

## 巢湖杭埠河流域湖相沉积物多指标揭示的全新世以来环境演变\*

周慧<sup>1</sup>, 吴立<sup>1,2,3\*\*</sup>, 马春梅<sup>4</sup>, 管后春<sup>5</sup>, 孙小玲<sup>1</sup>, 路曙光<sup>1</sup>, 尚广春<sup>4</sup>, 汪勇<sup>1</sup>, 徐仪红<sup>1</sup>,  
徐军<sup>5</sup>, 陈晔<sup>6</sup>, 鲍远航<sup>6</sup>

(1: 安徽师范大学地理与旅游学院/江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室, 芜湖 241002)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(3: 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061)

(4: 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

(5: 安徽省地质调查院, 合肥 230001)

(6: 南京师范大学海洋科学与工程学院, 南京 210023)

**摘要:** 在巢湖杭埠河流域中的古湖盆中心——三河圩区获取 28.6 m 长的湖相岩芯(SZK1507 孔), 利用 AMS<sup>14</sup>C 测年技术建立可靠的地层年代序列, 通过对 SZK1507 孔 738 cm 以上段湖相沉积物平均粒径、磁化率、总氮(TN)、总有机碳(TOC)及 C/N 的综合分析, 高分辨率重建了巢湖杭埠河流域全新世以来的古环境演变过程. 结果表明, 本区域的环境变化过程可以分为 4 个阶段, 阶段 I (约 10050—9700 cal. a B.P.) 与阶段 III (约 9250—5300 cal. a B.P.) 气候较为湿润, 巢湖水位较高, 平均粒径、磁化率值较低, TN、TOC、C/N 也偏低; 阶段 II (约 9700—9250 cal. a B.P.) 与阶段 IV (约 5300 cal. a B.P. 以来) 气候干燥, 巢湖水量减少, 水位降低, 平均粒径、磁化率值、TN、TOC、C/N 均较高. 一些全球范围内显著发生的气候突变事件在 SZK1507 孔沉积记录中也有体现, 如 9.3、8.2 和 4.2 ka B.P. 事件等. 将巢湖杭埠河流域 10000 cal. a B.P. 以来的平均粒径、磁化率、TN、TOC、C/N 沉积记录与全新世以来的北纬 30° 夏季太阳辐射量、太阳黑子数、火山喷发对大气中硫酸盐含量贡献率等进行对比, 发现巢湖杭埠河流域全新世气候突变事件主要受控于北半球夏季太阳辐射量变化、太阳活动以及火山活动等因素, 并与它们之间复杂的响应机制有关.

**关键词:** 巢湖; 杭埠河流域; 湖相沉积; 全新世; 环境演变

## Holocene environmental evolution recorded by multi-proxies from lacustrine sediments of the Hangbu River Valley, Lake Chaohu Basin, East China\*

ZHOU Hui<sup>1</sup>, WU Li<sup>1,2,3\*\*</sup>, MA Chunmei<sup>4</sup>, GUAN Houchun<sup>5</sup>, SUN Xiaoling<sup>1</sup>, LU Shuguang<sup>1</sup>, SHANG Guangchun<sup>4</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>, XU Yihong<sup>1</sup>, XU Jun<sup>5</sup>, CHEN Ye<sup>6</sup> & BAO Yuanhang<sup>6</sup>

(1: Provincial Key Laboratory of Earth Surface Process and Regional Response in the Yangtze-Huaihe River Basin, School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, P.R.China)

(4: School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, P.R.China)

(5: Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, P.R.China)

(6: School of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P.R.China)

\* 2019-10-29 收稿; 2020-01-19 收修改稿.

国家自然科学基金项目(41771221, 41621002)、国家重点研发计划项目(2016YFA0600501)、黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(SKLLQG1851)、中国博士后科学基金项目(2018M6324039)和安徽师范大学研究生科研创新与实践项目(2018kyex053)联合资助.

\*\* 通信作者; E-mail: jedi-wuli@163.com.

**Abstract:** Time sequence of the SZK1507 core derived from AMS<sup>14</sup>C dating, and the content of the total nitrogen (TN), total organic carbon (TOC) and the C/N values as well as the mean grain size, magnetisability are utilized to reconstruct the environmental changes in the Hangbu River Valley of the Lake Chaohu Basin, East China during the Holocene. The comprehensive analyses of multiple alternative proxies indicated that the evolutionary process of Lake Chaohu Basin in the Holocene could be divided into four periods. The climate was moist in Period I (from 10050 cal. a B.P. to 9700 cal. a B.P.) and Period III (from 9250 cal. a B.P. to 5300 cal. a B.P.), and lake level of Lake Chaohu was high inferred from the low values of TN, TOC, C/N, mean grain size and magnetisability. Period II (from 9700 cal. a B.P. to 9250 cal. a B.P.) and Period IV (from 5300 cal. a B.P. to the present) were dry, and the Lake Chaohu had low lake level, suggested by the high values of mean grain size and magnetisability, TN, TOC, C/N. Some global-scale abrupt climatic change events (e.g., 9.3 ka B.P., 8.2 ka B.P., and 4.2 ka B.P. events) were also recorded in this sediment core. Comparing the lacustrine records of SZK1507 core to other observations of climate variability, such as the northern hemisphere summer solar insolation, the sunspot numbers etc during the Holocene, we discovered that the abrupt climatic change events occurring in the Lake Chaohu Basin were affected by the variation of summer solar insolation in the northern hemisphere, the solar activities, the volcanic activities, and the complex feedback mechanism among them principally.

**Keywords:** Lake Chaohu; Hangbu River Valley; lacustrine sediments; Holocene; environmental evolution

全新世以来的气候环境变化已成为当前全球变化研究的热点之一<sup>[1-7]</sup>. 这一时段气候变化存在一定的复杂性, 叠加在轨道尺度变化过程之上的还有以快速增温/降温为主要特征的千年—数十年尺度的气候事件, 这些气候事件有的还具有持续时间短、突发性和区域性等特点<sup>[8-12]</sup>. 在精确测年的基础上, 利用沉积记录多环境代用指标综合集成实现对全新世以来长尺度气候环境的高分辨率重建是取得对这些气候事件及其响应机制认识进步的关键之一<sup>[13-14]</sup>. 湖泊沉积由于具有时间分辨率高、沉积连续性好和储存信息量大等优势, 其在利用各种理化、生物指标及本身演变重建陆地古气候、环境演化序列, 揭示区域和全球气候演化规律等研究中仍具有不可替代的优势<sup>[15-17]</sup>. 季风区的湖泊, 尤其是内流封闭或半封闭湖对气候变化的响应最为灵敏, 记录了季风演替的历史<sup>[18-20]</sup>. 中国全新世以来的气候环境变化序列已初步重建<sup>[21-22]</sup>, 但和广袤的中西部<sup>[23-25]</sup>及青藏高原区<sup>[26-28]</sup>相比, 由于受自然地理背景与人类活动影响, 东部季风区全新世以来环境变化的高分辨率地质记录自然材料还比较缺乏且分布不均, 近年来的成果主要集中在石笋<sup>[29-30]</sup>、泥炭<sup>[31-32]</sup>及风成堆积<sup>[33]</sup>等方面. 前人研究表明<sup>[34]</sup>, 安徽中部巢湖的湖相沉积记录对环境变化较敏感, 因其地处四周山地围限的构造盆地内, 且位于北亚热带和暖温带湿润季风气候过渡地带, 加之只有唯一出水通道裕溪河与长江相连, 构成相对封闭的流域, 湖相沉积保存连续完好, 含有良好的测年材料, 蕴含丰富的、高分辨率的气候—生态环境信息, 是理想的研究对象. 本研究通过对巢湖杭埠河流域采集的湖相沉积岩芯进行 AMS<sup>14</sup>C 年代学以及平均粒径、磁化率、总氮、总有机碳、C/N 的综合分析研究, 高分辨率重建该流域全新世以来的环境演变信息, 并通过与其他区域气候记录对比探讨该区域全新世以来的气候变化响应过程及驱动机制.

## 1 研究区概况

巢湖位于安徽省中部地区, 江淮流域之间, 东西长 54.5 km, 南北平均宽 15.1 km, 湖岸线长 181 km, 平水期湖泊面积 770 km<sup>2</sup>, 水深 0.98~7.98 m, 最大容积 4.81×10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>, 为中国东部五大淡水湖之一(图 1). 杭埠河子流域介于 30°59′~31°45′N, 116°22′~117°22′E 之间(图 1), 河流全长 145 km, 流域面积 4150 km<sup>2</sup>, 是巢湖入湖河流中水量最大、长度最长、流域面积最广的水系, 约占巢湖流域径流总量的 55.5%<sup>[35]</sup>. 气候属亚热带湿润性季风气候区, 地带性植被类型为北亚热带混交林, 年平均气温 15.6℃. 杭埠河流域是巢湖沉积物质的主要来源之一, 其入湖泥沙贡献率达 50% 以上<sup>[36]</sup>.

## 2 样品采集与实验方法

### 2.1 样品采集

已有研究表明<sup>[37-38]</sup>, 现今巢湖的形态是在 1728—1820 A.D. 时形成, 而古巢湖的水域远大于现在, 面积鼎盛时期出现在 8500—5500 cal. a B.P., 达 2123.03 km<sup>2</sup>. 因此, 我们选取全新世以来古巢湖湖盆中心附近、现今巢湖西岸三河镇的杭埠河大桥附近圩区为采样点(经纬度 31°31′N, 117°15′E, 图 1), 于 2015 年 7 月采

用 GY-200-1A 型工程钻机实施湖相沉积岩芯钻探取样,编号为 SZK1507 孔,获取岩芯总长 32.1 m,其中第四系河湖相沉积物厚度 28.6 m。样品采集后采用对套管进行密封保存,然后运回实验室内低温(4℃左右)存放以防止样品氧化。根据高分辨率和研究需要,选取 SZK1507 孔 738 cm 以上段岩芯以每 2 cm 进行分割取样,共获取 369 个样品;岩芯取芯率为 92.3%。沉积物以青灰色湖相淤泥为主,约占总体的 90%;砂层含量次之,约占 10.5%,主要有 4 段,分别位于 44~66、112~124、436~448 和 562~586 cm 深度处。钻孔沉积物特征描述如下:

1) 深度 0~16 cm 段:灰黄色淤泥层,夹青灰色泥、碳化木片和炭屑;2) 深度 18~42 cm 段:青灰色淤泥层,夹灰黄色泥、炭屑与碳化木片,底部粉砂含量略高;3) 深度 44~66 cm 段:高粉砂含量青灰色淤泥层,炭屑含量与粉砂含量都较高;4) 深度 68~110 cm 段:青灰色淤泥层,含炭屑;5) 深度 112~124 cm 段:灰黄色至青白色砂层,含炭屑,砂含量高;6) 深度 126~418 cm 段:青灰色淤泥层,含炭屑,质地单一,且较粘;7) 深度 420~434 cm 段:青灰色黏土层,无炭屑,质地较黏;8) 深度 436~448 cm 段:青灰色粉砂层,质地较松散;9) 深度 450~560 cm 段:青灰色淤泥层,含大量炭屑,质地单一;10) 深度 562~564 cm 段:灰黄色砂层,含泥质成分;11) 深度 566~586 cm 段:青灰色粉砂层,含泥质成分;12) 深度 588~738 cm 段:青灰色淤泥层,质地较粘软,含炭屑与碳化木片。

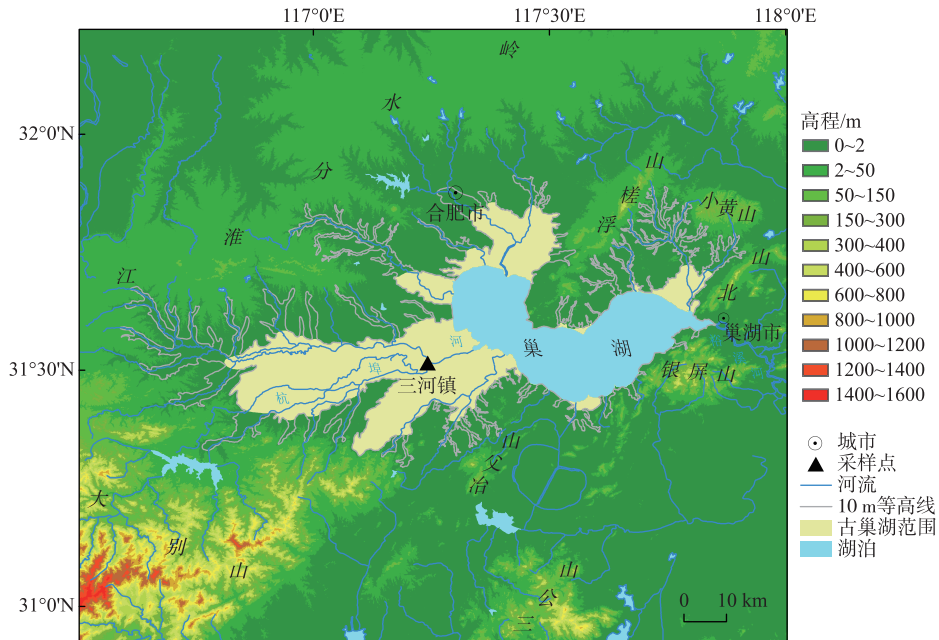


图 1 巢湖流域地形、水系及钻孔位置示意

Fig.1 The topography, drainage of the studied site and the location of the core SZK1507 in Lake Chaohu Basin

## 2.2 实验方法

粒度、磁化率测试在南京师范大学环境演变与生态建设江苏省重点实验室内完成。粒度测试用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪,仪器测量范围为 0.02~2000  $\mu\text{m}$ ,测量精度为  $\pm 1\%$ 。每个样品重复测量 3 次取其平均值。磁化率测试步骤为:所有样品在 40℃ 以下烘干,在 Bartington MS2 磁化率仪上进行低频磁化率测定,每个样品测定 3 次,取平均值。总氮(TN)、总有机碳(TOC)、C/N 测试分析在安徽师范大学江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室完成,其具体分析步骤为:将自然晾干的样品研磨过 10 目筛,加入 5% 的稀盐酸多次搅拌至反应完全,用中性去离子水水洗至中性(pH=7),烘干后将样品用玛瑙研钵研磨至粉末状,过 200 目筛,然后称取一定量的被测样品在锡纸紧密包裹下送入德国 Elementar 公司生产的 Vario EL cube 元素分析仪直接测定出 TN、TOC、C/N 值(TOC/TN 比值)根据质量比乘以 1.167

计算而得<sup>[39]</sup>.

2.3 年代序列建立

自上至下依次在 SZK1507 孔深度 12、50、56、106、110、452、532、580、708 和 738 cm 处共选取 10 个样品进行 AMS<sup>14</sup>C 年代测试,实验在中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室西安加速器质谱中心完成,测年结果使用 CALIB 7.0.4 程序进行年代校正. AMS<sup>14</sup>C 年代测试结果及 2σ 树轮校正结果如表 1 所示. 10 个日历年代与深度呈现很好的线性关系 ( $R^2 = 0.9464$ ),采用线性内插和外推法建立了沉积岩芯的年代-深度模式(图 2). 整个 738 cm 以上段岩芯的沉积速率可分为 2 段,0~110 cm 沉积速率较低,平均为 0.031 cm/a;110~738 cm 沉积速率较高,约为 0.12 cm/a;总体沉积速率变化于 0.004~7.5 cm/a 之间,其中 4700—3600 cal. a B.P.段沉积速率最慢,10036—9900 cal. a B.P.段沉积速率最快.

表 1 巢湖杭埠河流域 SZK1507 孔 AMS<sup>14</sup>C 测年及校正结果

Tab.1 The AMS<sup>14</sup>C dates and calibrated results of the SZK1507 core in Hangbu River Valley, Lake Chaohu Basin

实验室编号	样品编号	深度/cm	测年材料	AMS <sup>14</sup> C 年代/a B.P.	2σ 校正年代/cal. a B.P.	中值年代/cal. a B.P.
XA18799	G1-3	12	碳化木片	1220±20	1067—1184	1126
XA18801	G2-13	50	炭屑	2250±25	2159—2261	2210
XA18802	G2-16	56	炭屑	2500±25	2490—2646	2568
XA18803	G2-41	106	总有机质	3395±25	3580—3696	3638
XA18855	G2-43	110	炭屑	4170±30	4611—4769	4690
XA19891	G6-44	452	炭屑	7845±45	8539—8780	8660
XA19889	G6-14	532	总有机质	8265±35	9128—9333	9231
XA19893	G7-21	580	总有机质	8485±35	9462—9537	9500
XA19898	G8-35	708	总有机质	8875±37	9887—10176	10032
XA19899	G8-50	738	炭屑	8885±35	9889—10182	10036

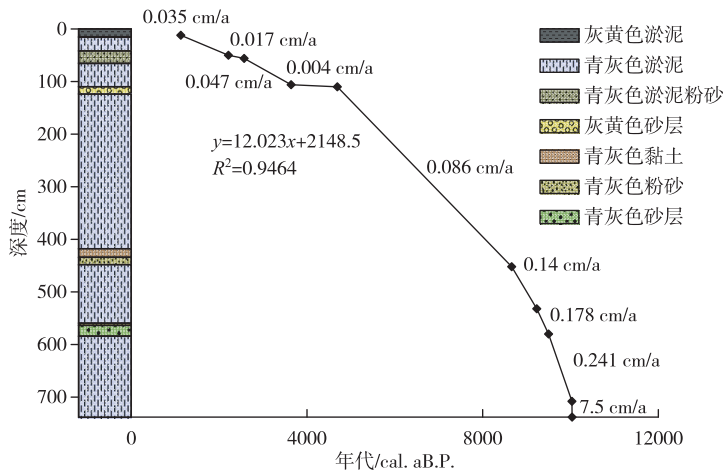


图 2 SZK1507 孔沉积岩芯年代-深度模式

Fig.2 Age-depth model of the core SZK1507

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 平均粒径、磁化率、TN、TOC 和 C/N 的环境指示意义

沉积物颗粒粒径是一种常被用于区别沉积物搬运方式的沉积学指标. 一般情况下,高能沉积动力环境下沉积的物质颗粒较粗,低能沉积动力环境下沉积的物质颗粒较细<sup>[40]</sup>. 在高分辨率(年际或者十年尺度上)的研究中,当湖面相对稳定时,较为丰沛的降水,使得地表径流增强,入湖水流搬运能力较强,采样点更容易带入较粗的陆源碎屑颗粒物,即细粒沉积物指示降水量较小的干旱期,粗粒沉积物指示降水量较大的湿润期. 但在千年或百年尺度,封闭、半封闭湖泊沉积研究中,沉积物颗粒变化则能指示长时间段湖泊水位波动所反映的气候演变:气候潮湿,湖泊面积扩张,水位上升,采样点水深变深,水动力条件减弱,细颗粒沉积物容易沉积;气候干燥,湖泊收缩,水位下降,采样点水深变浅,水动力条件变强,细颗粒沉积物难以保存,粗颗粒沉积物得以沉积<sup>[41]</sup>,故细颗粒沉积物指示潮湿气候,粗颗粒沉积物指示干燥气候.

磁化率是物质被磁化难易程度的一种度量<sup>[42]</sup>,天然物质的磁化率主要取决于它们的磁铁矿含量<sup>[43]</sup>. 未受成土作用与灼烧活动影响的沉积物,其磁化率可以在一定程度上反映沉积物的物质来源、搬运营力和成土作用等<sup>[44,45]</sup>. 谢红霞等<sup>[43]</sup>在对巢湖西部沉积物环境磁学的研究中发现,由于杭埠河流域砂、砾含量高的粗骨土中富含粗颗粒磁铁矿,总体上砂含量高的沉积物磁铁矿含量较高,磁化率高,而黏土含量高的沉积物磁铁矿含量较低,磁化率低;对 SZK1507 钻孔沉积物中值粒径与磁化率值进行相关性分析,也呈显著正相关( $R=0.294, P<0.01$ ). 气候变干,巢湖水位下降,采样点距离河流入湖口近,沉积物颗粒变粗,磁化率高;气候湿润,巢湖水位上升,采样点距河流入湖口远,沉积物变细,磁化率低<sup>[43,46]</sup>.

TOC 含量是描述沉积物中有机质丰度的最基本参数之一, TN 则能进一步反映沉积物的营养盐含量状况,这两个参数都可以用来判别沉积环境<sup>[42,47]</sup>. 由于巢湖只有 1 条河流与长江相连,属于相对封闭的湖泊,其沉积物有机质的主要来源应为内源有机质(C 含量低)与陆源碎屑(C 含量高)<sup>[48]</sup>. 因此,巢湖湖泊沉积物 TOC 含量的高低可反映其陆源碎屑的沉积量,而陆源碎屑沉积量又受到运移路径、沉积过程和保存能力的影响,从而能够间接反映出气候环境的演变<sup>[42]</sup>. TOC 与 TN 的比值,即 C/N,综合反映沉积物内外源(如湖沼相沉积中的水生植物和陆生植物碎屑)物质来源的相对比例. 一般情况下,湖泊水生植物的蛋白质和脂类含量较高,其 C/N 在 4~10 之间;陆生维管植物和挺水植物由于含有丰富的纤维素和木质素,因此 C/N 一般大于 20<sup>[49]</sup>, C/N 高,陆源碎屑沉积较多,反之陆源碎屑沉积少<sup>[50,51]</sup>.

#### 3.2 全新世以来的气候环境演化过程

根据岩芯平均粒径、磁化率、TN、TOC 与 C/N 的变化曲线,可以将全新世以来巢湖杭埠河流域的古气候环境变化过程分为 4 个阶段:

(1) 阶段 I (深度 738~634 cm, 年代约 10050—9700 cal. a B.P.): 此段沉积物以青灰色淤泥为主, 阶段前期(深度 738~688 cm, 年代 10050—9950 cal. a B.P.) 平均粒径、磁化率值、TN、TOC 与 C/N 波动下降, 且变化幅度较大, 平均值分别为 22.3  $\mu\text{m}$ 、15.12 SI、0.07%、0.48%、7; 后期(约 9950—9700 cal. a B.P.) 变化平稳, 总体较阶段前期低, 平均值分别为 13  $\mu\text{m}$ 、12.6 SI、0.074%、0.42% 和 5.8. 710~704 cm 处(年代约 10030 cal. a B.P. 左右) 数值快速下降, 平均粒径、磁化率值、C/N 降低明显(图 3). 阶段 I 处于早全新世气候湿润期, 气候总体上温和湿润, 巢湖水位上升, 采样点与湖岸距离扩大, 沉积物搬运路径变长, 粒度变细, 磁化率降低, 陆源物质沉积减少, C/N 下降. GISP2 冰芯的  $\delta^{18}\text{O}$  记录在同一时段内逐渐偏正的变化趋势也表明气候变得温和(图 4a)<sup>[52]</sup>. 姜修洋等<sup>[53]</sup>对黔北三星洞石笋氧同位素沉积记录的研究结果证明 10000—9700 cal. a B.P. 时段内, 夏季风逐渐增强. Wu 等<sup>[54]</sup>根据云南星云湖钻孔沉积物中的孢粉记录揭示出的早全新世 6 月气温在此时段也表现出上升趋势.

(2) 阶段 II (632~534 cm, 约 9700—9250 cal. a B.P.): 此段沉积物以青灰色淤泥为主, 深度 586~562 cm 处为一厚度约 24 cm 的砂层. 该阶段沉积物平均粒径、磁化率值较阶段 I 迅速上升; TN 含量、C/N 与阶段 I 大致持平, TOC 含量较阶段 I 高, 各环境代用指标均波动强烈; 平均粒径、磁化率、TN、TOC 和 C/N 平均值依次为 17.8  $\mu\text{m}$ 、11.7 SI、0.061%、0.55% 和 8.83. 本阶段中沉积的一段砂层, 平均粒径迅速增加数十倍, 故此段沉积物平均粒径曲线在图 3 中未表现出来; TN 和 TOC 含量相应出现明显低值(最低值分别为 0.1% 和

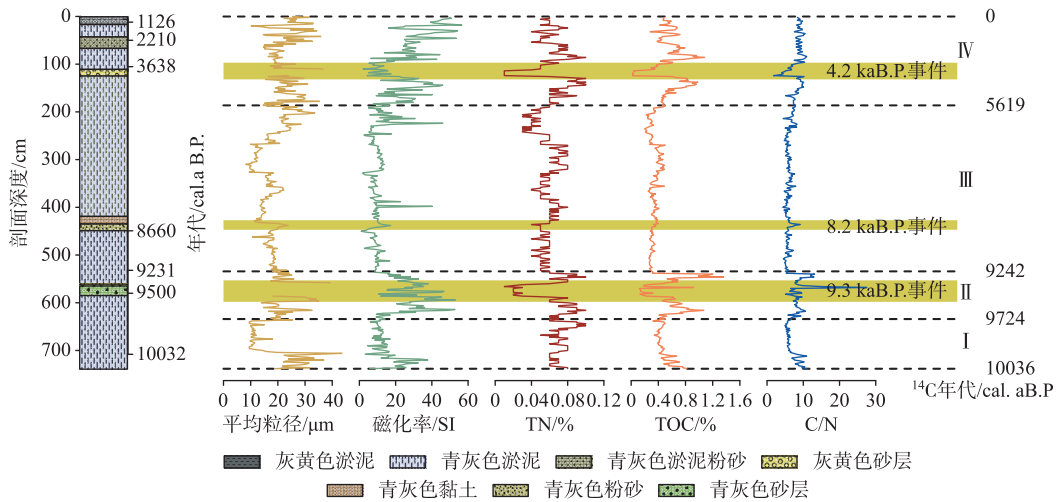


图3 SZK1507 孔沉积物平均粒径、磁化率、TN、TOC、C/N 变化

Fig.3 The mean grain size, magnetisability, TN, TOC and C/N of the core SZK1507

0.13%), C/N 则在同期出现剖面最高值 (约为 27.54), 表明湖泊水位下降, 采样点与湖岸距离缩短, 沉积物质粒度变粗, 磁化率增大, 陆源碎屑大量沉积, 气候迅速转干, 对应于早全新世的 9.3 ka B.P. 干事件. 吴立等<sup>[55-56]</sup>对巢湖沉积物孢粉-炭屑组合记录的研究, 以及晏宏等<sup>[57-58]</sup>对湖北神农架大九湖泥炭沉积记录研究的结果皆表明 9300 cal. a B.P. 前后气候趋向干旱, 董哥洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  变化也记录了这一时段内的弱季风事件<sup>[59]</sup>. 尽管本阶段气候较为干旱, 但从图 2 中可以看出, 阶段 I 和阶段 II (约 10050—9250 cal. a B.P.) 附近沉积速率远高于其余各阶段, 尤其是阶段 I, 沉积速率为其余各阶段的数十倍, 这主要是因为全新世早期, 巢湖流域地壳发生了间歇性的抬升, 从六安南边的中店、清风岭、龙家山, 经肥西县的大潜山, 合肥市的大柏店、将军岭、长岗店、吴山庙向滁州的章广集一线抬升, 形成了江淮分水岭; 这一时段巢湖西岸大别山—江淮分水岭的新构造抬升过程使得杭埠河流域地表物质剥蚀加强, 河流搬运以及入湖沉积的碎屑物质也随之增加, 这可能是上述两个阶段钻孔岩芯沉积速率较大的原因<sup>[60]</sup>.

(3) 阶段 III (532~164 cm, 约 9250—5600 cal. a B.P.): 本阶段沉积物质较为均一, 以青灰色淤泥为主, 仅 448~420 cm 深度处出现厚度分别为 12 cm 和 16 cm 的青灰色粉砂和黏土. 该阶段平均粒径、磁化率值、TN 与 TOC 含量、C/N 总体偏低, 平均值分别为 23.3  $\mu\text{m}$ 、18.4 SI、0.057%、0.34% 和 6.04, 为剖面 4 个阶段中均值最小的一段. 本阶段后期平均粒径、磁化率值与 TN、TOC 含量有所上升; 波动幅度较小, 尤其 TOC 含量和 C/N, 变化范围分别仅为 0.2%~0.51%、4.3~9.1. 此阶段与前一阶段相比, TOC 含量和 C/N 下降, 总体上变化微弱, 表明环境总体变湿, 气候变化较为平稳, 湖泊水位波动不明显, 沉积环境稳定. 普遍认为的全新世以来最强冷事件——8.2 ka B.P. 事件, 在此阶段内有所体现, 沉积物质由淤泥质转变为粉砂质, 但各指标数值变化幅度较小, 未表现出与其他地区古气候变化指标 (如德国南部阿默尔湖沉积物中的氧同位素记录<sup>[61]</sup>、Jura 山 Lautrey 湖湖泊沉积物中孢粉记录<sup>[62]</sup>以及青海湖湖泊沉积记录<sup>[63]</sup>) 对此事件相同的强烈反应, 可能的原因是 8.2 ka B.P. 事件主要表现为中高纬地区的降温, 而 SZK1507 钻孔沉积物磁化率、粒度等为干湿指标, 对温度变化的反应不显著.

(4) 阶段 IV (162 cm 以上, 约 5600 cal. a B.P. 以来): 本阶段沉积物岩性变化最为频繁, 自下而上依次为 42 cm 厚的青灰色淤泥层、18 cm 厚的灰黄色砂层、44 cm 厚的青灰色淤泥粉砂层、24 cm 厚的青灰色淤泥粉砂层、26 cm 厚的青灰色淤泥层以及 16 cm 厚的灰黄色淤泥层, 说明近 5 ka 以来气候不稳定, 变化频次高. 该阶段平均粒径、磁化率值、TN、TOC 含量较前一阶段有显著的增加, 且变化强烈, 平均值依次为 23.3  $\mu\text{m}$ 、23.1 SI、0.063%、0.57%; C/N 则增加微弱, 变化幅度小. 剖面深度 110~120 cm 段磁化率值、TN、TOC 含量和 C/N 出现此阶段最低值, 这是对 4.2 ka B.P. 事件的响应, 气候变干, 湖泊水位下降, 出现砂层, 沉积物平均粒径迅



速上升,因此与上述阶段Ⅱ中 586~562 cm 段砂层原因相同,此段沉积物粒径曲线在图 3 中亦未表现. 4.2 ka B.P.事件时段内,采样点处沉积环境可能已转变为滨湖相或河流三角洲相沉积,且周围河流数量及流量因气候干旱程度较强而减少,陆源沉积物减少,因此沉积速率整体最低;这使得磁化率值、TN、TOC 和 C/N 都快速下降. 4.2 ka B.P.事件是距今 5000 年以来最强的一次气候突变事件,2018 年 7 月 31 日国际地层委员会将全新世划分为 3 个时期,4.2 ka B.P.事件被认定为第 3 个时期—梅加拉亚期 (Meghalayan, 4200 cal. a B.P.) 的起始点<sup>[64-65]</sup>. 与 8.2 ka B.P.事件特征不同的是,其表现为中低纬地区持续 100~200 年的干旱,对人类早期文明的兴衰有着显著影响,导致了当时世界上很多发展起来的农业文明的崩溃和人类的迁徙<sup>[66-67]</sup>. 5000 cal. a B.P.以来本区气候波动较大,冷暖时期交替,但总体上趋于变干;19 世纪末以来的气候变化,受人类活动的干扰逐渐变强<sup>[68]</sup>.

### 3.3 区域对比及气候突变事件的可能机制

通过对比近 10000 cal. a B.P.以来 GISP2 冰芯  $\delta^{18}\text{O}$ <sup>[53]</sup>、董哥洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$ <sup>[60]</sup>、巢湖沉积序列中各科属孢粉百分比含量<sup>[56-57]</sup>、太阳黑子数<sup>[69]</sup>、巢湖 SZK1507 钻孔平均粒径、磁化率等气候代用指标及 30°N 夏季太阳辐射量气候强迫记录<sup>[70]</sup>,发现巢湖杭埠河流域全新世以来的环境变化可能与以下 3 种因素密切相关(图 4).

(1) 北半球夏季太阳辐射量变化. 作为地气系统最主要的能量来源,太阳辐射强度的微小变化都会引起气候的波动. 大量古环境指标数据及气候模拟数据表明<sup>[71-73]</sup>,亚洲夏季风的强弱与北半球夏季太阳辐射量呈正相关关系,主要受地球轨道参数的变化所决定,表现出 19000 年或 21000 年的周期变化. 图 4c 表明,10000 cal. a B.P.以来,北半球夏季太阳辐射量总体呈逐渐下降的趋势,导致夏季风的强度逐渐减弱;并且低、中、高纬之间的夏季太阳辐射量差异趋于减小,这可能会削弱不同纬度之间的大气经向环流,从而导致夏季风的减弱.

(2) 太阳活动. 前人研究表明,太阳活动强弱变化会引起紫外线辐射变化,改变平流层的臭氧浓度与温度,向下传递到对流层,进而影响 Hadley 环流和 Walker 环流,导致亚洲夏季风的变化<sup>[74]</sup>;太阳活动减弱会使得热带海洋地区温度降低、蒸发变弱,水汽输送与潜热释放减少,亚洲夏季风强度改变<sup>[75]</sup>. 太阳活动也会通过海气耦合过程扩大对气候的影响,例如太阳活动变化可能会通过大洋温盐环流放大,然后再通过海洋—大气之间的热传输作用影响亚洲夏季风强弱<sup>[76]</sup>. 太阳黑子数是太阳活动水平最为明显的标志之一,变化具有规律,多被用作指示太阳活动强弱的重要指标<sup>[68]</sup>. 葛非<sup>[77]</sup>通过对 1910—1965 年强东亚夏季风时期太阳黑子相对数与东亚夏季风指数进行相关性拟合,发现两者之间存在高度正相关性. 段长春<sup>[78]</sup>基于对 1948—2005 年太阳 10.7 cm 射电流量,以及再分析位势高度场和风场资料的相关分析、小波分析、合成分析,发现太阳活动峰值年,矢量距平风场上的东亚热带地区(10°~20°N)出现一个气旋性环流,表明东亚夏季风环流加强;而太阳活动谷值年,矢量距平风场上的东亚热带地区出现了一个反气旋性环流,表明东亚夏季风环流减弱. 研究区位于北亚热带季风气候区,气候的变化主要受到东亚夏季风势力强弱的影响. 图 4d 为近 10000 cal. a B.P.太阳黑子数<sup>[69]</sup>,从中也可以明显的看出太阳黑子低爆发年,即太阳活动较弱年,东亚夏季风势力减弱,图 4a、4b 分别是 GISP2 冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录<sup>[52]</sup>和董哥洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$ <sup>[59]</sup>,也记录了对应的弱季风事件,巢湖杭埠河流域受到的来自海洋暖湿气流的影响变小,因此大都发生冷气候事件,降水减少,在 SZK1507 钻孔沉积物中则表现为 C/N 值、平均粒径、磁化率对应极值,出现砂层沉积,最为显著的 3 段分别是 44~66 cm(约 2038—2782 cal. a B.P.)、108~124 cm(4164—4852 cal. a B.P.)以及 562~586 cm(9300—9524 cal. a B.P.)段,大致对应 2.8、4.2 和 9.3 ka B.P.事件;而太阳黑子高爆发年气候相对温暖,东亚夏季风势力加强,研究区降水增多,沉积物 C/N 值、平均粒径和磁化率值则相对偏低. 但是,太阳活动与地表气候的关系并不仅仅是简单的直接影响关系,其间还存在某些未知作用机制,尚需进一步探讨<sup>[79]</sup>.

(3) 火山活动. 火山活动对气候产生的影响主要是通过释放大量的火山灰和火山气体<sup>[80]</sup>. 强火山喷发产生的火山灰和气溶胶扩散至平流层后会强烈的散射和反射太阳辐射,使得入射的太阳辐射减少,进而导致地表温度降低,同时又会吸收部分太阳辐射和地面长波辐射,使平流层温度上升,产生阳伞效应;高温的火山灰及温室气体快速沉降后会使得对流层温度升高,强烈的辐射也能引起火山附近的温度增加<sup>[81]</sup>. 除影响气温外,火山活动还会改变大气环流,进而影响降水. 一方面,火山活动导致的降温幅度表现为陆地强于海洋,高纬度大于低纬度<sup>[82]</sup>,这在一定程度上会减弱东亚夏季风的强度;另一方面,火山喷发产生的气溶胶引

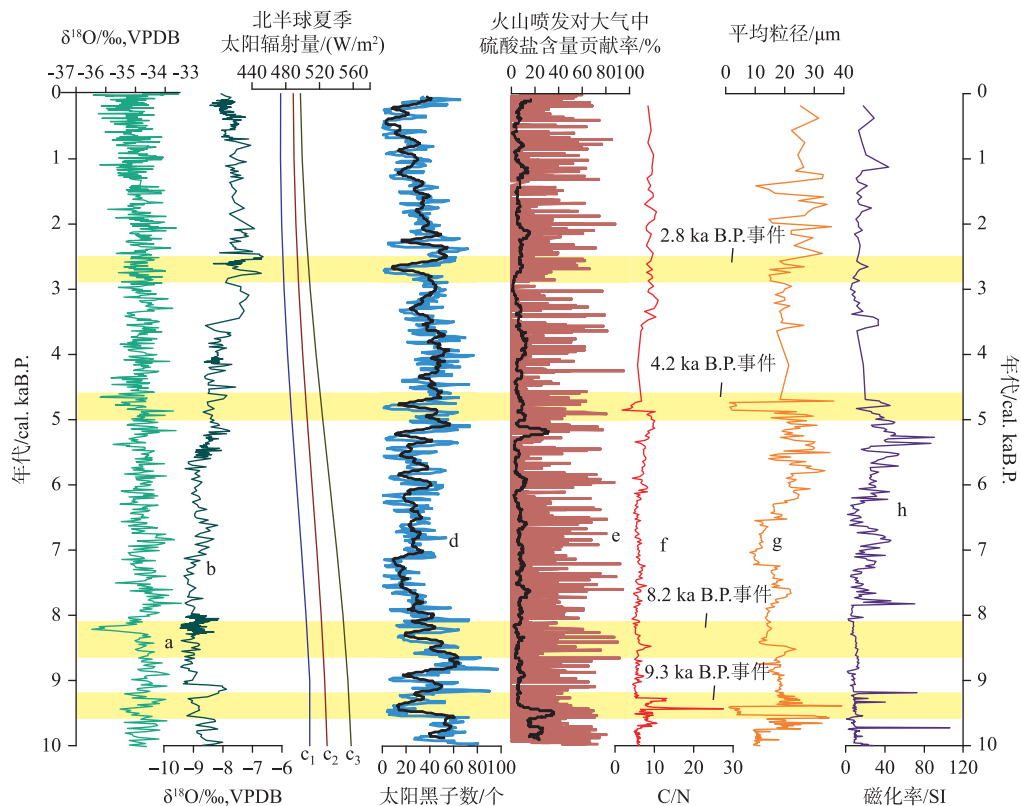


图4 巢湖 SZK1507 孔沉积记录与其他高分辨率气候记录对比((a) GISP2 冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录<sup>[52]</sup>;

(b) 董哥洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$ <sup>[59]</sup>; (c) 北半球夏季太阳辐射量<sup>[71]</sup>( $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  分别表示

90°N、60°N、30°N 夏季太阳辐射量); (d) 太阳黑子数<sup>[69]</sup>; (e) 火山喷发对大气中硫酸盐含量贡献率<sup>[86-92]</sup>; (f) SZK1507 钻孔 C/N; (g) SZK1507 钻孔平均粒径; (h) SZK1507 钻孔磁化率值)

Fig.4 Contrast of sedimentary records of the SZK1507 core and other high-resolution climatic records ((a) GISP2  $\delta^{18}\text{O}$ <sup>[52]</sup>; (b) Stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  record from Dongge cave<sup>[59]</sup>; (c) Northern hemisphere summer solar insolation<sup>[71]</sup> ( $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  indicate 90°N, 60°N, 30°N summer solar insolation separately);

(d) Sunspot numbers<sup>[69]</sup>; (e) Sulfate content in the atmosphere came from volcanic eruption<sup>[86-92]</sup>;

(f) C/N of the core SZK1507; (g) Mean grain size of the core SZK1507; (h) Magnetisability of the core SZK1507)

发的南北半球温度差会导致热带辐合带 (ITCZ) 南移, 进而对东亚夏季风降水产生影响<sup>[83]</sup>. Kobashi 等模拟发现<sup>[84]</sup>, 一次大规模的火山爆发能引起海洋持续大约 16 年的低温; 而在高北纬地区, 火山喷发引起的低温会导致海冰扩张, 从而使得低温持续上百年. 全新世以来有 5 个火山爆发集中期, 分别是全新世早期 (10250—9750 cal. a B.P.)、7000 cal. a B.P. 前后、全新世中期 (5000 cal. a B.P. 前后)、4250—3750 cal. a B.P. 期间以及 3250—1750 cal. a B.P. 时段; 这 5 个火山爆发集中期都对应几次大规模气候变冷事件, 如 9.4、7.5、5.5、4.2 以及 2.8 ka B.P. 事件<sup>[85]</sup>; 图 4e 为火山喷发对大气中硫酸盐含量的贡献率<sup>[86-92]</sup>, 贡献率越高表明火山喷发越频繁; 对其进行滑动平均后发现有两个显著高峰期, 分别对应于 9.3 ka B.P. 事件和 4.2 ka B.P. 事件, 如前文所述, 火山活动使得陆地降温幅度高于海洋, 高纬度强于低纬度, 东亚夏季风势力减弱<sup>[82]</sup>; 同时, ITCZ 南移, 也会导致研究区季风降水量的减少<sup>[83]</sup>, SZK1507 钻孔从而对应沉积两段显著砂层, 沉积物平均粒度迅速增加数十倍; 磁化率值、TN、TOC 和 C/N 值也出现显著变化, 并且变化幅度较大; 其余较低峰值出现的时间段也可能对应 7.5 ka B.P. 和 2.8 ka B.P. 等事件<sup>[79, 93]</sup>, 钻孔同样沉积了砂或粉砂层. 可以看出火山活动高频时段与气候冷干事件有着良好的对应关系.



## 4 结论

1)全新世以来巢湖杭埠河流域的环境变化过程主要表现为:10050—9700 cal. a B.P.,气候湿润;9700—9250 cal. a B.P.,气候变干;9250—5300 cal. a B.P.,气候再次转湿,且环境波动较小;5300 cal. a B.P.以来,气候波动强烈,干湿交替,但总体上环境趋于变干。

2)巢湖 SZK1507 钻孔沉积物的磁化率值、平均粒径、TN、TOC、C/N 5 个高分辨率环境代用指标较为显著的记录了 9.3、8.2 和 4.2 ka B.P.等气候突变事件,其中尤以 9.3 和 4.2 ka B.P.事件最为明显,而对较为典型的 8.2 ka B.P.事件的反应则相对较弱。

3)影响巢湖杭埠河流域全新世以来气候突变事件的可能机制主要为北半球夏季太阳辐射量变化、太阳活动以及火山活动。其中,北半球夏季太阳辐射量变化对气候变化的影响较为直接;而太阳活动和火山活动对气候变化的影响则是间接的,主要是通过改变大气层的大气环流模式或物质组成以及海—气耦合过程,从而引起区域气候变化。

## 5 参考文献

- [ 1 ] Xing W, Bao KS, Han DX *et al.* Holocene wetland developing history and its response to climate change in northeast China. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1391-1402. DOI: 10.18307/2019.0516. [ 邢伟, 鲍昆山, 韩冬雪等. 全新世以来东北地区沼泽湿地发育过程及其对气候变化的响应. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1391-1402. ]
- [ 2 ] Leng SY *et al.* eds. The geographical sciences during 1986–2015: From the classics to the frontiers. Beijing: The Commercial Press, 2016. [ 冷疏影等. 地理科学三十年: 从经典到前沿. 北京: 商务印书馆, 2016. ]
- [ 3 ] Chen FH, Chen JH, Huang W *et al.* Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales. *Earth-Science Reviews*, 2019, **192**: 337-354. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.03.005.
- [ 4 ] Capron E, Roche DM, Vallelonga P *et al.* Glacial terminations and interglacials. *PAGES Magazine*, 2015, **23**(1): 1-40.
- [ 5 ] Finkenbinder MS, Abbott MB, Finney BP *et al.* A multi-proxy reconstruction of environmental change spanning the last 37,000 years from Burial Lake, Arctic Alaska. *Quaternary Science Reviews*, 2015, **126**: 227-241. DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.08.031.
- [ 6 ] Timmermann A, Friedrich T. Late Pleistocene climate drivers of early human migration. *Nature*, 2016, **538**: 92-95. DOI: 10.1038/nature19365.
- [ 7 ] Cotton JM, Cerling TE, Hoppe KA *et al.* Climate, CO<sub>2</sub>, and the history of North American grasses since the Last Glacial Maximum. *Science Advances*, 2016, **2**(3): e1501346. DOI: 10.1126/sciadv.1501346.
- [ 8 ] Roberts N ed. The Holocene: An environmental history (Third Edition). Chichester: Wiley Blackwell, 2014.
- [ 9 ] Lowe J, Walker M eds. Reconstructing quaternary environments (3rd Edition). London: Routledge, 2006.
- [ 10 ] Zhou X, Sun LG, Chu YX *et al.* Catastrophic drought in East Asian monsoon region during Heinrich event 1. *Quaternary Science Reviews*, 2016, **141**: 1-8. DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.03.029.
- [ 11 ] Holmes JA, Tindall J, Roberts N *et al.* Lake isotope records of the 8200-year cooling event in western Ireland: Comparison with model simulations. *Quaternary Science Reviews*, 2016, **131**: 341-349. DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.06.027.
- [ 12 ] Liu JL, Liu Q, Wu J *et al.* N-alkanes distributions and compound-specific carbon isotope records and their paleoenvironmental significance of sediments from Lake Sifangshan in the Great Khingan Mountain, Northeastern China. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 498-511. DOI: 10.18307/2017.0226. [ 刘嘉丽, 刘强, 伍婧等. 大兴安岭四方山天池全新世以来沉积物正构烷烃分布、单体碳同位素特征及古环境意义. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 498-511. ]
- [ 13 ] Zhu C, Li L, Liu WQ *et al.* eds. An introduction to environmental archaeology. Beijing: Science Press, 2013. [ 朱诚, 李兰, 刘万青等. 环境考古概论. 北京: 科学出版社, 2013. ]
- [ 14 ] Zhang LS, Fang XQ, Ren GY eds. Global change(second edition). Beijing: Higher Education Press, 2017. [ 张兰生, 方修琦, 任国玉. 全球变化(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2017. ]
- [ 15 ] Chen JH, Rao ZG, Liu JB *et al.* On the timing of the East Asian summer monsoon maximum during the Holocene-Does the speleothem oxygen isotope record reflect monsoon rainfall variability? *Science in China: Earth Science*, 2016, **59**: 2328-2338. [ 陈建徽, 饶志国, 刘建宝等. 全新世东亚夏季风最强盛期出现在何时? ——兼论中国南方石笋氧同位素的

- 古气候意义. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(11): 1494-1504.]
- [16] Song YQ, Luo Y, Li SC *et al.* Holocene environmental change and climatic periodicities recorded from the lacustrine sediments in the Sanqing Chi section, Taibai Mountain. *J Lake Sci*, 2016, 28(4): 899-908. DOI: 10.18307/2016.0424. [宋雅琼, 罗耀, 李双成等. 太白山三清池湖泊沉积记录的全新世气候变化及周期讨论. 湖泊科学, 2016, 28(4): 899-908.]
- [17] Liu JB, Rühland KM, Chen JH *et al.* Aerosol-weakened summer monsoons decrease lake fertilization on the Chinese Loess Plateau. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 190-194. DOI: 10.1038/NCLIMATE3220.
- [18] Zhang JW, Ma XY, Qiang MR *et al.* Developing inorganic carbon-based radiocarbon chronologies for Holocene lake sediments in arid NW China. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 144: 66-82. DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.05.034.
- [19] Liang LE. Environment and climate evolution recorded in sediments of Hulun Lake since middle-late Holocene [Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017. [梁丽娥. 中晚全新世以来呼伦湖沉积记录的环境与气候演变[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.]
- [20] Zhang ZK, Sheng J, Yang XD *et al.* Climate change and Indian monsoon variation recorded by the lacustrine sediments from Erhai Lake, Yunnan Province during the past 8 ka. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2008, 3(3): 1-6. [张振克, 沈吉, 羊向东等. 近 8 ka 来云南洱海湖泊沉积记录的气候变化与夏季印度季风强弱变化的关系. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(3): 1-6.]
- [21] Wang SW ed. The Holocene climate change. Beijing: China Meteorological Press, 2011. [王绍武. 全新世气候变化. 北京: 气象出版社, 2011.]
- [22] Yu G, Liu J, Xue B eds. Dynamical palaeoclimate. Beijing: Higher Education Press, 2007. [于革, 刘健, 薛滨. 古气候动力模拟. 北京: 高等教育出版社, 2007.]
- [23] Wu XD, Liu GX, Shen J. Grain size variation and its environmental significance from Huguangyan Maar Lake, Zhanjiang since the Holocene. *J Lake Sci*, 2016, 28(5): 1115-1122. DOI: 10.18307/2016.0522. [吴旭东, 刘国旭, 沈吉. 湛江湖光岩玛珥湖全新世粒度变化特征及古气候意义. 湖泊科学, 2016, 28(5): 1115-1122.]
- [24] An CB, Tao SC, Zhao JJ *et al.* Late Quaternary (30.7—9.0 cal ka BP) vegetation history in Central Asia inferred from pollen records of Lake Balikun, northwest China. *Journal of Paleolimnology*, 2013, 49(2): 145-154. DOI: 10.1007/s10933-012-9649-7.
- [25] Wu YL, Wang YB, Liu XQ *et al.* Holocene climate evolution in the monsoonal margin region revealed by the pollen record from Jilantai Playa. *J Lake Sci*, 2018, 30(4): 1161-1176. DOI: 10.18307/2018.0427. [吴雅玲, 王永波, 刘兴起等. 吉兰泰盐湖沉积物孢粉记录的季风边缘区全新世气候演化. 湖泊科学, 2018, 30(4): 1161-1176.]
- [26] Rao ZG, Qiang MR, Jia GD *et al.* A 15 ka lake water  $\delta D$  record from Genggahai Lake, northeastern Tibetan Plateau, and its paleoclimatic significance. *Organic Geochemistry*, 2016, 97: 5-16. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2016.03.007.
- [27] Jin ZD, An ZS, Yu JM *et al.* Lake Qinghai sediment geochemistry linked to hydroclimate variability since the last glacial. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 122: 63-73. DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.05.015.
- [28] Qiang MR, Song L, Chen FH *et al.* A 16-ka lake-level record inferred from macrofossils in a sediment core from Genggahai Lake, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau (China). *Journal of Paleolimnology*, 2013, 49: 575-590. DOI: 10.1007/s10933-012-9660-z.
- [29] The China Society on Tibet Plateau ed. Report on advances in Tibetan Plateau research. Beijing: Science and Technology of China Press, 2014. [中国青藏高原研究会. 青藏高原研究学科发展报告. 北京: 中国科学技术出版社, 2014.]
- [30] Wang YJ, Cheng H, Edwards RL *et al.* A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 2001, 294: 2345-2348. DOI: 10.1126/science.1064618.
- [31] Zhou WJ, Xie SC, Meyers PA *et al.* Reconstruction of late glacial and Holocene climate evolution in southern China from geolipids and pollen in the Dingnan peat sequence. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(9): 1272-1284. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2005.04.005.
- [32] Zhang WC, Yan H, Cheng P *et al.* Peatland development and climate changes in the Dajiuhe basin, central China, over the last 14,100 years. *Quaternary International*, 2016, 425: 273-281. DOI: 10.1016/j.quaint.2016.06.039.
- [33] Han ZY, Li XS, Yi SW *et al.* Extreme monsoon aridity episodes recorded in South China during Heinrich Events. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2015, 440: 467-474. DOI: 10.1016/j.palaeo.2015.09.037.
- [34] Xie P ed. The history of Lake Chaohu—eutrophication and geological evolution of cyanobacteria. Beijing: Science Press,

2009. [谢平. 翻阅巢湖的历史——蓝藻、富营养化及地质演化. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [35] Xia LY, Wang XY, Zhang GS. Research on soil erosion and prevention and controlling measures for fengle river valley in west of Anhui. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, **13**(3): 162-164. [夏林益, 王心源, 张广胜. 皖西丰乐河流域水土流失及防治对策. 水土保持研究, 2006, **13**(3): 162-164.]
- [36] Tu QY, Gu DX eds. Study on eutrophication of Chaohu. Beijing: Science and Technology of China Press, 1990. [屠清瑛, 顾丁锡. 巢湖——富营养化研究. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1990.]
- [37] Wu YD. Formation and evolution of Chaohu. *Shanghai Geology*, 2010, **31**: 152-156. [吴跃东. 巢湖的形成与演变. 上海地质, 2010, **31**: 152-156.]
- [38] Wu L, Wang XY, Zhou KS *et al.* The transmutation of ancient settlements and environmental changes from the Neolithic Age to the Han Dynasty in the Lake Chaohu Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(1): 59-68. [吴立, 王心源, 周昆叔等. 巢湖流域新石器至汉代古聚落变更与环境变迁. 地理学报, 2009, **64**(1): 59-68.]
- [39] Sun WW, Shen J, Zhang EL *et al.* Characteristics of organic stable carbon isotope and C/N ratio of sediments in Lake Onuma, Japan and their environmental implications for the last 400 Years. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1306-1313. [孙伟伟, 沈吉, 张恩楼等. 日本大沼湖沉积物碳氮比值、有机碳同位素特征及其近 400 年的古气候环境意义. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1306-1313.]
- [40] Hu F, Yang YZ, Zhang JZ *et al.* Sedimentary environmental evolution during last deglaciation and early holocene in Chaohu region. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, **35**(1): 153-162. [胡飞, 杨玉璋, 张居中等. 巢湖地区末次冰消期——早全新世沉积环境演化. 海洋地质与第四纪地质, 2015, **35**(1): 153-162.]
- [41] Xie YY, Li CA, Wang QL *et al.* Grain-size characteristics and their environmental significance of Jiangling Lake sediments in Jiangnan Plain. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007, **37**(3): 570-577. [谢远云, 李长安, 王秋良等. 江汉平原江陵湖沉积物粒度特征及气候环境意义. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, **37**(3): 570-577.]
- [42] Shen J, Xue B, Wu JL *et al.* eds. Lake sedimentation and environmental evolution. Beijing: Science Press, 2010. [沈吉, 薛滨, 吴敬禄等. 湖泊沉积与环境演化. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [43] Xie HX, Zhang WG, Gu CJ *et al.* Magnetic properties of sediments from Lake Chaohu and its response to sedimentary dynamics. *J Lake Sci*, 2006, **18**(1): 43-48. DOI: 10.18307/2006.0106. [谢红霞, 张卫国, 顾成军等. 巢湖沉积物磁性特征及其对沉积动力的响应. 湖泊科学, 2006, **18**(1): 43-48.]
- [44] Thompson R, Oldfield F eds. Environmental magnetism. London: Allen & Unwin Ltd, 1986.
- [45] Wu L. Environmental archaeology of the mid-holocene palaeofloods in the Jiangnan Plain, central China [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University, 2013. [吴立. 江汉平原全新世古洪水事件环境考古研究 [学位论文]. 南京: 南京大学, 2013.]
- [46] Wang J, Liu ZC, Jiang WY *et al.* A relationship between susceptibility and grain-size and minerals, and their paleo-environmental implications. *Acta Geographica Sinica*, 1996, **51**(2): 155-163. [王建, 刘泽纯, 姜文英等. 磁化率与粒度、矿物的关系及其古环境意义. 地理学报, 1996, **51**(2): 155-163.]
- [47] Qin BQ, Xu H, Dong BL eds. The principle and practice of eutrophic lake restoration and management. Beijing: Higher Education Press, 2011. [秦伯强, 许海, 董百丽. 富营养化湖泊治理的理论与实践. 北京: 高等教育出版社, 2011.]
- [48] Wu L, Zhang MC, Ji C *et al.* Charcoal recorded fire environment change during the holocene from the sediment of the Lake Chaohu, East China. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, **36**(12): 1920-1928. [吴立, 张梦翠, 计超等. 全新世巢湖沉积物碳屑记录的火环境变化. 地理科学, 2016, **36**(12): 1920-1928.]
- [49] Meyers PA. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. *Organic Geochemistry*, 1997, **27**(5/6): 213-250. DOI: 10.1016/S0146-6380(97)00049-1.
- [50] Shen J, Liu XQ, Matsumoto R *et al.* A high-resolution climatic change since the Late Glacial Age inferred from multi-proxy of sediments in Qinghai Lake. *Science in China; Series D: Earth Sciences*, 2005, **48**(6): 742-751. [沈吉, 刘兴起, Matsumoto R 等. 晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2004, **34**(6): 582-589.]
- [51] Wu L. The transmutation of ancient settlements and environmental changes from the Neolithic Age to the Han Dynasty in the Lake Chaohu Basin [Dissertation]. Wuhu: Anhui Normal University, 2010. [吴立. 巢湖流域新石器至汉代古聚落变更与环境变迁 [学位论文]. 芜湖: 安徽师范大学, 2010.]
- [52] Stuiver M, Braziunas TF, Grootes PM *et al.* Is there evidence for solar forcing of climate in the GISP2 oxygen isotope re-

- cord? *Quaternary Research*, 1997, **48**(3): 259-266. DOI: 10.1006/qres.1997.1931.
- [53] Jiang XY, Yang B, Wang XY *et al.* The centennial to decadal scale variation of summer monsoon precipitation in Northern Guizhou Province during the Last Deglacial. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, **35**(6): 773-781. [姜修洋, 杨邦, 王晓艳等. 黔北洞穴石笋记录的末次冰消期至早全新世百年~十年际气候变化. 地理科学, 2015, **35**(6): 773-781.]
- [54] Wu D, Chen X, Lv F *et al.* Decoupled early Holocene summer temperature and monsoon precipitation in southwest China. *Quaternary Science Reviews*, 2018, **193**: 54-67. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.05.038.
- [55] Wu L, Wang XY, Zhang GS *et al.* Vegetation evolution and climate changes since the Holocene recorded by pollen-charcoal assemblages from lacustrine sediments of Lake Chaohu in Anhui Province. *Journal of Palaeogeography*, 2008, **10**(2): 183-192. [吴立, 王心源, 张广胜等. 安徽巢湖湖泊沉积物孢粉-碳屑组合记录的全新世以来植被与气候演变. 古地理学报, 2008, **10**(2): 183-192.]
- [56] Wu L, Wang XY, Zhou KS *et al.* Transmutation of ancient settlements and environmental changes between 6000-2000 aBP in the Lake Chaohu Basin, East China. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, **20**(5): 687-700. DOI: 10.1007/s11442-010-0804-7.
- [57] Zhang WC, Yan H, Dodson J *et al.* The 9.2 ka event in Asian summer monsoon area; the strongest millennial scale collapse of the monsoon during the Holocene. *Climate Dynamics*, 2017, **50**: 2767-2782. DOI: 10.1007/s00382-017-3770-2.
- [58] Zhang WC, Yan H, Cheng P *et al.* Peatland development and climate changes in the Dajiuhu basin, central China, over the last 14,100 years. *Quaternary International*, 2016, **425**: 273-281. DOI: 10.1016/j.quaint.2016.06.039.
- [59] Wang Y, Cheng H, Edwards RL *et al.* The Holocene Asian monsoon; Link to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 2005, **308**(5723): 854-857. DOI: 10.1126/science.1106296.
- [60] Wang XY, Wu L eds. Geological investigation and regional geological tourism in the north mountain of Lake Chaohu (Second Edition). Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2018. [王心源, 吴立. 巢湖北山地质考察与区域地质旅游教程(第二版). 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2018.]
- [61] Von Grafenstein U, Erlenkeuser H, Muller J *et al.* The cold event 8200 years ago documented in oxygen isotope records of precipitation in Europe and Greenland. *Climate Dynamics*, 1998, **14**(2): 73-81. DOI: 10.1007/s003820050210.
- [62] Christophe C, Michel M, Hervé B *et al.* Changes in ecosystems, climate and societies in the Jura Mountains between 40 and 8 ka cal BP. *Quaternary International*, 2015, **378**: 40-72. DOI: 10.1016/j.quaint.2014.05.032.
- [63] An Z, Colman SM, Zhou W *et al.* Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka. *Scientific Reports*, 2012, **2**: 1-7. DOI: 10.1038/srep00619.
- [64] Berkelhammer M, Sinha A, Stott L *et al.* An abrupt shift in the Indian monsoon 4000 years ago. *Geophysical Monograph Series*, 2012, **198**(7). DOI: 10.1029/2012GM001207.
- [65] Walker MJC, Gibbard PL, Berkelhammer M *et al.* Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch. *Journal of Quaternary Science*, 2012, **27**(7): 649-659. DOI: 10.1007/s12594-019-1141-9.
- [66] Hadeer S, Zhao XS, Alaa S *et al.* Early-middle Holocene climatic and environmental changes in the Nile delta and implications for early agriculture. *J Lake Sci*, 2018, **30**(3): 857-864. DOI: 10.18307/2018.0327. [Hadeer S, 赵小双, Alaa S 等. 尼罗河三角洲早—中全新世气候—环境变化对早期农业发展的影响. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 857-864.]
- [67] Wu L, Zhu C, Ma CM *et al.* Mid-Holocene palaeoflood events recorded at the Zhongqiao Neolithic cultural site in the Jiangnan Plain, middle Yangtze River Valley, China. *Quaternary Science Reviews*, 2017, **173**: 145-160. DOI: 10.1016/j.quascirev.2017.08.018.
- [68] Ge QS *et al.* eds. The climate change in China during the past dynasties. Beijing: Science Press, 2011. [葛全胜等. 中国历朝气候变化. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [69] Solanki SK, Usoskin IG, Kromer B *et al.* Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, 2004, **431**: 1084-1087. DOI: 10.1038/nature02995.
- [70] Berger A, Loutre MF. Insolation values for the climate of the last 10 million of years. *Quaternary Science Reviews*, 1991, **10**(4): 297-317. DOI: 10.1016/0277-3791(91)90033-Q.
- [71] Zhang XJ, Jin LY. Meridional migration of the South Asian High and its association with Asian summer monsoon precipitation during the Holocene. *Quaternary Sciences*, 2018, **38**(5): 1244-1254. [张肖剑, 靳立亚. 全新世南亚高压南北移动及其与亚洲夏季风降水的关系. 第四纪研究, 2018, **38**(5): 1244-1254.]
- [72] Marcott SA, Shakun JD, Clark PU *et al.* A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, 2013, **339**(6124): 1198-1201. DOI: 10.1126/science.1228026.

- [73] Zhang ZP, Huang W, Chen JH *et al.* Multi-time scale analysis of east asian summer monsoon and its possible mechanism during holocene. *Quaternary Sciences*, 2017, **37**(3): 498-509. [张志平, 黄伟, 陈建徽等. 全新世东亚夏季风演化的多尺度周期变化及其可能机制探讨. 第四纪研究, 2017, **37**(3): 498-509.]
- [74] Gary LJ, Beer J, Geller M *et al.* Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics*, 2010, **48**: RG4001. DOI: 10.1029/2009RG000282.
- [75] Meehl GA, Arblaster JM, Matthes K *et al.* Amplifying the Pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing. *Science*, 2009, **325**(5944): 1114-1118. DOI: 10.1126/science.1172872.
- [76] Liu YH, Henderson GM, Hu CY *et al.* Links between the East Asian monsoon and North Atlantic climate during the 8200 year event. *Nature Geoscience*, 2013, **6**: 117-120. DOI: 10.1038/ngeo1708.
- [77] Ge F. Weather-climate characteristics of East Asian Summer Monsoon interdecadal variations and its correlation with solar activity[Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2013. [葛非. 东亚夏季风年代际变化的天气气候特征及其与太阳活动的相关性[学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.]
- [78] Duan CC. Impacts of solar activities on abnormality of general circulation and Yunnan rainfall in Summer. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2008, **28**(3): 37-43. [段长春. 太阳活动对夏季大气环流异常及云南降水的影响. 高原山地气象研究, 2008, **28**(3): 37-43.]
- [79] Wu WX, Hou M, Zheng HB *et al.* Environmental expressions of 7.5~7.0 cal. ka B.P. climate event in China and its dynamic mechanisms. *Quaternary Sciences*, 2019, **39**(2): 267-281. [吴文祥, 侯梅, 郑洪波等. 7.5~7.0 cal. ka B.P. 气候事件在中国地区的表现及其动力机制. 第四纪研究, 2019, **39**(2): 267-281.]
- [80] Li CJ, Ren JW, Qin DH *et al.* Summary of research on climate influences from volcanic activities and depositional records of volcanic matters in ice cores. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(4): 863-876. [李传金, 任贾文, 秦大河等. 火山活动的气候影响及其冰芯记录研究进展. 冰川冻土, 2012, **34**(4): 863-876.]
- [81] Li J, Zhang DE. Impact of volcanic eruptions on climate. *Meteorological Science and Technology*, 2005, **33**(3): 193-198. [李靖, 张德二. 火山活动对气候的影响. 气象科技, 2005, **33**(3): 193-198.]
- [82] Man W, Zhou T, Jungclauss JH. Effects of large volcanic eruptions on global summer climate and East Asian monsoon changes during the last millennium; Analysis of MpPI-ESM simulations. *Journal of Climate*, 2014, **27**(19): 7394-7409.
- [83] Ridley HE, Asmerom Y, Baldwin JUL *et al.* Aerosol forcing of the position of the intertropical convergence zone since AD 1550. *Nature Geoscience*, 2015, **8**: 195-200. DOI: 10.1038/ngeo2353.
- [84] Kobashi T, Menviel L, Jeltsch-Thömmes A *et al.* Volcanic influence on centennial to millennial Holocene Greenland temperature change. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 1441. DOI: 10.1038/s41598-018-21307-y.
- [85] Yu G, Liu J. Geological records of volcanic explosions during the last 12000 years and the volcanic impacts on climate changes. *J Lake Sci*, 2003, **15**(1): 11-20. DOI: 10.18307/2003.0102. [于革, 刘健. 全球 12000 a BP 以来火山爆发记录及其对气候变化影响的评估. 湖泊科学, 2003, **15**(1): 11-20.]
- [86] Yalcin K, Wake CP, Kreutz KJ *et al.* Ice core paleovolcanic records from the St. Elias Mountains, Yukon, Canada. *J Geophys Res*, 2007, **112**, D08102. DOI: 10.1029/2006JD007497, 2007.
- [87] Yalcin K, Wake CP, Kreutz KJ *et al.* Ice core evidence for a second volcanic eruption around 1809 in the Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**, L14706. DOI: 10.1029/2006GL026013.
- [88] Yalcin K, Wake CP, Kang S *et al.* Seasonal and spatial variability in snow chemistry at Eclipse Icefield, Yukon Territory, Canada. *Annals of Glaciology*, 2006, **43**: 230-238. DOI: 10.3189/172756406781811998.
- [89] Yalcin K, Wake CP, Kreutz KJ *et al.* A 1000-yr record of forest fire activity from Eclipse Icefield, Yukon, Canada. *The Holocene*, 2006, **16**: 200-209. DOI: 10.1191/0959683606h1920rp.
- [90] Yalcin K, Wake CP, Germani MS. A 100-year record of North Pacific volcanism in an ice core from Eclipse Icefield, Yukon Territory, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D1). DOI: 10.1029/2002JD002449.
- [91] Wake CP, Yalcin K, Gundestrup N. The climate signal recorded in the oxygen isotope, accumulation, and major ion time-series from the Eclipse Ice Core, Yukon Territory, Canada. *Annals of Glaciology*, 2002, **35**: 416-422. DOI: 10.3189/172756402781817266.
- [92] Yalcin K, Wake CP. Anthropogenic signals recorded in an ice core from Eclipse Icefield, Yukon Territory Canada. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(23): 4487-4490. DOI: 10.1029/2001GL013037.
- [93] Bond G, Showers W, Cheseby M *et al.* A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, **278**(14): 1257-1266.