

近百年来长江水下三角洲高分辨率洪水沉积记录及其控制机理

韦璐, 范代读*, 吴伊婧, 任发慧

WEI Lu, FAN Daidu*, WU Yijing, REN Fahui

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

摘要:夏季洪涝灾害对长江流域社会经济造成了严重的影响,急需开展多时空尺度流域洪水发生规律和控制机理的研究,但因洪水器测数据年限短和缺少有效的古洪水沉积记录研究方法而难以实现。选取长江水下三角洲 YEC1701 柱状样顶部 100 cm 进行高分辨率 XRF 岩心连续扫描(XRFCS),粒度、有机碳、N 元素、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 ^{210}Pb 定年分析,并与流域洪水器测或历史记录等进行对比研究,以期建立高效的古洪水沉积记录代用指标。结果表明,长江水下三角洲沉积物中 Zr/Rb 峰值通常对应粒度粗组分高值和较高的 C/N 值、偏负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,所在层位的沉积年龄与流域洪水事件发生年份有很好的对应关系。由此判断, Zr/Rb 值可作为判别长江古洪水沉积的重要代用指标。长江流域于 1930—2017 年间共发生 22 次洪水事件,利用 XRFCS 获得的 10 mm 和 2 mm 间隔 Zr/Rb 值可分别识别出其中的 11 次和 18 次,识别率为 50% 和 80%。由此推荐 XRFCS 样品测试间隔要小于年沉积速率一半以内,以提高古洪水事件的识别率。多源洪水和降雨数据分析表明,长江洪水年际至千年尺度发生规律主要受厄尔尼诺-南方涛动和东亚夏季风、南亚夏季风活动的共同影响。但早期长江洪水资料分辨率较低,长江水下三角洲有较连续的洪水沉积记录,运用 XRFCS 毫米级分辨率的 Zr/Rb 值可重建全新世高分辨率的长江古洪水发生历史,更精细地分析气候变化对洪水发生规律的控制机理,为预测全球变化背景下长江洪水演变趋势提供依据。

关键词:长江;洪水沉积;Zr/Rb 值;东亚夏季风;南亚夏季风

中图分类号:P333;TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)05-0707-14

Wei L, Fan D D, Wu Y J, Ren F H. High resolution flood records in the Yangtze subaqueous delta during the past century and control mechanism. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(5): 707–720

Abstract: Summer flood hazards have a strong influence on the social economy of the Yangtze River Basin, so it is in dire need of investigating multiple spatiotemporal variations in floods and control mechanisms, but this is handled by short time extent of instrumental flood data and lack of effective research methods for palaeoflood deposition records. A sediment core (YEC1701) collected from the Yangtze subaqueous delta was studied in detail with its top 100 cm through using high-resolution XRF core scanner (XRFCS), and measurements of grain size, organic carbon and nitrogen, stable carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$), and ^{210}Pb compositions. The above study results were compared with the observing instruments or documental flood data to establish an effective proxy for paleo-flood depositions by comparison with instrumental or documental flood data. The results show that the peak value of Zr/Rb in the subaqueous delta sediments of the Yangtze River usually corresponds to the high value of coarse grain composition, the high value of C/N, and the negative value of $\delta^{13}\text{C}$. The sedimentary age of the strata in the delta corresponds well to the year of flood events in the basin. Therefore, the Zr/Rb ratio can be used as an important proxy index for the identification of palaeo-flood sediments in the Yangtze River. Totally, 22 flood events occurred in the period 1930—2017 in the Yangtze River basin, 11 and 18 of which were identified by the XRFCS Zr/Rb

收稿日期:2021-01-15;修订日期:2021-02-24

资助项目:上海市教委科研创新计划自然科学基金重大项目《河口动力地貌系统状态转变与潜在海洋地质灾害预警》(批准号:2021-01-07-00-07-E00093)

作者简介:韦璐(1995-),女,在读硕士生,从事海洋沉积学研究。E-mail:625695571@qq.com

* 通信作者:范代读(1972-),男,博士,教授,从海洋地质学研究。E-mail:ddfan@tongji.edu.cn

data in terms of 10 mm and 2 mm measurement intervals with effective recognition rates of 50% and 80% respectively. It is therefore recommended to perform XRFCS measurement with a smaller interval than half of sedimentation rates for better recognition rates of flood events. Multiple source data of river floods and precipitations were analyzed to show that river floods in Yangtze River basin are majorly influenced by ENSO (El Niño–Southern Oscillation), EASM (East Asian summer monsoon) and SASM (South Asian summer monsoon) over different time scales from multiple years to millennium. However, the time resolution for earlier flood records is very low, and it can be greatly improved by employing XRFCS mm-scaled Zr/Rb ratio of continuous flood depositions in the Yangtze subaqueous delta. This will also improve our understanding of controlling mechanisms of flood events and then better prediction of flood variation in response to global climate change.

Key words: Yangtze; flood deposition; Zr/Rb ratio; ENSO; East Asian summer monsoon; South Asian summer monsoon

流域洪水是造成社会经济损失和人员伤亡最严重的自然灾害之一,近年受气候变化、人口增长、社会经济发展等影响,洪灾频次和致灾程度都在增加^[1-3]。极端降雨事件引发的洪水与全球变暖的关系是大家关注的焦点,重建长时间尺度洪水事情发生频次、规律与控制机制成为相关研究的重要内容。准确的洪水器测记录只有几十年历史,利用文字记载和沉积记录可以有效延长洪水发生历史^[4-6]。后者是利用古洪水事件沉积的代用指标,尽可能准确地、完整地列举沉积记录中的洪水事件,并尽可能精确地确定洪水发生的时间^[7-10]。大河流域洪水灾害尤为突出,掌握其长时间序列极端洪水事件的发生规律及影响机制,对有效预测全球变化背景下流域洪水的演化趋势,采取有效措施防控洪涝灾害与水资源管理等均具有重要意义。

洪水期间急剧增强的河流动力可输运更多粗的陆源颗粒物到河口沉积,形成沉积结构、有机质、元素地球化学组成上均有别于非洪水的沉积单元,可据此建立判别古洪水事件沉积的代用指标^[10-11]。元素 Zr/Rb 值在成岩作用中较稳定,被认为是重建古洪水的有效指标^[11-13];其中 Zr 主要富集于锆石等相对粗颗粒的重矿物中,而 Rb 更易富集于粘土矿物等细颗粒组分中,因此 Zr/Rb 值能够反映沉积物中粗-细颗粒的相对含量变化^[12,14],河口沉积单元具有高的 Zr/Rb 值可能是洪水事件所致^[6,9]。

长江年均径流量约 $8.93 \times 10^{11} \text{ m}^3$,年均输沙量达 $3.68 \times 10^8 \text{ t}$ (1951—2015 年),因处在亚热带季风区,受季节性降雨的影响,65% 的径流量集中于夏季 (5~10 月) 入海^[15],并常形成暴雨洪灾,给流域内社会经济和人民生产生活造成了严重威胁^[5,16]。2020 年长江流域特大洪涝灾害造成 7047.1 万人次受灾,直接经济损失达 2143.1 亿元^[17]。洪水极大地改变了河口的沉积地貌^[18],并在水下三角洲形成相应的

沉积单元^[19],因此可通过相关沉积特征研究重建历史洪水事件。Wang 等^[6]利用长江水下三角洲钻孔岩心粒度和 Zr/Rb 值,重建了长江流域 1350—1950 AD 高分辨率古洪水记录。Hu 等^[9]利用长江口外短柱样沉积物中的 Zr/Rb 值和粒度敏感组分,识别出 1887 年以来发生的 20 次长江洪水事件。

然而,台风暴潮、冬季强风浪等极端事件,同样能通过改变水动力环境影响河口沉积物的 Zr/Rb 值^[20-21]。利用 Zr/Rb 值进行古洪水重建时,基本未考虑非洪水因素的影响,存在误判的可能性,因此需结合其他指标来验证高 Zr/Rb 值是流域洪水事件所致。洪水可同时携带大量的有机质到河口沉积^[22],陆源有机质以较高的 C/N 值 (大于 12) 和偏负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (约 -27‰) 区别于海源有机质 (C/N 值: $6 \sim 8$, $\delta^{13}\text{C}$ 值: -20‰)^[23-25],可依此辅助判别河口沉积物高的 Zr/Rb 值是否为洪水事件所致。此外,河口洪水事件沉积的重建还受到取样间隔、测年准确性等的影响,保存下来的洪水事件沉积通常只有数毫米至几厘米,而代表高能的粗颗粒纹层常不超过 1 cm,急需运用高分辨的、连续的沉积柱状样分析方法,提高洪水事件沉积判别的有效性。

本次在长江水下三角洲选取可建立准确年龄框架的柱状样 YEC1701 开展历史洪水研究。首先通过粒度敏感组分变化和有机指标特征验证高 Zr/Rb 值对洪水事件的指示意义;其次通过流域洪水器测与文献记录对比,进一步论证不同测试间隔获取的 Zr/Rb 值对流域洪水事件的识别效率;最后基于 YEC1701 中恢复的近百年洪水资料,以及前人从历史文献、地质记录重建的中长时间尺度长江古洪水资料,通过主控因素与厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO; El Niño–Southern Oscillation)、南亚夏季风、东亚夏季风活动规律的精细对比,探讨气候变化对长江流域洪水时空变化规律的控制机制。

1 现代长江三角洲地质概况

现代长江三角洲指以徐六泾为节点的三次分汊四口入海的新格局。长江主泓从 19 世纪中叶由北支改道南支,之后从北支下泄的径流量占比快速下降,至 1958 年后已持续低于 5%^[26-27]。进入南支的主泓时,时而以南港为下泄主通道,时而改为北港,存在数十年不等的周期性摆动。长江水下三角洲向东一直延伸至水深 50~60 m(图 1-b),可进一步划分为 3 个沉积相带^[31],三角洲前缘浅滩(水深小于 5 m)以细砂、粉砂质沉积为主,三角洲前缘斜坡(水深介于 5~10 m 和 10~30 m 之间)以粉砂和粘土质粉砂为主,前三三角洲(水深介于 10~30 m 和 40~60 m 之间)以粉砂质粘土为主。再向东过渡为泥质砂和中外陆架变余砂(图 1-b)。

夏季长江携带巨量泥沙入海,约 40% 泥沙沉积在口门附近,其余部分先沉积在水下三角洲,冬季受到强风浪作用再悬浮往南或其他方向输运。除径流外,长江口属中等潮差环境,口门处平均潮差为 2.6 m;波浪作用较弱,但每年会受到强台风和冬季风暴的影响。口外会受到沿岸流、台湾暖流等的影响^[32]。

2 材料与方法

2.1 研究材料

本次研究的 YEC1701 柱状样为同济大学 2017 年执行 YEC 夏季航次取得的重力柱状样,采自水深 22.4 m 的长江水下三角洲(北纬 30°57.1′、东经 122°44.3′,图 1),柱长 4.05 m。在实验室内将柱样对半剖开,一半岩心用薄膜封盖后冷藏保存,另一半岩心经表面平整处理拍照后进行 XRF 岩心无损扫描(XRFCS),再按 1 cm 间距进行分样,低温烘干后装入塑料样品袋,冷藏保存以备后续测试分析。

2.2 实验分析与数据处理

2.2.1 XRF 岩心扫描分析

岩心无损元素扫描使用 Avaatech 公司的 XRF 岩心扫描仪(XRFCS)。将剖开的岩心表面平整后覆上专用薄膜,分别在 10 kV、30 kV 和 50 kV 的工作电压下对 YEC1701 柱样以 1 cm 步长进行扫描,获得 27 种元素含量数据。根据沉积物柱中广泛发育毫米级厚的沙质纹层和较低的沉积速率,对顶部 1 m 岩心以步长 2 mm 进行加密扫描,目的是探讨

并建立基于沉积记录重建长江古洪水发生历史的有效指标和高效分析方法。

Avaatech XRF 岩心扫描仪为能量色散型 XRF,各元素含量数据为相对含量,元素测量结果以 cps(counts per second)表示^[33]。

2.2.2 粒度分析

以 4 cm 间距选取粒度测试样品,每个样品称量 0.3 g 左右置于 50 mL 离心管,先后加入 15 mL 30% 的 H_2O_2 和 15 mL 1 mol/L 的 HCl,分别去除有机质和碳酸盐,待反应结束后加去离子水清洗,重复此步骤直至上清液呈中性;上机测试前加入六偏磷酸钠溶液,超声振荡 15 min 使颗粒充分离散。测试分析使用 Beckman Coulter LS230 型全自动激光粒度仪,测量范围为 0.375~2000 μm ,粒径测量间隔为 0.135 ϕ ,重复测量的相对误差小于 1%。使用“粒径-标准偏差法”提取沉积物中的敏感粒度组分^[34-36]。

2.2.3 有机碳、N 元素和稳定碳同位素分析

取样间距和层位同粒度分析样品,每次取约 1 g 干样研磨后置于 15 mL 离心管,加入浓度 1 mol/L 的优级纯盐酸去除碳酸盐,将离心管置于 60℃ 水浴锅,每隔 2 h 振荡一次使充分反应,待 24 h 后反应结束,再用去离子水反复清洗样品至中性,冻干研磨后进行总有机碳(TOC)和总氮(TN)分析。有机元素分析使用 Elementar Vario EL Cube CN 系列有机元素分析仪进行测试。根据 TOC 测试结果,取 40 μg 有机碳沉积物于 DELTA plus XP 同位素质谱仪连接 Carlo Erba Instruments Flash 1112 分析仪进行测试,获得 $\delta^{13}C$ 数据。

2.2.4 年代测定

按照²¹⁰Pb 随深度衰变规律,以 2~8 cm 不等间距取 10 g 干样,用玛瑙研钵磨至无明显颗粒感,装入样品密封盒,封存 20 d 后待测。样品测试使用井式低本底高纯锗探头的 γ 能谱仪(GWL-120-15-LB-AWT, AMETEK),同时测量²¹⁰Pb、¹³⁷Cs、²²⁶Ra 等核素,具体测试方法见王晓慧等^[37],每个样品测试时间为 48 h。根据 CIC(恒定初始浓度)模式,基于²¹⁰Pb_{ex}(过剩²¹⁰Pb)深度剖面分段计算平均沉积速率,进而建立柱样年龄框架。

以上所有测试分析均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。

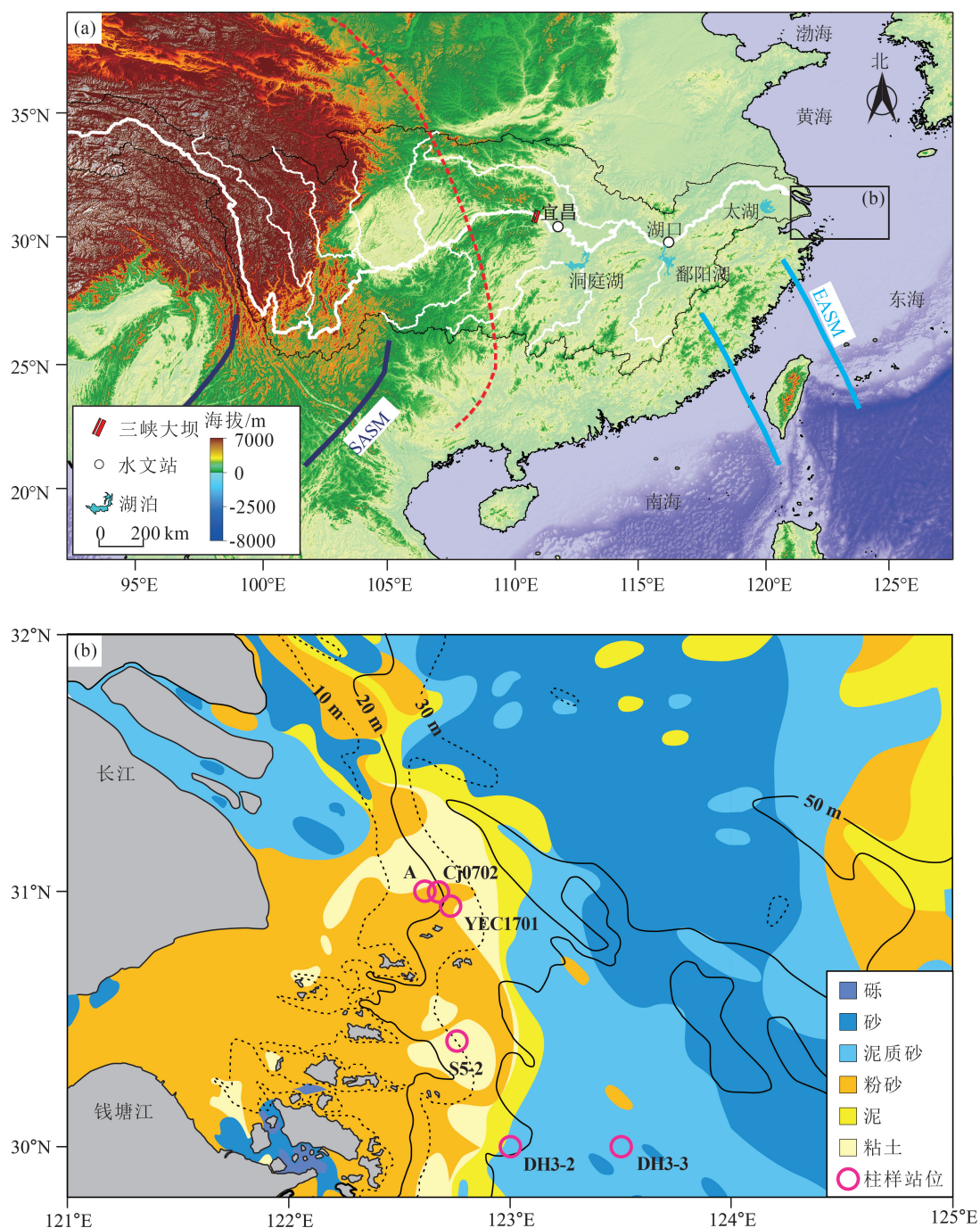


图1 长江流域主要水系(a)和长江口及周边海域表层沉积物分布特征(b,据参考文献[28]修改)
(其他文献中用于古洪水研究的5个短柱样位置(A^[29]、Cj0702^[9]、S5-2^[20]、DH3-2、DH3-3^[11])；a图中红色虚线表示南亚夏季风(SASM)和东亚夏季风(EASM)主要影响区域的分界线(据参考文献[30]修改))

Fig. 1 Major tributaries of the Yangtze River system (a) and grain-size distribution pattern of surface sediments in the Yangtze Estuary and adjacent seas (b)

3 结果

3.1 岩性、粒度特征与敏感组分

YEC1701 柱状样岩性较单一,以粘土质粉砂为

主,夹薄的粉砂质纹层(图2)。砂、粉砂和粘土的含量分别为 0.1%~2.5% ($1.1 \pm 0.7\%$)、64.9%~84.3% ($70.0 \pm 4.1\%$)、13.2%~34.4% ($29.0 \pm 4.6\%$),各组分含量变化范围较小。平均粒径 M_z 波动范围为 5.8~

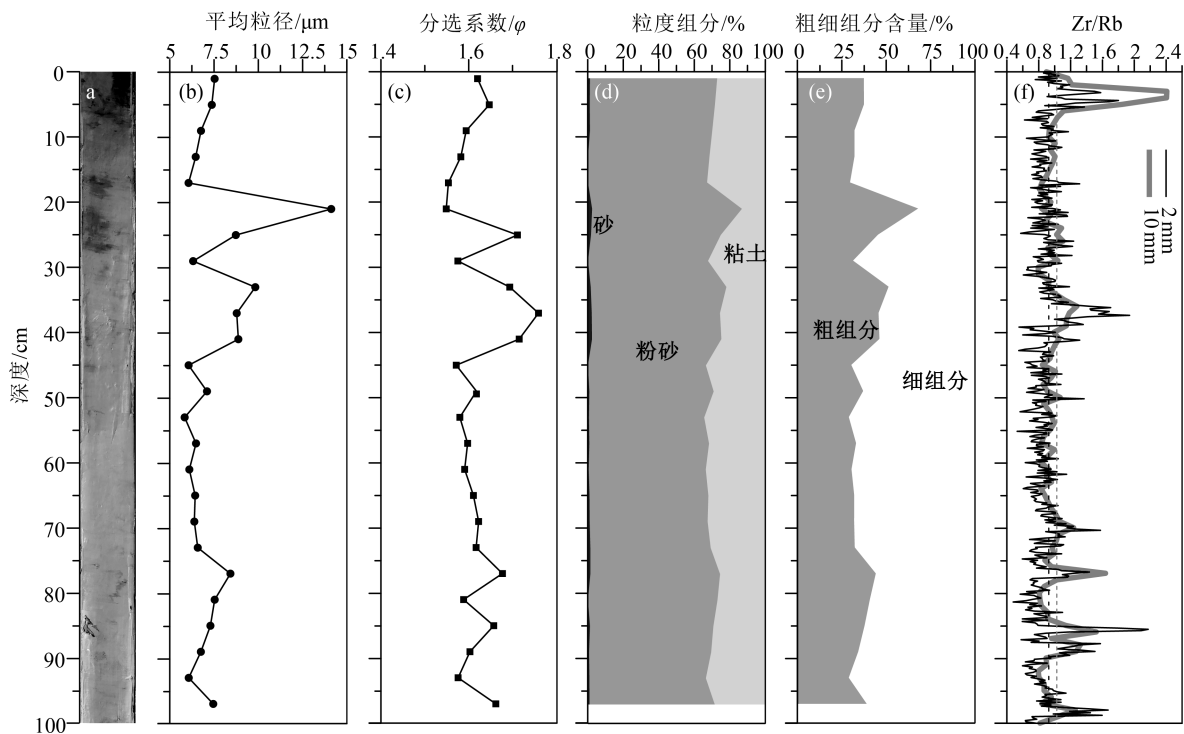


图 2 YEC1701 柱状样沉积物岩性、粒度特征、敏感组分与 Zr/Rb 值的垂向变化

Fig. 2 Downcore variations of the lithology, grain size parameters, sensitive grain populations, and Zr/Rb ratio in core YEC1701

14.1 μm , 平均值为 $7.4 \pm 1.7 \mu\text{m}$; 分选系数 SD 波动范围为 $1.55 \sim 1.76 \phi$, 平均值为 $1.62 \pm 0.05 \phi$, 分选性较差。

通过粒度-标准偏差法识别出 YEC1701 柱样有 3 个敏感组分(图 3-a), 标准偏差的 3 个峰值对

应的粒级是对沉积环境最敏感的粒级: $5.4 \mu\text{m}$ 、 $28.7 \mu\text{m}$ 和 $106.0 \mu\text{m}$ 。3 个组分的分界约为 $11.3 \mu\text{m}$ 和 $96.6 \mu\text{m}$, 其中最粗组分在柱样中最多占 0.8%, 因此在后续统计分析时将其与中间组分合并统称为粗组分(图 3-a)。

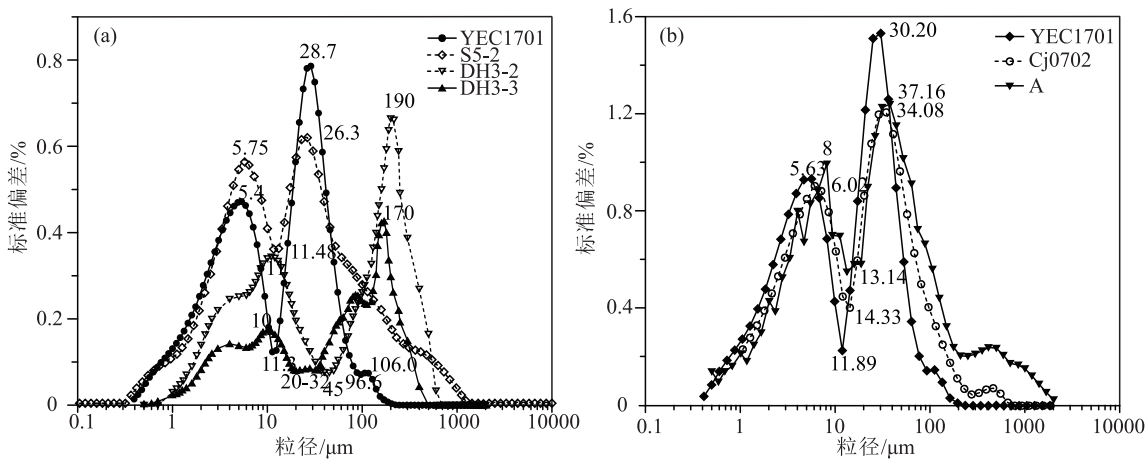


图 3 柱状样沉积物粒度-标准偏差曲线对比

(其他柱样位置和数据来源详见图 1)

Fig. 3 Grain size-standard deviation curves of sediment cores in the Yangtze Delta with different statistical intervals

a—单粒径测量通道(0.135ϕ); b—双粒径测量通道(0.27ϕ)

柱样中大于 $11.3\ \mu\text{m}$ 的粗组分含量在 37% 左右波动(图 2)。除“锯齿”型波动变化外,柱样粒度参数整体增减趋势不明显,粗、细组分含量随深度变化幅度不大,表明该孔所处的沉积环境相对稳定,适合开展高分辨率的古环境重建工作。但在个别层位,如 21 cm、25 cm、33~41 cm 和 77 cm 处粒度变粗,粗组分含量突然增加,反映了强水动力事件的扰动,可能是洪水或风暴等极端高能事件所致。

3.2 Zr/Rb 值特征

YEC1701 柱样 10 mm 间距 XRFCS 得到的 Zr/Rb 值变化范围为 0.800~2.411,平均值为 1.024 ± 0.259 。柱样 2 mm 间距 XRFCS 得到的 Zr/Rb 值变化范围为 0.487~2.176,平均值为 0.924 ± 0.231 。二者波动趋势较吻合,在埋深 3~5.4 cm、17~17.4 cm、26~28.2 cm、36~41.2 cm、50.2 cm、69.8~70.4 cm、76.8~77 cm、85.4~89 cm、97.8~98.8 cm 等层位出现明显峰值(图 2)。

3.3 有机元素和同位素组成特征

YEC1701 柱样中 TOC 和 TN 含量总体变化不大(图 4)。TN 含量为 0.088%~0.119%,平均值为 $0.102 \pm 0.006\%$;TOC 含量为 0.40%~0.58%,平均值为 $0.51 \pm 0.05\%$,二者基本落在现代长江水系沉积

物的有机元素组成范围内^[38]。TN 和 TOC 含量的垂向变化趋势相似,且显著正相关,相关系数达 0.75。C/N 值随深度变化不大,在 4.5~5.5 范围内波动,平均值为 4.9。柱样 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 -23.9‰ ~ -23.1‰ ,平均值为 -23.5‰ ,柱样上部 45 cm 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较下部明显偏负。

3.4 年代框架的建立

YEC1701 柱样沉积物中的补给 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{su}}$)通过测量 ^{226}Ra 获得,垂向无明显变化趋势,平均值为 $2.06 \pm 0.18\ \text{dpm/g}$ (图 5-a)。过剩 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)由沉积物 ^{210}Pb 总量扣除得到 $^{210}\text{Pb}_{\text{su}}$, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 深度剖面整体符合随深度增加比活度不断减小的特征,自上而下可分为 3 段(图 5-a)。顶部 9 cm $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 分布较不规则,结合该段岩心有一定扰动(图 2),可能是取样或生物扰动造成的,属于混合层不参与沉积速率计算。第二段 9~75 cm 为第一个衰减层,除去低于检出限的部分值后,拟合通过 CIC 模式计算得到该段平均沉积速率为 1.62 cm/a,假设混合层底界 9 cm 处对应取样时间 2017 年,按照平均沉积速率计算得到埋深 75 cm 处的沉积时间应为 1976 年。第三段 75~100 cm 为第二个衰减层,拟合通过 CIC 模式计算得到该段平均沉积速率为 0.53 cm/a,按照平均沉积速

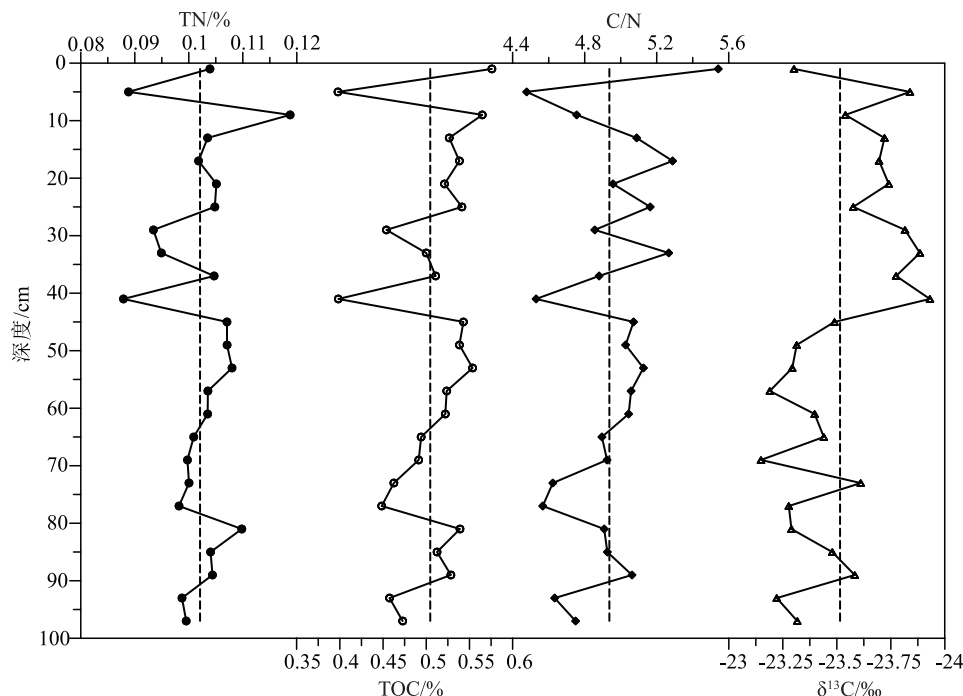


图 4 YEC1701 柱状样有机元素和碳同位素组成变化

Fig. 4 Variations of organic elements and stable carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$) in core YEC1701

率计算得到埋深 100 cm 处的沉积年龄为 1930 年。

YEC1701 柱样的 ^{137}Cs 深度剖面在 60~90 cm 处出现峰值, 向上逐渐减少, 判断该峰值对应北半球 1963 年的核试验峰, 由此计算得到柱样的平均沉积速率为 1.00~1.56 cm/a, 与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 分段拟合通过 CIC 模式计算得到的沉积速率相近。由于 ^{137}Cs 蓄积峰较宽(图 5-b), 在建立年代框架时主要依据 ^{210}Pb 定年结果。

4 讨 论

4.1 长江口洪水事件沉积的可靠判别指标

4.1.1 洪水沉积敏感组分和有机质组成特征

粒度-标准偏差法得到的粒度敏感组分对沉积物来源和水动力变化十分敏感, 可用于指示沉积事件^[9, 35-36]。已有若干研究运用该方法进行长江洪水事件沉积的识别, 均发现长江口外沉积物粒度主要由粗、细 2 个敏感组分构成(图 3), 且都认为粗组分敏感地记录了洪水事件发生频次^[9, 11, 20]。但不同柱

样粗组分粒级和标准偏差统计值差别较大, 部分原因可能是采用了不同粒级统计间隔造成的。为此, 按单粒径测量通道(0.135 ϕ)和双粒径测量通道(0.27 ϕ)2 种统计间隔进行粒级-标准偏差法分析, 并分别成图, 与文献中^[9, 11, 20, 29]对应的统计间隔分析结果进行对比(图 3)。结果发现, 2 种统计间隔对粗、细组分峰值对应的粒级影响较小, 如 YEC1701 柱样的 2 组值分别为: 5.4 μm 与 5.63 μm , 28.7 μm 与 30.2 μm ; 但双粒径测量通道统计法的标准偏差值基本是单粒径测量通道统计值的一倍左右。事件沉积主要关注不同组分的粒级范围和标准偏差峰值所对应的敏感粒级, 因此 2 种统计分析结果可以对比。

位于现代长江水下三角洲泥质区的 YEC1701、A、Cj0702 和 S5-2 柱样粗、细组分界限(11.3 μm 、13.14 μm 、14.33 μm 和 11.48 μm) 非常接近。已有研究表明, 长江悬沙组成物质较细, 平均粒径通常低于 13 μm ^[39]。由此判断, 这些细组分沉积物颗粒源自长江入海悬沙, 并以絮凝方式沉降为主, 对水

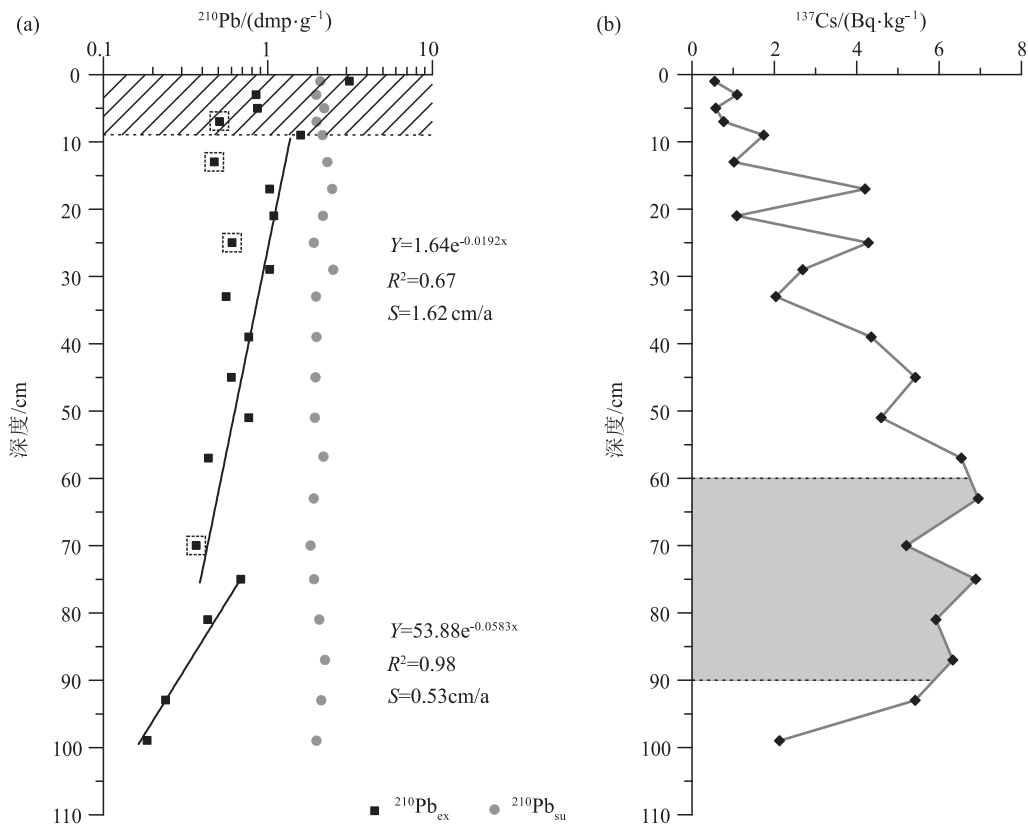


图 5 YEC1701 柱状样 ^{210}Pb (a) 和 ^{137}Cs (b) 深度剖面特征

(a 中斜线框标示顶部混合层; b 中灰色框标示 ^{137}Cs 蓄积峰范围)

Fig. 5 ^{210}Pb (a) and ^{137}Cs (b) concentration profiles and accumulation rate calculated from core YEC1701

动力反映较弱。但位于现代长江水下三角洲外的沙质区 DH3-2 和 DH3-3 柱样粗、细组分界限显著偏粗,分别为 20~32 μm 和 45 μm ^[11],且这 2 个柱样细组分的粒级-标准偏差曲线为双峰态,也不同于水下三角洲泥质区内 4 个柱样的单峰态,成因应更复杂,需对原始数据进行重新解释,才能更准确地揭示其所蕴含的物源和水动力信息。

YEC1701 柱样的粗组分标准偏差峰值出现在粒径 28.7~30.2 μm ,与同样位于现代长江水下三角洲泥质区的相邻站位柱样 A (37.16 μm)、Cj0702 (34.0 μm) 和较远的柱样 S5-2 (26.3 μm) 均可对比^[9,20,29]。这些粗组分以中、粗粉砂和极细砂为主,它们应以单颗粒运动为特征,对强水动力事件敏感,因此粗组分在柱样中的时间序列变化被认为是长江流域洪水事件的可靠沉积记录^[9,20]。位于现代长江水下三角洲外沙质区的柱样 DH3-2 和 DH3-3 的粗组分也被解释为长江洪水事件沉积记录^[11],但该粗组分以细砂为主,标准偏差峰值对应的粒径分别为 190 μm (DH3-2) 和 170 μm (DH3-3)^[11],也显著大于现代长江水下三角洲泥质区 4 个柱样的粗组分峰值粒径 (26.3~37.16 μm)。笔者认为,洪水不可能携带细砂粒级沉积物越过上百千米宽的水下三角洲泥质区,进入沙质区沉积(图 1-b),更有可能是风暴沉积的结果,且物源来自东海外陆架的沙质区而非现代河流输入。

长江水下三角洲粗组分沉积也不能完全排除风暴成因^[20-21]。统计发现,YEC1701 柱样粗组分含量高值通常对应较高的 C/N 值和偏负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(图 6)。洪水时期显著增加的径流量除携带大量的沉积物入海外,期间陆源有机质入海通量也会显著增加^[47]。研究表明,2011 年洪水期长江口表层沉积物 C/N 值大于枯水期,佐证了洪水是河流输出陆源有机质的主要贡献^[48]。此外,近海风暴沉积沙质层的海源有机质含量更高,表现为 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正和 C/N 值偏低,正好与河口洪水沉积沙质层的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负、C/N 值偏高等相反^[49]。综上所述,认为 YEC1701 柱样中大于 11.3 μm 的粗组分可作为长江流域洪水判别的沉积学指标。

长江水下三角洲沉积物变化还会受到长江入海主泓摆动、苏北沿岸流等的影响^[32]。苏北沿岸流可能带来黄河源物质,影响沉积物元素组成,但对季节性沉积物粗细变化应该影响不大^[32]。长江入

海主泓已从 19 世纪中叶稳定在南支河槽,尽管会在南、北港之间摆动^[26-27],但对南、北港岸外的 YEC1701 柱样位置影响不大(图 1-b)。近期长江入海泥沙部分来自长江中下游河床侵蚀,导致入海沉积物明显变粗,但这种较长尺度的趋势性变化应该不影响季节性沉积物粗细变化。尽管如此,这些较长周期的沉积物输入趋势性变化非常值得研究。

4.1.2 洪水沉积的 Zr/Rb 值判别特征和识别成效

尽管 YEC1701 柱样的粗组分含量变化可以有效判别长江洪水事件沉积,但因采样间隔大,时间分辨率低,目前只能据此初步划分出几次洪水多发期,难以确定特定年份的洪水事件(图 6)。XRFCS 可以等间距($\geq 1\text{ mm}$)扫描岩心,得到二十余种主量和微量元素的相对含量,通过选取特征元素比值可以显著提高事件沉积的分辨率^[6,13]。扫描间距越小耗时越长,考虑时效性通常采用 10 mm 等间距扫描岩心^[29]。Zr 和 Rb 因赋存的矿物不同,Zr/Rb 值被认为是陆源碎屑沉积物很好的粒度代用指标,已被广泛用于古洪水重建^[11-13]。通过同层位对比发现,YEC1701 柱样中高 Zr/Rb 值均很好地对应沉积物粗组分高值和较大的 C/N 值、偏负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。如 1999 年中下游大洪水和 1998 年全流域特大洪水所对应的粗粒沉积层 Zr/Rb 距平值高达 1, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -23.9‰。由此可见,YEC1701 柱样中的高 Zr/Rb 值可用来反演长江流域洪水事件的代用指标。

根据²¹⁰Pb_{ex} 沉积速率重建的沉积年龄,对比分析 YEC1701 柱样 10 mm 间距 Zr/Rb 距平值正峰值和长江流域历史洪峰流量数据,结果发现 1930—2017 年间共发生 22 次洪水事件,依据 Zr/Rb 值可识别出其中的 11 次,识别率仅为 50%(图 6-a,c;表 1)。较低的识别率可能因为 YEC1701 柱样沉积速率较低,其中 0~75 cm 平均沉积速率为 1.62 cm/a,而 75~100 cm 降为 0.53 cm/a,10 mm 的 XRFCS 扫描间隔无法很好地捕捉一些较薄的洪水事件沉积。

为了尽可能准确、完整地反演沉积记录中的洪水事件,按 2 mm 间距重新对 YEC1701 柱样顶部 1 m 岩心进行加密扫描。2 mm 间距的 Zr/Rb 距平值大于 0.15 的高值区段很好地对应长江流域历史洪峰高值(图 6-a,b),据此共识别出 1930—2017 年间的 18 次洪水事件,识别率为 80%,较 10 mm 间距的 Zr/Rb 值识别法提高了 60%。一些仍未被识别

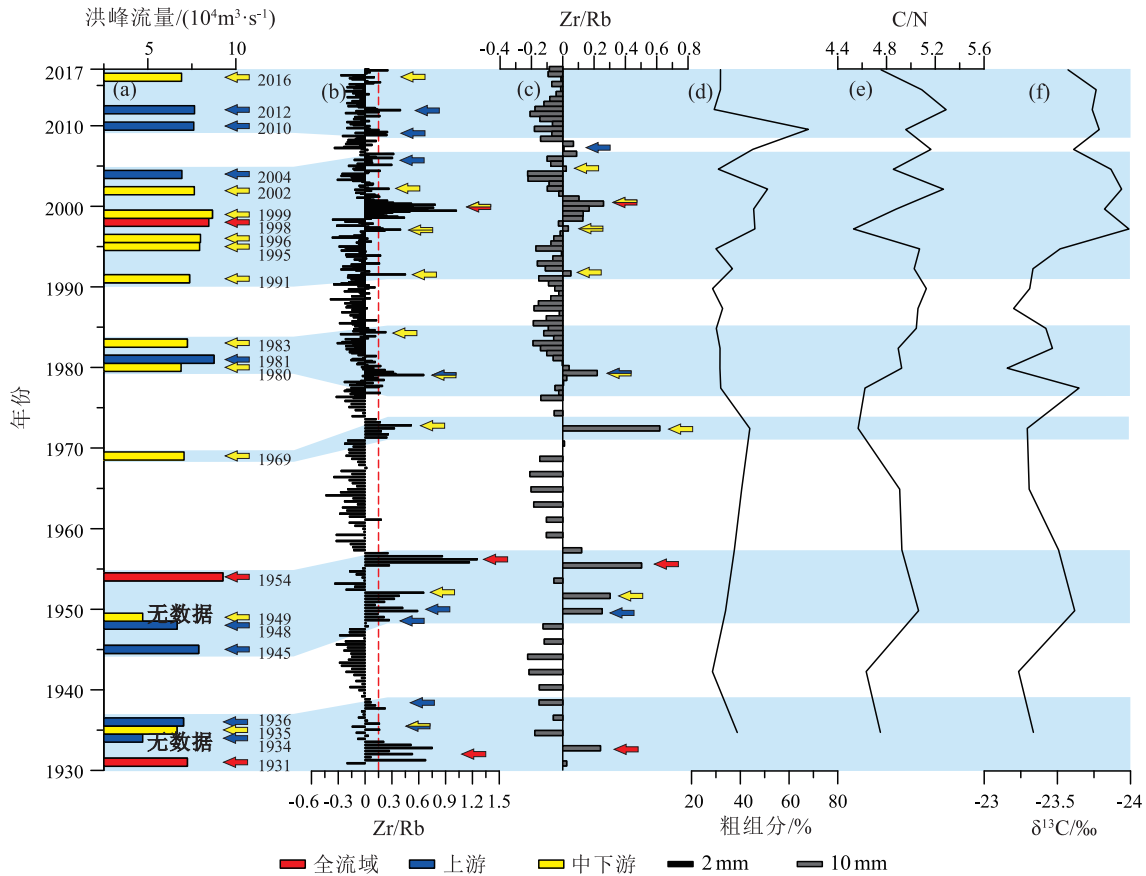


图 6 1930 年以来 YEC1701 柱样 Zr/Rb 距平值与粗组分含量、C/N 值、 $\delta^{13}\text{C}$ 值及历史洪水数据^[4, 42-48]对比
(蓝色阴影区域表示历史洪水多发时期)

Fig. 6 Comparison of Zr/Rb anomaly values, coarse grain-size population, C/N ratio, and $\delta^{13}\text{C}$ in core YEC1701 with historical flood events in the Yangtze watershed since 1930

出来的洪水事件通常是前后年都有大洪水发生,如 1934 年与 1935 年、1980 年与 1981 年、1995 年与 1996 年和 1998 年与 1999 年等,存在后发洪水事件改造先前洪水事件沉积的可能,以及 2 次事件沉积之间的细粒层较薄而未能被当前扫描间距的 XRFCS 所识别等原因。综上所述,认为高分辨率的 XRFCS 元素比值法为古洪水历史重建提供了高效的方法,连续扫描间距取年沉积速率值的一半以内为宜。

4.2 近百年长江流域洪水发生的主周期及影响因素

频谱分析已广泛应用于地层学周期性变化的探测,有助于更好地了解沉积记录在时间序列上的变化^[50]。为了探究长江流域洪水的发生规律,使用 Past3 软件中的 REDFIT 频谱分析功能对 YEC1701

柱样 2 mm 间距扫描的 Zr/Rb 值进行分析,Zr/Rb 值时间序列功率谱显示,经 95% 置信度水平检验存在 6.7 a、5.2 a 和 1.3 a 的周期(图 7)。现代 ENSO 的变化周期为 2~8 a^[51-52],而百年来的太平洋年代际涛动(PDO: Pacific Decadal Oscillation)数据分析显示其变化周期一般大于 10 a^[53-54]。在 YEC1701 柱样记录中,1930 年以来高分辨率 Zr/Rb 值的变化周期与 ENSO 周期吻合,并未体现 PDO 的影响,表明近百年来长江洪水发生主要受控于 ENSO 的变化。

ENSO 主要通过影响西太平洋副热带高压(WPSH: Western Pacific Subtropical High)的强度和位置进而影响季风雨带的位置,从而驱动长江流域的降水变化与洪水发生规律^[5, 55]。在厄尔尼诺现象(正相位 ENSO 事件)发生期间,WPSH 增强并向西

表 1 长江流域历史洪水信息
Table 1 Historical floods of Yangtze River

年份	洪峰流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水文站	区域	参考文献
2016	61300	汉口	中下游	[40]
2012	71200	三峡入库	上游	[41]
2010	70000	宜昌	上中游	[42]
2004	61100	宜昌	上游	[43]
2002	70300	汉口	中下游	[44]
1999	84500	大通	中下游	[4]
1998	81700	大通	全流域	[4]
1996	75200	大通	中游	[4]
1995	74500	大通	中下游	[4]
1991	66700	汉口	下游	[4]
1983	65000	汉口	中游及汉江流域	[4]
1981	85700	寸滩	上游	[4]
1980	60100	汉江	中下游	[4]
1969	62400	汉口	中下游	[4]
1954	92600	大通	全流域	[4]
1949	—	—	中下游	[4]
1948	57000	宜昌	上游	[45]
1945	73800	寸滩	上游	[4]
1936	62000	宜昌	上游	[45]
1935	56900	宜昌	中游	[46]
1934	—	—	上游	[4]
1931	65000	宜昌	全流域	[45]

扩展、向南移动^[56],同期东亚夏季风减弱,季风雨带不能像正常年份那样向华北推进,而是在长江中下游流域和华南地区持续存在,导致华南地区降水偏多、华北地区降水偏少^[55, 57-58]。已有研究显示,1936年、1954年、1983年和1998年发生的长江大洪水事件均和强厄尔尼诺现象有很大关系^[59]。Jiang等^[57]通过历史资料研究表明,公元1470—2003年长江流域上游的洪涝和干旱历史与 ENSO 活动有关。Zhu等^[60]通过石笋记录研究表明,全新世长江中游地区降雨和古洪水也与 ENSO 活动变强密切相关。可见,ENSO 是影响长江流域洪水年际至千年尺度变化的重要因素。

4.3 长江流域洪水时空变化的影响机制

全球范围内的洪水事件多与区域性强降雨有关^[61]。长江流域 6~9 月洪季平均径流量和年降水量的相关指数高达 0.87,且洪水事件的发生与气候

变化引起的强降雨密切相关^[5, 62]。除 ENSO 影响外,长江流域内不同区域季节降水变化明显受到东亚夏季风 (EASM) 和南亚夏季风 (SASM) 的调控^[63-67],进而影响流域洪水发生规律。通过时序分析,对比 1930 年以来 YEC1701 柱样的高分辨率洪水沉积记录、流域洪水器测资料及重建的其他气候数据,进一步探讨多重气候因素对长江洪水事件的影响机制。

器测资料表明,20 世纪 60 年代前多发上游和全流域大洪水,之后多发中下游洪水(图 8-g)。这 2 个阶段长江径流量与中下游流域梅雨带降水量存在反相关关系,即 20 世纪 60 年代前长江年径流量大,但中下游流域梅雨带降水量很少;而此后正好相反(图 8-e、f)。此外,这 2 个阶段的洪水对 ENSO 和亚洲夏季风的响应也不同。根据 Z_r/R_b 值等识别出的长江流域 6 个洪水事件多发期中(图 8),1930—1939 年和 1949—1957 年这 2 个洪水多发期与拉尼娜现象(负相位 ENSO 事件)有较好的对应关系,且为强 SASM 和 EASM 期;而 1971—1974 年、1976—1985 年、1991—2006 年、2009—2017 年这 4 个洪水多发期与厄尔尼诺呈现出较好的对应关系,为弱 SASM 和 EASM 期(图 8)。由此可见,2 个阶段的不同气候态是控制多年至年代际上游洪水或中下游洪水多发变化的主要因素。

历史资料重建结果表明,年代际至百年尺度长江中下游区域洪涝灾害主要与厄尔尼诺有关,但在长江上游厄尔尼诺却是干旱事件的成因,而洪涝灾害主要与拉尼娜有关^[57]。地质资料重建结果表明,百年至千年尺度长江中游地区降雨强度和频率也

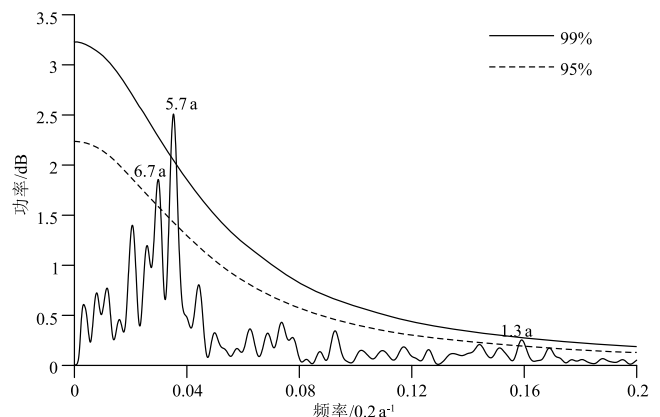


图 7 YEC1701 柱样 Z_r/R_b 值时间序列功率谱

Fig. 7 Spectral analysis of Z_r/R_b ratio in core YEC1701

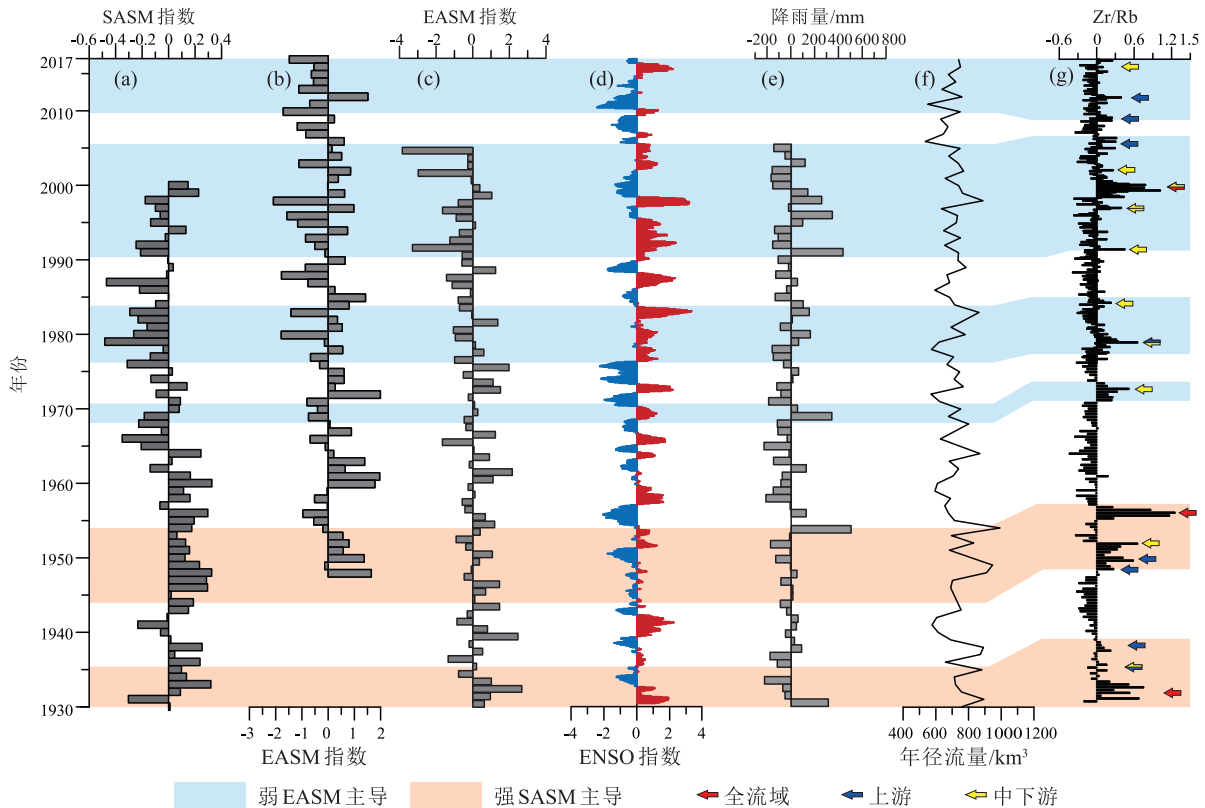


图 8 1930—2017 年 YEC1701 柱样沉积物 Zr/Rb 距平值与气候变化、降雨量及长江年径流量对比

(SASM 指数(a, 据参考文献[65])、EASM 指数(b, c 分别据参考文献[68]和[69])、ENSO 指数(d, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei>)、长江中下游流域梅雨带降雨量(e, 据参考文献[70])及长江年径流量(f, 1930—2005 年数据据参考文献[71]; 2006—2017 年数据据参考文献[72]); 蓝色阴影区域表示上游和全流域洪水多发期, 橘色阴影区域表示中下游洪水多发期)

Fig. 8 Comparison of Zr/Rb anomaly values with climate change, the precipitation records and annual water discharge of the Changjiang river

与厄尔尼诺现象密切相关^[63]。由此可见, 拉尼娜期间易发生长江上游或全流域洪水, 而厄尔尼诺期间易发生长江中下游洪水。

受 EASM 和 SASM 差异影响, 长江流域上游和中下游存在降水异常的偶极模式^[73]。如前所述, 20 世纪 60 年代前的 2 个上游或全流域大洪水多发期受强 SASM 主导, 而此后的 4 个中下游洪水多发期受弱 EASM 主导(图 8-a、b、c)。24 次全新世特大洪水序列与川渝地区近 2000 年的洪灾史料分析表明, SASM 暖湿气流源源不断的水汽输送是维持长江上游暴雨的物质基础, 表现在上游暴雨事件与活跃的 SASM 之间有很好的相关性, 上游暴雨多发期与 SASM 强盛期相对应, 因此 SASM 的异常增强常引发长江上游的极端洪水事件^[74]。其他长江上游古洪水及汉江上游古洪水的研究也得出类似结

论^[4, 75]。但是长江中下游强降水则与较弱的 EASM 有关, 历史资料研究表明, 当 EASM 环流较弱时, 盛行南风/副热带高压系统在中国东部上空更弱, 不能向北推进至较高纬度, 导致在中国东部形成了一个更南向的季风雨带, 致使雨带长时间的停留在江淮流域上空, 给长江中下游流域带来丰富的降水^[57, 76]。

综上所述, 长江流域洪水存在显著的多时空尺度演化, 受 ENSO 和亚洲季风活动规律的共同影响。中长时间尺度的长江流域降雨研究较详细, 但因缺少连续的沉积记录和可靠的洪水沉积代用指标, 中长时间尺度长江古洪水发生规律的研究还较薄弱。可以利用长江水下三角洲较连续的沉积记录, 运用 XRFCS 得到高分辨率(毫米级)的 Zr/Rb 值, 结合其他辅助判别指标, 可望重建全新世高分辨率的长江古洪水发生历史, 为预测气候变化与洪

水发生规律提供依据。

5 结 论

(1) 长江水下三角洲 YEC1701 柱样中 Zr/Rb 峰值通常对应粒度粗组分含量和 C/N 的高值及偏负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 可作为辨识长江洪水沉积的代用指标; 以 2 mm 间隔进行 XRF 岩心扫描 (XRFCs) 得到的 Zr/Rb 值对长江洪水沉积的识别率为 80%, 显著高于 10 mm 间隔的 Zr/Rb 值对洪水沉积的识别率 (50%); 总体表明高分辨率 XRFCs 的 Zr/Rb 值是通过三角洲沉积记录重建流域古洪水发生历史的高效方法。

(2) 高分辨率 Zr/Rb 值时间序列功率谱显示, 经 95% 置信度水平检验存在 6.7 a、5.2 a、1.3 a 周期, 与现代 ENSO 2~8 a 的变化周期吻合, 表明长江洪水与 ENSO 事件之间存在密切联系。

(3) 据多源气候和洪水数据分析推断, 长江洪水年际至千年尺度时间变化受到 ENSO 和东亚夏季风、南亚夏季风的共同影响; 长江上游或全流域洪水多发期主要受拉尼娜影响和强南亚夏季风控制, 而中下游洪水多发期主要受厄尔尼诺影响和弱东亚夏季风控制; 但历史时期的各种数据分辨率较低, 仍有待更多高分辨率的证据加以证实。

致谢: 感谢同济大学赵金鹏、王晓慧、苏建锋同学对采样及室内实验工作的帮助, 感谢中国极地研究中心毕磊助理研究员对本文图件制作的指导。

参考文献

- [1] Schulte L, Schillereff D, Santisteban J I, et al. Pluridisciplinary analysis and multi - archive reconstruction of paleofloods [J]. *Global and Planetary Change*, 2019: 103220.
- [2] Schulte L, Schillereff D, Santisteban J I. Pluridisciplinary analysis and multi - archive reconstruction of paleofloods: Societal demand, challenges and progress[J]. *Global Planet Change*, 2019, 177: 225-238.
- [3] CRED(The Centre for Research on the Epidemiology of Disasters) and UNDRR(United Nations Office for Disaster Risk Reduction). The human cost of disasters: an overview of the last 20 years(2000-2019)[EB/OL].(2020).[2021-04-07]. UN Reports.https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-2000-2019.
- [4] 施雅风, 姜彤, 苏布达, 等. 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*, 2004, (4): 289-297.
- [5] Jiang T, Zhang Q, Blender R, et al. Yangtze Delta floods and droughts of the last millennium: Abrupt changes and long term memory[J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 2005, 82(3/4): 131-141.
- [6] Wang M J, Zheng H B, Xie X, et al. A 600-year flood history in the Yangtze River drainage: Comparison between a subaqueous delta and historical records[J]. *Chin.Sci.Bull.*, 2011, 56(2): 188-195.
- [7] Kochel R C, Baker V R. Paleoflood hydrology[J]. *Science*, 1982, 215(4531): 353-361.
- [8] Jones A F, Macklin M G, Brewer P A. A geochemical record of flooding on the upper River Severn, UK, during the last 3750 years [J]. *Geomorphology*, 2012, 179: 89-105.
- [9] Hu G, Li A, Liu J, et al. High resolution records of flood deposition in the mud area off the Changjiang River mouth during the past century[J]. *Chin.J.Oceanol.Limn.*, 2014, 32(4): 909-920.
- [10] Barbara L, Schmidt S, Urrutia - Fucugauchi J, et al. Fuerte River floods, an overlooked source of terrigenous sediment to the Gulf of California[J]. *Cont.Shelf Res.*, 2016, 128: 1-9.
- [11] Zhang K, Li A, Zhang J, et al. Recent sedimentary records in the East China Sea inner shelf and their response to environmental change and human activities[J]. *Chin.J.Oceanol.Limn.*, 2018, 36(5): 81-99.
- [12] Dypvik H, Harris N B. Geochemical facies analysis of fine-grained siliciclastics using Th/U, Zr/Rb and (Zr+Rb)/Sr ratios[J]. *Chem. Geol.*, 2001, 181(1): 131-146.
- [13] Croudace I W, Rothwell R G. Micro-XRF Studies of Sediment Cores[J]. *Series: Developments in Paleoenvironmental Research*, 2015, 17: 1-236.
- [14] Liu L, Chen J, Ji J, et al. Variation of Zr/Rb ratios on the Loess Plateau of Central China during the last 130000 years and its implications for winter monsoon[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2002, 47(15): 1298-1302.
- [15] 水利部长江水利委员会长江泥沙公报.[M].北京: 长江出版社, 2019.
- [16] Kundzewicz Z W, Huang J, Piskwar I, et al. Climate variability and floods in China - A review [J]. *Earth - Science Reviews*, 2020, 211: 103434.
- [17] 王晨曦. 应急管理部: 今年洪涝灾害造成直接经济损失 2143.1 亿元[EB/OL].(2020-09-03).[2021-04-07]. 中国网财经. http://finance.china.com.cn/news/20200903/5358440.shtml.
- [18] Su J, Fan D. Internal Facies Architecture and Evolution History of Changxing Mouth-Bar Complex in the Changjiang (Yangtze) Delta, China[J]. *J.Ocean U.China*, 2018, 6: 1281-1289.
- [19] Middelkoop H, Erkens G, Van der Perk M. The Rhine delta-a record of sediment trapping over time scales from millennia to decades[J]. *J. Soils Sediments*, 2010, 10: 628-639.
- [20] Zhao Y, Zou X, Gao J, et al. Recent sedimentary record of storms and floods within the estuarine-inner shelf region of the East China Sea[J]. *The Holocene*, 2016, 27(3): 439-449.
- [21] Tian Y, Fan D, Zhang X, et al. Event deposits of intense typhoons in the muddy wedge of the East China Sea over the past 150 years[J]. *Mar.Geol.*, 2019, 410: 109-121.
- [22] 展望, 杨守业, 刘晓理, 等. 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.
- [23] Hedges J I, Keil R G, Benner R. What happens to terrestrial organic matter in the ocean [J]. *Org.Geochem.*, 1997, 27(5/6): 195-212.
- [24] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic,

- paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. *Org. Geochem.*, 1997, 27(5/6): 213–250.
- [25] Lamb A L, Wilson G P, Leng M J. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material[J]. *Earth-Sci. Rev.*, 2006, 75: 29–57.
- [26] 陈吉余, 沈焕庭, 恽才兴. 长江河口动力过程和地貌演变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.
- [27] 火苗, 范代读, 陆琦, 等. 长江口南汇边滩冲淤变化规律与机制[J]. *海洋学报*, 2010, 32(5): 41–51.
- [28] Fan D. Open – Coast Tidal Flats [M]// *Principles of Tidal Sedimentology*, 2012: 187–229.
- [29] Fan D, Qi H, Sun X, et al. Annual lamination and its sedimentary implications in the Yangtze River delta inferred from High – resolution biogenic silica and sensitive grain – size records [J]. *Cont. Shelf Res.*, 2011, 31(2): 129–137.
- [30] Rao Z, Li Y, Zhang J, et al. Investigating the long-term paleoclimatic controls on the δD and $\delta^{18}\text{O}$ of precipitation during the Holocene in the Indian and East Asian monsoonal regions [J]. *Earth-Sci. Rev.*, 2016, 159: 292–305.
- [31] Chen Z, Song B, Wang Z, et al. Late Quaternary evolution of the sub-aqueous Yangtze Delta, China: sedimentation, stratigraphy, palynology, and deformation[J]. *Mar. Geol.*, 2000, 162(2): 423–441.
- [32] Liu J, Saito Y, Kong X, et al. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last 13000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years [J]. *Quaternary Sci. Rev.*, 2010, 29(17): 2424–2438.
- [33] Shang S, Fan D, Ying P, et al. Late Quaternary environmental change in the central – western East China Sea [J]. *Palaeogeogr. Palaeocl.*, 2018, 492: 64–80.
- [34] Boulay S, Colin C, Trentesaux A, et al. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144) [C]// *Prell W L, Wong P, Blum P, et al. Proc ODP, Sci. Res.*, 2003, 184: 1–21.
- [35] Sun Y, Gao S, Li J. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal seafloor [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2003, 48(2): 184–187.
- [36] 肖尚斌, 李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分[J]. *沉积学报*, 2005, (1): 122–129.
- [37] 王晓慧, 吴伊婧, 范代读. 福建兴化湾外近海 ^{210}Pb 法沉积速率及校正方法[J]. *古地理学报*, 2019, 21(3): 527–536.
- [38] Xing L, Zhang H, Yuan Z, et al. Terrestrial and marine biomarker estimates of organic matter sources and distributions in surface sediments from the East China Seashelf [J]. *Cont. Shelf Res.*, 2011, 31(10): 1106–1115.
- [39] Luo X X, Yang S L, Zhang J. The impact of the Three Gorges Dam on the downstream distribution and texture of sediments along the middle and lower Yangtze River (Changjiang) and its estuary, and subsequent sediment dispersal in the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2012, 179: 126–140.
- [40] 李妍清, 刘冬英, 熊莹. 2016 年长江洪水遭遇分析[J]. *水资源研究*, 2017(6): 568–576.
- [41] 李文龙, 李鸿雁. 长江流域连续大洪水年机理分析及预报[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(5): 1–8.
- [42] 邹红梅, 陈新国. 2010 年与 1998 年长江流域洪水对比分析[J]. *水利水电快报*, 2011, (5): 15–17.
- [43] 李春香, 张辰亮, 虞海平, 等. 长江宜昌“2004 9”暴雨洪水分析[J]. *人民长江*, 2008, 39(18): 9–10, 26.
- [44] 黄为, 冯忠民. 长江 2002 年洪水与 1996 年洪水的对比分析[J]. *人民长江*, 2003, 34(4): 39–40.
- [45] 乔盛西, 陈正洪. 历史时期川江石刻洪水资料的分析[J]. *暴雨灾害*, 1999, 18(1): 4–7.
- [46] Wang Z Y, Plate E J. Recent flood disasters in China [J]. *Water & Maritime Engineering*, 2002, 154(3): 177–188.
- [47] Li X, Bianchi T S, Allison M A, et al. Historical reconstruction of organic carbon decay and preservation in sediments on the East China Seashelf [J]. *J. Geophys. Res. Biogeophys.*, 2013, 118(3): 1079–1093.
- [48] 胡利民, 石学法, 王国庆, 等. 2011 长江中下游旱涝急转前后河口表层沉积物地球化学特征研究[J]. *地球化学*, 2014, (1): 39–54.
- [49] 高抒, 贾建军, 杨阳, 等. 陆架海岸台风沉积记录及信息提取[J]. *海洋学报*, 2019, 41(10): 141–160.
- [50] Xiao S, Li A, Liu J P, et al. Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea [J]. *Palaeogeogr. Palaeocl.*, 2006, 237: 293–304.
- [51] Moy C M, Seltzer G O, Rodbell D T, et al. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch [J]. *Nature*, 2002, 420(6912): 159–162.
- [52] D’Arrigo R, Cook E R, Wilson R J, et al. On the variability of ENSO over the past six centuries [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32(3): L03711.
- [53] MacDonald G M, Case R A. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32(8): L08703.
- [54] 张瑞, 汪亚平, 潘少明. 近 50 年来长江入海径流量对太平洋年代际震荡变化的响应[J]. *海洋通报*, 2011, 30(5): 572–577.
- [55] Zhang Q, Xu C, Jiang T, et al. Possible influence of ENSO on annual maximum streamflow of the Yangtze River, China [J]. *J. Hydrol.*, 2007, 333(2/4): 265–274.
- [56] Qian W, Lin X, Zhu Y, et al. Climatic regime shift and decadal anomalous events in China [J]. *Climatic Change*, 2007, 84(2): 167–189.
- [57] Jiang T, Zhang Q, Zhu D, et al. Yangtze floods and droughts (China) and teleconnections with ENSO activities (1470–2003) [J]. *Quatern. Int.*, 2006, 144: 29–37.
- [58] Chen J, Chen F, Feng S, et al. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age: spatial patterns and possible mechanisms [J]. *Quaternary Sci. Rev.*, 2015, 107: 98–111.
- [59] Kim H J, Hyeong K, Yoo C M, et al. Impact of strong El Niño events (1997/98 and 2009/10) on sinking particle fluxes in the 10°N thermocline ridge area of the northeastern equatorial Pacific [J]. *Deep*

- Sea Res., Part I, 2012, 67(0): 111–120.
- [60] Zhu Z, Feinberg J M, Xie S, et al. Holocene ENSO-related cyclic storms recorded by magnetic minerals in speleothems of central China[J]. Proc. Natl. Acad., USA, 2017, 114(5): 852–857.
- [61] Kundzewicz Z W, Szwed M, Pińskwar I. Climate Variability and Floods—A global Review[J]. Water, 2019, 11(7): 1399.
- [62] Guo Y, Huang C C, Zhou Y, et al. Extraordinary flood events and the response to monsoonal climatic change during the last 3000 years along the middle Yangtze River valley, China [J]. Palaeogeogr. Palaeocl., 2016, 462: 70–84.
- [63] Liu H, Gu Y, Huang X, et al. A 13000-year peatland palaeohydrological response to the ENSO-related Asian monsoon precipitation changes in the middle Yangtze Valley [J]. Quaternary Sci. Rev., 2019, 212: 80–91.
- [64] Shen C, Wang W C, Gong W, et al. A Pacific Decadal Oscillation record since 1470 AD reconstructed from proxy data of summer rainfall over eastern China [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(3): L03702.
- [65] Shi F, Li J, Wilson R J. A tree-ring reconstruction of the South Asian summer monsoon index over the past millennium [J]. Sci. Rep., 2014, 4: 6739.
- [66] Xu K, Li A, Liu J P, et al. Provenance, structure, and formation of the mud wedge along inner continental shelf of the East China Sea: A synthesis of the Yangtze dispersal system [J]. Mar. Geol., 2012, 291–294: 176–191.
- [67] Wang Z, Wei G, Chen J, et al. El Niño–Southern Oscillation variability recorded in estuarine sediments of the Changjiang River, China [J]. Quaternary International, 2017, 441: 18–28.
- [68] 李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系 [J]. 气候与环境研究, 2005, (3): 351–365.
- [69] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [C] // Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge New York, 2007: 1–297.
- [70] Ding Y, Wang Z, Sun Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. Int. J. Climatol., 2008, 28(9): 1139–1161.
- [71] Wang H, Yang Z, Wang Y, et al. Reconstruction of sediment flux from the Changjiang (Yangtze River) to the sea since the 1860s [J]. J. Hydrol., 2008, 349(3/4): 318–332.
- [72] 长江泥沙公报. 水利部长江水利委员会 [M]. 北京: 长江出版社, 2006–2017.
- [73] Liu J, Chen J, Zhang X, et al. Holocene East Asian summer monsoon records in northern China and their inconsistency with Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 148: 194–208.
- [74] 葛兆帅. 长江上游全新世特大洪水对西南季风变化的响应 [J]. 地理研究, 2009, 28(3): 592–600.
- [75] Guo Y, Huang C C, Pang J, et al. Investigating extreme flood response to Holocene palaeoclimate in the Chinese monsoonal zone: A palaeoflood case study from the Hanjiang River [J]. Geomorphology, 2015, 238: 187–197.
- [76] 周秀骥, 赵平, 刘封, 等. 中世纪暖期、小冰期与现代东亚夏季风环流和降水年代–百年尺度变化特征分析 [J]. 科学通报, 2011, 56(25): 2060–2067.