

文章编号: 1000-0550(2012)06-1099-07

# 太湖沉积对流域极端降水和洪水响应的研究<sup>①</sup>

李永飞<sup>1,2</sup> 于革<sup>1</sup> 沈华东<sup>1,2</sup> 胡守云<sup>1</sup> 姚书春<sup>1</sup> 尹刚<sup>1,2</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 认识极端洪水特征和周期,急需建立长期洪水记录和序列。过去150 a来长江下游极端降水引发了多次太湖特大洪水,太湖湖泊沉积提供了长于观测资料的洪水记录。本文利用太湖中心开阔水域的近现代沉积,采用<sup>210</sup>Pb和<sup>137</sup>Cs测年法和粒度、磁学特征分析,与区域夏季降水和长江下游洪峰流量进行相关分析,恢复了太湖流域150 a来的历史洪水事件。根据长江下游极端夏季降水( $P_{jia} \geq 90\%$ 百分位)和极端径流( $Q \geq 90\%$ 百分位)以及历史文献记载,太湖流域自1840年以来约有24次特大洪水年,而湖泊沉积物砂级粒径与低频磁化率等特征能捕获与之对应的中洪水事件15次。这表明湖泊沉积记录能较好地反演过去洪水变化,为利用沉积记录认识百年极端洪水长周期变化和特征提供了沉积学、磁学等方面的科学依据。

**关键词** 太湖 湖泊沉积 粒度 磁化率 洪水指标

**第一作者简介** 李永飞 男 1976年出生 博士研究生 湖泊沉积与环境演 E-mail: lyfei\_123@163.com

**通讯作者** 于革 E-mail: geyu@niglas.ac.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 0 引言

随着大气层中温室气体含量的增高,极端气候发生增多,世界许多地方出现了一些不寻常或极为罕见的暴雨强降水事件<sup>[1,2]</sup>。长江中下游地区表现为1990s升温约0.2~0.8℃,降水增加5%~20%,导致全流域洪水灾害高发<sup>[3]</sup>。太湖平原地处长江下游段南侧,地势低平,绝大部分地区处在该地区高洪水位以下<sup>[4]</sup>。近30 a来太湖平原抵御“十年一遇”、“百年一遇”洪水损害的能力进一步削弱。所以,认识该地区极端洪水特征及其周期性演化,具有重要理论和现实意义。

国外许多学者利用河流平流沉积<sup>[5,6]</sup>、树轮<sup>[7]</sup>和湖泊沉积分析区域古洪水事件<sup>[8,9]</sup>取得了许多重要研究成果。一些学者利用河流阶地研究晚更新世晚期长江上游不同时间跨度不同类型古洪水的精度有较大差别<sup>[10]</sup>和黄河上游全新世官亭盆地磁化率显示14次大洪水的发生<sup>[11]</sup>,利用考古遗址研究长江三峡库区中坝自然沉积层为多期洪水泛滥形成的<sup>[12-16]</sup>。利用黄河中游三门峡与小浪底河段1843年和1994年两次洪水平流沉积,延长特大洪水记录和序列至中全新世<sup>[17]</sup>。在长江流域,研究沉积记录并能够与长

江干流1850—1954年期间的若干次特大洪水事件历史文献和水文监测资料吻合<sup>[18]</sup>。长江中下游两岸的自然堤后湖,不仅有其水系的洪水侵入,还常有长江洪水的水沙倒灌,而且倒灌入湖的泥沙还有其自身的颗粒特征。长江中游网湖1870年以来沉积粒度、花粉特征和洪水关系的研究<sup>[19]</sup>,表明湖泊沉积能够判识20世纪6次长江特大洪水淹没湖泊及临近县城洪灾事件。这些研究都为采用湖泊沉积地质、磁学特征重建历史特大洪水,能够对比现代洪水观测记录,弥补历史文献记载的不足和延长现代观测序列,提供了研究途径和科学依据。

太湖(图1)(30°55'40"~31°32'58"N, 119°52'32"~132°36'10"E)湖泊面积2 428 km<sup>2</sup>,平均深度1.9 m<sup>[20]</sup>。从太湖流域汇入湖泊的洪水,由于特大入湖流量侵蚀流域和搬运,湖泊泥沙沉积发生显著变化,湖泊泥沙沉积颗粒增粗是一个显著特征<sup>[4]</sup>。在自然水系下,特大洪水年份发生长江水沙的倒灌,如1954年长江倒灌进入太湖湖区的水量曾达到 $3.2 \times 10^8$  m<sup>3</sup><sup>[21]</sup>。太湖的沉积剖面中是否能够分辨出洪水沉积特征,并借以重建洪水序列是我们沉积学关注的问题。因此,本文根究太湖的近现代沉积,寻找洪水特征沉积,与区域降水和洪峰流量进行相关分析试图

①科技部全球变化重大科学研究计划(2012CB956103)、中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-338-2)和中国科学院对外合作重点项目(GJHZ1214)资助。

收稿日期:2011-08-10; 收修改稿日期:2011-12-20

恢复太湖流域 150 a 来的历史洪水事件。

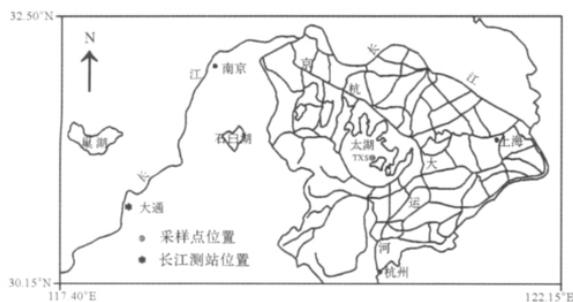


图1 研究区地理位置示意图

Fig.1 Schematic map of locations of Taihu Lake and the catchment

## 1 采样及实验分析

① 沉积钻孔: 2004年6月在太湖中心、开阔水域用重力采样器采集了沉积物柱样钻孔 TXS (31°08′53.7″N, 120°13′20.2″E) (图1), 水深205 cm, 钻孔深675 cm。0~50 cm以0.5 cm间隔取样, 50 cm以下1 cm间隔取样。岩芯上部105 cm沉积岩性与沉积特征如下:

- |            |                 |
|------------|-----------------|
| 0~16 cm    | 灰色泥, 有铁锈色;      |
| 16~26 cm   | 青灰色粉砂质泥;        |
| 26~30 cm   | 青灰色粉砂质泥, 含植物残体; |
| 30~90 cm   | 灰色粉砂质泥, 含有机碎屑物; |
| 90~101 cm  | 灰色泥, 含灰白色团块状斑点; |
| 101~105 cm | 灰色泥质粉砂。         |

② 粒度测定: 首先用浓度10%的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>除去样品中的有机质, 用浓度10%的HCl除去无机碳, 振荡离散15 min后在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用英国生产的Mastersizer2000激光粒度仪(分析范围0.02~2 000 μm)测试。

③ 磁化率测定: 将钻孔岩芯湿样品置于2 cm×2 cm×2 cm标准塑料盒中, 在德国图宾根大学古地磁实验室测试。使用Bartington频率磁化率仪测量样品低频磁化率( $\chi_{lf}$ )和低频磁化率( $\chi_{hf}$ )。

④ 年代测定: 干沉积样品研磨至过100目筛后, 用美国产的高纯锗井型探测器(OrtecHPGeGWL)与Ortec919型谱控制器和IBM微机构成的16k道多道分析器所组成的 $\gamma$ 谱分析系统在中科院南京地理与湖泊所年代实验室测定。<sup>137</sup>Cs和<sup>226</sup>Ra标准样品由中国原子能研究院提供;<sup>210</sup>Pb标准样品用英国利物浦大学做比较校准。

⑤ 气候和流量观测资料: 作为对比和验证沉积记录, 采用长江下游地区三个气象站(南京、杭州、上海)具有长期气象观测的降水记录, 选择资料1873年来夏季(6~8月3个月降水总量)的逐月降水资料。径流资料采用长江下游大通水文站1950—2004年逐月观测记录。

## 2 结果与分析

### 2.1 沉积年代序列

根据测定结果,<sup>226</sup>Ra的比活度(52.96~127.26 Bq/kg)较高, 在垂向上变化较大(图2)。<sup>210</sup>P<sub>bex</sub>(过剩<sup>210</sup>Pb)的比活度(10.86~398.69 Bq/kg)和<sup>210</sup>P<sub>bt</sub>(总<sup>210</sup>Pb)的比活度(83.35~494.86 Bq/kg)演变趋势相似, 从湖底深度约28 cm处开始逐渐增加, 于11 cm处突然剧增至7 cm处达到峰值, 对应1986年切尔诺贝利核电站泄露事件。太湖TXS孔岩芯剖面(图2)中<sup>210</sup>P<sub>bex</sub>呈非指数式分布, 所以本文用CRS(Constant Rate of Supply)模式<sup>[22]</sup>计算TXS孔沉积通量, 获得沉积速率0.173 cm/a, 即5.8 a/cm。岩芯特征分析显示沉积物质地单一, 均为细泥与粉砂混合体, 沉积环境接近, 由此依据平均沉积速率推断, 岩芯深度27.25 cm约对应1849 a A. D.。

TXS孔中<sup>137</sup>Cs比活度较低(<21 Bq/kg), 从11.75 cm处1.52 Bq/kg开始出现, 向上一直增加, 于4.75 cm处达到峰值20.68 Bq/kg, 其后降低直至顶部, 总体形态呈尖锐的单峰。钻孔TXS中<sup>137</sup>Cs沉积通量远小于太湖区域大气沉降累积通量(2 120 Bq/kg), 这种现象在太湖其他钻孔以及长江中下游的洪湖、巢湖沉积物中也有相似发现<sup>[23~26]</sup>, 可能是后生沉积作用导致峰高降低的结果。若以TXS垂直剖面上<sup>137</sup>Cs蓄积峰对应1986年全球<sup>137</sup>Cs散落高峰期, 计算的平均沉积速率与利用<sup>210</sup>Pb CRS模式分析结果相一致。<sup>137</sup>Cs全球1963年散落高峰在太湖TXS钻孔表现不显著, 可能由于沉积物后生沉积作用稀释所致。结合<sup>210</sup>Pb测定和模式, 确定沉积速率并建立年代序列(图2)。

### 2.2 粒度特征变化

太湖TXS孔沉积物粒径分析表明(图3), 砂级粒径(>64 μm)百分含量在钻孔30 cm以上较低, 小于2.5%, 粒径含量变化于0~2.466%之间, 最大值出现在18.25 cm处约1901年附近, 12.25 cm和14.25 cm缺失粗颗粒物砂, 砂级粒径平均含量为0.97%, 离差系数C<sub>v</sub>=0.72, 粒径变化波动幅度较大。

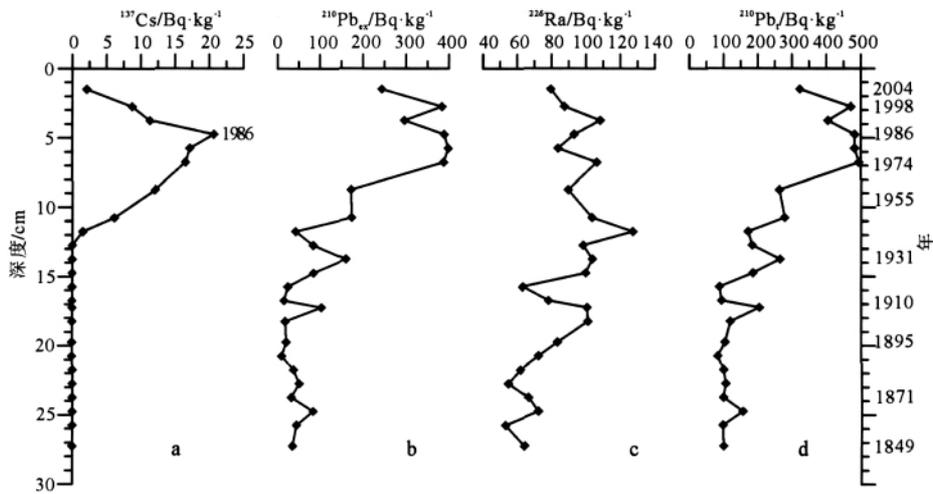


图 2 太湖 TXS 孔 <sup>137</sup>Cs、<sup>210</sup>Pbt、<sup>226</sup>Ra、<sup>210</sup>Pbex 蓄积垂直分布和年代序列

Fig. 2 Dating results of <sup>137</sup>Cs (a), <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> (b), <sup>226</sup>Ra (c) and <sup>210</sup>Pb<sub>t</sub> (d) of sedimentary TXS core from Taihu Lake

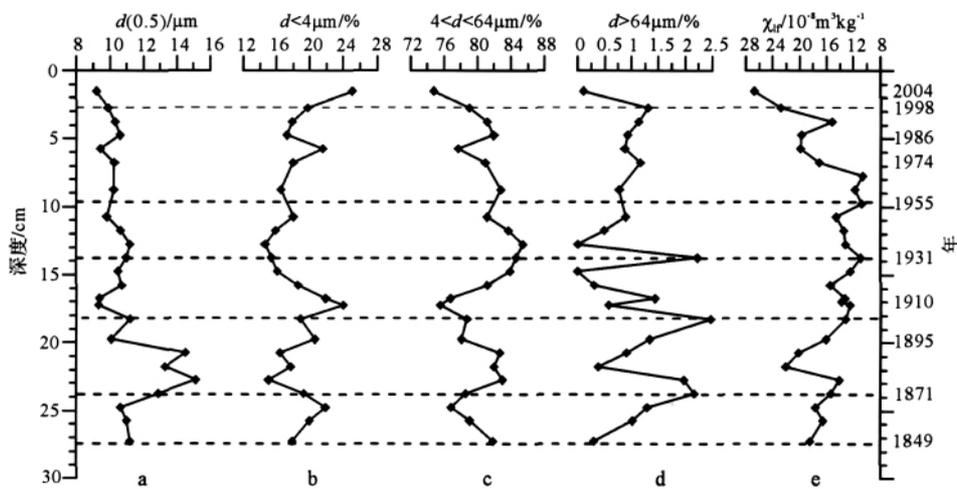


图 3 太湖 TXS 钻孔沉积物中值粒径(a)、黏土(b)、粉砂(c)、砂(d)和低频磁化率(e)垂直分布

Fig. 3 Sediment grain sizes of median (a), clay (b), silt (c), sand (d) and low-frequency magnetic susceptibility (e) in the TXS core

钻孔岩芯中粉砂粒径 4 ~ 64 μm 百分含量平均 80.53% 左右, 变动范围 74.83% ~ 85.40%, 离差系数  $C_v = 0.04$ , 因此, 岩芯中绝大部分沉积物都是粉砂, 而且含量变化比较稳定。黏土颗粒 (< 4 μm) 平均含量为 18.60% 左右, 30 cm 以上变化于 14.60% ~ 20.06% 之间, 离差系数  $C_v = 0.15$ , 钻孔中黏土含量变动幅度较小。由此知道, 150 年来太湖西山沉积环境整体相对稳定, 水动力条件保持稳定, 主要沉积物粉砂离散程度很小, 只有 0.04, 黏土离散程度较小, 也只有 0.15 左右, 砂离散程度较大达到 0.72, 表明影响砂沉积的水动力条件变化较大。

太湖沉积物质来源主要有两个: 流域自身水沙供

给和长江洪水倒灌湖泊区水沙供给。太湖沉积颗粒大部分为黏土质粉砂, 即黏土(粒径 < 0.01 mm) 含量占 20% ~ 40% 左右, 而粉砂(粒径 0.1 ~ 0.01 mm) 含量占 60% ~ 80% 左右, 砂(粒径 > 0.1 mm) 含量很少<sup>[4]</sup>。粗颗粒的砂应该主要为水动力条件较强的洪水<sup>[14~17]</sup> 搬运而来。

### 2.3 磁学特征

对钻孔 TXS 岩芯磁化率测定结果表明, 低频磁化率变化与沉积粒度具有显著的同步变化(图 3)。在 7.25 cm 处 1968 年处于最低值  $10.66 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 顶部达到最高值  $26.73 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 均值  $15.86 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。与粒度砂级粒径 (> 64 μm) 做相关分

析表明与磁化率变化呈负相关,相关系数 $-0.23$ ;磁化率和粒度粉砂( $4 \sim 64 \mu\text{m}$ )变化呈负相关,相关系数 $-0.37$ ;磁化率和粒度黏土( $<4 \mu\text{m}$ )变化呈正相关,相关系数 $0.42$ (达到95%置信区域)。

太湖沉积磁性矿物主要以细颗粒黏土为主,当水力条件较强时,磁化率值相对较小,而水动力条件较弱时,磁化率值就相对较大。这与太湖WIC孔沉积物磁化率与较粗颗粒组分含量成反相关,而与较细颗粒组分成正相关<sup>[27]</sup>的结论相一致,在中国东部地区其它区域苏北盆地<sup>[28]</sup>、巢湖<sup>[29]</sup>、河北省原阳盆地井儿洼湖相沉积物中<sup>[30]</sup>都有相似的结论。因此,太湖盆地TXS钻孔沉积物粒度和磁化率的大小变化能够反映入湖径流水动力条件的变化,可以指示湖泊周边气候变迁过程。碎屑颗粒砂的含量相对高值和磁化率相对低值表明湖泊较强的水动力搬运能力,指示着较强的区域性降水过程和随后较大的径流输入湖盆,反映太湖流域洪涝事件的发生。

### 3 湖泊沉积与降水、流量相关分析

太湖流域处于中国东部湿润性季风区,每年降水主要集中于夏季,短期暴雨引起的洪水也多集中于夏季,由区域降水补给和径流输入导致洪涝灾害也频发于夏季。由于南京地处太湖流域上游,南京气象站降水量能反映下游径流特征。故以南京站数据为主,辅

以同一流域降水情势相同的上海和杭州站夏季降水记录,得到流域夏季降水序列。采用流域夏季(6、7和8月)降水大于90%百分位作为极端丰水年,结合长江干流下游河段水文监测大通水文站1950年以来径流量大于90%百分位做为极端洪水年,并与历史文献洪水记录对比,综合分析得到洪水参数(图4)。对比洪水参数,太湖沉积、湖相韵律变化,佐以磁学特征,获得太湖流域洪水指标。结果发现太湖TXS钻孔沉积物砂级粒径( $>64 \mu\text{m}$ )与过去150a来洪水年重合15次,误差 $\pm 1$ 年,重合年份为1849,1859—1860,1870—1871,1882—1883,1895—1896,1901—1902,1907,1912—1913,1931,1954—1955,1973—1974,1980,1986—1987,1991—1992,1998年等,识别率达到62.5%。缘由可能是采样间隔精度尚未达到1a数量级(本钻孔为 $\pm 3\text{a}/\text{样}$ )。

根据现代150a粒度—磁化率—洪水参数建立的洪水指标,进行快速傅里叶频谱变换(FFT)。表明沉积粒径、低频磁化率具共同的48a和20a周期(图5)。此外,对TXS钻孔岩芯4.12m段进行类比,获得了洪水重发信号。其中粗颗粒砂级粒径( $>64 \mu\text{m}$ )—低频磁化率指标捕获洪水事件64次;沉积物中值粒径( $D=50$ )—低频磁化率指数分析获得洪水事件58次。

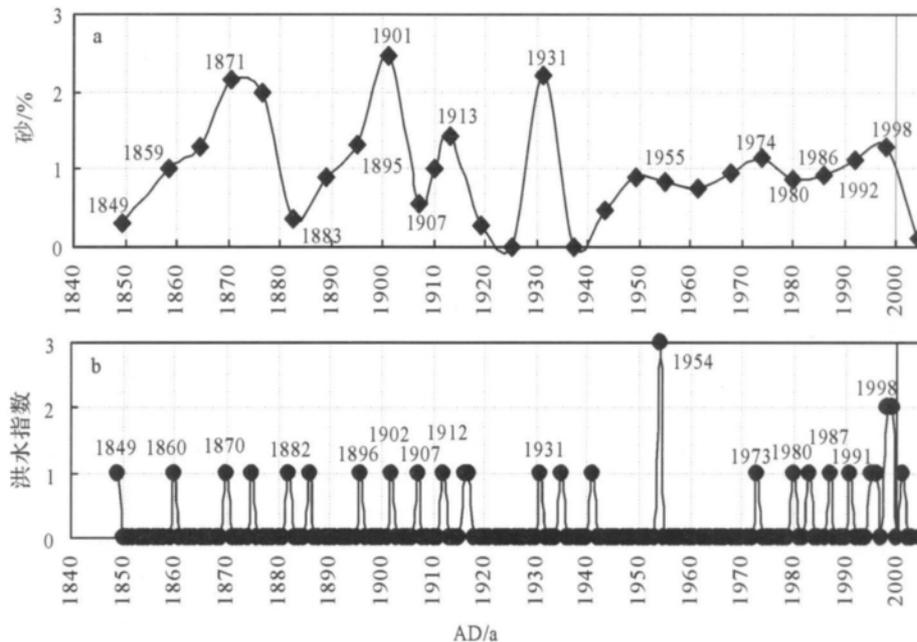


图4 太湖TXS孔沉积砂级含量( $>64 \mu\text{m}$ ) (a)与流域洪水年份 (b)对比

Fig. 4 Comparisons between sand content in TXS core and flood years for Taihu Lake catchment

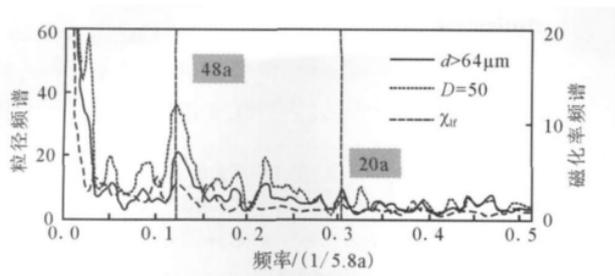


图5 TXS孔沉积粒度(砂级 $>64\mu\text{m}$ 和中值 $D_{50}$ )和磁化率的频谱分析

Fig. 5 FFT analysis for the sediment particle size ( $\phi > 64\mu\text{m}$  and  $D_{50}$ ) and magnetic susceptibility in the TXS core

## 4 讨论

湖泊悬移质含沙量与沉积速率的高低,主要取决于入湖河流含沙量的大小、湖水深度、底质状态及水动力特征等因素。而入湖河流携带的泥沙含量又与地表径流对流域表土的侵蚀、流域内地形条件、土壤、植被、季节性气候变化、降雨强度及人类活动等因素有关。由于太湖流域地形宽广坦荡,河床比降平缓,上游地区植被生长茂盛,覆盖度较高,水土保持较好,流失轻微,除汛期含沙量较高外,枯水期上游河流携带进入湖泊的泥沙量甚微,均较难测得<sup>[4]</sup>,湖泊沉积速率偏低。TXS孔位于湖泊中心区,与湖泊边缘相比较,沉积速率更低。虽然局部湖岸因风浪冲击崩塌也能增加太湖水中的含沙量,但对整个太湖影响不大。因此,太湖盆地是一个以外来碎屑沉积为主的开放型沉积湖盆,进入湖盆的来水是控制沉积物粒径构成变化的主要动力因子。

根据沉积机械分选原理<sup>[31]</sup>,沉积物颗粒大小由湖边向湖中心逐渐变细,并呈同心圆状分布;在湖泊中的不同位置,沉积物颗粒的大小随搬运动力改变可发生变化。当降水量增加尤其集中降雨、强降雨增加时,进入湖泊水量增加,水流搬运泥沙能力增强,搬运相对较粗的碎屑颗粒物质进入湖泊沉积;当流域降水减少,入湖水量减少,流速变缓,水动力搬运能力减弱,水流挟带泥沙的搬运动力下降,搬运的沉积碎屑物也就相对较细。所以粗颗粒物质砂( $>64\mu\text{m}$ )的沉积指示着较高的区域降水和较大的径流输入,于中国东部湿润季风区则预示着暴雨和洪涝事件的发生;如果只有细颗粒的沉积而缺失粗颗粒物质则代表着降水量偏少年份,表明当时气候相对干旱。本研究表明太湖湖泊沉积物粒度砂级粒径( $>64\mu\text{m}$ )与磁学特征能捕获过去150a来洪水事件14次,识别率为62.

5%。该指标对洪水的分辨率达不到90%或更高,主要原因是沉积速率低(约 $0.173\text{ cm/a}$ ),尽管钻孔位于湖心位置,取样是5mm间隔。

磁化率作为一项环境代用指标,反映了各种环境营力之间相互作用和转化过程,能指示区域沉积环境。磁化率能够较好地反映黄土和古土壤成土过程的作用程度,高值表明了较强烈的成壤作用和适宜的气候状况,低值表明了铁磁性矿物含量较少和较为恶劣的气候状况<sup>[32,33]</sup>。沉积物中磁性矿物来源有三类:外源磁性矿物、自生磁性矿物和成岩磁性矿物,湖泊沉积磁性矿物中外源磁性矿物占绝对优势<sup>[34]</sup>。沉积物磁化率的大小与其磁性矿物种类、粒径、含量相关,它们都受物源区影响。因此,磁化率可以反映沉积动力的强弱及其变化趋势,若沉积动力与沉积环境不变,可以反映沉积物源区的变化<sup>[27]</sup>。太湖盆地磁性矿物来源以外源磁性矿物为主,受输入碎屑物质磁性矿物成分、含量和粒度控制,磁性矿物含量和粒度组成与水动力条件相关:若物源区磁性矿物以粗颗粒砂级碎屑为主,当水动力搬运能力强时,磁化率就大;若物源区磁性颗粒矿物以细颗粒黏土为主,则动力搬运能力较弱时,沉积物磁化率也相对较大。文中依据沉积物粒度、湖相韵律以及磁学特征尝试对太湖流域150a来洪涝事件进行定量重建,个别洪水事件的沉积剖面年龄与洪水参数年龄有大约1年的偏离,这可能与<sup>210</sup>Pb年龄测试的误差有关,也可能与风浪、风涌水和湖流对湖底的扰动造成沉积环境的不稳定有关。同时,钻孔粗颗粒砂级沉积并不能与洪水参数形成一一对应,一些沉积颗粒较粗年份并没有洪水事件发生,也表明自然地理状况下湖泊沉积动力环境的复杂性。

## 5 结语

总结本文的分析结果,得到以下几点结论:

(1) 长江下游径流( $Q \geq 90\%$ 百分位)、夏季降水量( $P_{\text{夏}} \geq 90\%$ 百分位)和文献记录长江流域1840年以来的特大洪水,共发现洪水事件约24次,即平均 $6.25\text{ a/次}$ 。

(2) 太湖湖泊沉积物粒度砂级粒径( $>64\mu\text{m}$ )与磁学特征能捕获过去150a洪水事件15次,与洪水记录对应的识别率62.5%,表明湖泊沉积记录能较好地反演过去洪水变化。

(3) 太湖沉积磁化率与较粗颗粒组分含量成反相关,而与较细颗粒组分成正相关;磁性矿物沉积物

主要以细颗粒黏土为主,当水动力条件较强时,磁化率值相对较小,而水动力条件较弱时,磁化率值就相对较大。

(4) 150 a 来太湖湖泊沉积由 TXS 钻孔揭示的粒度和磁学特征,与长江下游径流量高值、太湖流域夏季强降水、以及文献记载长江特大洪涝灾害三者组成具有很好的对应关系,能够做为沉积的洪水指标用以认识过去极端洪水的长周期变化特征和规律。

### 参考文献 (References)

- IPCC. The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 张德二. 全球变暖与气候极端事件之我见 [J]. 自然杂志, 2010, 32(4): 213-216 [Zhang De'er. My view of global warming and climate extremes [J]. Chinese Journal of Nature, 2010, 32(4): 213-216]
- 姜彤, 施雅风. 全球变暖、长江水灾与可能损失 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 277-284 [Jiang Tong, Shi Yafeng. Global climatic warming, the Yangtze floods and potential loss [J]. Advances in Earth Science, 2003, 18(2): 277-284]
- 孙顺才, 黄漪平. 太湖 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993 [Sun Shuncai, Huang Yiping. Taihu Lake [M]. Beijing: Ocean Press, 1993]
- Baker V R. Paleoflood hydrology and extreme flood events [J]. Journal of Hydrology, 1987, 96: 79-99
- Benito G, Thorndycraft V R. Palaeoflood hydrology and its role in applied hydrological sciences [J]. Journal of Hydrology, 2005, 313: 3-15
- George S S. Tree Rings as Paleoflood and Paleostage Indicators [M] // Stoffel, *et al.*, eds. Tree Rings and Natural Hazards: A State-of-the-Art, Advances in Global Change Research 41, doi 10.1007/978-90-481-8736-2\_22, Springer Science + Business Media B. V. 2010
- Nesje A, Dahl S O, Matthews J A, Berrisford M S. A ~4500-yr record of river floods obtained from a sediment core in Lake Atnsjoen, eastern Norway [J]. Journal of Paleolimnology, 2001, 25: 329-342
- Moreno A, Valero-Garcés B L, González-Sampériz P, *et al.* Flood response to rainfall variability during the last 2000 years inferred from the Taravilla Lake record (Central Iberian Range, Spain) [J]. Journal of Paleolimnology, 2008, 40: 943-961
- 葛兆帅, 杨达源, 李徐生, 等. 晚更新世晚期以来的长江上游古洪水记录 [J]. 第四纪研究, 2004, 24(5): 555-560 [Ge Zhaoshuai, Yang Dayuan, Li Xusheng, *et al.* The paleoflooding record along the upreaches of the Changjiang River since the Late Pleistocene Epoch [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(5): 555-560]
- 杨晓燕, 夏正楷, 崔之久. 黄河上游全新世特大洪水及其沉积特征 [J]. 第四纪研究, 2005, 25(1): 80-85 [Yang Xiaoyan, Xia Zhengkai, Cui Zhijiu. Holocene extreme floods and its sedimentary characteristic in the upper reaches of the Yellow River [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(1): 80-85]
- 朱诚, 郑朝贵, 马春梅, 等. 长江三峡库区中坝遗址地层古洪水沉积判别研究 [J]. 科学通报, 2005, 50(20): 2240-2250 [Zhu Cheng, Zheng Chaogui, Ma Chunmei, *et al.* Identifying paleoflood deposits archived in Zhongba Site, the Three Gorges reservoir region of the Yangtze River, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(21): 2493-2504]
- 张强, 杨达源, 施雅风, 等. 川江中坝遗址 5000 年来洪水事件研究 [J]. 地理科学, 2004, 24(6): 715-720 [Zhang Qiang, Yang Dayuan, Shi Yafeng, *et al.* Flood events since 5000 a. B. P. recorded in natural sediments [J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(6): 715-720]
- 赵景波, 李胜利. 西安高陵马坊滩渭河洪水变化研究 [J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 857-863 [Zhao Jingbo, Li Shengli. Study on flood changes of Weihe River at Mafangtan in Gaoling [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(6): 857-863]
- 王长燕, 赵景波, 郁耀闯. 黄河兰州段高河漫滩洪水沉积及其气候意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 125-132 [Wang Changyan, Zhao Jingbo, Yu Yaochuang. Flood sediment in valley flat and the climatic implication of Lanzhou section of the Yellow River [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(4): 125-132]
- 赵景波, 郁耀闯, 周旗. 渭河渭南段高漫滩沉积记录的洪水研究 [J]. 地质论评, 2009, 55(2): 231-241 [Zhao Jingbo, Yu Yaochuang, Zhou Qi. A study on great floods recorded by sediments on the high alluvial flat of Weihe River in Weinan, Shaanxi [J]. Geological Review, 2009, 55(2): 231-241]
- Dayuan Yang, Ge Yu, Yuebo Xie, *et al.* Sedimentary records of large Holocene floods from the middle reaches of the Yellow River, China [J]. Geomorphology, 2000, 33: 73-88
- 展望, 杨守业, 刘晓理. 长江下游近代洪水事件重建的新证据 [J]. 科学通报, 2010, 55(19): 1908-1913 [Zhan Wang, Yang Shouye, Liu Xiaoli, *et al.* Reconstruction of flood events over the last 150 years in the lower reaches of the Changjiang River [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(21): 2268-2274]
- 于革. 高分辨湖泊沉积和孢粉记录对气候、水文变化的响应 [J]. 沉积学报, 2011, 29: 8-15 [Yu Ge. High-resolution records of lacustrine sedimentology and palynology responding to changes in climate and hydrology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29: 8-15]
- 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998 [Wang Sumin, Dou Hongsheng. Chinese Lakes [M]. Beijing: Science Press, 1998]
- 吴浩云. 太湖流域典型年梅雨洪涝灾害比较分析 [J]. 水文, 2000, 20(4): 54-57 [Wu Haoyun. Comparison and analysis of the typical plum rains caused flood disaster in Taihu Lake Basin [J]. Hydrology, 2000, 20(4): 54-57]
- Appleby P G, Oldfield F. The concentration of <sup>210</sup>Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported Pb to the sediment [J]. Catena, 1978, 5: 1-8
- 刘恩峰, 沈吉, 朱育新, 等. 太湖表层沉积物重金属元素的来源分析 [J]. 湖泊科学, 2004, 16(2): 113-119 [Liu Enfeng, Shen Ji, Zhu Yuxin, *et al.* Source analysis of heavy metals in surface sediments of lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(2): 113-119]

- 24 刘建军,吴敬禄. 太湖大浦区近百年来湖泊记录的环境信息[J]. 古地理学报, 2006, 8(4): 559-564 [Liu Jianjun, Wu Jinglu. Environmental information of recent 100 years recorded sediments of Dapu Area in Taihu Lake [J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(4): 559-564]
- 25 姚书春,薛滨,夏威岚. 洪湖历史时期人类活动的湖泊沉积环境响应[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(4): 475-480 [Yao Shuchun, Xue Bin, Xia Weilan. Human impact recorded in the sediment of Honghu Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(4): 475-480]
- 26 姚书春,薛滨,李世杰,等. 长江中下游湖泊沉积速率的测定及环境意义——以洪湖、巢湖、太湖为例[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(5): 569-573 [Yao Shuchun, Xue Bin, Li Shijie, et al. Sedimentation rates in Honghu, Chaohu and Taihu Lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(5): 569-573]
- 27 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[J]. 地理学报, 1996, 51(2): 155-163 [Wang Jian, Liu Zechun, Jiang Wenying, et al. A relationship between susceptibility and grain-size and minerals and their paleoenvironmental implications [J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(2): 155-163]
- 28 舒强,李才林,赵志军,等. 苏北盆地浅钻沉积物磁化率与粒度记录的末次冰消期以来的环境变化[J]. 沉积学报, 2009, 27(1): 111-117 [Shu Qiang, Li Cailin, Zhao Zhijun, et al. The records of mass susceptibility and grain size for climate changes in Subei Basin during the last deglaciation [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(1): 111-117]
- 29 王心源,吴立,张广胜,等. 安徽巢湖全新世湖泊沉积物磁化率与粒度组合的变化特征及其环境意义[J]. 地理科学, 2008, 28(4): 548-553 [Wang Xinyuan, Wu Li, Zhang Guangsheng, et al. Characteristics and environmental significance of magnetic susceptibility and grain size of lake sediments since Holocene in Chaohu Lake, Anhui Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(4): 548-553]
- 30 迟振卿,闵隆瑞,王志明,等. 河北省阳原盆地井儿洼钻孔磁化率、粒度反映的环境意义[J]. 地质力学学报, 2002, 8(1): 87-96 [Chi Zhengqing, Min Longrui, Wang Zhiming, et al. Environmental significance of magnetic susceptibility and grain size in Jingerwa Core, Yangyuan Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8(1): 87-96]
- 31 Leman A. Lake: Chemistry, Geology, Physics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978: 79-83
- 32 刘东生. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 78-81 [Liu Tungsheng. Loess and Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985: 78-81]
- 33 安芷生, Porter S, Kukla G, 等. 最近 13 万年黄土高原季风变迁的磁化率证据 [J]. 科学通报, 1990, 35(7): 529-532 [An Zhisheng, Porter S C, Kukla G, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130 000 years [J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(7): 529-532]
- 34 汤普生 R, 奥尔德费尔德 F, 著. 环境磁学 [M]. 北京: 地质出版社, 1995 [Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995]

## Study on Lacustrine Sediments Responding to Climatic Precipitation and Flood Discharge in Lake Taihu Catchment, China

LI Yong-fei<sup>1,2</sup> YU Ge<sup>1</sup> SHEN Hua-dong<sup>1,2</sup> HU Shou-yun<sup>1</sup> YAO Shu-chun<sup>1</sup> YIN Gang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and

Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** It is necessary to know long-term flood records and the sequence for understanding the features and periods of extreme flood, while lacustrine sediments from Taihu Lake has provided the records much longer than the observations. This paper has reconstructed historical flood events during the past 150 years in Taihu Lake catchment, by sedimentary records from TXS core in the centre of the open water. Dating of the <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs and characteristics of the grain size and magnetic susceptibility were analyzed, and sedimentary flood index were configured which have been correlated with regional summer precipitation and flood discharge in the lower reaches of the Yangtze River. Results showed that there were about 24 events of the extreme large floods when we used cutoff the 90<sup>th</sup> percentiles for the discharge ( $Q \geq 90\text{th}\%$ ) and summer precipitation ( $P_{\text{jia}} \geq 90\text{th}\%$ ) from historical documents since 1840AD. Comparably, flood index from grain size of sedimentary sand ( $> 64 \mu\text{m}$ ) and low-frequency magnetic susceptibility can catch 15 flood events during the past 150 years, 62.5% corresponding with the historical records. This result supported that lacustrine sediment records can well reconstruct the paleoflood change, and provide scientific basis of sedimentology and magnetic susceptibility to recognize centenary timescale extreme floods in features and periods.

**Key words:** Taihu Lake; lake sediments; grain size; magnetic susceptibility; flood index