

## 腾格里沙漠盐湖氯同位素地球化学特征\*

韩凤清<sup>1,2</sup>, 毛庆飞<sup>1,2,3\*\*</sup>, 马茹莹<sup>4</sup>, 张燕霞<sup>5</sup>, 孙宇强<sup>6</sup>, 韩继龙<sup>1,2,3</sup>, 年秀清<sup>1,2,3</sup>, 刘文玉<sup>1,2,3</sup>, Syed Asim Hussain<sup>1,2,3</sup>, 马 喆<sup>1,2,3</sup>

(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, 西宁 810008)

(2: 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 西宁 810008)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

(4: 青海省地震局, 西宁 810001)

(5: 宁夏回族自治区地震局, 银川 750001)

(6: 青海民族大学, 西宁 810007)

**摘 要:**  $\delta^{37}\text{Cl}$  值可以用来指示盐湖演化过程中卤水的蒸发浓缩程度、可能的补给来源和控制因素, 本文对腾格里沙漠地区 12 个代表性盐湖卤水样品开展了氯同位素组成研究. 结果表明, 研究区内沙漠盐湖卤水的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值变化范围为  $-0.10\text{‰}$ ~ $1.36\text{‰}$ , 平均值为  $0.55\text{‰}$ ; 其中, 硫酸钠亚型卤水的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值范围为  $-0.10\text{‰}$ ~ $1.36\text{‰}$  (平均值为  $0.56\text{‰}$ ), 硫酸镁亚型卤水的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值范围为  $0.14\text{‰}$ ~ $0.82\text{‰}$  (平均值为  $0.48\text{‰}$ ). 对比柴达木盆地现代盐湖分析数据, 发现区内沙漠盐湖的  $\delta^{37}\text{Cl}$  平均值明显大于柴达木盆地盐湖的  $\delta^{37}\text{Cl}$  平均值, 并且, 硫酸钠亚型卤水  $\delta^{37}\text{Cl}$  最高, 硫酸镁亚型卤水次之, 氯化物型卤水最小. 基于不同盐湖地下水咸化程度以及盐湖卤水中  $\delta^{37}\text{Cl}$  值与  $\text{Br/Cl}$  系数关系的研究, 揭示了研究区东部和东北部盐湖可能受到第三系地层咸水的补给, 而其他盐湖主要受蒸发浓缩作用影响.  $\delta^{37}\text{Cl}$  值分布特征则显示, 腾格里沙漠地区部分盐湖在形成过程中可能受到区域构造活动诱发的第三系深部水补给及水-岩作用等多重因素的影响.

**关键词:** 氯同位素; 盐湖; 卤水; 腾格里沙漠

## Chlorine isotope geochemistry of salt lakes in the Tengger Desert

HAN Fengqing<sup>1,2</sup>, MAO Qingfei<sup>1,2,3\*\*</sup>, MA Ruying<sup>4</sup>, ZHANG Yanxia<sup>5</sup>, SUN Yuqiang<sup>6</sup>, HAN Jilong<sup>1,2,3</sup>, NIAN Xiuqing<sup>1,2,3</sup>, LIU Wenyu<sup>1,2,3</sup>, SYED Asim Hussain<sup>1,2,3</sup> & MA Zhe<sup>1,2,3</sup>

(1: Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment of Qinghai Province, Xining 810008, P.R.China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(4: Qinghai Earthquake Administration, Xining 810001, P.R.China)

(5: Ningxia Hui Autonomous Region Earthquake Administration, Yinchuan 750001, P.R.China)

(6: Qinghai Nationalities University, Xining 810007, P.R.China)

**Abstract:** The value of  $\delta^{37}\text{Cl}$  can be used to indicate the intensity of evaporation, possible sources and controlling factors during salt lake evolution. In this paper, 12 brine samples were collected and their chlorine isotopic compositions were analyzed. The results showed that the values of  $\delta^{37}\text{Cl}$  range from  $-0.10\text{‰}$  to  $1.36\text{‰}$ , with an average value of  $0.55\text{‰}$ . The values of  $\delta^{37}\text{Cl}$  in the lakes of sodium sulfate type range from  $-0.10\text{‰}$  to  $1.36\text{‰}$ , with an average value of  $0.56\text{‰}$ , and those of magnesium sulfate type are from  $0.14\text{‰}$  to  $0.82\text{‰}$ , with an average value of  $0.48\text{‰}$ . In comparison with the chlorine isotopic composition of brines in Qaidam Basin, it is found that the average value of  $\delta^{37}\text{Cl}$  in the investigated area is greater than that in the Qaidam Basin. Among three

\* 国家 973 前期项目 (2012CB426501) 和青海省应用基础研究计划项目 (2014-ZJ-702) 联合资助. 2017-10-10 收稿; 2017-11-29 收修稿. 韩凤清 (1963 ~), 男, 研究员; E-mail: hanfq@isl.ac.cn.

\*\* 通信作者; E-mail: qingfeim@163.com.

brine types, the  $\delta^{37}\text{Cl}$  values of sodium sulfate type brine are highest, those in the magnesium sulfate type brine are lower, and those in the chloride type brine are lowest. The evidences of the different salinization of groundwater, the  $\delta^{37}\text{Cl}$  values of salt lake brine and the ratios of Br/Cl indicated together that the salt lakes located in the eastern and northeastern may be supplied by saline water from the Tertiary stratum, while the other salt lakes are mainly affected by evaporation. The distribution characteristic of the  $\delta^{37}\text{Cl}$  values showed that the evolution of these salt lake brines may be affected by multiple factors such as tectonic activity-induced supplies of Tertiary deep waters and the water-rock interaction in Tengger Desert region.

**Keywords:** Chlorine isotope; salt lake; brine; Tengger Desert

我国盐湖分布范围广、数量多,主要分布在西藏、青海、内蒙古和新疆四省区。在地理环境和气候条件的控制下,盐湖分布呈现出明显的区域性和地带性,藏北(羌塘)高原、阿里高原、柴达木盆地、可可西里、阿拉善高原、准噶尔盆地和塔里木盆地等是盐湖分布的集中地区。其中阿拉善高原位于内蒙古西部,分布有著名的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠,在这些沙漠的沙丘洼地间散布着许多盐湖,这些盐湖的形成演化与青海和西藏的盐湖不同,与沙漠演化相伴相生是其最大的特征。腾格里沙漠盐湖区位于阿拉善高原南部,区内盆地大都在晚第三纪至第四纪形成,盐湖面积都比较小,表现为小盐湖群集<sup>[1]</sup>。

盐湖卤水的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值可以判定盐湖的蒸发浓缩程度、补给来源和控制因素,进而推测在不同演化时期盐湖周围环境的变化。氯在自然界中存在 $^{37}\text{Cl}$ 和 $^{35}\text{Cl}$ 两种稳定同位素,二者丰度分别为24.22%和75.78%<sup>[2]</sup>。由于二者相对质量差达5.7%<sup>[3]</sup>,相对大的质量差使得氯同位素在自然界的不同地质体中存在较大的分馏特性。大量研究表明,随着蒸发浓缩的进行和盐类矿物的析出, $^{37}\text{Cl}$ 相对 $^{35}\text{Cl}$ 优先进入盐类沉积物中,残余卤水和对应析出矿物的 $\delta^{37}\text{Cl}$ 值不断降低,所以晚期阶段的析出盐比早期阶段的析出盐更贫 $\delta^{37}\text{Cl}$ 值,因而 $\delta^{37}\text{Cl}$ 值是反映卤水浓缩演化阶段的良好指标<sup>[4-7]</sup>。在盐湖的形成和演化过程中,蒸发析盐和补给水会影响氯同位素组成<sup>[8]</sup>。因此,研究盐湖卤水中 $\delta^{37}\text{Cl}$ 值能反映卤水的蒸发程度和可能的补给水来源,同时也为研究盐湖的演化提供依据。

本文通过对腾格里沙漠地区盐湖卤水 $\delta^{37}\text{Cl}$ 值及水化学的研究,尝试阐明研究区 $\delta^{37}\text{Cl}$ 值分布特征和探讨盐湖卤水的补给来源和控制因素,为利用氯同位素方法深入理解盐湖卤水的演化及成盐作用过程提供重要资料和依据。

## 1 地质背景

腾格里沙漠地区在大地构造上位于华北地台阿拉善地块的东南缘,多年平均年降水量在140 mm左右,年蒸发量高达3000 mm<sup>[1]</sup>。沙漠形成于隆起带间的拗陷带,其形成最初始于加里东期产生的褶皱隆起及所伴生的深大断裂,后经海西运动的进一步活化而形成;由于周缘板块的相互作用,形成了一系列相间排列的断陷、拗陷盆地;新生代时期的沉积则是在白垩纪末期开阔湖盆河湖相沉积的基础之上发展起来的<sup>[9]</sup>(图1)。腾格里沙漠地区盐湖分布受控于阿拉善弧形构造体系,该弧形构造体系与祁吕贺兰山字型构造几乎同步形成、发展和定型,始于晚古生代或更早,成熟于第三纪<sup>[10]</sup>。新近纪末期的晚喜马拉雅运动,使得印度板块向欧亚板块快速楔入,青藏高原迅速隆升<sup>[11]</sup>,目前被学界普遍接受的青藏高原东北缘的最前缘位置是祁连山北缘及河西走廊地区<sup>[12-14]</sup>,关于青藏高原扩展是否影响到更北的阿拉善地区,目前的详细研究较少<sup>[15]</sup>。

前人研究认为腾格里沙漠至少在1.8 MaBP开始形成<sup>[17]</sup>。在末次冰期早—中期腾格里沙漠的范围还很小,在末次冰盛期沙漠向东南方向大规模扩展,奠定了现代沙漠环境的格局<sup>[18]</sup>。在晚更新世,腾格里沙漠及周边地区为古大湖,一些学者称之为“腾格里大湖”<sup>[19-20]</sup>。研究区第三系地层中存在大量含膏盐的红层<sup>[21-22]</sup>。由于岩性与构造配置构成了山前拗陷型的自流盆地,所以在腾格里沙漠侏罗系、白垩系以及第三系地层中均可有承压水分布<sup>[23]</sup>。贺兰山西缘—乌兰布和沙漠一带潜水为微咸水、承压水为淡水<sup>[24-26]</sup>,吉兰泰西部和南部第三系地层中存在矿化度为7.46 g/L的Cl-Na型咸水<sup>[26]</sup>,而腾格里沙漠西南的地下水几乎都为淡水<sup>[27]</sup>。

## 2 样品的采集与实验方法

### 2.1 样品采集

本研究针对腾格里沙漠地区典型盐湖进行野外考察,腾格里沙漠地区由于气候干旱,河流少,水量不大。

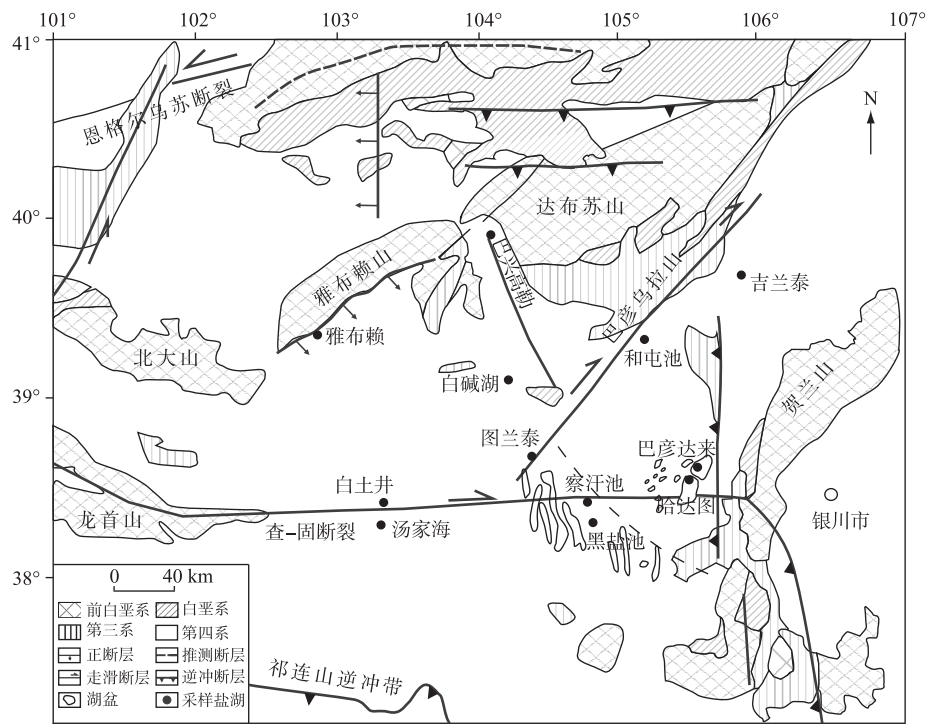


图 1 腾格里沙漠地区采样位置分布图及地质构造简图(据文献<sup>[16]</sup>修改)

Fig.1 Sketch map of sampling location and geology in the Tengger Desert

表 1 采样点及野外编号

Tab.1 Sampling points and serial numbers

编号	采样点	经纬度	湖面 海拔/m	卤水类型
1	巴兴高勒	39°59'00"N, 104°08'00"E	1200	湖表卤水
2	雅布赖	39°23'00"N, 102°50'00"E	1230	晶间卤水
3	白碱湖	39°06'00"N, 104°08'00"E	1285	湖表卤水
4	汤家海	38°17'00"N, 103°17'00"E	1323	湖表卤水
5	白土井	38°27'00"N, 103°17'00"E	1370	湖表卤水
6	图兰泰	38°39'00"N, 104°18'00"E	1318	湖表卤水
7	黑盐池	38°18'00"N, 104°42'00"E	1316	湖表卤水
8	察汗池	38°24'00"N, 104°40'00"E	1313	湖表卤水
9	和屯池	39°22'00"N, 105°01'00"E	1162	晶间卤水
10	吉兰泰	39°45'00"N, 105°42'00"E	1023	晶间卤水
11	巴彦达来	38°35'11"N, 105°24'21"E	1294	晶间卤水
12	哈达图	38°31'06"N, 105°21'37"E	1265	晶间卤水

虽然湖泊众多,但绝大多数已演化为盐湖,本研究在腾格里沙漠腹地及周围采集了 12 个盐湖的卤水样品(图 1),基本上代表了腾格里沙漠地区的盐湖,具体采样位置见表 1.

在采样期间发现哈达贺休湖、雅布赖湖、和屯池、吉兰泰盐湖、巴彦达来和哈达图没有湖表卤水,其中有些盐湖的湖表被粉砂掩盖,已演化为砂下湖,故只采集到其孔隙卤水或晶间卤水,其余样品皆为湖表卤水. 卤水样品直接用塑料桶采集,采样前,先用待取卤水洗涤塑料桶 5 次,每个样品采样量为 5 L,在野外进行现场密封、编号和记录,以便送实验室分析. 表 1 列出了腾格里沙漠地区本次研究所采集盐湖卤水样品的基本信息.

2.2 实验方法

氯同位素测试在中国科学院青海盐湖研究所盐湖化学分析测试中心完成,使用正热电离质谱法对样品进行分析.

实验所用试剂和仪器: ISL 标准样品; 石墨悬浮液由石墨(SP)与 80%乙醇、20%去硼水混合配制而成; H-型阳离子交换树脂; BaCO<sub>3</sub>: 99.998% (上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产); Cs-型阳离子交换树脂; 钼带; 实验用水为二次蒸馏水再经二次亚沸蒸馏所得; 氯同位素检测仪器为 Triton 固体热电离质谱仪,由赛默

飞世尔科技生产,灵敏度 $\geq 3\text{ion}/\mu\text{mol}$ .  
具体测试过程及方法见文献[28-30],检测离子为 $^{133}\text{Cs}_2\text{Cl}^+$ 复合离子. 测得样品的氯同位素值用 $\delta^{37}\text{Cl}$  值表示:

$$\delta^{37}\text{Cl}(\text{‰}) = \left\{ \left[ \left( \frac{{}^{37}\text{Cl}}{{}^{35}\text{Cl}} \right)_{\text{样品}} - \left( \frac{{}^{37}\text{Cl}}{{}^{35}\text{Cl}} \right)_{\text{标准}} \right] / \left( \frac{{}^{37}\text{Cl}}{{}^{35}\text{Cl}} \right)_{\text{标准}} \right\} \times 1000 \quad (1)$$

标准物质均为 ISL 354 国际参考标准,推荐值为 $(^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl})_{\text{标准}} = 0.319030 \pm 0.000071 (2\sigma)$ ,测试精度为 $0.09\text{‰}$ .

3 结果与讨论

本次研究所考察盐湖,除个别之外,大部分都有大量的石盐、芒硝和石膏等盐类矿物与卤水共存. 研究区盐湖卤水阳离子以 Na 为主,阴离子主要以 Cl 和  $\text{SO}_4$  为主,pH 值显示研究区盐湖卤水为弱碱性, $\delta^{37}\text{Cl}$  值变化范围为 $-0.10\text{‰} \sim 1.36\text{‰}$ ,平均值为 $0.55\text{‰}$ (表2).

根据瓦里亚什科对盐湖卤水的分类得出研究区盐湖卤水的水化学类型为硫酸盐型卤水(表3),其中10个为硫酸钠亚型卤水,2个盐湖为硫酸镁亚型. 硫酸钠亚型卤水的 $\delta^{37}\text{Cl}$  值范围为 $-0.10\text{‰} \sim 1.36\text{‰}$ ,平均值为 $0.56\text{‰}$ ,硫酸镁亚型卤水的 $\delta^{37}\text{Cl}$  值范围为 $0.14\text{‰} \sim 0.82\text{‰}$ ,平均值为 $0.48\text{‰}$ ,研究区内硫酸钠亚型卤水中的 $\delta^{37}\text{Cl}$  值略大于硫酸镁亚型卤水中的 $\delta^{37}\text{Cl}$  值.

研究区盐湖卤水中的离子以 Na、Cl 为主,本区的干旱气候是高矿化度的主要影响因素,Br 含量在本区比较低,主要由于本区盐湖皆为陆相成因,补给源为低 Br 的地下水或降水<sup>[31]</sup>. 本次研究样品的 $\delta^{37}\text{Cl}$  值(平均值为 $0.55\text{‰}$ ),远高于同为现代盐湖的柴达木盆地盐湖卤水的 $\delta^{37}\text{Cl}$  值(平均值为 $-0.97\text{‰}$ <sup>[6]</sup>),也略高于柴达木盆地硫酸镁亚型盐湖卤水的 $\delta^{37}\text{Cl}$  值(图2). 以往对柴达木盆地的研究已经说明,硫酸镁亚型盐湖卤水的 $\delta^{37}\text{Cl}$  值略大于氯化物型盐湖卤水的 $\delta^{37}\text{Cl}$  值(图2),因此归纳盐湖卤水中 $\delta^{37}\text{Cl}$  值的关系为:硫酸钠亚型>硫酸镁亚型>氯化物型. 表明研究区所处的盐湖演化阶段要远低于柴达木盆地盐湖演化阶段,这与“柴达木统一古湖”形成于渐新世<sup>[32]</sup>,经历了长时期的蒸发浓缩演化有关,而研究区内“腾格里大湖”形成于更新世<sup>[19,45]</sup>,盐湖的演化比较短,成盐厚度薄(最多几米),如吉兰泰盐湖,石盐和芒硝沉积厚度仅为 $3 \sim 4\text{ m}$ <sup>[46]</sup>.

研究区 $\delta^{37}\text{Cl}$  值与河水和石盐的 $\delta^{37}\text{Cl}$  值非常接近,且在油田水和雨水的 $\delta^{37}\text{Cl}$  值范围之内,而该地区盐湖并没有油田水和长期性地表河水的补给,因而推测该地区盐湖卤水的 $\delta^{37}\text{Cl}$  值可能与周围山区降雨补给形成的地下水以及该区存在的第三系咸水<sup>[26]</sup>有关.

表2 腾格里沙漠盐湖卤水水化学及氯同位素的组成  
Tab.2 Hydrochemical composition and chlorine isotopic compositions of salt lakes

编号	采样点	离子的质量浓度/(g/L) *									Br <sup>-</sup> / (mg/L) *	pH	$\delta^{37}\text{Cl}/\text{‰}$
		K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	矿化度			
1	巴兴高勒	5.42	104.38	0.14	3.49	129.35	61.70	1.46	<0.005	305.20	36.80	7.99	1.13
2	雅布赖	1.29	103.45	0.47	3.40	152.80	24.96	0.18	<0.005	286.45	2.27	7.62	0.28
3	白碱湖	1.03	68.85	0.51	5.37	62.18	83.06	0.07	0.03	221.07	2.48	7.72	0.55
4	汤家海	0.91	85.22	0.41	1.60	98.32	52.90	0.27	<0.005	239.50	1.20	7.54	0.19
5	白土井	4.82	75.01	0.54	1.28	98.41	35.40	0.18	<0.005	215.55	0.80	7.69	1.04
6	图兰泰	0.58	26.73	0.50	2.04	32.41	21.71	0.12	<0.005	84.02	0.87	7.60	0.80
7	黑盐池	0.96	20.66	0.17	1.64	31.36	8.48	0.24	0.03	63.43	1.50	7.55	0.06
8	察汗池	4.15	117.85	0.31	6.70	184.78	27.74	0.28	<0.005	341.66	8.58	7.48	-0.10
9	和屯池	2.25	113.93	0.19	11.02	178.34	42.72	0.33	<0.005	348.63	23.75	7.32	0.14
10	吉兰泰	2.27	102.30	0.25	10.53	166.70	32.55	0.25	<0.005	314.73	1.88	7.89	0.82
11	巴彦达来	4.30	134.61	0.19	3.92	134.63	119.45	0.72	<0.005	397.46	24.43	7.91	0.31
12	哈达图	3.31	142.17	0.30	2.82	153.78	103.72	0.49	<0.005	406.35	51.90	7.57	1.36

\* 表示来源于文献[31].

表 3 主要水化学组成的克当量值及水化学类型

Tab.3 The gram equivalent value of the main hydrochemical composition and hydrochemical type

编号	采样点	离子毫克当量值/mEq					分类系数				水化学类型
		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Kn1	Kn2	Kn3	Kn4	
1	巴兴高勒	0.01	1.98	106.23	0.58	24.04	0.08	4.40	183.63	3.44	硫酸钠亚型
2	雅布赖	0.01	0.25	43.70	1.98	23.81	0.01	1.70	22.13	0.13	硫酸钠亚型
3	白碱湖	0.09	0.10	147.90	2.18	38.25	0.01	3.66	67.86	0.08	硫酸钠亚型
4	汤家海	0.01	0.38	94.20	1.75	11.40	0.03	7.19	53.76	0.22	硫酸钠亚型
5	白土井	0.01	0.26	64.13	2.35	9.28	0.02	5.54	27.31	0.12	硫酸钠亚型
6	图兰泰	0.02	0.19	42.67	2.36	16.04	0.01	2.33	18.09	0.09	硫酸钠亚型
7	黑盐池	0.10	0.38	16.83	0.81	13.02	0.03	1.25	20.78	0.58	硫酸钠亚型
8	察汗池	0.01	0.38	47.37	1.27	45.77	0.01	1.02	37.28	0.31	硫酸钠亚型
9	和屯池	0.01	0.44	72.36	0.77	74.66	0.01	0.97	93.68	0.59	硫酸镁亚型
10	吉兰泰	0.01	0.34	56.04	1.03	72.52	0.01	0.77	54.25	0.34	硫酸镁亚型
11	巴彦达来	0.01	0.96	202.32	0.77	26.56	0.04	7.44	261.95	1.26	硫酸钠亚型
12	哈达图	0.01	0.63	170.14	1.18	18.50	0.03	8.68	144.06	0.55	硫酸钠亚型

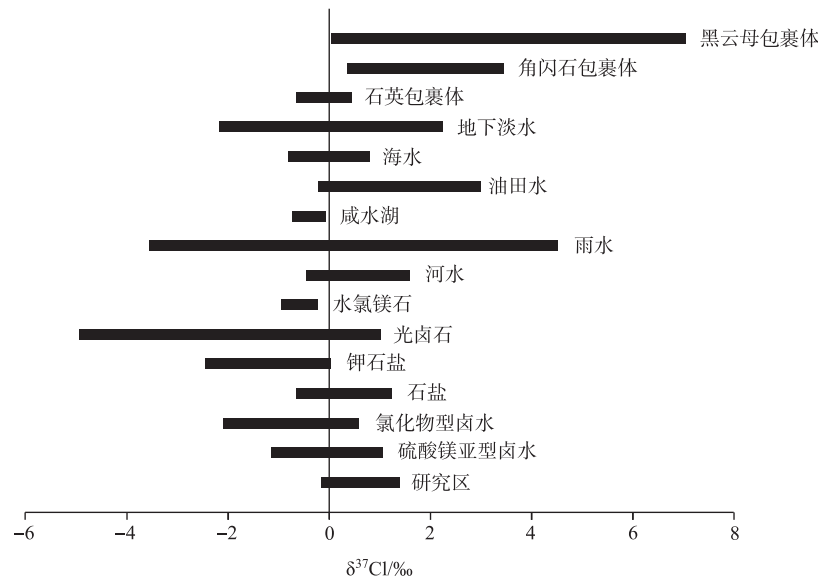


图 2 不同地质体中  $\delta^{37}\text{Cl}$  值的范围及研究区  $\delta^{37}\text{Cl}$  值的范围 (数据来源:硫酸镁亚型卤水<sup>[32-33]</sup>; 氯化物型卤水<sup>[33]</sup>;石盐<sup>[33-35]</sup>;钾石盐<sup>[4,36]</sup>;光卤石<sup>[4,36]</sup>;水氯镁石<sup>[7,36]</sup>; 河水<sup>[33,37]</sup>;雨水<sup>[38-39]</sup>;咸水湖<sup>[33]</sup>;油田水<sup>[33]</sup>;海水<sup>[40]</sup>;地下淡水<sup>[41]</sup>; 石英包裹体<sup>[42]</sup>;角闪石包裹体<sup>[43]</sup>;黑云母包裹体<sup>[42,44]</sup>)

Fig.2 Ranges of  $\delta^{37}\text{Cl}$  values in different geological bodies and in the investigated area

溴氯系数 ( $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ ) 在卤水和蒸发盐的研究中已经被证明是一种反映其浓缩程度的良好指标<sup>[47-48]</sup>. 研究区内巴兴高勒、和屯池、巴彦达来和哈达图的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值与  $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$  呈高度正相关,拟合得出方程:  $y = 0.15x + 0.12$  ( $n = 4, R^2 = 0.98$ ) (图 3).

一般而言,随着盐湖的演化, $\delta^{37}\text{Cl}$  值逐渐降低,而  $\text{Br} / \text{Cl}$  比值逐渐增加,而此处 4 个盐湖的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值与  $\text{Br} / \text{Cl}$  比值呈高度正相关,相关系数  $R^2 = 0.98$ ,推测这 4 个盐湖不完全由于蒸发浓缩形成的,可能与该地区微咸的潜水和第三系咸水补给有关;另外 8 个盐湖卤水样品的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值与  $\text{Br} / \text{Cl}$  比值呈负相关,应该这是由于蒸

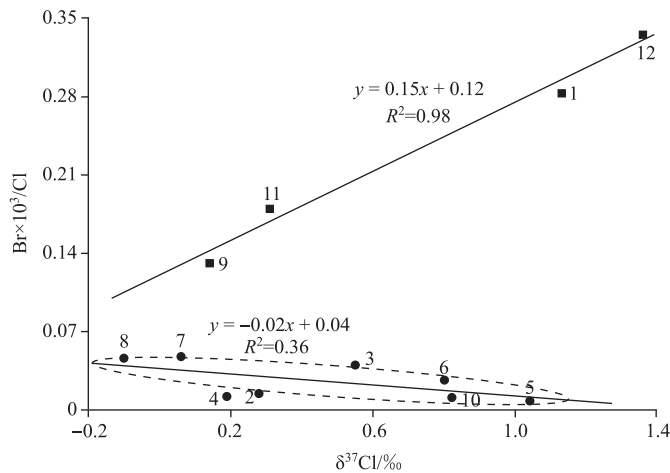


图3 研究区盐湖卤水的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值与  $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$  的关系(1、巴兴高勒, 2、雅布赖, 3、白碱湖, 4、汤家海, 5、白土井, 6、图兰泰, 7、黑盐池, 8、察汗池, 9、和屯池, 10、吉兰泰, 11、巴彦达来, 12、哈达图)

Fig.3  $\delta^{37}\text{Cl}$  value vs.  $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$  in the brine of the investigated area

发浓缩而成。

研究区同属阿拉善块体,其  $\delta^{37}\text{Cl}$  值大体上呈现出西南低、东北高的趋势。腾格里沙漠地区的  $\delta^{37}\text{Cl}$  高值区主要为白土井、图兰泰、巴兴高勒、吉兰泰和哈达图几个盐湖(图4)。巴兴高勒和哈达图的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值前面已述及应该与微咸潜水和第三系咸水的补给控制有关。其他3个盐湖中(图4),白土井位于查-固走滑断裂区,图兰泰位于巴彦乌拉山走滑断裂区,推测这2个盐湖的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值异常偏高可能与断层控制的地下水有关;而吉兰泰邻近巴彦乌拉山,且靠近山系的一侧平行巴彦乌拉山断裂分布有第三系地下咸水及两个较大

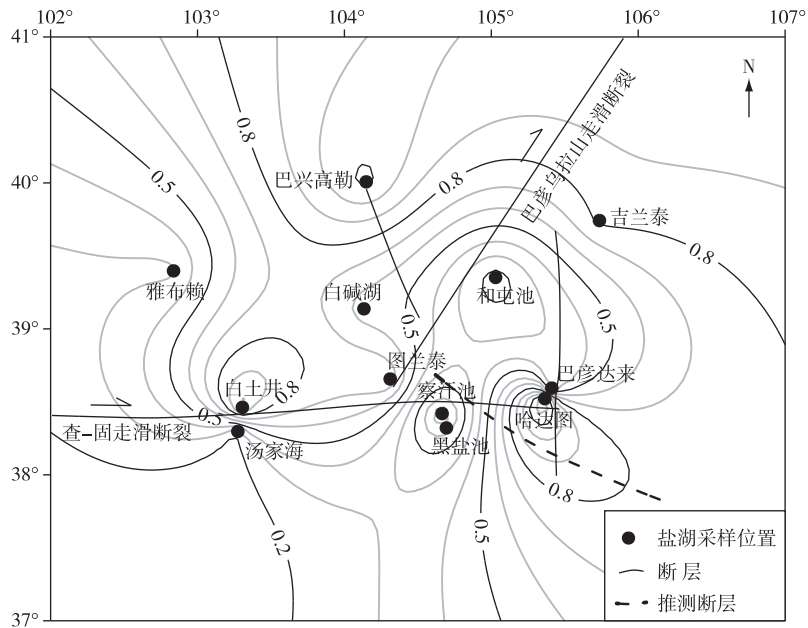


图4 腾格里沙漠地区氯同位素等值线图(‰)

Fig.4 Contour map of the chlorine isotope in Tengger Desert

的泉眼,推测吉兰泰也应该受到巴彦乌拉山断裂地下水补给的控制.此外由于达布苏山广泛分布着中元古、华力西晚期的钾长花岗岩、黑云母花岗岩和花岗闪长岩等基岩,因而推测巴兴高勒湖的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值除了受到断层地下水和第三系咸水的共同控制外,可能也与地下水对基岩的侵蚀(水-岩作用)有关.

#### 4 结论

1) 研究区盐湖卤水的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值变化范围为  $-0.10\text{‰} \sim 1.36\text{‰}$ , 平均值为  $0.55\text{‰}$ , 远高于柴达木盆地盐湖卤水的  $\delta^{37}\text{Cl}$  平均值  $-0.97\text{‰}$ , 其中硫酸钠亚型卤水的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值范围为  $-0.10\text{‰} \sim 1.36\text{‰}$ , 平均值为  $0.56\text{‰}$ , 硫酸镁亚型卤水的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值范围为  $0.14\text{‰} \sim 0.82\text{‰}$ , 平均值为  $0.48\text{‰}$ . 无论柴达木盆地还是研究区, 硫酸钠亚型盐湖的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值大于硫酸镁亚型盐湖的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值, 而硫酸镁亚型盐湖的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值大于氯化物型盐湖的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值, 这些变化规律与盐湖的水化学演化历史有关, 腾格里沙漠地区盐湖处于盐湖演化早期, 演化时间较短.

2) 研究区 4 个盐湖的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值与  $\text{Br}/\text{Cl}$  比值呈高度正相关, 其原因可能与微咸潜水和第三系咸水的补给有关, 导致咸水中含量较多的 Br 重新补给到盐湖中, 使得这 4 个盐湖卤水的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值与  $\text{Br}/\text{Cl}$  比值与正常规律相反, 另外 8 个盐湖卤水样品的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值与  $\text{Br}/\text{Cl}$  比值呈负相关, 应该主要归因于蒸发浓缩作用.

3) 腾格里沙漠地区东北部盐湖卤水的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值整体上大于西南部盐湖卤水的  $\delta^{37}\text{Cl}$  值, 应该由于区域地下水的类型不同所致, 区内  $\delta^{37}\text{Cl}$  值高的盐湖可能与第三系咸水通过区域深断裂的补给作用以及水-岩作用有关.

致谢: 在实验和论文撰写过程中得到中国科学院青海盐湖研究所马云麒老师和中国科学院地球化学研究所罗重光老师的精心指导, 在此一并感谢!

#### 5 参考文献

- [1] Pang XL, Yin H. Hydrochemical characteristics in the saline lakes on the Alxa Plateau. *Acta Geologica Sichuan*, 2009, **29** (2): 199-203. [庞西磊, 尹辉. 阿拉善高原盐湖湖水化学特征的主成分分析研究. 四川地质学报, 2009, **29**(2): 199-203.]
- [2] Rosman KJR, Taylor PDP. Isotopic compositions of the elements 1997. *Pure and Applied Chemistry*, 1998, **70**(1): 217-235.
- [3] Tan HB, Ma HZ, Zhang XY *et al.* Fractionation of chlorine isotope in salt mineral sequences and application: Research on sedimentary stage of ancient salt rock deposit in Tarim Basin and western Qaidam Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, **25** (4): 955-962. [谭红兵, 马海州, 张西营等. 蒸发岩序列中氯化物盐的氯同位素分馏效应及应用——兼论塔里木盆地、柴达木盆地古代岩盐的沉积阶段. 岩石学报, 2009, **25**(4): 955-962.]
- [4] Vengosh A, Chivas AR, McCulloch MT. Direct determination of boron and chlorine isotopic compositions in geological materials by negative thermal-ionization mass spectrometry. *Chemical Geology Isotope Geoscience*, 1989, **79**(4): 333-343.
- [5] Eggenkamp HGM, Kreulen R, Groos AFKV. Chlorine stable isotope fractionation in evaporites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**(24): 5169-5175.
- [6] Liu WG, Xiao YK, Sun DP *et al.* Chlorine isotopic composition in Qaidam Basin. *Geochimica*, 1996, **25**(3): 296-303. [刘卫国, 肖应凯, 孙大鹏等. 柴达木盆地氯同位素组成特征. 地球化学, 1996, **25**(3): 296-303.]
- [7] Luo CG, Xiao YK, Ma HZ *et al.* Stable isotope fractionation of chlorine during evaporation of brine from a saline lake. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(14): 1242-1251. [罗重光, 肖应凯, 马海州等. 盐湖卤水蒸发过程中的稳定氯同位素分馏. 科学通报, 2012, **57**(14): 1242-1251.]
- [8] Liu WG, Xiao YK, Peng ZC. Preliminary study of hydrochemistry characteristics of boron and chlorine isotopes of salt lake brines in Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 1999, **7**(3): 8-14. [刘卫国, 肖应凯, 彭子成. 柴达木盆地盐湖卤水硼、氯同位素的水化学特性探讨. 盐湖研究, 1999, **7**(3): 8-14.]
- [9] Liu ZM. Research on material composition of Salt Lakes in Tengger Desert region. *Journal of Salt Lake Research*, 2000, **8** (3): 21-26. [刘振敏. 腾格里沙漠区盐湖物质成分研究. 盐湖研究, 2000, **8**(3): 21-26.]
- [10] Zhou LR. Basic features of Alashan arc tectonic belt. *Northwestern Geology*, 1989, **1**(2): 1-8. [周良仁. 阿拉善弧形构造带的基本特征. 西北地质, 1989, **1**(2): 1-8.]
- [11] Jia CZ, He DF, Lu JM. Episodes and geodynamic setting of Himalayan movement in China. *Oil & Gas Geology*, 2004, **25**

- (2): 121-125. [贾承造, 何登发, 陆洁民. 中国喜马拉雅运动的期次及其动力学背景. 石油与天然气地质, 2004, **25**(2): 121-125.]
- [12] Meyer B, Tapponnier P, Bourjot L *et al.* Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet plateau. *Geophysical Journal International*, 1998, **135**(135): 1-47.
- [13] Palumbo L, Hetzel R, Tao M *et al.* Deciphering the rate of mountain growth during topographic presteady state: An example from the NE margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 2009, **28**(4): 333-345.
- [14] Zheng WJ, Zhang PZ, Ge WP *et al.* Late Quaternary slip rate of the South Heli Shan Fault (northern Hexi Corridor, NW China) and its implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 2013, **32**(2): 271-293.
- [15] Yu JX. Active tectonics in the southern Gobi-Alashan block and its response to the interactions of the adjacent crustal blocks [Dissertation]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2016. [俞晶星. 阿拉善地块南部构造活动及其对周边地块相互作用的响应[学位论文]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2016.]
- [16] Zhang J, Li JY, Li YF *et al.* The Cenozoic deformation of the Alxa Block in Central Asia-Question on the northeastern extension of the Altyn Tagh Fault in Cenozoic Time. *Acta Geologica Sinica*, 2007, **81**(11): 1481-1497. [张进, 李锦轶, 李彦峰等. 阿拉善地块新生代构造作用——兼论阿尔金断裂新生代东向延伸问题. 地质学报, 2007, **81**(11): 1481-1497.]
- [17] Yang D, Fang XM, Dong GR *et al.* Aeolian deposit evidence for formation and evolution of the Tengger Desert in the north of China since early Pleistocene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, **26**(1): 93-100. [杨东, 方小敏, 董光荣等. 早更新世以来腾格里沙漠形成与演化的风成沉积证据. 海洋地质与第四纪地质, 2006, **26**(1): 93-100.]
- [18] Qiang MR, Li S, Jin M *et al.* Aeolian deposits on the southeastern margin of Tengger Desert and desert evolution during the last 60000 years. *Journal of Desert Research*, 2000, **20**(3): 256-259. [强明瑞, 李森, 金明等. 60 ka 来腾格里沙漠东南缘风成沉积与沙漠演化. 中国沙漠, 2000, **20**(3): 256-259.]
- [19] Zhang HC, Wunnemann B. Preliminary study on the chronology of lacustrine deposits and determination of high palaeo-lake level in Tengger Desert since late Pleistocene. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 1997, **33**(2): 87-91. [张虎才, Wunnemann B. 腾格里沙漠晚更新世以来湖相沉积年代学及高湖面期的初步确定. 兰州大学学报: 自然科学版, 1997, **33**(2): 87-91.]
- [20] Wang NA, Li ZL, Cheng HY *et al.* High lake levels on Alashan Plateau during the Late Quaternary. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(17): 1367-1377. [王乃昂, 李卓仑, 程弘毅等. 阿拉善高原晚第四纪高湖面与大湖期的再探讨. 科学通报, 2011, **56**(17): 1367-1377.]
- [21] Wang PY, Wang BY. Tertiary system and its fauna of Alxa area, Nei Mongol, China. *Northwest Geoscience*, 1998, **19**(2): 1-37. [王培玉, 王伴月. 内蒙古阿拉善地区的第三系及其动物群. 西北地质科学, 1998, **19**(2): 1-37.]
- [22] Tian Y. The Paleogene and Neogene strata in the Northern margin area of Tengger Desert [Dissertation]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. [田颖. 腾格里沙漠北缘地区古近纪、新近纪地层研究[学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2012.]
- [23] Liu ZM. Hydrochemistry of Tengger Desert region. *Geology of Chemical Minerals*, 1998, **20**(1): 42-49. [刘振敏. 腾格里沙漠地区水化学特征. 化工矿产地质, 1998, **20**(1): 42-49.]
- [24] Ding Z, Ma J, Zhao W *et al.* Profiles of geochemical and isotopic signatures from the Helan Mountains to the eastern Tengger Desert, northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 2013, **90**: 77-87.
- [25] Jiang L. Study on hydrochemical composition formation and evolution mechanisms of the groundwater in oasis of arid areas—A case of Yaoba oasis in Alashan [Dissertation]. Xi'an: Chang'an University, 2009. [姜凌. 干旱区绿洲地下水水化学成分形成及演化机制研究——以阿拉善腰坝绿洲为例[学位论文]. 西安: 长安大学, 2009.]
- [26] Guo JY. Groundwater environmental evolution in Jilantai desert basin and safety risk control of drinking water in high fluoride area [Dissertation]. Xi'an: Chang'an University, 2014. [郭晋燕. 吉兰泰沙漠盆地地下水环境特征及高氟区饮用水安全风险控制[学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.]
- [27] Ding ZY, Ma JZ, He JH. Geochemical evolution of groundwater in the southwest of Tengger desert, NW of China. *Arid Land Geography*, 2009, **32**(6): 948-957. [丁贞玉, 马金珠, 何建华. 腾格里沙漠西南缘地下水水化学形成特征及演化. 干旱区地理: 汉文版, 2009, **32**(6): 948-957.]
- [28] Xiao YK, Zhang CG. High precision isotopic measurement of chlorine by thermal ionization mass spectrometry of  $\text{Cs}2\text{Cl}^+$  ion. *International Journal of Mass Spectrometry & Ion Processes*, 1992, **116**(3): 183-192.



- [29] Xiao YK, Zhou YM, Liu WG. Precise measurement of chlorine isotopes based on  $\text{Cs}_2\text{Cl}_2$  by thermal ionization mass spectrometry. *Analytical Letters*, 1995, **28**(7): 1295-1304.
- [30] Zhang CG, Xiao YK. High precision isotopic measurement of chlorine by thermal ionization mass spectrometry. *Journal of Salt Lake Research*, 1993, **1**(2): 6-10. [张崇耿, 肖应凯. 高精度热电离质谱法测定氯同位素. 盐湖研究, 1993, **1**(2): 6-10.]
- [31] Zhang YX, Han FQ, Ma RY *et al.* Hydrochemical characteristics of salt lakes in western region of inner Mongolia, China. *Journal of Salt Lake Research*, 2013, **21**(3): 17-24. [张燕霞, 韩凤清, 马茹莹等. 内蒙古西部地区盐湖化学特征. 盐湖研究, 2013, **21**(3): 17-24.]
- [32] Zhang PX ed. Saline lake in the Qaidam Basin. Beijing: Science Press, 1987. [张彭熹. 柴达木盆地盐湖. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [33] Liu WG, Xiao YK, Wang QZ *et al.* Chlorine isotopic geochemistry of salt lakes in the Qaidam Basin, China. *Chemical Geology*, 1997, **136**(3): 271-279.
- [34] Eastoe CJ, Long A, Land LS *et al.* Stable chlorine isotopes in halite and brine from the Gulf Coast Basin: brine genesis and evolution. *Chemical Geology*, 2001, **176**(1): 343-360.
- [35] Sharp ZD, Mercer JA, Jones RH *et al.* The chlorine isotope composition of chondrites and Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, **107**: 189-204.
- [36] Xiao YK, Liu WG, Zhang CG. The preliminary investigation on chlorine isotopic fractionation during the crystallization of saline minerals in salt lake. *Journal of Salt Lake Research*, 1994, **2**(3): 35-40. [肖应凯, 刘卫国, 张崇耿. 盐湖中盐类矿物沉积过程中氯同位素效应的初步研究. 盐湖研究, 1994, **2**(3): 35-40.]
- [37] Eastoe CJ. Stable chlorine isotopes in arid non-marine basins: Instances and possible fractionation mechanisms. *Applied Geochemistry*, 2016, **74**: 1-12.
- [38] Koehler G, Wassenaar LI. The stable isotopic composition ( $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ ) of dissolved chloride in rainwater. *Applied Geochemistry*, 2010, **25**(1): 91-96.
- [39] Xiao YK, Jin L, Liu WG *et al.* Chlorine isotopic composition of Da Qaidam Lake. *Chinese Science Bulletin*, 1994, **39**(14): 1319-1322. [肖应凯, 金琳, 刘卫国等. 大柴达木湖的氯同位素组成. 科学通报, 1994, **39**(14): 1319-1322.]
- [40] Xiao YK, Zhou YM, Liu WG *et al.* The character of isotopic compositions of chlorine in ocean water. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, **20**(4): 406-408. [肖应凯, 周引民, 刘卫国等. 海水的氯同位素组成特征. 矿物岩石地球化学通报, 2001, **20**(4): 406-408.]
- [41] Xu JX, Ma HZ, Xiao YK *et al.* Stable chlorine isotope and its research on applied geochemistry. *Journal of Salt Lake Research*, 2008, **16**(1): 51-59. [许建新, 马海州, 肖应凯等. 稳定氯同位素及其应用地球化学研究. 盐湖研究, 2008, **16**(1): 51-59.]
- [42] Eastoe CJ, Guilbert JM. Stable chlorine isotopes in hydrothermal processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, **56**(12): 4247-4255.
- [43] Magenheimer AJ, Spivack AJ, Michael PJ *et al.* Chlorine stable isotope composition of the oceanic crust: Implications for Earth's distribution of chlorine. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, **131**(3): 427-432.
- [44] Willmore CC, Boudreau AE, Spivack A *et al.* Halogens of Bushveld Complex, South Africa:  $\delta^{37}\text{Cl}$  and Cl/F evidence for hydration melting of the source region in a back-arc setting. *Chemical Geology*, 2002, **182**(2): 503-511.
- [45] Pachur HJ, Wünnemann B, Zhang H. Lake evolution in the Tengger Desert, Northwestern China, during the last 40,000 years. *Quaternary Research*, 1995, **44**(2): 171-180.
- [46] Zheng XY ed. Salt lakes of China. Beijing: Science Press, 2002. [郑喜玉. 中国盐湖志. 北京: 科学出版社, 2002.]
- [47] Tan HB, Ma HZ, Ma WD *et al.* Research on geological and geochemical characteristics of paleo-salt rock and its potash ore formation in western Tarim Basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2004, **23**(3): 194-199. [谭红兵, 马海州, 马万栋等. 塔里木盆地西部古岩盐地质地球化学特征与成钾条件分析. 矿物岩石地球化学通报, 2004, **23**(3): 194-199.]
- [48] Zhang XY, Ma HZ, Tan HB *et al.* Preliminary studies of on geochemistry and post-depositional change of Dong Tai potash deposit in Laos. *Mineral Deposits*, 2010, **29**(4): 713-721. [张西营, 马海州, 谭红兵等. 老挝东泰钾盐矿床地球化学及其沉积后变化初步研究. 矿床地质, 2010, **29**(4): 713-721.]