doi:10.3799/dqkx.2013.061

# 博茨瓦纳 Sua 盐湖地下卤水来源及成因

单慧媚<sup>1,2</sup>,马 腾<sup>1,2\*</sup>,谭 婷<sup>1,2</sup>,罗朝晖<sup>1,2</sup>,祁志冲<sup>1,2</sup>,翟明哲<sup>3</sup>,Oteng M. Lekgowe<sup>4</sup>

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室,湖北武汉 430074

2. 中国地质大学环境学院,湖北武汉 430074

3. 博茨瓦纳大学地质系,哈博罗内 0022,博茨瓦纳

4. 博茨瓦纳地质调查局,哈博罗内 0014,博茨瓦纳

**摘要:**Sua 盐湖是博茨瓦纳面积最大的盐湖之一,是南半球重要的天然碱资源.为进一步揭示该盐湖的成因,对盐湖区地下水、地表水以及晒盐场盐结晶进行了常规阴阳离子含量、D、<sup>18</sup>O和<sup>37</sup>Cl 同位素组成及地下水<sup>14</sup>C 年龄分析.水化学结果显示Sua 盐湖的地下卤水具有富 Na 和 K,贫 Ca 和 Mg 的特征.氢氧同位素关系和<sup>37</sup>Cl 结果显示,附近河流地表水与 Sua 盐湖地下卤水具有密切的水力联系,而地下水对其补给作用较弱(<sup>37</sup>Cl 差异为 0.04‰~0.06‰).TDS-γ<sub>Na</sub>/γ<sub>Cl</sub>关系揭示 Sua 盐湖地下卤水受到盐岩地层溶滤作用的影响(γ<sub>Na</sub>/γ<sub>Cl</sub>≈1),而<sup>14</sup>C 年龄(距今约 2 万年)表明古气候的波动变化是其重要影响因素.基于以上认识,运用 PHREEQC 软件对 Sua 盐湖地下卤水进行反向地球化学模拟,结果表明地表水的强烈蒸发浓缩以及附近地下水对盐岩地层的溶滤是控制 Sua 盐湖卤水形成的主要因素.

关键词:地下卤水;水化学特征;同位素;反向模拟;地球化学.

**中图分类号:** X142; P592 **文章编号:** 1000-2383(2013)03-0607-09 **收稿日期:** 2012-05-21

## Sources and Genesis of Subsurface Brine in Sua Pan, Botswana

SHAN Hui-mei<sup>1,2</sup>, MA Teng<sup>1,2</sup>\*, TAN Ting<sup>1,2</sup>, LUO Zhao-hui<sup>1,2</sup>, QI Zhi-chong<sup>1,2</sup>, ZHAI Ming-zhe<sup>3</sup>, Oteng M. Lekgowe<sup>4</sup>

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Department of Geology, University of Botswana, Gaborone 0022, Botswana

4. Department of Geological Survey, Government of Botswana, Gaborone 0014, Botswana

Abstract: The salt lake of Sua Pan, one of the largest salt lakes in Botswana, is important resources of natural alkali. To identify the sources and genesis of subsurface brine in this salt lake, groundwater and surface water near this lake, in addition to subsurface brine water in the lake and salt crystals from solar salt field were collected and determined. The contents of major cation and anion, the isotope compositions of D, <sup>18</sup>O and <sup>37</sup>Cl, and the <sup>14</sup>C age of groundwater were calculated. It is found that the subsurface brine is characterized by enriched Na and K, and depleted Ca and Mg. Results of D, <sup>18</sup>O and <sup>37</sup>Cl show that surface water is closely connected with subsurface brine in Sua Pan, while the role of groundwater recharge on it is weak (the difference of <sup>37</sup>Cl is 0. 04‰ - 0. 06‰). Relationships of TDS- $\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$  indicate that leaching of halite affects the formation of this subsurface brine in Sua Pan. Based on the above knowledge, inverse simulation of subsurface brine in Sua Pan is modeled by PHREEQC software, which further verifies that salt lake of Sua Pan is mainly the result of strong evaporation and concentration of surface water and halite leaching by groundwater.

Key words: subsurface brine; hydrogeochemical characteristics; isotopes; inverse simulation; geochemistry.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(Nos. 40872157,40830748);教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-07-0773);中央高校基本科研业务 费专项基金资助(No. CUGL100501).

作者简介:单慧娟(1985一),女,博士,主要从事同位素生物地球化学方面研究. E-mail: shanhuimei1985@163. com

<sup>\*</sup> 通讯作者:马腾, E-mail: mateng@cug. edu. cn

盐湖是一种无机盐、有机质和生物综合性自然 资源,同时也是研究全球变化和成矿信息的天然实 验室(郑绵平,2006). Sua 盐湖是博茨瓦纳 Makgadikgadi(马卡迪卡迪)盐湖群中面积最大的两个 盐湖之一,该盐湖下含水层赋存含 NaCO<sub>3</sub> 卤水,储 量达 2.3 亿吨,是南半球重要的天然碱资源(张晨 鼎,2006).

众多学者针对 Sua 盐湖地下卤水的成因进行了 研究,但存在很大分歧.早期的学者认为雨季时周围 河流在补给 Sua 湖的过程中,将毛细作用和蒸发作用 在砂土层表面形成的含盐或碱物质带入了湖中(张晨 鼎,2006).Parsons(1999)认为早期的地壳运动导致河 流汇聚形成 Makgadikgadi 湖,后期的干旱气候导致 湖水强烈蒸发,周围地表/地下水携带淋滤出来的可 溶性盐类在该低洼地区汇集形成卤水(http://www. thuto.org/ubh/bw/bhpindex.htm).Eckardt *et al.* (2008)基于水化学特征分析认为,附近河流补给 Sua 盐湖的作用是微弱的,锶和硫同位素结果暗示其卤水 主要受到不确定起源的岩类的贡献.

研究表明(Clayton et al., 1966; 樊启顺等, 2007;张兆广, 2009),通过分析盐类沉积物周围出 露的各种卤水、湖(河)水、泉水等的水化学组成和同 位素组成,可以反演成盐盆地卤水的形成和演化,推 测盐湖的起源及其卤水成因.本文在对 Sua 盐湖地 区已有的监测井和生产井水质分析基础上,补充采 集盐湖内地下卤水,盐湖附近地表水、地下水以及晒 盐场盐结晶样品,进行常规水化学组成和 D、<sup>18</sup>O、 <sup>14</sup>C、<sup>37</sup>Cl同位素组成的测定分析,在此基础上利用 PHREEQC软件进行地球化学模拟,深入揭示 Sua 盐湖地下卤水的来源和成因,为当地卤水资源的开 采和利用提供更多的理论基础和科学依据.

## 1 研究区概况

Makgadikgadi 盐湖盆地位于非洲博茨瓦纳中 部,是古湖泊的残留体,该古湖泊曾覆盖博茨瓦纳的 北部. Sua 盐湖位于 Makgadikgadi 盐湖群的东部, 覆盖面积约 3 400 km<sup>2</sup>,集水区面积高达 27 000 km<sup>2</sup> (图 1).该地海拔为 760 m,是 Makgadikgadi 流域的 最低部分. Sua 盐湖下伏含水层赋存含 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 的 卤水,表层则为 30 m 厚的 Kalahari 砂土(张晨鼎, 2006). Sua 盐湖西北和西部的沟渠和河谷,以及北 部的 Nata 河流域,砂土普遍发生钙化而形成钙质冲 积土.

Sua 盐湖地区年平均气温 21 ℃,属热带干旱气 候.1月最热,白天平均气温 33 ℃,最高可达 43 ℃, 夜间平均气温 18 ℃.7月最冷,平均最高气温22 ℃, 最低 5 ℃,夜间最低可到 0 ℃以下.年降雨量约 400 mm,年蒸发量高达 1 800 mm.一年分为雨季 (10月一次年 4月)和旱季(5-9月),该地区降雨主 要集中在雨季,旱季降雨量仅占全年 1%~10%.雨 季时地貌为湿地草滩,旱季时只有坑洼处有积水(张 晨鼎,2006).



除了季节性的降雨补给外,Sua 盐湖主要受到

图 1 马卡迪卡迪流域地理位置、地形和降雨量 Fig. 1 Makgadikgadi Pans showing locations, terrain and rainfall





季节性 Nata 河和其他间歇性溪流(Semovane, Mosetse 和 Mosope 河)的补给(Thomas and Shaw, 1991),如图 2 所示. Sua 盐湖北部经历过最显著的 季节性洪涝和干旱,也是地下卤水提取的重要地区. 西边与之相邻的 Ntwetwe 盐湖则曾经历大于十年 的干枯时期(Eckardt *et al.*, 2008).

# 2 采样与分析

结合 Eckardt et al. (2008)和 McCulloch et al. (2008)在 1999-2000 年间对 Sua 盐湖进行的水化 学调查成果(图 2),笔者于 2010 年 1 月在该盐湖开 展水文地球化学调查工作,共采集 1 份晒盐场卤水 盐结晶及 6 份水样,盐湖内采集 1 份地下水,盐湖附 近采集 3 份地表水和 2 份地下水.具体位置如图 1 和表 1 所示.

所有水样均进行常规阴阳离子含量分析和氢氧 同位素组成测定,所有地下水样(GW03、GW04 和 BW06)以及晒盐场盐结晶样品均测定<sup>37</sup>Cl同位素. 此外,对盐湖内地下水样(BW06)还测定了<sup>14</sup>C同位 素,以确定其年龄.

水样的阴阳离子测定在博茨瓦纳大学自然科学 院测试中心分别采用 Metrohm761 Compact IC 和 Thermo Finnigen Element2 ICP-MS 完成.稳定氯 同位素(<sup>37</sup> Cl)和电导率(EC)<2000 mg/L水样的 D 和<sup>18</sup>O同位素在中国地质大学(武汉)生物地质与环 境地质国家重点实验室使用 MAT-253 测定,电导 率(EC)>2000 mg/L 的水样在宜昌地质矿产研究 所同位素地球化学实验室采用 MAT-251 分析.地 下水样的<sup>14</sup>C 组成在国土资源部海洋地质实验检测 中心采用 1220 型超低本底液闪谱仪测定.

## 3 水化学特征

水样分析结果显示(表 2),Sua 盐湖附近的地表水pH值在8.80~8.89间,地下水pH在7.08~

Table 1Water samples collected from Sua pan								
样品编号	SW01	SW02	GW03	GW04	B <b>W</b> 06	SW07		
经纬度	26°11.224′E	26°22.055′E	26°27.126′E	26°28. 373′E	25°57.871′E	26°14.439′E		
	20°12.798'S	20°05.645'S	20°30.683'S	20°30. 517'S	20°27.852'S	20°17.889′S		
类型	地表水	地表水	地下水	地下水	地下卤水	地表水		
地点	Nata 河	Nata 河	Dukwi 地区	Dukwi 地区	Sua 盐湖	Nata 国家公园		
采样深度	$0\sim 30 \text{ cm}$	$0\sim 30 \text{ cm}$	>36.93 m	>34.50 m	约 20 m	$0\sim$ 30 cm		

表1 Sua 盐湖水样采集信息

#### 表 2 水样的水化学分析结果

Fable 2	Results of	f hvdrochemical	analysis of	water samples
	Trobuito O	I III GI OCHCIIIICUI		mater Dampied
		<u> </u>		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

指标	SW01	SW02	GW03	GW04	B <b>W</b> 06	SW07
EC(µs/cm)	1 024.0	138.3	1 556.0	1 562.0	183 300.0	4 333.0
pН	8.80	8.89	7.16	7.08	9.50	8.83
温度(℃)	32.9	26.4	28.8	27.8	29.0	30.3
$HCO_3^{-}(mg/L)$	130.43	85.81	583.50	518.97	4 118.85	364.52
$CO_3^{2-}$ (mg/L)	49.52	0.00	0.00	0.00	15 445.06	210.80
$Cl^{-}(mg/L)$	207.44	3.20	216.75	252.79	41 640.00	1 076.08
$SO_4^{2-} (mg/L)$	20.58	0.90	93.22	95.40	12 480.00	97.90
$K^+$ (mg/L)	14.91	6.33	4.81	4.14	2 108.90	49.23
$Ca^{2+}$ (mg/L)	16.81	16.26	23.08	16.34	7.30	10.64
$Mg^{2+}(mg/L)$	3.05	2.78	35.22	30.94	3.50	0.78
$Na^+(mg/L)$	185.30	5.43	269.76	296.44	46 278.01	1 028.80
TDS(g/L)	0.630	0.121	1.229	1.218	112.655	2.841
阴阳离子平衡(%)	0.981	4.486	1.548	0.017	4.371	4.808
库尔洛夫式	Cl • HCO <sub>3</sub> -Na	HCO <sub>3</sub> -Ca • Na	HCO3 • Cl-Na	HCO3 • Cl-Na	Na-Cl	Na-Cl



图 3 水样的 Piper 三线图 Fig. 3 Piper graph of water samples

7.16间, 而盐湖地下卤水的 pH 值则较大, 为 9.50. 盐湖地下卤水(BW06)为 Na-Cl 型水, 其 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup>离子含量(7.30 mg/L)远远低于 Na<sup>+</sup>含量(46 278.01 mg/L).其他研究(Clayton *et al.*,1966;

TDS 基本上呈"盐湖地下卤水(112.655 g/L)> 附近地下水(1.218~1.229 g/L)>地表水(0.121~ 0.981 g/L)"的特征,而在 Nata 国家公园山脊地带采 集的地表水样(SW07)TDS(2.841 g/L)远远大于地下 水,为咸水(TDS>1000 mg/L的水).除 SW07 外,其 他水样中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>以及 Na<sup>+</sup>均表现出:盐 湖地下卤水>附近地下水>附近地表水的特征;K<sup>+</sup> 则呈现出:盐湖地下卤水>附近地表水>附近地下水 的特征.由于盐湖周围土壤沉积物的矿物组成主要为 方解石、白云石等 Ca、Mg 碳酸盐岩(Ringrose *et al.*, 2005),其大量的溶解导致 Sua 盐湖附近的地下水中 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>的含量远高于地表水和盐湖地下卤水.整 体上,Sua 盐湖的地下卤水呈现显著的富 Na 和 K,贫 Ca 和 Mg 的特点.

所有水样的 Piper 三线图(图 3)进一步显示,盐 湖周围土壤浸出液的水化学结果主要分布在菱形分 区的 V 区,其碳酸盐硬度超过 50%;盐湖附近 3 条 河流(Nata、Semowane 和 Mosetse)地表水的结果 (包括本次采集的地表水 SW02)也全部落在 V 区, 显示 为较高的碳酸盐硬度.除 SW02 地表水和 GW03 地下水样外,其余水样的结果均落在 VII 区, 以碱金属及强酸为主.

## 4 卤水来源及影响因素

#### 4.1 氢氧同位素结果与分析

根据卤水的来源,其可分为 3 种成因类型:(1) 同生沉积卤水,即与沉积物一起埋藏下来的古湖水 或晶间卤水;(2)大气渗入起源卤水,即大气水渗入 地层并溶滤蒸发岩,特别是最易溶的岩盐;(3)不同 水体混合而成的卤水(王弭力等,1996).通过卤水的 稳定氢氧同位素特征,可以确定卤水的起源是古湖 水蒸发浓缩、大气降雨入渗还是深部水的补给等 (Ringrose *et al.*,2005; 张兆广,2009),然而,以往 对 Sua 盐湖卤水起源的研究却很少应用氢氧同位素 技术(Clayton *et al.*,1966).

由  $\delta D - \delta^{18} O 关系图(图 4)可知, Sua 盐湖附近的$ 地下水(GW03 和 GW04)和地表水(SW01 和 $SW02)的氢氧同位素均落在全球大气降水线(<math>\delta D =$  $8\delta^{18} O + 10$ )(Taylor, 1974)上及附近,说明该盐湖 区附近的地下水和地表水主要接受大气降水的补 给;盐湖地下卤水(BW06)则落在线的右侧,发生了 明显的"氧同位素正漂移"现象,这是不断增强的 水一岩相互作用(Taylor, 1974)或卤水与含氧类矿 物较强同位素交换平衡的结果(郑永红和陈江峰, 2000). SW07 和 BW06 之间具有相似的  $\delta D$ (分别为



图 4 Sua 盐湖水样氢氧同位素组成变化图(SMOW,标准平均大洋水) Fig. 4 Variations of δD and δ<sup>18</sup>O values of water samples collected from Sua Pan

-0.4‰和-1.7‰)和δ<sup>18</sup>O(分别为 2.25‰和 3.15‰),说明盐湖区 Nata 国家地质公园的地表水 与 Sua 盐湖地下卤水之间存在较好的水力联系.沿 Nata 河流地表水(SW01和 SW02)向右和右上方向 到盐湖地下卤水(BW06)的物相变化则进一步揭示 Sua 盐湖地下卤水是地表水强烈蒸发以及地表水与 硅酸盐岩之间水岩作用的结果.

#### 4.2 <sup>37</sup>Cl 同位素结果与分析

盐湖的主要成盐元素之一——氯,在盐湖的形成与演化过程中具有重要作用.受补给来源、蒸发作用以及构造作用等因素的影响,盐湖卤水中氯同位素组成产生相应的差异(刘卫国等,1995,1996).由于稳定氯同位素分馏作用有限,同位素比值变化小,以它作为地球化学的标识物,为研究盐湖的变化与发展提供了有效途径(万军伟等,2003).

Sua 盐湖地下卤水及其晒盐场的盐结晶、附近 地下水的稳定氯同位素测试结果如表 3 所示. 从表 中可以发现,盐湖附近的地下水以及盐湖内地下卤 水较盐结晶贫<sup>37</sup> Cl,体现了蒸发过程对 Sua 盐湖形 成的重要贡献. 这是因为卤水蒸发析盐的过程中, <sup>37</sup> Cl和<sup>35</sup> Cl 在与 Na<sup>+</sup>等阳离子形成氯化物时,结合 能的差异会导致<sup>37</sup> Cl 优先进入固相,即盐类固体比 水中富集<sup>37</sup> Cl,这与众多研究的结果也一致(肖应凯 等,1994;刘卫国等,1995;万军伟等,2003). Sua 盐 湖附近的地下水和湖内地下卤水之间稳定氯同位素 组成的差异非常小,在 0.04‰~0.06‰范围内,暗 示该盐湖附近的地下水对盐湖内地下卤水的补给作 用较弱,进一步表明 Sua 盐湖地下卤水主要受到周 围河流地表水的补给.

#### 4.3 TDS-γ<sub>Na</sub>/γ<sub>CI</sub>关系分析

 $\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$ (毫克当量浓度比值)能够反映水样是来 自于海相沉积(<0.85)还是受到岩盐地层的溶滤作 用(≈1)(Ringrose *et al.*,2005).从TDS- $\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$ 关 系图(图 5)中可以发现,本次研究中盐湖附近的地 表水和地下水、以及盐湖地下卤水均落在 3> $\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$ >1的区间内,排除了其来自于海相沉积的可能. 已有数据显示(Eckardt *et al.*,2008),Sua 盐湖内 所有监测井和生产井中采集地下卤水(平均深度 38 m)的 $\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$ ≈1,进一步揭示该盐湖的地下卤水 可能是含岩盐地层溶滤而成.

## 4.4 <sup>14</sup>C 同位素结果与分析

众多学者(Shaw and Cooke, 1986; Shaw et al., 1992; Ringrose et al., 2005; Burrough et al., 2009)对 Sua 盐湖沉积物的年龄(2.2~10.8

#### 表 3 样品的<sup>37</sup> CI 测试结果

Table 3  $\delta^{37}$ Cl values of water and salt crystals samples from Sua Pan

样品	$\delta^{37}\mathrm{Cl}(\%_0)$	d 值(‰)
GW03	0.22	0.06
GW04	0.24	0.04
BW06	0.18	0.02
盐结晶	0.29	0.07





表4 Sua 盐湖卤水的<sup>14</sup>C 年龄

Table 4<sup>14</sup>C age of brine water from Sua Pan

编号	现代碳百分数(%)	<sup>14</sup> C 年龄(ka)	校正后年龄(ka)
BW06	13.464	$16.580 \pm 0.27$	21.459

万年)进行了深入研究,但关于其地下卤水的年龄尚 无记录.本研究中测定盐湖地下卤水中<sup>14</sup>C年龄,采 用 Fontes 和 Garnier 提出的化学稀释一同位素交 换综合校正模型进行年龄校正,因为该模型考虑了 同位素交换反应,且不加区别的适用于承压含水层 的补给区和承压区(郑永红和陈江峰,2000).

表4显示,校正后的地下水<sup>14</sup>C年龄约为 21459a,属于第四纪晚更新世(12.6~1万年).第 四纪的特点是在短暂的地质时期内发生过多次急剧 的寒暖气候变化以及大规模的冰川运动等(杨伦等, 1998),该时期的气候特点是冰期一间冰期交替,在 1.7万年前达到最冷,海水表面温度低于1~2°C (Holmgren *et al.*, 2003),之后便处于冰后期,气候 逐渐回暖到接近现代,该期间随着南极冷逆转(antarctic cold reversal, ACR)出现几次变冷,至1.35 万年回暖达到最强,而从晚更新世进入全新世,距今

2500~6000年间显著变冷,之后处于气候回暖期, 其中全新世最强变冷期出现在 1700 年前(Servant et al., 1993; Holmgren et al., 2003). 研究显示, 非洲中部地区从晚更新世到全新世的平均温度回升 了大约 5.7 °C (Holmgren et al., 2003). 回暖的过 程中,中低纬度大部分地区湖群缩小,湖水位降低, 进一步干涸或咸化(曹博勋,1995). 地下水年龄显 示,Sua 盐湖地下卤水起源于早期的冰川作用,在经 历了漫长的全球气候回暖过程中逐渐形成,其主要 包括两个阶段(刘鸿雁,2002):古气候潮湿阶段,地 表水盐分溶解并随径流进入湖盆,即湖盆水体不断 获得盐类物质阶段;古气候干旱阶段,则是湖盆水体 缩小、盐分浓集和析盐阶段;这两个阶段往复进行, 形成了具有经济意义的盐湖矿床.由此可见,晚更新 世以来的古气候条件下,冷暖与干湿的频繁波动,是 Sua 盐湖形成的一个重要因素.

5 卤水形成与演化

利用 PHREEQC 软件对地下卤水的演化进行 模拟,可以反映卤水的形成以及演化的主要地球化 学过程及控制因素(王珍岩等,2003).在 Sua 盐湖地 下卤水补给来源以及影响因素分析的基础上,结合 盐湖区的矿物组成特征,反演该盐湖地下卤水的地 球化学反应过程.分别以地表水、浅层地下水作为模 拟起点,盐湖卤水作为模拟终点;以石膏、方解石、钾 长石、钠长石、海泡石、岩盐以及白云石作为矿物相, 考虑到水岩作用过程中围岩吸附综合体(-X)的作 用,NaX、KX、CaX<sub>2</sub> 以及 MgX<sub>2</sub> 也被加入到参与反 应的矿物相中;CO<sub>2</sub> 作为参与反应的气体相;pH 作 为模拟运算中摩尔平衡参数,其可接受的不确定度 范围为 0.01~0.05,运行过程中结合输出模型的收 敛性和稳定性进行调整.

模拟结果(表 5)显示,控制 Sua 盐湖地下卤水

形成的最主要过程是水分蒸发及浓缩作用,因为水的摩尔转移量远远高于其他化学反应过程(相差 10<sup>3</sup>~10<sup>6</sup>);其次是岩盐的溶滤作用,该作用对卤水 形成的贡献大于钠长石以及石膏的溶解.此外,模拟 结果显示,方解石、钾长石的析出对 Sua 盐湖卤水的 形成也存在影响.考虑盐湖地区地下水(>30 m 埋 深)的实际蒸发强度,模拟结果显示盐湖附近地下水 对卤水的贡献作用应主要体现在对岩盐和石膏的溶 解.综上所述,Sua 盐湖的地下卤水应主要是河流地 表水的强烈蒸发并浓缩,以及附近地下水与岩盐地 层发生溶滤作用的结果.

# 6 结论与建议

对博茨瓦纳 Sua 盐湖的地下卤水、附近的地表 水和地下水、晒盐场的盐结晶的水化学和同位素 (D、<sup>18</sup>O、<sup>14</sup>C和<sup>37</sup>Cl)特征分析发现:

(1)Sua 盐湖地下卤水为碱性的 Cl-Na 型水,呈 显著的富 Na<sup>+</sup>和 K<sup>+</sup>,贫 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>的特点;盐湖 附近的地下水则为 HCO<sub>3</sub> • Cl-Na 型水,沿着"附近 地下水一盐湖地下卤水"方向呈现 HCO<sub>3</sub> 型向 Cl 型 水转化的特征.

(2)氢氧同位素关系表明,Sua 盐湖区地表水 以及地下水(30~40 m 深度)主要受到大气降水的 补给,盐湖地下卤水与 Nata 国家地质公园地表水之 间存在较好的水力联系.<sup>37</sup>Cl 结果显示,盐湖地下卤 水受盐湖附近地下水的补给作用较小,其主要受到 周围河流地表水的补给.

(3)TDS-γ<sub>Na</sub>/γ<sub>Cl</sub>关系显示盐湖区所有水样并非 海相沉积,其地下卤水可能受含盐岩地层溶滤作用 的影响;地下卤水的<sup>14</sup>C年龄约2万年,对该时期的 古气候特征的分析表明Sua盐湖地下卤水起源于早 期的冰川作用,在晚更新世以来古气候的冷暖干湿 频繁波动变化中逐渐形成,波动的气候条件是Sua

Table 5 Geochemistry models for the evolution of brines in Sua pan									
起点	终点	$H_2O$	岩盐	方解石	钾长石	石膏	白云石	钠长石	$CO_2$
SW01	B <b>W</b> 06	-1.261e+4	1.538e-1	-1.891e-1	-3.514e-2	1.220e-1	-2.844e-2	3.514e-2	3.779e-1
SW02	B <b>W</b> 06	-7.794e+4	1.418	-6.526e-1	-1.756e-1	1.578e-1	-1.605e-1	1.756e-1	-6.335e-1
SW07	B <b>W</b> 06	-2.567e+3		-1.320e-1	-7.751e-3	1.210e-1	-1.356e-3	7.751e-3	2.735e-1
	B <b>W</b> 06	-2.578e+3		-1.302e-1		1.191e-1	-1.362e-3		
GW03	B <b>W</b> 06	-2.869e+3	1.271	-7.363e-2	4.542e-2	1.197e-1	-7.626e-2	-4.542e-2	-8.165e-2
GW04	B <b>W</b> 06	-2.720e+3	1.242	-7.786e-2	4.661e-2	1.212e-1	-6.354e-2	-4.661e-2	-7.031e-2

表 5 Sua 盐湖卤水演化的地球化学模型(单位:mol/L) Table 5 Geochemistry models for the evolution of brines in Sua pa

注:负值表示从水溶液中迁移出来的摩尔量;正值表示进入水溶液的摩尔量.

盐湖形成过程中的重要影响因素.

基于上述认识对 Sua 盐湖卤水进行反向地球化 学模拟,结果进一步揭示 Sua 盐湖地下卤水主要是 河流地表水强烈蒸发并浓缩、附近地下水对岩盐地 层溶滤作用的共同结果.

#### References

- Burrough, S. L., Thomas, D. S. G., Bailey, R. M., 2009. Mega-Lake in the Kalahari: A Late Pleistocene Record of the Palaeolake Makgadikgadi System. Quaternary Science Reviews, 28 (15 - 16): 1392 - 1411. doi: 10. 1016/j. quascirev. 2009. 02. 007
- Cao, B. X., 1995. Geomorphology and Quaternary Geology. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Clayton, R. N., Friedman, I., Graf, D. L. et al., 1966. The Origin of Saline Formation Waters 1. Isotopic Composition. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 71 (16): 3869-3882. doi: 10.1029/JZ071i016p03869
- Eckardt, F. D., Bryant, R. G., McCulloch, G., et al., 2008. The Hydrochemistry of a Semi-arid Pan Basin Case Study: Sua Pan, Makgadikgadi, Botswan. Applied Geochemistry, 23 (6): 1563-1580. doi: 10.1016/j. apgeochem. 2007. 12.033
- Fan, Q. S., Ma, H. Z., Tan, H. B., et al., 2007. Characteristics and Origin of Brines in Western Qaidam Basin. *Geochimica*, 36(6): 601-611 (in Chinese with English abstract).
- Holmgren, K., Lee-Thorp, J. A., Cooper, G. R. J., et al., 2003. Persistent Millennial-Scale Climatic Variability over the Past 25 000 Years in Southern Africa. *Quater*nary Science Reviews, 22 (21-22): 2311-2326. doi: 10.1016/S0277-3791(03)00204-X
- Liu, H. Y., 2002. Quaternary Ecology and Global Change. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, W. G., Xiao, Y. K., Sun, D. P. , et al., 1995. Characteristics and Significance of Chlorine Isotope of Brine and Deposits in the Mahai Salt Lakes. *Journal of Salt Lake Science*, 3 (2): 29 – 33 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W. G., Xiao, Y. K., Sun, D. P., et al., 1996. Chlorine Isotopic Composition in Qaidam Basin. *Geochimica*, 25 (3):296-303 (in Chinese with English abstract).
- McCulloch, G. P., Irvine, K., Eckardt, F., et al., 2008. Hydrochemical Fluctuations and Crustacean Community Composition in an Ephemeral Saline Lake (Sua Pan, Makgadikgadi Botswana). *Hydrobiologia*, 596 (1): 31-46. doi: 10.1007/s10750-007-9055-8

- Ringrose, S., Huntsman-Mapila, P., Kampunzu, A. B., et al., 2005. Sedimentological and Geochemical Evidence for Palaeo-Environmental Change in the Makgadikgadi subbasin, in Relation to the MOZ Rift Depression, Botswana. *Palaeo*, 217(3-4): 265-287. doi: 10.1016/j. palaeo. 2004. 11.024
- Servant, M., Maley, J., Turcq, B., et al., 1993. Tropical Forest Changes during the Late Quaternary in African and South American Lowlands. *Global and Planetary Change*, 7(1-3): 25-40.
- Shaw, P. A., Cooke, H. J., 1986. Geomorphic Evidence for the Late Quaternary Palaeoclimates of the Middle Kalahari of Northern Botswana. *Catena*, 13(4): 349-359. doi:10.1016/0341-8162(86)90009-3
- Shaw, P. A., Thomas, D. S., G., Nash, D. J., 1992. Late Quaternary Fluvial Activity in the Dry Valleys (mekgacha) of the Middle and Southern Kalahari, Southern Africa. Journal of Quaternary Science, 7 (4): 273 – 281. doi:10.1002/jqs.3390070402
- Taylor, H. P. ,1974. The Application of Oxygen and Hydrogen Isotope Studies to Problems of Hydrothermal Alteration and Ore Deposition. *Economic Geology*, 69 (6): 843-883. doi:10.2113/gsecongeo. 69. 6.843
- Thomas, D. S. G., Shaw, P. A., 1991. The Kalahari Environment, Cambridge University Press, Cambridge.
- Wan, J. W., Liu, C. F., Chao, N. Y., et al., 2003. Isotope Hydrology Theory and Practice. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Wang, M. L., Yang, Z. C., Liu, C. L., et al., 1996. The Northern Qaidam Basin Salt Lake Potash Deposit and Its Development Prospects. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, Z. Y., Meng, G. L., Wang, S. Q., 2003. Geochemistry Modeling of Quaternary Subsurface Brines in South Coast of the Laizhou Bay, the Bohai Sea—Taking Brines from Core-aoli501 in Changyi Area as an Example. Marine Geology & Quaternary Geology, 23(1):49-53 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Y. K., Jin, L., Liu, W. G., et al., 1994. Chlorine Isotope Composition in Big Tsaidam Lake. *Chinese Science Bulletin*, 39(14):1319-1322(in Chinese).
- Yang, L., Liu, S. F., Wang, J. S., 1998. General Geology Brief Tutorial. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhang, C. D., 2006. Present Situation of Trona Development in Botswana. *Soda Industry*, (4): 3-6(in Chinese).
- Zhang, Z. G., 2009. Unconfined Brine Hydrochemistry Characteristic and Brine Cause Analysis of East Section of

Qarhan Salt Lake. Journal of Salt Lake Research, 17 (1): 19-26(in Chinese with English abstract).

- Zheng, M. P. ,2006. Salinology: Research and Prospects. Geological Review, 52(6): 737 - 746 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. H., Chen, J. F., 2000. Stable Isotope Geochemistry. Science Press, Beijing (in Chinese).

### 附中文参考文献

- 曹博勋,1995. 地貌学及第四纪地质学. 武汉:中国地质大学 出版社.
- 樊启顺,马海州,谭红兵,等,2007.柴达木盆地西部卤水特征 及成因探讨.地球化学,36(6):601-611.
- 刘鸿雁,2002. 第四纪生态学与全球变化. 北京:科技出版社.
- 刘卫国,肖应凯,孙大鹏,等,1995.马海盐湖区卤水和盐类矿 物的氯同位素特征及意义.盐湖研究,3(2):29-33.
- 刘卫国,肖应凯,孙大鹏,等,1996.柴达木盆地氯同位素组成 特征.地球化学,(3):296-303.
- 万军伟,刘存富,晁念英,等,2003.同位素水文学理论与实

践. 武汉:中国地质大学出版社.

- 王弭力,杨智琛,刘成林,等,1996.柴达木盆地北部盐湖钾矿 床及其开发前景.北京:地质出版社.
- 王珍岩,孟广兰,王少青,2003. 渤海莱州湾南岸第四纪地下 卤水演化的地球化学模拟. 海洋地质与第四纪地质. 23 (1):49-53.
- 肖应凯,金琳,刘卫国,等,1994. 大柴达木湖的氯同位素组 成.科学通报,39(14):1319-1322.
- 杨伦,刘少峰,王家生,1998. 普通地质学简明教程. 武汉:中 国地质大学出版社.
- 张晨鼎,2006. 博茨瓦纳天然碱的开发现状. 纯碱工业,(4): 3-6.
- 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. 盐湖研究,17(1):19-26.
- 郑绵平,2006. 盐湖学的研究与展望. 地质论评,52(6): 737-746.
- 郑永红,陈江峰,2000.稳定同位素地球化学.北京:科学出版社.