

青海湖及其水系近30年来的化学变化*

于升松

(中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008)

提要 根据1985—1987年和1989—1991年对青海湖及其水系的考查资料, 研究其化学变化。结果表明, 近30年来, 青海湖及其入湖河流域在萎缩过程中, 水系总矿化度增加, 逐渐咸化。除尕斯库勒湖的 Mg^{2+} ; 耳海水的 K^+ , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} ; 入湖河流域的 SO_4^{2-} 离子浓度减小外, 青海湖、尕斯库勒湖及耳海水体中的 Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 离子增加速率较大, Ca^{2+} , Mg^{2+} 等离子增加速率较小。尕斯库勒湖水体中各化学组分浓度增加速率较其它湖大。青海湖及尕斯库勒湖水型由 Cl_{III}^{Na} 变成 Cl_{II}^{Na} , 耳海由 Cl_{III}^{Na} 变成 Cl_{II}^{Na} ; 布哈河、哈尔盖河由 C_{II}^{Ca} 变成 C_{I}^{Ca} , 黑马河由 C_{II}^{Ca} 变成 C_{II}^{Ca} , 倒淌河由 C_{II}^{Ca} 变成 C_{I}^{Na} , 沙柳河、甘子河及泉吉河水型不变, 仍为 C_{II}^{Ca} 。

关键词 青海湖 水系 化学变化

对青海湖的考察和研究, 已进行了系统论述(中国科学院兰州地质研究所等, 1979)。本文仅就1985—1987年和1989—1991年对该湖重新考察后所获得的最新水化学分析资料及其与同行的研究成果, 进一步与前人资料对比, 阐述青海湖及其水系的化学变化及可能的发展趋势, 并以此作为青藏高原边缘的干旱、半干旱区近代环境变迁的湖泊方面的一点佐证, 同时, 也帮助人们去了解高原上盐湖的形成演化过程。

1 青海湖及其水系变化概况

近30年来, 青海湖及其水系(图1)一直处于萎缩过程中, 1962年时, 青海湖东缘仅存在尕斯库勒湖和耳海两个子湖; 湖水中耸立着鸟岛、海心山、三块石及沙岛4大岛屿(中国科学院兰州地质所, 1979)。1986年时, 在湖的东缘又形成了海晏湾和沙岛湖两大子湖; 鸟岛已与陆地连成一片, 原沙岛与新形成的沙岛相连而形成一片新的大沙岛。

1959—1988的29年间, 青海湖水位累计下降了2.96m, 年平均下降速率10.21cm/a; 1988年时, 湖水位为3193.59m; 湖水容量累计下降了 $130.51 \times 10^8 m^3$, 年均下降速率 $4.50 \times 10^8 m^3/a$ 。1988年时, 湖水容量为 $738.8 \times 10^8 m^3$ 。1956—1988的32年间, 湖水面积减小了301.60km², 年均减小速率9.43km²/a, 1988年, 湖水面积为4282.30km²(周立华等, 1992)。

流入该湖河流50余条(集水面积大于50km²), 不对称分布, 主要从湖区北面和西面入湖, 大部分为间歇河, 仅甘子河、哈尔盖河、沙柳河、泉吉河、布哈河、黑马河和倒

* 国家自然科学基金资助项目, 4880103号。于升松, 男, 出生于1941年11月, 研究员。

参加研究工作的还有陈克造、唐渊、邵明显、雷亚川、王克俊等同志, 刘建华同志清绘了图件, 谨志谢忱。

收稿日期: 1993年12月23日, 接受日期: 1994年6月17日。

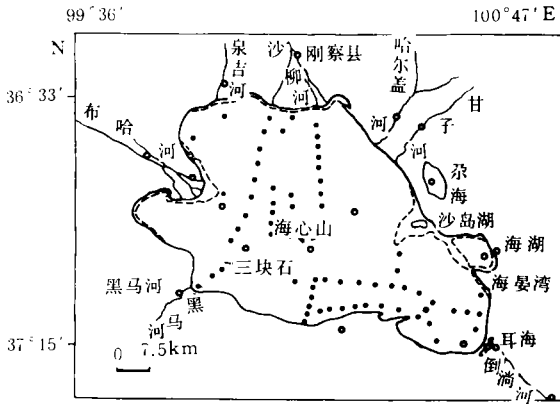


图1 青海湖及其水系分布

Fig.1 The distribution on Qinghai hu Lake and its river system

· 1985年取样点；。1989年取样点；——1962年湖岸线；
---1989年湖岸线。

青海湖年均损失水量达 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{a}$ ，水量入湖人不敷出而导致湖水面积及总容水量减小。

2 青海湖及其水系的化学组分及其变化

2.1 化学组分 据1985—1989年资料(表1、表2),青海湖水的总矿化度 $14.45 \text{ g} / \text{L}$, pH 值 = 9.24, 主要化学组分的浓度顺序: 阳离子 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ \gg \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$; 阴离子 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} \gg \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$, 并且, 湖水的总矿化度、pH 值及化学组分的浓度, 不论在横向或纵向上, 其变异系数甚小(除离子 Ca^{2+} 浓度变化较大, 变异系数为 30.7% 外, 其他, 如总矿化度、离子 $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+}, \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}$ 及 HCO_3^- 浓度变化极小, 变异系数仅在 2.69% — 4.88% 之间), 分布极为均匀, 这些离子浓度在平面上的分布无明显的异常区, 随着水深增加, 也见不到化跃层。水型¹⁾为 $\text{Cl}_{\text{II}}^{\text{Na}}$ 。

尕海水的总矿化度为 $32\ 602.1 \text{ mg} / \text{L}$, pH 值为 9.25, 主要化学组分的浓度顺序: 阳离子 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ \gg \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$; 阴离子 $\text{Cl}^- \gg \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 。水型为 $\text{Cl}_{\text{II}}^{\text{Na}}$ 。耳海水的总矿化度为 $1\ 492.5 \text{ mg} / \text{L}$, pH 值为 9.52, 主要化学组分浓度顺序: 阳离子 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ \gg \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$; 阴离子 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- \approx \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ 。水型为 $\text{Cl}_{\text{I}}^{\text{Na}}$ 。

湖区周边河流水的总矿化度除倒淌河(总矿化度为 $621.7 \text{ mg} / \text{L}$)外, 其他变化于 $220.2 \text{ mg} / \text{L} - 286.02 \text{ mg} / \text{L}$ 之间, pH 值为 8.53 — 8.87, 主要化学组分浓度顺序: 阳离子 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, 或者 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$; 阴离子多为 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, 少部分为 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$, 水型除黑马河($\text{C}_{\text{III}}^{\text{Ca}}$)外, 均为 $\text{C}_{\text{II}}^{\text{Ca}}$ 。

1) 系阿列金(ArekuH)分类法。Cl、C 分别为氯化物及碳酸盐水类, 其右上角的元素为水组, 右下角罗马数字为水型, 如, $\text{Cl}_{\text{I}}^{\text{Na}}$ 为氯化物类, 钠组, I 型水, 其余依次类推。

淌河 7 条河流为主要的常年性河流。1958 — 1986 的 28 年间, 河流年均径流量 $16.0 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{a}$, 年际变化虽有波动, 但总趋势下降。1962 — 1988 的 26 年间, 湖区集水面积减少了 $5\ 289 \text{ km}^2$, 年均减少速率为 $203.42 \text{ km}^2 / \text{a}$, 1988 年时, 湖区集水面积为 $34\ 950 \text{ km}^2$ 。

据秦伯强等(1992)、杨贵林等(1992)及周立华等(1992)等人研究资料, 取定 1958 — 1986 年期间, 青海湖区如下水文参数: 年均降水量 (P) $17.82 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{a}$, 年均地表水径流量 (Q_s) $16.0 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{a}$, 年均地下水径流量 (Q_g) $4.56 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{a}$, 年均蒸发水量 (E) $42.50 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{a}$, 灌溉等人工用水量 (A) 年均 $0.38 \times 10^8 \text{ m}^3 / \text{a}$, 按水均衡方程: $E + A = P + Q_s + Q_g$, 青

以上不难看出，青海湖水化学组成(尤其水中离子浓度顺序)与尕海及耳海水的完全相同，而与周边河水的正好相反。

2.2 化学组分变化 近30年来，青海湖区现代气候向着干旱气候发展，入湖水量入不敷出而导致湖水面积减少，水体总矿化度增加，其中，尕海水年增加速率最大，青海湖水的较小。化学组分：尕海水的 $K^+, Na^+, Cl^-, SO_4^{2-}$ 及入湖河流水的 $Ca^{2+}, CO_3^{2-}, HCO_3^-$ 离子浓度年增加速率最大；耳海水的 $K^+, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}$ 及入湖河流水的 SO_4^{2-}, Cl^- 离子浓度年趋减小；青海湖水中各离子浓度自 1962 年起均稳定增加。水化学类型：青海湖及尕海水型由 Cl^{Na}_{III} 变成 Cl^{Na}_{II} ，耳海由 Cl^{Na}_{II} 变成 Cl^{Na}_I ；布哈河、哈尔盖河由 C^{Ca}_{II} 变成 C^{Ca}_I ，黑马河由 C^{Ca}_{III} 变成 C^{Ca}_{II} ，倒淌河由 C^{Ca}_{II} 变成 C^{Ca}_I ，沙柳河、甘子河及泉吉河水型不变，仍为 C^{Ca}_{II} (表 1—表 3)(于升松，1992)。

2.3 化学组分变化趋势 河流水的化学组分主要取决于各河流的类型，流域面积，流域区出露的岩石、土质性质及风化程度等。目前，流入青海湖的河流水的主要化学成分为 $Ca^{2+}, Mg^{2+}, CO_3^{2-} + HCO_3^-$ 及 SO_4^{2-} 离子(图 2)，水型为 C^{Ca}_{II} (表 2)。根据孙大鹏等人(1993)研究，形成青海湖时的主要水来自外围河水，这些内陆河水进入湖盆之后，由于湖水的漫长地质时期蒸发浓缩及脱碳酸盐等化学作用及生物化学作用，使湖原始水体化学组分浓度及水型发生了变化：由于文石、方解石、白云石及水菱铁矿等碳酸盐矿物从水中析出，使湖水中的 Ca^{2+}, Mg^{2+} 及 $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ 离子浓度不断减小，同时，由于脱硫酸盐作用，湖水中 SO_4^{2-} 部分被还原，形成较多黄铁矿，而使水体中 SO_4^{2-} 含量相对减小。而水中 Na^+, K^+ 及 Cl^- 离子浓度不断增加(图 2)。

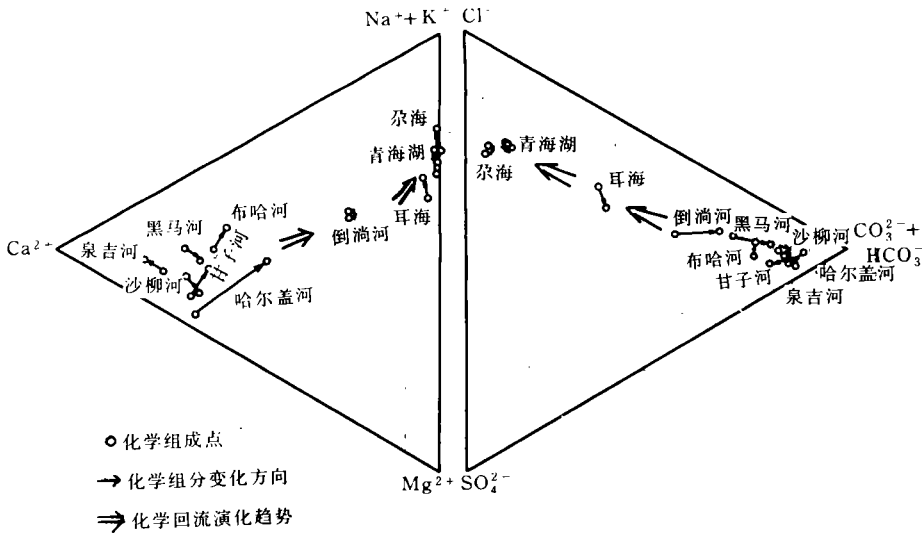


图2 青海湖及其水系演化

Fig. 2 Chemical evolution of Qinghaihu Lake and its river water system

青海湖水中阴离子、阳离子的化学演化方向：阴离子由原始水体的 $CO_3^{2-} + HCO_3^- - SO_4^{2-} - Cl^-$ 而演化成 $Cl^- - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} + HCO_3^-$ 序列；阳离子由原始水体的 $Ca^{2+} - Mg^{2+} - Na^+ + K^+$ 而演化成 $Na^+ + K^+ - Mg^{2+} - Ca^{2+}$ 序列，水型演化序列由 $C^{Ca}_{II} \rightarrow Cl^{Na}_{III} \rightarrow Cl^{Na}_{II}$ 。

表1 青海湖、尕斯海、耳海水化学组分浓度等多年变化

Tab.1 Variations of chemical composition concentration of Qinghaihu, Gahai and Erhai Lakes over years

浓度	年份	化学组分								总矿化度	pH	水型
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻			
青海湖 浓度 (mg/L)	1880	110	3711	4	733	5403	2112		1727	13,800	9.1 — 9.4 9.52	Cl ^{Na} _{III} Cl ^{Na} _{II}
	1962	146.1	3258.2	9.87	821.8	5274.7	2034.3		525.0	12,489.37		
	1985 ¹⁾	157.4	3980.26	15.42	793.8	5860.7	2373.5		679.7	14,380.24		
	1989 ²⁾	142.95	4038.19	10.50	791.36	5945.56	2337.8		661.74	14,452.9		
尕斯海 浓度 (mg/L)	1880	36.1	-452.8	5.87	88.8	-128.3	-77.7			-1310.63	9.4 9.25	Cl ^{Na} _{III} Cl ^{Na} _{II}
	1962	11.3	722.06	5.55	-28	586	339.2		154.7	1,890.87		
	1985	-14.45	57.93	-4.92	-2.44	84.86	-35.7		-17.96	72.66		
	1989	0.30	3.0	0.06	0.54	4.98	2.07		3.88	5.99		
耳海 浓度 (mg/L)	1962	308.9	6721.6	15.12	1469.5	10660.6	4587.7		519.7	25375.4	9.0 9.52	Cl ^{Na} _{II} Cl ^{Na} _I
	1985	466.4	9580.62	49.58	1388	13526.7	6268.7		642.1	32602.1		
	浓度差 ΔC	157.5	2859.0	34.46	-81.5	2866.1	1681		122.4	7226.7		
	速率 [mg/(L·a)]	6.85	124.31	1.50	-3.54	124.61	73.09		5.32	314.2		
耳海 浓度 (mg/L)	1962	19.16	267.91	11.63	86.27	291.7	207.9		87.4	1146.7	9.0 9.52	Cl ^{Na} _{II} Cl ^{Na} _I
	1985	17.46	349.61	20.66	87.67	396.2	203.9		319.8	1492.5		
	浓度差 ΔC	-1.7	81.7	9.03	1.4	104.5	-4		232.4	345.8		
	速率 [mg/(L·a)]	-0.074	3.55	0.39	0.061	4.54	-0.17		10.10	15.03		

1) 98 个水样测得数据的平均值; 2) 25 个水样测得数据的平均值。

表3 青海湖及其水系化学组分浓度变化

Tab.3 Variation of chemical composition concentration of Qinghai hu Lake and its river systems

年份 水系		1880—1989 青海湖	1962—1985 尕海	1962—1985 耳海	1985—1989 入湖水系
化 学 组 分	K^+	32.95 / 0.30 ¹⁾	157.5 / 6.85	-1.70 / -0.074	0.407 / 0.102
	Na^+	327.19 / 3.00	2,859 / 124.31	81.70 / 3.55	36.88 / 9.22
	Ca^{2+}	6.50 / 0.06	34.46 / 1.5	9.03 / 0.39	17.10 / 4.28
	Mg^{2+}	58.36 / 0.54	-81.50 / -3.54	1.40 / 0.061	6.60 / 1.65
	Cl^-	542.56 / 4.98	2,866.1 / 124.61	104.5 / 4.54	54.68 / 13.67
	SO_4^{2-}	225.80 / 2.07	1681 / 73.09	-4.01 / -0.17	-9.08 / -2.27
	CO_3^{2-}	104.78 / 3.88	107.4 / 4.67	-77.55 / -3.75	30 / 7.5
	HCO_3^-	136.74 / 5.06	122.4 / 5.32	232.4 / 10.10	233.76 / 58.44
总矿化度		652.90 / 5.99	7,226.7 / 314.2	345.80 / 15.03	263.18 / 65.8
水型		$Cl_{III}^{Na} \rightarrow Cl_{II}^{Na}$	$Cl_{III}^{Na} \rightarrow Cl_{II}^{Na}$	$Cl_{II}^{Na} \rightarrow Cl_{I}^{Na}$	

1) 分子为浓度变化值 (mg / L); 分母为年均浓度变化速率值 [mg / (L · a)]。

湖区各水体的演化顺序：河流水→耳海水→青海湖水→尕海水。因此说，河流水和耳海水的化学组成是青海湖水的过去，尕海水的化学组成是青海湖水的未来，如果气候持续干旱，尕海未来可能会演化成盐湖的早期阶段，而青海湖短期内不会变成盐湖。

3 结语

近 30 年来，青海湖区现代气候向着干旱方向发展，湖水总矿化度增加，化学组分的浓度分配结构发生变化，使湖水向着 Ca^{2+} ， Mg^{2+} 和 $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ 及 SO_4^{2-} 浓度减小， Na^+ ， K^+ 及 Cl^- 浓度增加方向演化。今后若干年，如果气候仍然持续向着干旱趋势发展，该湖水总矿化度还将持续增加，并且其各化学组分浓度分配还将持续发生变化，最终可能导致尕海首先进入盐湖发展的早期阶段，而只要气候持续干旱的渐变过程中的大的突变性干旱灾害不发生，青海湖本身短期内不会变为盐湖。

参 考 文 献

- 于升松, 1992, 湖泊科学, 4 (3): 17—23.
 中国科学院兰州地质研究所等, 1979, 青海湖综合考察报告, 科学出版社 (北京), 26—23.
 孙大鹏等, 1993, 科学通报, 38 (9): 824.
 杨贵林等, 1992, 湖泊科学, 4 (3): 17—23.
 周立华等, 1992, 湖泊科学, 4 (3): 35.
 秦伯强等, 地理学报, 1992, 47 (3): 167—173.

CHEMICAL CHANGES OF QINGHAIHU LAKE AND ITS RIVER WATER SYSTEM IN THE LAST 30 YEARS

Yu Shengsong

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

Abstract Qinghaihu Lake is China's biggest inland brackish lake. Erhai Lake and Gahai Lake are its daughter lakes. About 50 rivers flow into the lake. As Qinghaihu Lake and rivers that flow into it shrink, the lake water salinity and mineralization have been increasing for nearly 30 years. Except for concentration of Mg^{2+} in Gahai Lake waters, K^+ , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} in Erhai Lake water and SO_4^{2-} in rivers that flow into the lake decrease, all chemical component concentration in Qinghaihu Lake and that of other ions in the above-mentioned waters increase. But the annual average rate of increase is different, that of, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} being higher, that of Ca^{2+} , Mg^{2+} being lower. The increase rate of chemical component concentration in Gahai Lake waters is higher than that in other lakes. Water type has changed from Cl_{III}^{Na} to Cl_{II}^{Na} in Qinghaihu Lake and Gahai Lake waters, from Cl_{II}^{Na} to Cl_I^{Na} in Erhai Lake waters; from C_{II}^{Ca} to C_I^{Ca} in Buha and Hargai Rivers, from C_{III}^{Ca} to C_{II}^{Ca} in Heima River and from C_{II}^{Ca} to C_I^{Ca} in Daotang River, and has been unchanged (C_{II}^{Ca}) in Shaliu, Ganzi and Qúanji Rivers.

Key words Qinghaihu Lake River water system Chemical changes