

## 罗布泊盐湖钾盐矿床形成的地球化学研究\*

## Geochemistry of salt lake potash deposits in the Lop Nur, Xinjiang

焦鹏程, 刘成林, 王弭力, 陈永志

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

JIAO PengCheng, LIU ChengLin, WANG MiLi and CHEN YongZhi

(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

**摘要** 文章阐述了罗布泊盐湖主要钾盐矿床富钾卤水的化学特性。采用元素地球化学技术、同位素地球化学技术, 研究晶间卤水的起源、补给方向、富集机理等卤水演化过程, 揭示出罗布泊盐湖晶间卤水主要起源于大气降水, 盐分的富集以蒸发作用为主。开展罗布泊不同钾盐矿区的对比研究, 探讨了卤水物质来源、卤水演化过程及阶段的差异。硫同位素确定了卤水硫酸盐和固体硫酸盐的同源性, 且硫物质的演化以溶解、沉积作用为主。

**关键词** 罗布泊盐湖; 晶间卤水; 地球化学; 钾盐

罗布泊盐湖位于塔里木盆地东端, 1995—2000年发现评价了罗布泊超大型钾盐矿床——罗北凹地, 罗北凹地位于罗布泊东北部, 南北长 80 km, 东西宽 10~30 km, 面积约 1 300 km<sup>2</sup> (图 1)。卤水氯化钾平均品位 1.40%, KCl 资源 / 储量达 2.5 亿吨 (王弭力等, 2001), 这一成果被认为是中国近年来钾盐找矿的重大突破。罗北凹地钾矿床在国内外属一种新类型, 富钾卤水主要赋存于钙芒硝岩的(次生)孔隙中。钙芒硝(岩)孔隙十分发育, 呈蜂窝状。2001—2005年, 在罗北凹地外围又发现 4 个中型钾矿床, KCl 资源量数千万吨。本文主要通过对比罗北凹地钾矿床与其东部的铁南凹地、西部的罗西洼地卤水地球化学组成特征, 揭示罗布泊地区钾盐成矿的水文地球化学条件。

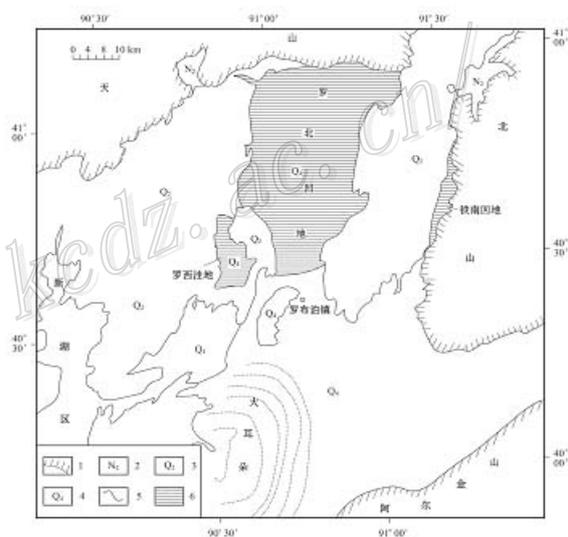


图 1 罗布泊及主要钾矿床位置图

1—山区; 2—上新统; 3—中新统; 4—全新统; 5—地层界限;  
6—主要钾矿床

## 1 罗布泊钾矿床卤水化学组成及水化学类型

罗布泊盐湖罗北凹地、铁南凹地和罗西洼地钾盐矿床卤水主要常、微量元素含量见表 1。卤水盐度以罗北凹地最高, 为 353.46 g/L, 铁南凹地次之, 罗西洼地最低, 328.33 g/L。各区卤水 KCl 含量的平均值均高出工业品位 (%), 与已建厂投产的柴达木盆地察尔汗钾矿卤水 KCl 品位相当。铁南凹地卤水氯化钾平均为 1.45%, 高于罗北凹地和罗西洼地卤水平均值。

对比发现, 罗北凹地、铁南凹地卤水中碳酸氢根、硼和锂离子含量明显高于罗西洼地, 说明两地卤水蒸发作用、物质来源等有一定的差异。

\*本文由国家科技攻关305项目专题(编号: 2001BA609A-07-15)和地质调查项目(编号: 200010300105)资助

第一作者简介 焦鹏程, 男, 1964年生, 研究员, 主要从事盐湖矿床水文地质研究, E-mail: jiaopengcheng@263.net

采用瓦里亚什科(1965)的水化学分类方案(表2)对卤水进行分类,罗北凹地卤水中 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 含量很低,特征系数 $\text{Kn}1 \ll 1$ 、 $\text{Kn}3 \gg 1$ 、 $\text{Kn}4 < 1$ ,符合硫酸盐型水。由于罗北凹地卤水 $\text{Kn}2$ 小于1,因此该区卤水为硫酸镁亚型卤水,盆地边部有的样品 $\text{Kn}2$ 接近1,表明部分卤水刚从硫酸钠亚型转变过来。铁南凹地卤水特征系数 $\text{Kn}2$ 大多小于1,平均为0.64,卤水化学类型主要为硫酸镁亚型,个别为硫酸钠亚型。罗西洼地卤水特征系数 $\text{Kn}2$ 值大多小于1,其中,4件样品的 $\text{Kn}2$ 值为等于1或略大于1,可见,该区卤水水化学类型基本为硫酸镁亚型;罗西洼地有少数为硫酸钠亚型或硫酸钠亚型-硫酸镁亚型的过渡型。由水型看出,铁南凹地、罗北凹地盐湖卤水总的演化程度高于罗西洼地。

表1 罗北凹地卤水化学组成

钾矿床分区	化学组成	盐度/(g·L <sup>-1</sup> )	KCl%	Ca <sup>2+</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	Mg <sup>2+</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	Cl <sup>-</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	B <sup>3+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	Li <sup>+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )
罗北凹地	最大值	410.10	1.82	0.38	26.95	189.32	4.77	88.95	194.00	44.58
	最小值	298.50	0.88	0.09	8.45	159.55	0.91	13.39	25.60	4.17
	平均值	353.46	1.40	0.24	17.42	179.95	2.71	44.03	67.22	18.17
铁南凹地	最大值	377.06	1.65	0.20	32.65	183.50	271.0	84.50	85.60	15.80
	最小值	311.27	1.19	0.05	14.60	154.00	14.0	33.65	52.40	12.40
	平均值	347.40	1.45	0.13	22.18	169.40	149.0	56.67	65.20	14.20
罗西凹地	最大值	347.18	1.42	0.29	18.00	173.50	85.00	68.50	74.20	13.10
	最小值	310.00	1.08	0.13	12.50	143.00	5.00	34.80	28.00	2.40
	平均值	328.33	1.31	0.19	15.50	155.90	15.00	55.40	50.30	11.20

注: 卤水化学分析样品数分别为: 罗北凹地200余个、铁南凹地9个、罗西洼地21个, 分析者: 中国地质科学院矿产资源研究所, 陈永志等。

表2 天然水地球化学分类及特征系数

特征系数	特征系数			
	碳酸盐型	硫酸盐型		氯化物型
		硫酸钠亚型	硫酸镁亚型	
$\text{Kn}1=(\text{NCO}_3^{2-}+\text{NHCO}_3)/(\text{NCa}^{2+}+\text{NMg}^{2+})$	>1	<1	<<1	<<1
$\text{Kn}2=(\text{NCO}_3^{2-}+\text{NHCO}_3+\text{NSO}_4^{2-})/(\text{NCa}^{2+}+\text{NMg}^{2+})$	>>1	≥1	≤1	<<1
$\text{Kn}3=(\text{NCO}_3^{2-}+\text{NHCO}_3+\text{NSO}_4^{2-})/\text{NCa}^{2+}$	>>1	>>1	>>1	<<1
$\text{Kn}4=(\text{NCO}_3^{2-}+\text{NHCO}_3)/\text{NCa}^{2+}$	>>1	<<1	<<1	<1

据瓦里亚什科(1965)。

## 2 潜层卤水 KCl 含量平面分布规律

罗北凹地浅层卤水 KCl 含量分布呈现出“北低南高”的态势,分界线位于凹地中部。北区钾含量多小于 1.30%, 龟背山前有一呈舌状向南、南东插入的淡化带,其 KCl 含量 0.88%~1.10%,表明浅层水受到源于龟背山的现代淡水补给(王弭力, 2001)。南区 KCl 含量均在 1.40%以上,有两个高值区(KCl 含量大于 1.60%),最高浓缩中心位于南小团(罗中),其次在 ZK0000 孔附近。这种分布状态与卫星图片的影像结构一致,即北部的浅色区对应着较低盐度分布区,南部的暗色区与较高盐度区相吻合。高值区的形成机理是,由于新构造运动使北部抬升,南部相对下降,其潜水面埋深小于北部,变为相对低洼区。由于水位埋藏较浅,地下卤水毛细蒸作用不断进行,有利于卤水继续蒸发浓缩,另外,低洼区必然成为卤水的汇集区,此两作用促使南部卤水盐度增高。

铁南凹地浅部卤水氯化钾含量,从南向北变化不大,从 1.36%~1.65%,这可能说明,铁南凹地浅层卤水受到盆地深部水补给。从卫星影像可以看到,铁南凹地位于盆地边部,沿断裂发育,新构造活动形成的断裂构造可成为盆地深部水补给浅层水的通道(刘成林等, 2003; 焦鹏程等, 2003)。

罗西洼地浅部卤水氯化钾分布呈“南低北高”的趋势,从南部的 ZKD0020 往北至中部的 ZKD0017 孔、北部的 ZKD0019 孔,氯化钾含量从 1.19% 增至 1.34%、1.42%,反映了卤水的补径排条件,即与罗布泊地区的主要补给方向一致,南部靠近补给区、晚期受到南部大湖区湖水影响(刘成林等,1990)。

### 3 稳定同位素地球化学

#### 3.1 氢氧同位素地球化学

罗北凹地卤水,  $\delta D$  平均值 -30.46‰、 $\delta^{18}O$  平均为 -5.10‰; 铁南凹地卤水,  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$  平均值分别为 -32.33‰、6.03‰; 罗西洼地卤水氢氧同位素组成为 -28.00‰、4.88‰。将罗布泊盐湖区及其补给区各种水体氢、氧同位素组成投到  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  图上(图 2)。由图可见,不同地区不同类别水的同位素组成大致分成 3 个区域:

**A 域** ( $\delta^{18}O$  值  $< -8.9$ ‰): 样品包括开都河河水、博斯腾湖岸边的井水、若羌河水、若羌县城井水等,其氢氧稳定同位素组成的特点是,位于大气降水线附近,反映了区域大气降水的同位素组成特点,即这些样品点的水体是现代降水补给的,且未经历强烈的蒸发作用、水岩交换作用和不同水体混合作用,地下水的咸化以溶滤作用为主。

**B 域** ( $\delta^{18}O$  值  $-6.9$ ‰~ $-1.4$ ‰): 主要是塔里木河和孔雀河中下游河水样品。该域位于全球大气降水线右下方,与 A 域水存在演化关系,从区域地质、水文地质条件分析可知, B 域水体不是 A 域水体与 C 域水体混合的结果,而是由 A 域水体经蒸发浓缩演化而来。

**C 域** ( $\delta^{18}O$  值  $> 0.2$ ‰): 样品点主要为罗布泊湖区地下卤水及台特玛湖卤水。这些水点的同位素组分已飘离大气降水线,反映出强烈蒸发作用的特征,罗布泊卤水与 B 域水之间具有成因联系,即罗布泊卤水主要来源于塔里木河和孔雀河,盐分的富集是强烈蒸发作用的结果。台特玛干盐湖浅坑水具有较高的氢氧同位素组成,采样点为公路旁开挖的水坑,经过长时间的暴晒,相当于进行天然蒸发试验。

#### 3.2 硫同位素地球化学

罗北凹地、铁南凹地和罗西洼地采集了硫酸盐沉积物和卤水硫同位素样品 14 件,  $\delta^{34}S$  值分布范围为 7.4~12.5‰(表 3),与塔里木盆地西部的硫同位素值较为一致,测试结果表明:罗布泊地区的硫均是陆源的。

水、岩硫酸根的  $\delta^{34}S$  值差异反映出硫同位素分馏作用的特点。大量的研究表明,在地壳表层的低温环境中,有微生物活动引起的氧化物型硫化物的还原反应对硫同位素分馏起着重要作用,此外,在交换平衡反映中,也产生硫同位素的热力学分馏。比较而言,无机化学反应中硫酸盐的硫同位素组成在物理作用中的分馏不明显,天然水中的溶解硫酸盐在蒸发浓缩作用下结晶形成的蒸发硫酸盐矿物和由硫酸盐矿物溶解进入水中的溶解硫酸盐,其硫同位素组成均与原始硫酸盐基本一致。

由表 3 可见,罗布泊盐湖硫酸盐矿物(石膏、钙芒硝)硫同位素的平均值为 9.82‰,卤水硫同位素的平均值 9.75‰,固体硫酸盐矿物的  $\delta^{34}S$  值比现代卤水重 0.07‰,说明两者十分接近,这反映了硫物质的长期演化过程,以溶解、沉积作用为主,而在微生物影响下的氧化还原过程不明显。

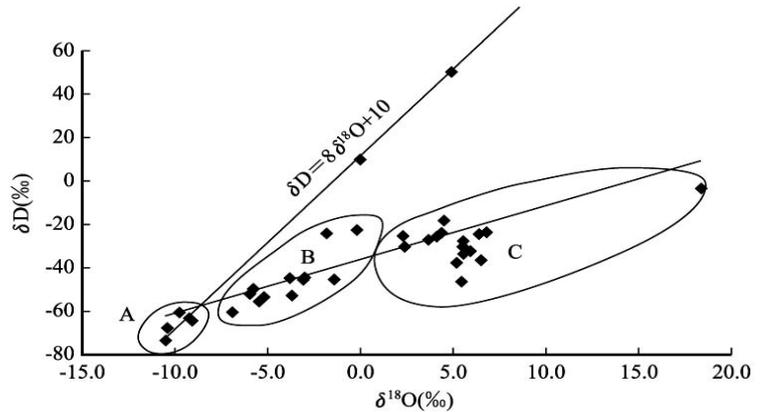


图 2 罗布泊及其补给区地表水、地下水氢氧同位素组成

表3 罗布泊盐湖硫酸盐沉积与卤水硫同位素特征

采样位置	样品编号	样品性质	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
罗北凹地	ZK95-2SU1*	卤水	7.4
罗北凹地	ZK95-2SU2*	卤水	10.4
罗北凹地	ZK95-3SU1*	卤水	11.5
罗北凹地	ZK95-3SU2*	卤水	7.8
铁南凹地	ZKD0008W1	卤水	10.3
铁南凹地	ZKD0010W1	卤水	12.5
罗西洼地	ZKD0017W2	卤水	9.0
罗西洼地	ZKD0019W1	卤水	9.1
罗北凹地	ZK95-1BO5*	钙芒硝	8.2
罗北凹地	ZK95-1K1*	钙芒硝	8.2
罗北凹地	ZK95-1BO4*	钙芒硝	8.7
罗西洼地	ZKD0017B32	石膏	11.4
罗西洼地	ZKD0017B41	钙芒硝	11.9
罗北凹地	ZK95-1*	石膏	10.5

分析者：中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室，白瑞梅等，1996。\*引自王弭力等，2001。

## 4 结 论

罗布泊盐湖主要钾盐矿区卤水盐度 328.33~353.46 g/L，KCl 含量 1.31%~1.45%，水型以硫酸镁亚型为主，从卤水水化学类型分析，铁南凹地、罗北凹地卤水演化程度高于罗西洼地，同时，卤水微量元素硼、锂含量变化主要反映卤水物质来源的差异。

卤水氯化钾含量的平面分布规律揭示出罗北凹地浅层卤水的现在补给来源为北部龟背山低山区的侧向径流；罗西洼地浅层卤水的主要补给来源位于其南部，即晚期受到南部大湖区湖水的补给；而铁南凹地浅层卤水则的可能受到盆地深部水补给。

氢氧同位素研究表明，罗布泊盐湖钾矿区卤水主要起源于大气降水，由塔里木河中下游河水和孔雀河河水蒸发浓缩作用而成。硫同位素组成特征揭示出罗布泊盐湖区硫酸盐均为陆源成因，即塔里木盆地西部古代硫酸盐矿物风化、河水搬运、强烈蒸发沉积。

## 参 考 文 献

- 焦鹏程, 刘成林, 王弭力, 等. 2003. 罗布泊盐湖晶间卤水运动特征及其动力学分析. 地球学报, 24(3): 255~260.
- 刘成林, 王弭力. 1990. 罗布泊第四纪沉积环境演化与成钾作用. 地球学报, 20(增刊): 264~270.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弭力, 等. 2003. 新疆罗布泊第四纪盐湖上升卤水流体及其成钾意义. 矿床地质, 22(47): 386~392.
- 王弭力, 刘成林, 焦鹏程, 等. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源. 北京: 地质出版社. 129~133.