

青藏高原中部色林错矿物组合特征对晚全新世气候的响应

林勇杰^{1,2}, 郑绵平^{1,2}, 王海雷²

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083
2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

摘要 对气候敏感区青藏高原中部色林错 SL-1 孔岩心样品进行 X 射线衍射分析表明, SL-1 孔岩心的矿物主要包括文石、方解石、水菱镁矿、白云石和石膏以及细碎屑物石英、白云母、绿泥石、长石等。根据岩心中矿物及其组合的意义, 以 1135 a BP 和 2900 a BP 为界, 可将色林错湖区 5090 a BP 以来的气候环境演变划分成明显不同的 3 个阶段, 反映了色林错湖区气候总体上凉干-冷干的变化。同时, 在中后期多次出现典型的冷相矿物水菱镁矿的富集沉积, 揭示了色林错湖区在晚全新世期间存在多次百年尺度的冷事件。

关键词 色林错; 青藏高原中部; 矿物组合; 古气候; 冷事件

中图分类号 P532

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.35.004

Late Holocene Climatical and Environmental Evolutions Inferred from Mineralogical Records in Selin Co, Central Qinghai-Tibetan Plateau

LIN Yongjie^{1,2}, ZHENG Mianping^{1,2}, WANG Hailei²

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environment; Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract The X-ray diffraction (XRD) analysis of the core SL-1, collected from Selin Co, the climate sensitive regions in the central Qinghai-Tibetan Plateau, reveals that the minerals in the core mainly include aragonite, calcite, hydromagnesite, dolomite, gypsum and clastic materials such as quartz, muscovite, chlorite, feldspar, etc.. Based on the mineralogy of the sediments, three climate evolution stages are identified in Selin Co area since 5090 a BP, i.e., 5090-2900 a BP; 2900-1135 a BP; 1135-0 a BP. The climate was changed from cool dry at 5090-2900 a BP to cold dry 1135 a BP-present, with a transition during 2900-1135 a BP. Meanwhile, several cold events are also retrieved in the late Holocene, according to the accumulation of hydromagnesite in the lower part of the core.

Keywords Selin Co; central Qinghai-Tibetan Plateau; mineral assemblage; paleoclimate; cold event

湖泊是地质环境的记录器, 利用湖泊沉积记录重建不同时间尺度的气候环境演化的研究受到广泛重视^[1]。矿物是湖泊沉积物的重要组成部分, 具有能够揭示湖区的古气候和古水文条件的潜力^[2], 而今所有湖泊环境代用指标中, 有关矿物学记录及其古环境意义的研究不多, 在有限的研究报道中,

大多数也仅是作为辅助的环境代用指标。随着一门新兴边缘学科——沉积矿物学的兴起和发展, 湖泊沉积记录中的矿物学研究已经取得不少进展^[3], 例如, 运用碳酸盐矿物^[4-6]、黏土矿物^[7,8]、外源碎屑矿物^[9]和盐类矿物^[10-12]探讨湖区的气候环境演化。

收稿日期: 2014-09-15; 修回日期: 2014-10-31

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120114048501); 国家自然科学基金面上项目(41372179); 国土资源部公益性行业专项(201311140)

作者简介: 林勇杰, 硕士研究生, 研究方向为湖泊沉积学, 电子信箱: linyongjie2014@163.com; 郑绵平(通信作者), 中国工程院院士, 研究方向为盐湖学与盐类地质矿床学, 电子信箱: zhengmp2010@126.com

引用格式: 林勇杰, 郑绵平, 王海雷. 青藏高原中部色林错矿物组合特征对晚全新世气候的响应[J]. 科技导报, 2014, 32(35): 35-40.

色林错地处青藏高原中部的气候敏感区,由于受人类活动的影响较少,是研究自然气候变迁的理想湖泊之一。其沉积记录可以为研究该区域气候环境演化提供较好的环境指标。本文旨在通过X射线衍射半定量分析色林错SL-1孔沉积岩心中的矿物,阐明SL-1孔矿物及其组合的意义,在此基础上探讨青藏高原中部色林错湖区5090 a BP以来的气候环境演化。

1 研究区域概况

色林错地处西藏自治区申扎、班戈、尼玛三县交界,位于冈底斯山北麓,藏北高原断陷盆地。色林错是青藏高原形成过程中产生一个构造湖,亦为大型深水湖。湖泊海拔4552 m,构造上处于班公—怒江缝合带中段。色林错、班戈错湖盆是在古近纪初开始发育的班戈断陷盆地基础上,在第四纪继承活化发育而来的新生断陷盆地。盆地长轴近EW向,南北两缘新构造发育,随着青藏高原的整体隆升而抬起。中更新世以来,大湖逐渐缩小,由于局部隆升差异而将大湖分割,逐渐形成现代众湖分布格局,沉积中心由SEE向NWW转移。

色林错流域属于高原寒带半干旱季风气候区,流域河系发育,总流域面积约45000 km²,是西藏最大的内陆湖水系(图1)。流域内有很多相互串连的内陆湖泊群,较大的湖泊有格仁错、吴如错、错鄂、仁错贡玛、恰规错等。色林错位于全流域最低洼的地区,是水流汇集的中心,常年或季节性汇入色林错的主要河流有扎根藏布、扎加藏布和波曲藏布等。

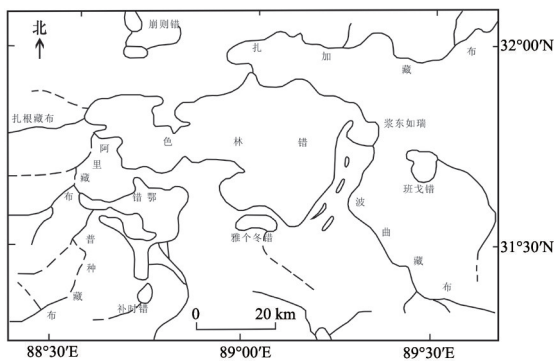


图1 色林错地理位置示意(据文献[13],略有修改)

Fig. 1 Location of Selin Co.(According to the reference[13])

2 样品采集与测试分析

2012年2月,王海雷等在色林错水深30 m处完成水下浅钻6口,共获取原状湖芯7.75 m,最大取芯深度2.78 m,取芯率100%,钻孔水-沉积物界面清晰,无扰动,提供了高分辨率的地质记录。将SL-1孔岩心运回实验室,以0.5 cm的间隔分样。沉积物顶部3 cm为灰黄色的含粉砂淤泥,钻孔上部岩性主要为灰白色中细砂或粉细砂与黑色黏土互层,下部以灰黄色、黑色黏土为主。

选取部分获得经烘干研磨至100目的样品,在国土资源部盐湖与热水资源重点实验室,利用日本理学公司Rigaku

MiniFlex 600型X射线粉晶衍射仪,进行矿物种类及相对百分含量的测定。测试条件:Cu靶,电压/电流:40 kV/15 mA,步长:0.02°,扫描角度3°~70°。各矿物种类的检出及相对百分含量的确定由MDI Jade 软件完成。

样品中不同矿物的相对百分含量的计算公式为

$$X_i = \left(\frac{K_{i,n}}{I_{i,n}} \sum_{j=1}^m \frac{I_{j,n}}{K_{j,n}} \right)^{-1}$$

式中, $K_{i,n}$ 和 $K_{j,n}$ 是矿物*i*和*j*分别在衍射线*n*上的参照强度比值; $I_{i,n}$ 和 $I_{j,n}$ 分别为矿物*i*和*j*在衍射线*n*上的积分强度; m 为样品中所有矿物的个数。样品中的矿物相对百分含量的测定误差为±5%。

3 结果与讨论

3.1 年代序列

色林错SL-1孔岩心年代框架是由经树轮校正的AMS¹⁴C结果综合建立的,BP为距2012年,具体年代框架的建立详见文献[14]。

3.2 矿物学研究

沉积物的矿物组成、含量及其组合特征在研究古气候和古环境中发挥重要作用,成为古环境恢复与重建的重要研究手段之一^[3]。X射线衍射分析表明,样品中的矿物主要包括:碎屑矿物(石英、白云母、长石、绿泥石),碳酸盐矿物(文石、方解石、白云石、水菱镁矿),硫酸盐矿物(石膏)(图2)。

3.2.1 碎屑矿物

非黏土碎屑矿物主要有石英、长石,其中石英的平均含量最高(约14%)。黏土碎屑矿物主要有白云母、绿泥石,其中白云母的平均含量最高(约23%)。湖泊中自生黏土矿物的生成主要发生在盐湖,而在其他类型的湖泊中几乎不存在自生黏土矿物^[15]。SL-1孔中的黏土矿物主要为绿泥石,一般认为,绿泥石在碱性环境下形成,且只能在化学作用受抑制的地区生存下来,如冰川或干旱地表^[16,17]。绿泥石在本钻孔中的含量很少,且几乎分布在钻孔的每个层位,可以认为它是母岩物质的风化产物,只是说明了形成区和来源区的古气候、古环境特征,而不是反映湖泊沉积时的气候特征^[18]。

湖泊中的碎屑矿物来源于湖泊外围地区,一般是由河流、地表径流的搬运、湖岸侵蚀、大气降落物等供给^[19]。一般认为,当气候湿润,湖盆流域降水增加时,地表径流发育,难溶的碎屑矿物随径流迁移至湖中并直接以物理形式沉积至湖底,使碎屑矿物含量增加。反之亦然。

3.2.2 碳酸盐矿物

湖泊沉积物碳酸盐有外源碳酸盐、内生碳酸盐和自生碳酸盐3种来源。前人研究证实色林错沉积物中的文石、方解石、白云石、水菱镁矿主要为自生沉积的碳酸盐矿物^[20]。SL-1孔中自生碳酸盐矿物主要有文石、方解石、白云石和水菱镁矿。湖水的化学性质和温度是影响碳酸盐沉淀的最主要因素^[4]。一般来说,碳酸盐以何种矿物沉淀主要取决于湖水中Mg/Ca值与pH值。湖泊沉积物中碳酸盐的Mg/Ca值可以说

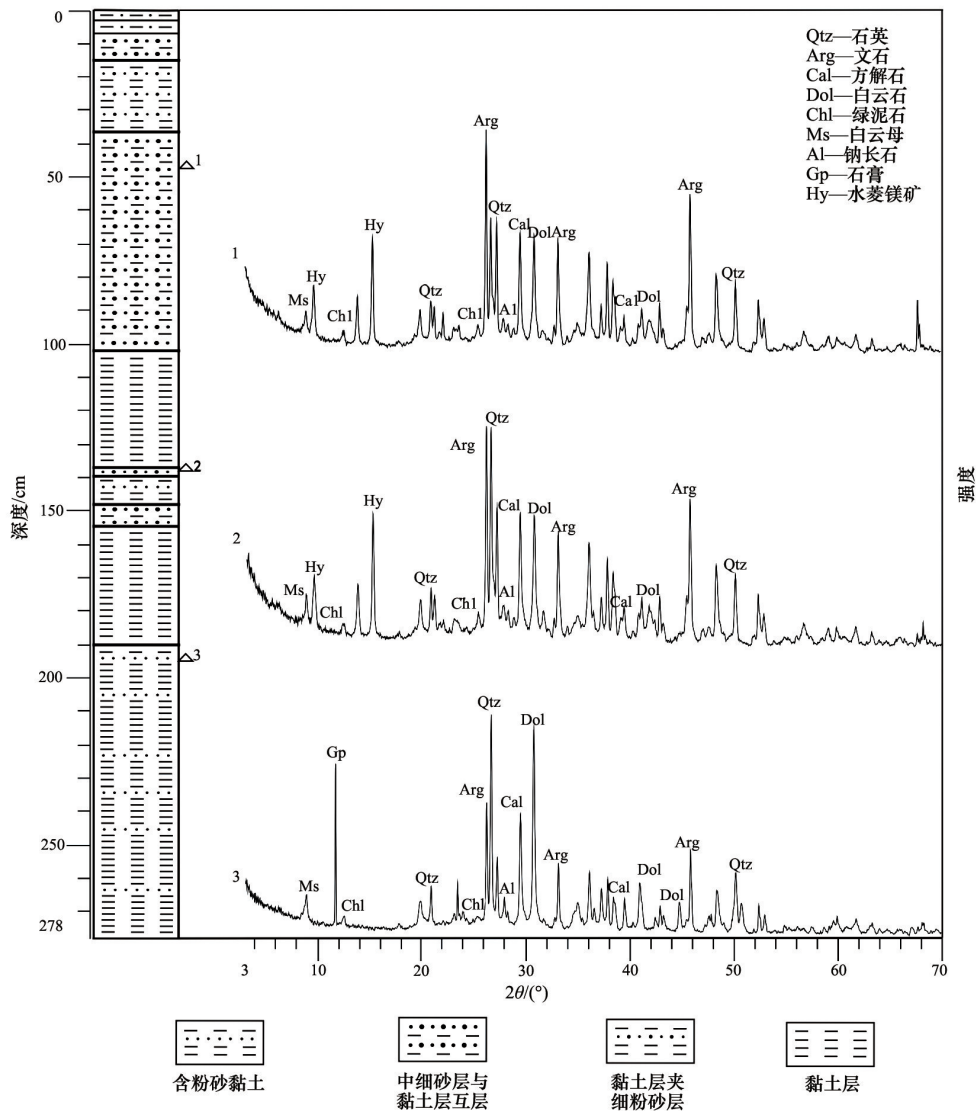


图2 色林错SL-1孔岩性及典型层位的X射线衍射图谱

Fig. 2 Lithology of Hole SL-1 and the XRD pattern of some layers

明湖水盐度的变化^[21,22]。郑绵平等^[23,24]将碳酸盐型盐湖再细分为强度、中度、弱度3种亚型。色林错属于弱度碳酸盐亚型^[24]。当Mg/Ca < 2时,沉积方解石;当Mg/Ca为2~12时,易沉积白云石;当Mg/Ca > 12时,以文石沉积为主^[25]。随着湖盆年龄的增长,湖水的pH值也日益增大,当Mg/Ca达到20~30,pH值增至9.1时,水菱镁矿即可沉积^[26]。

白云石的成因极具复杂性,至今未有定论。内陆湖泊沉积物中出现白云石需要较高的蒸发量、盐碱度^[27],其虽不能直接指示湖水的咸化^[28],但是湖泊沉积物中的白云石在高盐度水体中主要是蒸发成因^[29,30]。因此,原生白云石可以作为气候干旱的替代指标^[31];往往是干旱地区高矿化度湖盆的沉积标志。

水菱镁矿是一种冷相盐类矿物^[32],郑绵平等^[24]针对班戈湖-色林错湖区水菱镁矿的成因调查研究表明:色林错的水菱镁矿现代沉积属于湖相化学沉积,是在低温(年均温约-1℃),

高Mg/Ca值、高 P_{CO_2} 和高 C_{CO_2} 、偏碱性的咸水中沉积的。因此,湖盆中出现水菱镁矿,喻示湖区趋于低温和偏干。

3.2.3 硫酸盐矿物

湖泊沉积物中的盐类矿物主要是天然盐水达到饱和而沉淀的化学沉积物,需要长期干旱的气候条件。石膏作为典型高温相盐类矿物、干旱气候环境的标志物,指示干旱、水体盐度相对较高和蒸发作用强的气候条件^[32,33]。

石膏在岩芯中分布较离散,除在61cm处零星出现以外,主要分布在88~97、182~237、256~258 cm 3个层位。

3.3 色林错湖区5090 a BP以来的气候环境演化

根据色林错SL-1孔矿物、组合及其含量的变化特征(图3),将5090 a BP以来色林错湖区气候环境特征讨论如下。

1) 阶段I(268~151 cm):约5090~2900 a BP。

本段碳酸盐以文石、方解石和白云石为主。在5090~4780 a BP和4300~3415 a BP期间出现了石膏沉积。在石膏

出现的段内,白云石含量明显增大。总碎屑岩矿物平均含量约54%,总碳酸盐矿物平均含量约45%,反映该时段气候总体上以凉偏干为主。根据矿物的沉积特征,又可以划分I₁、I₂、I₃、I₄段。

(1) I₁(268~256 cm):约5090~4780 a BP。该段碳酸盐有文石(约33.4%)、方解石(约9.6%)和白云石(约8.7%)。该时期出现了石膏沉积,且白云石的平均含量明显高于平均值。总碎屑岩矿物平均含量约47%,总碳酸盐矿物平均含量约52%。反映该阶段气候整体偏凉干。

(2) I₂(256~237 cm):约4780~4300 a BP。该段碳酸盐有文石(约37.4%)、方解石(约10.1%)和白云石(约5.6%)。该时期石膏沉积突然消失,白云石含量也明显减少,但文石含量有所增大。总碎屑岩矿物平均含量约47%,总碳酸盐矿物平均含量约53%。反映该阶段湖区干旱趋势有所减弱。

(3) I₃(237~182 cm):约4300~3415 a BP。该段碳酸盐有文石(约26.5%),白云石(约10%)和方解石(约8.9%)。石膏又出现沉积,白云石平均含量也远大于平均值。该时期的石膏和白云石沉积作用在整个钻孔中是最强的。总碎屑岩矿物平均含量约54%,总碳酸盐矿物平均含量约45%。反映该阶段气温降低,湖水蒸发作用比较强。

(4) I₄(182~151 cm):约3415~2900 a BP。该段碳酸盐有文石(约26.5%),方解石(约8.2%)和白云石(约4.3%)。该时期石膏沉积又突然消失,白云石的含量也减少至平均值左右。总碎屑岩矿物平均含量明显增大(约61%),总碳酸盐矿物平均含量明显减少(约39%)。反映该阶段气温整体降低。

2) 阶段II(151~59 cm):约2900~1135 a BP。

本段碳酸盐以文石、方解石和水菱镁矿为主。在2900~2420 a BP,2110~1900 a BP和1500~1300 a BP 3个时期,水菱镁矿出现大量的沉积。总碳酸盐矿物平均约47%,总碎屑岩矿物平均含量约52%。反映较上一阶段气候整体有转冷的趋势,而湖水也有变咸的趋势。根据矿物的沉积特征,又可以划分为II₁至II₇段。

(1) II₁(151~126 cm):约2900~2420 a BP。该段碳酸盐有文石(约27.7%)、水菱镁矿(约11.8%)、方解石(约6.9%)和白云石(约4.1%)。该时期水菱镁矿出现大量沉积,平均含量大于方解石和白云石。反映该阶段气候变冷,此时湖泊水体Mg/Ca值较高,盐度也较高,水体呈碱性。

(2) II₂(126~110 cm):约2420~2110 a BP。该段碳酸盐有文石(约30.3%),方解石(约9%)和白云石(约3.6%)。该时期水菱镁矿沉积突然消失。反映该阶段气候有所回暖,干旱趋势有所减弱。

(3) II₃(110~99 cm):约2110~1900 a BP。该段碳酸盐有文石(约28%)、水菱镁矿(约14.7%),方解石(约7%)和白云石(约4.8%)。该时期水菱镁矿出现大量沉积,平均含量大于方解石和白云石。反映气候整体变冷,湖泊水体呈碱性,盐度增大。

(4) II₄(99~88 cm):约1900~1690 a BP。该段碳酸盐有文石(约27.8%),方解石(约8.6%)和白云石(约4.5%)。该时期水菱镁矿沉积骤然消失,但出现了石膏沉积。反映气温有所回升而湿度降低,湖泊蒸发作用增强。

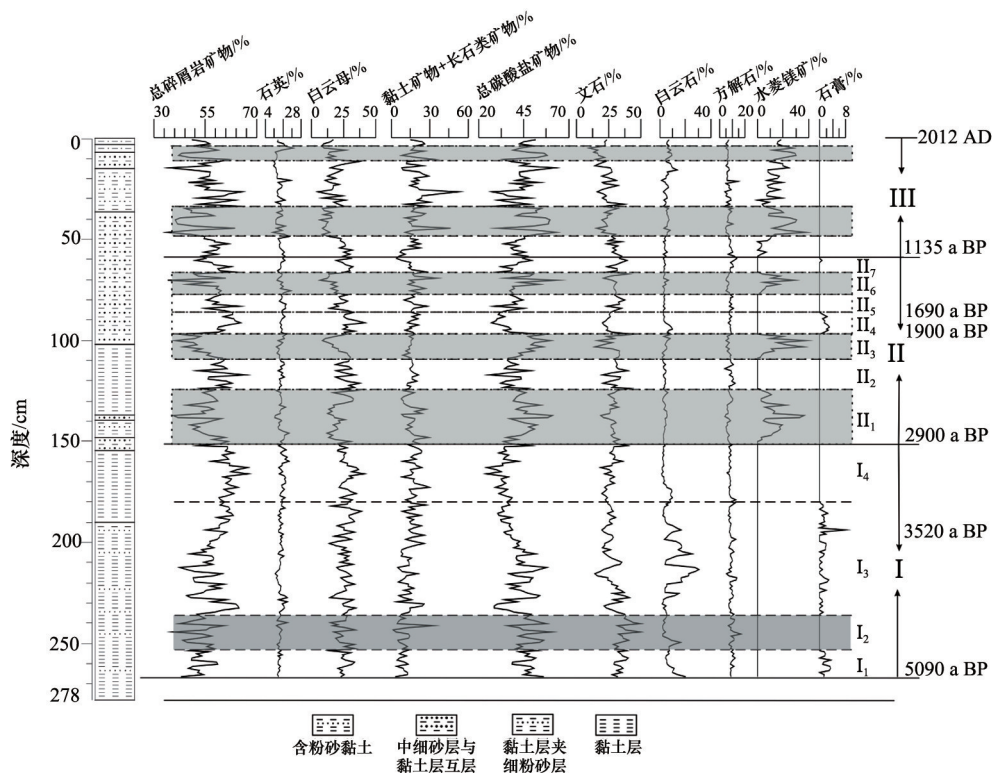


图3 色林错SL-1孔矿物相对含量曲线及环境演化阶段

Fig. 3 Relative mineral content and environmental evolution stages of core SL-1

(5) II₅(88~78 cm):约1690~1500 a BP。该段碳酸盐有文石(约31.4%),方解石(约8.8%)和白云石(约3.4%)。该时期石膏沉积突然消失,且文石、方解石和白云石的平均含量趋于平均值。反映该阶段湖区干旱趋势有所减弱。

(6) II₆(78~68 cm):约1500~1300 a BP。该段碳酸盐有文石(约29.4%)、水菱镁矿(约10.1%),方解石(约6.4%)和白云石(约3.8%)。该时期水菱镁矿出现大量沉积,且平均含量大于方解石和白云石。反映该阶段气候整体较冷。

(7) II₇(68~59 cm):约1300~1135 a BP。该段碳酸盐有文石(约31.7%),方解石(约10.2%)和白云石(约3.7%)。该时期水菱镁矿沉积骤然消失。总碎屑岩矿物平均含量约54%,总碳酸盐矿物平均含量约46%。反映该阶段气候整体有所回暖。

3) 阶段III(59~0cm):约1135 a BP至今。

本段碳酸盐以文石和水菱镁矿为主。该时期水菱镁矿大量连续沉积,且在910~780 a BP和315~65 a BP两个时期,水菱镁矿含量出现较高值。总碎屑岩矿物平均含量约49%,总碳酸盐矿物平均含量约51%。反映该段气候总体上以冷干为主,湖水中Mg/Ca值、pH值和盐度都较大,已趋于浓缩和咸化。值得注意的是,由于SL-1所具有的高分辨率沉积记录,使得910~780 a BP和315~65 a BP两个较明显的百年尺度的冷事件得以辨识出来。

施雅风等^[34]提出中国全新世大暖期出现于8.5~3.0 ka,期间有多次剧烈的气候波动和寒冷事件。唐领余等^[35]对青藏高原中部的孢粉研究表明,4900~4400 a BP期间,青藏高原中部的MSE(草甸、草原混合生态群落)区域内,区域植被由草原向草甸过渡,揭示了气温的下降。这与本文矿物学记录揭示的气候变化具有很强的一致性。4.5~3.0 ka以来高原各地湖泊普遍强烈退缩,大湖解体,湖水进一步浓缩而成为咸水湖和盐湖。例如:台错4500 a BP发生了一次最大规模的收缩,湖底大面积暴露^[36];班公错、松木希错3.9~3.2 ka BP出现干旱事件^[37,38];兹格塘错3900 a BP以来干旱趋势更为明显^[39]。同区域的错那孢粉研究表明,2200~1800 a BP左右存在一个较明显的百年尺度的干旱事件^[35]。

4 结论

色林错SK-1孔岩心具有较高的时间分辨率和敏感的气候环境变化指标,连续的矿物学记录能够相对精细的揭示该地区5090 a BP以来的气候变化。通过对其矿物组合的分析和研究表明,该地区5090 a BP以来气候变化能够分为比较明显的3个大的气候阶段:5090~2900 a BP, 2900~1135 a BP, 1135 a BP至今。

色林错湖区在5090~2900 a BP时期气候总体上以凉偏干为主。5090~4780 a BP和4300~3415 a BP两个阶段气候整体以凉干为主,湖泊蒸发作用比较强,湖水盐度比较大。4780~4300 a BP期间湖区干旱趋势减弱。3415~2900 a BP期间气候出现变化,表现出明显的降温趋势。

色林错湖区在2900~1135 a BP期间气候表现出由凉转冷的特征。其中2900~2420 a BP, 2110~1900 a BP, 1500~1300 a BP 3个阶段水菱镁矿大量出现,揭示3个较显著的百年尺度的冷事件。在1900~1690 a BP期间,气候偏凉干,湖泊蒸发作用较强。

色林错湖区从1135 a BP至今气候总体上以偏冷偏干为主,而在近50年来偏暖湿。由于SL-1孔较高的时间分辨率,使得910~780 a BP和315~65 a BP左右两个阶段的冷事件得以明显的反映。

至今已有许多研究涉及到青藏高原中部五千年来的气候环境演化历史,本文从沉积矿物学的角度,利用SL-1孔的矿物学记录重建了色林错湖区5090 a BP以来较高分辨率的气候环境记录。它与高原其他地区的气候变化的差异,为研究其所反映的季风演化历史提供了较为详实的材料。

参考文献(References)

- [1] 郑绵平, 张雪飞, 侯献华, 等. 青藏高原晚新生代湖泊地质环境与成盐成藏作用[J]. 地球学报, 2013, 34(2): 129-138.
Zheng Mianping, Zhang Xuefei, Hou Xianhua, et al. Geological Environments of the Late Cenozoic Lakes and salt-forming and oil-gas pool-forming actions in the tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(2): 129-138.
- [2] Wang Y B, Liu X Q, Mischke S. Environmental constraints on lake sediment mineral compositions from the Tibetan Plateau and implications for paleoenvironment reconstruction[J]. Journal of Paleolimnology, 2012, 47(1): 71-85.
- [3] 宋友桂. 沉积矿物学在古环境恢复中的应用进展[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2009, 32(4): 313-323.
Song Yougui. Sedimentary mineralogy and its application for paleoenvironmental reconstruction[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2009, 32(4): 313-323.
- [4] 刘兴起, 沈吉, 王苏民, 等. 16 ka以来青海湖湖相自生碳酸盐沉积记录的古气候[J]. 高校地质学报, 2003, 9(1): 39-46.
Liu Xingqi, Shen Ji, Wang Sumin, et al. A 16000-year paleoclimatic record derived from authigenetic carbonate of lacustrine sediment in Qinghai Lake[J]. Geological Journal of China University, 2003, 9(1): 39-46.
- [5] Solotchina E P, Kuzmin M I, Stolpovskaya V N, et al. Carbonate mineralogy of Lake Hvsgl sediments: Water balance and paleoclimatic conditions[J]. Doklady Earth Sciences, 2008, 419(3): 438-443.
- [6] Sklyarov E V, Solotchina E P, Vologina E G, et al. Detailed Holocene climate record from the carbonate section of saline Lake Tsagan-Tyrm(West Baikal area) [J]. Russian Geology and Geophysics, 2010, 51(3) : 237-258.
- [7] Arie S. The paleoclimatic interpretation of clay minerals in sediments-A review[J]. Earth-Science Reviews, 1984, 21(4): 251-293.
- [8] Andreas D, Mueller, Flavio S, et al. Late Quaternary palaeoenvironment of northern Guatemala: Evidence from deep drill cores and seismic stratigraphy of Lake Peten Itza[J]. Sedimentology, 2010, 57(5) : 1220-1245.
- [9] 李卓仑, 王乃昂, 李育, 等. 花海古湖泊外源碎屑矿物含量揭示的河西走廊早、中全新世降水变化[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1-6.
Li Zhuolun, Wang Naiang, Li Yu, et al. Precipitation Changes during the Early Holocene and Middle Holocene Implicated by Exogenic Detrital Mineral Changes in Huahai Lake, Hexi Corridor of NW China [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1-6.
- [10] Liu X Q, Dong H L, Rech J A, et al. Evolution of Chaka Salt Lake in NW China in response to climatic change during the Latest Pleistocene-Holocene[J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27(7):

- 867-879.
- [11] Li M H, Kang S C, Ge J, et al. Saline rhythm and climatic change since 0.6 kyr BP from the Qiulinamu Playa Lake in Tibet[J]. Carbonates and Evaporites, 2010, 25(1): 5-14.
- [12] Last W M, Vance R E. Bedding characteristics of Holocene sediments from salt lakes of the northern Great Plains, Western Canada[J]. Journal of Paleolimnology, 1997, 17(3): 295-296.
- [13] 陈毅峰, 陈自明, 何德奎, 等. 藏北色林错流域的水文特征[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 21-28.
Chen Yifeng, Chen Ziming, He Dekui, et al. Hydrographic Features of Serlin Co, North Tibetan Plateau[J]. Journal of Lake Sciences, 2001, 13(1): 21-28.
- [14] 王海雷, 郑绵平. 青藏高原中部色林错SL-1孔粒度参数指示的5.33 ka BP以来的水位变化[J]. 科技导报, 2014, 32(35): 29-34.
Wang Hailei, Zheng Mianping. Grain-size of Core SL-1 sediments Indicated Lake Level Changes Since 5.33 ka BP in Selin Co, Central Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(35): 29-34.
- [15] Chamley H. Geodynamic control on messinian clay sedimentation in the central Mediterranean Sea[J]. Geo-marine Letters, 1989, 9(3): 179-184.
- [16] 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 粘土矿物的环境意义[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 337-344.
Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. Environment significance of clay minerals[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 337-344.
- [17] 赵东升, 贺鹏, 孔红喜, 等. 柴达木盆地粘土矿物特征及其演化[J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 66-70.
Zhao Dongsheng, He Peng, Kong Hongxi, et al. Characteristics and evolution of the clay minerals in Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(1): 66-70.
- [18] 金章东. 湖泊沉积物的矿物组成、成因、环境指示及研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(1): 34-44.
Jin Zhangdong. Composition, origin and environmental interpretation of minerals in lake sediments and recent progress[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1): 34-44.
- [19] 沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 等. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 78.
Shen Ji, Xue Bing, Wu Jinglu, et al. Lake sediments and environmental evolution[M]. Beijing: Science Press, 2010: 78.
- [20] 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[J]. 科学通报, 1993, 38(1): 61-64.
Gu Zhaoyan, Liu Jiaqi, Yuan Baoyin, et al. Qinghai-Tibetan Plateau Monsoon variations since 12 ka BP, records from the geochemistry of lake sediments in Selincuo[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(1): 61-64.
- [21] 莱尔曼 A. 湖泊的化学、地质学和物理学[M]. 王苏民, 译. 北京: 地质出版社, 1989: 316-318.
Lerman A. Lakes: Chemistry, geology, physics[M]. Wang Sumin, trans. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 316-318.
- [22] 谢宏琴, 贾国东, 彭平安, 等. 艾比湖二千年来环境演变的地球化学记录[J]. 干旱区地理, 2005, 28(2): 205-209.
Xie Hongqin, Jia Guodong, Peng Pingan, et al. Paleolimnology of Aibi Lake during the last 2500 years inferred from geochemical Records [J]. Arid Land Geography, 2005, 28(2): 205-209.
- [23] 郑绵平, 刘文高, 向军, 等. 论西藏的盐湖[J]. 地质学报, 1983, 57(2): 184-194.
Zheng Mianping, Liu Wengao, Xiang Jun, et al. On Saline lakes in Tibet, China[J]. Acta Geological Sinica, 1983, 57(2): 184-194.
- [24] 郑绵平, 向军, 魏新俊, 等. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1989: 1-431.
Zheng Mianping, Xiang Jun, Wei Xinjun, et al. Saline Lakes of Tibetan Plateau[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1989: 1-431.
- [25] Müller G, Irion G, Förstner U. Formation and diagenesis of inorganic Ca-Mg carbonates in the lacustrine environment[J]. Naturwissenschaften, 1972, 59(4): 158-164.
- [26] Alderman A R. Dolomitic sediments and their environment in the south-east of South Australia[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1965, 29(12): 1355-1365.
- [27] De Deckker P, Last W M. Modern dolomite deposition in continental, saline lakes, western Victoria, Australia[J]. Geology, 1988, 16(1): 29-32.
- [28] 李卓仑, 陈晴, 王乃昂, 等. 河西走廊花海古湖泊全新世白云石的发现及其环境意义[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 558-564.
Li Zhuolun, Chen Qing, Wang Naiang, et al. Discovery of dolomite deposition during the Holocene and its environmental significance in Lake Huahai, Hexi Corridor[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(4): 558-564.
- [29] Warren J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1): 1-81.
- [30] 王乃昂, 王涛, 高顺尉, 等. 河西走廊末次冰期芒硝和砂楔与古气候重建[J]. 地学前缘, 2000, 7(S1): 59-66.
Wang Naiang, Wang Tao, Gao Shunwei, et al. The sand wedge and mirabilite of the last ice age and paleoclimatic reconstruction in Hexi corridor, Gansu, West China[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(S1): 59-66.
- [31] 姜文英, 吴海斌, 储国强, 等. 内蒙古巴彦查干湖白云石的成因及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2010, 30(6): 1116-1120.
Jiang Wenying, Wu Haibin, Chu Guoqiang, et al. Origin of dolomite in lake bayanchagan, inner Mongolia and its palaeoclimatic implications [J]. Quaternary Science, 2010, 30(6): 1116-1120.
- [32] 郑绵平, 赵元艺, 刘俊英. 第四纪盐湖沉积和古气候[J]. 第四纪研究, 1998(4): 297-307.
Zheng Mianping, Zhao Yuanyi, Liu Junying. Quaternary saline lake deposition and paleoclimate[J]. Quaternary Science, 1998(4): 297-307.
- [33] 田馨, 向芳, 罗来, 等. 陆相特殊沉积的研究方法及气候意义[J]. 地学前缘, 2009, 16(5): 71-78.
Tian Xin, Xiang Fang, Luo Lai, et al. Research method and climatic significance of continental special deposition[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(5): 71-78.
- [34] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件[J]. 中国科学B辑, 1992(12): 1300-1308.
Shi Yafeng, Kong Zhaohuan, Wang Sumin, et al. Climate changes and important events of the Megathermal in China[J]. Science in China, Series B, 1992(12): 1300-1308.
- [35] 唐领余, 沈才明, 李春海, 等. 花粉记录的青藏高原中部全新世以来植被与环境[J]. 中国科学: 地球科学, 2009, 39(5): 615-625.
Tang Lingyu, Shen Caiming, Li Chunhai, et al. Pollen recorded vegetation and environment in the central Qinghai-Tibetan Plateau since Mid Holocene[J]. Scientia Sinica Terrae, 2009, 39(5): 615-625.
- [36] 郑绵平, 刘俊英, 庞其清, 等. 西藏台错沉积记录与更新世晚期——全新世气候变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 86(1): 104-131.
Zheng Mianping, Liu Junying, Pang Qiqing, et al. Sedimentary Records and the late Pleistocene-Holocene climatic changes in the Tai Co, Tibet(Xizang) [J]. Scientia Sinica Terrae, 2012, 86(1): 104-131.
- [37] Gasse F, Arnold M, Fontes J C, et al. A 13000-year climate record from western Tibet[J]. Nature, 1991, 353: 742-745.
- [38] Gasse F, Fontes J C, Van Campo E, et al. Holocene environmental changes in Bangong Co basin (Western Tibet). Part 4: Discussion and conclusion[J]. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 1996, 120: 79-92.
- [39] 吴艳宏, Andreas Lucke, Bernd Wunnemann, 等. 青藏高原中部全新世气候变化的湖泊沉积地球化学记录[J]. 中国科学: 地球科学, 2007, 37(9): 1185-1191.
Wu Yanhong, Andreas Lucke, Bernd Wunnemann, et al. Holocene climate change of lakes sedimentary geochemical records in central Tibet Plateau[J]. Scientia Sinica Terrae, 2007, 37(9): 1185-1191.

(责任编辑 刘志远)