

# 察尔汗盐湖晶间卤水痕量 元素分布特征研究

刘兴起 于升松 邵明显

(中国科学院盐湖研究所 西宁 810008)

**提要** 1991 年 9 月,定深采集了察尔汗盐湖  $S_4$  层晶间卤水的 85 个样品,利用 ARL-3520 等离子光谱仪对样品中 16 种痕量元素进行了分析测试,根据测试结果对  $S_4$  层晶间卤水痕量元素集散特征进行了研究。结果表明,察尔汗盐湖  $S_4$  层晶间卤水中的 16 种痕量元素比海水富集;痕量元素随卤水的不断浓缩,其含量趋于增高;在  $S_4$  层晶间卤水水平方向上,痕量元素的含量出现东高西低、南北变化不大的分异现象;垂直方向上表现为随深度的增加其含量出现增高的趋势。

**关键词** 察尔汗盐湖 晶间卤水 痕量元素

**学科分类号** P59

察尔汗盐湖以其丰富的盐类矿产资源引起了国内外许多学者的广泛注视,自 70 年代以来,许多部门对察尔汗盐湖卤水的水化学组成、水化学变化规律、水动态等问题均进行过大量的研究(于升松等,1981;杨丙章,1981;张彭熹,1987)。然而,对察尔汗盐湖卤水痕量元素的研究工作却开展得较晚。本文比较系统地探讨察尔汗盐湖  $S_4$  层晶间卤水中 16 种痕量元素的分布特征,为进一步在该区进行痕量元素地球化学的研究奠定基础。

## 1 样品的采集与分析测试

### 1.1 样品的采集

研究区为青海钾肥厂一期工程开采卤水矿的区段——首采区,其位于达布逊湖东侧,面积约为  $320\text{km}^2$ (图 1)。1991 年 9 月,使用定深取样器对研究区 51 个钻孔定深采集了晶间卤水样品。从每个孔的水面下 0.5m 开始取第一个样,然后按距地面下 3m 的等间距取样至井底,试孔深情况,每个孔一般可取到 3—5 个样。样品储存于 500ml 的聚乙烯塑料瓶中,运回实验室后,选择其中 85 个样品做主要化学成分和 16 种痕量元素的测定。

### 1.2 测试

晶间卤水中的主要化学成分  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  及 pH 和比重的分析方法见文献(中国科学院盐湖研究所分析室,1988)。晶间卤水中的痕量元素 Zn, Ni, B, Mn, Fe, Cr, Al, V, Be, Cu, Ti, Sr, Ba, Li, P, Si 用 ARL-3520 等离子光谱仪进行测定。

\* 国家“八五”科技重点攻关项目,85-802-01号。刘兴起,男,出生于1966年4月,副研究员,Fax:0086-0971-6146002

收稿日期:1995-01-16,收修改稿日期:1998-02-15

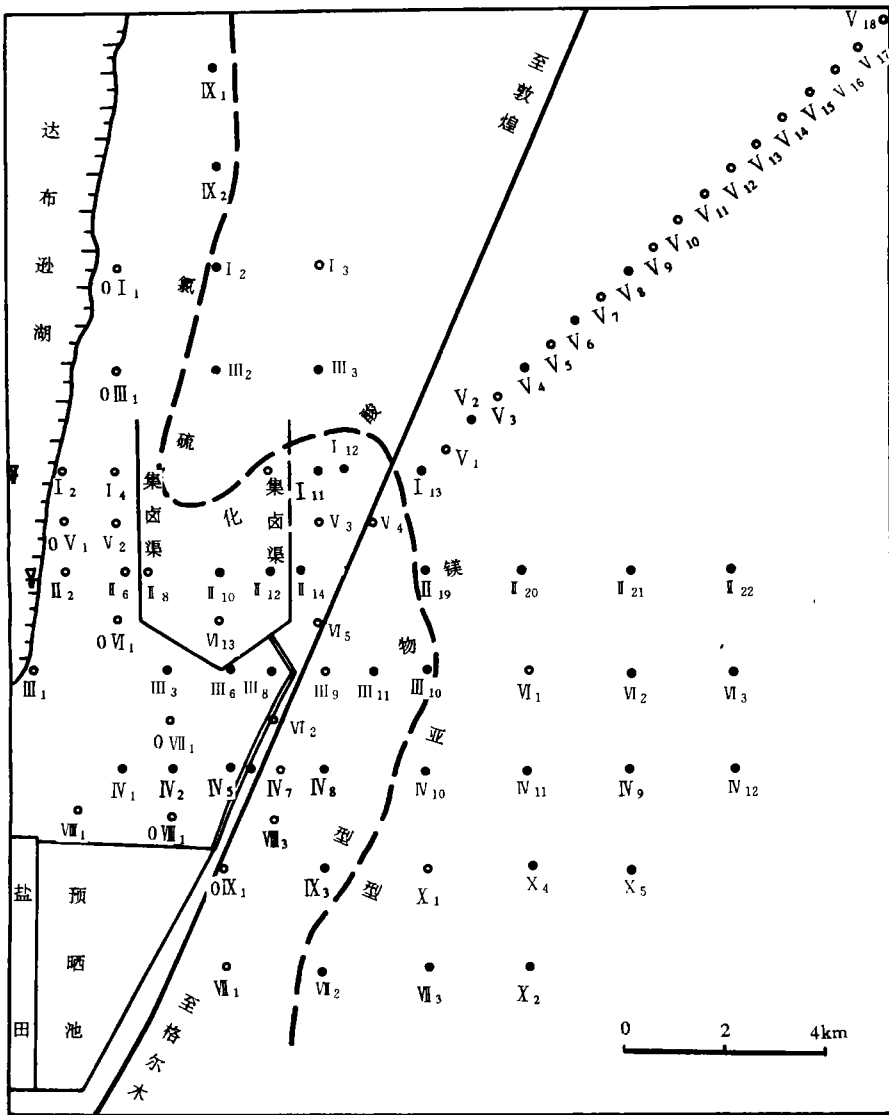


图1 察尔汗盐湖首采区钻孔及采样位置

Fig.1 Coring and sampling locations over the Qarhan Salt Lake area  
① 钻孔编号; ② 取样位置; ③ 湖岸线; ④ 水化学类型分界线

## 2 研究结果

### 2.1 S<sub>4</sub>层晶间卤水痕量元素集散特征

#### 2.1.1 S<sub>4</sub>层晶间卤水概况及水化学特征

察尔汗盐湖是我国最大的现代干盐湖,其地层由四层碎屑物和四层盐类沉积物组成,其中的四个盐类沉积层自下而上分别称为 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>。S<sub>4</sub>层晶间卤水是指赋存在最上部盐层(即 S<sub>4</sub>)中的水体,属于潜水型晶间卤水,在自然状态下,其平均埋深为

0.39—0.5m,厚度一般为8—21m,是青海钾肥厂开采的主要液体矿层。1991年9月S<sub>4</sub>层晶间卤水的水化学特征列入表1。

表1 S<sub>4</sub>层晶间卤水水化学特征(85个样品)

Tab.1 Hydrochemical characteristics of the interstitial brine in Layer S<sub>4</sub> on the basis of 85 samples

项 目		最大值	最小值	平均值
比 重		1.30	1.21	1.25
pH		6.40	4.60	5.60
矿化度(g/L)		409.67	314.18	358.04
化 学 组 分 (g/L)	Na <sup>+</sup>	80.22	0.22	25.63
	K <sup>+</sup>	22.84	1.29	11.35
	Mg <sup>2+</sup>	101.33	25.22	65.97
	Ca <sup>2+</sup>	22.96	0.61	4.26
	Cl <sup>-</sup>	301.21	199.21	247.50
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7.76	0.00	2.67
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.33	0.24	0.67

据瓦良亚什科(1965)的天然水水化学分类原则,计算获得的1991年9月份采集的S<sub>4</sub>层晶间卤水(表层0.5m)的水化学类型表明:研究区内存在两种不同的水化学类型,一类为硫酸盐型的硫酸镁亚型,另一类为氯化物型(图1)。

### 2.2.2 富集与分散

S<sub>4</sub>层晶间卤水中微量元素含量比其它水体高(如湖泊、海洋等),为了比较各元素在S<sub>4</sub>层晶间卤水中的集散程度,采用富集倍数K表示: $K = \frac{C}{C_0}$ 。其中,C为S<sub>4</sub>层晶间卤水某痕

表2 S<sub>4</sub>层晶间卤水中微量元素的富集系数

Tab.2 Riched coefficients of the trace element of the interstitial brine in Layer S<sub>4</sub>

元素	Zn	Ni	B	Mn	Fe	Cr	Li	V
S <sub>4</sub> 层晶间卤水(mg/L)	0.4085	1.6702	110.52	3.1738	2.0286	2.7682	51.753	0.6791
海水(mg/L) <sup>1)</sup>	0.001	0.002	4.80	0.002	0.01	5×10 <sup>-5</sup>	0.200	0.002
柴达木盆地盐湖卤水 (mg/L) <sup>1)</sup>	1.95	0.0116	209.46	0.1136	0.20	0.021	56.08	0.004
K <sub>1</sub> <sup>2)</sup>	408.5	835.1	23.025	1586.9	202.86	55364	258.76	339.55
K <sub>2</sub> <sup>2)</sup>	0.2094	143.98	0.5276	27.938	12.143	131.82	0.9228	169.77
元素	Be	Cu	Sr	Ba	Ti	Al	P	Si
S <sub>4</sub> 层晶间卤水(mg/L)	0.0188	0.3653	78.787	2.5975	0.2572	4.6695	16.302	14.108
海水(mg/L)	6×10 <sup>-7</sup>	0.0006	8.00	0.009	0.001	0.01		3.00
柴达木盆地盐湖卤水 (mg/L)	0.01	0.023	69.99	3.00	0.0093	0.158		2.67
K <sub>1</sub>	31333	608.83	9.8484	288.61	257.2	466.95		4.7027
K <sub>2</sub>	1.8800	15.883	1.1257	0.8658	27.656	29.554		5.1112

1) 海水、柴达木盆地盐湖卤水的资料引自中国科学院盐湖研究所(1986); 2) K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>分别为某微量元素相对于海水和柴达木盆地盐湖卤水的富集系数

量元素的含量;  $C_0$  为海洋水或柴达木盆地盐湖卤水中某痕量元素的含量。计算结果列入表 2。从表 2 中可以看出, 同海水相比,  $S_4$  层晶间卤水中所有元素的  $K$  值都大于 1, 最高可达  $n \times 10^4$ , 说明其浓度比海水高。而与柴达木盆地盐湖卤水相比, 部分元素 (Zn, B, Li, Ba) 的  $K$  值小于 1, 表明这些元素在察尔汗盐湖相对分散, 但其它元素均表现为不同程度的富集, 富集顺序为:  $V > Ni > Cr > Al > Mn > Ti > Cu > Fe > Si > Be > Sr$ 。

### 2.2.3 影响痕量元素在 $S_4$ 层晶间卤水中分布规律的水介质性质

卤水的 pH 值、比重、矿化度、常量离子及水化学类型对卤水中痕量元素的迁移及含量分布情况均产生着不同程度的影响(于升松, 1992), 为进行综合研究, 揭示它们之间的内在规律, 应用因子分析的方法(肯德尔, 1983), 以 85 个  $S_4$  层晶间卤水样品的痕量元素、pH 值、矿化度、比重及常量离子为变量做 R-型因子分析。

对原始数据进行标准化之后, 求出各变量间相关系数矩阵的全部特征值, 结果表明: 初始因子的前三个方差贡献累计百分比已达 87.17%, 故取因子数为 3, 对初始因子进行方差最大旋转后, 求出 R-型方差最大因子载荷矩阵得表 3。从表 3 中可以看出:

表3 R-型方差最大因子载荷矩阵

Tab.3 Matrix of maximum loading in the variance of R mode factor

项目	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
比重	0.8731	0.3810	-0.2656
矿化度	0.9143	0.3079	-0.2509
pH	-0.8018	-0.3048	0.4212
Na <sup>+</sup>	-0.9379	-0.2803	0.0636
K <sup>+</sup>	-0.4279	-0.1690	0.7798
Mg <sup>2+</sup>	0.9463	0.2054	-0.2333
Ca <sup>2+</sup>	0.1720	0.8768	-0.1142
Cl <sup>-</sup>	0.8756	0.3345	-0.3189
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.6261	-0.4566	0.3857
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.7694	-0.2413	0.4630
Zn	0.7358	0.3155	-0.4130
Ni	0.7791	0.5694	-0.1190
B	0.8786	0.1856	0.0268
Mn	0.5048	0.5635	-0.2300
Fe	0.7628	0.3138	-0.0216
Cr	0.8068	0.5143	-0.1499
Al	0.7789	0.5175	-0.0881
V	0.7526	0.6208	-0.0842
Be	0.4524	0.6874	0.1034
Cu	0.7333	0.4408	-0.2795
Ti	0.3717	0.8887	-0.1696
Sr	0.1741	0.9007	-0.2251
Ba	0.0103	0.8315	-0.0778
Li	0.9475	0.0415	-0.2404
P	0.9102	0.1840	-0.2509
Si	0.8089	0.4553	-0.2714
方差贡献	14.5792	6.7613	2.1950
方差贡献累计(%)	54.00	79.04	87.17

(1) 因子  $F_1$  上, 变量  $Cl^-$ ,  $Mg^{2+}$ , 比重, 矿化度具有很高的正载荷, 代表着卤水演化到了晚期阶段而成为氯化物型卤水。该因子上痕量元素的载荷均为正值, 一些元素, 如 Zn, Ni, B, Fe, Cr, Al, V, Cu, Li, P, Si 等的载荷很高, 说明卤水演化到晚期时, 痕量元素趋于富集。而  $Na^+$ ,  $K^+$ , pH,  $SO_4^{2-}$  则具有很高的负载荷, 表明痕量元素与它们存在着明显的负相关。

(2) 因子  $F_2$  代表着卤水中  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  离子同痕量元素 (特别是 Sr, Ti, Ba, Be 等) 的相互制约关系。该因子上,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  具有较高的负载荷, 而元素 Ba, Sr, Ti, Be, Mn 及  $Ca^{2+}$  则具有较高的正载荷, 这清楚地表明, 卤水中痕量元素 Ba, Sr, Ti, Be 及  $Ca^{2+}$  的增高势必要消耗水中的  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  离子而产生硫酸盐和碳酸氢盐沉淀, 使水中的  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  离子浓度趋于减小; 相反,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  离子浓度的增高, 也会降低水中部分痕量元素的浓度而产生沉淀。

(3) pH,  $K^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  在  $F_3$  因子上的载荷为正, 矿化度和比重在  $F_3$  因子上的载荷为负, 代表卤水的早期演化, 为硫酸盐型或碳酸盐型卤水。因子上几乎所有痕量元素的载荷均为负值, 表明卤水在早期演化阶段痕量元素相对贫化。

由此可见, 随卤水的不断浓缩, 矿化度和比重的增加, pH 值的减小, 水体由碳酸盐型卤水经硫酸盐型卤水向氯化物型卤水演化的过程中, 痕量元素的浓度则由低逐渐变高。

## 2.2.4 痕量元素在 $S_4$ 层晶间卤水中的分异

### 2.2.4.1 水平分异

为全面反映痕量元素在首采区内的变化趋势, 选择区内有代表性的 44 个表层样, 做部分痕量元素的趋势面分析, 限于篇幅, 这里仅给出第四次趋势等值线图 (图 2)。从图 2 中可以看出: 各痕量元素在研究区的西部 (靠近达布逊湖东侧) 含量较低, 向东出现明显的增高趋势。总的看来, 各元素的第四次等值线呈近南北向延伸, 它们所组成的图案象一个长轴被拉尖了的椭圆, 其长轴呈近南北向延伸, 表明东西方向上各痕量元素含量的变化要比南北方向上的变化明显。造成各痕量元素在首采区内呈这种形态分布的原因与区内卤水的变质程度有关: 研究区东部地区的晶间卤水, 远离达布逊湖, 受湖表淡卤水影响小, 其成分和浓度变化不大, 保存了原生晶间卤水的性质, 表现为卤水的矿化度高, 水化学类型为氯化物型, 痕量元素的含量较高; 研究区西部的晶间卤水, 靠近达布逊湖, 由于受地表水渗入、湖表淡卤水的混合掺杂作用, 其成分和浓度变化较大, 而改变了原

表4  $S_4$  层晶间卤水中痕量元素的分布 (mg/L)<sup>1)</sup>

Tab.4 Distribution of the trace elements contained in the interstitial brine in different depth of Layer  $S_4$  (mg/L)

元素	Zn	Ni	B	Mn	Fe	Cr	Al	V
水面下0.5m(6)	0.2936	1.1190	92.313	1.9945	1.6681	2.2672	3.4572	0.4819
地面下	3m(5)	0.2945	1.2804	93.494	2.2796	1.8467	3.8027	0.5219
	6m(5)	0.3807	1.5660	115.37	2.4096	2.0492	4.4274	0.6183
	9m(4)	0.6945	2.0646	125.76	3.2044	2.2481	3.2017	5.9836
	12m(4)	0.8711	2.1404	133.32	3.5160	2.3458	3.2971	6.0180
元素	Be	Cu	Ti	Sr	Ba	Li	P	Si
水面下0.5m(6)	0.0111	0.2154	0.1309	30.564	0.4316	42.135	14.735	10.566
地面下	3m(5)	0.0154	0.2297	0.1450	29.075	2.1910	42.666	15.137
	6m(5)	0.0141	0.3226	0.1702	34.663	0.9557	55.728	18.536
	9m(4)	0.0277	0.6441	0.2749	50.958	0.3638	73.411	22.740
	12m(4)	0.0205	0.6073	0.2693	46.967	0.6789	76.769	23.196

1) 括号中的数为样品的平均个数

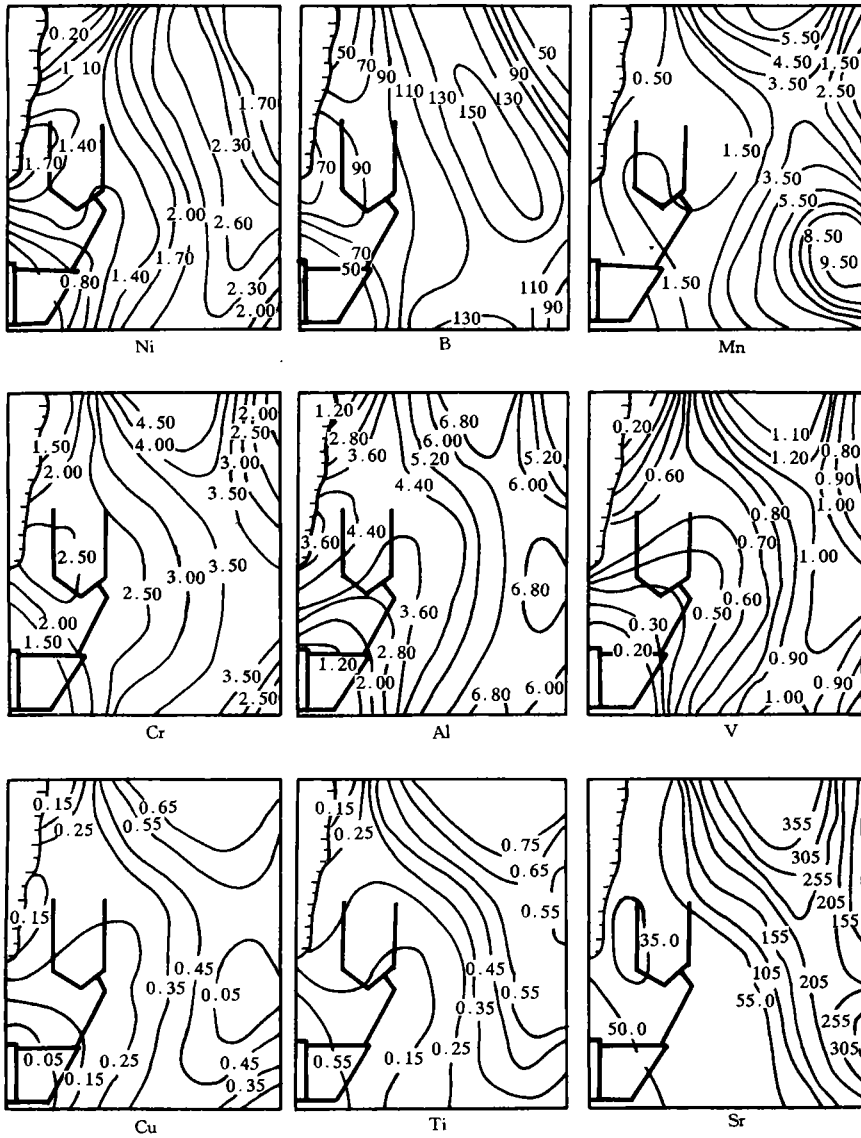


图 2 S<sub>4</sub>层晶间卤水部分痕量元素第四次趋势面 (mg / L)

Fig.2 Fourth-trend surface of some of trace elements of the interstitial brine in Layer S<sub>4</sub> (mg / L)

晶间卤水的初始性质, 表现为卤水的矿化度降低, 水化学类型变为硫酸镁亚型, 痕量元素的含量降低, 因此, 研究区东部比西部各痕量元素的含量都高。在南北方上, 由于达布逊湖湖岸线呈近南北向延伸, 使区内南北方向上晶间卤水的变质程度一致, 因而南北方向上各痕量元素的含量变化不大。

**2.2.4.2 垂直分异** 以 III 线为例, 各钻孔不同深度晶间卤水痕量元素含量的平均值列于表 4。从表 4 可以看出, 除个别元素 (Be, Sr, Ba, Cu, Ti), 其它元素的含量都随深度的增加而出现增高的趋势, 其幅度在不同深度的表现不同: 水面下 0.5m 到距地面下 3m, 痕量元素含量增加缓慢, 而距地面下 3—9m 处, 痕量元素的含量随深度的增加幅度较快, 往下又

渐渐变缓。这表明  $S_4$  层晶间卤水中痕量元素的垂直分异总体上是在重力作用的驱使下造成的。但表面水体由于受蒸发泵作用的影响,致使痕量元素的含量稍高,垂直变化缓慢,而底部水体则同  $S_4$  层晶间卤水下部的低矿化度承压卤水的作用有关,使痕量元素的含量降低,变化相对较小。

### 3 结论

3.1 察尔汗盐湖首采区  $S_4$  层晶间卤水中的 16 种痕量元素比海水富集。Cr, Be 的含量为海洋水的  $n \times 10^4$  倍, Ni, Cu, Al, Zn, V 等其它元素的含量一般也为海洋水的  $n \times 10^2$  倍。

3.2  $S_4$  层晶间卤水中的痕量元素随卤水的不断浓缩,其含量趋于增高。

3.3 察尔汗盐湖首采区  $S_4$  层晶间卤水水平方向上,痕量元素的含量出现东高西低,南北变化不大的分异现象;垂直方向上表现为随深度的增加其含量出现增高的趋势。卤水的变质程度是造成痕量元素水平分异的主要原因;重力作用、蒸发泵作用、低矿化度承压卤水的作用是造成痕量元素垂直分异的主要原因。

**致谢** 主要化学组分的分析由林乐枝、吕亚平老师完成,痕量元素的测定由王华安、原力、张晓凤老师完成,刘建华同志清绘图件,谨志谢忱。

### 参 考 文 献

- 于升松 1992. 西藏盐湖及其水系中的痕量金属. 海洋与湖沼, 23(4): 407—414
- 于升松 唐 渊, 1981. 青藏高原盐湖的水化学特征. 海洋与湖沼, 12(6): 489—511
- 瓦良亚什科 МГ, 1965. 钾盐矿床形成的地球化学规律. 北京: 中国工业出版社. 18
- 中国科学院盐湖研究所, 1986. 青海柴达木盆地晚更新代地质环境演化. 北京: 科学出版社. 140—141
- 中国科学院盐湖研究所分析室, 1988. 卤水和盐的分析方法. 北京: 科学出版社. 29—74
- 杨丙章, 1981. 察尔汗盐湖卤水矿的动态变化特征及今后工作意见. 青海地质, 1: 39—40
- 张彭熹, 1987. 柴达木盆地盐湖. 北京: 科学出版社. 217—229
- 肯德尔 M, 多元分析. 北京: 科学出版社. 59—75

## STUDIES ON DISTRIBUTION CHARACTER OF TRACE ELEMENTS IN INTERSTITIAL BRINE OF QARHAN SALT LAKE

LIU Xing-qi, YU Sheng-song, SHAO Ming-yu

(Institute of Salt Lakes, The Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008)

**Abstract** In september, 1991, 85 samples of interstitial brine were collected from Layer  $S_4$  i. e. the uppermost layer of the salt deposits from Qarhan Salt Lake. The contents of 16 trace elements were determined using an ARL-3520 ICP. The results of an analysis of the distribution character of the trace elements in  $S_4$  interstitial brine indicate that the 16 trace elements in  $S_4$  interstitial brine are rich compared with seawater; the contents of Cr and Be are tens of thousands times and those of other elements such as Ni, Cu, Zn and V are several hundreds times as high as those in seawater. R-factor analysis indicates that the trace element contents become gradully higher with the brine evolution from carbonate type to chloride type vis sulphate type; in the region, the trace elements contents are relatively high in the east and low in the west, have rew variations from the north to the south in horizontal directions and increase with depth in the vertical direction. The metamorphic degree of  $S_4$  interstitial brine accounts for the observed horizontal variation. Likewise, the effects of the gravity, the evaporation and the pressure-bearing brine with relatively low salinity accounts for the observed vertical variation.

**Key words** QarhanSalt Lake Interstitial brine Trace element

**Subject classification number** P59

\*\*\*\*\*

### 本 刊 消 息

中国科学引文数据库公布了中国科技期刊引文频次前 500 名, 其中《海洋与湖沼》学报 1994 年居第 45 位; 1995 年居第 40 位, 又前进 5 名。据此可以说, 《海洋与湖沼》学报引文频次居本学科之首。

《海洋与湖沼》学报, 1997 年荣获中国科协优秀科技期刊二等奖, 中宣部、国家科委、新闻出版署优秀科技期刊三等奖。

本刊编辑部