

柴达木盆地昆特依盐湖的地球化学 演化与古气候变化*

韩凤清 黄 麒 王克俊 王华安 原 力

(中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008)

提要 1990 年用铀系年代学及古地磁对昆特依盐湖沉积物进行年代测定, 探讨该湖区地球化学演化与古气候变化关系。结果表明, 该区最老的盐层形成于早更新世晚期(大于 730ka), 大量的盐类沉积则始于 300ka 左右; 盐湖沉积物中元素含量变化主要受古盐度、矿物、类质同象和吸附控制; 沉积物水溶 F/Cl 比值与古盐度成反比关系; 该湖 2000ka 以来的古环境演变: 盐层形成于干冷、偏酸性的氧化环境, 泥岩层形成于温暖、偏碱性的还原环境。认为, 昆特依盐湖 730ka 以来, 有 8 次大的干湿与冷暖气候的波动。

关键词 盐湖沉积物 元素垂直分布 古盐度指标 地球化学环境 第四纪古气候 昆特依盐湖

昆特依盐湖位于青海柴达木盆地西北部, 是一个特大型钾盐、芒硝和石盐的综合盐类矿床, 总量高达 500 亿 t。本文根据考察资料, 结合前人的研究成果(黄麒等, 1990)对该湖 2000ka 以来的古盐度、元素地球化学演化、地球化学环境与古气候变化进行初步探讨。

1 样品的采集与测定方法

所有样品均于 1988—1990 年取自昆特依盐湖的 ZK3208 孔, 该孔位于湖区的沉积中心, 深 500.9m。500.9—336m 为含粉砂泥岩, 取化学分析样 21 个; 336—0m, 石盐层与含粉砂泥岩交替出现, 石盐层取化学分析样 37 个, 含粉砂泥岩层取 27 个化学分析样。将所采岩芯样的表层削去, 留取其中间部分作为分析样品。样品烘干后称重, 粉碎过 120 目筛孔。

F, Cl 元素采用水溶, 前者用 LaF_3 离子选择性电极测定, 后者用汞量法测定。Li, Na, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Al, V, Ti, Fe, Mn, Zn, Cu, P 和 S 16 种元素用氢氟酸分解, 王水提取。Li, Na 用原子吸收测定, 其余 14 种元素用 ICP-AES 法测定。为研究 K 在不同沉积物不同组分间的分布与分配, K 用水和氢氟酸分别溶解, 水溶以 K^+ 表示, 用火焰发射光谱测定, 氢氟酸全溶的用 K 表示, 用 ICP-AES 法测定。

从地表至地下 122m 之间取年代样 7 个, 6 个样品为含粉砂泥岩, 1 个为含粉砂石盐。年龄测定采用不平衡铀系法(表 1)。

2 研究结果

* 国家自然科学基金资助项目, 18975066 号。韩凤清, 男, 出生于 1963 年 8 月, 助研。

在研究过程中得到徐昶和刘群柱先生的帮助, 谨志谢忱。

收稿日期: 1991 年 11 月 3 日, 接受日期: 1993 年 2 月 13 日。

表 1 昆特依盐湖 ZK3208 孔年龄数据

Tab. 1 Age data in the core ZK3208 of the Kuntayi Salt Lake

深度 (m)	3.90	14.5	23.0	52.0	66.9
年龄 (ka) ¹⁾	30.6±3.0	65.0±8.0	126±24	165±17	174±21
深度 (m)	98.3	115	122	302 ²⁾	469 ³⁾
年龄 (ka) ¹⁾	247±28	292±32	329±42	730	2075

1) 年龄数据的标准偏差为±1σ; 2) 302m 为古地磁 B/M 界限; 3) 469m 为奥都维正极性亚期。古地磁界限资料由青海地质一队提供。

2.1 元素地球化学演化

ZK3208 孔中地下 500.9—336m 间的含粉砂泥岩层是未成盐阶段, 336m—地表的泥岩层与石盐层为昆特依盐湖的成盐阶段。不同阶段与不同岩性中元素的均值及其变异系数见表 2。

表 2 昆特依盐湖不同演化阶段岩层中元素的平均含量 (×10⁻²%) 及变异系数

Tab. 2 elemental average contents (×10⁻²%) and variation coefficients in rocks of different evoluntional stages of the Kuntayi Salt Lake

	Na	Cl	F	F/Cl	SO ₄	K ⁺	Ca	Mg	Sr	Zn
V ₃	0.18	0.23	0.27	1.27	1.79	3.05	1.91	1.88	1.40	2.00
V ₂	0.68	1.66	0.33	0.71	0.86	0.67	0.39	0.45	0.37	0.76
V ₁	0.26	0.38	0.27	0.42	1.30	0.31	0.42	0.55	0.66	0.65
X ₃	3440	4960	0.15	0.38	570	29.5	101	71.5	0.50	0.30
X ₂	304	470	0.09	4.08	1410	15.1	1040	401	6.20	3.70
X ₁	239	189	0.07	4.22	435	9.80	986	324	6.74	2.10
A	66.0	1.60	—	—	90.0	—	253	134	4.50	0.80

	Ba	K	Li	Mn	Cu	P	Al	V	Ti	Be	Fe
V ₃	2.40	2.16	0.60	0.85	0.67	2.25	1.33	1.19	1.42	2.00	1.36
V ₂	0.60	0.38	0.33	0.61	0.46	0.30	0.31	0.29	0.32	0.27	0.30
V ₁	0.53	0.27	0.28	0.27	0.49	0.26	0.23	0.30	0.46	0.30	0.27
X ₃	0.50	40.3	0.10	0.40	0.03	0.40	30.4	0.04	1.90	0.00	15.4
X ₂	7.00	154	0.30	6.90	0.22	5.40	420	0.70	23.4	0.05	230
X ₁	9.20	212	0.30	5.20	0.24	5.80	525	0.80	31.3	0.05	284
A	8.00	228	0.60	6.67	0.57	7.70	1050	1.30	45.0	0.03	333

A, 全球泥质岩均值(武汉地质学院, 1979); V, 变异系数; X, 元素的平均值。下标数字 1 代表未成盐阶段泥岩、2 代表成盐阶段泥岩、3 代表成盐阶段石盐层。

对于元素的分组, 作者采用元素在表生环境水体中迁移能力的强弱(水迁移系数)和元素在本盐湖沉积物中的分布特点作为依据。

2.1.1 Na, Cl, F, SO₄, K⁺, K⁺/K 此类元素在地表水体中迁移能力最强(水迁移系数最大), 其离子在水中易溶, 当水体蒸发强烈时很容易富集而从水中析出。从表 2 中看出, Na, Cl, F 3 元素在不同阶段不同岩性中变异系数及含量变化趋势是一致的, 其含量不但远高于全球泥质岩均值, 而且自下而上逐渐增大, 显示湖水水体日益咸化。不同阶段不同

岩性中 Na, Cl, F 的变异系数有这样特点: 成盐阶段泥岩中变异系数最大, 盐层中变异系数最小, 未成盐阶段泥岩中变异系数介于上述二者之间(表 2)。Na, Cl, F 在沉积物中的含量受古气候制约, 故认为 Na, Cl, F 的含量(特别是 Na, Cl)反映古气候的干湿程度, 而其变异系数显示干湿气候的稳定程度。由此可见, 盐层形成时的干旱气候比较稳定, 成盐阶段泥岩形成时的半干旱气候波动最剧烈, 而未成盐阶段泥岩形成时的湿润气候变化剧烈程度介于以上二类气候之间。

水溶 K^+ 的含量由下而上逐渐增大, 同时其变异系数也在增大, 这表明水溶 K^+ 的含量变化范围增大了。 K^+/K 之比(水溶 K^+ 与全溶 K 之比)在未成盐阶段泥岩中仅为 0.05, 表明此阶段的 K 元素主要以不可溶的碎屑矿物形式(如伊利石)存在。在成盐阶段泥岩中 K^+/K 比值稍有增加, 为 0.10。成盐阶段盐层中 K^+/K 比值变化较大, 在中部及下部盐层中其比值仅为 0.20, 表明大部分 K 仍存在于盐层的碎屑矿物杂质中, 以可溶盐形式存在的 K 仅占一小部分; 在上部盐层中, 自下而上盐层的 K^+/K 比值逐渐增大, 表层盐中该比值几乎为 1, 表明 K 绝大部分以可溶性盐类存在, 以碎屑矿物杂质存在的 K 仅占全部 K 的极少部分。从上述 K^+/K 比值的变化趋势上看, 钾盐层存在的有利层位是在靠近表层的盐层中。

2.1.2 Ca, Mg, Sr, Ba, Zn 这 5 个元素在地表水体中迁移能力较强(水迁移系数较大)。Ca, Mg, Zn 的含量变化及变异系数的变化类似。Ca 在未成盐阶段泥岩中主要以碳酸盐存在, 少量以石膏形式存在; 在成盐阶段泥岩中 Ca 存在方式与上述存在方式正好相反; 盐层中 Ca 存在于碎屑矿物杂质中。Mg 在不同阶段泥岩中均以绿泥石存在, 盐层中以泻盐和自钠镁矾存在。Zn 在地表水体中的迁移能力大小与介质的氧化还原电位成正比关系 (Fortecue, 1980), 故 Zn 从下至上逐渐增大反映当时介质的氧化还原电位有明显升高。

Sr 与 Ba 的含量变化类似, 自下而上泥岩中二者均逐渐降低(表 2), 其原因为: 成盐阶段泥岩中的石膏与未成盐阶段泥岩中的碳酸盐相比, 石膏不利于 Sr 和 Ba 对其中的 Ca 进行类质同象替换, 而碳酸盐与石膏正好相反。

盐层中 Ca, Mg, Sr, Zn, Ba 的变异系数平均值高达 1.80, 表明它们在盐层中的含量变化很不稳定, 变化范围很大。

2.1.3 Mn, Cu, Li, P 这 4 个元素在地表水体中迁移性很差, 其平均含量很低(表 2), 并随盐湖演化的深入而逐渐变小, 相反变异系数却增大了。

2.1.4 Al, V, Ti, Be, Fe 此类元素在水体中几乎不以离子态迁移(水迁移系数极小), 而主要是以固态形式迁移。自下而上其含量逐渐降低(表 2)。未成盐阶段泥岩和成盐阶段泥岩中这 5 个元素的变异系数均较小, 表明其含量变化范围较窄; 盐层中变异系数均很大, 显示 5 元素的含量变化范围很宽, 并且其含量是很低的。

2.1.5 晶间卤水、海水及盐层中元素含量的比较 从表 3 列出的数据看, 昆特依盐湖区晶间卤水中元素的含量均很高, K, Mg, Sr, Li 的含量一般高出海水两个数量级, 盐层中上述 4 元素一般也高出海水一个数量级。

2.2 地球化学环境与古气候演变

2.2.1 古盐度与古气候的干湿变化 前人对海洋古盐度变化有较多的研究 (Berner,

表 3 晶间卤水、盐层及海水中元素含量($\times 10^{-2}\%$)的比较

Tab. 3 Comparison of elemental contents in intercrystal brine, salt layers of the Kunteyi Salt Lake and sea water

	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	Li	F	Sr
晶间卤水 ¹⁾	538	122	379	72.8	2169	8.44	0.27	0.03	1.82
盐层	3440	29.5	71.5	101	4960	570	0.10	0.15	0.50
海水 ²⁾	108	3.99	12.8	4.12	194	81.9	0.00	0.01	0.08

1) 张彭熹,1987; 2) 陈国珍,1990。

1979; Nelson, 1969; Shen et al., 1982; Spears, 1974),实验研究表明,水体中 F 离子浓度与水体中 NaCl 的浓度成正比。作者对其实验数据计算后,发现 F/Cl 值与盐度成反比关系。在环青海湖各类水体中也发现 F/Cl 比值与盐度呈现反比关系(表 4)。

表 4 环青海湖各类水体中盐度(g/L)与 F/Cl($\times 10^{-4}\%$) 比值的反比关系

Tab. 4 Salinities inversely proportional to F/Cl ratios in different waters around Qinghai Lake, Qinghai

各水体	尕海	青海湖	洱海	布哈河	降雪
盐度	30.5	13.0	1.39	0.82	0.03
F/Cl	0.034	0.082	1.77	3.60	17.3

昆特依盐湖沉积物中 F,Cl,F/Cl 比值的变化趋势(图 1)为:泥岩中的 F/Cl 比值远大于盐层,无论是泥岩还是石盐层,自下而上 F/Cl 比值均逐渐变小。与此相对应,自生矿物依次出现碳酸盐、石膏和石盐,这种矿物序列表明古盐度从下至上是一个增大序列。从上述讨论中看出,F/Cl 比值与盐度成反比关系的结论从实验资料计算和青海湖各类水体中得到证实,从实际应用和矿物序列显示的古盐度变化中进一步得到了相互验证。

成盐阶段泥岩中 F/Cl 比值的变异系数大于未成盐阶段泥岩中 F/Cl 的变异系数(表 2),显示前者的古盐度变化大于后者;盐层中 F/Cl 比值的变化表明:上部盐层形成时的古盐度最大,下部次之,中部盐层最小。

自下而上盐层与泥岩层的交替出现,表明干旱与湿润气候的频繁波动,泥岩层厚度向上变薄和石盐层厚度的增大表明湿润气候的减弱与干旱气候的加强,这种趋势与古盐度变化是一致的。

2.2.2 地球化学环境变化 昆特依盐湖沉积物中盐层的矿物组合为石盐与芒硝。芒硝在水中的溶解度取决于温度,二者成正比关系,故温度降低有利于芒硝从水体中析出。在西藏盐湖湖底沉积物中芒硝很常见(郑喜玉等,1988),与此相反,柴达木盆地盐湖湖底沉积物中芒硝罕见(张彭熹,1987)。对比西藏盐湖区和柴达木盆地盐湖区的年平均气温,前者仅为-0.9℃,后者高达 2—4℃(郑喜玉,1988;张彭熹,1987),显然,西藏盐湖区的低温气候是芒硝析出的直接因素。故认为昆特依盐湖沉积物中由芒硝和石盐组成的盐层应形成于干燥和寒冷的气候之中。

在昆特依盐湖的泥质岩层中其矿物组合为伊利石和绿泥石,这一组合通常认为是冰

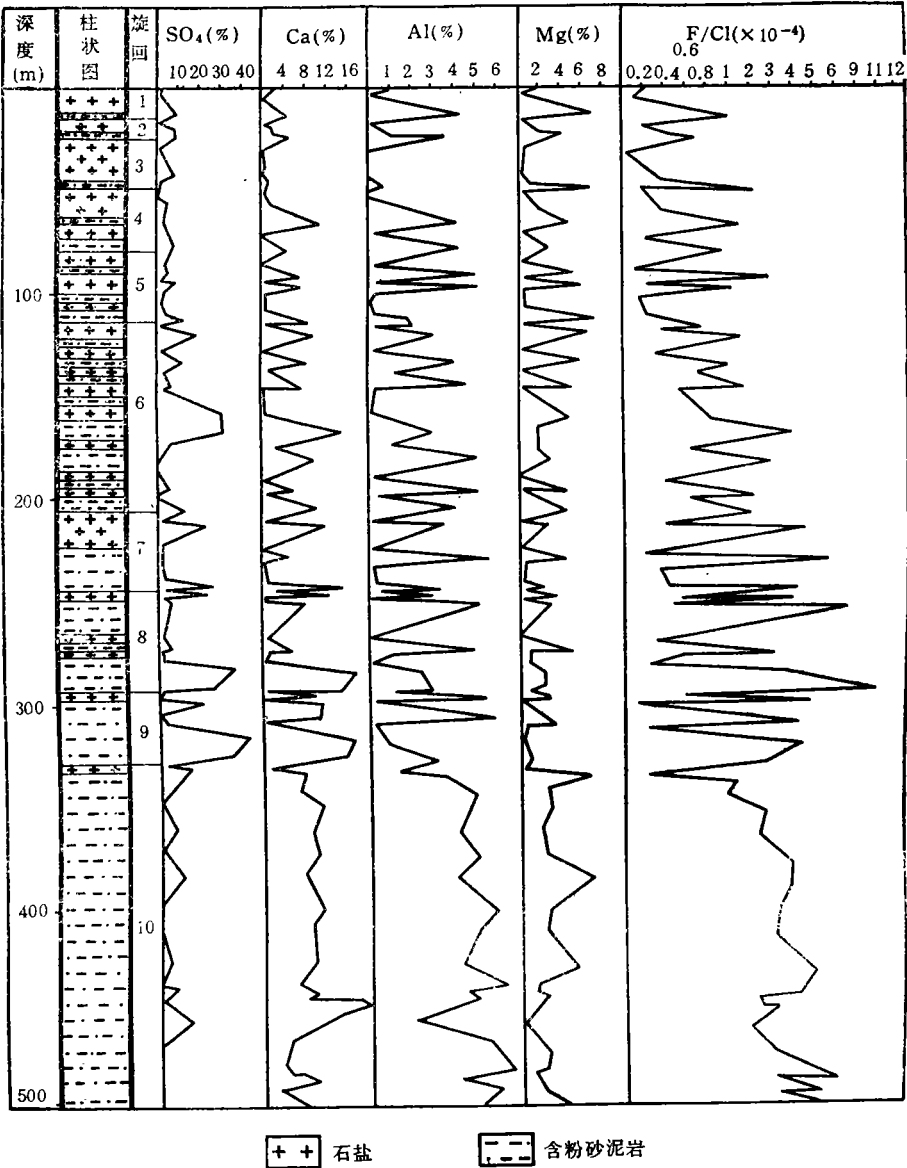


图 1 昆特依盐湖成盐旋回划分

Fig. 1 Division of cycles of salt-forming in the Kuntayi Salt Lake

川区的粘土矿物组合。由于本湖沉积物中无冰碛物出现，推测其成因为：昆特依盐湖沉积物的物源区有冰碛物，在气候转暖时融化的水体将物源区冰碛物中的粘土搬运到湖中沉积下来，所以该湖泥质岩应形成于温湿的气候中。

泥岩中伊利石、碳酸盐和绿泥石等矿物出现，表明其形成于偏碱性环境；泥岩中有机质与硫化物出现，表明其形成于还原环境，即泥质岩形成于偏碱性的还原环境。盐层中出现高价硫酸盐矿物，如芒硝、泻利盐和白钠镁矾等，显示盐层形成于偏酸性的氧化环境中。

2.2.3 古气候变化 在盐湖演化中古气候的变化表现为成盐旋回的更替,即干湿与冷气候的转化。在工作中发现,2000ka 以来昆特依盐湖有 10 次大的成盐旋回,即古气候变化旋回(图 1)。每次大的成盐旋回代表一次大的干冷与暖湿气候变化,其具体表现为: 1)每次成盐旋回至少有一层石盐和泥岩层,最多时达到 6 层,盐层向上变厚而泥岩层变薄;2)各旋回中 Ca , Al , SO_4 向上逐渐变小,泥岩中 Mg 向上逐渐增大;3)古盐度由小变大,干冷气候向上增大而暖湿气候逐渐减弱。

从成盐旋回研究中可知,早期成盐旋回中暖湿气候占主导地位,而中晚期成盐旋回以干冷气候为主,尽管向上成盐旋回的周期缩短了,但成盐作用的强度增大了。

3 结论

3.1 常量元素中易迁移元素的含量主要与古盐度有关,不易迁移元素的含量主要受矿物控制;微量元素主要与类质同象和吸附作用有关。

3.2 古盐度研究结果显示,随盐湖演化的深入与发展,古盐度不仅向上增大,而且波动范围也在增大,表明古盐度在高值时很不稳定,在低值时正好相反。

3.3 实验数据计算,青海湖及昆特依盐湖的资料研究表明:水溶 F/Cl 比值可作为古盐度的新指标,二者成反比关系。

3.4 泥岩层形成于偏碱性还原环境和温湿气候之下;相反,盐层形成于偏酸性氧化环境和干冷气候之下。

3.5 从 2000—730ka 之间,昆特依以暖湿气候为主;730ka 以来出现干冷与暖湿气候的波动:早期以暖湿气候为主,中晚期以干冷气候为主。730ka 以来出现的 8 次气候波动与察尔汗盐湖区是一致的(黄麒等,1990),但昆特依盐湖古气候的干湿变化比察尔汗盐湖更为强烈、更为明显。

参 考 文 献

- 陈国珍,1990,海水痕量元素分析,海洋出版社(北京),1110—1113。
张彭熹,1987,柴达木盆地盐湖,科学出版社(北京),2,199。
武汉地质学院,1979,地球化学,地质出版社(北京),40—42。
郑喜玉等,1988,西藏盐湖,科学出版社(北京),18—22。
黄麒、陈克造,1990,73 万年以来柴达木盆地察尔汗盐湖古气候波动的形式,第四纪研究,3: 205—211。
Berner, R. A., 1979, Authigenic iron sulfides as palaeosalinity indicator, *J. Sedi. Petro.*, 49 (4): 1345—1350。
Fortecue, J. A. C., 1980, *Environmental Geochemistry*, Springer-Verlag (New York), p. 83。
Nelson, B. W., 1969, Sedimentary phosphate method for estimating palaeosalinity, *Science* 158:917—920。
Shen, Der-Duen et al., 1982, Inferred palaeosalinity and phosphate content of carbonate rock from a cyclic evaporite-carbon rock sequence, *J. Sedi. Petro.*, 52 (3):897—903。
Spears, D. A., 1974, Relation between water-soluble cations and palaeosalinity, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38:567—575。

STUDY OF GEOCHEMICAL EVOLUTION AND PALAEO-CLIMATIC FLUCTUATION OF KUNTEYI SALT LAKE IN THE QAIDAM BASIN, QINGHAI

Han Fengqing, Huang Qi, Wang Kejun, Wang Huaan, Yuan Li

(*Institute of Salt Lakes, Academia Sinica, Xining 810008*)

ABSTRACT

In 1990 uranium series age, paleomagnetic and geochemical study of the sediment from Kunteyi Salt Lake in the Qaidam Basin were carried out to approach the relation between geochemical evolution and paleoclimatic evolution of the lake. The results show that the earliest salt layer was formed in the late of Lower Pleistocene (730 thousands years ago). Large scale halite precipitation began about 300 thousand years ago. The elemental content variations are controlled by salinity, mineral-forming, isomophic replacement and adsorption. Water soluble F/Cl ratio is an new indicator of palaeosalinity, the former is inversely proportional to the latter. Salt layers in the Kunteyi Salt Lake were formed in oxidation-subacid under dry-cold palaeoclimate, mud layers in reduction-subalkalinity under warm-moist palaeoclimate. On the basis of element geochemistry, palaeosalinity and sedimentology, authors suggest there have been 8 large palaeoclimate fluctuations (from the warm-moist to cold-dry) during the last 730 ka in the region of Kunteyi Salt Lake.

Key words Salt lake sediments Vertical distribution of elements Indicator of palaeosalinity Geochemical environments Quaternary palaeoclimate Kunteyi Salt Lake