



长江流域全新世极端洪水事件研究进展与启示

徐润, 于世永, 周 亮, 公力维, 沈治雄

Holocene extreme flood events in the Yangtze River Basin: Research progress and implications

XU Runzhe, YU Shiyong, ZHOU Liang, GONG Liwei, and SHEN Zhixiong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024022701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江流域风成黄土研究进展与展望

Progress and prospect in the study of Aeolian Loess in the Yangtze River Basin

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(2): 16-32

黄河流域全新世古洪水研究进展及展望

Research progress of the Holocene paleoflood in the Yellow River basin and a future prospect

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 178-188

山东弥河流域现代洪水沉积特征与水动力过程反演

Characteristics of modern flood deposits in the Drainage basin of Mi River, Shandong Province and the reconstruction of hydrodynamic processes

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(2): 178-189

苏北-南黄海西部第四纪长江埋藏古河道分布研究进展

Research progress on distribution of Quaternary buried paleo-Yangtze River channels in the North Jiangsu-western South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 40-54

黄河下游东平湖炭屑记录的近1 500年以来火演化历史

Fire history over the past 1 500 years revealed by charcoal record from the Dongping Lake in the Lower Yellow River

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(2): 33-45

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77-89



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

徐润喆, 于世永, 周亮, 等. 长江流域全新世极端洪水事件研究进展与启示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(2): 158-176.

XU Runzhe, YU Shiyong, ZHOU Liang, et al. Holocene extreme flood events in the Yangtze River Basin: Research progress and implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(2): 158-176.

长江流域全新世极端洪水事件研究进展与启示

徐润喆, 于世永, 周亮, 公力维, 沈治雄

江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 徐州 221116

摘要:随着全球气候变暖 and 人类活动加剧, 全球洪水事件的发生频率与强度正在快速变化, 揭示洪水发生规律及其驱动机制是当前古洪水水文学和全球变化研究的热点问题。长江流域作为中国洪涝灾害最为严重的区域之一, 其洪水活动近年来呈现快速异常变化, 较短的现代器测记录已不能满足未来洪水灾害风险预测的需求, 迫切需要通过各种长时间尺度记录揭示过去时期长江流域洪水事件与气候变化之间的关系。本文通过综述各种极端洪水事件的地质记录和历史记录, 确定全新世以来极端洪水事件的频发期, 并与区域关键气候代用指标进行对比, 发现洪水事件频发期主要跟气候的急剧突变和强烈的人类活动有关。然而准确预测长江流域洪水事件未来演化趋势, 需不断加强各种代用记录的综合研究, 进一步探索洪水发生机制与气候变化和人类活动耦合关系, 并加强有关数值模拟方面的研究, 以便于为未来长江流域的洪涝灾害防御、城乡规划优化布局、资源合理开发利用提供科学依据和决策支持。

关键词:古洪水事件; 沉积记录; 全球变暖; 人类活动; 长江流域

中图分类号: P532

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024022701

Holocene extreme flood events in the Yangtze River Basin: Research progress and implications

XU Runzhe, YU Shiyong, ZHOU Liang, GONG Liwei, SHEN Zhixiong

School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China

Abstract: With global warming and the intensification of human activities, the frequency and magnitude of large river flood events are increasing in recent years. To reveal the regularity of flood occurrence and its driving mechanism is a hot issue in the study of paleoflood hydrology and global change. As one of the regions with the most severe flood disasters in China, the Yangtze River Basin has shown rapid and abnormal changes in flood activities in recent years. Short modern measurement records can no longer meet the needs of future flood disaster risk prediction, and it is urgent to reveal the relationship between flood events and climate change in the Yangtze River Basin in the past through various long-term records. By summarizing the geological and historical records of various extreme flood events, the frequent periods of extreme flood events since the Holocene were determined and compared with key regional climate proxies. However, to accurately predict the future evolution trend of flood events in the Yangtze River Basin, it is necessary to strengthen continuously the comprehensive research of various proxy records, to further explore the coupling relationship of flood occurrence mechanisms to climate changes and human activities, and to strengthen research on numerical simulation. This study provided a scientific basis and decision support for future flood disaster prevention, urban and rural planning optimization layout, and rational resource development and utilization in the Yangtze River Basin.

Key words: paleoflood events; sedimentary record; global warming; human activities; the Yangtze River

河流洪水是全球威胁人民生命健康和财产安全的极端水文灾害之一^[1]。近年来, 随着全球气候的不断变暖, 全球洪水、强降雨等极端自然灾害事件呈现高度频发态势^[2], 如 1998 年夏季, 我国长江

流域发生了全流域范围的特大洪水, 宜昌站记录到的最大洪峰流量超过了 63 000 m³/s, 给长江流域沿岸城市带来了巨大的经济和社会损失^[3]; 2021 年 7 月 17—23 日, 河南省遭遇了历史罕见特大暴雨,

资助项目: 国家自然科学基金资助项目“ The magnitude and frequency of extreme late Holocene flooding in the middle Yangtze River and their climatic and anthropogenic forcing ”(42250610211), “ 黄河下游地区中晚全新世重大洪泛事件及其对我国早期文明的影响 ”(41971102); 江苏师范大学研究生科研与实践创新计划项目“ 1500AD 以来江汉平原湖泊沉积物碳埋藏及其影响因素分析 ”(2024XKT0141)

作者简介: 徐润喆 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地表过程与全球变化, E-mail: xurunzhe0824@163.com

通讯作者: 周亮 (1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为古洪水水文学和古风暴学, E-mail: geozhouliang@126.com

收稿日期: 2024-02-27; 改回日期: 2024-05-29. 文凤英编辑

郑州市的洪涝灾害造成重大人员伤亡和财产损失^[4]; 2023 年 7 月, 极端暴雨导致华北地区发生特大洪水事件, 城市内涝、河流洪水、山洪滑坡等自然灾害并发, 同样造成了重大社会经济损失^[5]。与此同时, 全球其他地区洪水事件的频率和强度也屡次突破历史极值。在全球变暖背景下, 人口和财富正不断向河流沿岸聚集, 而河流沿岸地区面临洪水灾害的风险急速升高, 迫切需要准确揭示区域洪水事件发生的规律, 以加强洪水灾害的防御能力^[6]。

近年来对全球变暖和洪水频率变化关系的认识存在较大争议。第六次 IPCC 报告称, 气候变暖将会带来全球更严重的热浪、更强烈的降雨和洪涝灾害等极端灾害事件^[7]。一些学者认为洪水活动的加强还与南方涛动指数和厄尔尼诺事件有着密切的关系^[8-9]。目前已有学者对“全球变暖是否会导致洪涝灾害的程度不断变强”进行了探讨^[10-11], 但是对“全球变暖是否会导致特大洪水事件频发”这一问题还缺少深入的认识, 出现这一问题的主要原因是现代洪水观测的尺度太短, 有关洪水事件的准确数据记录更是缺乏, 导致对洪水生成、发展、演化的气候驱动机制认识不足。因此, 有必要立足于各类长时间尺度记录载体, 揭示特大洪涝灾害的时间性和周期性规律, 更好地预测其变化、发展, 为河流沿岸地带防灾减灾工作、经济合理规划开发与生态资

源保护提供基础数据参考。长江作为亚洲第一大河, 其流域是中国的核心经济带, 自古素有“黄金水道”之称, 而长江流域却是中国受洪涝灾害影响最为严重的地区之一, 因此长江流域洪涝灾害防御问题一直是国家部委和学界关注的焦点。过去几十年间, 国内多个团队在长江流域开展了全新世以来洪水事件的研究工作(图 1, 具体点位见表 1), 本文系统梳理了记录长江流域极端洪水活动信息的各种代用记录、洪水频率和流量(水位)规律研究的方法和新的研究进展, 并为未来学科发展提出了展望。

1 长江流域全新世极端洪水事件的地质记录

1.1 古洪水沉积物野外宏观识别

古洪水是指全新世以来至可考证的历史洪水期以前的由沉积物所记录的洪水^[1, 55]。美国学者 Kochel 和 Baker 首次提出“古洪水水文学”这一学科概念^[56], 并在其研究中为后人提供了初步的研究思路与技术方法^[57], 此后大量研究者在美洲^[8, 58]、欧洲^[59-60]和亚洲^[61-62]等地陆续开展了大量关于古洪水沉积物的识别和古洪水流量重建工作。古洪水事

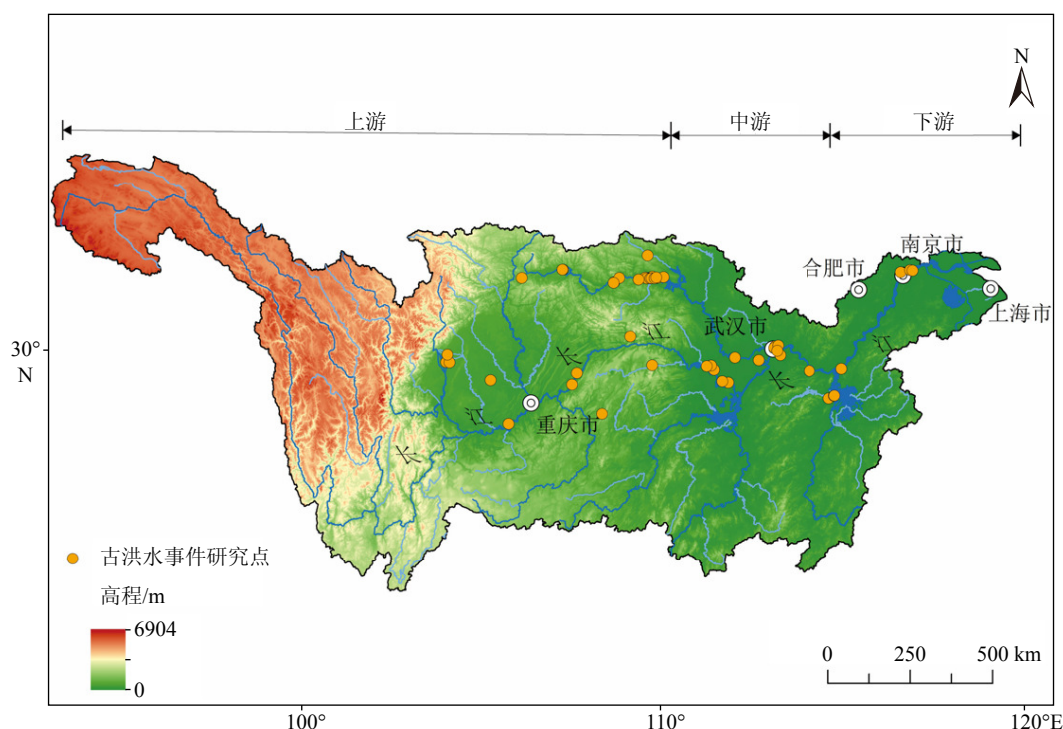


图 1 长江流域极端洪水记录研究点分布

Fig.1 Study sites of extreme events in the Yangtze River Basin

表 1 长江流域极端洪水事件研究剖面位置及代用指标

Table 1 Site and proxy of research profiles of extreme flood events in Yangtze River Basin

序号	河段	剖面位置	经纬度	地质记录类型	文献来源
1	上游	中坝遗址	30.34°N、108.45°E	文化遗址	[12]
2		玉溪遗址	30.03°N、107.86°E	文化遗址	[13]
3		红桥村	30.68°N、103.88°E	文化遗址	[14]
4		金沙遗址	30.68°N、104.00°E	文化遗址	[15]
5		马街遗址	30.89°N、103.92°E	文化遗址	[16]
6		张家湾遗址	31.27°N、109.77°E	文化遗址	[17]
7		汉东城遗址	29.00°N、105.84°E	文化遗址	[18]
8		涪磧口遗址	29.20°N、108.75°E	文化遗址	[19]
9	中游	曲远河	32.87°N、110.62°E	自然剖面	[20]
10		尚家河	32.84°N、110.46°E	自然剖面	[21]
11		庾家洲	32.85°N、110.39°E	自然剖面	[22]
12		庾家湾	32.86°N、110.39°E	自然剖面	[23]
13		李家咀	32.82°N、110.77°E	自然剖面	[24]
14		晏家棚	32.83°N、110.43°E	自然剖面	[25]
15		归仙河口	32.82°N、110.54°E	自然剖面	[22]
16		弥陀寺	32.82°N、110.58°E	自然剖面	[26]
17		前坊村	32.83°N、110.98°E	自然剖面	[27]
18		辽瓦店	32.82°N、110.68°E	自然剖面	[24]
19		黄坪村	32.84°N、110.74°E	自然剖面	[28]
20		万春村	33.19°N、107.69°E	自然剖面	[29]
21		祥龙洞	33.00°N、106.33°E	自然剖面	[30]
22		尾笔村	30.39°N、114.47°E	自然剖面	[31]
23		焦家台子	32.82°N、110.16°E	自然剖面	[32]
24		罗家滩	32.78°N、109.35°E	自然剖面	[33]
25		楼子滩	33.46°N、110.51°E	自然剖面	[34]
26		泥沟口	32.89°N、109.53°E	自然剖面	[35]
27		立石村	30.20°N、105.30°E	自然剖面	[36]
28		新滩村	32.76°N、109.33°E	自然剖面	[37]
29		杜家沟	33.19°N、107.67°E	自然剖面	[38]
30		三房湾	30.46°N、113.04°E	自然剖面	[39]
31		江北农场二砖厂	30.18°N、112.34°E	自然剖面	[40]
32		消泗剖面	30.32°N、113.78°E	自然剖面	[41]
33		武汉	30.64°N、114.34°E	自然剖面	[42]
34		SK10	30.60°N、114.31°E	自然剖面	[43]
35		ZK145	30.66°N、114.44°E	自然剖面	[44-45]
36		钟桥遗址	30.31°N、112.27°E	文化遗址	[46]

续表 1

序号	河段	剖面位置	经纬度	地质记录类型	文献来源
37	中游	JH001	30.52°N、114.39°E	自然剖面	[47]
38		扬子江剖面	30.30°N、112.12°E	自然剖面	[48]
39		网湖	29.86°N、115.33°E	自然剖面	[49]
40		中洲子	29.80°N、112.75°E	自然剖面	[50]
41		天鹅洲	29.85°N、112.57°E	自然剖面	[51]
42	下游	修河	29.05°N、115.83°E	自然剖面	[52]
43		赣江	29.10°N、116.00°E	自然剖面	[52]
44		黄茅潭	29.80°N、116.35°E	自然剖面	[52]
45		大汉湖	29.10°N、116.01°E	自然剖面	[52]
46		东门镇林峰桥	32.14°N、118.70°E	自然剖面	[53]
47		宝华山-和平冲	32.16°N、119.02°E	自然剖面	[54]
48		宝华山	32.13°N、119.09°E	自然剖面	[54]

件是地表水文系统对气候变化的响应,对地质、地貌以及生态系统都会产生巨大的影响^[63],这些影响可能在地质记录中有所体现,选择合适的地质学代用记录进行分析研究,可重建长江流域古洪水事件。

1.1.1 自然剖面记录的古洪水事件

利用洪水沉积进行古洪水研究,首先需要识别出洪水沉积,然而不同沉积环境下古洪水沉积特征存在较大差异。本文根据不同沉积环境下形成的自然剖面进行分类,探讨长江流域古洪水事件的野外识别特征。

(1)古洪水滞流沉积物 (Slack-water deposits)

当河流发生洪水事件时,水流会携带流域内含有植物碎片、孢子等富含有机质的悬移质泥沙,并在高水位滞流环境下缓慢沉积后被其他沉积物迅速掩埋并保存下来,这类富含有机质的悬移质泥沙通常被称为古洪水滞流沉积物 (Slack-water Deposit, 简称 SWD)^[64]。由于其沉积过程与风成沉积和重力沉积存在显著不同,古洪水滞流沉积与其他类型沉积在地层宏观与微观特征具有明显的差异(图 2a),凭借其沉积特征清楚、洪水指示意义明确的优势,已被广泛用于古洪水事件重建研究。

如何在野外识别滞流沉积物是恢复古洪水事件的前提。长江流域古洪水的宏观特征在野外与其他地层之间存在较大的差异,其差别主要体现在:①古洪水滞流沉积层在颜色上与其他地层沉积之间有明显的差别。黄春长团队通过观察湖北郧县辽瓦店剖面,认为古洪水滞流沉积物的颜色呈棕

灰色,而其他地层如黄土呈浊黄色、古土壤呈亮红棕色,具有较大差别^[67];②古洪水滞流沉积物与其相邻的坡积物、沉积物物源不同,因此其质地和结构也有较大差异。一般来说,滞流沉积物为细沙质粉砂质地,且结构较为均匀,呈松散的粒状结构,与其上覆和下伏的地层结构显著不同;③古洪水滞流沉积物与上下相邻地层呈突变接触关系,界线清楚,并且由于在滞流及退水过程中,沉积物不断逐层沉积,其层理一般呈明显的水平层理或波状层理^[23]。

当前通过古洪水滞流沉积物来重建古洪水序列的工作主要集中在长江中上游地区,Zha 等在汉江上游郧县河段的河岸悬崖上发现了 4 个具有 SWD 互层的风积黄土-土壤剖面,通过磁化率和粒度分析发现 SJH 剖面中 SWD 的含沙量高于风积黄土/土壤^[21]。李晓刚等^[32]在丹江上游 LZT 地点发现了 4 层古洪水 SWD,这 4 层 SWD 具有一定的共同特点:颜色呈浊黄橙色和浊红棕色,质地均匀,块状构造,层理为波状—水平状平行层理。通过粒度分析得出这 4 层 SWD 属于粉和黏土质粉砂,洪水物质主要来源于流域内山区坡地和黄土台地^[68]。然而上游基岩区古洪水滞留沉积物记录的均为特大洪水事件,难以记录到中小洪水事件特征,且普遍存在沉积记录保存较差等问题。

(2)冲积平原洪水越岸沉积 (Overbank flooding deposits)

由河流沉积作用形成的平原地貌被称为冲积平原,其成因是河流在自然因素与人为因素的共同作用下,河流上游被侵蚀的大量泥沙输送到下游,

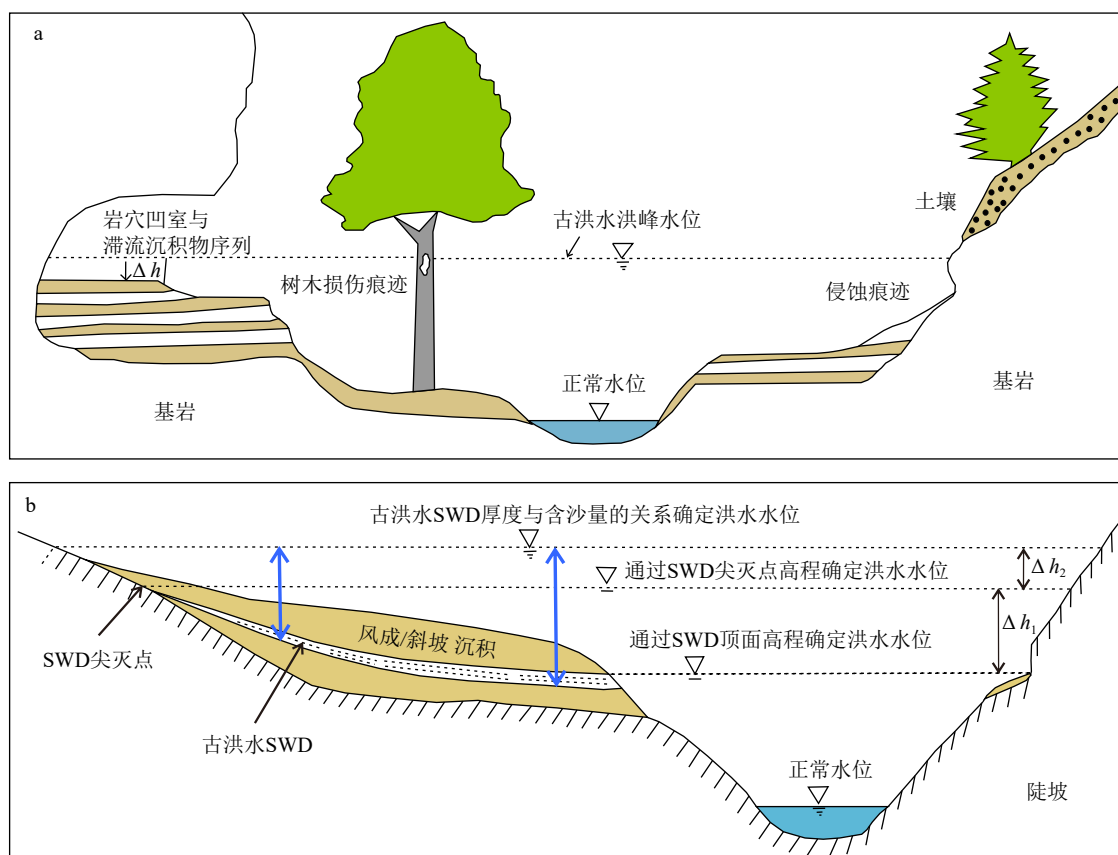


图 2 古洪水滞流沉积物野外位置及重建洪水方法

a: 古洪水滞流沉积物示意图^[65], b: 三种确定洪水水位方法示意图^[66](据文献 [65-66] 修改)。

Fig.2 Field location of paleoflood sediment and flood reconstruction method

a: The schematic diagram of paleoflood SWD^[65], b: Schematic diagram of three methods for determining flood level^[66]

(Modified according to references [65-66]).

因河流下游流速较慢,超过了流水的挟沙能力,泥沙在河流中下游沉积;同时河流发生溢岸时,泥沙也会在河流两岸沉积,经过河流不断泛滥、决堤、改道,加之在垂向和侧向加积的共同作用下,沿河床及其两侧长期堆积沉积物便形成了冲积平原^[69-70](图 3)。

当大洪水发生时,洪水流量超过正常河道所能容纳的最大水量,被洪水携带的物质便会沉积在河岸或堤前,形成越岸沉积。冲积平原环境下的越岸沉积通常由细粉沙、淤泥以及黏土组成,与中上游基岩峡谷处的滞流沉积物在沉积特征上存在一定差异^[71]。

根据表 2 所示,越岸漫滩沉积物与峡谷滞流沉积物在岩性与层理上两者差别不大;在颜色上,基岩峡谷区滞流沉积物多为浊红棕色,指示当时环境为偏氧化环境,而冲积平原区漫滩沉积物的颜色则多为灰色、棕色等暗色,指示其环境为偏还原环境;在沉积物的结构上,漫滩沉积物中有较多的植物残体,且多为互层构造,与基岩峡谷区滞流沉积物破

碎为棱块状有较大差异。由此可见,长江流域中上游与中下游的沉积物特征在各个方面都有所不同,主要是中下游与中上游地区在水动力条件、地貌特征和物质来源等方面存在差异所致。

(3) 湖泊环境洪水沉积

湖泊沉积物具有记录介质丰富、连续性强、分辨率高和对气候变化敏感等特点,通过湖泊沉积物可以提取丰富的气候和沉积环境演变信息,揭示古洪水与区域尺度内的气候波动之间的关系,预测全球变暖背景下洪水频率与强度的变化趋势^[72]。由于湖泊洪水沉积物有别于湖泊常态沉积,因此在长江流域研究湖泊环境的洪水沉积时,一般选择河成湖作为研究对象^[52]。河成湖主要分布在平原地区,与河流的发育以及河道的变迁有着密切的关系,河成湖湖底较平,湖水较浅,在长江流域主要分为以下几种类型:①长江携带的泥沙沉积物在平原上堆积不均匀,天然堤之间存在地势的差异形成洼地,洼地之中的积水为河成湖,江汉平原东南端的洪湖是此种河成湖;②长江干流的河道变迁,导致河道

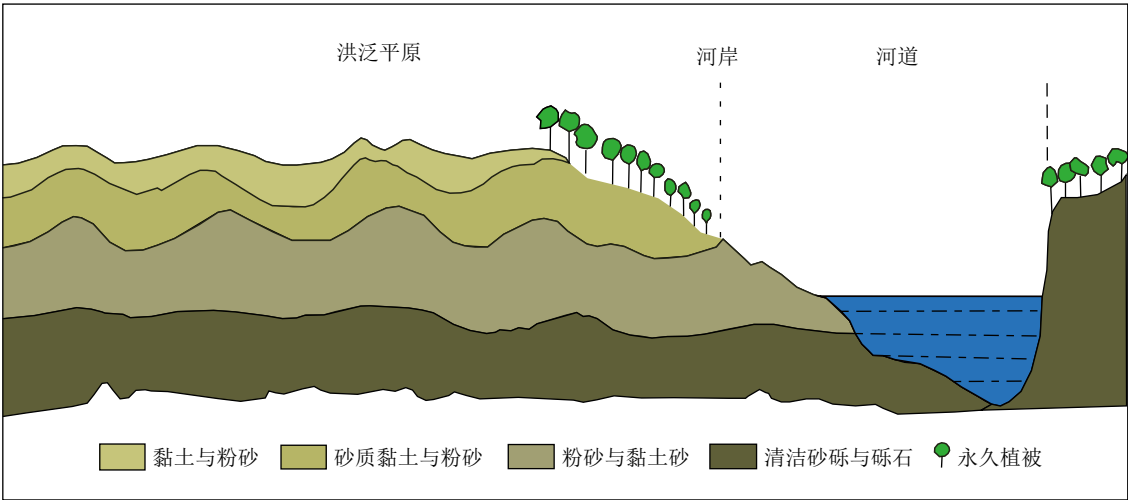


图 3 冲积平原河岸沉积示意图

据文献 [70] 改绘。

Fig.3 Sedimentary model of floodplain

Redrawn from reference [70].

表 2 长江流域滞流沉积物与冲积平原沉积物宏观特征对比

Table 2 Comparison of macroscopic characteristics of slack water deposits in the Yangtze River Basin and overbank flooding deposits in the floodplain

	基岩峡谷区滞流沉积物 ^[68]	冲积平原区漫滩沉积物 ^[73]
颜色	浊红棕色、浊黄橙色等	灰色、棕色等
岩性	黏土质粉砂、粉砂	砂和粉砂
结构	破碎为棱块状、具有贝壳状断口	多为互层构造, 沉积上部有根系
层理	波状—水平状平行层理, 有部分上下界面开裂	水平层理, 局部可见波状层理

自行裁弯取直留下旧河道形成的湖泊,如湖北省监利县尺八湖为典型的牛軋湖;③江西九江鄱阳湖等一类湖泊的成因则是长江干流的水流顶托支流水流,导致支流流动不畅,甚至干流发生倒灌,支流平原则受到洪水泛滥形成支流堰塞湖;④江汉平原内河漫滩后缘与外围岗地之间的低地积水形成如南湖一类的岗边湖;⑤受地质构造运动的影响,江河倒灌,洪水泛滥,河口淤塞,沉降洼地积水而成的湖泊为河谷沉溺湖,江汉平原的鲁湖则为这一类湖泊;⑥当洪水泛滥时,河流自然堤溃口,洪水强烈冲刷冲积平原,形成深坑或渊塘,这一类河堤决口湖普遍面积较小,相对较深,排列方向指示洪水冲刷方向^[74]。江汉平原本地的土壤多为网纹红土,当洪水来临时,长江携带大量的泥沙沉积物在湖泊中沉积;洪水事件后,土壤处于长期浸润状态下,形成了亮蓝灰色的潜育土,与湖泊自身沉积物在颜色、质地、粒度等方面差异较大,借助这些沉积特征差异可以在河成湖中重建古洪水序列。

传统识别长江流域湖泊环境洪水沉积的方法

主要集中在岩性、粒度组分方法以及地球化学方法上,近年来基于 XRF 岩芯扫描获得的亮度曲线也被用来进行高分辨率的洪水事件识别。此外湖泊沉积还可以通过借助其他指标分析,重建驱动洪水事件发生的气候背景和人类活动变化。赵炳炎等根据长江下游南漪湖岩性差异,在 340~210、210~185、115~90 cm 的黑色黏土以及深灰色黏土中发现植物残体,认为岩性的变化反映了气候的变化(图 4)^[75]。袁世飞对中洲子钻孔中的沉积物进行了分析,发现岩芯从下段至上段沉积物的颜色转变是由于水环境发生了明显的改变^[50]。

1.1.2 考古遗址记录的极端洪水事件

新石器时期以来,长江流域人类活动较为频繁,文化遗址分布广泛,已有研究发现文化遗址中许多相邻的两个文化层之间常常存在厚度不等的淤泥层,这些淤积层的沉积特征与现代洪水沉积类似,因此这些淤泥层很有可能指示了古洪水事件的发生^[76]。朱诚等通过对长江三峡段文化遗址中夹杂的自然淤积层进行分析,发现这些淤积层出现在

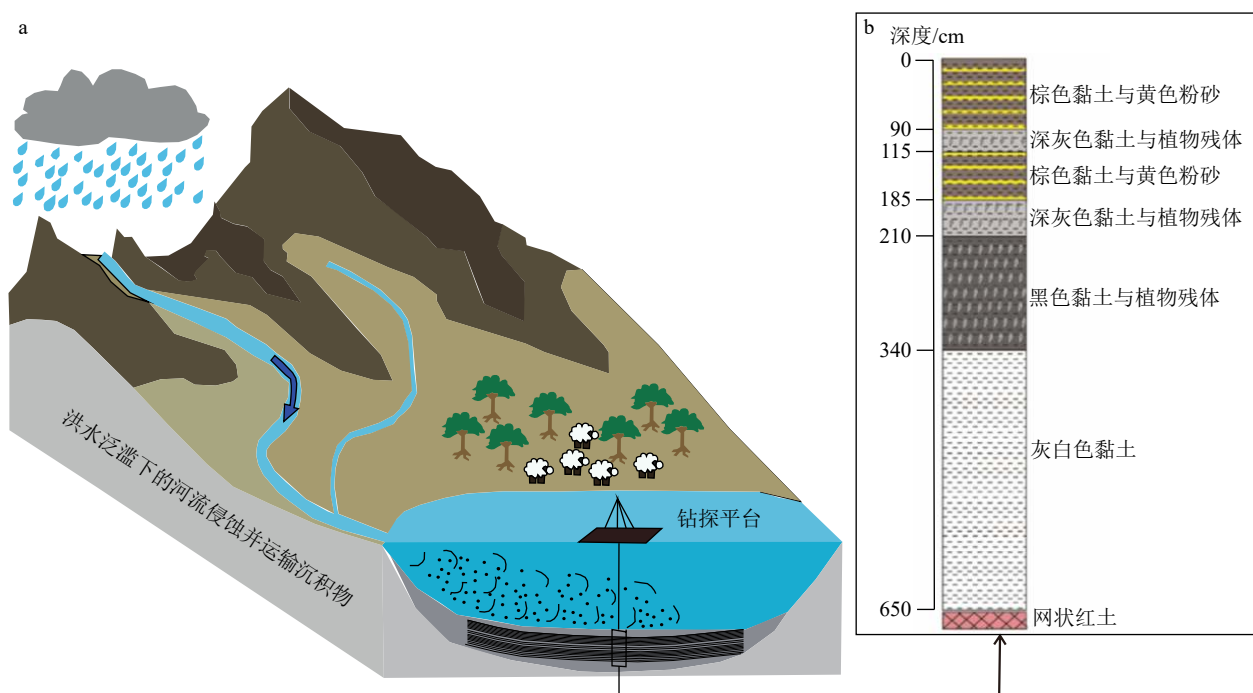


图4 湖泊环境沉积模式示意图 (a) 与南漪湖岩芯柱状图 (b)

a: 据文献 [77] 修改, b: 据文献 [75] 修改。

Fig.4 Model of lake deposition (a), depositional sequence of the Nanyi Lake core (b)

a: Modified according to [77], b: modified according to [75].

各期文化演替的过渡阶段,认为江汉平原新石器文化更替与异常洪涝灾害间存在因果关系,且考古遗址地层记录的大规模洪水有5期,分别为城背溪文化末、大溪文化末屈家岭文化初、屈家岭文化末石家河文化初、石家河文化末商周初、商周末^[78]。吴立对江汉平原钟桥遗址地层剖面进行了详细的描述,发现其中三层疑似古洪水层具有一定的相同特征:颜色均以灰黄棕色为主,质地以粉砂质黏土为主,均含植物或植物种子,有锈斑及虫孔,并伴随扰动;同时利用1998年现代长江洪水沉积物与之对比,确定了这些疑似古洪水层^[79]。总的来看,学者们多利用考古遗址中疑似古洪水层与现代洪水沉积物中的沉积特征对比分析,结合历史文献资料以及其他考古年代,确定遗址古洪水层的年代,并将其与对应的气候背景对应分析,探讨洪水事件与文化衰落与兴起的关系。

1.2 地质记录理化指标验证

1.2.1 传统洪水记录验证指标

为了更好地识别和认识古洪水事件的沉积特征,单单依靠野外识别地层的宏观差异还不足以满足需要,有关沉积物理化指标的分析逐渐被学者广泛应用于研究中。传统的洪水指标验证方法主要包括粒度特征、磁化率以及地化元素分析。沉积物

的粒度特征分析主要包括粒度组成、频率曲线、CM图、端元分析模型等指标^[80]。因洪水沉积层的物质来源、沉积动力、沉积环境与其他地层的不同,洪水层粒度特征在垂直方向上会呈现有明显的异常变化。在滞流沉积物的粒度特征分析研究中,谢悦波等根据长江、黄河、海河、淮河的研究经验,总结了古洪水滞流沉积物的粒度特征:(1)滞流沉积物的中值粒径在 5Φ 以上,与现代沉积物的中值粒径(大部分 $\leq 5\Phi$)差别较大;(2)滞流沉积物粒径累计 $\leq 4\Phi$ 的颗粒含量超过88%,且粉砂为滞流沉积粒组含量的主要成分;(3)滞流沉积物大部分分选性较好;(4)滞流沉积物为悬移质细颗粒沉积,偏态系数为正偏^[81]。

长江中游的洪泛沉积主要包括溃决洪水事件的沉积、滨岸带的洪水沉积和洪水越岸沉积3种类型,学者们通过越岸沉积物的粒度^[45, 82]、磁组构^[40-41]、地化元素^[43, 47]来重建不同时间尺度的洪水事件。(1)越岸沉积往往是洪水期碎屑物漫过天然堤坝沉积而成的,粒径一般较粗,因此在进行粒度分析时,往往选取砂含量高值、中值粒径高值等相关粒度指标重建古洪水事件^[83]。(2)由于长江洪水沉积物具有低 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ,高 Na_2O 的特征,因此越岸沉积物中地化元素含量变化也可以重建洪水事件;此外,越岸沉积物中地化元素的比值,即 Rb/Sr 的谷值

以及 Zr/Rb 的峰值同样可以用来重建古洪水事件^[43]。(3)长江流域越岸沉积物的质量磁化率高值与频率磁化率低值常与较粗粒径的指标相对应,因此通过越岸沉积的磁化率指标来重建古洪水事件也是可靠的^[44]。(4)从沉积特征来看,长江流域越岸沉积物中包含大量炭化木、具冲积特征的埋藏古树以及砂砾石层^[53],这些沉积特点都指向强水动力沉积事件,可用于重建古洪水事件。

在湖泊沉积环境下,发生洪水事件时,入湖径流水动力显著增加,流域粗颗粒随径流输运到湖泊。当洪水事件停止,入湖径流量显著锐减,水流动力较弱无法输运较粗的沉积颗粒,此时在粗颗粒沉积层上部沉积形成细颗粒沉积^[84]。因此,从粒度组分的角度看,湖泊环境下的洪水沉积会呈现粒径由下至上逐渐变细的沉积特征^[85]。此外,洪水沉积与常态沉积在物质来源与组成中有较大差异,因此洪水沉积物中有机地球化学组分含量也会存在明显不同^[86]。TOC 和 TN 等指标是当前反映湖泊环境变化主要有机指标。TOC 含量指的是沉积过程中没有被矿化分解的部分有机质中碳的总量,反映了沉积物中有机质的含量,而 C/N 比值变化则可以反映沉积物中的有机质来源变化。一般来说,湖泊沉积物中洪水层的 C/N 比值要高于常态沉积的 C/N 比值,故沉积岩芯序列中 C/N 比的异常高值变

化可指示洪水沉积事件^[87-88]。

1.2.2 洪水验证指标新进展

除了传统洪水沉积载体的分析,近年来利用洞穴堆积物的稳定同位素等代用指标指示洪水事件发生规律正成为新的研究趋势。洞穴堆积物(石笋和流石等)是由洞穴中的矿物质沉积形成的,其形成过程与洞穴内的水流有着密切的关系(图 5),其中石笋具有测年准确、生长连续、高分辨率等优点,已被广泛用于亚洲季风区温度和降水的重建^[89]。在轨道及千年时间尺度上,长江流域石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 整体反映了亚洲季风强度的变化^[90];在百年至十年和年的时间尺度上, $\delta^{18}\text{O}$ 可以解释为当地的季风降水量指标^[91]。 $\delta^{18}\text{O}$ 数值偏负,则说明降水量大,指示 EASM 势力偏强^[92],长江流域易发生洪涝灾害。因此 $\delta^{18}\text{O}$ 数值的大小,可以判断夏季风势力的强弱,大体推断出降水强度,进而间接指示洪水规模。 $\delta^{13}\text{C}$ 在轨道及千年时间尺度上主要受当地水文、土壤、植被动态控制^[93];在百年至十年和年的时间尺度上可以反映当地的气候变化,当气候干燥时,地表植被减少、土壤微生物活动减弱,地下渗入水的停留事件增加,更多富含 $\delta^{13}\text{C}$ 的基岩溶解^[89]。因此通过石笋中稳定同位素($\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$)分析可重建高分辨率的强降水事件,进而间接反映极端洪水事件活动变化特征^[89,94]。

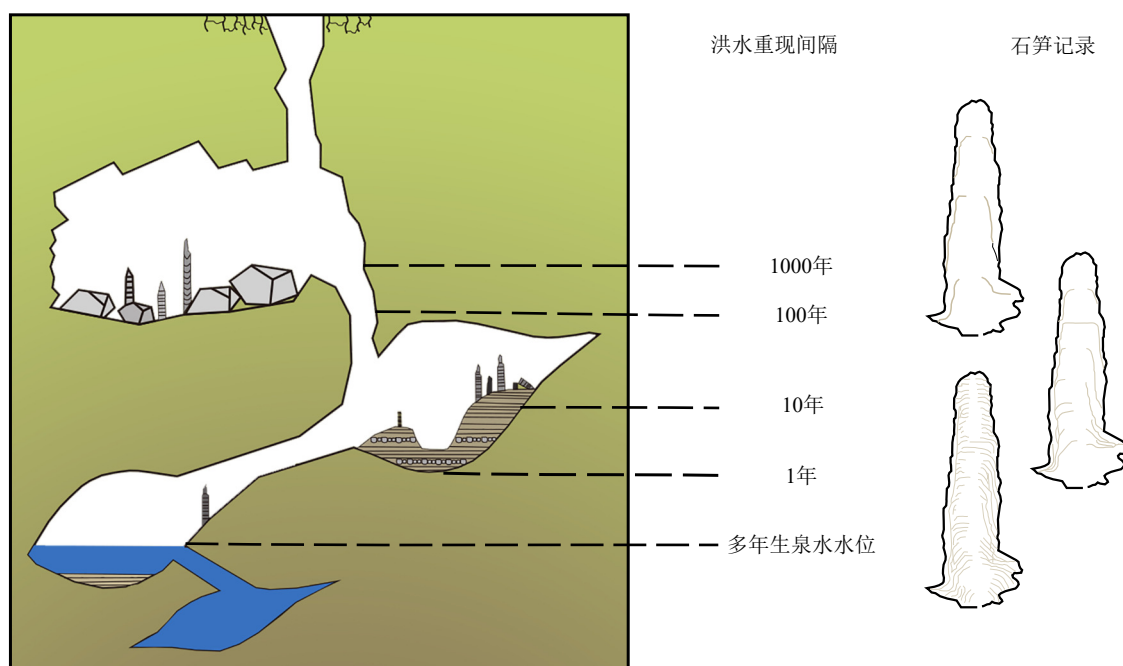


图 5 洞穴堆积物与洪水的关系示意图

据文献^[77]修改。

Fig.5 The relationship between speleothems and flood deposits

Modified from reference^[77].

Tan 等^[94]利用汉江流域祥龙洞中4个高分辨率石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 记录,重建了汉江上游地区6650年以来的季风降水变化。与中国东部季风区其他石笋所记录的 $\delta^{18}\text{O}$ 相比,祥龙洞内 $\delta^{18}\text{O}$ 数值自全新世中期以来同样呈长期上升的趋势,并与北半球夏季太阳辐射逐渐减少相对应,认为在轨道尺度上可能是太阳辐射控制了EASM的变化;而 $\delta^{13}\text{C}$ 记录则显示随着EASM强度减弱,该区域内的降水并未减少,故在此基础上,确认了汉江上游由季风降水增强引起的4个特大洪涝灾害时间段^[30]。湖北落水洞石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 记录表明,全新世以来长江中游区域水文变化周期约为1000a,且长江流域水文的频率和强度变化与ENSO有着密切的关系,部分区域还受到大尺度季风环流影响^[95]。

除了利用石笋中稳定同位素来指示长江洪水事件外,还有部分学者利用石笋中磁性矿物来指示长江中游全新世古洪水。在洞穴上覆盖的土壤中,磁性矿物通过地下水在其中运输,而石笋中的磁铁矿主要是通过流水从土壤进入洞穴并保存在石笋中^[96-97],若降水增加,则促进土壤中成土磁铁矿形成^[98],并加快土壤中的成土磁铁矿沉积在洞穴,进而加速保存在石笋中^[99-100]。因此,石笋中磁铁矿浓度的变化可以反映当地降水的变化。Zhu等人利用和尚洞中石笋IRM_{soft-flux}通量指标重建了中国中部全新世以来的降水变化,并结合长江中游其他地区关于古洪水的研究结果,认为长江中游全新世共发生过10次古洪水事件^[101]。利用石笋记录可以重建高分辨的降水记录,但石笋是洪水记录的间接指标,因此不一定真实反映实际洪水活动规律,今后仍需加强与其他洪水记录的对比分析。

2 长江流域全新世极端洪水事件的历史文献记录

长江流域人类活动历史悠久,历史文献记载类型丰富,这些历史文献中包含大量气候变化和洪水灾害的信息,这就为我们利用历史文献进行洪水灾害的研究提供了可能。长江流域最早的洪水事件可以追溯到公元前21世纪,《史记·五帝本纪》《华阳国志·巴志》等史籍都有提到夏禹时期的长江上游特大洪水,《孟子·滕文公上》中提到在尧的时期,“洪水横流,泛滥于天下;水逆行,泛滥于中国”。长江流域自西晋以来人口数量逐渐增加,因此,近2000年以来史书、地方志等资料较为完备,记录了较为详细的长江干流气候和水文信息^[102]。本文以

李雨凡等所整理的近2000年以来长江干流洪水事件数据集为基础^[103],参考部分长江流域碑文、岩壁、地方志和《中国气象灾害大典·重庆卷》^[104]等史籍资料及已发表的考古资料,集成更为完备的洪水事件历史文献数据集,分析长江两千年来不同气候时期的洪水发生频率变化特征。总体来看,长江流域洪水事件发生频率波动较大但具有明显的阶段性特征(图6),洪水事件从1400年之后变得更加密集,发生洪水事件年份更为集中;1400年之前洪水事件发生年份则普遍较为分散。

长江流域上游共统计到312个洪水年份,其中唐后至五代冷期前(公元781年前)洪水事件年份较少,共有20个年份发生有历史文献记载的洪水事件,中世纪暖期(951—1320年)累积58个年份发生了有记载的洪水事件,发生洪水事件的概率为34.11%,明清小冰期(1321—1920年)共有164个年份发生有记载的洪水事件,约占全部洪水事件年份的1/2,其发生洪水事件年份的频率为27.33%,当前暖期(1921年后)共有70个年份发生了有记载的洪水事件,洪水年份占当前暖期年份的概率为87.5%。由此可知,长江流域上游地区发生洪水年代频率最高时期为现代暖期,其发生洪水事件的年份次数最多的是在明清小冰期。

长江中游共统计431个洪水年份,其中中世纪暖期前(公元950年前)共统计洪水年份33个,由此可见中世纪暖期前洪水发生频率不高,公元950年开始的中世纪暖期共有34个年份发生洪水事件,相比中世纪暖期前洪水发生更为频繁;长江流域明清小冰期期间共统计到294个洪水年份,占中游全部洪水年份的2/3,其洪水年份的概率占这段时期的49%,现代暖期共统计到70个洪水年份,与长江上游现代暖期的洪水年份次数相一致。因此,长江流域中游地区洪水事件发生的频率最高时期亦为现代暖期,发生洪水事件的年份次数最多的是在明清小冰期。

长江下游共统计到389个洪水年份,中世纪暖期前洪水事件发生频率较小,但长江下游地区在魏晋南北朝冷期共统计到36个洪水年份,较长江上游地区和中游地区的区别更为明显。951年开始的中世纪暖期共统计到52个洪水年份,洪水年份占中世纪暖期的30.59%,明清小冰期共统计到233个洪水年份,占明清小冰期时期的38.83%,现代暖期共统计到47个洪水年份,占现代暖期的58.75%,较长江上游和中游地区的洪水年份少。因此,长江流域下游地区洪水事件发生年代集中在明清小冰期,但

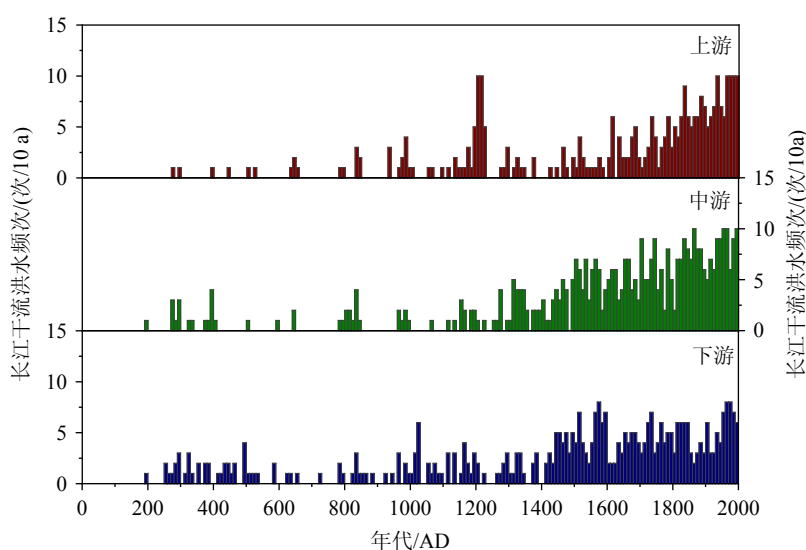


图 6 长江干流上中下游分段洪水频次
据文献 [103] 修改。

Fig.6 Flood frequency in the upper, middle, and lower reaches of the Yangtze River main stream

Modified from reference [103].

洪水事件发生频率最高的时期同样是在现代暖期。

尽管历史文献记录与地质学代用记录相比,记录年限较短,但历史文献记录在年代精确性上具有明显优势,一般的洪水事件在历史文献中可以精确记录至年、月,甚至到洪水事件发生的日期。因此,学者们在利用其他代用记录识别古洪水事件时,常与历史文献记载中的时间互相对比,从而提高洪水发生年代结果的精确度与可信度^[105]。

3 长江流域古洪水事件流量和水位的重建

流量和水位的重建是古洪水水文学研究的核心内容,利用沉积物及考古遗址的赋存位置、高程等信息,根据水力学理论,恢复古洪水洪峰水位及流量,可为当代水利工程及防洪工作提供重要的科学参考。在基岩峡谷区,树木洪水痕、侵蚀痕淤泥线、基岩冲刷特征等也可以用来识别和重建历史时期古洪水事件,恢复其水位与流量^[65, 106-107]。古洪水 SWD 作为古洪水事件的直接记录,是当前学界进行洪水流量和水位重建的主要沉积载体之一。SWD 的高程、厚度以及形态可确定古洪水水位,目前利用 SWD 来重建古洪水流量的方法主要包括:通过 SWD 顶面高程确定洪水水位、通过 SWD 尖灭点高程确定洪水水位和通过古洪水 SWD 厚度与含沙量的关系确定洪水水位(图 2b)。通过 SWD 顶面高程确定的洪水水位可认为是最小洪水水位;而

SWD 顶面上有一定的水深,因此通过 SWD 尖灭点的高程可以更精确地近似洪水水位^[108];但是在实际野外考察过程中,有的剖面并没有形成或保存 SWD 尖灭点^[109],故也可通过 SWD 的厚度与含沙量的关系重建古洪水水位。结合 SWD 指示的水位,通过数学模型和水文模型分析,可以恢复古洪水流量^[66]。然而基岩峡谷地区 SWD 也普遍存在保存潜力较差、保存不够连续等问题,不利于洪水事件序列时间规律性认识。

目前,长江古洪水重建主要集中在中上游基岩峡谷地区,在长江流域中下游地区利用冲积平原越岸沉积物进行古洪水水文学重建案例则相对匮乏。这主要由于长江中下游河道不稳定,准确重建古洪水事件的水位及流量难度巨大^[71];而中上游的基岩峡谷区河道较为稳定,有利于保存洪水地质记录,便于古洪水事件重建及流量恢复。

部分学者根据黄河下游的地形特征以及洪水沉积物特征,尝试定量恢复 1642 年黄河下游古洪水的流量及相关水文信息^[110],但利用湖泊沉积物来重建古洪水事件的流量和水位在我国还未有深入的认识与实践。洪水强度的判断以半定量和定性为主,主要依据为当洪水来临时,河水流量异常增加,输送沉积物至湖泊的水流动力更强、流量更高,故洪水沉积物越粗越厚代表该次洪水事件的流量及水位越高^[60, 111]。理论上沉积物的颗粒大小以及沉积物的厚度可以用来重建洪水水位及流量^[112],但所有的沉积物都有可能由相似的沉积物组成且由于

沉积物分辨率不高,如何判断每个洪水沉积物中能够反映洪峰的组分粒径是需要解决的重要问题^[113]。此外,由于湖泊内各个地点岩芯厚度与地形相关,洪水沉积物的厚度需要在湖泊内各个地点进行充分验证^[112]。

一些学者还利用长江流域依据考古遗址和历史文献记录初步重建历史时期古洪水水位^[79]。周凤琴利用埋藏古遗址、古墓葬、古代水工建筑、水文考古、古建筑以及现代实测水位对比,考证了荆江5 000年以来水位上升,并通过历史文献记载推算荆江历史水位,认为泥沙淤积与口穴堵塞是荆江水位上升的主要原因^[114]。

综上所述,目前长江流域古洪水水位及流量的重建工作主要基于中上游的基岩峡谷地区的SWD来进行重建,中下游平原结合越岸沉积物及湖泊沉积物进行洪水水位和流量的重建工作还未深入开展。

4 长江流域极端洪水事件与亚洲季风变化的关系

全新世极端洪水事件对气候变化甚至是微小的气候变化都异常敏感^[115]。长江流域地处中国季风降水影响的核心区,洪水事件发生的频率和强度与季风气候的异常变化息息相关。

前人就长江流域极端洪水事件的频发时期开展了大量卓有成效的工作,为揭示极端洪水事件发生规律与气候变化的关系奠定了良好的基础。在长江上游地区,葛兆帅等通过三峡坝址附近古洪水滞流沉积物的实验分析,得出长江上游的特大洪水期为4 840~3 983 aBP,并认为长江上游特大洪水事件与气候剧烈波动有关^[116];Zhu等根据中坝遗址考古记录,得出长江上游的洪水事件集中在战国初期(400—350BC)、西周(920—900BC)、夏朝(2070—1600BC)、新石器晚期(3000—2300BC)^[12]。在长江中游地区,黄春长团队通过梳理汉江上游近十年古洪水成果,确定了汉江上游特大洪水事件的发生期主要集中在9个时期:11500~11400、9000~8500、8500~8400、7500~7000、5500~5000、4200~4000、3200~2800、1900~1700和1000~900 aBP,这些时期对应了全新世以来气候突变或转折,认为汉江上游的古洪水事件是对气候突变的响应^[117];吴立综合江汉平原及其周边地区106个考古遗址文化层的¹⁴C年代数据和12个光释光年代结果,认为全新世江汉地区洪水频发期为4 900~4 600 cal. aBP和4 100~3 800 cal. aBP,并认为4 000 cal. aBP的气候

异常事件导致的极端洪水事件是石家河文化消亡的原因^[79]。长江下游地区,朱诚等根据南京宝华山地区剖面洪水沉积物分析结果,得出长江下游地区在6 588±192 aBP、5 720±80 aBP和5 410±120~5 145±84 aBP期间发生了规模较大的山地洪水,导致这些山地洪水的原因是气候-海面的短期震荡及突变事件^[118]。综上所述,学者们普遍认为极端洪水事件的发生与气候突变有关,因此本文探讨极端洪水事件与气温和降水之间的关系。

中国东部地区全新世气温存在明显的波动变化^[119],其中变化显著的阶段包括全新世大暖期、中世纪暖期以及明清小冰期等气候事件。为了更深入理解未来全球变暖的背景下极端洪水事件发生规律,学者们就长江流域百年-千年尺度极端洪水发生频率与全新世气候特征时期(尤其是暖期)的关系开展了大量研究^[53, 116-117],并取得了很多重要认识。在小冰期阶段(Little Ice Age,简称LIA)及中世纪气候异常阶段(Medieval Climate Anomaly,简称MCA),北半球夏季太阳辐射较低,长江流域气候波动频繁,此时和尚洞磁性矿物所指示的两次洪水事件皆处在气温由低向高转折的阶段;黑暗时代冷期(Dark Age Cold Period,简称DACP)及罗马暖期(Roman Warm Period,简称RWP)共对应3次长江流域极端洪水事件,其中两次位于气温变化的转折点,另一次出现在气温降低的过程中速率突变的转折点;4.2 ka事件处于长江流域气温逐渐升高转为逐渐降低的转折处,对应长江流域极端洪水事件;而8.2 ka事件也存在气温的剧烈波动,此气温突变事件未导致长江流域极端洪水事件的发生,可能由于暂无人类活动干预以及北半球夏季太阳辐射较高,(图7a—c)。可以看出,全新世长江流域的特大洪水发生期大多处于气温变化的转折期,与大九湖泥炭所模拟出的全新世以来的温度对应良好,说明长江流域古洪水事件是对全球气候突变的响应。

长江流域洪水的波动变化不仅跟气温有关,极端降水也是形成极端洪水的另一核心因素。施雅风等根据1840—2000年间共32次大洪水记录发现,因长江流域处于亚洲夏季风湿润区,其洪水对降水的敏感性远大于对温度的敏感性^[126]。相关研究表明关于长江流域降水会受到东亚夏季风(EASM)和印度夏季风(ISM)的双重影响,这使得长江流域极端洪水与季风关系复杂性特征更加显著。在长江上游地区,葛兆帅等通过24次全新世特大洪水序列与川渝地区近两千年的洪灾史料,发现特大洪水事件多发生于ISM较弱的阶段,这些阶

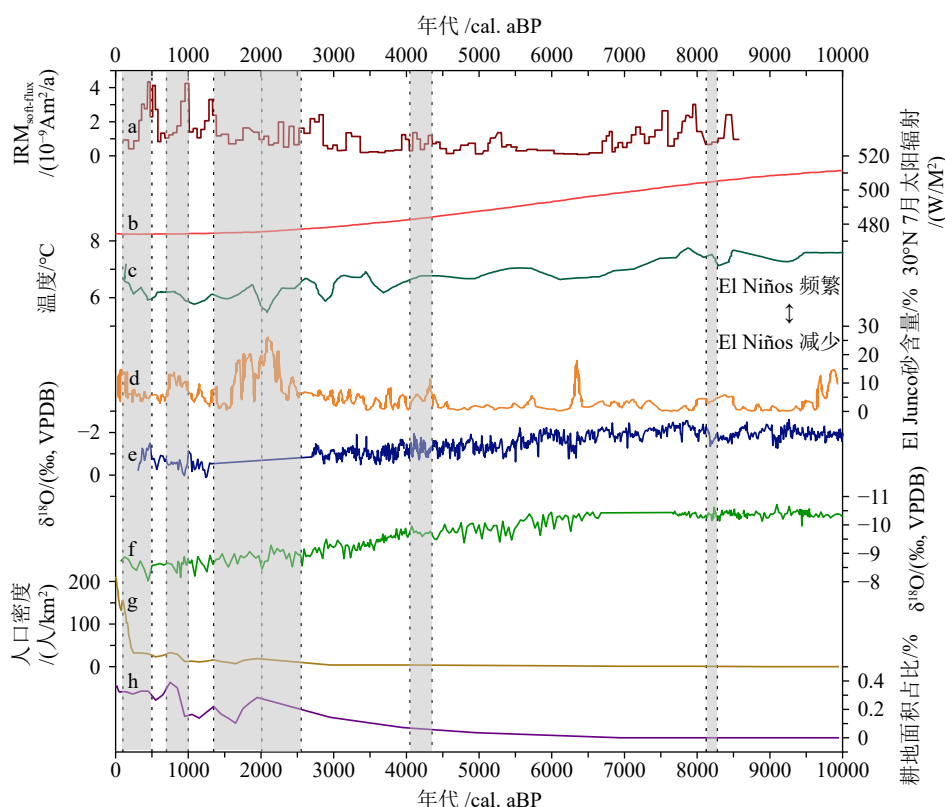


图 7 长江流域全新世洪水记录及其与气候和人类活动记录的对比

a: 和尚洞石笋 HS4 的 $IRM_{\text{soil-flux}}^{[101]}$, b: 10 000 cal. aBP 以来北半球夏季太阳辐射变化^[120], c: Huang 等重建的 10 000 年以来气温变化^[121], d: 10 000 cal. aBP 以来 El Junco 粉砂记录的 ENSO 变化情况^[122], e: 阿曼 Qunf 洞穴石笋所记录的 $\delta^{18}O$ 数据指示西南季风变化^[123], f: 湖北神农架地区三宝洞石笋所记录的 $\delta^{18}O$ 指示东亚季风变化^[124], g: HYDE3.0 数据库 10 000 cal. aBP 以来江汉平原地区人口密度变化^[125], h: HYDE3.0 数据库 10 000 cal. aBP 以来江汉平原地区耕地垦殖率变化^[125](图中 6 处阴影从左至右分别对应 LIA-小冰期、MCA-中世纪气候异常、DACP-黑暗时代冷期、RWP-罗马暖期、4.2ka 寒冷事件、8.2ka 寒冷事件)。

Fig.7 The Holocene flood records in the Yangtze River Basin and their comparison with climatic and human activity records

a: $IRM_{\text{soil-flux}}$ in stalagmite HS4, Heshang Cave^[101], b: changes of solar radiation in the northern hemisphere during summer since 10000 cal.aBP^[120], c: changes in temperature over the past 10,000 years as reconstructed by Huang et al.^[121], d: changes of ENSO recorded in El Junco silt since 10000 cal. aBP^[122], e: the $\delta^{18}O$ data recorded by stalagmites in Qunf Cave, Oman, indicate changes in the southwest monsoon^[123], f: the $\delta^{18}O$ recorded by stalagmites in Sanbao Cave, Shennongjia area, Hubei Province indicates the change of East Asian monsoon^[124], g: the change of population density in Jiangnan Plain area since 10000 cal. aBP is obtained by HYDE3.0 database^[125], h: changes of cropland cultivation ratio in Jiangnan Plain since 10000 cal. aBP^[125] (The six shadows in the figure correspond from left to right to LIA- Little Ice Age, MCA-Medieval Climate Anomaly, DACP-Dark Age Cold Period, RWP-Roman Warm Period, 4.2ka cold event, and 8.2ka cold event respectively).

段以西南季风气候快速变化为特征,处于气候剧烈波动期或气候的转型期^[127]。通过阿曼 Qunf 洞穴石笋的 $\delta^{18}O$ 数据与长江流域古洪水事件频发期对应可以发现(图 7e, ISM 指标),当石笋 $\delta^{18}O$ 异常偏正,对应 ISM 势力较弱,长江上游水汽供应不足,其降水较少,但当气候突变异常时期,ISM 可能出现异常变化,长江上游出现异常降水,造成洪水洪峰流量较大,形成特大洪水;当 $\delta^{18}O$ 异常偏负,ISM 势力较强,长江上游降水充足,上游容易产生洪水灾害。在长江中下游地区,Guo 等将汉江上游 SWD1-3 与全新世黄土-古土壤地层对比,结合 OSL 测年结果,发现这些洪水事件是发生在 9 500~8 500、3 200~

2 800、1 800~1 700 aBP,对应着东亚夏季风异常时期^[37]。对比湖北神农架地区三宝洞 $\delta^{18}O$ 数据(图 7f, EASM 指标)和长江洪水发生时期,发现 EASM 势力较强时期,长江中下游降水较少,这是因为副高迅速北移使得中国东部夏季雨带偏北;当 EASM 势力较弱时期,中下游季风雨带偏南,降水带长期滞流在长江中下游地区,使得长江中下游易发生洪水事件。因此,长江中下游地区的洪水事件与东亚夏季风异常突变也有着密切的对应关系。

长江流域极端洪水事件与季风气候的变化的紧密联系不仅在地质记录有所体现,在历史文献中也有很好的对应性(图 6)。(1)在公元 950 年之前,

历史文献记载的洪水事件较少,长江中游和下游在魏晋南北朝洪水事件较多,这主要与EASM势力较强、厄尔尼诺事件活动强烈有着密切的关系,而上游地区则主要集中在唐后至五代冷期,其主要原因是上游地区在魏晋南北朝时期由于西南季风较弱,上游地区携带的水汽不足,而唐后至五代西南季风强盛,给长江上游带来充足的水汽;(2)公元950年之后,历史文献记载普遍偏多,一方面与ISM、EASM以及厄尔尼诺事件活动有关,最主要的原因是由于中世纪暖期开始,长江流域的人口增加较多,因此在公元950年之后长江流域的洪水事件与人类活动的关系密切。同时,长江流域极端洪水事件与中游江汉平原人口密度及耕地数据也具有良好的对应性(图7g、h),进一步印证了极端洪水事件与人类活动之间的密切关系。

长江流域的极端洪水事件与气温和季风转折突变时期有着良好的对应关系,笔者认为主要有两点原因:(1)当温度升高时,空气中饱和水汽压显著增加,能容纳的水汽含量增加,原先已饱和的水面(尤其是海面)会重新开始蒸发,即根据克劳修斯-克拉皮隆方程,当气温每上升1℃,大气中水汽含量增加7%^[128]。随后,当温度降低时,空气中,饱和水汽压降低,多余的水汽会凝结出来,形成降雨。因此,当气温急剧变化时,气候变率增加,干旱事件与极端降水导致的洪水事件频率显著增加,与长江流域的极端洪水事件频率具有较好的一致性。(2)气候变化调整了大气环流。热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, 简称ITCZ)是位于赤道附近上空的区域,具有低气压、强对流和大量降水的特点^[129],当全球气候变暖,ITCZ发生异常移动,对流活动加强,改变了经圈环流的强度^[130],导致西太平洋副热带高压长时间位置异常,我国长江流域气候变率加强,台风活动更加活跃,易造成极端降水事件,进而引发极端洪水事件。另一方面,索马里急流附近盛行湿空气,其两侧为相对干区,是西南季风的重要组成部分;当全球气候变暖,索马里急流向北移动越过赤道,为长江中上游带来大量水汽,引发极端降水事件^[131]。

5 长江流域极端洪水事件与厄尔尼诺事件的关系

目前,学界认为长江流域洪水事件与ENSO之间存在明显的相关性^[132-133]。东亚夏季风和冬季风受到El-Niño和La-Niña事件的影响,在El-Niño事

件发生前的冬季,北风在长江流域盛行;在El-Niño事件发生前的夏季,西太平洋副高相对较弱,而印度洋气压较高,西南气流较弱。当La-Niña事件偏强时,低印度气压降低了中国南方夏季风的强度,导致长江中下游流域降水减少。冯利华等通过分析1865—1980年期间汉口水文站监测数据,认为长江洪水与厄尔尼诺事件具有较密切的关系,并且在厄尔尼诺次年出现洪水的可能性更大,但其相关程度可能与研究地点的区域位置有关,也可能与其地点的气候机制的差异有关^[134]。Guan等结合江汉平原JH001沉积物岩心的元素记录,确定了9个古洪水频发时期,发现古洪水事件的发生时期与长江中游ENSO相关记录吻合,并重建了ENSO记录^[47]。Jiang等通过研究1470—2003年长江洪水事件与ENSO的相关性发现,ENSO事件间隔越短,长江流域旱涝灾害响应越快;ENSO事件持续时间较长,长江流域的洪水/干旱期也持续较长,且长江中下游洪水发生在El Niño事件之后,干旱发生在La-Niña事件之后^[135]。因此长江流域对ENSO事件的响应是长期的。结合图7d, El Junco湖泊的粉砂含量所指示的厄尔尼诺事件发生频率可以看出,长江流域洪水频发期厄尔尼诺相比于其他时期活动的频率交替更为频繁,进而影响长江流域洪水事件发生的频率。

6 结论与展望

近20多年来,众多学者利用长江流域古洪水滞流沉积物、冲积平原区的越岸洪水沉积及湖泊洪水沉积等沉积记录进行古洪水事件的研究,取得了丰硕的成果。本文通过综述各种极端洪水事件的地质记录和历史记录,确定全新世以来极端洪水事件的频发期,并与区域关键气候代用指标进行对比,发现洪水事件频发期主要跟气候的急剧突变和强烈的人类活动有关。但目前的研究仍存在以下不足:首先,当前仍以单一的地质记录载体和时间尺度研究为主,缺乏长时间尺度、高分辨率的洪水序列;其次,当前洪水流量和水位重建主要集中在中上游基岩地区,缺乏开展中下游的相关重建工作;再次,长江流域的极端洪水事件规律理解仍不够充分,全新世洪水活动的气候和人类活动发生机制当前还缺乏量化的深入认识。故今后应加强以下几个方面研究:(1)不断加强各种代用记录的综合研究,融合不同时间分辨率和时间尺度的代用记录,重建更为准确的洪水事件;(2)加强中下游湖泊

和冲积平原的洪水流量和水位的重建; (3) 仍需不断加强对长江流域洪水事件的归因分析, 量化洪水与气候变化及人类活动的关系; (4) 加强数值模拟方面的研究, 进一步探索洪水事件发生的气候驱动机制与周期性变化的研究。

参考文献 (References)

- [1] Baker V R. Paleoflood hydrology and extraordinary flood events[J]. *Journal of Hydrology*, 1987, 96(1-4): 79-99.
- [2] 顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应 [J]. *地理学报*, 2016, 71(5): 718-730. [GU Xihui, ZHANG Qiang, KONG Dongdong. Spatiotemporal patterns of extreme precipitation with their responses to summer temperature[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5): 718-730.]
- [3] 王立琨, 陶祖钰, 杨阳, 等. 1998 年长江洪水大暴雨的卫星云图分析 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2000, 36(1): 87-94. [WANG Likun, TAO Zuyu, YANG Yang, et al. Analysis of satellite image characters of severe storm rainfall during the flood of Yangtze River in 1998[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 2000, 36(1): 87-94.]
- [4] 新华社. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告公布 [EB/OL]. [2022-11-26]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/21/content_5669723.htm. [Xinhua News Agency. Investigation Report on “7·20” Heavy Rainstorm Disaster in Zhengzhou[EB/OL]. [2022-11-26]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/21/content_5669723.htm.]
- [5] 余锡平, 单楷越. 华北平原极端暴雨洪水事件共性机制探讨及对策建议 [J]. *中国水利*, 2023, 58(18): 24-28. [YU Xiping, SHAN Kaiyue. Common mechanisms and disaster prevention strategies for catastrophic rainfall and flooding events in the North China Plain[J]. *China Water Resources*, 2023, 58(18): 24-28.]
- [6] Yu S Y, Li W J, Zhou L, et al. Human disturbances dominated the unprecedentedly high frequency of Yellow River flood over the last millennium[J]. *Science Advances*, 2023, 9(8): eadf8576.
- [7] 高启慧, 秦圆圆, 梁媚聪, 等. IPCC 第六次评估报告综合报告解读及对我国的建议 [J]. *环境保护*, 2023, 51(Z2): 82-84. [GAO Qihui, QIN Yuanyuan, LIANG Meicong, et al. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 synthesis report[J]. *Environmental Protection*, 2023, 51(Z2): 82-84.]
- [8] Ely L L, Enzel Y, Baker V R, et al. A 5000-year record of extreme floods and climate change in the southwestern United States[J]. *Science*, 1993, 262(5132): 410-412.
- [9] Ely L L. Response of extreme floods in the southwestern United States to climatic variations in the Late Holocene[J]. *Geomorphology*, 1997, 19(3-4): 175-201.
- [10] Gong D Y, Zhu J H, Wang S W. Flooding 1990s along the Yangtze River, has it concern of global warming?[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2001, 11(1): 43-52.
- [11] Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, et al. The changing character of precipitation[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(9): 1205-1218.
- [12] Zhu C, Zheng C G, Ma C M, 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.
- [13] Zhu C, Ma C M, Xu W F, et al. Characteristics of paleoflood deposits archived in unit T0403 of Yuxi Site in the Three Gorges reservoir areas, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(S1): 1-17.
- [14] Huang M, Zhu C, Ma C M, et al. The hongqiaocun site: the earliest evidence of ancient flood sedimentation of the water conservancy facilities in the Chengdu Plain, China[J]. *CATENA*, 2020, 185: 104296.
- [15] Jia T J, Ma C M, Zhu C, et al. Depositional evidence of palaeofloods during 4.0-3.6 ka BP at the Jinsha site, Chengdu Plain, China[J]. *Quaternary International*, 2017, 440: 78-89.
- [16] 朱诚, 徐佳佳, 黄明, 等. 成都平原马街遗址古洪水事件遗存考古发现与研究 [J]. *地学前缘*, 2021, 28(2): 181-201. [ZHU Cheng, XU Jiajia, HUANG Ming, et al. Archaeological discoveries and research on the remains of an ancient flood event at the Majie Site in the Chengdu Plain[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(2): 181-201.]
- [17] 张芸, 朱诚. 长江三峡大宁河流域大昌地区环境考古 [J]. *科学通报*, 2008, 53(S1): 121-131. [ZHANG Yun, ZHU Cheng. Environmental archaeology of the dachang region in the Daning Valley, the Three Gorges reservoir region of the Yangtze River, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(S1): 140-152.]
- [18] 李兰, 白九江, 代玉彪. 重庆永川汉东城遗址地层记录的长江上游唐代洪水事件 [J]. *第四纪研究*, 2020, 40(2): 556-567. [LI Lan, BAI Jiujia, DAI Yubiao. Flood event recorded by the layer of handongcheng site and its significance to the Upper reaches of yangtze river[J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(2): 556-567.]
- [19] 李杰, 郑卓, 邹后曦, 等. 重庆阿蓬江涪陵口遗址近 3000 年来环境变化研究 [J]. *第四纪研究*, 2011, 31(3): 554-565. [LI Jie, ZHENG Zhuo, ZOU Houxi, et al. Environmental research of a 3000 year record from fuqikou archaeological sites in apeng river, chongqing[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(3): 554-565.]
- [20] 郑树伟, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游郧县曲远河河口段全新世古洪水水文状态研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(12): 1608-1613. [ZHENG Shuwei, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Palaeoflood hydrological study in the quyuanhekou reach in the Upper reaches of the hanjiang river[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(12): 1608-1613.]
- [21] Zha X, Huang C C, Pang J L, et al. Reconstructing the palaeoflood events from slackwater deposits in the Upper reaches of Hanjiang River, China[J]. *Quaternary International*, 2015, 380-381: 358-367.
- [22] Mao P N, Pang J L, Huang C C, et al. A multi-index analysis of the extraordinary paleoflood events recorded by slackwater deposits in the Yunxi Reach of the Upper Hanjiang River, China[J]. *CATENA*, 2016, 145: 1-14.
- [23] 查小春, 黄春长, 庞奖励, 等. 汉江上游郧西段全新世古洪水事件研究 [J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 671-680. [ZHA Xiaochun, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. The Holocene palaeoflood events in the yunxi reach in the Upper reaches of Hanjiang River[J]. *Acta Geo-*

- graphica Sinica, 2012, 67(5): 671-680.]
- [24] 查小春, 黄春长, 庞奖励, 等. 汉江上游沉积记录的东汉时期古洪水事件考证研究[J]. 地理学报, 2017, 72(9): 1634-1644. [ZHA Xiaochun, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. The palaeoflood events recorded by slackwater deposits in sedimentary profiles during the eastern Han Dynasty in the Upper reaches of the Hanjiang River[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(9): 1634-1644.]
- [25] 吉琳, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游晏家棚段全新世古洪水研究[J]. 地球科学进展, 2015, 30(4): 487-494. [JI Lin, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Holocene palaeoflood studies of the Yanjiapeng reach in the Upper Hanjiang River, China[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(4): 487-494.]
- [26] 郑树伟, 庞奖励, 黄春长, 等. 湖北弥陀寺汉江段北宋时期古洪水研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(3): 153-160. [ZHENG Shuwei, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Study on palaeoflood in northern Song Period at Mituosi segment of Hanjiang River, Hubei province[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(3): 153-160.]
- [27] Huang C C, Pang J L, Zha X, et al. Extraordinary hydro-climatic events during the Period AD 200–300 recorded by slackwater deposits in the Upper Hanjiang River valley, China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 374: 274-283.
- [28] 郑树伟, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游黄坪村段古洪水滞流沉积物研究及意义[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1025-1031. [ZHENG Shuwei, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. The significance of palaeoflood slack water deposit in Huang Ping Site in Hanjiang River[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(5): 1025-1031.]
- [29] Guo Y Q, Huang C C, Zhou Y L, et al. Sedimentary record and luminescence chronology of palaeoflood events along the Gold Gorge of the Upper Hanjiang River, Middle Yangtze River Basin, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 156: 96-110.
- [30] Tan L C, Cai Y J, Cheng H, et al. Centennial-to decadal-scale monsoon precipitation variations in the Upper Hanjiang River region, China over the past 6650 years[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 482: 580-590.
- [31] Guo Y Q, Huang C C, Zhou Y L, 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]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2016, 462: 70-84.
- [32] 李晓刚, 黄春长, 庞奖励, 等. 汉江上游白河段万年尺度洪水水文学研究[J]. 地理科学, 2012, 32(8): 971-978. [LI Xiaogang, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Palaeoflood hydrological study in the baihe reach in the Upper reaches of the Hanjiang River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(8): 971-978.]
- [33] Zhang Y Z, Huang C C, Pang J L, et al. Holocene paleofloods related to climatic events in the Upper reaches of the Hanjiang River valley, Middle Yangtze River Basin, China[J]. Geomorphology, 2013, 195: 1-12.
- [34] Li X G, Huang C C, Zhang Y Z, et al. Hydrological reconstruction of extreme palaeoflood events 9000-8500 a BP in the Danjiang River Valley, tributary of the Danjiangkou Reservoir, China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13: 137.
- [35] Wang L S, Huang C C, Pang J L, et al. Paleofloods recorded by slackwater deposits in the Upper reaches of the Hanjiang River valley, Middle Yangtze River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1249-1256.
- [36] 周亮, 黄春长, 周亚利, 等. 汉江上游安康东段古洪水事件光释光测年研究[J]. 地质学报, 2013, 87(11): 1703-1714. [ZHOU Liang, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. OSL dating of the palaeoflood events in the ankang east reach in the Upper Hanjiang River valley[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(11): 1703-1714.]
- [37] Guo Y Q, Huang C C, Pang J L, 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.
- [38] Mao P N, Pang J L, Huang C C, et al. Paleoflood evidence for an Upper limit of the maximum flood magnitudes along the Gold Gorge, the Upper Hanjiang River, China[J]. CATENA, 2022, 212: 106111.
- [39] Jia M, Li C, Mao X, et al. Climate-human-environment interactions in the middle Yangtze Basin (central China) during the middle Holocene, based on pollen and geochemical records from the Sanfangwan Site[J]. Catena, 2021, 204: 105357.
- [40] 张玉芬, 李长安, 陈亮, 等. 基于磁组构特征的江汉平原全新世古洪水事件[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2009, 34(6): 985-992. [ZHANG Yufen, LI Chang'an, CHEN Liang, et al. Magnetic fabric of Holocene palaeo-floods events in Jiangnan plain[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(6): 985-992.]
- [41] 陈亮, 张玉芬, 李长安, 等. 江汉平原消泗剖面沉积物磁组构特征[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(3): 190-195. [CHEN Liang, ZHANG Yufen, LI Chang'an, et al. Magnetic fabric characteristics of the sediments in the xiaosi profile of Jiangnan Plain of Hubei province[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(3): 190-195.]
- [42] Liu X J, Min F Y, Kettner A J. The impact of large to extreme flood events on floodplain evolution of the Middle and Lower reaches of the Yangtze River, China[J]. CATENA, 2019, 176: 394-409.
- [43] 张跃颖, 李长安, 张玉芬, 等. 长江武汉段 4.5~2.5 ka 沉积地层与古洪水标志识别[J]. 地质论评, 2019, 65(4): 973-982. [ZHANG Luoying, LI Chang'an, ZHANG Yufen, et al. Sedimentary strata and paleoflood identification indexes of Wuhan section, Yangtze River, during 4.5~2.5 ka BP[J]. Geological Review, 2019, 65(4): 973-982.]
- [44] 熊智秋, 张玉芬, 毛欣, 等. 武汉地区 ZK145 钻孔沉积物磁性特征及对古洪水的记录[J]. 地球科学, 2020, 45(2): 663-671. [XIONG Zhiqiu, ZHANG Yufen, MAO Xin, et al. Magnetic characteristics of ZK145 borehole sediments in Wuhan area and its[J]. Earth Science, 2020, 45(2): 663-671.]
- [45] 朱海, 张玉芬, 李长安. 端元分析在长江武汉段古洪水识别中的应用[J]. 沉积学报, 2020, 38(2): 297-305. [ZHU Hai, ZHANG Yufen, LI Chang'an. The application of end-member analysis in identification of paleo-floods in wuhan section of the Yangtze River[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(2): 297-305.]
- [46] 吴立, 朱诚, 李枫, 等. 江汉平原钟桥遗址地层揭示的史前洪水事件[J]. 地理学报, 2015, 70(7): 1149-1164. [WU Li, ZHU Cheng, LI Feng, et al. Prehistoric flood events recorded at the Zhongqiao neo-

- lithic site in the Jiangnan Plain, Central China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1149-1164.]
- [47] Guan S, Yang Q, Li Y N, et al. River flooding response to ENSO-related monsoon precipitation: evidence from Late Holocene core sediments in the Jiangnan Plain[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 589: 110834.
- [48] 罗淑元, 郑丽匀, 曹向明, 等. 长江中游河漫滩沉积序列对洪水事件的指示: 以荆州扬子江剖面为例 [J]. 人民长江, 2021, 52(1): 6-12. [LUO Shuyuan, ZHENG Liyun, CAO Xiangming, et al. Indication of flood events based on floodplain sedimentary sequence in Middle reaches of Changjiang River since 19th century: case of Yangzjiang profile in Jingzhou city[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(1): 6-12.]
- [49] 史小丽, 秦伯强. 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, 2009, 29(2): 117-122. [SHI Xiaoli, QIN Boqiang. Grain-size characteristics and their environmental significance of wanghai lake sediments in the Middle reach of yangtze river[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(2): 117-122.]
- [50] 袁世飞. 近百年来长江中游牛轭湖沉积记录的高分辨率环境演变研究 [D]. 上海师范大学硕士学位论文, 2014. [YUAN Shifei. High-resolution environmental evolution of Oxbow Lake sedimentary records in the Middle reaches of the Yangtze River in the last hundred years[D]. Master Dissertation of Shanghai Normal University, 2014.]
- [51] 王峰. 近百年来长江中游牛轭湖沉积特征及其环境意义: 以长江荆江段牛轭湖群为例 [D]. 上海师范大学硕士学位论文, 2015. [WANG Feng. Sedimentary characteristics and environmental significance of Oxbow Lake in the Middle reaches of Yangtze River in the last hundred years[D]. Master Dissertation of Shanghai Normal University, 2015.]
- [52] 曹向明. 长江中下游地区高分辨率河湖相沉积记录的洪水事件及其规律 [D]. 江西师范大学硕士学位论文, 2020. [CAO Xiangming. Flood events recorded by high-resolution fluvial and lacustrine deposits in the Middle and Lower reaches of the yangtze river and their properties[D]. Master Dissertation of Jiangxi Normal University, 2020.]
- [53] 朱诚, 于世永, 史威, 等. 南京江北地区全新世沉积与古洪水研究 [J]. 地理研究, 1997, 16(4): 23-30. [ZHU Cheng, YU Shiyong, SHI Wei, et al. Holocene deposits and paleo-floods on the north bank of the Yangtze River, Nanjing area[J]. *Geographical Research*, 1997, 16(4): 23-30.]
- [54] Yu S Y, Zhu C, Wang F B. Radiocarbon constraints on the Holocene flood deposits of the Ning - Zhen Mountains, Lower Yangtze River area of China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2003, 18(6): 521-525.
- [55] Baker V R. Paleoflood hydrologic techniques for the extension of streamflow records[J]. *Transportation Research Record*, 1983, 4(922): 18-23.
- [56] Kochel R C, Baker V R. Paleoflood hydrology[J]. *Science*, 1982, 215(4531): 353-361.
- [57] Baker V R, Kochel R C, Patton P C. Flood geomorphology[M]. Wiley, 1988.
- [58] Wright M N, Bird B W, Gibson D K, et al. Fluvial responses to Late Holocene hydroclimate variability in the midcontinental United States[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2023, 301: 107939.
- [59] Macklin M G, Lewin J. River sediments, great floods and centennial - scale Holocene climate change[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2003, 18(2): 101-105.
- [60] Wilhelm B, Arnaud F, Sabatier P, et al. 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*, 2013, 28(2): 189-199.
- [61] 杨劲松, 刘林敬, 赵华, 等. 黄河故道区晚全新世沉积记录及其对洪水灾害事件的响应 [J]. 中国地质, 2023, 50(4): 1004-1015. [YANG Jinsong, LIU Linjing, ZHAO Hua, et al. Late Holocene sedimentary records along the abandoned channel areas of the Yellow River and their response to flood hazards[J]. *Geology in China*, 2023, 50(4): 1004-1015.]
- [62] Huang C C, Pang J L, Zha X, et al. Holocene palaeoflood events recorded by slackwater deposits along the Lower Jinghe River valley, Middle Yellow River Basin, China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, 27(5): 485-493.
- [63] Baker V R. Paleoflood hydrology: origin, progress, prospects[J]. *Geomorphology*, 2008, 101(1-2): 1-13.
- [64] 谢悦波, 杨达源. 古洪水平流沉积基本特征 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1998, 26(6): 5-10. [XIE Yuebo, YANG Dayuan. Basic characteristics of paleoflood slack water deposits[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 1998, 26(6): 5-10.]
- [65] Jarrett R D. Paleohydrology and its value in analyzing floods and droughts[J]. *US Geological Survey Water-Supplementary Paper*, 1991, 2375: 105-116.
- [66] Guo Y Q, Huang C C, Pang J L, et al. Reconstruction palaeoflood hydrology using slackwater flow depth method in the Yanhe River valley, Middle Yellow River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 156-171.
- [67] 吴帅虎, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游河谷古洪水滞流沉积物特征 [J]. 土壤通报, 2013, 44(2): 271-276. [WU Shuaihu, PANG Ji-angli, HUANG Chunchang, et al. The palaeoflood slackwater sediments feature in the valley of the Upper reaches of the Hanjiang River[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(2): 271-276.]
- [68] 李晓刚, 黄春长, 庞奖励. 丹江上游全新世早期古洪水滞流沉积物粒度特征研究 [J]. 干旱区地理, 2014, 37(4): 646-655. [LI Xiaogang, HUANG Chunchang, PANG Jiangli. Grain-size characteristics of the early Holocene flood Slackwater deposits in the Upper reaches of Danjiang River[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(4): 646-655.]
- [69] Wohl E. An integrative conceptualization of floodplain storage[J]. *Reviews of Geophysics*, 2021, 59(2): e2020RG000724.
- [70] Normally N R. Definition and identification of channel and overbank deposits and their respective roles in flood plain Formation[J]. *The Professional Geographer*, 1967, 19(1): 1-4.
- [71] 杨劲松, 王永, 尹金辉, 等. 我国冲积平原区洪水事件重建研究进展及展望 [J]. 地球科学, 2022, 47(11): 3944-3959. [YANG Jinsong, WANG Yong, YIN Jinhui, et al. Progress and prospects in reconstruction of flood events in Chinese alluvial plains[J]. *Earth Science*,

- 2022, 47(11): 3944-3959.]
- [72] 张振克, 王苏民. 中国湖泊沉积记录的环境演变: 研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(4): 417-422. [ZHANG Zhenke, WANG Sumin. Advance and prospects of lake sediments and environmental changes study in China[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(4): 417-422.]
- [73] 张凌华. 长江南京—镇江段现代河漫滩沉积特征与环境意义[D]. 南京大学博士学位论文, 2015. [ZHANG Linghua. Sediment characteristics and overbank sediments in the Nanjing-Zhenjiang reaches of the Yangtze River and their environmental implication[D]. Doctor Dissertation of Nanjing University, 2015.]
- [74] 何报寅. 江汉平原湖泊的成因类型及其特征[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2002, 36(2): 241-244. [HE Baoyin. The origin types and their characteristics of the lakes in Jiangnan Plain[J]. *Journal of Central China Normal University: Natural Science*, 2002, 36(2): 241-244.]
- [75] 赵炳炎, 胡建芳, 刘丰豪, 等. 长江下游南漪湖沉积记录的全新世以来温度变化[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(4): 1044-1055. [ZHAO Bingyan, HU Jianfang, LIU Fenghao, et al. Variation of temperature in lake nanyi sediments from the Lower yangtze river region since the last 12.0 ka B. P.[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(4): 1044-1055.]
- [76] Wu L, Zhu C, Ma C M, et al. Mid-Holocene palaeoflood events recorded at the Zhongqiao Neolithic cultural site in the Jiangnan Plain, Middle Yangtze River Valley, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 173: 145-160.
- [77] Wilhelm B, Ballesteros Cánovas J A, Macdonald N, et al. Interpreting historical, botanical, and geological evidence to aid preparations for future floods[J]. *WIREs Water*, 2019, 6(1): e1318.
- [78] 朱诚, 于世永, 卢春成. 长江三峡及江汉平原地区全新世环境考古与异常洪涝灾害研究[J]. *地理学报*, 1997, 52(3): 268-278. [ZHU Cheng, YU Shiyong, LU Chuncheng. The study of Holocene environmental archaeology and extreme flood disaster in the three gorges of the Changjiang River and the Jiangnan Plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(3): 268-278.]
- [79] 吴立. 江汉平原中全新世古洪水事件环境考古研究[D]. 南京大学博士学位论文, 2013. [WU Li. Environmental Archaeology of the Mid-Holocene palaeofloods in the Jiangnan Plain, Central China[D]. Doctor Dissertation of Nanjing University, 2013.]
- [80] 连丽聪, 凌超豪, 李晓峰, 等. 河漫滩沉积体系对洪水事件的指示: 以修河为例[J]. *沉积学报*, 2019, 37(1): 135-142. [LIAN Licong, LING Chaohao, LI Xiaofeng, et al. Indicator of flood events based on floodplain sediments: a case study of Xiu River[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(1): 135-142.]
- [81] 谢悦波, 王文辉, 王平. 古洪水平流沉积粒度特征[J]. *水文*, 2000, 20(4): 18-20. [XIE Yuebo, WANG Wenhui, WANG Ping. Characteristics of grain size for palaeoflood slackwater deposits[J]. *Journal of China Hydrology*, 2000, 20(4): 18-20.]
- [82] 谢远云, 李长安, 王秋良, 等. 江汉平原近 3 000 年来古洪水事件的沉积记录[J]. *地理科学*, 2007, 27(1): 81-84. [XIE Yuanyun, LI Chang'an, WANG Qiuliang, et al. Sedimentary records of paleoflood events during the last 3000 years in Jiangnan Plain[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(1): 81-84.]
- [83] 李长安, 张玉芬. 长江中游洪水沉积特征与标志初步研究[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4): 485-488. [LI Chang'an, ZHANG Yufen. Flood sedimental characteristic and its mark on the Middle reaches of Yangtze River[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 485-488.]
- [84] 张灿, 周爱锋, 张晓楠, 等. 湖泊沉积记录的古洪水事件识别及与气候关系[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(7): 898-908. [ZHANG Can, ZHOU Aifeng, ZHANG Xiaonan, et al. Identification of Paleoflood events by lacustrine archives and their links to climatic conditions[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(7): 898-908.]
- [85] 吴霜, 刘倩, 曹向明, 等. 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*, 2017, 36(11): 1413-1422. [WU Shuang, LIU Qian, CAO Xiangming, et al. A 240-year sedimentary record of paleoflood events from the Huangmaotan Lake, northern Jiangxi province[J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(11): 1413-1422.]
- [86] Gilli A, Anselmetti F S, Glur L, et al. 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: Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment. Dordrecht: Springer, 2013: 225-242.
- [87] Brown S L, Bierman P R, Lini A, et al. 10 000 yr record of extreme hydrologic events[J]. *Geology*, 2000, 28(4): 335-338.
- [88] Osleger D A, Heyvaert A C, Stoner J S, et al. Lacustrine turbidites as indicators of Holocene storminess and climate: Lake Tahoe, California and Nevada[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2009, 42(1): 103-122.
- [89] Fairchild I J, Treble P C. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(5-6): 449-468.
- [90] Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, et al. Ice age terminations[J]. *Science*, 2009, 326(5950): 248-252.
- [91] Tan L C, Cai Y J, Cheng H, et al. Climate significance of speleothem $\delta^{18}\text{O}$ from central China on decadal timescale[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 106: 150-155.
- [92] Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1-2): 71-86.
- [93] Wang X F, Edwards R L, Auler A S, et al. Hydroclimate changes across the Amazon lowlands over the past 45, 000 years[J]. *Nature*, 2017, 541(7636): 204-207.
- [94] Tan L C, Cai Y J, An Z S, et al. A Chinese cave links climate change, social impacts and human adaptation over the last 500 years[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 12284.
- [95] Wang Z J, Chen S T, Wang Y J, et al. A high-resolution stalagmite record from Luoshui Cave, Central China over the past 23.5 kyr[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 282: 107443.
- [96] Xie S C, Evershed R P, Huang X Y, et al. Concordant monsoon-driven postglacial hydrological changes in peat and stalagmite records and their impacts on prehistoric cultures in central China[J]. *Geology*, 2013, 41(8): 827-830.

- [97] Lasca I, Feinberg J M. Speleothem magnetism[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(23-24): 3306-3320.
- [98] Maher B A, Thompson R. Paleorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese loess and paleosols[J]. *Quaternary Research*, 1995, 44(3): 383-391.
- [99] Strauss B E, Strehlau J H, Lasca I, et al. The origin of magnetic remanence in stalagmites: Observations from electron microscopy and rock magnetism[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(12): 5006-5025.
- [100] Bourne M D, Feinberg J M, Strauss B E, et al. Long-term changes in precipitation recorded by magnetic minerals in speleothems[J]. *Geology*, 2015, 43(7): 595-598.
- [101] Zhu Z M, Feinberg J M, Xie S C, et al. Holocene ENSO-related cyclic storms recorded by magnetic minerals in speleothems of central China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(5): 852-857.
- [102] 黄忠恕. 长江流域历史水旱灾害分析 [J]. *人民长江*, 2003, 34(2): 1-3. [HUANG Zhongshu. Analysis on historic flood and drought disasters of the Yangtze river[J]. *Yangtze River*, 2003, 34(2): 1-3.]
- [103] 李雨凡, 周亮, 于世永, 等. 过去两千年长江干流历史洪水事件的时空变化研究 [J]. *地球与环境*, 2022, 50(2): 241-251. [LI Yufan, ZHOU Liang, YU Shiyong, et al. Temporal and spatial variations of flood events of the Yangtze River over the past 2000 years[J]. *Earth and Environment*, 2022, 50(2): 241-251.]
- [104] 温克刚. 中国气象灾害大典: (重庆卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2008. [WEN Kegang. The Meteorological Disaster Encyclopedia of China: Chongqing Volume[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008.]
- [105] 廖淦标, 范代读. 全球变暖是否导致台风增强: 古风暴学研究进展与启示 [J]. *科学通报*, 2008, 53(13): 1489-1502. [LIAO Ganbiao, FAN Daidu. Perspectives on the linkage between typhoon activity and global warming from recent research advances in paleotempestology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(13): 1489-1502.]
- [106] Baker V R, Kochel R C, Patton P C, et al. Palaeohydrologic analysis of Holocene flood slack - water sediments[J]. *Modern and ancient fluvial systems*, 1983: 229-239.
- [107] Benito G, Sánchez-Moya Y, Sopeña A. Sedimentology of high-stage flood deposits of the Tagus River, Central Spain[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 157(1-2): 107-132.
- [108] 杨铁文, 杨青惠. 窟野河流域水文特性分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2006, 17(1): 57-60,64. [YANG Yiwen, YANG Qinghui. Analysis of hydrologic characteristics in Kuye river Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2006, 17(1): 57-60,64.]
- [109] Li X G, Huang C C, Pang J L, et al. Sedimentary and hydrological studies of the Holocene palaeofloods in the Shanxi-Shaanxi Gorge of the Middle Yellow River, China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2015, 104(1): 277-288.
- [110] Storozum M, Lu P, Wang S Y, et al. Geoarchaeological evidence of the AD 1642 Yellow River flood that destroyed Kaifeng, a former capital of dynastic China[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 3765.
- [111] Crookshanks S, Gilbert R. Continuous, diurnally fluctuating turbidity currents in Kluane Lake, Yukon Territory[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2008, 45(10): 1123-1138.
- [112] Wilhelm B, Amann B, Corella J P, et al. Reconstructing paleoflood occurrence and magnitude from lake sediments[J]. *Quaternary*, 2022, 5(1): 9.
- [113] Wilhelm B, Vogel H, Crouzet C, et al. Frequency and intensity of palaeofloods at the interface of Atlantic and Mediterranean climate domains[J]. *Climate of the Past*, 2016, 12(2): 299-316.
- [114] 周凤琴. 荆江近 5000 年来洪水水位变迁的初步探讨 [J]. *历史地理*, 1986, 6(1): 46-53. [ZHOU Fengqin. Preliminary study on flood level change in recent 5000 year in Jingjiang River[J]. *Historical Geography*, 1986, 6(1): 46-53.]
- [115] Knox J C. Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1-5): 439-457.
- [116] 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 up-reaches of the Changjiang River since the Late Pleistocene Epoch[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 555-560.]
- [117] 王娜, 查小春, 黄春长, 等. 汉江上游晚冰期以来古洪水事件发生的气候背景分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(10): 2250-2260. [WANG Na, ZHA Xiaochun, HUANG Chunchang, et al. Climate background about the palaeoflood events since Lateglacial Epoch in the Upper reaches of Hanjiang River, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(10): 2250-2260.]
- [118] 朱诚, 于世永, 张兵, 等. 南京宝华山地区全新世沉积环境研究 [J]. *地理科学*, 1997, 17(3): 253-258. [ZHU Cheng, YU Shiyong, ZHANG Bing, et al. Study on Holocene sedimentary environment in Baohuashan area of Nanjing[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 17(3): 253-258.]
- [119] 王江月, 白伟明, 王照波, 等. 中国东部地区全新世气候演化及其与气候事件的对应性 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(2): 167-177. [WANG Jiangyue, BAI Weiming, WANG Zhaobo, et al. The Holocene climatic evolution in eastern China and its bearing on climatic events[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(2): 167-177.]
- [120] Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10(4): 297-317.
- [121] Huang X Y, Meyers P A, Jia C L, et al. Paleotemperature variability in central China during the last 13 ka recorded by a novel microbial lipid proxy in the Dajiuhe peat deposit[J]. *The Holocene*, 2013, 23(8): 1123-1129.
- [122] Conroy J L, Overpeck J T, Cole J E, et al. Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos lake sediment record[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(11-12): 1166-1180.
- [123] Fleitmann D, Burns S J, Mangini A, et al. Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra)[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(1-2): 170-188.
- [124] Dong J G, Wang Y J, Cheng H, et al. A high-resolution stalagmite record of the Holocene East Asian monsoon from Mt Shennongjia, central China[J]. *The Holocene*, 2010, 20(2): 257-264.
- [125] Klein Goldewijk K, Beusen A, Doelman J, et al. Anthropogenic land use estimates for the Holocene-HYDE 3.2[J]. *Earth System Science*

- Data, 2017, 9(2): 927-953.
- [126] 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, 16(4): 289-297. [SHI Yafeng, JIANG Tong, SU Buda, et al. 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*, 2004, 16(4): 289-297.]
- [127] 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. [GE Zhaoshuai. The response of Holocene extreme floods in the Upper Changjiang River to changes of southwest monsoon[J]. *Geographical Research*, 2009, 28(3): 592-600.]
- [128] Trenberth K E. Changes in precipitation with climate change[J]. *Climate Research*, 2011, 47(1-2): 123-138.
- [129] Xie S P, Philander S G H. A coupled ocean - atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1994, 46(4): 340-350.
- [130] Bischoff T, Schneider T. Energetic constraints on the position of the intertropical convergence zone[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(13): 4937-4951.
- [131] 李晓峰, 郭品文, 董丽娜, 等. 夏季索马里急流的建立及其影响机制 [J]. *南京气象学院学报*, 2006, 29(5): 599-605. [LI Xiaofeng, GUO Pinwen, DONG Lina, et al. Onset process of summer somali jet and the possible influenced mechanism[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, 29(5): 599-605.]
- [132] Chang W Y B, King G. Centennial climate changes and their global associations in the Yangtze River (Chang Jiang) Delta, China and subtropical Asia[J]. *Climate Research*, 1994, 4(2): 95-103.
- [133] Dillel M, Heyman B N. ENSO and disaster: droughts, floods and El Niño/southern Oscillation warm events[J]. *Disasters*, 1995, 19(3): 181-193.
- [134] 冯利华, 张强. 1998 年长江巨洪与厄尔尼诺事件 [J]. *东海海洋*, 2001, 19(4): 13-16. [FENG Lihua, ZHANG Qiang. Large flood along the Changjiang River in 1998 and El Nio event[J]. *Donghai Marine Science*, 2001, 19(4): 13-16.]
- [135] Tong J, Qiang Z, Deming Z, et al. Yangtze floods and droughts (China) and teleconnections with ENSO activities (1470-2003)[J]. *Quaternary International*, 2006, 144(1): 29-37.