

## 柴达木盆地盐湖水化学特征\*

于昇松

(中国科学院盐湖研究所)

柴达木盆地是中生代开始拗陷的内陆山间断陷盆地,面积约90,000km<sup>2</sup>。棋布于盆地的湖泊,按水的矿化度分为淡水湖、半咸水湖、咸水湖和盐湖四类<sup>1)</sup>。该盆地共有湖泊37个,其中,淡水湖1个、半咸水湖6个、咸水湖2个、盐湖28个(图1)。这些盐湖的平均海拔高程约2788.23m,湖水面积平均约46.45km<sup>2</sup>,湖水深度平均约0.742m。达布逊湖湖表卤水的储量最大。察尔汗湖区<sup>2)</sup>晶间卤水<sup>3)</sup>的储量最大(表1)。

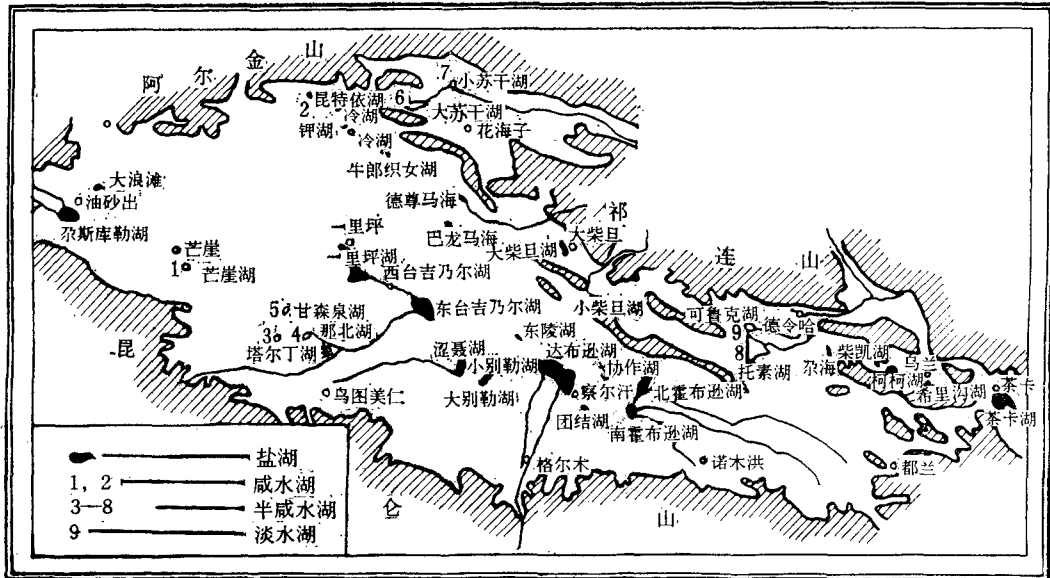


图1 柴达木盆地湖泊的分布及类别

目前,在柴达木盆地盐湖发现的盐类矿物,其中,石盐、芒硝、钾盐和硼酸盐等都具有工业规模的天然沉积,尤其是达布逊湖的现代天然光卤石,大、小柴旦湖的天然硼酸盐和察尔汗湖区的石盐沉积为世界之冠。在盐湖卤水中,除富含石盐、芒硝等主要常见盐类

\* 该文承澳大利亚 Dr. J. M. Bowler, Dr. P. G. Macumber 和中国科学院青海盐湖研究所陈克造、孙大鹏等同志的指导;胡金泉同志清绘图件,特此表示感谢。

收稿日期: 1982年8月5日。

1) 我们采用的湖泊水的矿化度分类: 淡水湖矿化度小于1g/l; 半咸水湖矿化度1—35g/l; 咸水湖矿化度35—50g/l; 盐湖矿化度大于50g/l。

2) 察尔汗湖区由察尔汗和别勒滩两个干盐滩连接南、北霍布逊湖、协作湖、团结湖、达布逊湖、大、小别勒湖、涩聂湖、东陵湖九个卤水湖构成。

3) 晶间卤水指的是埋藏在盐类晶体和碎屑沉积物颗粒孔隙中的地下水。

表 1 柴达木盆地盐湖卤水概况\*

盐湖名称	湖表卤水高程 (m)	湖表卤水面积 (km <sup>2</sup> )	湖表卤水深度 (m)	盐湖卤水类别		备 注
				湖表水	晶间水	
茶 卡 湖	3059	(104)	0.2—0.3	✓	△	1959 年测量
希 里 沟 湖	2938	19.5	0.5	△	—	1959 年测量
柯 柯 湖	3010	3.5(90)	0.18	✓	△	1966 年测量
柴 凯 湖		18		✓	△	
尔 海	2851.2	37.4	8—13	△	—	1959 年 8 月测量
大 柴 旦 湖	3148.1	22.92—35.9	0.22—0.34	△	△	1963 年 6 月测量
小 柴 旦 湖	3172	35.91—40	0.26—0.29	△	✓	1963 年 6 月测量
德 尊 马 海	2740.17	11.0	0.15—0.20	△	—	1959 年 8 月测量
巴 龙 马 海	2743.07	4.5	0.20—0.25	△	△	1959 年 8 月测量
北 霍 布 逊 湖	2675.57	90.44	0.32	△	△	1959 年 8 月测量
南 霍 布 逊 湖	2675.57	33.41	0.29	△	△	1959 年 8 月测量
协 作 湖	2691	17	0.05—0.10	✓	△	1959 年 8 月测量
团 结 湖				△	△	
达 布 逊 湖	2677	184—334	0.39—1.02	△	△	1956 年测量
东 陵 湖	2690.3	7.2	0.02—0.15	✓	△	1956 年测量
小 别 勒 湖	2676.57	6.25	0.06	△	△	1967 年 4 月测量
大 别 勒 湖	2676.57	7.38	0.18	△	△	1967 年 4 月测量
涩 聂 湖	2675.57	68.88—85.18	0.38—0.46	△	△	1967 年 4 月测量
牛 郎 织 女 湖		1	0.1	△	△	1959 年测量
钾 湖	2726.57	1.5(1677)	0.05	✓	△	1959 年测量
昆 特 依 湖	2723.97	1.5	0.05	✓	△	1959 年测量
东 台 吉 乃 尔 湖	2681.37	116	0.6	△	△	1959 年测量
西 台 吉 乃 尔 湖	2682	82.4	0.3—0.4	△	△	1959 年测量
尔 斯 库 勒 湖	2853.7	103	0.65	△	△	1959 年测量
察 尔 汗 湖	2677—2680	(5856)	干盐湖	—	△	
一 里 坪 湖	2683	(268)	干盐湖	—	△	
大 浪 滩 湖		(500)	干盐湖	—	△	
别 勒 滩 湖			干盐湖	—	△	

\* 表中空白处数值没测量；括弧里数字为干盐湖面积；✓ 表示卤水不发育；△ 表示卤水发育；— 表示“无”。

外,镁、钾、硼、锂、铷、铯、铀、钍等有用元素含量之高、储量之大,在世界上也属罕有。深入地研究该区盐湖的成盐演化和成矿规律,不仅在理论上而且对发展我国国民经济都具有重要意义。本文仅对盐湖卤水水化学特征进行讨论<sup>1)</sup>。

### 一、卤水的酸碱度(pH 值)

柴达木盆地盐湖卤水的 pH 值平均为 7.014,大多数属中偏碱性,少数为 5—7,中偏酸性(图 2)。

靠近盆地西北部的昆特依湖、钾湖、牛郎织女湖和中部的察尔汗湖区及东北部的茶卡湖、柯柯湖卤水的 pH 值较低,其他盐湖略高(图 3)。

1) 文中所用样品由本所一室提供,水分析结果由一、三室提供。

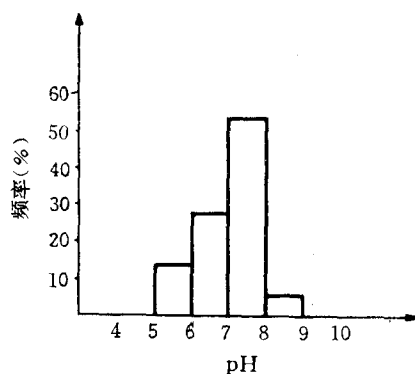


图2 柴达木盆地盐湖卤水 pH 值分布频率直方图

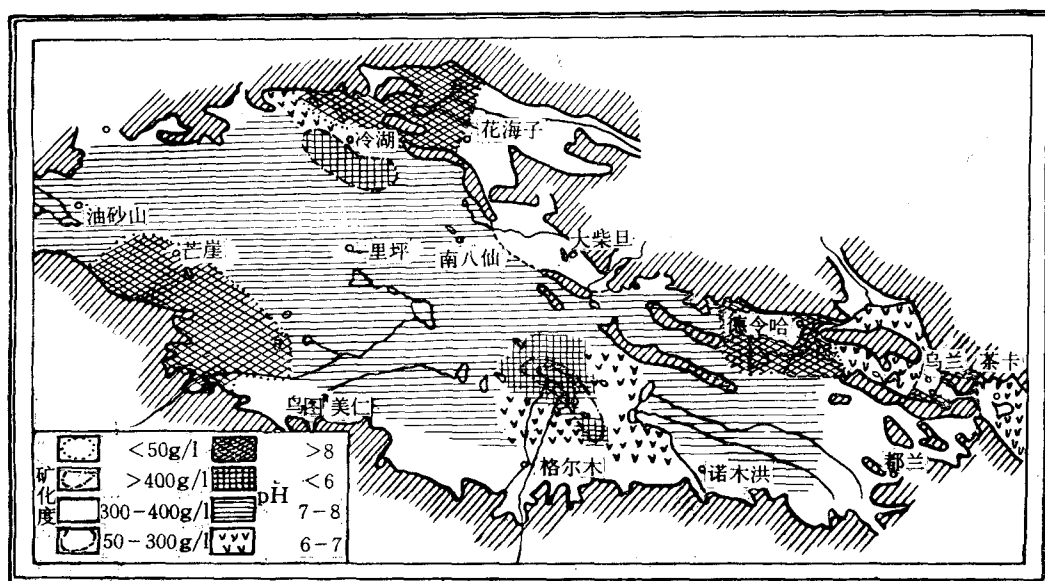


图3 柴达木盆地湖泊水矿化度和 pH 值的分布

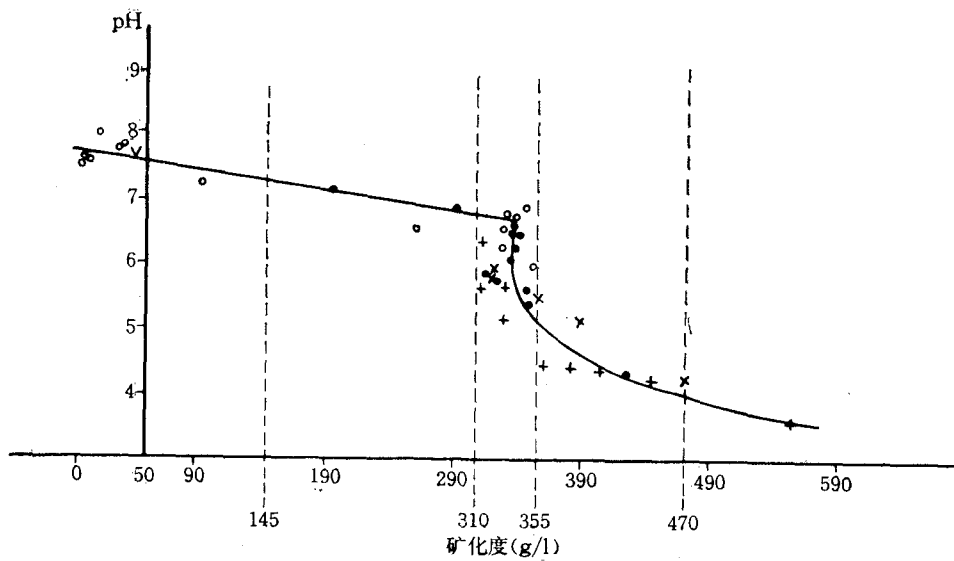


图4 柴达木盆地湖泊水的矿化度 pH 值、化学类型间的关系

+ 氯化物型水; × 氯化物过渡亚型水; ● 硫酸镁亚型水; ○ 钠-镁硫酸盐亚型水; v 硫酸钠亚型水。

统计结果表明：该盆地盐湖卤水的 pH 值随矿化度的增加而减小。矿化度在 50—310g/l 区间，pH 值随矿化度的增加而减小的速度十分缓慢；矿化度在 310—355g/l 区间，pH 值随矿化度的增加而急速下降，下降曲线非常陡峻（几乎成直角）；矿化度从 355g/l 开始，pH 值随矿化度的增加而减小的速度又变得缓慢起来（图 4）。

## 二、卤水的矿化度

柴达木盆地盐湖卤水的矿化度最高值为 555.065g/l（牛郎织女湖），最低值为 90.587g/l（尕斯海），平均值为 340.747g/l，属浓卤水。

整个盆地盐湖卤水的矿化度均高，大都达到了自析盐阶段，相对说来，靠近盆地北缘

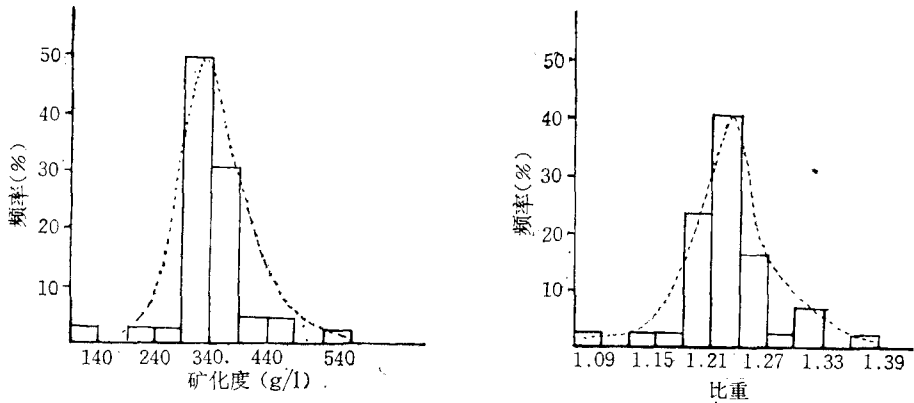


图 5 柴达木盆地盐湖卤水的矿化度和比重的频率分布

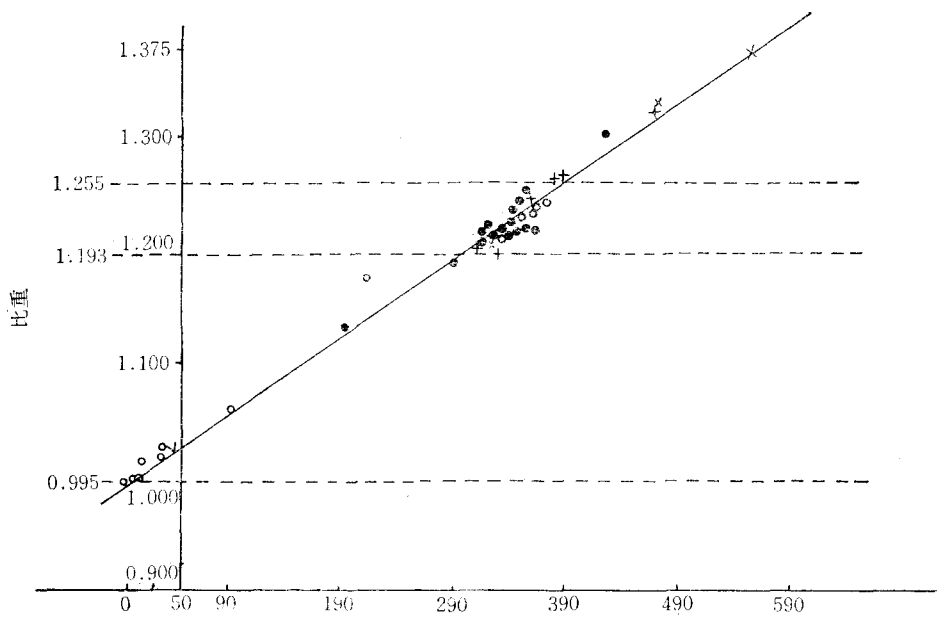


图 6 柴达木盆地盐湖卤水的矿化度和比重间的关系

+ 氯化物型水；× 氯化物过渡型水；● 硫酸镁亚型水；○ 钠→镁硫酸盐亚型水；√ 硫酸钠亚型水。

和南缘的盐湖, 卤水的矿化度略低, 而西北部和中部的盐湖较高, 尤其是昆特依湖、牛郎织女湖、达布逊湖的更高(图 3)。

卤水的矿化度和比重均呈正态分布(图 5), 并且两者之间呈直线相关(图 6), 其一元回归方程式为:

$$d(\text{比重}) = 0.9893 + 6.97 \times 10^{-4} \times M(\text{矿化度, g/l})$$

从图 6 还可看出, 大部分盐湖卤水的比重都集中在 1.193—1.255, 矿化度集中在 290—390g/l 间。

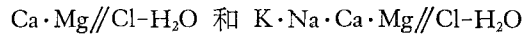
卤水的矿化度与其化学类型有关。氯化物和氯化物过渡亚型卤水的矿化度较硫酸盐型的高。氯化物型卤水矿化度为 310—530g/l, 氯化物过渡亚型卤水矿化度为 310—470g/l, 硫酸盐型卤水矿化度在 355g/l 以下(图 4)。

对盐湖卤水矿化度的长期观察资料表明: 远离盐滩而靠近淤泥沉积岸的湖表卤水, 矿化度的多年变化幅度最大, 靠近盐滩岸的湖表卤水次之, 晶间卤水最小。这说明, 除蒸发作用造成的高矿化度期的卤水与高温期相对应外, 补给水的类型(淡水补给, 卤水矿化度多年变化幅度大, 而卤水补给则小)、影响程度(补给水对晶间卤水较湖表卤水影响小)对盐湖卤水矿化度的动态变化也起相当大的作用。

### 三、卤水的化学类型

#### (一) 水盐体系

根据卤水中存在的  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  八种常见离子含量, 该盆地盐湖卤水为  $\text{R}_1//\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{R}_2//\text{Cl}\cdot\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$  两大水盐体系。其中, 前者有



两个水盐体系, 后者有  $\text{K}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}//\text{Cl}\cdot\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}\cdot\text{Mg}//\text{Cl}\cdot\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{K}\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}//\text{Cl}\cdot\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$  三个水盐体系(表 2)。由表 2 看出, 该盆地盐湖卤水水盐体系的显著特点是: (1) 没有碳酸盐体系的卤水; (2) 大多数盐湖卤水为  $\text{K}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}//\text{Cl}\cdot\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$  体系。

#### (二) 水化学类型的划分法<sup>1)</sup>

将盐湖卤水中常见的  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  离子, 分为碳酸盐、硫酸盐、氯化物三种水化学类型。其中, 硫酸盐型又分为硫酸钠、钠→镁硫酸盐、硫酸镁三个亚型。硫酸盐型和氯化物型之间还有一个氯化物过渡亚型。各水型划分的具体方法是: 先根据 M. Γ. 瓦里亚什科分类法把碳酸盐型水挑出来, 然后作者根据韩蔚田、蔡克勤同志提出的特征系数  $R = \frac{r\text{SO}_4^{2-}}{r\text{Mg}^{2+}}$  值把其余的卤水细分为硫酸钠、钠→镁硫酸盐、硫酸镁、氯化物过渡亚型和氯化物型(硫酸钠亚型水  $R > 1.5$ , 钠→镁硫酸盐亚型水  $R$  为 1.5—0.5, 硫酸镁亚型水  $R$  为 0.5—0.075, 氯化物过渡亚型水  $R$  为 0.075—0.01, 氯化物型水  $R$  为 0.01—0)(图 7)。

1) 袁见齐、霍承禹, 1979 年。地质科技资料 3: 90—96。

表 2 柴达木盆地盐湖卤水的基本组成及化学类型

项 目 湖 名	g/l							化学体系			相图指数			特征系数 R	化学类型	组成点 在相图 中的位 置
	Na <sup>+</sup>	K <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>	2K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>					
	茶卡湖	80.23	4.47	0.12	26.51	187.71	23.63	0.027	0.17	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	4.1	78.25	17.65			
希里沟湖	78.98	1.64	0.48	11.11	121.13	47.25	0.48	0.25	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	2.17	47.12	50.71	1.0761	钠→镁硫酸盐亚型	2	
柯柯湖(西)	97.79	2.62	0.41	14.41	187.06	12.02	0.051	0.031	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	4.46	78.90	16.64	0.2111	硫酸镁亚型	3	
柯柯湖(中)	94.84	2.95	0.28	17.00	187.06	16.13	0.063	0.047	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	4.17	77.28	18.55	0.2401	硫酸镁亚型	4	
柯柯湖(东)	47.50	8.29	0	50.78	197.45	42.15	0	0.32	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	4.02	79.32	16.66	0.2100	硫酸镁亚型	5	
柴凯湖	106.38	1.57	0.41	11.54	187.71	16.38	0.108	0.04	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	3.02	71.36	25.62	0.3591	硫酸镁亚型	6	
大柴旦湖(东)	63.19	2.34	0.37	6.69	110.95	11.69	0.25	0.036	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	7.00	64.49	28.51	0.4421	硫酸镁亚型	7	
大柴旦湖(中)	93.34	3.43	0.44	10.40	165.08	17.43	0.19	0.12	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	6.72	65.50	27.78	0.4240	硫酸镁亚型	8	
大柴旦湖(西)	108.63	3.91	0.55	12.00	191.64	20.58	0.11	0.16	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	6.60	65.14	28.26	0.4339	硫酸镁亚型	9	
小柴旦湖(1)	104.91	3.47	0.43	12.91	181.22	29.55	0	0.21	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	5.03	60.14	34.83	0.5791	钠→镁硫酸盐亚型	10	
小柴旦湖(2)	106.52	3.56	0.41	13.58	184.25	31.53	0	0.19	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	4.88	59.92	35.20	0.5874	钠→镁硫酸盐亚型	11	
小柴旦湖(3)	107.73	3.54	0.41	13.75	184.92	33.67	0	0.33	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	4.71	58.84	36.45	0.6196	钠→镁硫酸盐亚型	12	
尕斯库勒湖(东)	79.40	4.60	0.41	30.42	181.56	45.94	0.19	0.47	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	3.29	69.97	26.74	0.3822	硫酸镁亚型	13	
尕斯库勒湖(中)	75.96	4.47	0.41	28.75	171.81	45.19	0.21	0.46	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	3.34	69.15	27.51	0.3978	硫酸镁亚型	14	
尕斯库勒湖(中)	76.48	4.50	0.41	29.58	175.17	45.03	0.17	0.49	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	3.30	69.81	26.89	0.3852	硫酸镁亚型	15	
尕斯库勒湖(西)	75.94	4.47	0.36	29.62	174.50	44.78	0.19	0.49	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	3.28	69.96	26.76	0.3825	硫酸镁亚型	16	
尕斯库勒湖(晶)	39.02	6.83	0	56.32	190.95	56.72	0	0.18	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	2.91	77.37	19.72	0.2548	硫酸镁亚型	17	
冷湖盐滩	76.67	2.31	0.41	32.67	191.64	33.01	0.30	0.17	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	1.72	78.27	20.01	0.2556	硫酸镁亚型	18	
西台吉乃尔湖(西)	103.67	6.81	0.29	13.58	188.38	23.96	0.17	0.028	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	9.73	62.41	27.86	0.4464	硫酸镁亚型	19	
西台吉乃尔湖(西)	102.87	6.99	0.30	13.72	187.71	24.04	0.12	0.041	Na·K·Mg/Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	9.89	62.43	27.68	0.4434	硫酸镁亚型	20	

mm

21	西台吉乃尔湖(晶)	101.16	8.44	0.20	15.74	183.50	35.32	0	0.23	Na·K·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	9.61	57.66	32.73	0.5678	钠→镁硫酸盐亚型
22	东台吉乃尔湖(东)	116.95	3.56	0.47	5.28	187.21	17.04	0.11	0	Na·K·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	10.34	49.35	40.31	0.8168	钠→镁硫酸盐亚型
23	东台吉乃尔湖(东)	115.95	4.02	0.40	6.09	186.87	19.02	0.11	0	Na·K·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	10.28	50.12	39.60	0.7901	钠→镁硫酸盐亚型
24	一里坪(晶)	81.35	11.02	0.37	24.18	196.46	13.83	0.026	0	Na·K·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	11.01	77.74	11.25	0.1447	硫酸镁亚型
25	德通马海	107.43	3.16	0.18	15.69	175.42	52.85	0.39	0	Na·K·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	3.27	52.22	44.51	0.8524	钠→镁硫酸盐亚型
26	达布逊湖	0.799	0.712	0.084	118.69	342.83	6.57	0	0.42	Na·K·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	0.2	98.44	1.36	0.014	氯化物过渡亚型
27	团结湖	5.80	7.22	0	98.69	273.40	39.43	0.012	0.80	Na·K·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	2.02	88.98	9.00	0.1011	硫酸镁亚型
28	涩聂湖	94.50	7.27	0.27	18.21	189.14	22.57	0.29	0	Na·K·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	8.63	69.55	21.82	0.3137	硫酸镁亚型
29	别勒滩(晶)	23.34	23.18	0.43	64.15	239.85	6.70	0.13	0.077	Na·K·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	9.86	87.82	2.32	0.0265	氯化物过渡亚型
30	大别勒湖	81.97	8.47	0.10	31.0	177.49	63.11	0.37	0.37	Na·K·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	5.31	62.50	32.19	0.5151	钠→镁硫酸盐亚型
31	小别勒湖	109.48	18.93	0.08	81.57	262.10	12.33	0.22	0.74	Na·K·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	6.50	90.06	3.44	0.0383	氯化物过渡亚型
32	察尔汗湖(晶)	71.36	12.11	1.02	28.67	201.56	6.41	0.33	0.009	Na·K·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	11.06	84.18	4.76	0.0565	氯化物过渡亚型
33	昆特依湖(晶)	53.77	12.22	7.28	37.92	216.86	0.84	0.068	0.007	K·Na·Ca·Mg//Cl-H <sub>2</sub> O	9.06	90.44	0.5	0.00561	氯化物型
34	钾湖(晶)	4.10	5.37	10.82	90.21	293.41	0.042	0.136	0.027	K·Na·Ca·Mg//Cl-H <sub>2</sub> O	1.82	98.17	0.01	0.000118	氯化物型
35	协作湖	16.0	7.72	17.66	64.87	252.02	0.198	0	0.002	K·Na·Ca·Mg//Cl-H <sub>2</sub> O	3.56	96.36	0.08	0.000772	氯化物型
36	东陵湖	9.42	18.11	14.48	71.78	265.83	0.207	0	0.015	K·Na·Ca·Mg//Cl-H <sub>2</sub> O	7.27	92.67	0.06	0.00073	氯化物型
37	尕海	27.33	0.25	0.31	4.18	45.26	13.09	0.034	0.14	Na·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	1.03	55.22	43.75	0.7924	钠←镁硫酸盐亚型
38	钾湖	0.523	0.575	8.015	113.86	345.93	0	0.159	0.061	Ca·Mg//Cl-H <sub>2</sub> O	0.20	99.8	0	0	氯化物型
39	牛郎织女湖	0	0.68	99.47	72.36	382.41	0	0	0.076	Ca·Mg//Cl-H <sub>2</sub> O	0.30	99.7	0	0	氯化物型
40	巴龙马海	103.19	2.42	3.67	9.26	193.27	2.099	0.085	0	Na·K·Ca·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	8.52	85.45	6.03	0.0574	氯化物型
41	达布逊湖(晶)	41.87	19.04	2.19	46.54	219.67	2.33	0.22	0	Na·K·Ca·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	11.17	87.73	1.10	0.0127	氯化物型
42	南霍布逊湖	83.34	2.96	3.70	21.20	198.45	1.55	0.034	0	Na·K·Ca·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	4.09	94.17	1.74	0.0185	氯化物型
43	北霍布逊湖	107.16	1.08	4.92	7.32	192.84	2.04	0	0	Na·K·Ca·Mg//Cl·SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O	7.89	86.06	6.06	0.0705	氯化物型

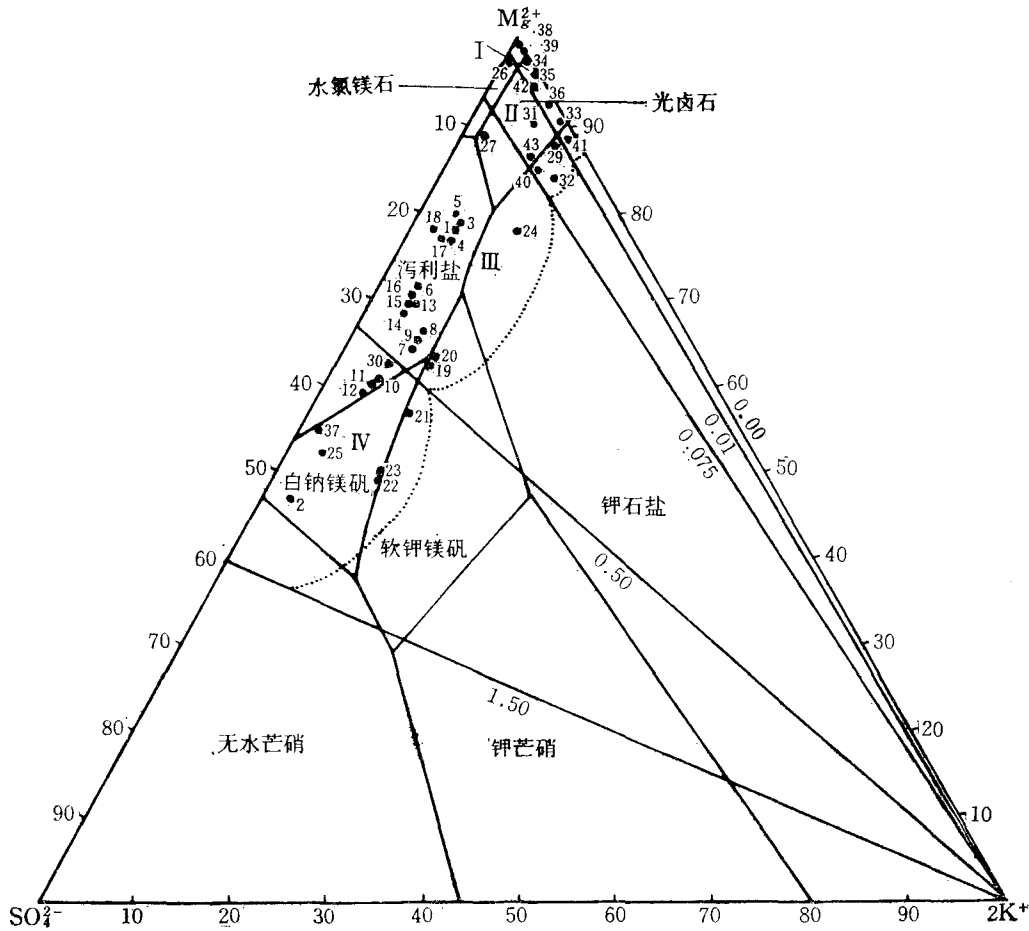


图7 柴达木盆地盐湖卤水化学类型在耶奈克三角图上的分布

I——氯化物型卤水； II——氯化物过渡亚型卤水； III——硫酸镁亚型卤水； IV——钠→镁硫酸盐亚型水。

上述划分出的水型反映卤水变质程度为(由小至大): 碳酸盐型→硫酸钠亚型→钠→镁硫酸盐亚型→硫酸镁亚型→氯化物过渡亚型→氯化物型。

### (三) 卤水的化学类型

柴达木盆地盐湖卤水化学类型的特点:

1. 卤水变质程度较深,反映在水型上是无碳酸盐型和硫酸钠亚型水,而钠→镁硫酸盐亚型、硫酸镁亚型和氯化物型水较发育(表 2)。

2. 从盐湖卤水化学类型的分布来看(图 8),氯化物型水呈 NW-SE 方向的带状分布于盆地的中部和西北部,硫酸盐型水分布在盆地的周围,氯化物过渡亚型水位于硫酸盐型和氯化物型之间的察尔汗湖区南缘地区(包括达布逊湖、小别勒湖、别勒滩、察尔汗干湖)。

3. 该盆地盐湖自上新世以来存在两个成盐期,一是  $N_2-Q_{1+2}$ ; 一是  $Q_3-Q_4$ 。第一成盐期的盐湖仅见于盆地西部,该期盐湖所沉积的盐类主要为石膏、芒硝、石盐、白钠镁矾、泻利盐等,反映了大陆硫酸盐型水体的正常蒸发析盐序列,这时的盐湖卤水属大陆硫酸盐



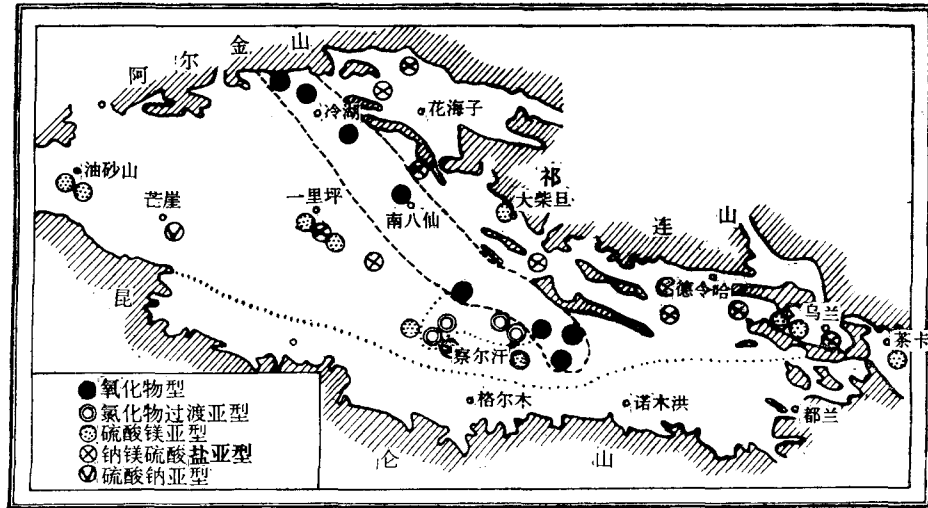


图 8 柴达木盆地湖泊水化学类型分布

型。第二成盐期的盐湖遍布于整个盆地, 该时期局部地区的湖盆由于得到大量的氯化物型的油田水、深部水和分布于盆地西部第三纪岩盐矿床淋滤水的补给, 因此, 这些地区的盐湖卤水属氯化物型, 其余地区仍为硫酸盐型。在察尔汗湖区南缘地带由于大量硫酸盐型地表水、地下水的补给, 与原氯化物型盐湖卤水掺杂, 而使该地区盐湖卤水变质为氯化物过渡亚型。

## 四、卤水的化学成分

### (一) 基本特征

1. 据目前所知, 该盆地盐湖卤水中含近四十种化学成分(表 3)。 $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  含量最大, 是盐湖卤水的主要化学成分, 也是确定盐湖水化学类型的基本因素, 同时也直接影响着盐类沉积。但这八种离子在卤水中的浓度差别也悬殊。阳离子  $r\text{Na}:r\text{Mg}:r\text{K}:r\text{Ca} = 21.68:16.79:1.02:1$ ; 阴离子

$$r\text{Cl}:r\text{SO}_4:r\text{CO}_3:r\text{HCO}_3 = 1389.39:123.33:1.42:1。$$

显然, 卤水中的  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  含量占绝对优势。除主要化学成分以外的其余三十多种, 尽管在卤水中的含量总和还不到离子当量总数的 2%, 但其中的 B, Li, Sr, Rb, Cs, U, Th 等离子的相对含量还是高的。

2. 盐湖卤水中的绝大多数化学成分的浓度比海洋水高, 只有 Br,  $\text{NO}_2$ , P,  $\text{HCO}_3^-$  离子的含量比海洋水低(表 4)。

3. 盐湖卤水中所含的绝大多数元素位于元素周期表的 1—4 周期, 其中, 含量较大的几乎都集中在  $\text{I}_A$ ,  $\text{II}_A$ ,  $\text{VI}_A$ ,  $\text{VII}_A$  族<sup>1)</sup>。元素在卤水中主要是呈低价离子存在, 尤以正负一、

1) 中国科学院盐湖研究所一室, 1978 年。柴达木盆地盐湖。58 页。

表 3 柴达木盆地盐湖卤水中的化学组分<sup>1)</sup>与海洋水的比较

含量 (mg/l)	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	B	Li	Br	I	Rb	Cs	U
水体															
盐湖卤水	68360.48	5977.78	4241.11	35129.71	204209	22290	127.4	171.6	252.56	61.7	34.1	0.51	1.46	0.011	0.097
海洋水	10500	380	400	1350	19000	2967	140	140	4.6	0.17	65	0.06	0.12	5×10 <sup>-4</sup>	0.003
盐湖卤水 海洋水	6.5	15.7	10.6	26	10.7	7.5	0.91	1.23	54.9	363	0.52	8.5	12.16	22	32.3
含量 (mg/l)	Th	F	Be	NO <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	Hg	P	Si	As	Al	Pb	Fe	Su	Cr	Mn
水体															
盐湖卤水	0.011	9.3	0	88.4	1.45	<2×10 <sup>-4</sup>	1.7×10 <sup>-3</sup>	5.36	0.049	0.152	0.0244	0.231	0.0096	0.0268	0.1114
海洋水	5×10 <sup>-4</sup>	1.3	6×10 <sup>-7</sup>	31.03	23.0	3×10 <sup>-5</sup>	0.07	3.0	0.003	0.01	3×10 <sup>-5</sup>	0.01	8×10 <sup>-4</sup>	0.00025	0.002
盐湖卤水 海洋水	220	7.15		2.85	0.06		0.02	1.79	16.3	15.2	813.3	23.1	12	107.2	55.7
含量 (mg/l)	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Ag	Zn	Sr	Co	Bi	Se	Pt	Au	Ga	
水体															
盐湖卤水	0.0119	0.116	0.0042	0.0078	0.0213	0.026	1.86	54.61	5×10 <sup>-4</sup>	4.3×10 <sup>-4</sup>	0.037	0	0	0	
海洋水	0.002	0.01	0.002	0.001	0.003	4×10 <sup>-5</sup>	0.01	8.0	5×10 <sup>-4</sup>	2×10 <sup>-4</sup>	0.004		4×10 <sup>-6</sup>	3×10 <sup>-5</sup>	
盐湖卤水 海洋水	6	11.2	2.1	7.8	7.1	650	186	6.8	1	2.2	9.3				

1) 系 1982 年最新化学分析数据。

表 4 柴达木盆地盐湖卤水中的组分与海洋水的比较

盐湖卤水组分的含量高出海洋水的倍数	项 目
$n \cdot 10^2$	Th, Pb, Cr, Ag, Zn, Li
$n \cdot 10^1$	K, Mg, B, Rb, Cs, U, As, Al, Fe, Sn, Mn, Mo
$n \cdot 10^0$	Na, Ca, Cl, $SO_4$ , I, F, $NO_3$ , Ni, V, Ti, Cu, Sr, Bi, Sc
$n \cdot 10^{-1}$	$CO_3$ , Si
0	Co
$-n \cdot 10^{-1}$	$NO_2$ , P, Br
$-n \cdot 10^{-2}$	$HCO_3$

二价离子含量最大,如  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Li^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  等。

4. 在盐湖卤水中,如不计氢和氧,大多数原子序数为奇数的元素的含量比相邻的偶数元素含量高,最显著的是  $Cl > S$ ,  $Na > Mg$ ,  $K > Ca$  等。因而奇数元素含量的总和高于偶数元素含量的总和。

5. 盐湖卤水中的大多数化学成分之间密切共存,相关性好。如  $Na^+-Cl^-$ ,  $Na^+-K^+$ ,  $Na^+-SO_4^{2-}$ ,  $Na^+-B^{3+}$ ,  $Na^+-Sr^{2+}$  等(表 5)。

表 5 柴达木盆地盐湖卤水中某些成分间的简单相关系数值<sup>1)</sup>

成分	$Cl^-$	$K^+$	$SO_4^{2-}$	$B^{3+}$	$Sr^{2+}$
$Na^+$	-0.628	-0.314	0.359	0.337	-0.519

1) 样品数  $n = 42$ , 置信度  $\alpha = 5\%$  时,  $|\gamma| > 0.304$ , 具直线相关。

6. 有用化学元素 K, B, Li 等在盐湖卤水中高度富集,且在各盐湖卤水中的浓度稳定,各自都构成了独立的液体矿床。除 Li 外, K 和 B 还都有现代固体盐类沉积,形成了固体矿床。K, B, Li 在卤水中的富集与水化学类型关系密切, K 主要富集在氯化物型和氯化物过渡亚型卤水中, B 和 Li 主要富集在硫酸镁和钠→镁硫酸盐亚型卤水中,而氯化物型和氯化物过渡亚型卤水中含量相对减少(表 6)。

表 6 K, B, Li 在不同的水化学类型卤水中的平均含量值 (mg/l)

组 分	水 型	氯化物型+氯化物过渡亚型	硫酸镁亚型+钠→镁硫酸盐亚型
	K		8159.09
B		141.13	303.93
Li		39.79	71.95
样品数		13	29

7. 盐湖卤水中 K, B, Li, Mg 等元素的富集与水体的演化有关。氯化物过渡亚型卤水的等温蒸发试验结果表明: B 和 Li 随卤水的蒸发浓缩,其含量不断增加,一直富集在

卤水中,  $\text{Li}/\text{B}_2\text{O}_3$  系数值一直恒定在 0.3159 左右, 都不形成大规模的固体盐类沉积。盐湖中没有大规模的锂盐固体矿床, 至于其中的大规模现代硼酸盐固体沉积矿床, 若不是在盐湖卤水形成前由于地热活动, 猛烈地带来的大量硼补给而形成, 就是在盐湖卤水形成过程中, 由于外界条件的改变(实验结果表明: 含硼卤水经冷冻、淡水稀释、静放多年都可析出大量硼酸盐沉淀)而形成。K 和 Mg 在成盐阶段与 B 和 Li 相同, 也是随卤水蒸发浓缩含量一直增加, 但卤水浓缩至成钾阶段后, 由于形成了固体钾盐沉积, 这时, 卤水中钾含量开始下降, 同样, 当卤水浓缩至成镁阶段后, 由于形成了固体镁盐沉积, 这时, 卤水中的镁含量也将开始下降<sup>1)</sup>(图 9)。

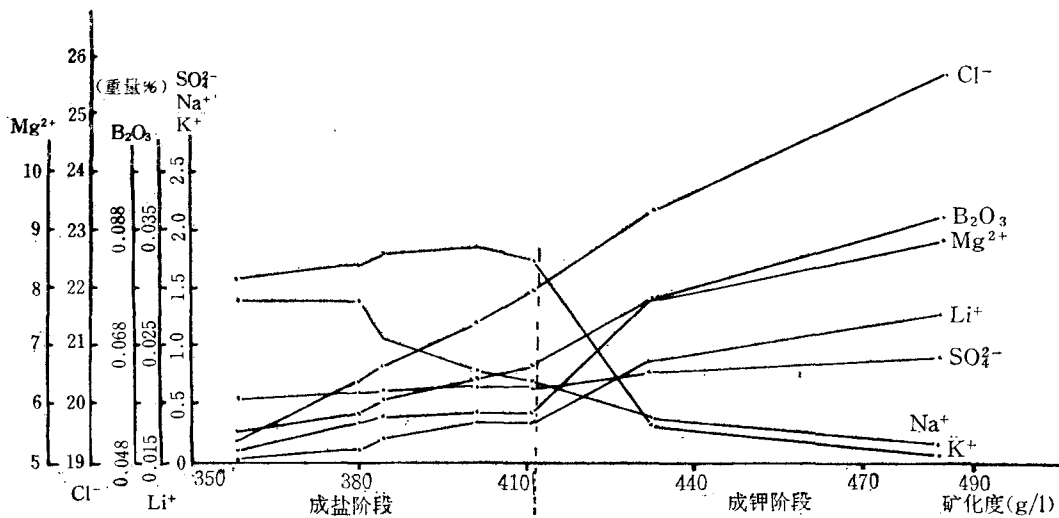


图 9 别勒滩 CK2022 卤水 25°C 等温蒸发过程中某些离子的变化

## (二) 分布规律

### 1. 元素的分配

柴达木盆地盐湖卤水中各元素含量分布特征值列于表 7。按 Cr 值将它们由小而大排列: Cl, Na, F, Br,  $\text{SO}_4$ , K, Mg,  $\text{HCO}_3$ , U,  $\text{CO}_3$ , Li, B, As, Rb, Sr, Si, I,  $\text{NO}_2$ , Ca,  $\text{NO}_3$ 。Cl 和 Na 的 Cr 值最小, 它们在各盐湖卤水中的浓度稳定, 变幅小、分布均匀;  $\text{NO}_2$ , Ca,  $\text{NO}_3$  等 Cr 值较大, 在各盐湖卤水中的浓度不稳定, 变幅大, 分布不均匀; 其他元素介于两者之间。

盐湖卤水中各元素含量值本身的分布, 根据偏态系数 ( $C_s$ ) 和峰态系数 ( $C_e$ ) 值 (表 7) 知, 大部分元素含量值属正态(正偏)。

### 2. 水平分异

(1) 位于盆地边缘(尤其南缘和北缘)的盐湖, 靠近地表和地下淡水补给, 卤水中各化学组分的浓度较小, 但个别盐湖, 如位于北缘的大、小柴旦湖, 由于早期水热活动补给物质, 所以, 卤水中 B, Li 含量较高, 形成局部富集。

1) 吴景泉、符廷进、孙玉芬, 1980。别勒滩 2022 卤水 25°C 等温蒸发试验报告。

表 7 柴达木盆地盐湖卤水中某些化学组分分布的特征值

特征值 组 分	样品数	mg/l		均方差 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$	偏态系数 $c_s = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{N\sigma^3}$	峰态系数 $c_e = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{N\sigma^4} - 3$	变异系数 $c_v = \frac{\sigma}{\bar{x}}$	分布特征
		最大值	最小值					
Na	42	116953	0	38164.52	-0.592	-1.126	0.558	正态、负偏、低峰态
K	42	23183	250	5101.2	1.620	2.422	0.853	正态 正偏 高峰态
Mg	42	118692	4176	30787.34	1.220	0.432	0.876	正态 正偏 高峰态
Ca	42	99470	0	15563.89	5.466	30.391	3.669	正态 正偏 高峰态
Cl	42	382412	45260	59895.56	0.788	1.938	0.293	正态 正偏 高峰态
SO <sub>4</sub>	42	63112	0	17995.52	0.464	-0.949	0.807	正态 正偏 低峰态
CO <sub>3</sub>	42	739	0	206.6	1.328	1.044	1.204	正态 正偏 高峰态
HCO <sub>3</sub>	42	475.9	0	124.39	0.877	-0.0132	0.976	正态 正偏 低峰态
Li	42	262	1.8	71.29	1.47	1.02	1.160	正态 正偏 高峰态
B	42	1253.18	25.93	305.69	2.384	5.033	1.210	正态 正偏 高峰态
Sr	42	399	<1	100.23	2.355	4.443	1.835	正态 正偏 高峰态
Rb	42	7.25	0.06	2.098	1.503	0.889	1.438	正态 正偏 高峰态
Si	42	19.30	痕	13.81	5.49	30.6	2.58	正态 正偏 高峰态
NO <sub>3</sub>	42	2360	0.016	365.67	5.705	32.462	4.135	正态 正偏 高峰态
NO <sub>2</sub>	42	26.29	痕	4.509	4.241	19.42	3.11	正态 正偏 高峰态
Br	42	88.04	6.97	22.88	0.92	-0.14	0.67	正态 负偏 高峰态
I	42	8.03	0.0135	1.415	4.219	18.007	2.773	正态 正偏 高峰态
F	42	22.2	1.49	5.87	0.543	-1.02	0.631	正态 负偏 高峰态
As	42	0.25	痕	0.0667	1.836	2.319	1.365	正态 正偏 高峰态
U	42	0.48	痕	0.109	1.463	1.906	1.124	正态 正偏 高峰态

(2) 位于盆地内部的昆特依湖—钾湖—东、西台吉乃尔湖—察尔汗湖区一带的盐湖，卤水中的化学组分的浓度高，形成 NW—SE 向富集带，其原因一是这些盐湖远离盆地周围的淡水补给，淡水的掺杂作用弱，二是近盆地中心，卤水经多次迁移、演化、析盐分异、浓缩程度大。在该富集带范围内的盐湖卤水中各化学组分的浓度也不尽相同，Mg 主要富集在昆特依湖、钾湖、察尔汗干湖和达布逊湖地区。B 和 Li 主要富集在东、西台吉乃尔湖、涩聂湖地区。K 主要富集在别勒滩、察干汗干湖和达布逊湖地区(图10—13)。

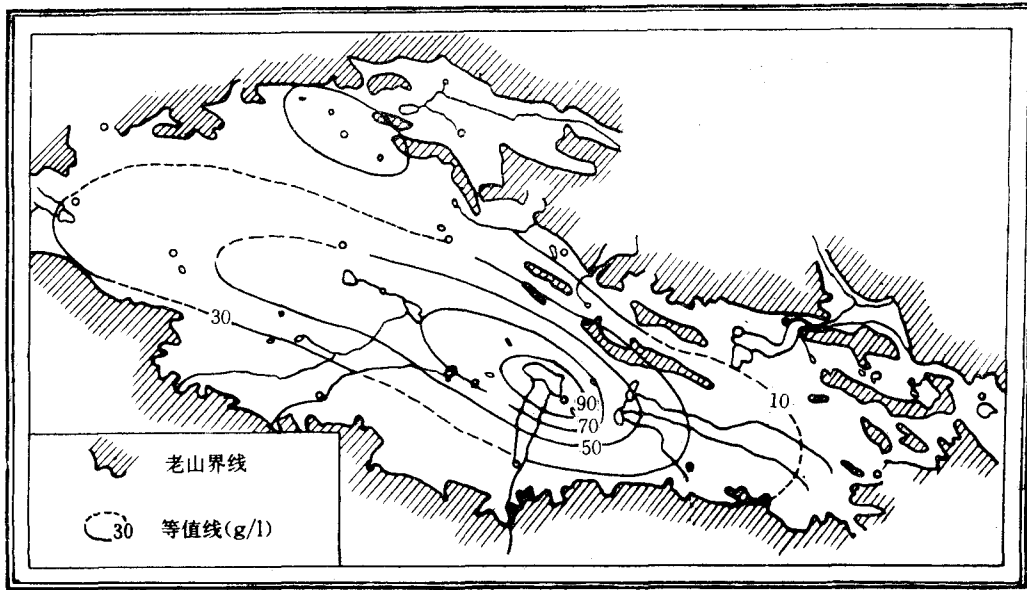


图 10 盐湖卤水中  $Mg^{2+}$  浓度等值线

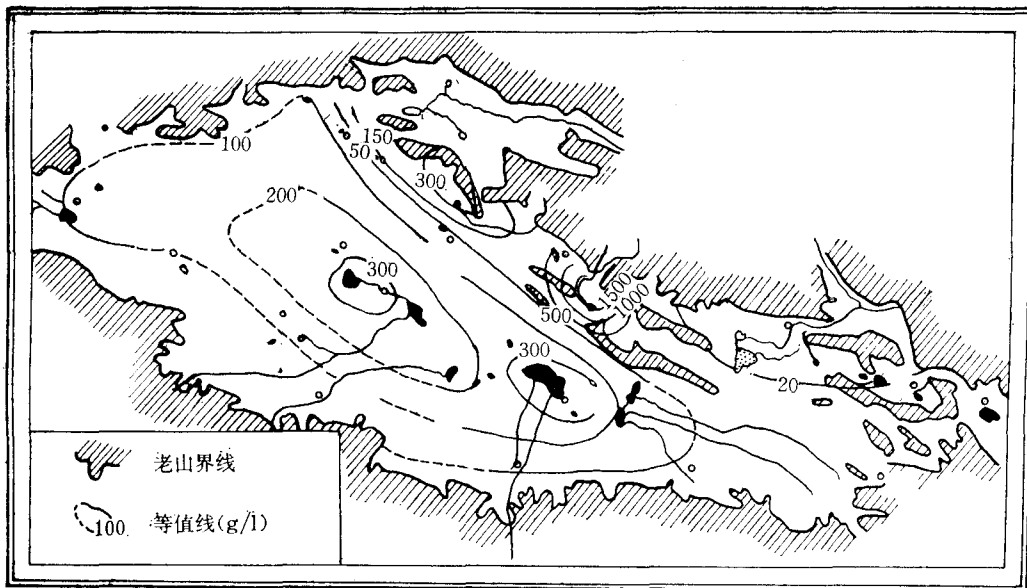
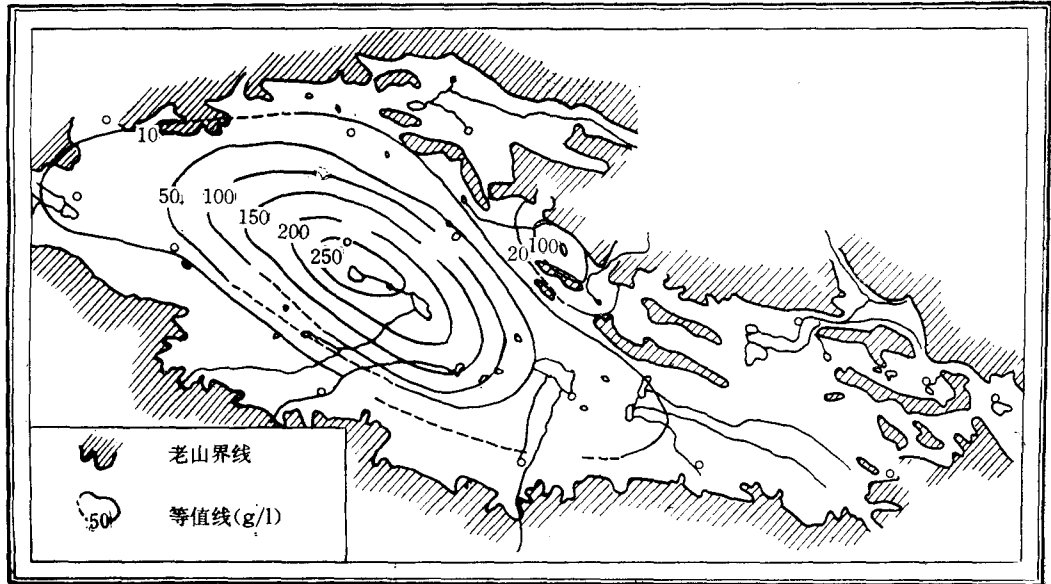
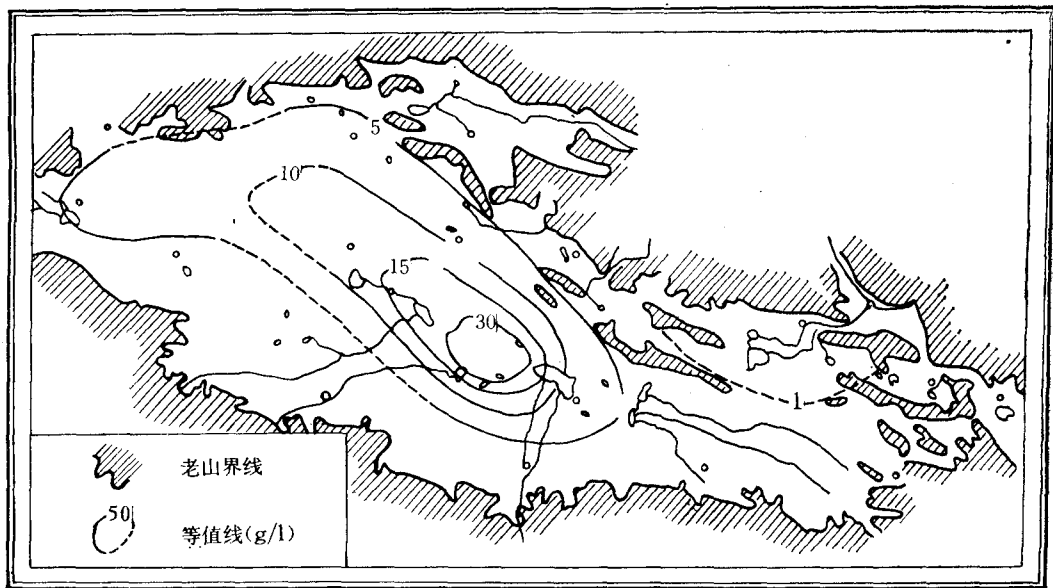


图 11 盐湖卤水中  $B^{3+}$  浓度等值线

图 12 盐湖卤水中  $\text{Li}^+$  浓度等值线图 13 盐湖卤水中  $\text{K}^+$  浓度等值线

### 3. 垂直分异

该盆地大多数盐湖湖表卤水水域面积小,水浅,在该地多风的强烈搅动作用下,化学成分的浓度较均匀,垂直分异不明显。对晶间卤水来说,察尔汗湖区工作较详细。按该湖区晶间卤水浓度垂直分异的幅度和变化特征,在平面上可分为微变型、剧变型和反常型三个区<sup>1)</sup>(表 8, 图 14):

1) 袁见齐、霍承禹, 1979。地质科技资料 3: 79。

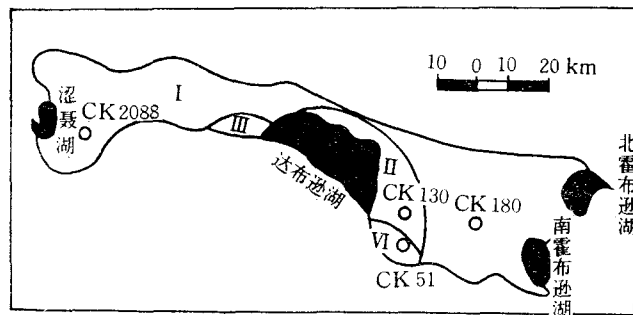


图 14 察尔汗湖区晶间卤水垂直分异类型(据王文达资料)

I——微变型; II——剧变型; III——反变型。

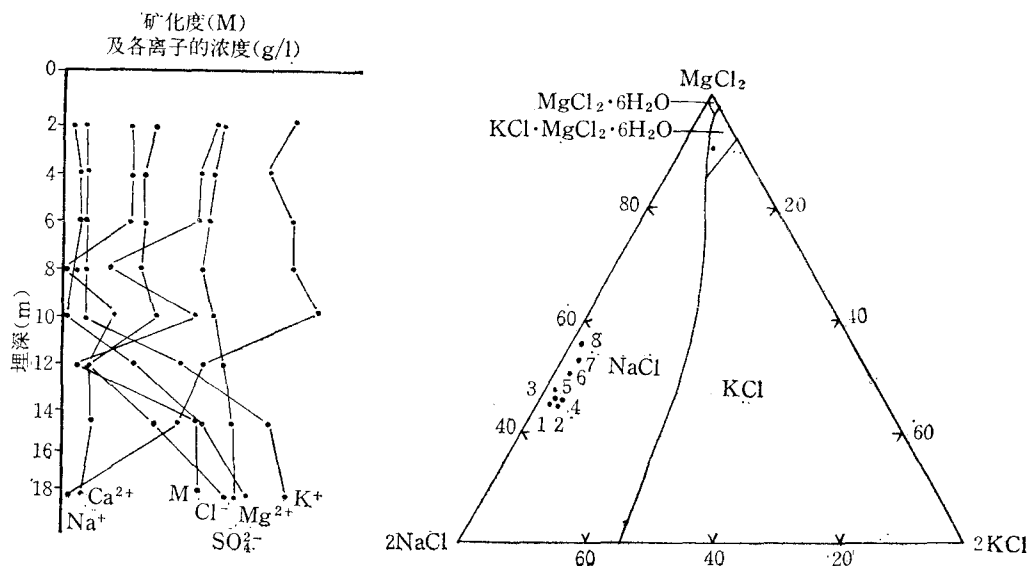


图 15 I型区 CK180 晶间卤水组分含量的垂直变化

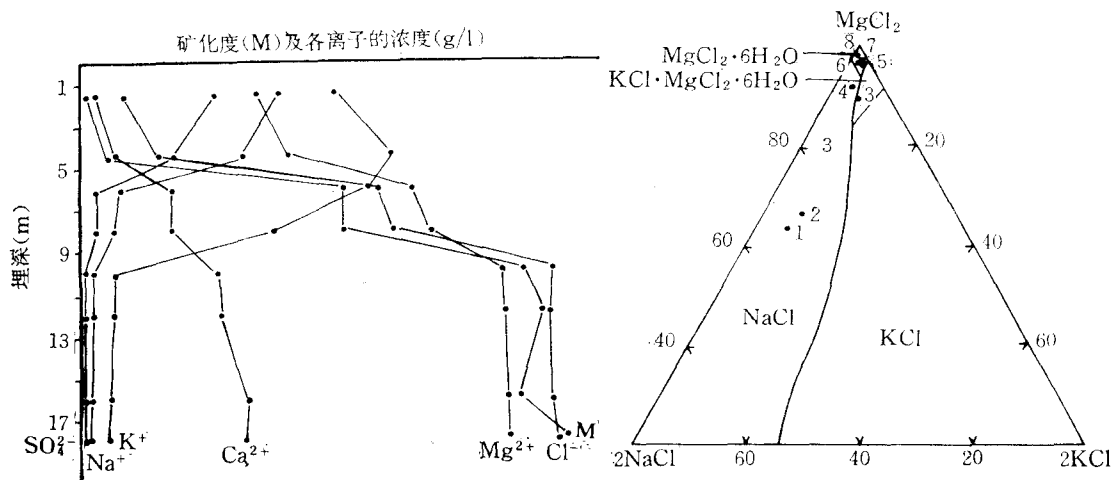


图 16 II型区 CK130 晶间卤水组分含量的垂直变化



表 8 察尔汗湖区晶间卤水化学成分随深度的变化

钻孔编号	采样深度(m)	矿化度(g/l)	比重	化学成分(g/l)						相图指数			组成点代号
				K	Na	Mg	Ca	Cl	SO <sub>4</sub>	2NaCl	2KCl	MgCl <sub>2</sub>	
CK180	2.29	317.89	1.213	3.62	64.85	29.51	12.05	207.17	0.69	52.81	1.73	45.46	1
CK180	4.29	316.91	1.213	3.66	63.50	30.05	11.73	207.32	0.65	51.80	1.76	46.40	2
CK180	6.25	317.30	1.216	3.65	64.25	30.03	11.78	206.97	0.62	52.80	1.74	45.46	3
CK180	8.31	313.30	1.215	3.57	64.10	29.28	11.42	204.33	0.60	52.72	1.73	45.55	4
CK180	10.30	317.30	1.216	3.60	65.50	29.12	11.96	206.48	0.64	53.38	1.72	44.90	5
CK180	12.30	311.81	1.214	4.00	60.00	32.71	9.08	205.33	0.69	48.30	1.89	49.81	6
CK180	14.40	317.99	1.217	4.42	58.95	35.73	9.30	208.87	0.72	45.64	2.02	52.34	7
CK180	17.87	317.51	1.219	4.48	54.55	37.58	8.85	211.32	0.73	42.53	2.05	55.42	8
CK130	1.59	332.3	1.220	12.65	49.63	44.21	0.80	212.44	6.72	35.27	5.29	59.44	1
CK130	4.42	337.7	1.229	15.20	39.45	50.91	1.44	219.95	4.59	27.26	6.18	66.56	2
CK130	5.99	394.95	1.266	14.00	9.93	81.84	4.42	273.11	0.77	5.74	4.76	89.50	3
CK130	8.00	394.18	1.269	9.43	8.58	85.50	4.24	275.92	0.78	4.88	3.15	91.97	4
CK130	10.09	438.95	1.298	1.63	2.95	103.25	6.69	315.81	0.14	1.48	0.48	98.04	5
CK130	12.10	442.05	1.300	1.55	2.95	103.18	6.87	314.27	0.15	1.48	0.46	98.06	6
CK130	15.97	436.0	1.300	1.35	2.79	103.61	7.11	315.27	0.11	1.40	0.40	98.20	7
CK130	18.05	443.68	1.296	1.25	2.74	103.99	7.02	317.64	0.12	1.37	0.37	98.26	8
CK51	2.34	444.9	1.306	6.20	5.55	102.15	0.02	283.40	36.66	2.73	1.79	95.48	1
CK51	6.06	357.4	1.259	7.72	16.29	76.42	0.04	239.97	19.91	9.85	2.74	87.41	2
CK51	10.87	389.2	1.259	8.62	10.03	85.66	0.14	259.53	15.28	5.66	2.86	91.48	3

微变型(I型): 卤水浓度自上而下虽有渐增趋势,但变幅甚微(图15)。该型分布在湖区的西、北、东部淡水补给量较小的区段。

剧变型(II型): 卤水浓度自上而下急剧增高,变幅大(图16)。该型分布在达布逊湖的北、东部地区。

反常型(III型): 卤水浓度自上而下渐减(图17)。该型分布在察尔汗湖区南部和达布逊湖西部有碎屑层伸入的地段。

卤水组成的垂直分异主要决定因素:

(1) 古气候。在地史时期,气候干旱强烈,卤水浓缩程度大,化学组分含量也高,气候干旱程度差,卤水浓缩程度低,化学组分含量也低,气候潮湿,卤水不但不浓缩,反而淡化。

(2) 与外围各种水源补给量和补给方式有关。如II型水区本是浓缩中心,卤水浓度普遍高,垂直分异不明显,只因后来的地表水补给量大,在接受补给水量较多地段的上部就形成了浓度较低的卤水,该卤水比重小,它不能垂直向下运动与下部浓卤水混合,只好单独停留在上部,形成了卤水组成上低下高的垂直分异。补给水量愈大,垂直分异愈明显。I型水区地表水不发育,即便是霍布逊湖区存在着地表水补给,因该区不是卤水浓缩中心,其浓度本来就比达布逊湖的小,所以淡化后的上部晶间卤水和下部较浓卤水的化学组成垂直差异小。另外,该区外围水的补给形式主要还是地下潜流,淡化首先发生在下部,比重较小的下部卤水被比重较大的上部卤水挤上来混合,因此,该区晶间卤水组成垂直分异不明显。III型水区主要是分布在有碎屑岩层地段,碎屑层在一定程度上阻止了

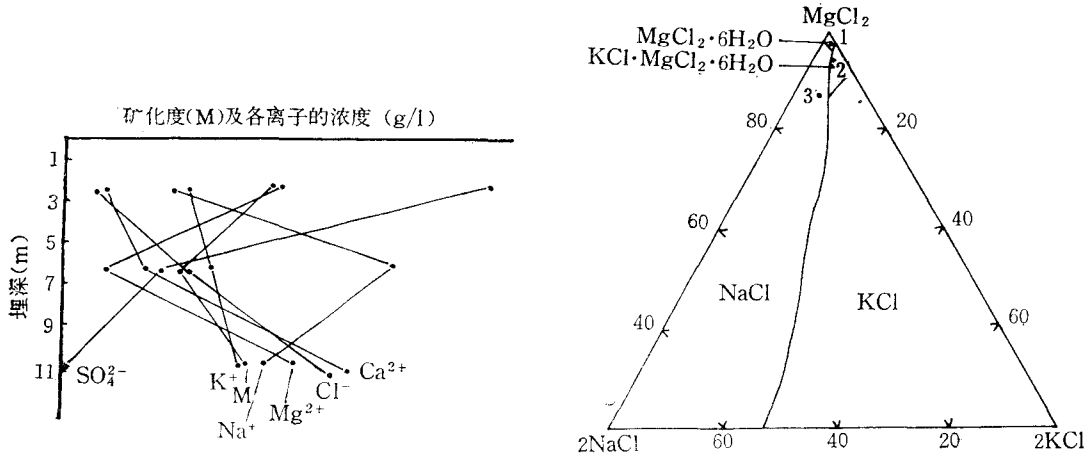


图 17 III 型区 CK51 晶间卤水组分含量的垂直变化

上、下部晶间卤水的混合,因而上部卤水随蒸发浓缩的程度比下部的要大。

(3) 与卤水演化过程中所处的析盐阶段有关。察尔汗湖区晶间卤水在蒸发浓缩过程中经历石盐—光卤石—水氯镁石结晶阶段。卤水中某些离子在各析盐阶段的含量值不一致。随卤水矿化度升高,开始析出大量石盐,卤水中 Na 含量大幅度减少, K, Mg 含量相对增加,当 K 含量达到饱和,钾盐析出时, K 又减少,当 Mg 含量增到水氯镁石析出时, Mg 含量也将减少。在地史时期,如果沉积的全是同种盐类,那么该卤水是处于同一析盐阶段,化学组成垂直分异不明显;反之,则相反。

### 参 考 文 献

- [1] 于昇松,1980。盐湖。青海人民出版社,8—9 页。
- [2] 于昇松、唐渊,1981。青藏高原盐湖的水化学特征。海洋与湖沼 12(6): 504—506。
- [3] 陈克造、杨绍修、郑喜玉,1981。青藏高原的盐湖。地理学报 36(1): 15—18。
- [4] 黄琪、蔡碧琴、余俊青,1980。盐湖年龄的测定。科学通报 25(21): 992—994。

## THE HYDROCHEMICAL FEATURE OF SALT LAKES IN THE QAIDAM BASIN

Yu Shengsong

*(Institute of Salt Lake, Academia Sinica, Xining)*

### ABSTRACT

In the Qaidam basin there are altogether 37 lakes: 1 fresh-water lake, 6 brackish-water lakes, 2 saline-water lakes and 28 salt lakes.

The pH value of salt-lake brines is 7.014 on the average, and the average total mineralization is 340.75 g/l. Their water-bodies belong mainly to the five-component equilibrium system, Na·K·Mg//SO<sub>4</sub>·Cl-H<sub>2</sub>O, which can be further grouped into Na-Mg-SO<sub>4</sub>, Mg-SO<sub>4</sub>, transitional chloride and chloride types by their hydrochemical property. The salt-lake brines of the first salt-forming epoch (N<sub>2</sub>—Q<sub>3</sub>) were of the sulphate type. In the second salt-forming epoch (Q<sub>3</sub>—Q<sub>4</sub>), some of them, however, turned to be of the chloride type.

The pH value of brines decreases with the increase of total mineralization, that is, lower when the total mineralization is in range of 50—310 g/l, and higher in the range of 310—355 g/l. However, when the total mineralization is higher than 355 g/l, the pH value will decrease slowly again.

Total mineralization of the chloride type and the transitory chloride subtype brine is higher than the sulphate type, being 310—530 g/l, 310—470 g/l, and less than 355 g/l in that order.

Among the 40 chemical components found in the saline lake brine in Qaidam basin, potassium is mainly concentrated in the chloride type and transition subtype brine, boron and lithium are mainly concentrated in the sulphate type brine. Evaporation experiments show that boron and lithium are accumulated in concentrated brine until crystallization of bischofite takes place. It is the same with potassium before salt-formation, but its content decreases after the salt-formation.