

# 3500 年来祁连山中段天鹅湖岩芯记录的沉积环境变化

闫天龙<sup>1</sup>, 王振亭<sup>2</sup>, 贺建桥<sup>2</sup>, 黄小忠<sup>1</sup>, 夏敦胜<sup>1</sup>, 王宗礼<sup>1</sup>

1. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000  
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院(筹), 兰州 730000

**摘要** 利用湖泊沉积, 特别是对祁连山中段天鹅湖沉积岩芯 TEB 孔的钻取, 选取 10 个陆生植物残体 AMS <sup>14</sup>C 测年建立年代框架, 结合对总有机碳(TOC)含量、矿物成分及元素相对含量等指标分析, 重建了天鹅湖 3500 年来的沉积环境变化特征。初步研究结果表明, 碳酸盐含量变化主要受控于地下水补给量的变化, 进而反映区域降水量, 1534 BC~1300 AD 期间, 湖区降水呈减少的趋势, 尤其是中世纪暖期(720 AD~1300 AD), 是 3500 年来最干旱的时期; 小冰期开始于 1300 AD, 共出现三次降水较多的时期, 期间在 1600 AD~1730 AD 是小冰期最盛期。受西风环流影响, 天鹅湖记录了该区域中世纪暖期相对暖干, 而小冰期较为冷湿的变化特征。同时, 该湖记录的小冰期气候相比于中世纪暖期不稳定。

**关键词** 祁连山; 天鹅湖; 晚全新世; 环境变化; 中世纪暖期; 小冰期

**第一作者简介** 闫天龙, 男, 1991 年出生, 硕士研究生, 自然地理学, E-mail: yantl15@lzu.edu.cn

**通讯作者** 王宗礼, 男, 高级工程师 E-mail: zlwang@lzu.edu.cn

**中图分类号** 文献标志码 A

## 0 引言

湖泊沉积物具有连续性、高分辨率以及对气候响应敏感的特性, 使它在恢复各种短时间尺度的气候和环境演化系列上具有其它记录无法替代的优势<sup>[1]</sup>。上世纪 80 年代以后, 国内在湖泊沉积与环境演变方面所涉及的研究范围不断扩大, 内容也日益丰富<sup>[2]</sup>。空间上既包括中国东部季风区<sup>[3-7]</sup>, 也包括西风影响区<sup>[8-10]</sup>和青藏高原<sup>[11-14]</sup>等地区, 时间上进行万年<sup>[5,11]</sup>、千年<sup>[7-8,12]</sup>、百年<sup>[9]</sup>及年代际<sup>[15]</sup>等不同时间尺度研究。目前, 不同时间尺度下, 更加强调高分辨率、多环境指标的综合研究<sup>[16-17]</sup>, 基于湖泊研究结果的多区域对比日益受到重视<sup>[18-20]</sup>。

青藏高原东北部处于中纬度西风环流和亚洲夏季风交汇区, 对气候变化响应敏感<sup>[21]</sup>。晚全新世以来青藏高原东北部气候环境变化的研究主要来自湖泊<sup>[22-25]</sup>、冰芯<sup>[26-27]</sup>、树轮<sup>[28-30]</sup>等的记录, 并详细讨论了中世纪暖期(MWP)、小冰期(LIA)和现代增温期(CWP)等时期的气候变化特征和地质历史时期的环境演替过程。已有的研究表明, 中世纪暖期发生时间大致为 9~14 世纪<sup>[31-32]</sup>, 小冰期大致为 15~19 世纪<sup>[33-34]</sup>, 其中 1500~1700 AD 是大多数地区小冰期的主要阶段<sup>[35]</sup>。中世纪暖期和小冰期开始和结束时间因地域、代用指标、测年手段等因素不同而各有差异<sup>[36]</sup>, 虽然对中世纪暖期、小冰期温度变化模式的认识基本一致, 但青藏高原东北部晚全新世以来的干湿变化模式仍存在争议。Chen *et al.* 基于介形虫重建了苏干湖的盐度变化, 认为 1000 年来苏干湖是冷湿、暖干的气候组合模式<sup>[37]</sup>。然而, Liu *et al.* 利用长链烯酮重建了青海湖的温度和盐度变化, 指出晚全新世以来青海湖是冷干、暖湿的气候组合模式<sup>[22]</sup>。因此, 开展高分辨率气候环境变化记录对比研究, 对于理解青藏高原东北部的气候环境演化特征极为重要。天鹅湖是祁连山中段典型的高山全封闭湖泊, 人为扰动小, 对气候变化响应敏感, 可以有效地记录区域气候环境变化, 通过沉积岩芯多指标分析, 探讨 3500 年以来环境变化特征, 为区域气候环境变化研究提供一定的参考依据。

## 1 研究区概况

天鹅湖(39°14'20" N, 97°55'26" E)位于祁连山中段加里东褶皱带上, 同时地处元古界镜铁山群之上, 由石炭纪灰岩和白垩纪砂质砾岩互层形成了天鹅湖的湖盆基地(区域地质测量报告, 1969 年甘肃省地质局第二局域地质测量队)(图 1a, b)。天鹅湖所在的山间盆地西侧是七一冰川主峰, 北侧紧邻著名的镜铁山矿区。天鹅湖由 1、2、3 号湖泊组成(图 1c), 三个湖泊

收稿日期: 2017-02-13; 收修改稿日期: 2017-07-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41571182); 兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金(lzujbky-2016-bt-01) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41571182; Open Foundation of MOE Key Laboratory of Western China's Environmental System of Lanzhou University, No. lzujbky-2016-bt-01]

由大到小自西南向东北展布，湖面海拔 3 012 m，水域面积 0.12 km<sup>2</sup>，流域面积约 0.28 km<sup>2</sup>，流域内没有冰川和积雪分布。甘肃省肃南县气象站多年器测资料显示，该区域年降水量约 300 mm，蒸发量 2 200 mm，无霜期约 120 天。天鹅湖没有河流补给，湖盆内无明显的冲沟，自然降雨主要以地表径流和坡面漫流方式对湖泊进行补给。现阶段该湖主要由地下水补给（图 1c），是典型的高山全封闭湖泊。浅层分析仪声呐扫描结果显示，天鹅湖 1 号湖泊最大水深 14.5 m，水面以下湖盆四壁呈断崖式近垂直状展布（图 1d）。围绕湖盆存在三条断裂带且呈“△”形状发育，初步推断湖盆可能由柱状节理长期演化而成。天鹅湖湖盆植被主要为芨芨草、扁穗冰草、碱草，参杂一些如风铃草、柴胡、青椒等干旱区植被；近水与浅水区域大量发育芦苇、蒲草等挺水植物以及各种藻类植物。湖泊没有鱼类，浅水区偶见虾类活动。天鹅湖水及泉水水化学性质经离子色谱和酸标准溶液滴定法分析，结果如表 1 所示，湖水的 Ca<sup>2+</sup>含量小于泉水，而湖水的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>大于泉水。湖水 pH 值为 8.19，属于弱碱性水，总固体溶解物（TDS）为 441 mg/L，电导率为 900 μs/cm，湖水十分清澈。

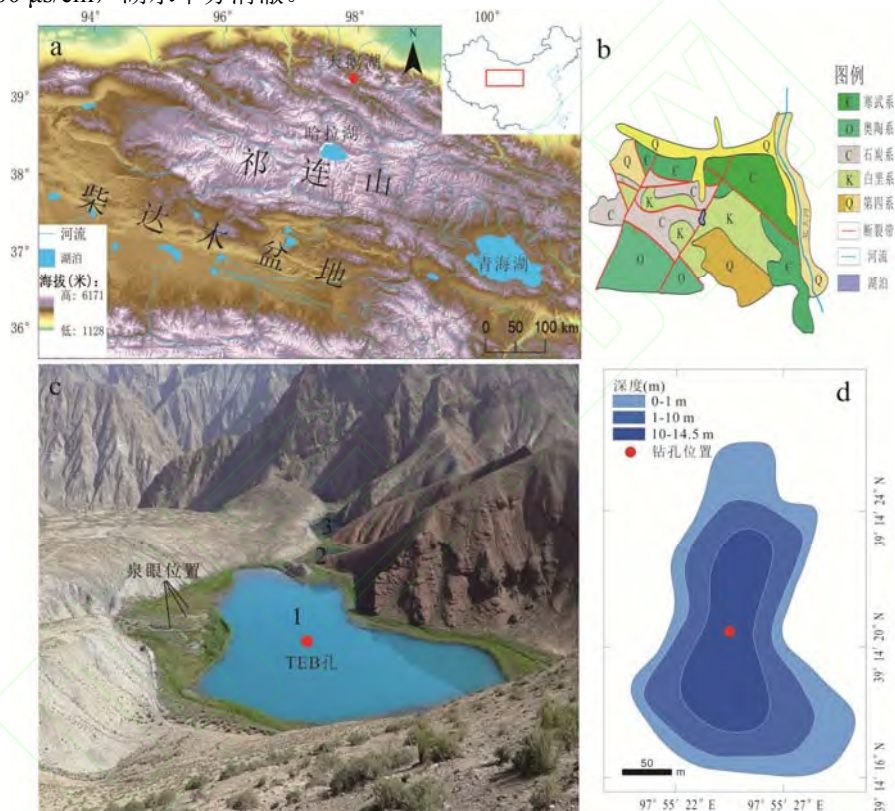


图 1 天鹅湖地理位置及湖盆概况  
Fig.1 The position of the TE Lake and the situation of the lake basin

表 1 天鹅湖水及泉水水化学性质（单位：mg/L）  
Table 1 Chemical characteristics of lake water and springs (units: mg/L)

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
天鹅湖水	72.763 4	67.878 3	7.567 5	4.896 1	6.796 9	0.421 8	250.188 7	267.987 1
泉 1	86.499 1	61.482 6	6.655 8	4.310 6	10.899 3	3.294 4	415.097 8	101.237 5
泉 2	85.803 5	63.102 2	6.543 3	4.448 6	10.841 5	2.509 1	382.518 0	123.549 6

## 2 样品采集与实验方法

### 2.1 岩芯地层特征

采用奥地利平台钻（UWITEC Sediment Corer）于 2015 年 1 月在天鹅湖 1 号湖泊中心水域 14.18 m 处钻取得到 7.9 m 的 TEB 孔岩芯。根据沉积物的结构、颜色、动植物特征，整个沉积

岩芯存在四次不同阶段(图 2): 0~0.55 m 为深褐色淤泥, 其间偶见壳体类生物残体; 0.56~1.55 m 为灰褐色湖相沉积物, 中间夹杂着大量的钙结核和藻类残体; 1.56~5.6 m 为深褐色淤泥, 分布有多个沙质互层, 同时沙层中出现大量陆源植物残体; 5.61~7.9 m 为灰褐色沉积物, 同样存在大量的植物钙结核。

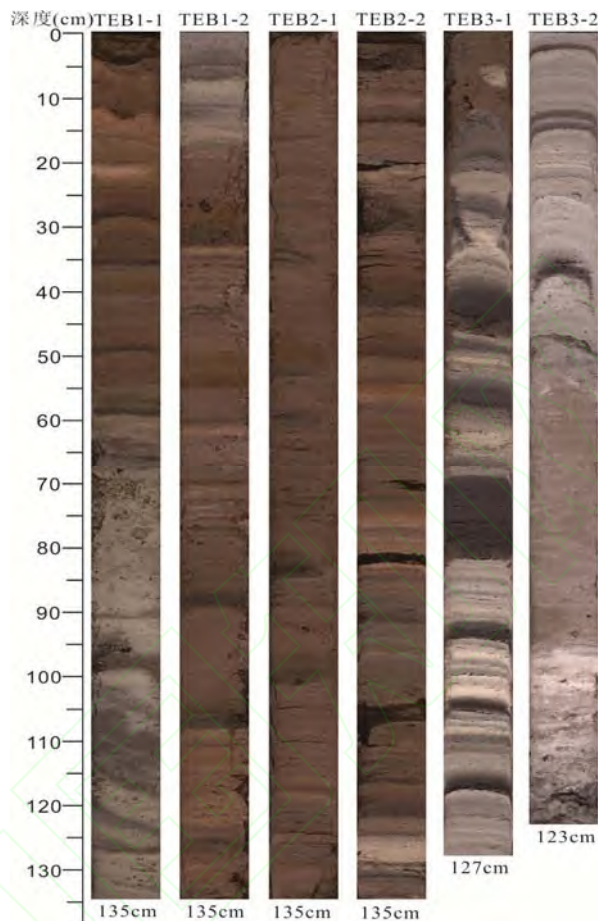


图 2 天鹅湖 TEB 孔岩芯地层特征  
Fig.2 The lithological characteristics of TEB core in TE Lake

## 2.2 实验方法

沉积岩芯样品在实验室按照 1 cm/样间隔进行分取, 并使用冷冻干燥仪进行真空冻干处理。元素含量利用 X 射线荧光光谱 (XRF) 岩芯扫描仪对岩芯孔进行扫描, 以 2 mm 为间隔, 单位以计数率 (count per second, cps) 表示; 碳酸盐以 1 cm 间隔在 950 °C 下通过烧失法 (Loss on ignition, LOI) 获得, 具体方法按照 Dean (1974) [38] 的步骤进行; 矿物分析利用 X 射线衍射法 (XRD) 以 10 cm 间隔获得; 总有机碳 (TOC) 及总氮 (TN) 利用元素分析仪 (VarioEL Cube, Elementar Analysensysteme GmbH, Germany) 以 5 cm 间隔测定; TEB 孔共计挑选出各类残体 90 个, 选取可靠的陆源植物大化石进行 AMS <sup>14</sup>C 年代测试。大块的植物残体样品用手术刀切割成 2~3 mm 条块, 使用酸—碱—酸方法处理 [39] 后, 由北京大学加速器质谱实验室完成年代测试。年代结果日历年校正使用 Calib 6.01 程序, 使用 1  $\sigma$  误差范围 (68.2%) 取值。

## 3 结果与讨论

### 3.1 年代框架

湖泊沉积岩芯总长为 7.9 m, 但 6.2~7.9 m 缺少可靠的定年材料, 无法建立高分辨率年代框架, 因而本文仅对 6.21 m 以上部位进行分析。6.21 m 以上部位共计挑选出各类残体 77 个, 选取 10 个木本类陆源植物残体进行测年 (图 3), 可以避免“碳库效应”的影响 [40]。年代结果如

表 2 所示, 底部 6.2 m 和 6.21 m 处的年代分别为 3 585 B.P.和 3 484 B.P.。利用已有年代结果对 TEB 孔沉积岩芯沉积速率进行了计算, 并根据沉积速率对各个沉积层位进行线性内插, 获取整个沉积岩芯不同沉积层位的年代结果 (图 4)。整个岩芯平均沉积速率为 0.175 cm/a, 1 cm 取样对应的平均分辨率为 5.7 年。

表 2 天鹅湖 TEB 孔岩芯 AMS  $^{14}\text{C}$  测年结果  
Table 2 The results of radiocarbon AMS  $^{14}\text{C}$  dating of TEB core

样品编号	深度/m	材料	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$^{14}\text{C}$ 年龄/a B.P.	日历年龄 (cal yr B.P., 1 $\sigma$ )
TE1-1-003	0.01	植物残体	-37.33±0.23	Modern	-64±80
TE1-1-023	0.26	植物残体	-35.23±0.23	125±25	137±25
TE1-1-047	0.56	植物残体	-32.89±0.23	250±45	213±45
TE1-2-026	1.66	植物残体	-29.53±0.24	305±25	367±25
TE1-2-085	2.4	植物残体	-26.21±0.23	615±25	603±25
TE2-2-003	4.07	植物残体	-25.97±0.24	1 170±40	1 093±40
TE2-2-103	5.27	植物残体	-27.51±0.23	2 065±40	2 033±40
TE3-1-044	5.85	植物残体	-25.47±0.23	2 985±30	3 160±30
TE3-1-078	6.2	植物残体	-21.66±0.25	3 355±45	3 585±45
TE3-1-079	6.21	植物残体	-23.56±0.24	3 255±35	3 484±35



图 3 天鹅湖 TEB 孔有代表性的陆源植物残体  
Fig.3 The typical terrestrial plant residues of Core TEB in TE Lake

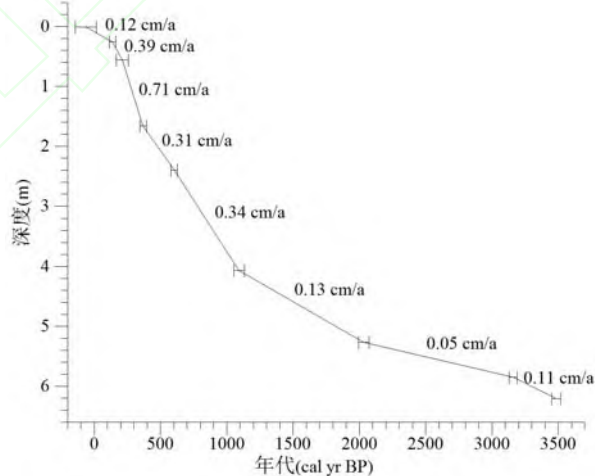


图 4 天鹅湖 TEB 孔年代模型及沉积速率变化特征  
Fig.4 The age model and sedimentation rates of Core TEB

### 3.2 环境代用指标

元素按照水迁移系数大小分为易迁移元素和弱迁移元素，易迁移元素包括 Ca、Sr 等碱土类元素，弱迁移元素包括 Fe、Al、Ti、Rb 等金属元素和 Si 等非金属元素<sup>[41]</sup>。湖泊沉积物中各元素主要来自于湖泊流域内岩石和土壤风化物、人类活动排放物及大气沉降物等<sup>[42]</sup>。对于人类活动干扰小且封闭的天鹅湖来说，沉积岩芯中元素主要来源于湖盆母岩风化形成的碎屑物质，上述弱迁移元素彼此相关性较好且大量赋存于这些碎屑物质中。Ca、Sr 元素与上述弱迁移元素呈现明显的反相关关系（图 5），且 Ca、Sr 元素两者之间相关性较好，反映易迁移元素与弱迁移元素之间不同的输入来源，初步推断天鹅湖弱迁移元素主要来源于陆源碎屑输入，易迁移元素来源于地下水输入。

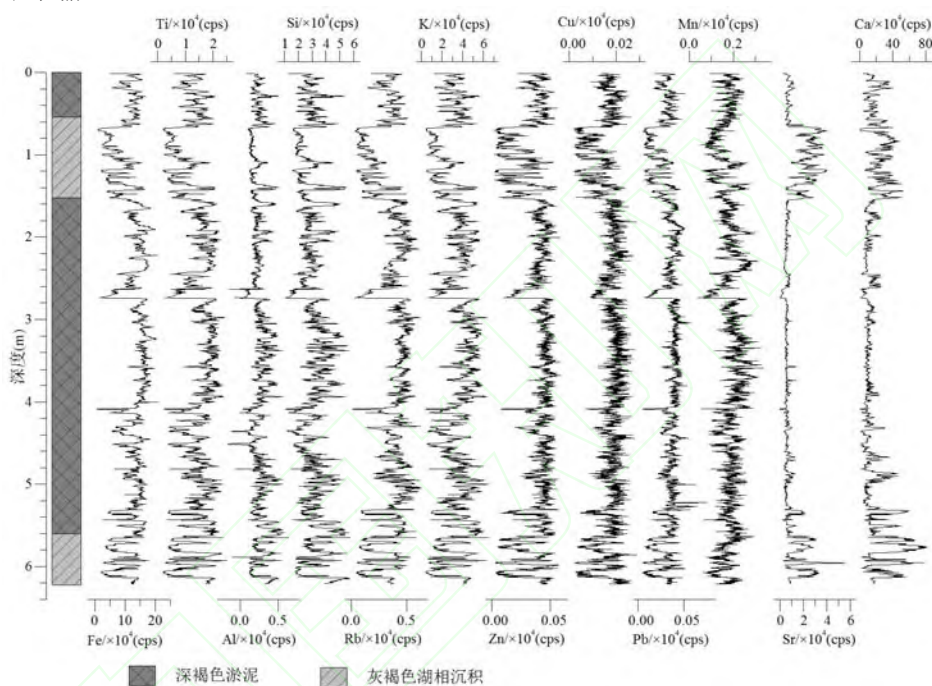


图 5 天鹅湖 TEB 孔元素含量

Fig.5 The content of elements of Core TEB in TE Lake

天鹅湖 TOC 和 TN 含量变化较为一致（图 6a, b），均值分别为 1.77%、0.15%。湖泊有机质含量主要取决于陆源有机质补给量和自生生物生产率<sup>[43]</sup>。前人研究认为<sup>[44-45]</sup>，C/N 值可以反映有机质来源，该比值小于 10 和大于 20 分别代表水生和陆生来源。天鹅湖 C/N 均值为 12.41%，表明湖泊有机质来源于自生和陆源混合输入过程。湖区降水增多，一方面导致湖泊植物大量发育，TOC 含量上升；另一方面，地表径流也可以带入更多的陆源有机质<sup>[21,43]</sup>。因此，天鹅湖沉积岩芯中 TOC 含量可以反映湖区降水量的变化。

湖泊沉积物中碳酸盐主要来源于湖泊自生和外部物源输入<sup>[46]</sup>。已有研究表明<sup>[1,47]</sup>，碳酸盐矿物成分中方解石和文石主要来源于湖泊自生，而白云石主要受外来物源影响。对天鹅湖湖盆内风化壳的矿物成分分析后发现不含碳酸盐类矿物，且沉积岩芯碳酸盐矿物形式主要为方解石（图 6c），在碳酸盐含量较高的沉积层位只出现极为少量的白云石，因而初步推断，沉积岩芯碳酸盐主要为自生成因。天鹅湖湖盆由石炭纪灰岩和白垩纪砂质砾岩组成，对湖泊补给的泉水露头位于石炭纪灰岩互层上，如图 1 所示。地下水中富含的  $\text{Ca}^{2+}$  不断补给湖水，并控制湖泊中碳酸盐的沉淀。同时，天鹅湖湖盆补给区域较小，降水主要以坡面漫流和地表径流方式对湖泊补给，结合沉积岩芯元素分析结果，认为天鹅湖沉积岩芯碳酸盐含量主要反映的是地下水补给量的变化。区域降水增加可以导致地下水补给量增多，从而输入更多的  $\text{Ca}^{2+}$  形成碳酸盐，所以碳酸盐的高值指示降水增多，低值指示降水减少。

自然界中 Rb 主要存在于钾长石、云母等难风化的矿物中，因此 Rb 在风化过程中大部分残留在原地；而 Sr 赋存于斜长石、碳酸盐等易风化的矿物中，Sr 在风化过程中易被迁移和淋失<sup>[48]</sup>。风化作用增强时，更多的易迁移元素 Sr 进入湖泊，而大部分弱迁移元素 Rb 残留在原地。因此，湖泊沉积岩芯中 Rb/Sr 值低指示较强的化学风化作用，反之，比值高指示较弱的化学风化作用<sup>[7,49-50]</sup>。Rb/Sr 值与指示降水量的 TOC 含量及碳酸盐含量始终呈反相关关系（图 6f），指示天鹅湖区化学风化强度的改变主要受控于降水量的变化。

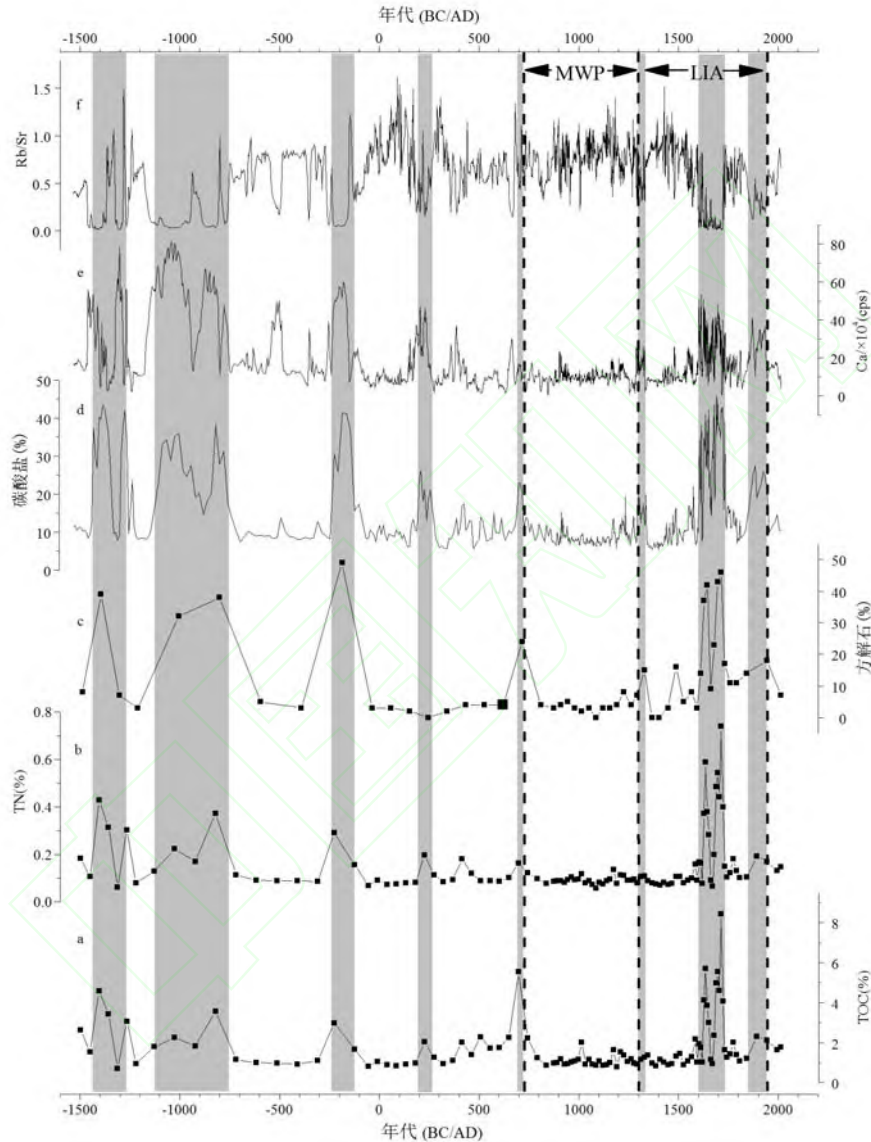


图 6 天鹅湖 TEB 孔岩芯环境代用指标变化特征  
Fig.6 Environmental indicators of Core TEB in TE Lake

### 3.3 3500 年来天鹅湖沉积环境变化

根据天鹅湖沉积岩芯 TOC 含量、碳酸盐含量、矿物成分、元素相对含量及岩性特征等指标的综合分析，3500 年以来天鹅湖沉积环境经历了 8 次明显的干、湿变化（图 6）。

(1) 1440 BC~1260 BC (6.1 m~5.83 m): 该时段位于灰褐色湖相沉积层内，碳酸盐含量在进入新冰期后首次出现持续 180 年的高值，最高可达 43.5%。该时期内 TOC 相对含量增加，湖泊生产率提高，同时 Rb/Sr 比值显示研究区化学风化强度增加，反映出相对湿润的沉积环境。

(2) 1120~750 BC (5.81~5.62 m): 该时期沉积岩芯同样为灰褐色湖相沉积物, 碳酸盐含量的峰值相比于前期较低, 最高为 38.4%, 但持续时间长达 370 年, 指示一次长期的湿润期, 该湿润的沉积环境得到来自 TOC 含量和 Rb/Sr 值的支持。期间在 940~830 BC 碳酸盐含量出现一次明显的下降, 指示湖区湿度降低, 该次干旱事件在 TOC 含量和 Rb/Sr 值中也有反映。750 BC 后, 湖泊沉积岩芯为深褐色淤泥, 碳酸盐含量下降, 进入相对稳定的干早期。

(3) 240~120 BC (5.36~5.29 m): 该湿润期持续时间较短, 但碳酸盐含量的峰值与 1440~1260 BC 相当, 高值处达 41.3%。与前两次湿润期相比, 240~120 BC 期间的降水具有快速变化的特征。同时, 方解石含量在该时间段内表现为明显的高值, 结合较高的 TOC 含量和较低的 Rb/Sr 值, 共同指示湖区湿润的沉积环境。

(4) 200~260 AD (4.91~4.83 m): 碳酸盐含量再次升高, 最高为 26.1%。这次短时间的湿润期内 TOC 含量升高, Rb/Sr 值下降, 同样指示湖区降水较多。该时期内方解石含量并没有出现高值, 可能原因是降水相对较少, 导致地下水补给量有限, 带入湖泊中的  $\text{Ca}^{2+}$  较少, 没有形成方解石沉淀的条件。

(5) 690~720 AD (4.29~4.25 m): 碳酸盐含量出现为期 30 年的高值, 峰值处为 23%, 该时期内 TOC 含量明显升高, Rb/Sr 值较低, 指示湖区降水较多。随后在 720 AD~1300 AD (4.25~2.56 m), 湖泊沉积岩芯为深褐色淤泥, 该时期对应于中世纪暖期, 沉积岩芯中碳酸盐和 TOC 含量处于稳定的低值, 反映湖区降水整体较少。同时, Rb/Sr 值高也反映较弱的化学风化强度, 湖区气候特征为暖干。碳酸盐含量、TOC 含量和 Rb/Sr 值变化整体较为稳定, 显示湖区在中世纪暖期相对稳定的气候条件。

(6) 1300~1330 AD (2.56~2.46 m): 碳酸盐含量出现微弱地上升, 最高为 18.9%, 湖区降水表现少量的增加, TOC 含量没有升高同样反映了湖区湿度不大。该时段 Rb/Sr 值降低, 记录了相对较强的化学风化强度。该时期对应于前人研究认为的小冰期开始阶段<sup>[51]</sup>, 湖区气候特征为冷湿。

(7) 1600 AD~1730 AD (1.55~0.61 m): 湖泊沉积岩芯再次表现为灰褐色湖相沉积, 该时段最明显的特征是碳酸盐含量和 TOC 含量达到 3500 年来最高值, 分别为 45.9%和 8.4%, 出现一次为期 130 年降水增多的时期。Rb/Sr 值也达到最低值, 反映湖区强的化学风化作用。

(8) 1850 AD~1950 AD (0.23~0.1 m): 碳酸盐含量及 TOC 含量再次升高, 碳酸盐最高值为 27.5%, Rb/Sr 值降低, 显示湖区降水增多, 该湿润期的湿润程度不及 1600 AD~1730 AD 但高于 1300 AD~1330 AD。随后进入现代增温期, 碳酸盐和 TOC 含量降低, Rb/Sr 值升高, 反映湖区降水量下降, 化学风化强度减弱, 表现为暖干的气候特征。现代增温期与中世纪暖期相比, 碳酸盐含量和 TOC 含量相对较高, 反映现代增温期湖区湿度高于中世纪暖期, 该结果与来自青藏高原北部尕斯库勒湖及苏干湖的记录一致<sup>[25]</sup>。

小冰期到来之前, 碳酸盐含量峰值出现的频次和变化幅度总体呈减少和降低的趋势, 反映湖区降水逐渐减少。尤其在 720 AD~1300 AD (4.25 m~2.56 m), 对应于中世纪暖期, 湖区处于稳定的暖干气候条件。根据天鹅湖多指标分析, 小冰期共出现三次降水增多的时期, 分别是 1300 AD~1330 AD、1600 AD~1730 AD、1850 AD~1950 AD, 尤其是 1600 AD~1730 AD, 碳酸盐含量显著上升, 处于小冰期内最高值, 是小冰期降水最多的时期, 该时期与姚檀栋等<sup>[52]</sup>利用古里雅冰芯记录的小冰期最盛期时间一致。同时, 相比于中世纪暖期而言, 天鹅湖记录的小冰期干湿波动较大。基于介形虫重建的苏干湖盐度变化<sup>[37]</sup>和树轮重建的青藏高原东北部降水<sup>[53]</sup>同样记录了小冰期不稳定的气候特征。Chen *et al.*<sup>[18-19]</sup> 综合多指标重建的湿度记录结果表明, 西风影响区小冰期气候特征在百年尺度上为冷湿, 而东部季风影响区小冰期气候特征为冷干。位于祁连山中段的天鹅湖地区, 晚全新世以来气候变化受西风环流驱动, 呈现暖干、冷湿的沉积环境特征。

前人研究认为<sup>[21]</sup>, 西风活动增强时期, 更多的北大西洋水汽能够进入中东亚干旱区, 导致该区域降水明显增多<sup>[18-19]</sup>, 西风的不稳定影响湖区降水量的变化。同时, 历史时期较低的气温能够降低蒸发强度, 而使得区域有效湿度相对增加<sup>[54]</sup>。另外, 天鹅湖位于七一冰川山前, 湖泊

沉积岩芯记录的干、湿等沉积环境变化可能受到冰川活动的影响，具体的响应机制有待进一步研究。

#### 4 结论

天鹅湖是以地下泉水补给为主的高山湖泊，碳酸盐含量变化主要受控于地下水补给量，可以高分辨率敏感地记录区域降水变化。根据天鹅湖沉积岩芯 TOC 含量、碳酸盐含量、元素相对含量、矿物成分及岩性特征等指标的综合分析，3 500 年以来天鹅湖沉积环境经历了 8 次明显的干、湿变化，湿润期分别为 1440 BC~1260 BC、1120 BC~750 BC、240 BC~120 BC、200 AD~260 AD、690 AD~720 AD、1300 AD~1330 AD、1600 AD~1730 AD 及 1850 AD~1950 AD。小冰期到来之前(1534 BC~1300 AD)，碳酸盐含量峰值出现的频次和变化幅度总体呈减少和降低的趋势，反映湖区降水逐渐减少，尤其是中世纪暖期(720 AD~1300 AD)，是 3 500 年来最干旱的时期。小冰期开始于 1300 AD，出现三次降水较多时期，期间在 1600 AD~1730 AD 是小冰期最盛期。受西风环流影响，天鹅湖记录的中世纪暖期与小冰期分别是暖干、冷湿的气候组合模式，该湖反映的小冰期气候相比于中世纪暖期更加不稳定。现代增温期与中世纪暖期相比，碳酸盐含量和 TOC 含量相对较高，反映现代增温期湖区湿度高于中世纪暖期。另外，天鹅湖沉积岩芯中由 Rb/Sr 值反映的湖区化学风化强度的改变主要受控于降水量的变化。

致谢 兰州大学王强博士参与岩芯元素扫描，在此表示感谢。

#### 参考文献(References)

- [1] 陈敬安,万国江. 云南洱海沉积物粒度组成及其环境意义辨识[J]. 矿物学报, 1999, 19(2): 175-182. [Chen Jing'an, Wan Guojiang. Sediment particle size distribution and its environmental significance in Lake Erhai, Yunnan Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1999, 19(2): 175-182.]
- [2] 王苏民,张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展[J]. 科学通报, 1999, 44(6): 579-587. [Wang Sumin, Zhang Zhenke. New progress of lake sediments and environmental changes research in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(6): 579-587.]
- [3] Chen Fahu, Xu Qinghai, Chen Jianhui, et al. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11186.
- [4] 储国强,顾兆炎,许冰,等. 东北四海龙湾玛珉湖沉积物纹层计年与<sup>137</sup>Cs、<sup>210</sup>Pb 测年[J]. 第四纪研究, 2005, 25(2): 202-207. [Chu Guoqiang, Gu Zhaoyan, Xu Bing, et al. Varvechronology and radiometric dating (<sup>137</sup>Cs, <sup>210</sup>Pb) from the Sihailongwan Maar, northeastern China[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(2): 202-207.]
- [5] Peng Yanjia, Xiao Jule, Nakamura T, et al. Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(3/4): 467-479.
- [6] 申洪源,贾玉莲,李徐生,等. 内蒙古黄旗海不同粒级湖泊沉积物 Rb、Sr 组成与环境变化[J]. 地理学报, 2006, 61(11): 1208-1217. [Shen Hongyuan, Jia Yulian, Li Xusheng, et al. Environmental change inferred from distribution of Rb and Sr in different grain size fractions from lacustrine sediments in Huangqihai Lake, Inner Mongolia[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(11): 1208-1217.]
- [7] Liu Jianbao, Chen Jianhui, Selvaraj K, et al. Chemical weathering over the last 1200 years recorded in the sediments of Gonghai Lake, Lvliang Mountains, North China: a high-resolution proxy of past climate[J]. Boreas, 2014, 43(4): 914-923.
- [8] 吴敬禄,刘建军,王苏民. 近 1 500 年来新疆艾比湖同位素记录的气候环境演化特征[J]. 第四纪研究, 2004, 24(5): 585-590. [Wu Jinglu, Liu Jianjun, Wang Sumin. Climatic change record from stable isotopes in Lake Aibi, Xinjiang during the past 1 500 years[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(5): 585-590.]
- [9] 陈发虎,黄小忠,张家武,等. 新疆博斯腾湖记录的亚洲内陆干旱区小冰期湿润气候研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(1): 77-85. [Chen Fahu, Huang Xiaozhong, Zhang Jiawu, et al. Humid Little Ice Age in arid central Asia documented by Bosten Lake, Xinjiang, China[J]. Science China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(1): 77-85.]
- [10] 薛积彬,钟巍. 新疆巴里坤湖全新世环境记录及区域对比研究[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 610-620. [Xue Jibin, Zhong Wei. Holocene climate change recorded by lacustrine sediments in Barkol Lake and its regional comparison[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(4): 610-620.]
- [11] 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. Monsoon variations of the Qinghai-Xizang Plateau during the last 12,000 years: geochemical evidence from the sediments in the Siling Lake[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(1): 61-64.]
- [12] 王苏民,薛滨,夏威夷. 希门错 2 000 多年来气候变化的湖泊记录[J]. 第四纪研究, 1997, 17(1): 62-69. [Wang Sumin, Xue Bin, Xia Weilan. Lake record of climatic change in the past 2 000 years of Ximen Cuo (Lake)[J]. Quaternary Sciences, 1997, 17(1): 62-69.]
- [13] 类延斌,张成君,尚华明,等. 青藏高原东北部希门错湖岩心粒度特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 31-38. [Lei Yanbin, Zhang Chengjun, Shang Huaming, et al. The grain size characteristics of Ximencuo Lake core in the Northeast Tibet Plateau and its environmental significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(3): 31-38.]
- [14] 王君波,朱立平. 藏南沉积钻孔沉积物金属元素分布特征及其与粒度的关系[J]. 湖泊科学, 2008, 20(6): 715-722. [Wang Junbo, Zhu Liping. Distribution features of elements in core sediments and their relationship with grain size in Lake Chen Co, southern Tibet[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(6): 715-722.]
- [15] Huang Wei, Chen Jianhui, Zhang Xiaojian, et al. Definition of the core zone of the "westerlies-dominated climatic regime", and its controlling factors during the instrumental period[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 58(5): 676-684.
- [16] Yang Bao, Br uning A, Shi Yafeng. Late Holocene temperature fluctuations on the Tibetan Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22(21/22): 2335-2344.



- [17] Yang Bao, Wang Jinsong, Bräuning A, et al. Late Holocene climatic and environmental changes in arid central Asia[J]. *Quaternary International*, 2009, 194(1/2): 68-78.
- [18] Chen Fahu, Yu Zicheng, Yang Meilin, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(3/4): 351-364.
- [19] Chen Fahu, Chen Jianhui, Holmes J, et al. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: a review, synthesis and comparison with monsoon region[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(7/8): 1055-1068.
- [20] Chen Jianhui, Chen Fahu, Feng Song, et al. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age: spatial patterns and possible mechanisms[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 107: 98-111.
- [21] An Zhisheng, Colman S M, Zhou Weijian, et al. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 619.
- [22] Liu Zhonghui, Henderson A C G, Huang Yongsong. Alkenone-based reconstruction of late-Holocene surface temperature and salinity changes in Lake Qinghai, China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(9): L09707.
- [23] Liu Xingqi, Dong Hailiang, Yang Xiangdong, et al. Late Holocene forcing of the Asian winter and summer monsoon as evidenced by proxy records from the northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 280(1/2/3/4): 276-284.
- [24] Zhao Cheng, Yu Zicheng, Zhao Yan, et al. Possible orographic and solar controls of Late Holocene centennial-scale moisture oscillations in the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(21): L21705.
- [25] He Yuxin, Zhao Cheng, Wang Zheng, et al. Late Holocene coupled moisture and temperature changes on the northern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 80: 47-57.
- [26] Narama C. Late Holocene variation of the Raigorodskogo Glacier and climate change in the Pamir-Alai, central Asia[J]. *CATENA*, 2002, 48(1/2): 21-37.
- [27] Thompson L G, Yao T, Mosley-Thompson E, et al. A high-resolution millennial record of the South Asian Monsoon from Himalayan Ice Cores[J]. *Science*, 2000, 289(5486): 1916-1919.
- [28] Shao X, Xu Y, Yin Z Y, et al. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(17/18): 2111-2122.
- [29] Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, et al. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium[J]. *Science*, 2010, 328(5977): 486-489.
- [30] Yang Bao, Qin Chun, Wang Jianglin, et al. A 3,500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(8): 2903-2908.
- [31] Hughes M K, Diaz H F. Was there a 'medieval warm period', and if so, where and when?[J]. *Climatic Change*, 1994, 26(2/3): 109-142.
- [32] Broecker W S. Was the medieval warm period global?[J]. *Science*, 2001, 291(5508): 1497-1499.
- [33] Jones P D, Mann M E. Climate over past millennia[J]. *Reviews of Geophysics*, 2004, 42(2): RG2002.
- [34] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 中国小冰期的气候[J]. *第四纪研究*, 1998, 18(1): 54-64. [Wang Shaowu, Ye Jinlin, Long Daoyi. Climate in China during the Little Ice Age[J]. *Quaternary Sciences*, 1998, 18(1): 54-64.]
- [35] Lamb H H. *Climate: Present, Past and Future, Volume 2: Climatic History and the Future*[M]. London, England: Methuen and Co. Ltd, 1977.
- [36] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries[J]. *Nature*, 1998, 392(6678): 779-787.
- [37] Chen Jianhui, Chen Fahu, Zhang Enlou, et al. A 1000-year chironomid-based salinity reconstruction from varved sediments of Suga Lake, Qaidam Basin, arid Northwest China, and its palaeoclimatic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(20): 3749-3759.
- [38] Dean W E, Jr. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1974, 44(1): 242-248.
- [39] Olsson I U. Radiocarbon dating history: early days, questions, and problems met[J]. *Radiocarbon*, 2009, 51(1): 1-43.
- [40] 王宗礼, 何建华, 陈亚东. 湖泊碳库效应及校正方法[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 683-688. [Wang Zongli, He Jianhua, Chen Yadong. The reservoir effect of radiocarbon dating in lake sediment system[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(3): 683-688.]
- [41] 陈骏, 王鹤年. *地球化学*[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 301-327. [Chen Jun, Wang Henian. *Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 2004: 301-327.]
- [42] 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: 74-76. [Shen Ji, Xue Bin, Wu Jinglu, et al. *Lake sediments and environmental evolution*[M]. Beijing: Science Press, 2010: 74-76.]
- [43] Zeng Yan, Chen Jing'an, Xiao Jule, et al. Non-residual Sr of the sediments in Daihai Lake as a good indicator of chemical weathering[J]. *Quaternary Research*, 2013, 79(2): 284-291.
- [44] Krishnamurthy R V, Bhattacharya S K, Kusumgar S. Palaeoclimatic changes deduced from  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  and C/N ratios of Karewa lake sediments, India[J]. *Nature*, 1986, 323(6084): 150-152.
- [45] Kaushal S, Binford M W. Relationship between C:N ratios of lake sediments, organic matter sources, and historical deforestation in Lake Pleasant, Massachusetts, USA[J]. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 22(4): 439-442.
- [46] 蓝江湖, 徐海, 刘斌, 等. 湖泊沉积中碳酸盐、有机质及其同位素的古气候意义[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1326-1334. [Lan Jianghu, Xu Hai, Liu Bin, et al. Paleoclimate implications of carbonate, organic matter, and their stable isotopes in lacustrine sediments: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(5): 1326-1334.]
- [47] 曹洁, 张家武, 张成君, 等. 青藏高原北缘哈拉湖近 800 年来湖泊沉积及其环境意义[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(1): 100-107. [Cao Jie, Zhang Jiawu, Zhang Chengjun, et al. Environmental changes during the past 800 years recorded in lake sediments from Hala Lake on the northern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(1): 100-107.]
- [48] 曾艳, 陈敬安, 朱正杰, 等. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值在古气候/古环境研究中的应用与展望[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(8): 805-810. [Zeng Yan, Chen Jing'an, Zhu Zhengjie, et al. Advance and perspective of Rb/Sr ratios in lake sediments as an index of paleoclimate/paleoenvironment[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(8): 805-810.]
- [49] Chen Jun, An Zhisheng, Wang Yongjin, et al. Distribution of Rb and Sr in the Luochuan loess- paleosol sequence of China during the last 800 ka: implications for paleomonsoon variations[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1999, 42(3): 225-232.
- [50] Chen Lei, Shen Hongyuan, Jia Yulian, et al. Environmental change inferred from Rb and Sr of lacustrine sediments in Huangqihai Lake, Inner Mongolia[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(3): 373-384.
- [51] Grove A T. The "Little Ice Age" and its geomorphological consequences in Mediterranean Europe[J]. *Climatic Change*, 2001, 48(1): 121-136.
- [52] 姚檀栋, 杨志红, 皇翠兰, 等. 近 2 ka 来高分辨的连续气候环境变化记录: 古里雅冰芯近 2 ka 记录初步研究[J]. *科学通报*, 1996, 41(12): 1103-1106. [Yao Tandong, Yang Zhihong, Huang Cuilan, et al. A high-resolution continuous record on climate change during the last 2000 years: A preliminary research of Guliya Ice core[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(12): 1103-1106.]
- [53] Shao Xuemei, Huang Lei, Liu Hongbin, et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha, Qinghai[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(7): 939-949.

[54] 陈建徽, 陈发虎, 张家武, 等. 中国西北干旱区小冰期的湿度变化特征[J]. 地理学报, 2008, 63 (1): 23-33. [Chen Jianhui, Chen Fahu, Zhang Jiawu, et al. Humidity variability in the arid Northwest China during LIA derived from different proxy records[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(1): 23-33.]

## A 3500 Year Environmental Changes Recorded by Sediment of Tian'E Lake, Middle of Qilian Mountain, China

YAN TianLong<sup>1</sup>, WANG ZhenTing<sup>2</sup>, HE JianQiao<sup>2</sup>, HUANG XiaoZhong<sup>1</sup>,  
XIA DunSheng<sup>1</sup>, WANG ZongLi<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS Lanzhou 730000, China

**Abstract:** Lake sediments, especially the inland-mountain closed lake sediments can be used to record the change of the continuous paleoclimate, which is one of the important archives of paleoclimate. Sediment core retrieved from Tian'E Lake (TE Lake) in the middle of Qilian Mountain was used to reconstruct climatic changes during the past 3500 year based on the analysis of total organic carbon (TOC), elements and mineral composition. The chronology of TEB core was established using AMS <sup>14</sup>C dates of ten terrestrial plant residues. The results show that carbonate content is controlled by the supplementary of groundwater, which further indicates the precipitation around the catchment. Accordingly, the precipitation of TE Lake has a decreasing tendency between 1534 BC~1300 AD based on carbonate content. Especially during the Medieval Warm Period (MWP) (720 AD~1300 AD), the precipitation reached lowest values among the last 3500 year. There had three-time humid conditions during the Little Ice Age(LIA) which began at 1300 AD and reached most humid condition during the period of 1600~1730 AD. TE Lake is characterized by assembly of warm-dry and cold-wet climate conditions in the region resulting from the influence of Westerlies. Moreover, variations of climate during LIA recorded by TE Lake were more unstable than that during the MWP.

**Key words:** Qilian Mountain; Tian'E Lake; late Holocene; Environmental changes; Medieval Warm Period; Little Ice Age