

文章编号: 1000-0550(2007) 04-0619-07

青藏高原秋里南木湖原生硼砂、芒硝韵律层的发现及气候环境意义

李明慧^{1,2} 康世昌¹ 卜令忠² 郑绵平²

(1 中国科学院青藏高原研究所 北京 100085 2 中国地质科学院矿产资源研究所 北京 100037
3. 冰冻圈科学国家重点实验室 兰州 730000)

提 要 湖泊沉积物中沉积韵律是个普遍现象,但盐类矿物组成的韵律现象比较少见。盐类矿物多出现在干旱的环境中,芒硝是干冷环境下沉积的盐类矿物。本文主要根据芒硝层厚度的变化,结合原生硼砂、粘土、孢粉、碳酸盐等环境指标,讨论了秋里南木湖 27.8~4.97 ka BP 的气候环境演化并进行了区域对比,为青藏高原是气候变化敏感区的观点提供了盐类矿物学方面的证据。研究认为,27.8~20.5 ka BP 湖区气候相对温暖潮湿,20.5~11.4 ka BP 气候寒冷,其中 20.5~17.5 ka BP 气候极端干冷,为末次盛冰期在秋里南木湖的反映,17.5~17.1 ka BP、15.9~15.2 ka BP 和 14.1~13.4 ka BP 气候条件略微好转;11.4~10.1 ka BP 气候温暖,10.1~7.5 ka BP 气候寒冷,其中 8.1~7.9 ka BP 的冷气候为“8.2 ka BP 冷事件”的反映;7.5~4.97 ka BP 气候相对温暖,但波动频繁。原生硼砂的存在说明,27.8 ka 以来秋里南木湖水温度不高,湖水较浅,水动力条件稳定。

关键词 芒硝 原生硼砂 粘土矿物 气候变化 盐湖 青藏高原

第一作者简介 李明慧 女 1974 年出生 博士 环境矿物学及古气候环境 E-mail: lin inghu@ pku. org. cn

中图分类号 X141 **文献标识码** A

盐类矿物主要是指天然盐水受蒸发而使某些组分达到饱和而形成的化学沉积矿物,多出现在海相和湖相沉积中。盐类矿物的沉淀需要严格的地理环境和气候条件:即长期干旱的气候、有供给盐水的古地理条件、控制浓度的封闭条件和保存盐岩的后生条件^[1],因此,盐类矿物常用于气候环境变化的研究中^[2,3]。据统计,我国盐湖盐类矿物共有 70 种,碳酸盐类 18 种,硫酸盐类 25 种,硼酸盐类 14 种,氯化物类 8 种,硝酸盐类 5 种^[4]。芒硝是干冷环境下沉积的硫酸盐矿物,气候越冷,越容易沉积,沉积厚度也越大^[5,6]。秋里南木湖是一个封闭的干盐湖,沉积物中出现了大量不同厚度的芒硝与薄层硼砂、粘土互层的交替现象,相关报道不多。本文将主要依据芒硝厚度变化讨论湖区古气候环境的演化特征。

1 地质概况

秋里南木湖位于藏北高原,冈底斯山脉北侧,日喀则、阿里地区交界处(图 1)。该湖为构造湖,处于冈底斯—喜马拉雅褶皱带上,主要受北北西和近东西与北东向三组断裂所控制。出露的地层有石炭系、二

叠系、白垩系、第三系和第四系等。秋里南木湖现已成为干盐湖,与扎布耶湖曾经为统一的大湖,8.7~7.6 ka BP 成为独立湖泊^[7]。现代湖区气候为高原寒带干旱气候,年均温不超过 1℃,雨季集中在 7~8 月,其它为大风干旱季节。日照充足,昼夜温差大。年降水量小于 150 mm,年蒸发量 2 200~2 500 mm(改则气象站)。

2 方法与结果

盐湖沉积物中含有较多的盐类矿物,提取粘土矿物时,先用蒸馏水反复冲洗,直到 pH 小于 8 再用一般粘土矿物方法提取,分别做成自然片、乙二醇饱和片和 550℃加热片,然后进行 X 光扫描。仪器型号为 D/M ax-RC; CuK α : 50KV-70mA; 连续扫描速度: 4°/min; 起止角度: 2 θ = 3°~30°。粘土矿物主要是绿泥石,含量为 70%,伊利石较少,含量为 30%,二者都是岩石早期风化和物理风化作用的产物。

孢粉分析,用氢氟酸处理,添加石松孢子,再用 10 μ m 筛网过滤,然后进行镜下鉴定。33 个孢粉样品共统计鉴定化石 5 419 粒花粉,平均 164.2 粒/样,

国家自然科学基金项目(批准号: 40401054 40121101),中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-339),国家重点基础研究发展规划项目(2005CB422004)及中国科学院“百人计划”共同资助。

收稿日期: 2006-10-21; 收修改稿日期: 2006-12-03

分属 37 个科属, 孢粉浓度较低, 多数小于 1 000 粒 / 克样 (最高为 5 961.68 粒 / g 最低为 89.77 粒 / g), 其中草本植物花粉含量较高 (53% ~ 97%), 其次为乔木 (10% ~ 30%), 蕨类 (< 13%) 和灌木 (< 8%) (图 2)。草本花粉主要是蒿 (*Artemisia*)、藜科 (*Chenopodiaceae*)、禾本科 (*Gramineae*)、莎草科 (*Cyperaceae*)、羊膜草 (*Hemiphragma*), 其次为菊科 (*Compositae*)、律草 (*Humulus*)、唐松草 (*Thalictrum*)、伞形科 (*Umbelliferae*)、狐尾藻 (*Myriophyllum*)、蔷薇科 (*Rosaceae*)、报春花科 (*Primulaceae*)、玄参科 (*Scrophulariaceae*)、毛茛科 (*Ranunculaceae*) 等, 偶尔出现十字花科 (*Cruciferae*)、蓼 (*Polygonum*)、紫菀 (*Aster*) 和委陵菜 (*Potentilla*); 乔木花粉有松 (*Pinus*)、云杉 (*Picea*)、桦 (*Betula*) 等, 偶尔出现卫矛、云杉、榆 (*Ulmus*) 和胡桃 (*Juglans*); 灌木花粉有麻黄 (*Ephed-*

ra) 和白刺 (*Nitraria*); 蕨类孢子主要是单缝孢 (*Psilamonoletes*) 和铁线蕨 (*Adiantum*), 少量卷柏 (*Selaginella*), 偶尔出现凤尾蕨 (*Pteris*) (图 2)。

本文年代测定采用 ^{14}C (无机碳) 和 U 系法 (表 1 和 2)。化学分析在国家地质测试中心完成。 ^{14}C 半衰期采用 5568 年, 起始计年为 1950 年; 液闪仪器型号 Quantulus-1220 (LKB), 为方便对比, 本文采用校正年龄, 其它层位采用内插法和外推法。

表 1 ^{14}C 年代与深度对应表Table 1 ^{14}C ages versus depths

实验室编号	深度 / m	^{14}C 年代	校正 / Cal a BP
CG-4889	28.1	4510 ± 260	5200
CG-4890	114.9	6130 ± 70	7000

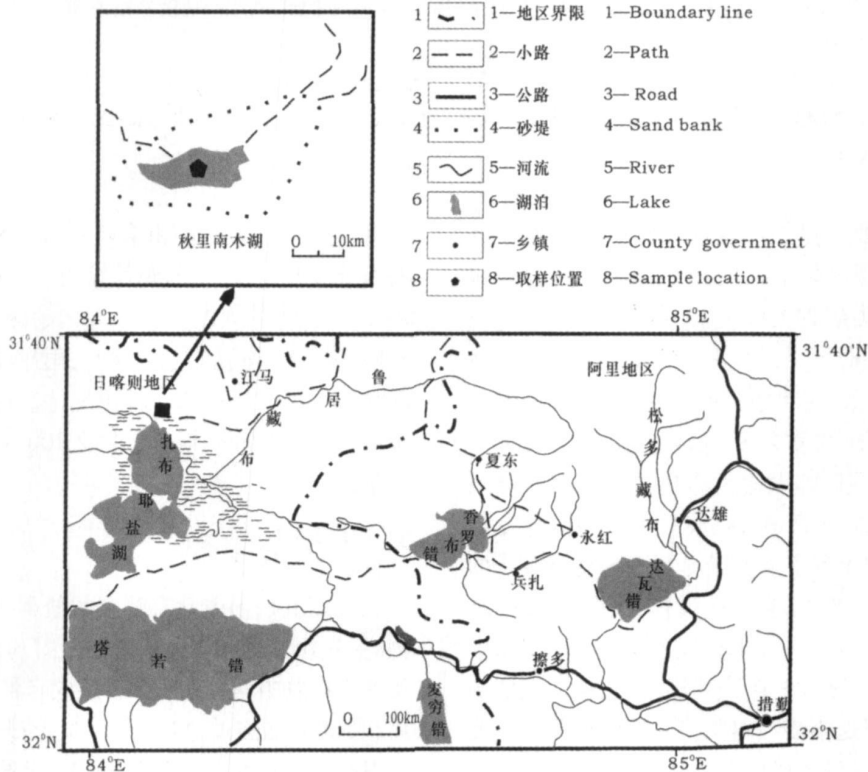


图 1 秋里南木湖地理位置及交通图

Fig 1 Location of Qilinnamu Lake

表 2 U 系法年代与深度对应表

Table 2 U series ages versus depths

样品号	深度 / m	$\text{U} / \times 10^{-6}$	$^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th} / ^{232}\text{Th}$	$^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$	校正年龄 / ka BP
LW-76	196	21.148 ± 0.394	1.492 ± 0.013	10.632	0.067 ± 0.002	7.8 ± 0.3
LW-96	266.4	9.776 ± 0.307	1.418 ± 0.033	5.63	0.101 ± 0.003	11.4 ± 0.5
LW-128	684	9.992 ± 0.244	1.472 ± 0.027	8.65	0.174 ± 0.006	20.6 ± 0.7
LW-135	736.17	5.073 ± 0.121	1.479 ± 0.029	9.12	0.227 ± 0.010	27.5 ± 1.4

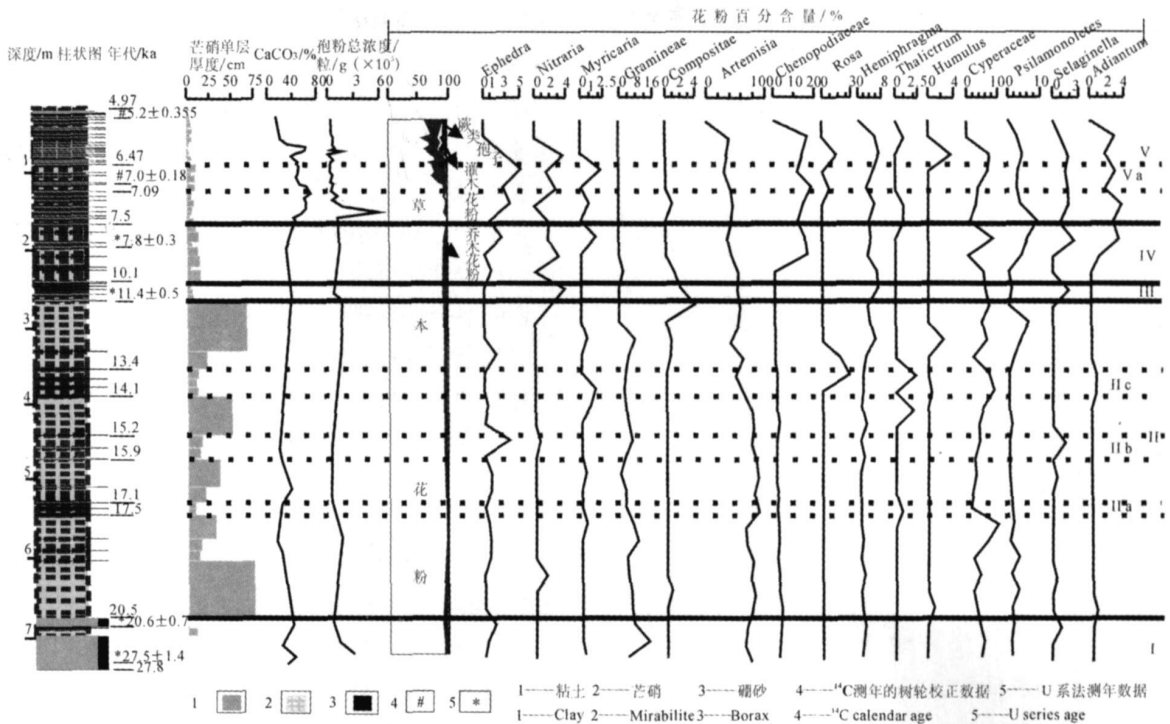


图 2 秋里南木湖剖面

Fig 2 Variations of multi-proxies versus depth and age from Quli'namu Lake

3 原生硼砂、芒硝韵律互层的发现

3.1 沉积特征与环境矿物学

剖面(图 2)厚 739.2 m, 有三种岩性: 原生硼砂、芒硝、碳酸盐粘土。沉积层序由上而下为: 0~ 17 m 为风化芒硝与碳酸盐粘土等的混合物;

17~ 89.5 cm 芒硝单层厚 2~ 5 cm, 碳酸盐粘土和硼砂单层小于 1 cm, 三者互层;

89.5~ 167 cm 芒硝单层厚 5~ 9 cm, 碳酸盐粘土和硼砂单层小于 1 cm, 三者互层;

167~ 241 cm 芒硝单层厚 10~ 15 cm, 碳酸盐粘土和硼砂单层小于 1 cm, 三者互层;

241~ 266.8 cm 芒硝单层厚 2~ 7 cm, 碳酸盐粘土和硼砂单层 1~ 2 cm, 三者互层;

266.8~ 678.7 cm 芒硝单层较厚, 除有两层 8 cm, 其余在 15~ 75 cm 之间; 硼砂单层小于 1cm, 碳酸盐粘土不成层, 只是散乱地分布在不平整的芒硝层凹坑内。

678.7~ 739.2 cm, 芒硝单层仅厚 2 cm, 硼砂、碳酸盐粘土以微细层理互层的形式出现。

芒硝层的矿物主要是芒硝 ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), 含量 98% 以上, 硼砂和泥质少量, 芒硝颗粒直径为 0.25~ 15 mm, 空气中易失水变成白色粉末, 极易溶于水。

芒硝是典型的冷相矿物, 剖面中芒硝单层厚度变化较大(图 2)。

原生硼砂集中出现在粉末状硼砂层中, 这种晶体一般生长在浅水、水动力条件比较安静、低温、稳定的物理化学条件、浅水和富 B、Ca 的环境中, 这种硼砂并不多见, 除秋里南木湖以外, 只在西藏曲依错的极浅湖水中有发现(郑绵平等, 1993 内部资料), 在数厘米至十几厘米深的卤水中呈 0.4~ 1 cm 厚的薄层状。

与盐类矿物相比, 粘土矿物一般表示暖气候, 与粘土矿物中的高龄石、蒙脱石相比, 绿泥石和伊利石的形成环境相对干旱, 但与盐类矿物的形成条件相比则为暖湿。硼砂出现在芒硝和粘土层之间, 说明硼砂代表的气候条件介于芒硝和粘土之间。另外, 干旱是盐类矿物的形成条件之一, 因此, 芒硝、硼砂、粘土的互层变化指示了干冷、干次冷和暖湿气候的交替, 由于剖面沉积物中主要是芒硝, 所以, 本文所揭示的主要是干冷气候的变化情况。

3.2 年代学与沉积速率

剖面的年代数据如表 1 和表 2 其它层位年代使用插入法计算, 其中小于 5.2 ka 大于 27.5 ka 的年代数据根据最近的沉积速率计算, 年代外推至 4.97 ka BP 和 27.8 ka BP(图 2), 平均沉积速率如图 3, 盐类

矿物的沉积速率比粘土的快,如表3所列扎布耶盐湖其它钻孔的沉积速率,粘土的沉积速率为0.221~0.829 mm/a,而3720~2730 a BP芒硝的沉积速率竟达到2.606 mm/a。

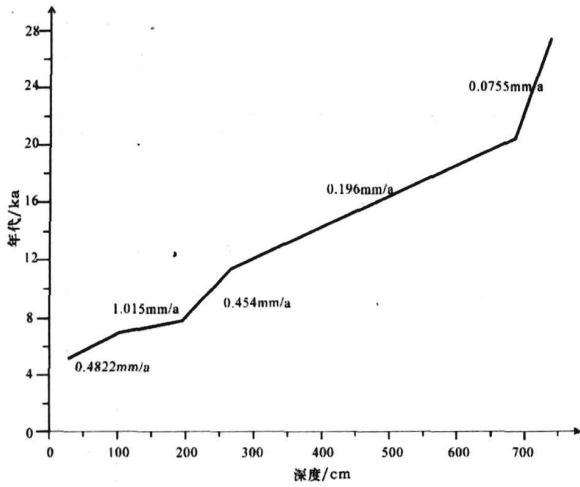


图3秋里南木湖剖面的沉积速率

Fig. 3 Sedimentation rate of Qiliu Lake

表3 扎布耶湖钻孔的沉积速率*

Table 3 Sedimentation rate in Zhabuye Lake Core

钻孔号	岩性	起止年代 / a BP	沉积速率 / mm / a
ZK 14/66	黄绿色—灰黑色碳酸盐粘土	15600~5310	0.221 mm / a
ZK 14/73	无色芒硝	3720~2730	2.606 mm / a
80m 钻	含硼砂碳酸盐粘土	5520~3330	0.502 mm / a
80m 钻	灰色碳酸盐粘土	15470~6147	0.337 mm / a
ZK 91	灰黑色碳酸盐粘土	38000~22130	0.829 mm / a
ZK 91	灰黑色碳酸盐粘土	29330~22130	0.8 mm / a

* 郑绵平提供的内部资料

不同时期沉积速率产生差异的原因可能是: (1) 气候因素: 不同时段的气候冷暖干湿不同, 入湖物质多少不同, 从而影响沉积速率的大小, 气候干冷物源不足可能是20.5~11.4 ka BP沉积速率低的原因之一; (2) 岩性变化: 芒硝、硼砂和粘土的频繁交替会影响沉积速率的大小。粘土矿物比盐类物质沉积慢, 也是造成27.8~20.5 ka BP沉积速率低的原因之一; (3) 测年方法: 河流、泉水等入湖水体带入沉积物和基岩中相对老化的碳, 影响¹⁴C年代结果, 11.4~7.8 ka BP沉积速率的计算为两种测年方法混合使用, 可能会影响沉积速率; (4) 层位的缺失和厚度的变化: 芒硝、硼砂都是易溶于水的矿物, 随气候变化芒硝和硼砂层厚度发生变化是可能的, 但由于湖区气候干旱寒冷, 气候的暖湿程度低, 持续时间短, 且硼砂单层厚度多数不超过1 cm, 所以这种影响相对较小; (5) 芒

硝的成岩压实作用: 剖面中芒硝经压实作用固结成坚硬的盐岩层, 实测芒硝厚度小于原始厚度, 会降低沉积速率值。扎布耶盐湖3720~2730 a BP芒硝的沉积速率为2.606 mm/a(表3), 但与本文年代时段差异较大, 缺少可比性。

由于芒硝、硼砂和粘土交替频繁, 文中没有获得每一种岩性的沉积速率, 所以, 只能采用平均速率即三者的混合速率进行其它年代的计算, 所幸硼砂和粘土层都很薄, 特别是20.5~11.4 ka BP硼砂和粘土层总厚度不超过1 cm, 11.4~7.8 ka BP硼砂和粘土层总厚度不超过2.7 cm, 减小了速率混用的误差影响。

4 古气候分析

依据芒硝层厚度、孢粉、碳酸盐含量的变化, 对气候阶段的划分和分析如下:

(1) 27.8~20.5 ka BP(739.2~678.7 cm): 主要以硼砂和粘土层为主, 碳酸盐含量为22%~43%, 草本花粉含量为89.6%~93.4%, 乔木花粉的含量为3%~6%, 气候相对温暖潮湿。22.8~21.5 ka BP出现10 cm厚的芒硝层, 说明气候出现干冷波动。整个剖面中乔木花粉浓度一直较低, 不超过50粒/g, 所占含量也不超过30%, 而乔木花粉的传播距离一般在几百千米以上, 所以27.8 ka以来研究区不存在森林植被^[8], 所以, 下面的文字不再讨论乔木花粉含量变化。

秋里南木湖与相邻的扎布耶湖在8.7~7.6 ka BP之前为统一的大湖^[7], 26.5~25.5 ka BP湖中盘星藻数量最高, 为淡水环境, 气候温暖湿润, 西南季风起控制作用^[9]; 22.8 ka BP介形类数量和生物种类锐减, 气候由暖偏湿转向干冷^[10]; 20.8 ka BP矿化度急剧增加, 盘星藻突然消失, 成为咸水湖^[9]。

(2) 20.5~11.4 ka BP(678.7~266.8 cm): 厚层芒硝集中出现在这个阶段, 芒硝单层厚度基本上都在15 cm以上, 最厚达75 cm, 草本花粉占绝对优势, 其中又以蒿为主(>80%), 碳酸盐含量较低(图2), 气候干旱寒冷, 为末次冰期在秋里南木湖的反映。由于不同地区、不同环境指标的反映时间和程度差别较大, 末次冰期又分为四期, : 73~72 ka BP, : 56~40 ka BP, : 24~16 ka BP, : 11.5~10.4 ka BP^[11], 但完整记录这四个冰期的沉积物不多。

秋里南木湖20.5~17.5 ka BP芒硝单层厚度达75 cm, 没有粘土出现, 气候极端干旱寒冷, 为末次冰

期中最冷的阶段, 常称为末次盛冰期 (LGM), 这是近代极其重要的气候环境事件, 期间藏北高原形成大量芒硝沉积^[12]。一般认为 LGM 出现在 18ka BP 左右或 21~19 ka BP^[11~13], 但古里雅冰芯的 LGM 时间 (32~16ka BP) 有些异常^[13, 14]。

15.2~14.1 ka BP, 12.8~11.4 ka BP 芒硝单层厚度分别为 50 cm 和 67 cm, 可能为两个气候冷事件。后者可能是新仙女木事件的反映, 这是个全球性事件, 虽然不少学者认为其时间跨度为 11~10 ka BP^[15~17], 但青藏高原对这一事件的反映有些滞后, 如古里雅冰芯记录该事件的时间为 12.2~10.9 ka BP^[18], 鄂错为 12.6~12 cal ka BP^[19], 色林错 12~10 ka BP 气候干冷^[20], 另外, 美国 Owens 湖 15.8~10 ka BP 也出现四次干冷事件: 15.1 ka BP, 13.2 ka BP, 12.2 ka BP, 11.3 ka BP^[21], 说明这一事件受地理位置和区域气候的影响, 具有地方特色。不同地区出现时间差异的原因为: 各实验室测年技术的精度不一、测年选用的材料不同、剖面采样的间隔和分辨率不同、各种代用指标对气候和环境变化的敏感度不同、各地对气候变化响应的区域差异等^[15, 17, 18]。

17.5~17.1 ka BP (图 2 II a)、15.9~15.2 ka BP (图 2 II b)、14.1~13.4 ka BP (图 2 II c) 芒硝单层厚度明显变薄, 还出现了粘土层, 说明气温回升, 但碳酸盐含量还很低, 草本花粉依然占主导地位, 所以, 此阶段仅仅是相对变暖现象, 整体上气候依然寒冷。青藏高原冰期气温回升不是偶然的, 冰芯和其他湖泊也有发现, 如古里雅冰芯 16.8¹⁸O ka BP 出现气温回升现象^[13, 18], 可可西里苟弄错 17.2~15.4¹⁴C ka BP 环境稍微改善^[22]。西南季风强度的变化和大量积雪的存在是高原气候波动的主要原因^[23]。

(3) 11.4~10.1 ka BP (266.8~241 cm): 芒硝单层很薄, 仅 2~6 cm, 粘土单层厚度达到 1.5 cm, 碳酸盐含量为 38%~38.8%, 气候温暖湿润。虽然是末次冰期的第四阶段^[11], 但湖泊记录的相对温暖潮湿气候不仅在秋里南木湖有记录, 鄂错 12~10.4 cal ka BP 化学风化作用增强, 也指示了气候的温暖潮湿^[19], 气候变暖的原因可能是西南季风加强。

(4) 10.1~7.5 ka BP (241~167 cm): 芒硝单层厚度增加至 12~15 cm, 碳酸盐含量为 30%, 草本花粉为 91.2%, 灌木和蕨类约为 1%, 气候干旱寒冷, 岩性的频繁变化指示气候冷暖交替较快。8.1~7.9 ka BP 芒硝单层厚 14 cm, 与通常所说的“8.2 cal ka BP 冷事件”时间一致, 其它地区如古里雅冰芯 8.4~8.0

¹⁸O ka BP^[24]、内蒙古岱海 8.25~7.9¹⁴C ka BP^[25]、鄂错 8.4~8.05 cal ka BP^[19] 等都出现了降温或化学风化减弱现象。

() 和 () 阶段的年代是 U 系法和 ¹⁴C 的混合使用, 可能影响沉积速率, 由于芒硝单层厚度明显不同, 依然分为两个气候阶段, 由上述讨论可知这并不影响气候事件的对比性。

(5) 7.5~4.97 ka BP (167~17 cm): 全新世降温之后的升温阶段。芒硝单层厚度减小, 为 2~10 cm, 碳酸盐和草本花粉含量的变化都比较大, 分别为 13%~70.59% 和 72.26%~97.4%, 说明本阶段气候比 (V) 有所好转, 但整体上依然寒冷, 而且冷暖交替频繁。

7.35 ka BP 的孢粉浓度为 5961 粒/g 明显高于其它时间段——本剖面的花粉总浓度一般不超过 1000 粒/g 所以, 这可能是个气候暖事件。7.09~6.47 ka BP (图 2 V a) 芒硝单层厚度增加到 9~10 cm, 说明气候寒冷, 可能为小的气候冷事件。

7.5 ka 以来的气候频繁交替是个普遍现象, 小的干冷事件也频繁出现在其它湖泊和冰芯, 如敦德冰芯^[26] 7.2 ka BP, 5.9 ka BP, 5.6 ka BP, 青海湖^[27] 5.6~5.3 ka BP 等出现了气候寒冷现象。研究认为^[23, 28], 全新世中期的气候波动是气候转型过程中的正常反映, 西南季风强度的变化是主要原因。

5 结论

湖泊沉积物中, 芒硝、原生硼砂、粘土互层并完整记录 2 万多年 (27.8~4.97 ka BP) 气候变化的现象不常见, 这为青藏高原是气候变化敏感区的观点提供了盐类矿物学方面的证据。芒硝等盐类矿物只在有限的环境中形成, 因此进一步研究其形成条件, 如温度、矿化度、生物种类、pH 值和地球化学条件等, 可更好指示气候环境。由于秋里南木湖为干盐湖, 相邻扎布耶盐湖也已经演化到氯化物阶段, 无法得到芒硝等盐类矿物更详细的环境指标。另外, 青藏高原许多盐湖的盐类矿物已经富集成矿, 对盐类矿物的深入研究可丰富成矿理论。

秋里南木湖沉积物所反映的气候变化为: 27.8~20.5 ka BP 湖区气候相对温暖潮湿; 20.5~11.4 ka BP 气候干冷, 其中 20.5~17.5 ka BP 气候极端干冷, 可能为末次盛冰期在秋里南木湖的反映, 17.5~17.1 ka BP, 15.9~15.2 ka BP 和 14.1~13.4 ka BP 气候条件略微好转; 11.4~10.1 ka BP 气候温暖; 10.1~

7.5 ka BP气候寒冷,其中 8.1~7.9 ka BP的冷气候为“8.2 ka BP冷事件”的反映; 7.5~4.97 ka BP气候相对温暖,但冷暖波动频繁, 7.09~6.47 ka BP出现气候寒冷现象。原生硼砂的存在说明 27.8 ka BP以来,秋里南木湖湖水较浅,水动力条件比较稳定。

致谢 孢粉分析由中国地质科学院水文地质研究所童国榜研究员完成,铀系法年代由中国地质科学院地质研究所马志邦研究员完成,¹⁴C由中国地震局地质研究所尹金辉研究员完成,化学分析由国家地质测试中心完成,罗莎莎博士在野外工作中给予很多支持和帮助,在此一并致谢。

参考文献 (References)

- 卫管一, 张长俊. 岩石学简明教程. 北京: 地质出版社, 1995 [Wei Guanyi Zhang Changjun Petrology Concise Tutorial Beijing Geological Publishing House, 1995]
- Sang J F. The sequence stratigraphy, sedimentology and economic importance of evaporite-carbonate transitions: a review. *Sedimentary Geology*, 2001, 140: 9-42
- Sinha R, Raymahashay B C. Evaporite mineralogy and geochemical evolution of the Sambhar Salt Lake, Rajasthan, India. *Sedimentary Geology*, 2004, 166: 59-71
- 郑熹玉, 张明刚, 徐昶, 等. 中国盐湖志. 北京: 科学出版社, 2002: 3-29 [Zheng Jiayu, Zhang Minggang, Xu Chang *et al*, Chinese Salt Lakes. Beijing: Science Press, 2002: 3-29]
- 郑绵平, 赵元芝, 刘俊英. 第四纪盐类沉积与古气候. *第四纪研究*, 1998, 4: 297-307 [Zheng Mianping, Zhao Yuanzhi and Liu Junying Quaternary saline lake deposition and paleoclimate. *Quaternary Science*, 1998, 4: 297-307]
- Wang Naiang, Zhang Jiaming, Cheng Hongyi *et al*. The age of formation of the marl and sand wedges in the Hexi Corridor and their paleoclimatic interpretation. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(14): 1439-1445
- 李明慧. 西藏扎布耶、秋里南木湖晚更新世以来古气候-古环境初步研究 [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2004 [Liming Preliminary Study of Paleoclimatic and Palaeoenvironmental Evolution since Late Pleistocene in Zabuye and Qilinan Lakes Tibet [Ph. D Thesis]. Beijing: China Academy of Geological Sciences, 2004]
- 王开发, 王宪曾. 孢粉学概论. 北京: 北京大学出版社, 1983: 7-20 [Wang Kaifa, Wang Xianzeng. *Conspectus of Pollenology*. Beijing: Peking University Press, 1983: 7-20]
- 吴玉书, 肖家仪. 西藏扎布耶湖地球三万年以来的花粉记录. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(3): 115-121 [Wu Yushu, Xiao Jiayi. A pollen record during the past 30000 years from the Zabuye Lake Tibet. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, 16(3): 115-121]
- 刘俊英, 郑绵平, 齐文. 西藏扎布耶盐湖 40 ka BP 以来的微体古生物与气候环境演变. 庆祝中国地质学会成立 80 周年学术讨论会文集, 2002: 560-566 [Liu Junying, Zheng Mianping, Qi Wen. Micro-paleontology and environmental change since 40 ka BP in Zabuye Saline Lake, Tibet. *Copius of the celebration on 80th anniversary of Chinese Geological Academy*, 2002: 560-566]
- 易朝路, 崔之久, 熊黑钢. 中国第四纪数值年表初步划分. *第四纪研究*, 2005, 25(5): 609-619 [Yi Changlu, Cui Zhijiu, Xiong Heigang. Numerical periods of Quaternary Glaciations in China. *Quaternary Research*, 2005, 25(5): 609-619]
- 张保珍, 张彭喜, Lowenstein T K 等. 青藏高原末次冰期盛冰阶的时限与干盐湖地质事件. *第四纪研究*, 1995, 3: 193-201 [Zhang Baozhen, Zhang Pengxi, Lowenstein TK, *et al*. Time range of the Great Ice Age of the Last Glacial Stage and its related geological event of playa in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Quaternary Sciences*, 1995, 3: 193-201]
- 姚檀栋. 古里雅冰芯氧同位素地层学. *第四纪研究*, 2000, 20(2): 165-170 [Yao Tandong. Oxygen isotope stratigraphy of the Guliya Ice Core. *Quaternary Research*, 2000, 20(2): 165-170]
- 施雅风, 郑本兴, 姚檀栋. 青藏高原末次冰期最盛时的冰川与环境. *冰川冻土*, 1997, 19(2): 97-152 [Shi Yafeng, Zheng Benxing, Yao Tandong. Glaciers and environments during the Last Glacial Maximum (LGM) on the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19(2): 97-152]
- 沈永平, 刘光秀, 施雅风, 等. 青藏高原新仙女木事件的气候与环境. *冰川冻土*, 1996, 18(3): 219-226 [Shen Yongping, Liu Guangxiu, Shi Yafeng *et al*. Climate and environment in the Tibetan Plateau during the Younger Dryas Cooling Event. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(3): 219-226]
- 杨志红, 姚檀栋, 皇翠兰, 等. 古里雅冰芯中的新仙女木末期事件记录. *科学通报*, 1996, 42(18): 1975-1978 [Yang Zhihong, Yao Tandong, Huang Cuilan *et al*. Record of Younger Dryas in Guliya ice core. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 42(18): 1975-1978]
- 刘焱光, 吴世迎, 张道建. 新仙女木事件的发生及其全球性意义. *黄渤海海洋*, 2000, 18(1): 74-83 [Liu Yanguang, Wu Shiying, Zhang Daojian. The occurrence and global significance of the "Younger Dryas" Event. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2000, 18(1): 74-83]
- 姚檀栋, Thompson L G, 施雅风, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来的气候变化记录研究. *中国科学 (D 辑)*, 1997, 27: 447-452 [Yao Tandong, Thompson L G, Shi Yafeng *et al*. Climate variation since the last interglaciation recorded in the Guliya ice core. *Science in China (Series D)*, 1997, 40(6): 662]
- Jin Zhangdong, Wu Yanhong, Zhang Xiaohui *et al*. Role of late glacial to mid-Holocene climate in catchment weathering in the central Tibetan Plateau. *Quaternary Research*, 2005, 63: 161-170
- 顾兆炎, 刘嘉麒, 袁宝印, 等. 12000 年来青藏高原季风变化——色林错沉积物地球化学的证据. *科学通报*, 1993, 38(1): 61-94 [Gu Zhaoyan, Liu Jiaqi, Yuan Baoyin, *et al*. The paleo-monsoon changes of Qinghai-Tibet Plateau during recent 12000 years: evidence of geochemistry from Seling Lake sediments. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(1): 66-70]
- Benson L, James Burlett, Steve Lund *et al*. Nearly synchronous climate change in the Northern Hemisphere during the last glacial termination. *Nature*, 1997, 388: 263-265

- 22 李炳元, 李元芳, 孔昭宸, 等. 青海可可西里苟弄错地区近二万年来的环境变化. 科学通报, 1994, 39(18): 1727-1728 [Li Bingyuan Li Yuanfang Kong Zhaochen *et al* Environmental changes of lake sediment from BarGongco Lake, Kekexili Qinghai-Xizang plateau since 20 ka BP. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(18): 1727-1728]
- 23 Zonneveld A F K, Gerold Ganssen, Simon Troelstra *et al* Mechanisms forcing abrupt fluctuations of the Indian Ocean summer monsoon during the last deglaciation. Quaternary Science Reviews 1997, 16: 187-201
- 24 王宁练, 姚檀栋, Thompson L G 等. 全新世早期强降温事件的古里雅冰芯记录证据. 科学通报, 2002, 47(11): 818-823 [Wang Ninglian Yao Tandong Thompson L G. Record of cold event in Early Holocene of Guliya ice core Chinese Science Bulletin 2002, 47(11): 818-823]
- 25 金章东, 沈吉, 王苏民, 等. 早全新世降温事件的湖泊沉积证据. 高校地质学报, 2003, 9(1): 1-18 [Jin Zhangdong Shen Ji Wang Sun *et al* Evidence for Early Holocene Cold Event from lake sediments Geological Journal of China Universities 2003, 9(1): 1-18]
- 26 姚檀栋, 施雅风, Thompson L G 等. 祁连山敦德冰芯记录的全新世气候变化. 见: 施雅风, 孔昭宸主编. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社, 1992. 206-211 [Yao Tandong Shi Yafeng Thompson L G, *et al* The Holocene climatic changes in Mt Qilian as Recorded in Dunde ice core. In: Shi Yafeng Kong Zhaochen eds. The Climate and Environment in China during the Holocene Megathermal Beijing Ocean Press 1992. 206-211]
- 27 刘兴起, 沈吉, 王苏民, 等. 16 ka BP 以来青海湖湖相自生碳酸盐沉积记录的古气候. 高校地质学报, 2003, 9(1): 38-46 [Liu Xingqi Shen Ji Wang Sun *et al* A 16 000-Year paleoclimatic record derived from authigenic carbonate of lacustrine sediment in Qinghai Lake Geological Journal of China Universities 2003, 9(1): 38-46]
- 28 Morrill C, Overpeck J T, Cole J E, *et al* Holocene variations in the Asian monsoon inferred from the geochemistry of lake sediments in central Tibet Quaternary Research 2006 65: 232-243

Discovery and Its Significance of the Alternation of Mirabilite and Borax in Qiulí nammu Lake, Tibet

LIM ing-hu^{1,2} KANG Shi-chang^{1,3} BU Ling-zhong² ZHENG Mian-ping²

(1. Institute of Tibetan Plateau Research Chinese Academy of Sciences Beijing 100085

2. Institute of Mineral Resources Chinese Academy of Geological Science Beijing 100037

3. State Key Laboratory of Cryospheric Science Lanzhou 730000)

Abstract The Qiulí nammu Lake is a dried saline lake in central Tibet with many thick mirabilite layers. Saline minerals are suggested to be products of dry and cold environment compared with clays. A detailed mineralogical investigation was carried out with mainly thick mirabilite and thin borax layer and thin clay layer alternately. The stratigraphic variation in the mineralogy of salt lake sediments is an indicator of paleoclimatic fluctuations. Based on the variations of mineralogy, pollen and carbonate, it is suggested that the climate was warm and wet in 27.8-20.5 ka BP, cold and dry in 20.5-11.4 ka BP, warm and wet 11.4-10.1 ka B, cold and dry in 10.1-7.5 ka BP, warm but changed frequently in 7.5-4.97 ka BP. The Last Glacial Maximum may be appeared in 20.5-17.5 ka BP. The warm pulses were at 17.5-17.1 ka BP, 15.9-15.2 ka BP and 14.1-13.4 ka BP. The "8.2 ka BP cold event" appeared at 8.1-7.9 ka BP. Borax, a mineral appeared in low temperature, steady and shallow brine water, suggested the same environment during 27.8-4.97 ka BP in Qiulí nammu lake. The changes of summer monsoon led to the climatic conditions in the area. This work gives a mineralogical evidence for the view that Tibet is a sensitive area of climatic changes.

Key words mirabilite, borax, clays, climatic change, saline lake, Tibet