

赣北黄茅潭湖泊沉积记录的240年以来古洪水事件

吴霜¹, 刘倩¹, 曹向明¹, 赖忠平², 陈远辉¹, 贾玉连^{1,3*}

(1. 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022; 2. 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074;
3. 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022)

摘要:古洪水研究是近几十年来全球变化研究的一个热点,同时也是难点。本文利用赣北黄茅潭的湖泊沉积,建立了小冰期以来全球变暖背景下的区域洪水记录。采用²¹⁰Pb和¹³⁷Cs方法厘定了地层年代,基于粒度与元素地球化学指标的对比分析,揭示了器测记录(1950年)以来指标记录的特点与区域日降水超过50 mm天数的关系,认为黄茅潭HMT-01孔粒度(包括粗粉砂+砂/粘土比值、平均粒径)和Zr/Rb、Ti/Rb、Zr/Fe比值可作为洪水指标记录,共识别出1950-2010年期间记载的13次洪水事件中的11次。基于这些指标记录及指标特点,共识别1769-1950年间由历史文献记录的31次洪水事件中的23次,识别率达74.2%。研究表明:①湖泊沉积中Zr/Rb、Ti/Rb、Zr/Fe比值和粒度参数(平均粒径、粗粉砂+砂/粘土)作为洪水指标,对洪水事件沉积有较好的指示作用,且Zr/Rb比值对洪水事件的检出率较高;②黄茅潭流域洪水发生频率暖期高于冷期;③年代际尺度上,1820s-1840s, 1860s-1870s为19世纪冷期黄茅潭洪水高频期,这两个阶段对应东亚夏季风偏强,长江中下游地区降雨较多;20世纪赣北黄茅潭洪水基本随1920s-1940s, 1980s-1990s两个变暖阶段而高频出现,与长江中下游大洪水演变特点基本一致。研究结果为利用湖泊沉积记录反演过去的洪水变化,延长洪水序列、认识洪水规律提供了一定的科学依据。

关键词:湖泊沉积;洪水指标;粒度;Zr/Rb;黄茅潭

1 引言

古洪水研究是近几十年来全球变化研究的一个热点,同时也是一个难点问题(杨晓燕等, 2005; Parris et al, 2010; 王敏杰等, 2010; 黄春长等, 2011)。在沉积序列中,哪些沉积指标能指示洪水事件哪些方面的信息,是识别洪水层重建古洪水事件的关键问题,应受到学者关注。湖泊沉积物具有记录介质丰富,连续性强,分辨率高等优点,是建立连续、高分辨率洪水沉积记录的优良载体(沈吉等, 2010; Gilli et al, 2013),近十几年来日益受到重视。其中,山地湖泊沉积受到特别的关注(Gilli et al, 2003; Moreno et al, 2008; Vasskog et al, 2011; Wil-

helm et al, 2013)。Wilhelm等(2013)利用沉积层中粗颗粒部分($Q_{90}(\mu m)$)和Zr/Fe比值等方法重建了近1400年来欧洲阿尔卑斯西北部Blanc湖发生的190次洪水事件,并探讨了古洪水发生频率和强度与气候变化的关系。Gilli等(2003)利用湖泊沉积碎屑层中低TIC和TOC值等指标识别出4次洪水事件。Vasskog等(2011)利用Rb/Sr比值和粒度参数(平均粒径和分选系数)来识别洪水事件。Moreno等(2008)利用沉积学、地球化学(TOC、TOC/TN等)、磁学等指标恢复了过去2000年来西班牙Taravilla湖的古洪水事件,认为洪水与太阳辐射和北大西洋涛动有一定的关联。李永飞等(2012)利用粒度和磁化率共识别出1840年以来太湖流域15次特大洪水事

收稿日期:2016-12;修订日期:2017-05。

基金项目:江西省重大生态安全问题监控协同创新中心项目(JXS-EW-00);鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室(江西师范大学)开放基金项目(ZK2013003)[**Foundation:** The Collaborative Innovation Center for Major Ecological Security Issues of Jiangxi Province and Monitoring Implementation, No.JXS-EW-00; Open Foundation of Ministry of Education Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research (Jiangxi Normal University), No.ZK2013003]。

作者简介:吴霜(1990-),女,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为湖泊沉积与区域响应,E-mail: 1172637763@qq.com。

通讯作者:贾玉连(1971-),男,山东莱芜人,副教授,主要研究方向为全球气候变化与区域响应,E-mail: northforest@sohu.com。

引用格式:吴霜,刘倩,曹向明,等. 2017. 赣北黄茅潭湖泊沉积记录的240年以来古洪水事件[J]. 地理科学进展, 36(11): 1413-1422. [Wu S, Liu Q, Cao X M, et al. 2017. A 240-year sedimentary record of paleoflood events from the Huangmaotan Lake, northern Jiangxi Province[J]. Progress in Geography, 36(11): 1413-1422.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.11.010

件。这些研究,基于具体的湖泊碎屑沉积特点,选择使用了不同的指标来反演古洪水事件,均达到了较为理想的效果,其中粒度和元素指标,得到了较为广泛的应用,但对这些指标与洪水沉积事件的关系的论述相对较少。

本文通过对赣北黄茅潭 HMT-01 孔岩芯的研究,较为系统地论述了粒度和元素地球化学指标与洪水事件的关系,重建了小冰期以来赣北古洪水沉积记录,并进一步探讨了洪水发生规律和特点,为利用湖泊沉积反演古洪水变化,延长古洪水序列,认识洪水发生规律和特征提供一定的科学依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况及样品采集

黄茅潭位于江西省九江市湖口县凰村乡与流泗镇之间,为长江中下游的一个淡水湖泊,最北面有一条小水道与长江相通。黄茅潭水域面积为 5.1 km^2 ,总流域面积为 60.98 km^2 ,包括流泗镇、凰村乡大部,大垈小部。湖盆四周分布典型的赣北低山丘陵,海拔多为 $120\sim 300\text{ m}$ 。湖水主要依靠地表径流和湖面降水补给,主要港汊有五官桥港、史家桥港等。湖泊冬枯夏潦,平均水位约 14.3 m ,水深 $3\sim 4\text{ m}$ 。湖区属亚热带湿润季风气候,四季分明,气候温和,雨量充沛,年平均气温 $17.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量为 1398.7 mm (江西省湖口县志编纂委员会, 1992),降水主要集中于春末至夏季,由连续性强降雨、暴雨引起的洪水也多集中于这一时期。

2011年5月采用Beeker sampler重力采样器于湖心 3.8 m 水深处采了长 80 cm 沉积柱状岩芯 HMT-01($29^{\circ}48'\text{N}$, $116^{\circ}21'\text{E}$),并在东西 20 m 处各获取了一个平行钻孔(HMT-02, HMT-03)岩芯(图1),采取的柱状岩芯立即在野外按 1 cm 间隔取样,并装入聚乙烯样品袋密封后带回实验室开展各指标的测定(赖忠平等, 2013)。岩芯沉积岩性与沉积特征如下:

0.03~0.25 m 青灰色粘土质粉砂(0.17 m 有贝壳出现); 0.25~0.63 m 浅青灰色粘土质粉砂; 0.63~0.8 m 青灰色粘土质粉砂。

2.2 实验方法

(1) 年代测定。样品风干,称取 3 g 蜡封后放置3周,采用EG&G ORTEC公司GWL-120-15型高纯锗并型光子检测系统测定 ^{210}Pb 与 ^{137}Cs 的比活度

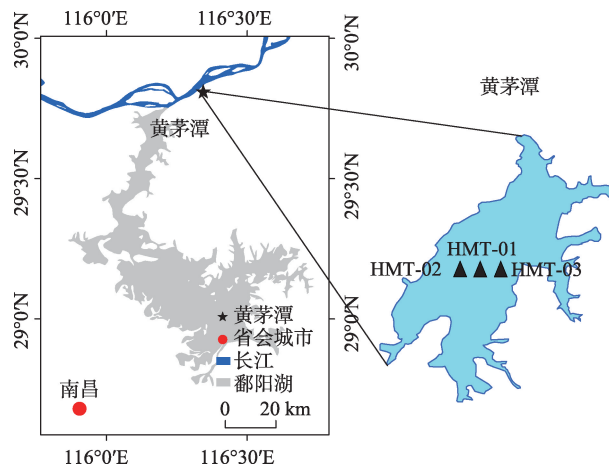


图1 黄茅潭地理位置及采样点示意图

Fig.1 Location and sampling sites of the Huangmaotan Lake

(Bq/kg),由此厘定钻孔的年代序列(图2)。测试在江西师范大学地理与环境学院 ^{210}Pb 与 ^{137}Cs 测年实验室完成。由于建国后多次复修堤坝,黄茅潭人类活动强度较大,本研究测试了HMT-01与HMT-03钻孔,通过比活度的剖面对比,检验地层是否受到沉积期人类扰动。

(2) 粒度测定。称取 0.2 g 干样,首先加入蒸馏水浸泡,接着加适量 10% 过氧化氢(H_2O_2)去除样品中的有机质,然后加入适量 $10\%\text{ HCL}$ 去除钙质胶结物,静置48小时后,高速离心(3600 转/min),倾掉上层清液,重复3次稀释酸度接近中性。加入 10 ml 浓度为 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠溶液作为分散剂,超声震荡 5 min 后上机测试。粒度分析在江西师范大学理化测试中心粒度实验室完成,所用仪器为HORIBA particle sizer LA-950,该仪器测试粒径范围为 $0\sim 3000\text{ }\mu\text{m}$ 。粒度参数计算采用矩值法求得。

(3) 元素测定。取烘干后的适量样品,在研钵中充分研磨分散并全部过 200 目筛,取研磨后的样品约 4 g 压制成直径 40 mm 、厚约 5 mm 的圆片,进行XRF元素测试分析。每10个样品加一个平行样,以检测测试结果的稳定性;归一法获得各元素的质量百分组成(凌光久等, 2016)。实验在江西师范大学分析测试中心完成,仪器为德国S4PIO-NEER X射线荧光光谱仪。

3 结果与分析

3.1 年代序列

HMT-01和HMT-03的 ^{137}Cs 剖面分布具有十分

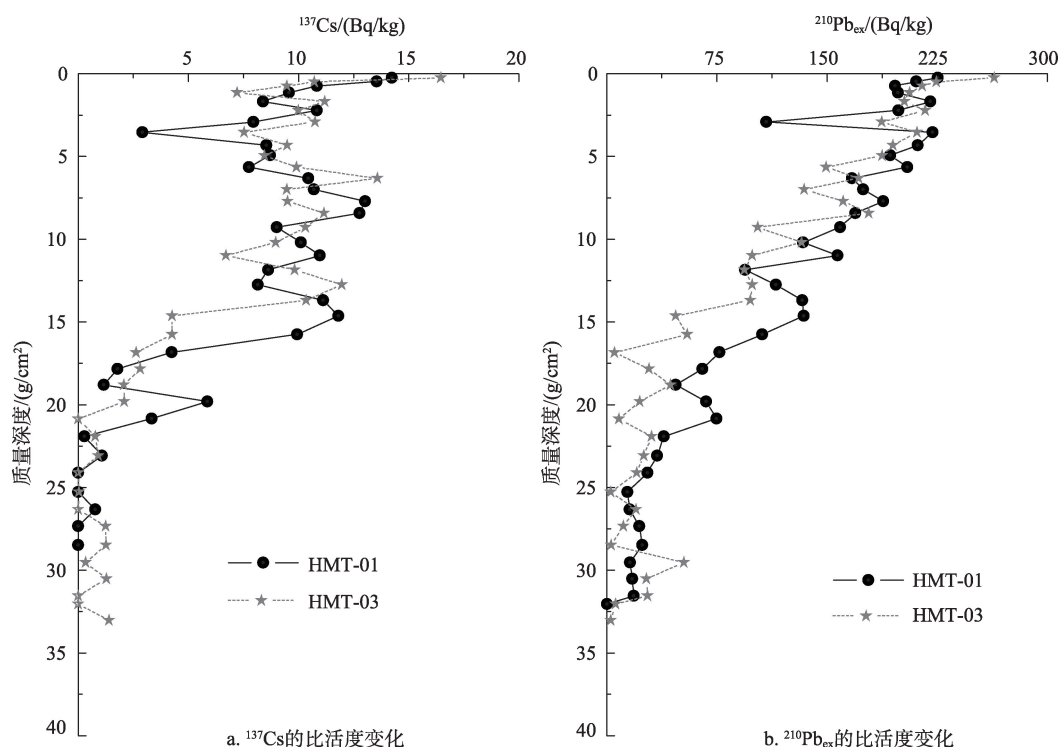


图2 黄茅潭HMT-01、HMT-03钻孔 ^{137}Cs 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度变化

Fig. 2 Variation of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ activities in the core HMT-01 and HMT-03 from the Huangmaotan Lake

相似的线性趋势:在质量深度小于 17.5 g/cm^2 范围内,均存在四个明显的蓄积峰,HMT-01钻孔中在深度22 cm、质量深度为 15 g/cm^2 处,是第一个蓄积峰, ^{137}Cs 活度为 11.817 Bq/kg ;对应HMT-03钻孔深度20 cm、质量深度 13.5 g/cm^2 处的蓄积峰(图2)。对比北半球和日本东京 ^{137}Cs 放射性比活度监测结果(McManus et al, 1993; Japan Meteorological Agency, 2001),判断此峰对应1963年全球 ^{137}Cs 散落高峰期(Xiang et al, 2002),对应1963或者1964年的沉积层节。两个钻孔在近乎一样的深度出现 ^{137}Cs 的1963-1964年时标,且二者近乎一样的线型变化特点,说明沉积期后没有受到明显的人类活动扰动。

基于 ^{210}Pb 比活度特点,采用CIC和CRS模式计算得到的年代序列,均与 ^{137}Cs 1963-1964年时标点存在显著偏差。因此,本文基于1963-1964年时标,将沉积柱芯分为上下两段,采用复合模式(Last et al, 2001)计算钻孔年代。

经岩芯特征分析显示沉积物质地单一,均为粘土质粉砂,沉积环境接近。因黄茅潭于20世纪20年代开始修建黄茅堤(江西省湖口县志编纂委员会, 1992),鉴于黄茅堤建成后对湖泊沉积速率有一定影响,导致沉积速率稍微加快,故1900年以前的

年代采用自然格局状态下未受建坝影响的1920-1900年的平均沉积速率(沉积速率 0.33 cm/a)推算,80 cm处的沉积层节年代大致为1769年。

3.2 近60年来HMT-01孔粒度、元素对洪水事件沉积的指示

洪水发生时,入湖径流量大,水动力搬运能力较强,导致较多的粗颗粒搬运至湖泊,沉积物粒径增大(史小丽等, 2009; Parris et al, 2010; Vasskog et al, 2011; Wilhelm et al, 2012)。沉积颗粒的粒度粗细、分选特征与粒度概率累积曲线相结合,可广泛应用于沉积动力过程及沉积环境的判别(王敏杰等, 2010; 展望等, 2010)。

HMT-01钻孔的概率累积曲线(图3)显示,几乎所有的平均粒径峰值(平均粒径大)层节的沉积物的概率累积曲线均具有明显的五段式:滚动组份($0-2\Phi$)明显,斜率较大,分选性好,指示水动力较强;跳跃组份存在冲刷一回流分界点(约 $3-4\Phi$);同时沉积物分选较差,频数曲线为多峰。其他层节则表现为3段或4段式,缺失滚动组份,跳跃组份不存在冲刷一回流分界点,沉积物分选相对较好,频数曲线为双峰。前者表现了一种水动力较强、水动力环境和沉积环境较为复杂的一种湖泊环境状况;后

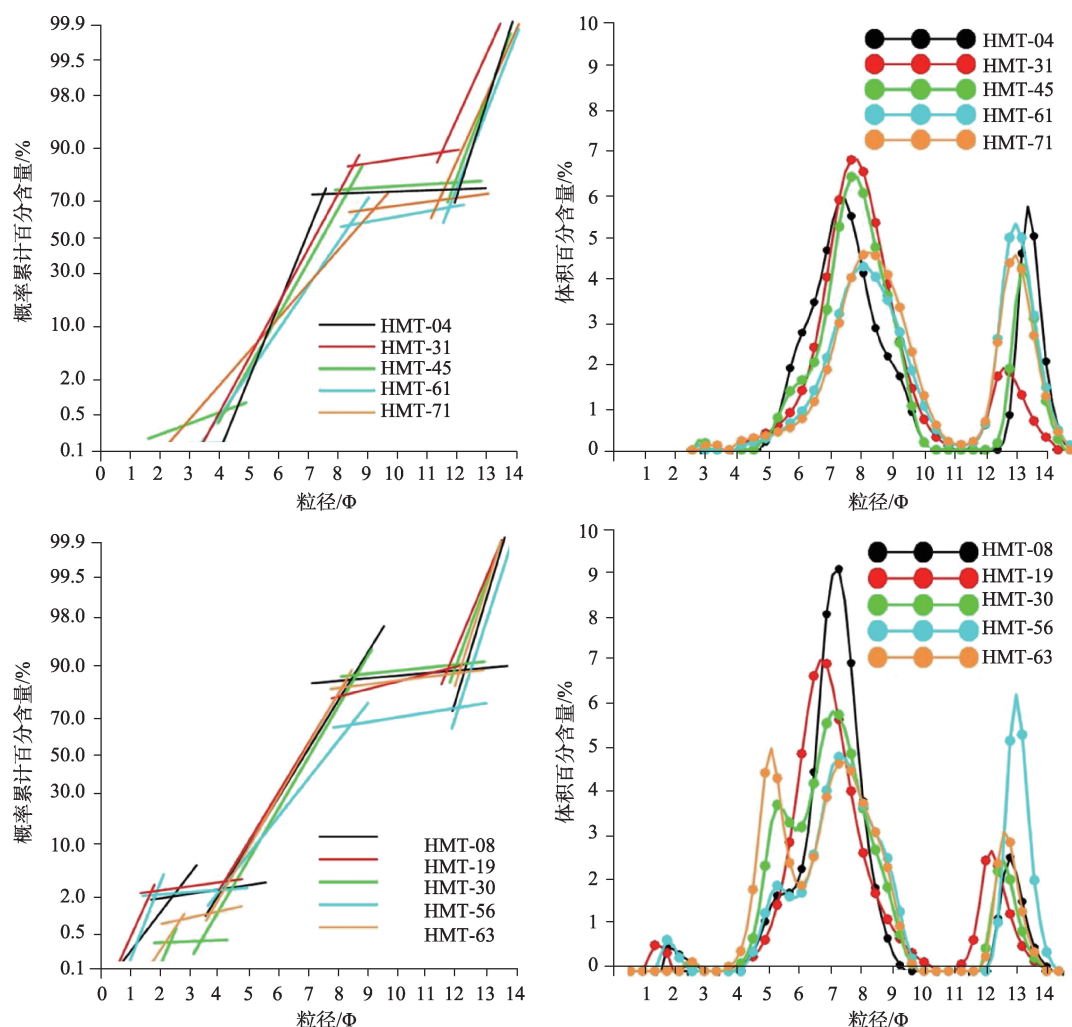


图3 HMT-01 钻孔非洪水期(a/b)与洪水期(c/d)的概率累计曲线和粒度频率曲线对比

Fig.3 Comparison of probability accumulation curves and grain-size frequency distribution curves of core HMT-01 in non-flood (a/b) and flood (c/d) periods, respectively

者则于此完全相反,表现了一种正常湖泊的水环境状况。无疑,前者指示湖泊的洪水环境,后者则是非洪水环境(表1)。

在表生地球化学环境中,Zr与Ti、Rb与Fe的地球化学行为存在显著差异,在风化搬运过程中,Rb与Fe相对富集于粘土等细颗粒中,Zr与Ti相对富集于粗颗粒中(Dypvik et al, 2001; 刘连文等, 2002; 陈诗越等, 2003; 张静然等, 2011),Zr/Rb、Zr/Fe与Ti/Rb比值可以反映沉积物颗粒相对大小的变化,从而具有反应洪水事件的能力,广泛应用于洪水沉积序列的研究(王敏杰等, 2010; Jones et al, 2012; Wilhelm et al, 2013)。图4揭示HMT-01孔Zr/Rb、Zr/Fe与Ti/Rb比值分别与平均粒径有较好正相关关系,其相关系数分别为0.544,0.416,0.498,均通

过0.01的显著性检验。

近60年来九江站记录的大雨(降水>50 mm)日数(日数/年)与HMT-01孔记录的平均粒径(μm)、(粗粉砂+砂)/粘土、Zr/Rb、Zr/Fe与Ti/Rb比值对比分析表明,器测数据记录的洪水频发期与沉积指标的峰值具有较好的对应关系(图4)。指标记录识别出1950-2010年13次较大洪水事件中的11次,这些洪水事件与湖口县志和中国气象灾害大典·江西卷中的洪水记录相符合(江西省湖口县志编纂委员会, 1992; 温克刚, 2006)。Zr/Fe和Zr/Rb比值分别在0.06 m与0.16 m处出现异常低值,Ti/Rb表现为显著高值,可能与长江洪水倒灌有关。

3.3 1769-1950年粒度、元素可能指示的洪水事件

由于1950年之前缺少器测数据,为进一步对比

表 1 洪水期和非洪水期沉积物各粒度组分和粒度参数对比

Tab.1 Comparison of grain size composition and grain size parameters of sediments in flood and non-flood periods								
	深度/m	平均粒径/ μm	砂/%	粉砂/%	粗粉砂/%	细粉砂/%	(粗粉砂+细粉砂)/粘土	分选系数
洪水期	0.08	17.61	2.40	85.54	16.47	69.07	1.563	2.22
	0.19	21.05	2.50	80.27	23.94	56.33	0.880	2.34
	0.30	14.68	0.80	86.55	28.92	57.63	2.345	2.20
	0.63	17.57	2.30	82.01	30.97	51.04	2.120	2.51
非洪水期	0.04	10.24	0.12	73.28	20.20	53.08	0.763	2.14
	0.31	9.65	0.90	83.27	12.83	70.45	0.867	1.97
	0.45	9.74	0.53	77.35	13.46	63.89	0.633	2.50
	0.71	7.28	1.46	60.55	6.90	53.65	0.220	2.54

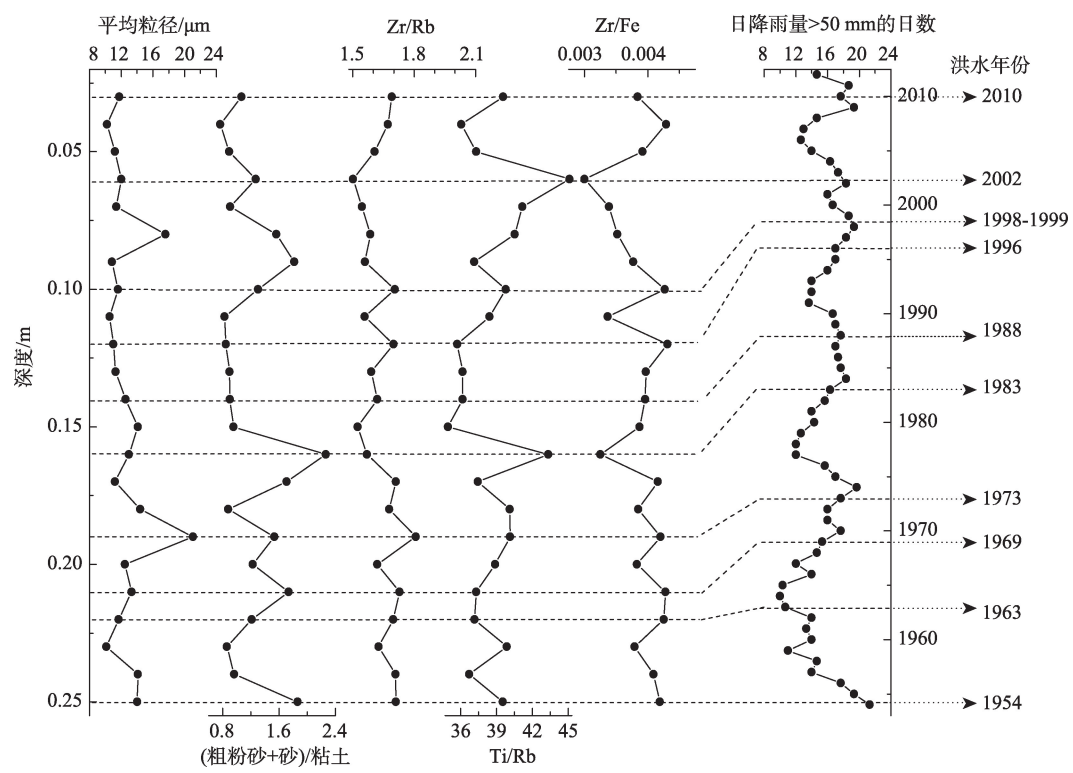


图 4 HMT-01 孔(0.03~0.25 m)平均粒径、(粗粉砂+砂)/粘土、Ti/Rb、Zr/Rb 和 Zr/Fe 比值与九江站(1954-2012 年)日降雨量>50 mm 日数(3 年滑动平均)的对比^①

Fig.4 Comparison of mean (μm), (coarse silt+sand)/clay, Ti/Rb, Zr/Rb, and Zr/Fe ratios in HMT-01 core (0.03~0.25 m) and the days with regional daily rainfall of more than 50 mm (3-year running mean) (1954-2012)

和验证沉积记录与洪水事件之间的关系,本文依据张德二五百年旱涝图集(中央气象局气象科学研究院, 1981),读取了 1769-1950 年赣北黄茅潭流域旱涝参数。图集中的旱涝指数共划分五个等级,即:1 级—涝、2 级—偏涝、3 级—正常、4 级—偏旱、5 级—旱。HMT-01 孔下部分(0.80~0.25 m)对应年代(1769 A.D-1950 A.D)。

Zr/Rb、Zr/Fe、Ti/Rb 及平均粒径等指标峰值与旱涝参数中的“1 级”(个别为“2 级”)有较好的对应关系(图 5)。在 0.46 m 和 0.63 m 处,Zr/Rb、Zr/Fe、平均粒径等指标出现较高峰值,很好的对应文献记载中的 1869-1870、1823 年的大洪水事件(葛兆帅等, 2004; 施雅风等, 2004; 张德二等, 2011)。1869、1870 长江中下游及上中游出现特大洪水,其中 1870

①连续洪水年份中间采用“-”表示,下同。

年大洪水是长江有史以来最大的(葛兆帅等, 2004; 施雅风等, 2004)。基于 ^{210}Pb 及 ^{137}Cs 厘定的时标,并结合1823年、1870年、1963年 ^{137}Cs 时标,采用内插和外推,对年代进行了校正。 Zr/Rb 、 Zr/Fe 、 Ti/Rb 及平均粒径等沉积指标峰值共识别出1769-1950年间的23次洪水事件(图5)。

4 讨论

洪水发生时,入湖径流侵蚀和搬运能力较强,较多粗颗粒被搬运至湖心,形成不同于背景沉积的碎屑层。与湖泊静水环境下形成的背景沉积相比,这些洪水沉积层颗粒较粗, Zr 、 Ti 因其主要富集在粗颗粒中而含量较高, Fe 、 Rb 因其主要富集在粘土细颗粒中而含量较低, Zr/Rb 、 Zr/Fe 、 Ti/Rb 比值增大,这在一些河漫滩、高山湖泊洪水沉积中也有类

似结论(王敏杰等, 2010; Jones et al, 2012; Wilhelm et al, 2013)。相关分析表明, HMT-01 孔 Zr/Rb 、 Zr/Fe 、 Ti/Rb 比值分别与平均粒径有较好正相关关系,在一定程度上可以反映水动力强弱。当水动力较强时,较多粗颗粒进入湖泊并沉积, Zr/Rb 、 Zr/Fe 、 Ti/Rb 比值增大;当水动力较弱时, Zr/Rb 、 Zr/Fe 、 Ti/Rb 比值较小。 HMT-01 孔平均粒径、(粗粉砂+砂)/粘土、 Zr/Rb 、 Ti/Rb 等洪水沉积指标峰值与器测数据记录的洪水频繁期及旱涝指数的“1级”(个别为“2级”)有较好对应关系(图4、图5),共识别出1769-2010年间34次较大洪水和大洪水事件,识别率为77.3%。洪水事件的识别率一定程度上取决于沉积速率(Jones et al, 2012)。 HMT-01 孔平均粒径、(粗粉砂+砂)/粘土、 Zr/Rb 、 Ti/Rb 等洪水沉积指标对洪水事件的识别率未达到90%及以上,一是由于沉积速率低,二是采样精度间隔。指标还识别出湖口县志

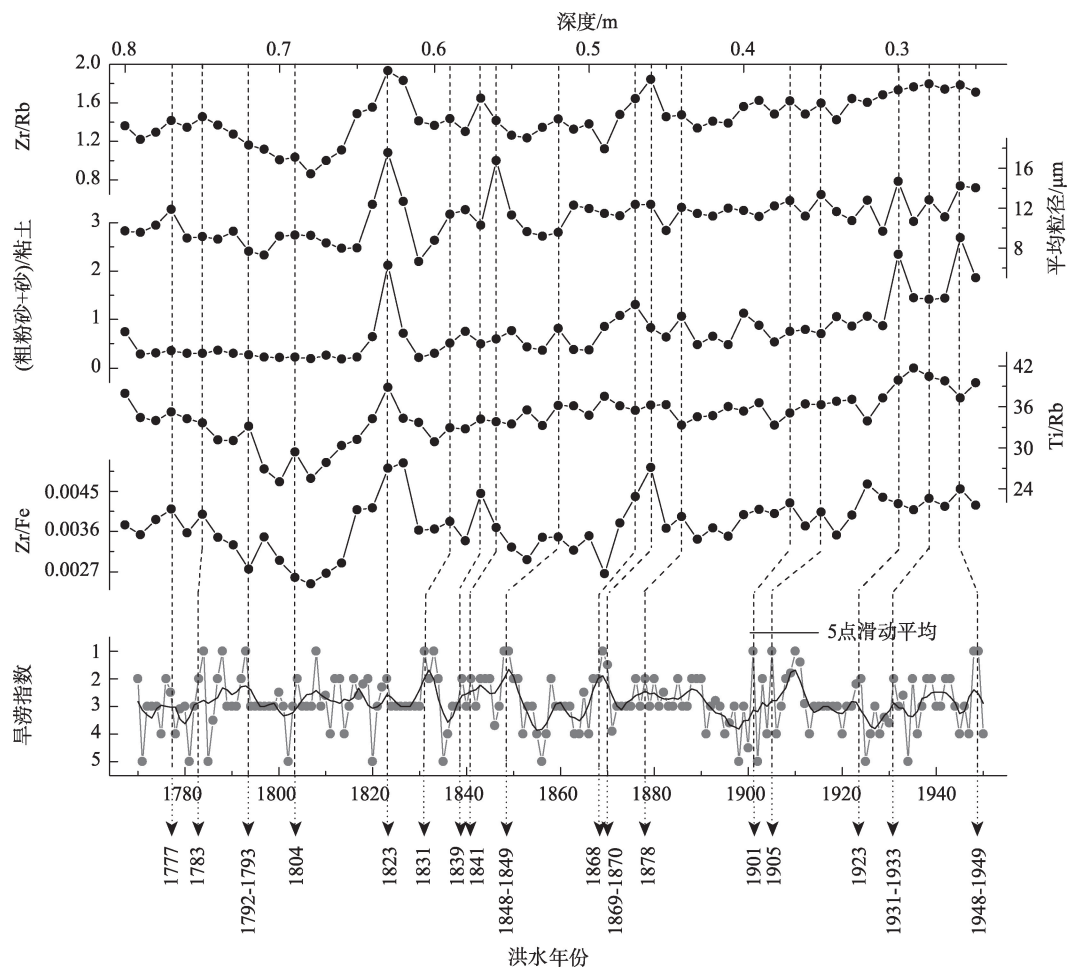


图5 HMT-01孔(0.25~0.8 m)平均粒径、(粗粉砂+砂)/粘土、 Ti/Rb 、 Zr/Rb 和 Zr/Fe 比值与湖口地区的旱涝指数对比

Fig.5 Comparison of mean (μm), (coarse silt+sand)/clay, Ti/Rb , Zr/Rb , and Zr/Fe ratios in HMT-01 core (0.25~0.8 m) and records of dryness/wetness in Hukou area

中没有记载的两次洪水事件,分别为1777、1905洪水事件,分别对应旱涝指数中“2级”和“1级”,可能是历史文献记载的洪水事件有所遗漏或是洪灾影响范围小而未被记录,但鄱阳湖流域有关于1777年较大洪水事件的记载(闵寿等, 1992)。

湖泊悬移质中粗颗粒含量受径流量大小、径流侵蚀搬运能力等因素影响。研究表明,入湖径流量大,径流侵蚀搬运能力强,沉积层中粗颗粒含量较高;入湖径流量少,径流侵蚀搬运能力弱,沉积层中细颗粒含量较高(Campbell, 1998; Parris et al, 2010)。对于强度较大的洪水事件,Zr/Rb、Zr/Fe、Ti/Rb、平均粒径等洪水沉积指标表现出显著高值,如在0.63、0.28、0.26、0.25、0.19 m处,分别对应历史文献记载中的1823、1931、1948-1949、1954、1973年大洪水事件(温克刚, 2006; 张德二等, 2011)(图4-图5)。对于流域内个别强度相对较弱的洪水事件(如1831、1839、1841年洪水),(粗粉砂+砂)/粘土比值的指示作用不明显(图5)。这种情况主要出现在HMT-01孔下段(0.25~0.8 m),可能与沉积环境不同有关。1949年以来黄茅潭加高堤防,HMT-01孔上段(0.03~0.25 m)为典型的湖相沉积,HMT-01下段(0.25~0.8 m)湖相程度减弱。沉积物在搬运过程中,Zr、Rb、Ti、Fe富集丰度受源区化学性质,沉积物搬运距离及径流侵蚀搬运能力等因素影响(Dypvik et al, 2001; Cuven et al, 2010; 张静然等, 2011)。Zr/Rb、Zr/Fe比值分别在0.16、0.06 m出现异常低值,Ti/Rb比值出现显著高值,一方面可能与长江洪水倒灌导致较多悬浮物进入黄茅潭有关,沉积物物源发生变化。另一方面,Cuven等(2010)认为Ti在粗颗粒(中粉砂和粗粉砂)含量最多,Zr在粗颗粒(粗粉砂和砂)含量最多。可见,Zr的粗颗粒富集效应更明显。对比Zr/Rb、Zr/Fe和Ti/Rb曲线(图4和图5),Zr/Rb、Zr/Fe比值在0.37、0.35、0.22、0.21 m处出现明显峰值,分别对应1901、1905、1963、1969年洪水,Ti/Rb比值则未表现出明显峰值或峰值不明显,可能与Ti的粒度富集效应有关。综合分析,Zr/Rb作为洪水指标,对洪水事件沉积较敏感,Zr/Rb比值共识别出1769-2010年间的30次大洪水和次较大洪水事件,识别率为68.2%,洪水检出率相对较高。

19世纪为小冰期的第三个冷期,20世纪为全球变暖时期(王绍武, 2001)。黄茅潭HMT-01孔记录的洪水事件,并结合历史文献洪水事件记录,17次出现1800-1900年间的冷期,频率为1.7次/10 a; 23

次出现在1900-2010年间的暖期,频率为2.1次/10 a,暖期高于冷期。年代际变化尺度上,1820s-1840s、1860s-1870s为19世纪冷期黄茅潭洪水高频期,频率分别为2.3次/10 a、2.8次/10 a; 1920s-1940s、1980s-1990s为20世纪暖期洪水高频期。据湖北神农架石笋(YX92) $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示,在1820s-1840s偏负,此后 $\delta^{18}\text{O}$ 在1860s-1870s相对偏负,但强度弱于前者,表明在这两个阶段东亚夏季风(梅雨峰)偏强,长江中下游地区降雨较多(赵侃等, 2015),这可能是19世纪冷期黄茅潭流域洪水在这两个阶段高频出现的原因。闵寿等(1994)研究也表明,19世纪上半期为鄱阳湖大洪水和较大洪水的频繁期。20世纪全球及中国的变暖主要集中在两个阶段,1920s-1940s气温上升明显,1950年代气温下降后1980年代气温复升(王绍武, 2001),黄茅潭流域洪水基本随着1920s-1940s, 1980s-1990s两个变暖阶段而高频出现,这与长江中下游大洪水演变特点一致(施雅风等, 2004)。据湖北和尚洞石笋(HS4和HS6) $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示,在1925-1945、1980s-1990s相对偏正,表明东亚夏季风减弱(Hu et al, 2008; 何璐瑶等, 2009)。李茜等(2011)研究表明,20世纪20年代前后东亚夏季风与中国东部旱涝分布年代际变化存在位相差异:20世纪20年代之前,东亚夏季风偏强,长江流域及其以南容易偏涝;20世纪20年代以后,东亚夏季风偏弱,长江流域及其以南容易偏涝。另外,1990年代是中国近百年中最暖的年代,受东南季风作用下的长江中下游地区降雨量是近百年最多的地区(施雅风等, 2004),其也受到了全球变暖的显著影响。

5 结论

在洪水期,因入湖径流大,水动力搬运能力较强,较多粗颗粒沉积物被搬运至湖心并沉积,形成不同于背景沉积的碎屑层,沉积物粒径较粗,(粗粉砂+砂)/粘土、Zr/Rb、Zr/Fe、Ti/Rb比值增大。HMT-01孔粒度参数(平均粒径、粗粉砂+砂/粘土)、元素(Zr/Rb、Zr/Fe、Ti/Rb比值)变化特征与器测数据、旱涝指数、文献洪水记录均有较好的相关性,可作为洪水沉积指标反演过去洪水变化,延长古洪水序列。

Zr/Rb、Zr/Fe、Ti/Rb与平均粒径呈正相关关系,一定程度上可以反映水动力强弱。当水动力较强

时,较多粗颗粒进入湖泊,Zr/Rb、Zr/Fe、Ti/Rb 比值增大;当水动力较弱时,Zr/Rb、Zr/Fe、Ti/Rb 比值较小。Ti/Rb、Zr/Rb 比值作为洪水沉积指标,其对洪水事件沉积的敏感性可能受 Ti、Zr 粒度富集效应影响,Zr/Rb 比值对洪水事件沉积较敏感。

19 世纪冷期与 20 世纪暖期相比,暖期黄茅潭洪水发生频率为 2.1 次/10 a,冷期为 1.7 次/10 a,暖期高于冷期。年代际尺度上,1820s-1840s、1860s-1870s 为 19 世纪冷期黄茅潭洪水高频期,这两个阶段对应东亚夏季风偏强,长江中下游地区降雨较多;20 世纪黄茅潭洪水基本随 1920s-1940s、1980s-1990s 两个变暖阶段而高频出现,这与长江中下游大洪水演变特点一致。

参考文献 (References)

- 陈诗越,王苏民,金章东,等. 2003. 青藏高原中部湖泊沉积物中 Zr/Rb 值及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 23(4): 35-38. [Chen S Y, Wang S M, Jin Z D, et al. 2003. Variation of Zr/Rb ratios in lacustrine sediments of the central Tibetan Plateau and its environment implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 23(4): 35-38.]
- 葛兆彬,杨达源,李徐生,等. 2004. 晚更新世晚期以来的长江上游古洪水记录[J]. 第四纪研究, 24(5): 555-560. [Ge Z S, Yang D Y, Li X S, et al. 2004. The paleoflooding record along the up reaches of the Changjiang River since the Late Pleistocene Epoch[J]. Quaternary Sciences, 24(5): 555-560.]
- 何璐瑶,胡超涌,黄俊华,等. 2009. 石笋氧同位素指示东亚季风大尺度环流特征[J]. 第四纪研究, 29(5): 950-956. [He L Y, Hu C Y, Huang J H, et al. 2009. Characteristics of large-scale circulation of East Asian monsoon indicated by oxygen isotope of stalagmites[J]. Quaternary Sciences, 29(5): 950-956.]
- 黄春长,庞奖励,查小春,等. 2011. 黄河流域关中盆地史前大洪水研究:以周原漆水河谷地为例[J]. 中国科学:地球科学, 41(11): 1658-1669. [Huang C C, Pang J L, Zha X C, et al. 2011. Prehistorical floods in the Guanzhong Basin in the Yellow River drainage area: A case study along the Qishuihe River Valley over the Zhouyuan Loess Tableland [J]. Scientia Sinica Terrae, 41(11): 1658-1669.]
- 江西省湖口县志编纂委员会. 1992. 湖口县志[M]. 南昌:江西人民出版社. [The Hukou County Annals Compiling Commission of Jiangxi Province. 1992. Hukou xianzhi [M]. Nanchang, China: Jiangxi People's Publishing House.]
- 赖忠平,欧先交. 2013. 光释光测年基本流程[J]. 地理科学进展, 32(5): 683-693. [Lai, Z P, OU X J. 2013. Basic procedures of optically stimulated luminescence (OSL) dating [J]. Progress in Geography, 32(5): 683-693.]
- 李茜,魏凤英,李栋梁. 2011. 近 159 年东亚夏季风年代际变化与中国东部旱涝分布[J]. 地理学报, 66(1): 25-37. [Li Q, Wei F Y, Li D L. 2011. Interdecadal variations of East-Asian summer monsoon and drought/flood distribution over Eastern China in last 159 years[J]. Acta Geographica Sinica, 66(1): 25-37.]
- 李永飞,于革,沈华东,等. 2012. 太湖沉积对流域极端降水和洪水响应的研究[J]. 沉积学报, 30(6): 1099-1105. [Li Y F, Yu G, Shen H D, et al. 2012. Study on lacustrine sediments responding to climatic precipitation and flood discharge in Lake Taihu Catchment, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 30(6): 1099-1105.]
- 凌光久,贾玉连,马春梅,等. 2016. 内蒙古黄旗海中晚全新世(3580~1630cal. a B. P.)气候环境记录[J]. 第四纪研究, 36(2): 257-267. [Ling G J, Jia Y L, Ma C M, et al. 2016. Mid-Late Holocene (3580~1630cal. a B. P.) climate and environment records from Huangqihai Lake in Inner Mongolia[J]. Quaternary Sciences, 36(2): 257-267.]
- 刘连文,陈骏,陈旻,等. 2002. 最近 130 ka 以来黄土中 Zr/Rb 值变化及其对冬季风的指示意义[J]. 科学通报, 47(9): 702-706. [Liu L W, Chen J, Chen Y, et al. 2002. Variation of Zr/Rb ratios on the Loess Plateau of central China during the last 130000 years and its implications for winter monsoon[J]. Chinese Science Bulletin, 47(15): 1298-1302.]
- 闵騫,汪泽培. 1992. 鄱阳湖近五百年较大洪水出现规律的初步分析[J]. 江西水利科技, 18(1): 76-83. [Min Q, Wang Z P. 1992. A preliminary investigation on regulations of the appearance of heavier floods in Poyang Lake in recent 500 years[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 18(1): 76-83.]
- 闵騫,汪泽培. 1994. 鄱阳湖近 600 年洪水规律的分析[J]. 湖泊科学, 6(4): 375-383. [Min Q, Wang Z P. 1994. On the regularity of flood occurrences in Poyang Lake in the past 600 years[J]. Journal of Lake Sciences, 6(4): 375-383.]
- 沈吉,薛滨,吴敬禄,等. 2010. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京:科学出版社. [Shen J, Xue B, Wu J L, et al. 2010. Hu-po chenji yu huanjing yanhua[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 施雅风,姜彤,苏布达,等. 2004. 1840 年以来长江大洪水演变与气候变化关系初探[J]. 湖泊科学, 16(4): 289-297. [Shi Y F, Jiang T, Su B D, et al. 2004. Preliminary analysis on the relation between the evolution of heavy floods in the Yangtze River Catchment and the climate changes since 1840[J]. Journal of Lake Sciences, 16(4): 289-297.]
- 史小丽,秦伯强. 2009. 近百年来长江中游网湖沉积物粒度

- 特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 29(2): 117-122. [Shi X L, Qin B Q. 2009. Grain-size characteristics and their environmental significance of Wanghu Lake sediments in the middle reach of Yangtze River[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 29(2): 117-122.]
- 王敏杰, 郑洪波, 谢昕, 等. 2010. 长江流域600年来古洪水: 水下三角洲沉积与历史记录对比[J]. 科学通报, 55(44): 3320-3327. [Wang M J, Zheng H B, Xie X, et al. 2011. A 600-years flood history in the Yangtze River drainage: Comparison between a subaqueous delta and historical records[J]. Chinese Science Bulletin, 56(2): 188-195.]
- 王绍武. 2001. 现代气候学研究进展[M]. 北京: 气象出版社. [Wang S W. 2001. Xiandai qihouxue yanjiu jinzhan[M]. Beijing, China: China Meteorological Press]
- 温克刚. 2006. 中国气象灾害大典. 江西卷[M]. 北京: 气象出版社. [Wen K G. 2006. Zhongguo qixiang zaihai dadian. Jiangxi juan[M]. Beijing, China: China Meteorological Press.]
- 杨晓燕, 夏正楷, 崔之久. 2005. 黄河上游全新世特大洪水及其沉积特征[J]. 第四纪研究, 25(1): 80-85. [Yang X Y, Xia Z K, Cui Z J. 2005. Holocene extreme floods and its sedimentary characteristic in the upper reaches of the Yellow River[J]. Quaternary Sciences, 25(1): 80-85.]
- 展望, 杨守业, 刘晓理, 等. 2010. 长江下游近代洪水事件重建的新证据[J]. 科学通报, 55(19): 1908-1913. [Zhan W, Yang S Y, Liu X L, et al. 2010. Reconstruction of flood events over the last 150 years in the lower reaches of the Changjiang River[J]. Chinese Science Bulletin, 55(21): 2268-2274.]
- 张德二, 陆龙骅. 2011. 历史极端雨涝事件研究: 1823年我国东部大范围雨涝[J]. 第四纪研究, 31(1): 29-35. [Zhang D E, Lu L H. 2011. Study of the large extent flooding over Eastern China in 1823 as one of the extreme climatic events in history[J]. Quaternary Sciences, 31(1): 29-35.]
- 张静然, 贾玉连, 申洪源, 等. 2011. 湖泊沉积物不同粒级组成的元素含量特征及其环境指示意义: 以内蒙古黄旗海为例[J]. 沉积学报, 29(2): 381-387. [Zhang J R, Jia Y L, Shen H Y, et al. 2011. Element features in different grain size fractions of lacustrine sediment and their environmental implication: A case study of Huangqihai Lake[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 29(2): 381-387.]
- 赵侃, 陈仕涛, 崔英方, 等. 2015. 神农架石笋记录的近200年东亚季风变化及其ENSO响应[J]. 地理研究, 34(1): 74-84. [Zhao K, Chen S T, Cui Y F, et al. 2015. East Asian monsoon changes and its ENSO response revealed by a 200-year stalagmite record from Yongxing Cave on the Mountain Shengnonjia[J]. Geographical Research, 34(1): 74-84.]
- 中央气象局气象科学研究所. 1981. 中国近五百年旱涝分布图集[M]. 北京: 地图出版社. [Academy of Meteorological Science of China Central Meteorological Administration. 1981. Yearly charts of Dryness/Wetness in China for the last 500-year Period[M]. Beijing, China: Cartographic Publishing House.]
- Campbell C. 1998. Late Holocene lake sedimentology and climate change in southern Alberta, Canada[J]. Quaternary Research, 49(1): 96-101.
- Cuven S, Francus P, Lamoureux S F. 2010. Estimation of grain size variability with micro X-ray fluorescence in laminated lacustrine sediments, Cape Bounty, Canadian High Arctic [J]. Journal of Paleolimnology, 44(3): 803-817.
- Dypvik H, Harris N B. 2001. Geochemical facies analysis of fine-grained siliciclastics using Th/U, Zr/Rb and (Zr+Rb)/Sr ratios[J]. Chemical Geology, 181(1-4): 131-146.
- Gilli A, Anselmetti F S, Ariztegui D, et al. 2003. A 600-year sedimentary record of flood events from two sub-alpine lakes (Schwendiseen, Northeastern Switzerland) [M]// Beres M, Scheidhauer M, Marillier F. Lake systems from the ice age to industrial time. Basel, Switzerland: Springer: 49-58.
- Gilli A, Anselmetti F S, Glur L, et al. 2013. Lake sediments as archives of recurrence rates and intensities of past flood events[M]//Schneuwly- Bollschweiler M, Stoffel M, Rudolf-Miklau F. Dating torrential processes on fans and cones. Netherlands: Springer: 225-242.
- Hu C Y, Henderson G M, Huang J H, et al. 2008. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records[J]. Earth and Planetary Science Letters, 266(3-4): 221-232.
- Japan Meteorological Agency. 2001. Bulletin of the radioactivity[M]. Tokyo, Japan: JMA.
- Jones A F, Macklin M G, Brewer P A. 2012. A geochemical record of flooding on the upper River Severn, UK, during the last 3750 years[J]. Geomorphology, 179: 89-105.
- Last W M, Smol J P. 2001. Tracking environmental change using lake sediments, volume 1: Basin analysis, coring, and chronological techniques[M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers: 171-196.
- McManus J, Duck R W. 1993. Geomorphology and sedimentology of lakes and reservoirs[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Moreno A, Valero-Garcés B L, González-Sampériz P, et al. 2008. Flood response to rainfall variability during the last 2000 years inferred from the Taravilla Lake record (Central Iberian Range, Spain)[J]. Journal of Paleolimnology, 40(3): 943-961.

- Parris A S, Bierman P R, Noren A J, et al. 2010. Holocene paleostorms identified by particle size signatures in lake sediments from the northeastern United States[J]. *Journal of Paleolimnology*, 43(1): 29-49.
- Vasskog K, Nesje A, Støren E N, et al. 2011. A Holocene record of snow-avalanche and flood activity reconstructed from a lacustrine sedimentary sequence in Oldevatnet, Western Norway[J]. *The Holocene*, 21(4): 597-614.
- Wilhelm B, Arnaud F, Enters D, et al. 2012. Does global warming favour the occurrence of extreme floods in European Alps? First evidences from a NW Alps proglacial lake sediment record[J]. *Climatic Change*, 113(3-4): 563-581.
- Wilhelm B, Arnaud F, Sabatier P, et al. 2013. Palaeoflood activity and climate change over the last 1400 years recorded by lake sediments in the north-west European Alps[J]. *Journal of Quaternary Science*, 28(2): 189-199.
- Xiang L, Lu X X, Higgitt D L, et al. 2002. Recent lake sedimentation in the middle and lower Yangtze Basin inferred from ^{137}Cs and ^{210}Pb measurements[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 77-86.

A 240-year sedimentary record of paleoflood events from the Huangmaotan Lake, northern Jiangxi Province

WU Shuang¹, LIU Qian¹, CAO Xiangming¹, LAI Zhongping², CHEN Yuanhui¹, JIA Yulian^{1,3*}

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Nanchang 330022, China)

Abstract: Paleoflood reconstruction is one of the foci of global change research and in the last decades, increasingly more attention has been paid to investigate lacustrine sediments to identify sedimentary proxies (such as chemical, physical) and extract environmental information of flood events. This article attempts to elucidate the issue based on recent Huangmaotan lacustrine sediments and reconstructs the regional paleoflood records of northern Jiangxi since the Little Ice Age. This investigation, using the ^{137}Cs and ^{210}Pb -based chronology, first presents a comparative analysis of grain size parameters, geochemical indices of sediments, and annual number of days with rainfall >50 mm during the last 60 years. It indicates that the particle size parameters, including (coarse silt+sand)/clay ratios, mean grain size (um), and ratios of Zr/Rb, Zr/Fe, and Ti/Rb correlated well with 11 of the 13 flood events recorded in historical documents during 1950-2010, which suggests that these indices can be applied to identify flood events from lacustrine sediments. Based on these indices, 23 of the 31 flood events during 1769-1950 recorded in historical documents are identified. The study indicates that: (1) Zr/Rb, Zr/Fe, and Ti/Rb ratios, (coarse silt + sand)/clay ratio, and mean grain size are sensitive to flood-event deposits, especially Zr/Rb ratios. Strong catchment erosion during flooding periods and intensified river discharge, we argue, are favorable conditions for the delivery of more coarse particles to the lake to deposit. This type of horizons, with high Zr and Ti, and low Fe and Rb, contrast with background lacustrine sediments. (2) This study also demonstrates that there were more floods occurred during the recent warm period (1900-2010) compared with the last cold stage of the Little Ice Age (1800-1900). (3) On multi-decadal time scales, regional floods were high-frequency incidence in the 1820s-1840s and the 1860s-1870s, when the East-Asian summer monsoon was stronger and rainfall was above normal in the middle and lower reaches of the Yangtze River catchment, and in two warm phases (the 1920s-1940s and the 1980s-1990s), consistent with the characteristics of heavy floods in the middle and lower reaches of the Yangtze River during the 20th century. The study provides a scientific basis for reconstructing paleoflood change by lacustrine sediments, and extends the time series of flood events by lake sediments.

Key words: lacustrine sediments; flood proxy; grain size; Zr/Rb; Huangmaotan Lake