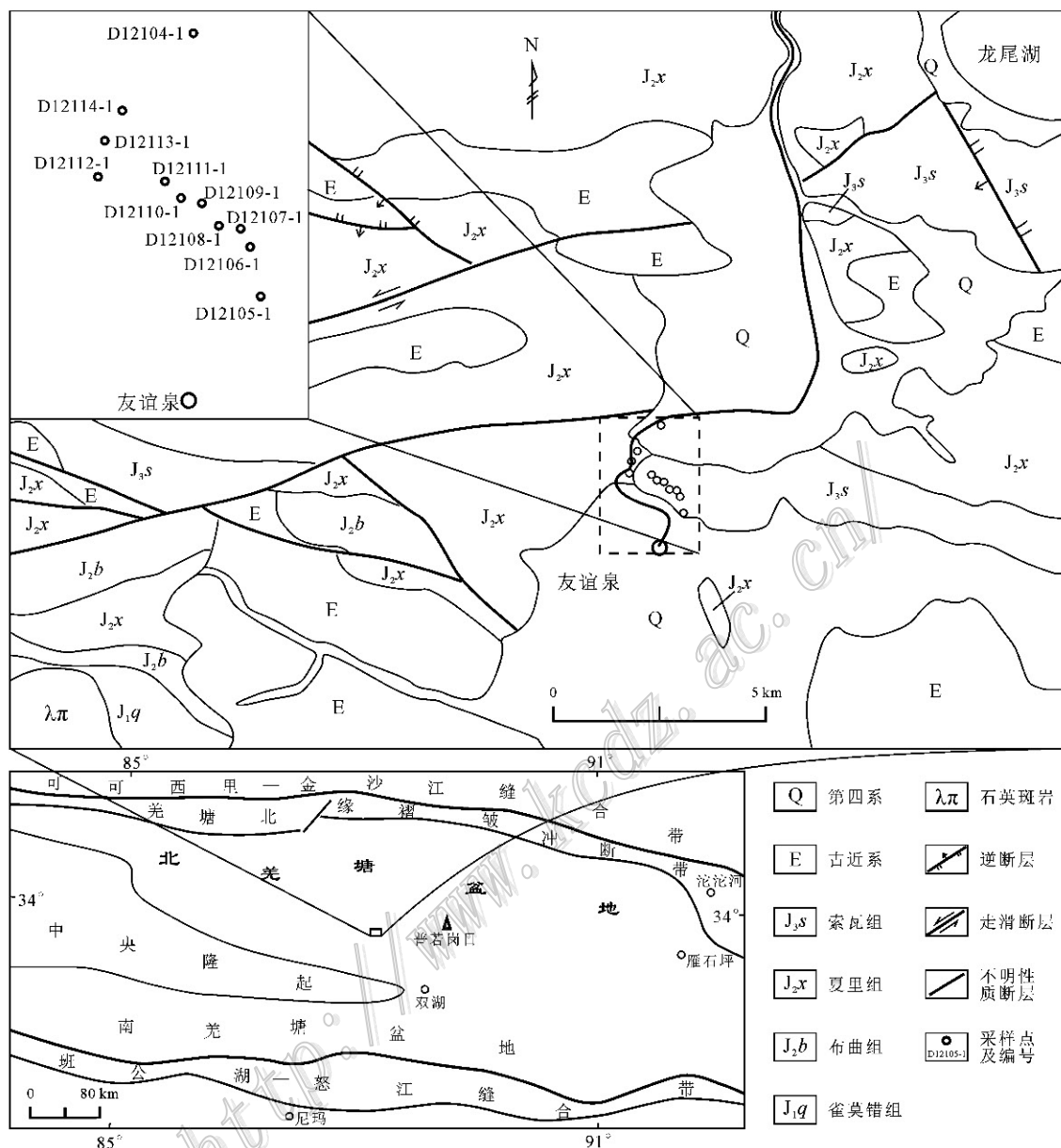


图 1 北羌塘盆地友谊泉地区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of the Youyiquan area in North Qiangtang Basin

MAT253 测定(表 2),测试单位为中国地质科学院矿产资源研究所;锆同位素使用 MAT262 固体同位素质谱计测定(表 2),测试单位为中国地质科学院地质研究所。

3 讨 论

以下分别从水化学的总体特征、地下水补给类型和矿物质来源对样品分析结果进行讨论。

3.1 泉水地球化学特征

友谊泉地区内泉水的矿化度相对较低,最低为 988.56 mg/L,最高为 11 357.20 mg/L(表 1),平均为 7711.46 mg/L,除个别样品外,从 D12105-1 样品开始,依次向 NW 方向直至 D12114-1 样品点,泉水的矿化度呈逐渐增高的趋势。11 个样品中,样品 D12111-1、D12112-1、D12113-1 和 D12114-1 的矿化度均大于 10 000 mg/L。一般认为,只有当泉水的矿化度大于 10 000 mg/L 时,才具有找钾地质意义,因

表 1 友谊泉地区泉水化学组分

Table 1 Chemical components of spring water from the Youyiquan area

样品编号	$\rho(B)/\text{mg/L}$								矿化度	水化学类型
	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Br^-	Ca^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na^+		
D12104-1	5070.00	432.2	780.00	<2.5	63.9	207	48.4	3240.00	9863.69	硫酸钠亚型
D12105-1	130.00	131.9	430.00	<0.5	119	6.77	47.7	120.00	988.56	硫酸钠亚型
D12106-1	490.00	241.8	480.00	<0.5	119	15.4	51.7	400.00	1802.28	硫酸钠亚型
D12107-1	1870.00	298.4	580.00	0.88	108	88.9	48.0	1290.00	4298.69	硫酸钠亚型
D12108-1	4660.00	489.9	760.00	<2.5	176	205	49.9	2950.00	9316.92	硫酸钠亚型
D12109-1	4860.00	684.7	780.00	<2.5	208	211	49.4	3050.00	9869.15	硫酸钠亚型
D12110-1	3210.00	268.8	650.00	1.37	75.7	133	52.2	2010.00	6417.52	硫酸钠亚型
D12111-1	5240.00	475.5	830.00	<2.5	137	228	48.2	3270.00	1 0257.58	硫酸钠亚型
D12112-1	5140.00	810.3	800.00	<2.5	160	237	46.6	3260.00	10482.19	硫酸钠亚型
D12113-1	5560.00	532.0	870.00	2.78	156	297	54.9	3850.00	1 1357.20	硫酸钠亚型
D12114-1	5190.00	552.8	800.00	<2.5	162	222	48.4	3170.00	1 0172.27	硫酸钠亚型

表 2 友谊泉地区泉水化学特征系数及氢、氧和锶同位素值

Table 2 Hydrochemical parameters, δD , $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of spring water from the Youyiquan area

样品编号	$\text{K}^+ \cdot 10^3 / \text{Cl}^-$ (钾氯系数)	$\text{K}^+ \cdot 10^3 / \sum \text{盐度}$ (钾盐系数)	$n(\text{Na}^+) / n(\text{Cl}^-)$ (钠氯系数)	$\text{Br}^- \cdot 10^3 / \text{Cl}^-$ (溴氯系数)	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
D12104-1	40.83	20.99	0.98	<0.49	-104	-13.3	0.708996
D12105-1	52.08	6.85	1.42	<3.85	-86	-12.4	0.708540
D12106-1	31.43	8.54	1.26	<1.02	-91	-12.9	0.708666
D12107-1	47.54	20.68	1.06	0.47	-93	-13.0	0.708931
D12108-1	43.99	22.00	0.98	<0.54	-100	-13.0	0.709053
D12109-1	43.42	21.38	0.97	<0.51	-104	-13.2	0.709232
D12110-1	41.43	20.72	0.97	0.43	-93	-11.9	0.709118
D12111-1	43.51	22.23	0.96	<0.48	-103	-13.1	0.709019
D12112-1	46.11	22.61	0.98	<0.49	-104	-13.2	0.709109
D12113-1	53.42	26.15	1.07	0.50	-101	-12.2	0.709146
D12114-1	42.77	21.82	0.94	<0.48	-104	-13.2	0.709216

此,样品 D12111-1、D12112-1、D12113-1 和 D12114-1 符合这一要求,而其他样品则仅具参考意义。

根据瓦利亚什科的水化学分类方法,区内泉水的水化学类型均为硫酸钠亚型,野外发育在泉口周围的无水芒硝也证明了这一点。水样的阴离子成分以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主,阳离子以 Na^+ 为主。与矿化度的变化趋势相同, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 的含量也自 SE 朝 NW 方向逐渐升高。其中, $\rho(\text{Cl}^-)$ 从 130 mg/L 增加到 5560 mg/L, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 从 430 mg/L 增加到 870 mg/L, $\rho(\text{Na}^+)$ 从 120 mg/L 增加到 3850 mg/L。泉水具有贫 Br^- 的特征,大部分水样未检测出具体 Br^- 含量,仅测出了其最大值,D12113-1 样品的 $\rho(\text{Br}^-)$ 最大,为 2.78 mg/L,最小为 D12105-1 和 D12106-1 样品,均小于 0.5 mg/L(表 1)。

分析表明,除 D12105-1 和 D12106-1 两个样品外,其他样品的 Cl^- 含量均占到矿化度的 40% 以上,

与矿化度呈正相关关系, R^2 为 0.9863(图 2a),同时, Cl^- 含量和 Na^+ 含量也呈明显的正相关关系, R^2 为 0.9988(图 2b)。一般认为,泉水中 Cl^- 与矿化度和 Na^+ 的正相关关系说明,泉水中的矿物质可能来自石盐矿物的溶解(Wilson et al., 1993; Hanor, 1994; 蔡春芳等, 1996)。

3.2 水化学特征系数及找钾指示

钠氯系数 钠氯系数代表水体中钠盐的富集程度,以海水的钠氯系数 0.86 为界,如果泉水的钠氯系数低于 0.86,一般认为其应来源于沉积卤水,如果钠氯系数大于 0.86 并接近于 1,则认为泉水来源于溶滤卤水。友谊泉地区的泉水,除 D12105-1 和 D12106-1 两个样品的矿化度太低而无甚意义外,其他水样的钠氯系数均大于 0.86 并接近于 1(最低为 0.94,最高为 1.07)(表 2),据此初步判断该区的泉水具有溶滤卤水的特征。

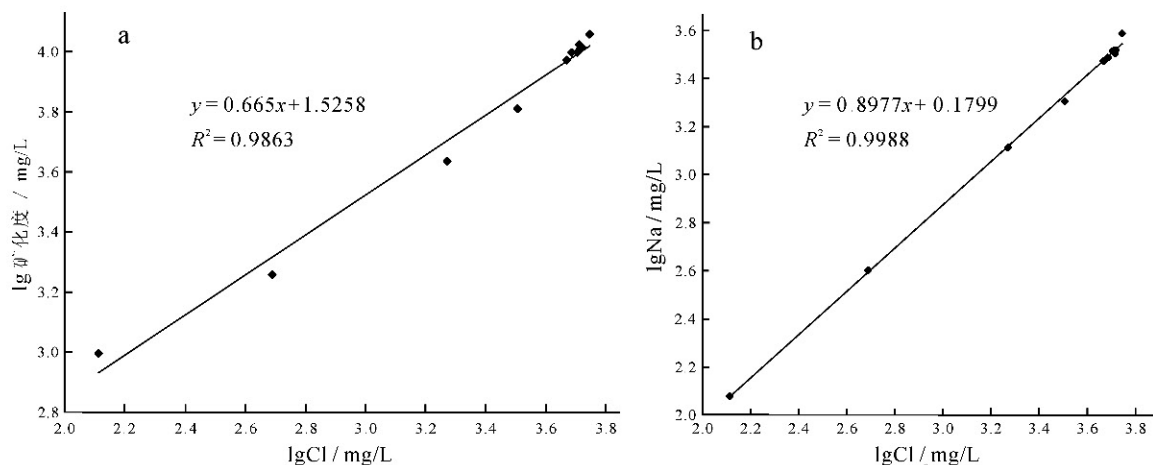


图 2 友谊泉地区泉水化学组分相关性分析图

a. 矿化度随 Cl^- 浓度的变化; b. Na^+ 浓度随 Cl^- 浓度的变化

Fig. 2 Correlation analysis diagram of chemical components of spring water from the Youyiquan area

a. Mineralization versus Cl^- concentrations of spring water; b. Na^+ concentrations versus Cl^- concentrations of spring water

溴氯系数 在卤水蒸发过程中,溴一般富集在溶液中,而不形成独立的矿物,只有极少量的溴与含氯盐类沉积物形成固溶体,以氯的类质同象赋存在氯化物型矿物中(支霞臣,1981;胡挺等,2011)。在晶体与溶液间,溴的分配系数小于1,溴的这种特征使得沉积卤水一般具有较高的溴氯系数,而溶滤卤水由地下水溶解地层中的盐类物质所形成,因此,溴氯系数较低,两者一般以海水的溴氯系数3.4为界。友谊泉地区内泉水的溴氯系数较低,样品D12105-1和D12106-1因矿化度较低而不能采信,其余样品的溴氯系数均低于1,除了矿化度低于10 000 mg/L的样品外,其余4件样品的溴氯系数分别为<0.48、<0.49、0.50、<0.48(表1和2),说明该地区内的泉水具有溶滤卤水成因。此外,在淋滤石盐带的沉积物时,溴氯系数很少超过0.2~0.3,在淋滤钾石盐带的沉积物时,该系数值稍高(地质矿产部地质科学院情报研究所,1972),区内样品的溴氯系数大部分低于0.50,反映出泉水在形成过程中可能溶滤了地层中的石盐等盐类矿物。

钾氯系数 钾氯系数是钾盐找矿的直接标志,一般低于海水的平均值,但是,当有钾盐地层存在时,则会出现明显变化。对于溶滤卤水,一般认为,当钾氯系数介于10~20时,表明有异常存在,当大于20时,含钾异常则非常明显(石油化学工业部化学矿山局,1977;云南省第十六地质大队,1978;张兆广,2009)。区内样品的钾氯系数均大于20,特别是样

品D12111-1、D12112-1、D12113-1和D12114-1的钾氯系数大于40(表2),显示出非常明显的含钾异常。

钾盐系数 钾盐系数表示钾物质占卤水总盐量的千分含量,其基本特征与钾氯系数相似。当溶滤卤水的钾盐系数介于5~10时,说明泉水具有含钾异常,当钾可能性盐系数大于10时,则认为异常比较明显,存在钾盐的可能性较大,并且有希望找到具工业意义的钾盐矿床(石油化学工业部化学矿山局,1977;云南省第十六地质大队,1978;王春宁等,2007;张兆广,2009)。区内的水样除D12105-1和D12106-1外,其他样品的钾盐系数均大于20,尤其是样品D12111-1、D12112-1、D12113-1和D12114-1的数值较高,样品D12113-1为最高,达到26.15(表2),含钾异常非常明显。

3.3 泉水的氢、氧、锶同位素组成及盐物质来源

^2H 和 ^{18}O 分别为氢、氧元素的重稳定同位素,由轻、重同位素分别组成的水分子具有明显不同的扩散分布特征,水汽的蒸发、冷凝及不同水体的混合可导致水体中氢、氧同位素含量的非均匀分布(Krabbenhoft et al., 1990),因此, ^2H 和 ^{18}O 作为保守的天然稳定同位素,是水体运移、交换及混合的理想示踪剂,是研究地下卤水形成与演化的重要指示。

友谊泉附近泉水的 δD 值为 -104‰ ~ -86‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -13.3‰ ~ -11.9‰ (表2)。在 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 图(图3)上,11件样品的数据点全部分布于国际标准雨水线和沱沱河大气降水线的两侧。根据Graig

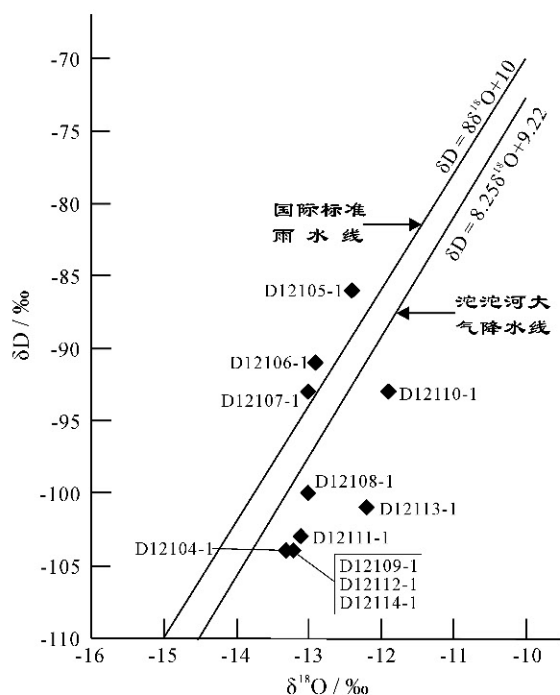


图3 友谊泉地区泉水的 δD - $\delta^{18}O$ 关系图
(沱沱河大气降水数据引自章新平等, 1996)

Fig. 3 δD versus $\delta^{18}O$ diagram of spring water from the Youyiquan area (data of Tuotuohe after Zhang et al., 1996)

(1961)的研究,雨水(大气降水)的氢、氧同位素变化规律遵循国际标准雨水线直线方程 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$,沱沱河大气降水线代表了羌塘盆地大气降水的氢、氧同位素分布规律。友谊泉地区内泉水的氢、氧同位素数据点明显分布于国际标准雨水线和沱沱河大气降水线的两侧(图3),说明该区内的泉水为大气降水所补给,大气降水进入地层后,在地层中运移及存在的时间较短,泉水中的盐物质为大气降水进入地层后溶滤盐类矿物所得。

锶同位素是另一种广泛应用于地下水演化研究的示踪工具。由于在化学及生物化学作用中,锶不会产生同位素分馏,因而,在物质迁移和变化过程的研究中, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 是有效的示踪剂(刘昊年等, 2007)。前文已述及,友谊泉地区内的泉水具有明显的含钾异常,盐类物质是由地下水溶解地层中的盐类物质后带至地表的,因此,确定泉水中盐类物质的来源层位是钾盐找矿工作的关键问题,所采水样的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 分析结果可有效回答这一问题。

锶同位素分析结果表明,11个水样的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为0.708 540~0.709 232,其中,样品D12111-1、D12112-1、D12113-1和D12114-1的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为

0.709 019~0.709 216(表2)。

前人对羌塘盆地的研究显示,从泥盆纪开始直至早侏罗世,藏北地区经历了一个完整的裂谷旋回,形成了水体环境相对较深的海相沉积(王成善等, 2001),这种环境不利于成盐成钾。此外,地质调查资料也表明,在泥盆系—三叠系内未见有石膏出现,而石膏的沉积是成盐成钾的必经阶段,结合前文证据,即区内泉水在地下运移时溶解了地层中的蒸发盐矿物,据此认为,区内泉水中盐类物质的来源层位,可排除泥盆系—三叠系,而将目标集中于侏罗系。

刘建清等(2007)曾测定了龙尾湖地区侏罗系的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值,该区邻近友谊泉,其测试结果可代表该区域地层的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值,具体测试结果分别为:布曲组,0.706 711~0.708 323;夏里组一段,0.706 770~0.708 009;夏里组二段,0.706 887~0.709 445;夏里组三段,0.706 948~0.708 425;索瓦组一段,0.706 591~0.711 086;索瓦组二段,0.707 262~0.708 352。将区内泉水的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值与区内主要地层的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值进行对比发现,泉水的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值落于夏里组二段与索瓦组一段的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值分布范围内,表明泉水在地下运移时可能溶解了夏里组二段和/或索瓦组一段中的盐类矿物。

4 羌塘盆地侏罗系成盐成钾条件分析

钾盐的形成需要3个基本条件:充足的盐类物质来源,干旱的气候条件,封闭或半封闭的聚盐盆地,即有利的构造条件(袁见齐, 1975; 云南省第十六地质大队, 1978)。北羌塘盆地内的侏罗系完全具备这4个条件,尤其是夏里组。

首先,侏罗纪期间,羌塘盆地为一海相盆地,海水可带来巨量的盐类物质,使该盆地具备了最基本的成盐成矿物质条件。

其次,在侏罗纪尤其是中-晚侏罗世期间,羌塘盆地持续处于干旱的气候条件。干旱-极端干旱气候条件是表生成盐成钾作用的先决条件(刘成林等, 2010),由于钾盐是卤水演化到中-晚期阶段的产物,故需要持续的干旱气候条件(赵元艺等, 2010)。古纬度恢复资料显示,羌塘地块于侏罗纪之前从南半球向北半球逐渐漂移,至侏罗纪到达古纬度北纬30°附近及其以南的位置(Boucot等, 2009; Metcalfe, 2013)。统计资料表明,全球的大-中型钾盐矿床主

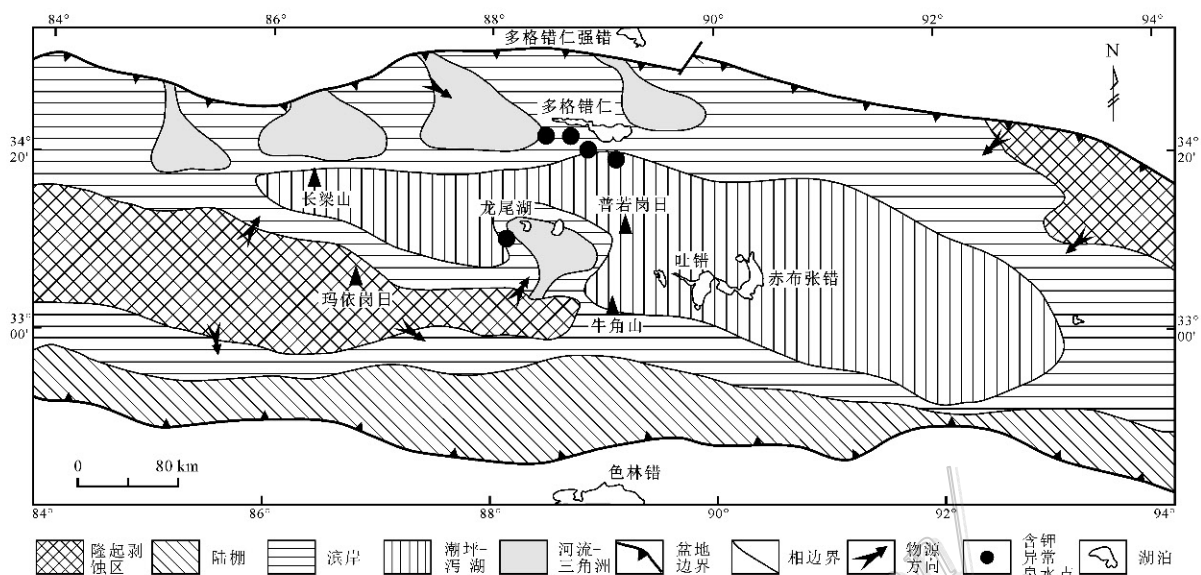


图4 羌塘盆地夏里期岩相古地理图及含钾异常泉水点位置(据王剑等,2009 修改)

Fig. 4 Lithofacies-paleogeographical map of Xiali Stage of the Qiangtang Basin, showing locations of springs with potash anomalies(modified after Wang et al., 2009)

要形成于地球纬度 15° 至 35° 之间(袁见齐, 1975), 羌塘盆地侏罗纪时期的古纬度无疑符合这一条件。古生物、地球化学以及稳定同位素资料进一步显示, 在此纬度条件下, 羌塘盆地在侏罗纪的雀莫错期、布曲期、夏里期直至索瓦期, 一直处于较为干旱的环境(蔚远江等, 2002; 付修根等, 2010; 曾胜强等, 2012), Boucot 等(2009)将其明确为干旱气候带, 因此, 羌塘盆地侏罗纪期间的气候条件有利于古海水蒸发浓缩。

羌塘盆地内广泛发育的石膏层是其中, 晚侏罗世持续干旱气候条件的产物。迄今, 地表已发现的石膏出露点达 300 个以上, 雀莫错组、布曲组、夏里组、索瓦组内均见有石膏沉积, 其中, 夏里组内石膏分布最为广泛, 厚度也最大(李亚林等, 2008)。石膏沉积是海水蒸发至钾盐生成的必经阶段。区内的石膏沉积表明, 在侏罗纪期间, 羌塘盆地内的海水已经开始了蒸发浓缩的过程。

第三, 北羌塘盆地在夏里期出现了一个相对封闭的潮坪-泻湖(图4), 其四周为滨岸环境所封闭, 在南侧的滨岸带形成了狭长的沙洲。沙洲的存在, 一方面保证了泻湖内的海水持续不断地蒸发, 另一方面, 当泻湖中的海水因蒸发导致水平面下降时, 外面的海水可以进一步供给泻湖, 这对于钾盐的形成是非常有利的条件(袁见齐, 1975)。在前期研究中, 笔

者已报道了多格错仁南岸、万安湖西北、源泉河、东温泉4地泉水具有较高的钾盐系数和钾氯系数(牛新生等, 2013), 结合此次研究可以发现, 此4地以及友谊泉的泉水点分别位于羌塘盆地夏里期泻湖的两岸(图4), 联系到泉水中盐类物质可能来源于夏里组这一信息, 笔者认为, 夏里组可能具有相对较好的成盐成钾地质条件。

最后, 在早侏罗世至晚侏罗世基末里期期间, 羌塘盆地发生了相对稳定的均匀沉降作用(王剑等, 2009)。这一构造条件既避免了较大的构造事件对成盐成钾过程的破坏, 同时也使成盐卤水得以进一步分异、汇聚, 朝有利于成盐成钾的方向演化。

5 结 语

(1) 羌塘盆地友谊泉地区的泉水均为硫酸钠亚型泉水, 泉水的 Cl^- 含量与矿化度和 Na^+ 的正相关关系、钠氯系数及溴氯系数都表明, 地层中很可能存在石盐等盐类矿物, 泉水的氢、氧同位素特征表明泉水受大气降水所补给。

(2) 泉水的锶同位素值与区域地层锶同位素值对比表明, 泉水中的盐类物质可能来源于夏里组二段和/或索瓦组一段。

(3) 羌塘盆地侏罗纪时期的古纬度、古气候、古

地理、古构造条件均有利于古海水蒸发浓缩,友谊泉地区以及多格错仁等地的泉水均具有较高的钾盐系数和钾氯系数,且泉水中的盐类物质可能来源于夏里组,这些证据表明,夏里组可能具有相对较好的成盐成钾条件。

志 谢 感谢郑绵平院士在本文撰写过程中所给予的指导,感谢项目首席科学家刘成林研究员对本文所提出的宝贵意见,感谢吴必豪研究员对本文的指导。

参考文献/References

- Boucot A J, 陈旭, Scotese C R, 樊勇轩. 2009. 显生宙全球古气候重建[M]. 北京:地质出版社. 90-91.
- 伯英,刘成林,焦鹏程,陈永志,曹养同. 2013. 塔里木盆地西南部和北部盐泉水化学特征及找钾指标探讨[J]. 地球学报, 34(5): 594-602.
- 蔡春芳,梅博文,李伟. 1996. 塔里木盆地油田水文地球化学[J]. 地球化学, 25(6): 614-623.
- 曾胜强,王剑,陈明,付修根,吴滔,熊兴国. 2012. 北羌塘盆地索瓦组上段的时代、古气候及石油地质特征[J]. 现代地质, 26(1): 10-21.
- 地质矿产部地质科学院情报研究所. 1972. 国外钾盐矿床普查资料[R]. 付修根,王剑,吴滔,何江林. 2010. 羌塘盆地胜利河地区雀莫错组地层及其古环境[J]. 中国地质, 37(5): 1305-1312.
- 胡挺,张占松,潘秀萍,严伟. 2011. 塔里木盆地车尔臣组地层特征与找钾分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 8(11): 22-25.
- 黄思静,曾允孚. 1997. 四川成都盆地某深层富钾卤水的地球化学特征及成因[J]. 沉积学报, 15(3): 67-71.
- 李亚林,王成善,李永铁. 2008. 西藏羌塘盆地侏罗系膏盐岩与油气成藏[J]. 石油学报, 29(2): 173-178.
- 林耀庭. 1995. 溴的地球化学学习性及其在四川找钾工作中的应用[J]. 化工矿产地质, (3): 175-181.
- 刘成林,焦鹏程,王弼力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 581-593.
- 刘吴年,黄思静,胡作维,吴萌,王庆东. 2007. 锶同位素在沉积学中的研究与进展[J]. 岩性油气藏, 19(3): 59-66.
- 刘建清,贾保江,杨平,陈玉禄,彭波,李振江. 2007. 碳、氧、锶同位素在羌塘盆地龙尾错地区层序地层研究中的应用[J]. 地球学报, 28(3): 253-260.
- 马万栋,马海州. 2006. 塔里木盆地西部卤水地球化学特征及成钾远景预测[J]. 沉积学报, 24(1): 96-106.
- 牛新生,陈文西,刘喜方. 2013. 羌塘盆地多格错仁地区盐泉地球化学特征及成钾预测[J]. 现代地质, 27(3): 621-628.
- 钱自强,曲一华,刘群. 1994. 钾盐矿床[M]. 北京:地质出版社. 14-27, 104-128, 148-158.
- 石油化学工业部化学矿山局. 1977. 石油勘探中找钾盐矿的方法[M]. 北京:石油工业出版社. 131-157.
- 王成善,伊海生,李勇,邓斌,刘登忠,王国芝,石和,李佑国,马润则,林金辉. 2001. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京:地质出版社. 32-198.
- 王成善,伊海生,刘池洋,李亚林,邹艳荣,伍新和,邓斌,杨兴科. 2004. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义[J]. 石油与天然气地质, 25(2): 139-143.
- 王春宁,余俊清,陈良,张丽莎. 2007. 钾盐资源全球分布和我国找钾实践及方法探究[J]. 盐湖研究, 15(3): 56-72.
- 王剑,丁俊,王成善,谭富文. 2009. 青藏高原油气资源战略选区调查与研究[M]. 北京:地质出版社. 208-227.
- 蔚远江,杨晓萍,雷振宇,张洪,陆万雨. 2002. 羌塘盆地查郎拉地区中新世古气候演化初探[J]. 地球学报, 23(1): 55-62.
- 于升松. 1994. 湖北江汉盆地潜江凹陷深层地下卤水水文地球化学研究[J]. 盐湖研究, 2(1): 6-17.
- 袁见齐. 1963. 钾盐专辑(第1辑)[M]. 北京:中国工业出版社. 94-99.
- 袁见齐. 1975. 钾肥与钾盐矿床[M]. 北京:燃料化学工业出版社. 99-101.
- 袁见齐. 1982. 世界钾盐新知[M]. 北京:地质出版社. 6-18.
- 云南省第十六地质大队. 1978. 怎样找钾盐[M]. 北京:地质出版社. 106-118.
- 章新平,姚檀栋. 1996. 青藏高原东北地区现代降水中 δD 与 $\delta^{18}O$ 的关系研究[J]. 冰川冻土, 18(4): 360-365.
- 张玉淑,高东林,时林,刘永,张西营,李宝兰. 2013. 云南思茅盆地勐腊含盐带盐泉水化学特征与找钾研究[J]. 盐湖研究, 21(2): 10-17.
- 张兆广. 2009. 察尔汗盐湖东段潜卤水水文地球化学特征及卤水成因分析[J]. 盐湖研究, 17(1): 19-26.
- 赵元艺,焦鹏程,李波涛,钱作华. 2010. 中国可溶性钾盐资源地质特征与潜力评价[J]. 地质学报, 29(4): 549-657.
- 赵政璋,李永铁,叶和飞. 2000. 青藏高原海相烃源层的油气生成[M]. 北京:科学出版社. 610-613.
- 郑绵平,袁鹤然,张永生,刘喜方,陈文西,李金锁. 2010. 中国钾盐区域分布与找钾远景[J]. 地质学报, 84(11): 1524-1553.
- 支霞臣. 1981. 钾盐地球化学中的溴法[J]. 化工地质, (1): 33-47.
- Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 133: 1702-1703.
- Hanor J S. 1994. Physical and chemical controls on the composition of waters in sedimentary basins[J]. Marine and Petroleum Geology, 11(1): 31-45.
- Krabbenhoft D R, Bowser C J, Anderson M P and Valley J W. 1990. Estimating groundwater exchange with Lakes 1: The stable isotope mass balance method[J]. Water Resources Research, 26(10): 2445-2453.
- Metcalf I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1-33.
- U. S. Geological Survey. 2013. Mineral commodity summaries 2013 [R]. U. S. Geological Survey. 122-123.
- Wilson T P and Long D T. 1993. Geochemistry and isotope chemistry of Michigan Brines: Devonian formations[J]. Applied Geochemistry, 8: 81-100.