

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020042601

黄河流域全新世古洪水研究进展及展望

张鹏^{1,2,3}, 杨劲松^{1,2,4}, 赵华^{1,2}, 刘哲^{1,2}, 宋磊^{1,2}, 张润⁵, 曹文庚¹

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061
2. 中国地质科学院第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 石家庄 050061
3. 中国地质大学(北京), 北京 100083
4. 中国地震局地质研究所, 北京 100029
5. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

摘要:全新世古洪水研究能够弥补近现代洪水监测记录在时间和空间上的局限性,更加科学地查明洪灾规律及机制,已逐步成为当今全球变化研究的热点之一。黄河流域由于独特的地质地貌条件,历史时期以来洪灾频发、影响巨大,而且现今洪水风险依然很大,是我国古洪水研究的重点区域。本文围绕近十年来黄河流域全新世古洪水研究在沉积特征、古水文重建、年代框架及其与文明兴衰关系等方面的研究成果,综述了当前研究中面临的主要问题和发展趋势,认为应加强流域内不同地貌位置的古洪水研究,综合分析、交互验证,完善黄河流域全新世古洪水序列及年代框架,深入挖掘“区域气候背景-异常洪水事件-人类活动”之间的相互关系,为全球变化背景下黄河流域洪水预测、防治及风险评估等提供科学依据。

关键词:古洪水;滞留沉积物;全新世;黄河流域

中图分类号:P532 **文献标识码:**A

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

ZHANG Peng^{1,2,3}, YANG Jinsong^{1,2,4}, ZHAO Hua^{1,2}, LIU Zhe^{1,2}, SONG Lei^{1,2}, ZHANG Run⁵, CAO Wengeng¹

1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China
2. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environmental Evolution, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China
3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
4. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China
5. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

Abstract: The study of Holocene paleoflood can remedy the limitation of modern flood monitoring records in time and space, and more scientifically identify the flooding regulations and mechanisms. It has gradually become one of the hotspots of the research of global changes. Due to the unique geological conditions in the Yellow River basin, floods have frequently happened in the Holocene history. The present flood risk is still very high in the basin, and therefore, it is one of the key areas of paleoflood research in China. This paper focuses on the research results of the paleoflood in the Yellow River basin published in the past ten years with special interests in sedimentary characteristics, hydrological reconstruction, chronological framework, and its relation to the rise and fall of civilization. Key problems and development trends of the current researches are also discussed, and it is suggested that the records of ancient floods at different geomorphologic locations in the basin should be further collected.

Key words: paleoflood; slack-water deposits; the Holocene; the Yellow River basin

在全球变暖的大背景下,极端事件尤其是极端水文事件频发^[1]。洪灾作为极端水文事件的重要表现形式,由于其危害的严重性和突发性而备受关注,因此对洪水过程和规律的认识显得尤为重要。

但是,传统研究主要依靠洪灾的文书记录和监测数据,覆盖的时间和空间有限,难以为研究洪水规律及预测提供全面、可靠的记录数据。而古洪水研究通过分析人类记录之前洪水事件所形成的地质记

资助项目:国家自然科学基金“黄河故道区(濮阳-大名段)全新世异常洪水沉积特征及年代学研究”(41807428),“黄河下游典型冲积扇含水层砷的物源示踪及释放机制研究”(41972262);河北省自然科学基金“河北平原近现代洪水事件“C核爆突跃定年研究”(D2020504008)

作者简介:张鹏(1996—),男,硕士研究生,第四纪地质学专业, E-mail: 715321952@qq.com

通讯作者:杨劲松(1987—),男,助理研究员,主要从事第四纪地层与环境演变研究, E-mail: yjs607@163.com

收稿日期:2020-04-26; **改回日期:**2020-06-22. 文凤英编辑

录,能够有效延长洪水记录的时空尺度,在查明洪水年代、洪峰水位和流量等水文信息基础上,科学系统地认识洪水历史、过程及规律。尤其是全新世古洪水事件与人类社会的发展密切相关,近年来已成为第四纪地质学和全球变化研究的热点之一^[2-5]。

据灾难中心网统计,20世纪全球范围内100次最致命的自然灾害中有23次发生在中国,其中有10次为洪灾(<http://www.disastercenter.com/disaster/TOP100K.html>),洪水已然成为我国最需要预防和应对的自然灾害之一。黄河流域由于独特的地质地貌条件,历来被认为是我国洪水泛滥最为严重的河流,长期存在较大的洪灾风险^[6]。通过对黄河在全新世期间发生的古洪水事件进行研究,一方面有助于科学分析黄河流域在万年尺度对气候变化的响应规律,另一方面能够推动合理认识理解洪水事件与人类活动之间的相互关系^[7]。基于黄河流域全新世古洪水研究的重要性,本文在系统总结近十年来研究者在古洪水识别、水文重建、年代框架建立和洪水与史前文化关系探讨等方面取得的新认识基础上,结合当前国际研究前沿,提出黄河流域古洪水研究的主要趋势。

1 黄河流域全新世古洪水研究现状

黄河流域自古以来洪灾频发,相应的洪水事件在地质记录中较为丰富,我国学者已经围绕黄河主要的干支流上获取了丰富的全新世古洪水研究成果(图1)。早期古洪水研究主要用于恢复洪峰水位、流量等水文信息,并延长洪水历史重现期^[8-9]。随着科学技术的发展以及多学科交叉融合,近年来黄

河流域的古洪水研究在古洪水识别、水文学重建、洪水年代框架和环境考古等方面都取得了较大进展。

1.1 古洪水识别

目前国内外对河流沉积体系的古洪水识别,主要将滞留沉积(slack-water deposits)作为全新世古洪水事件的识别标准^[10-11]。滞留沉积是指河流在行洪过程的洪峰阶段洪水溢出主河道,在合适的地理位置(如河流交汇口、河岸洞穴等地)流速趋近于零,此时洪水裹挟的孢粉、根茎叶残体、泥沙等悬移质开始沉积并形成具水平层理的细粒沉积物^[11]。

黄河流域的滞留沉积由于相似的沉积物源和水动力条件,在沉积特征上具有一定的共性。黄春长等^[7]和李晓刚等^[12]基于黄河中游多年的研究经验,认为黄土地区的古洪水滞留沉积与相邻沉积层在颜色和沉积构造等外观上的差异可以作为古洪水事件的野外识别特征。随着环境代用指标测试方法的完善和技术手段的不断提高,古洪水识别从野外的定性划分逐步发展为室内的定量分析。黄河流域多个研究地点的全新世古洪水滞留沉积在理化指标上具有以下相似特征:(1)粒度频率曲线表现为主峰单一且狭窄,平均粒径和中值粒径的数值小,指示了其水动力条件低的河流悬移质沉积^[13-14];(2)古洪水滞留沉积与相邻古土壤相比,由于未受成壤作用影响而具有低磁化率、低烧失量的特征^[15];(3)古洪水滞留沉积物中的石英颗粒表面一般具有三角痕、V形坑等特征,这与典型风成沉积物石英颗粒表面特征差异明显^[13];(4)古洪水滞留沉积与现代黄河滞留沉积在 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 MgO 、 Si_2O 等常量元素的含量上相近,反映其与现代黄河滞留沉积

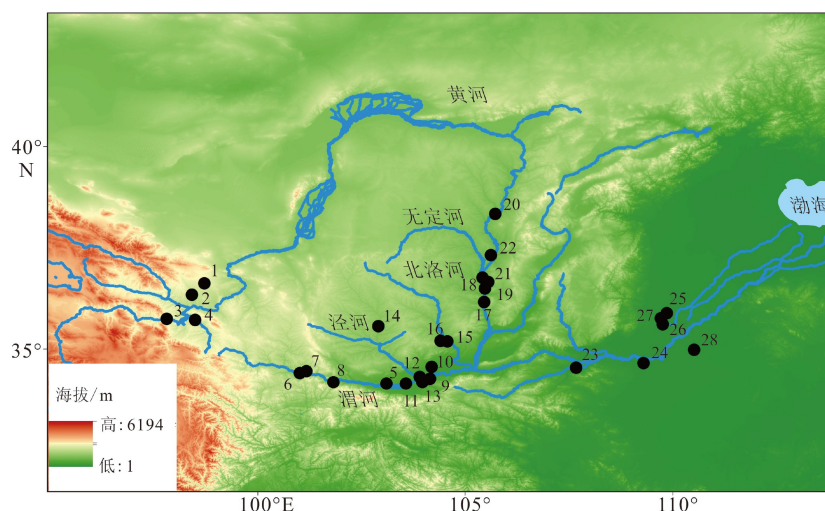


图1 近十年来黄河流域全新世古洪水研究剖面位置图

Fig.1 Location map of the Holocene paleoflood research sections of the Yellow River basin

应为相同的物源^[15]。可以看出,洪水作为一种异常突变事件,其形成的沉积物在沉积特征及理化指标上均与其他沉积物具有较为明显的差异,利用这种差异性并对比现代沉积过程可以作为识别黄河流域古洪水事件的重要手段。

1.2 古洪水水文学重建

古洪水水文学重建是古洪水研究的重要目的之一,通过恢复全新世时期的洪峰水位和流量等水文信息,延长洪水记录,为科学评价洪水周期规律及影响程度提供基础数据。黄河中上游的基岩峡谷段具有河槽稳定、水动力条件明确等特点,是古洪水水文重建的理想地区。近年来古洪水水文重建工作在上游靖远-景泰段^[16]及支流洮河^[17]、中游晋陕峡谷段^[18]及主要支流渭河^[19]等多个研究地点取得了一系列成果(图1,表1)。

古洪水滞留沉积作为古洪水事件的直接记录,能够提供洪水水位等信息。尽管杨达源等^[8]较早地认识到对于高含沙量的黄河流域,古洪水滞留沉积的尖灭端高程与古洪水水位基本相同,但该方法在未出现真正尖灭点的沉积层或具有一定厚度沉积层的地方推求古洪水水位具有一定的局限性^[9]。其后,黄春长等^[20]认为可以利用“洪水滞留沉积厚度与河流含沙量关系法”恢复古洪水水位,能够较好地弥补前人方法的局限,获取更加准确的古洪水水位。而就黄河流域古洪水洪峰流量而言,近五年来运用广泛的包括比降-面积法和采用 HEC-RAS (Hydrology Engineering Center-River Analysis System) 模型。两种方法都基于水利建设常用的曼宁公式,其中面积-比降法在糙率值的获取上主要依靠经验

获得,而 HEC-RAS 模型依靠大量的河槽形态数据和水文参数大幅减少了糙率值的影响,相对前者获取的结果更加准确^[21]。通过收集近五年来黄河流域不同河段古洪水水文重建结果,发现全新世古洪水洪峰流量是该河段水文站实测最大洪峰流量的 2~4 倍,这与全球其他典型流域的全新世古洪水水文重建结果一致^[22](表1)。

1.3 古洪水年代框架的建立

古洪水事件的年代测定是古洪水研究最为关键的环节,只有建立可靠的年代框架,才能在时间标尺下对古洪水的规律、机制和影响进行对比分析。现今黄河流域全新世古洪水年代学研究一般使用放射性碳(AMS-¹⁴C)、光释光(OSL)、地层对比和考古年代等多种方法开展古洪水事件的断代,在区域上也取得了较好的研究成果^[12]。

本文系统收集了近年来黄河流域 28 个地点的古洪水研究成果(表2),结果表明古洪水年代数据在空间上主要集中在黄河中游的干支流,在技术方法上以光释光测年为主。这表明了黄河中游是流域内古洪水年代框架建立较完善的区域,而且由于该区域位于黄土高原地区,独特的黄土-古土壤序列中穿插着古洪水沉积层为利用光释光测年开展古洪水研究提供了便利。从年代框架中可以发现,黄河流域广泛发育有 4200~3000 aBP 期间的异常洪水记录,尤其是集中在 4200~4000 aBP 和 3200~3000 aBP 两个时段。其中,4200~4000 aBP 时段的洪水地质记录在上游官亭盆地^[27],黄河中游洛阳段^[43]和泾河^[35]、北洛河^[10]和漆水河^[7]等主要支流以及下游菏泽段^[48]均有相关报道。3200~3000 aBP 期间

表1 黄河流域古洪水水文信息重建

Table 1 Comparison of paleoflood hydrological information of some research sites in the Yellow River Basin

河段	古洪水期次	古洪水水位/m	古洪水洪峰流量/ (m ³ /s)	近现代洪水实测最大 洪峰流量/(m ³ /s)	方法	来源
上游靖远-景泰段	3200~3000	1310.3	12750~16310	5600	HEC-RAS	[16]
洮河	480~300	1756.43~1759.75	4685~6700	2370	HEC-RAS	[17]
渭河	1800~1600	1068.63~1073.15	11420~20100	4920	HEC-RAS	[19]
晋陕峡谷马头关段	1900~1700 3400~3000	520.1~524.5	25200~51500	24000	HEC-RAS	[18]
晋陕峡谷龙门段	3200~2800	407.53~408.14	46280~48800	24000	HEC-RAS	[23]
晋陕峡谷柳林滩段	3200~3000	640.05~640.91	48190~52260	24000	比降-面积	[24]
北洛河	7600~7400 5800~5000 4200~4000	635.85	12600~14100	6280	比降-面积	[10]
延河	9500~8500	778.3	15000	6860	HEC-RAS	[25]

表2 黄河流域全新世古洪水研究剖面位置及年代数据
Table 2 The age data and location of the Holocene paleoflood research profiles

序号	河段	剖面位置	经纬度	年代获取方法	洪水时间/aBP	数据来源
1		景泰峡谷段	36.7167°N 103.7167°E	光释光测年	3200~3000	[14] [16]
2	上游	喇家遗址剖面	36.4417°N 103.4172°E	光释光测年、放射性碳测年	4380~3970 2850~2720 2310~2140	[26]
3		积石峡	35.8603°N 102.8147°E	放射性碳测年	3870	[27]
4		洮河	35.8333°N、 103.5000°E	光释光测年、考古年代、地层对比	300~480	[17]
5		漆水河杨凌段	34.2989°N 108.1125°E	光释光测年、考古年代	4300~4000 3100~3000	[7]
6		渭河上游	34.5583°N 106.0278°E	光释光测年、考古年代	1800~1600	[28]
7		渭河天水段	34.6000°N 106.1850°E	地层对比、考古年代	3200~3000 1800~1600	[19]
8		渭河宝鸡段	34.3333°N 106.8333°E	地层对比、考古年代	3200~3000	[29]
9		渭河千河流域	34.4667°N 108.9167°E	光释光测年	6000~5000	[30]
10		渭河支流石川河	34.7056°N 109.1997°E	光释光测年、放射性碳测年	8900~9200 6200~6600 4100~4700 3700~3900 2300~2600	[31]
11		渭河临潼段	34.4167°N 109.1667°E	光释光测年	3200~3000	[32]
12		渭河咸阳段	34.3000°N 108.5833°E	光释光测年	3200~2800	[33] [34]
13		泾河高陵段	34.3333°N 108.9833°E	光释光测年、考古年代	4200~4000 3200~2800	[35] [36]
14	中游	马莲河合水段	35.6861°N 107.9167°E	地层对比	4200~4000	[37]
15		北洛河白水段	35.3167°N 109.5806°E	地层对比	4500~4000	[38]
16		北洛河宜君段	35.3333°N 109.4167°E	光释光测年 地层对比	7600~7400 5800~5000 4200~4000	[10]
17		晋陕峡谷吉县段	36.2667°N 110.4667°E	光释光测年、地层对比	9000~8500 3200~3000	[39]
18		晋陕峡谷永和关段	36.8533°N110.4269°E	光释光测年、地层对比	3200~3000	[20]
19		晋陕峡谷马头关段	36.5904°N 110.4849°E	光释光测年	3400~3000 1900~1700	[18]
20		晋陕峡谷柳林滩段	38.3818°N 110.7383°E	光释光测年	10800~10200 10600~9600	[15]
21		晋陕峡谷龙门段	36.7500°N 110.5625°E	光释光测年 地层对比	3200~2800 1800~1700 770~610	[40] [41]
22		晋陕峡谷吴堡段	37.3917°N 110.6306°E	光释光测年、地层对比	3200~2900	[42]
23		二里头遗址剖面	34.6887°N 112.6875°E	光释光测年、放射性碳测年	6000~5500 4000~3800 1800~1700	[43]
24		开封段	34.7943°N 114.3069°E	放射性碳测年 考古年代	308	[44]
25		内黄三杨庄剖面	35.7275°N 114.7734°E	放射性碳测年、考古年代	4200~2000	[45]
26	下游	内黄大张龙剖面	35.9946°N 114.8692°E	放射性碳测年	902~822	[46]
27		内黄岸上剖面	35.8757°N 114.723°E	光释光测年、放射性碳测年、考古年代	4200~3000	[47]
28		菏泽段	35.1150°N 115.5310°E	光释光测年、放射性碳测年、考古年代	4000~3500	[48]

的古洪水事件的相关记录主要包括上游景泰峡谷^[16]、官亭盆地^[26]，中游晋陕峡谷^[40]、渭河^[19]、漆水河^[7]以及下游内黄段^[47]。可以看出，对两次古洪水事件均有记录的研究地点极少，仅在漆水河部分河段同时保存有这两次洪水记录。这可能与洪水规模和不同地点的沉积过程有关，如果希望获取相对完整的古洪水序列，需要在更多的区域开展详细的古洪水调查工作。另一方面，就黄河流域不同河段的古洪水年代框架而言，尽管我们无法确定这些同一时段、不同地点的洪水事件是否为同一洪水事件，是否与“大禹治水”等史前大洪水传说存在必然的联系，但现有成果基本可以确定黄河流域在4200~3000 aBP期间存在一段洪水频发期。

1.4 古洪水对史前文化的影响

黄河作为中华民族的母亲河，孕育了灿烂的中华文明，但频繁的洪水灾害也给人类文明带来了深远影响，地层中的古洪水记录为分析黄河对文明兴衰历程的影响提供了可能^[46, 49]。前人根据黄河两岸文化遗址中的古洪水记录，综合考古学、地质学和古环境分析成果，发现频繁的洪水灾害会改变沿岸人口聚集区布局^[45, 48]和农业生产方式^[50]，尤其是对生产力较低的史前社会产生更为严重的影响。

值得一提的是，4000 aBP前后的史前大洪水由于发生在新石器时代晚期至青铜器时代之间，是研

究黄河流域洪水与早期人类文明关系的重要研究对象。从沉积学上来看，在黄河上游喇家遗址^[7]的齐家文化层、中游二里头遗址^[43]和下游十里铺遗址^[48]的龙山文化层均被黄河洪水沉积直接覆盖(图2)，结合在遗址中发现史前先民被迫“水进人退”的考古证据，可认为4000年前后的史前大洪水摧毁了流域两岸大量的史前聚落，是新石器时代晚期文化消失的重要诱因^[49]。同时，史前大洪水引起了大规模的人口迁徙以及有组织的抵御洪水活动^[7, 48]，这些行为在一定程度上促使形成了以二里头遗址为代表的青铜器时代早期大型城邑^[43]。这为解释二里头文化遗址数量远远低于龙山文化，且多分布在海拔较高的嵩山地区的原因提供了一定的依据^[51]。此外Wu等^[27]通过古洪水研究认为，黄河流域从新石器时代晚期至青铜器时代的社会政治大转型是古代先民应对积石峡堰塞湖溃决大洪水所作出的复杂文化反应。但是多位学者分别从堰塞湖消失时间^[52-53]、溃决洪水流量计算方法^[54]和上游溃决洪水对中下游文明影响程度^[55]等方面提出质疑。可以看出，虽然黄河流域史前大洪水与华夏文明起源的问题尚存在一些争议，但有关史前时期古洪水事件-人类早期文明的演变关系是当前黄河流域古洪水研究的重要方向。由于古人类择水而居的生活习性，黄河沿岸分布的众多文化聚落必然会受到洪水事件的影响，所以我们有理由相信随着研究的逐

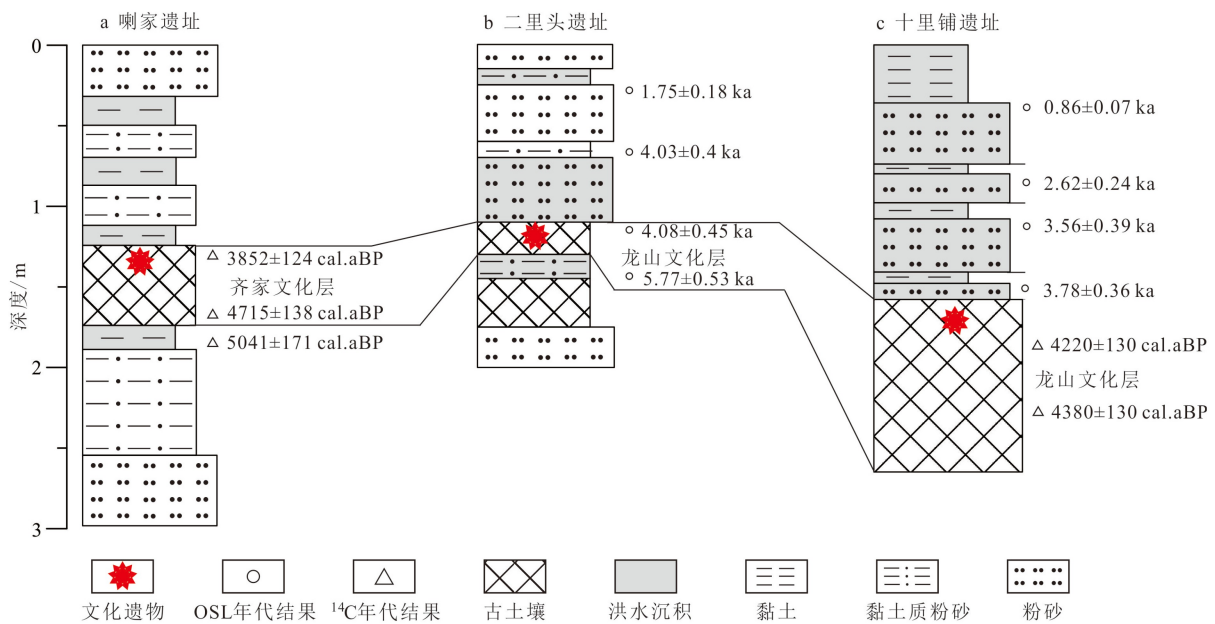


图2 黄河流域古洪水文化序列对比

a. 喇家遗址剖面(图1中的2号点)^[26]; b. 二里头遗址剖面(图1中的23号点)^[43]; c. 十里铺遗址剖面(图1中的24号点)^[48]

Fig.2 Cultural sequence comparison of palaeoflood records in the Yellow River Basin

a. profile of Lajia Site(Point 2 in Figure 1), b. profile of Erlitou site(Point 23 in Figure 1), c. profile of Shilipu site(Point 24 in Figure 1).

渐深入,古洪水研究在黄河流域的环境考古中将扮演更为重要的角色。

2 黄河流域全新世古洪水研究展望

2.1 完善不同地貌位置古洪水记录

通过系统梳理现阶段黄河流域全新世古洪水研究现状,以往的研究区主要集中在基岩峡谷区,包括上游的官亭盆地、中游的晋陕峡谷及主要支流(图1)。这些区域洪水沉积物具有保存完好、出露明显和单次洪水信息明确等特点,易于开展古洪水调查和古洪水水文重建。然而,当今的研究者日益关注洪水灾害在不同时间、不同流域(空间)产生的序列变化及其对区域气候的响应^[56-57],只有围绕流域不同河段开展系统综合的调查及研究,才能科学、系统地认识洪水发生规律、机制及驱动因素。因此,下游平原区作为现代人类聚集区、城镇化核心区和洪灾高风险区理应加强相关工作。

但是黄河在下游流域决堤泛滥次数众多,河道变迁频繁往复,沉积相变复杂,使得对古洪水事件的判别和水文重建更加困难。借鉴国际上近年来在平原区古洪水研究所取得的重要成果,结合黄河

下游相关工作,笔者初步梳理了黄河下游的洪水沉积物特征(图3):(1)平原区洪水沉积物厚度、粒径大小等特征,受河流侵蚀强度影响与距离河道远近有密切关系。远离河道地区多为厚层细粒沉积物,近河道地区相对沉积粒径更粗、厚度更薄,对应洪水记录重现期也存在较大差异^[58-59];(2)洪水沉积单元存在着典型的二元结构,即下部为洪水漫滩后形成的黄色粉砂,上部为结构紧实的棕红色滞留沉积^[48,60];(3)黄河下游地区在古河道附近存在丰富的古文化层(古土壤层)和古湖泊层^[46],洪水层作为异常突变事件与其在沉积特征上有明显差别^[61];(4)古洪水沉积的粒度频率曲线与现代黄河洪水沉积相似,而与下伏古文化层有较大的差异^[48](图4)。这些沉积特征及指标上的差异为河流下游洪泛区开展异常洪水的判别提供了重要参考。同时,部分研究者^[62-63]在下游平原区的古洪水水文学重建中进行了一系列有益的尝试,取得了较好的研究成果,为不同河段古洪水事件综合对比奠定了一定基础,后续随着研究的深入和多学科的交叉,下游地区将会获取更丰富的全新世古洪水记录。

2.2 加强古洪水年代测试研究

尽管黄河流域古洪水事件的年代框架已基本

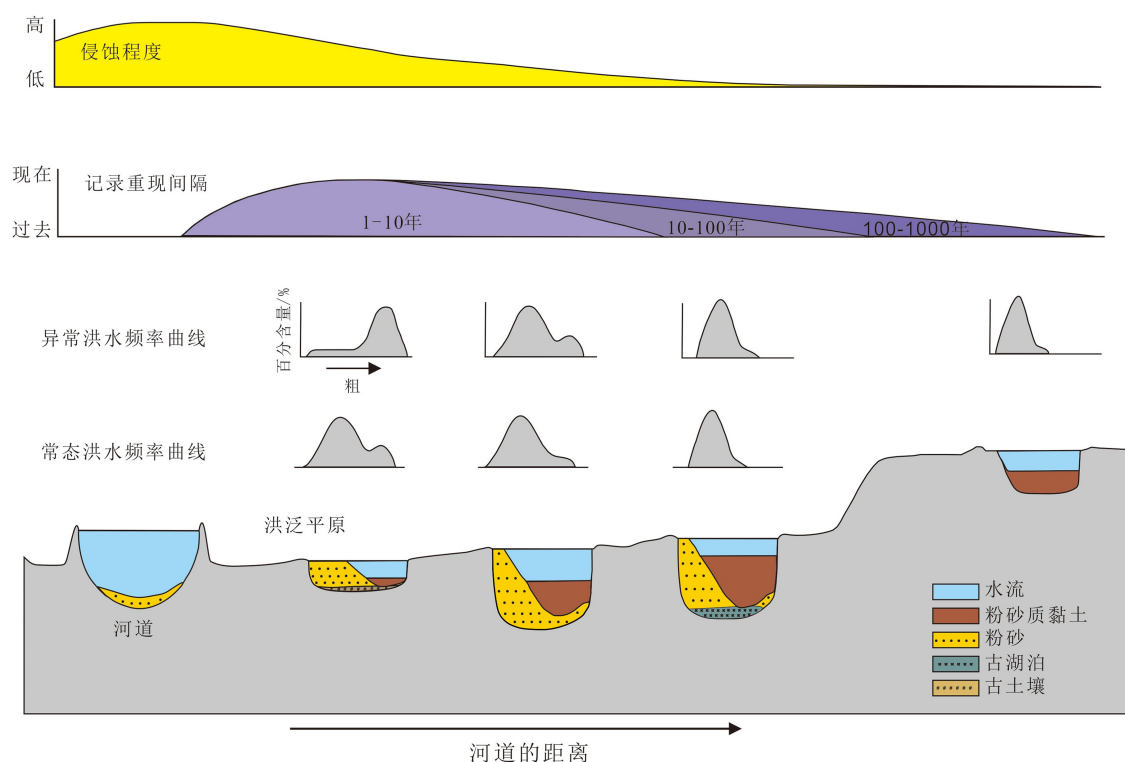


图3 黄河洪泛平原异常洪沉积模式及相应频率曲线 (据文献[59]改编)

Fig.3 Abnormal flood deposition model and corresponding frequency curves of Yellow River flood plain (modified from reference [59])

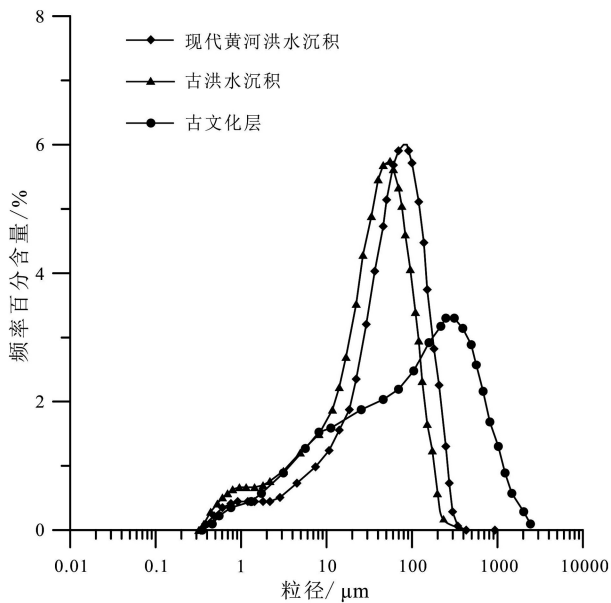


图4 黄河下游洪水沉积频率曲线图 (据文献[48]改编)

Fig.4 Paleoflood deposition frequency curves of the lower Yellow River (modified from reference [48])

建立,但这些年代数据主要源自于中上游地区的光释光测年和地层对比,仅有少量研究结合文化考古或 AMS- ^{14}C 测年(表2)。在黄河中上游利用 OSL 测年时,王恒松等^[35]考虑到洪水等水成沉积物存在释光信号不完全晒退的可能,采用单片再生法获得黄河中上游洪水沉积物的等效剂量(De 值),根据 De 分布特征判别埋藏前 OSL 信号可能未归零的样品,对这些样品采用统计学方法选取 De 较小的部分进行年代计算以期获得洪水发生的真实年代。但是平原区的洪水的沉积过程和规律与中上游有一定的区别,可能导致洪水沉积物光释光信号晒退程度不同,这使得该区洪水沉积物光释光测年结果的可靠性还需探索完善。比如 Shen 等^[64]认为,沂河盆地洪水沉积物粗颗粒石英晒退较好,推测其可能来自于河流上游长时间暴露的山区表层沉积物或较为年轻的河道沉积物。Zhao 等^[65]在华北平原进行洪水沉积物光释光研究后指出,OSL 测年结果存在偏老的现象,而且同一洪水沉积层垂向不同位置的样品晒退程度不同。因此在洪泛区进行光释光测年尽量采集序列样品,在洪水沉积不同位置以及其上下的非洪水沉积层取样,以期获得准确可靠的年龄。

相对而言,黄河下游洪泛区的文化层或者古湖沉积中遗存有大量的有机质、螺壳和炭屑等,这为使用放射性碳测年提供了有效的测年材料。但值得注意的是,杨铭等^[66]通过研究三杨庄汉代文化遗址中的洪水事件发现, ^{14}C 年代结果比 OSL 年代结

果严重高估,且高估值与深度呈正比,这可能是由于在黄河下游洪泛区利用 AMS- ^{14}C 定年存在碳库效应^[60]以及有机物的二次搬运造成的^[67]。因此,如何在河流冲淤积体系下寻找到有效的测年材料是 AMS- ^{14}C 法在黄河下游古洪水研究亟需解决的难点所在。

综上,黄河流域古洪水事件的断代重点需要加强样品挑选、方法改进和精细化研究,利用多种定年手段,结合黄河流域丰富的文化遗址和悠久的史料记载,多重比对,交互印证,综合分析异常洪水事件的上下限,确定高精度年代框架。通过下游年代数据结合中上游已有年代建立流域综合年代框架,将有助于分析黄河流域复杂的“气候-洪水-人文”关系。

2.3 深化洪水驱动因素的研究

由于季风区河流系统对于气候变化响应敏感,目前对黄河流域洪水驱动机制的研究集中在洪水事件的气候背景研究上。相关研究表明异常洪水事件在千年尺度上极易发生在气候突变或转折阶段,这些阶段存在着季风气候失稳和气候变率增大的现象^[40,68]。随着区域古气候研究中精度的提高,学者发现极端降水导致的异常洪水与太阳活动^[69]、北大西洋涛动^[70]、太平洋年代际震荡^[71]和厄尔尼诺事件^[48]等百年或者年际尺度的气候现象存在着很好的相关性。

近年来,构造运动也被一些学者认为是黄河流域全新世古洪水事件的重要驱动因素之一,比如 Wu 等^[27]认为黄河史前大洪水是由于地震造成的堰塞湖溃决造成的。尽管这项研究尚存在一定的争议,但也为我们研究黄河流域异常洪水驱动机制提供了新思路。此外,通过对考古遗址中古洪水事件的分析,发现古人类活动也对洪水事件有重要影响,比如黄春长等^[7]认为先周时期周原大规模的农业开发和城邑建设造成的水土流失,加剧了该区域洪水的侵蚀和沉积过程,而整个黄土高原的水土流失明显增加了黄河泛滥的频率^[72]。同时,人类对堤坝等水利工程的过度依赖也会影响着黄河流域洪水灾害的频率和规模^[45,47]。

总之,探讨黄河流域异常洪水的驱动机制时应综合考虑气候、构造运动以及人类作用等多种要素。尤其是全新世晚期,人类活动已成为影响黄河洪水主要因素之一。因此查明黄河流域洪水驱动机制需要结合水力学、气象学、地质学和考古学等多学科共同完成。

3 结论

结合近十年来黄河流域全新世古洪水研究进展,可以看出当前全新世古洪水研究区主要在中上游的基岩峡谷区进行,在沉积特征、水文重建和年代框架等方面取得了丰富成果。尤其是在黄河流域普遍发现有4200~3000 aBP期间的异常洪水记录,这些洪水事件与喇家遗址、大禹治水及夏王朝建立等历史文明兴衰更替可能存在着相关联系。但是目前在下游黄泛区关于古洪水的系统研究依然处于起步阶段,缺乏对古洪水地质记录和重建古洪水水文信息的详细研究,而作为中原文明的核心区和现代人类聚集区的下游地区更应加强古洪水的相关研究。笔者认为,今后随着测年技术的不断进步和不同学科的交叉融合,应进一步加强黄河流域内不同地貌单元、不同时间尺度下古洪水事件的综合对比分析,科学认识洪水事件的时空规律及影响因素,为未来全球变化大背景下黄河流域的洪灾风险评估和洪水防治提供重要资料。

参考文献 (References)

- [1] 朴世龙, 张新平, 陈安平, 等. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 62(10): 1551-1563. [PIAO Shilong, ZHANG Xinping, CHEN Anping, et al. The impacts of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: A review [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(10): 1551-1563.]
- [2] Baker V R, Pickup G. Flood geomorphology of the Katherine Gorge, northern Territory, Australia [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1987, 98(6): 635-646.
- [3] Baker V R. Paleoflood hydrology: Origin, progress, prospects [J]. *Geomorphology*, 2008, 101(1-2): 1-13.
- [4] 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.
- [5] Liu W M, Carling P A, Hu K H, et al. Outburst floods in China: a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 197: 102895.
- [6] Kozłowski T T. Extent, causes, and impacts of flooding[M]// Kozłowski T T. *Flooding and Plant Growth*. San Diego: Academic Press, 1984: 1-7.
- [7] 黄春长, 庞奖励, 查小春, 等. 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*, 2011, 41(11): 1658-1669. [HUANG Chunchang, PANG Jiangli, ZHA Xiaochun, et al. 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]. *Science Sinica Terrae*, 2011, 41(11): 1658-1669.]
- [8] Yang D Y, Yu G, Xie Y B, et al. Sedimentary records of large Holocene floods from the middle reaches of the Yellow River, China [J]. *Geomorphology*, 2000, 33(1-2): 73-88.
- [9] 谢悦波, 费宇红, 沈起鹏. 古洪水平流沉积与水位[J]. *地球学报*, 2001, 22(4): 320-323. [XIE Yuebo, FEI Yuhong, SHEN Qipeng. Slackwater deposits and flow peak level of a paleoflood [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(4): 320-323.]
- [10] Zhang Y Z, Huang C C, Pang J L, et al. Holocene palaeoflood events recorded by slackwater deposits along the middle Beiluohe River valley, middle Yellow River basin, China [J]. *Boreas*, 2015, 44(1): 127-138.
- [11] Benito G, Macklin M G, Panin A, et al. Recurring flood distribution patterns related to short-term Holocene climatic variability [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 16398.
- [12] 李晓刚. 黄河流域古洪水研究进展[J]. *商洛学院学报*, 2013, 27(2): 57-63. [LI Xiaogang. Advances of paleoflood research in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Shangluo University*, 2013, 27(2): 57-63.]
- [13] 陈莹璐, 黄春长, 张玉柱, 等. 黄河源区玛曲段末次冰消期古洪水事件及其光释光测年研究[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(3): 549-562. [CHEN Yinglu, HUANG Chunchang, ZHANG Yuzhu, et al. Study of the sedimentology and OSL dating of the Last Deglaciation paleoflood events along Maqu section in the source regions of the Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(3): 549-562.]
- [14] 赵雪如, 黄春长, 庞奖励, 等. 黄河上游靖远金坪段全新世古洪水沉积物特征[J]. *山地学报*, 2016, 34(2): 173-180. [ZHAO Xueru, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Sediment characteristics of the palaeoflood slackwater deposits at Jingyuan-Jinping site in the upper reaches of the Yellow River [J]. *Mountain Research*, 2016, 34(2): 173-180.]
- [15] 刘雯瑾, 黄春长, 庞奖励, 等. 黄河柳林滩段全新世古洪水滞流沉积物物源研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 136-142. [LIU Wenjin, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Study on provenance of Holocene flood slackwater deposits in the Liulintan reach of the Yellow River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 136-142.]
- [16] Hu G M, Huang C C, Zhou Y L, et al. Extreme paleoflood events 3200-3000 a BP in the Jingyuan-Jingtai reaches of the upper Yellow River, China [J]. *The Holocene*, 2016, 26(5): 790-800.
- [17] 胡迎, 黄春长, 周亚利, 等. 黄河上游洮河流域全新世古洪水水文学研究[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(5): 1029-1037. [HU Ying, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. Hydrological studies of the Holocene palaeoflood in the Taohe River basin of the upper Yellow River [J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(5): 1029-1037.]
- [18] 刘雯瑾, 黄春长, 庞奖励, 等. 黄河马头关段全新世古洪水水文恢复及气候背景研究[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(1): 85-93. [LIU Wenjin, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Holocene Palaeoflood and climatic changes at the Matouguan Reach of the Yellow River [J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(1): 85-93.]
- [19] 石彬楠, 黄春长, 庞奖励, 等. 渭河上游天水东段全新世古洪水水文学恢复研究[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(3): 573-581. [SHI Binnan, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Hydrological

- reconstructions of the Holocene Palaeoflood in the Tianshui East Reach of the upper Weihe River [J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(3): 573-581.]
- [20] 黄春长, 李晓刚, 庞奖励, 等. 黄河永和关段全新世古洪水研究[J]. *地理学报*, 2012, 67(11): 1493-1504. [HUANG Chunchang, LI Xiaogang, PANG Jiangli, et al. Palaeoflood sedimentological and hydrological studies on the Yongheguan reach in the middle Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1493-1504.]
- [21] 刘涛. 河流古洪水水文学重建的多种方法比较研究——以黄河中游和汉江上游为例[D]. 陕西师范大学硕士学位论文, 2015. [LIU Tao. Comparative study of hydrological reconstructions of Paleoflood: case studies of bedrock gorge reach in the middle Yellow River basin and upper Hanjiang River basin [D]. Master Dissertation of Shaanxi Normal University, 2015.]
- [22] Baker V R. Palaeoflood hydrology in a global context [J]. *CATENA*, 2006, 66(1-2): 161-168.
- [23] 胡贵明, 黄春长, 周亚利, 等. 黄河靖远-景泰段全新世古洪水水文事件水文指标模拟及气候背景分析[J]. *资源科学*, 2015, 37(10): 2059-2067. [HU Guiming, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. Hydrological reconstructions and climate events of the Holocene paleoflood in the Jingyuan-Jingtai reach on the Yellow River [J]. *Resources Science*, 2015, 37(10): 2059-2067.]
- [24] 范龙江, 黄春长, 庞奖励, 等. 黄河柳林段全新世特大洪水水文学研究[J]. *土壤通报*, 2014, 45(3): 524-530. [FAN Longjiang, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Palaeoflood hydrological studies in the Lianghekou reach in the middle Yellow River [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(3): 524-530.]
- [25] 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.
- [26] Ma M M, Dong G H, Chen F H, et al. Process of paleofloods in Guanting basin, Qinghai Province, China and possible relation to monsoon strength during the mid-Holocene [J]. *Quaternary International*, 2014, 321: 88-96.
- [27] Wu Q L, Zhao Z J, Liu L, et al. Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great flood and the Xia Dynasty [J]. *Science*, 2016, 353(6299): 579-582.
- [28] 朱向锋, 黄春长, 庞奖励, 等. 渭河天水峡谷全新世特大洪水水文学研究[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(7): 840-846. [ZHU Xiangfeng, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Palaeo-Hydrological studies of the Holocene extreme floods in the Tianshui Gorges of the Weihe River [J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(7): 840-846.]
- [29] 万红莲, 黄春长, 庞奖励, 等. 渭河宝鸡峡全新世古洪水事件研究[J]. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(2): 76-82. [WAN Honglian, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Palaeoflood events in the Baojixia Gorges of the Weihe River [J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2010, 38(2): 76-82.]
- [30] 王恒松, 黄春长, 周亚利, 等. 关中西部千河流域全新世古洪水事件光释光测年研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(3): 390-401. [WANG Hengsong, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. OSL dating of the Holocene paleoflood events on the Qianhe River in the Guanzhong Basin, China [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2012, 42(3): 390-401.]
- [31] He Z, Long H, Yang L H, et al. Luminescence dating of a fluvial sequence using different grain size fractions and implications on Holocene flooding activities in Weihe Basin, central China [J]. *Quaternary Geochronology*, 2019, 49: 123-130.
- [32] 王恒松, 黄春长, 周亚利, 等. 全新世古洪水事件光释光测年研究——以渭河下游临潼段为例[J]. *地球学报*, 2012, 33(2): 227-235. [WANG Hengsong, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. OSL dating of the Holocene paleoflood events: a case study of the Lintong segment in the lower Weihe River Valley [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(2): 227-235.]
- [33] 赵梅, 查小春, 黄春长, 等. 渭河中游全新世晚期古洪水沉积物特征[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(5): 920-925. [ZHAO Mei, ZHA Xiaoqun, HUANG Chunchang, et al. Analysis on depositional features of the Late Holocene Paleo-flood slackwater deposit in middle reaches of the Weihe River [J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(5): 920-925.]
- [34] 王恒松, 黄春长, 周亚利, 等. 渭河咸阳段全新世古洪水事件光释光测年研究[J]. *沉积学报*, 2012, 30(2): 346-355. [WANG Hengsong, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. OSL dating of the Palaeoflood events in the middle reaches of the Weihe River [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(2): 346-355.]
- [35] 顾洪亮, 黄春长, 周亚利, 等. 关中盆地杨官寨遗址古洪水事件释光测年[J]. *地理研究*, 2012, 31(10): 1837-1848. [GU Hongliang, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. OSL dating study on the Palaeoflood events recorded in the Yangguanzhai Neolithic ruins in the Guanzhong basin [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1837-1848.]
- [36] 张玉柱, 黄春长, 庞奖励, 等. 泾河下游全新世古洪水滞流沉积物研究[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 521-528. [ZHANG Yuzhu, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Sedimentary studies of the Holocene flood slackwater deposits in the lower reaches of the Jinghe River [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 521-528.]
- [37] 周芳, 查小春, 黄春长, 等. 马莲河全新世古洪水沉积学和水文学研究[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(9): 1081-1087. [ZHOU Fang, ZHA Xiaoqun, HUANG Chunchang, et al. Study on Holocene paleoflood in Malian River Basin [J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(9): 1081-1087.]
- [38] 赵明, 黄春长, 庞奖励, 等. 北洛河中游白水段峡谷全新世特大洪水水文学研究[J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(5): 155-161. [ZHAO Ming, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Palaeo-flood hydrological studies in the middle reaches of Beiluo River [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(5): 155-161.]
- [39] 郝高建, 黄春长, 邢莹莹, 等. 黄河晋陕峡谷吉县段全新世古洪水水平流沉积特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(3): 106-112. [HAO Gaojian, HUANG Chunchang, XING Yingying, et al. Sedimentary characteristics of the slackwater deposits of Holocene extreme floods in the FJJ section in the Yellow River valley, Ji county [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(3): 106-112.]

- [40] 石彬楠, 黄春长, 庞奖励, 等. 黄河龙门段商周转折时期的古洪水事件及气候背景[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(1): 234-245. [SHI Binnan, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Palaeoflood events and climate change at the turning time from the Shang to Zhou dynasty in the Longmen reach of the Yellow River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(1): 234-245.]
- [41] Zhao X R, Huang C C, Pang J L, et al. Holocene climatic events recorded in palaeoflood slackwater deposits along the middle Yiluohe River valley, middle Yellow River basin, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 123: 85-94.
- [42] Fan L J, Huang C C, Pang J L, et al. Sedimentary records of palaeofloods in the Wubu Reach along the Jin-Shaan gorges of the middle Yellow River, China [J]. *Quaternary International*, 2015, 380-381: 368-376.
- [43] Zhang Y Z, Huang C C, Tan Z H, et al. Prehistoric and historic overbank floods in the Luoyang Basin along the Luohe River, middle Yellow River basin, China [J]. *Quaternary International*, 2019, 521: 118-128.
- [44] 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.
- [45] 司徒克, 秦臻, 刘海旺, 等. 河南省内黄县河流地质考古研究[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(2): 579-593. [Storozum M J, QIN Zhen, LIU Haiwang, et al. The alluvial geoarchaeology of Neihuang County, Henan Province [J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(2): 579-593.]
- [46] Storozum M J, Zhen Q, Ren X L, et al. The collapse of the North Song dynasty and the AD 1048-1128 Yellow River floods: Geoarchaeological evidence from northern Henan Province, China [J]. *The Holocene*, 2018, 28(11): 1759-1770.
- [47] Kidder T, Liu H W, Xu Q H, et al. The alluvial geoarchaeology of the Sanyangzhuang site on the Yellow River Floodplain, Henan Province, China [J]. *Geoarchaeology*, 2012, 27(4): 324-343.
- [48] Yu S Y, Hou Z F, Chen X X, et al. Extreme flooding of the lower Yellow River near the Northgrippian-Meghalayan boundary: evidence from the Shilipu archaeological site in southwestern Shandong Province, China [J]. *Geomorphology*, 2020, 350: 106878.
- [49] 张俊娜, 夏正楷. 中原地区 4 ka BP 前后异常洪水事件的沉积证据[J]. *地理学报*, 2011, 66(5): 685-697. [ZHANG Junna, XIA Zhengkai. Deposition evidences of the 4 ka BP Flood events in Central China Plains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 685-697.]
- [50] Storozum M, Liu H W, Qin Z, et al. Early evidence of irrigation technology in the North China Plain: Geoarchaeological investigations at the Anshang Site, Neihuang County, Henan Province, China [J]. *Geoarchaeology*, 2018, 33(2): 143-161.
- [51] 李中轩, 朱诚, 吴国玺, 等. 河南省史前人类遗址的时空分布及其驱动因子[J]. *地理学报*, 2013, 68(11): 1527-1537. [LI Zhongxuan, ZHU Cheng, WU Guoxi, et al. Spatial and temporal distribution of prehistoric human sites and its driving factors in Henan province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1527-1537.]
- [52] Dong G H, Zhang F Y, Liu F W, et al. Multiple evidences indicate no relationship between prehistoric disasters in Lajia site and outburst flood in upper Yellow River valley, China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(4): 441-449.
- [53] Han J C. Comment on "Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great Flood and the Xia dynasty" [J]. *Science*, 2017, 355(6332): 1382.
- [54] Huang C C, Zhou Y L, Zhang Y Z, et al. Comment on "Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great Flood and the Xia dynasty" [J]. *Science*, 2017, 355(6332): 1382.
- [55] Wu W X, Dai J H, Zhou Y, et al. Comment on "Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great Flood and the Xia dynasty" [J]. *Science*, 2017, 355(6332): 1382.
- [56] Merz B, Aerts J, Arbjerg-Nielsen K, et al. Floods and climate: emerging perspectives for flood risk assessment and management [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(7): 1921-1942.
- [57] Hall J, Arheimer B, Borga M, et al. Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(7): 2735-2772.
- [58] Lewin J, Macklin M G. Preservation potential for Late Quaternary river alluvium [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2003, 18(2): 107-120.
- [59] Toonen W H J, Munoz S E, Cohen K M, et al. High-Resolution sedimentary Paleoflood records in alluvial river environments: a review of recent methodological advances and application to flood hazard assessment [M]//Herget J, Fontana A. *Palaeohydrology: Traces, Tracks and Trails of Extreme Events*. Cham: Springer, 2020: 213-228.
- [60] Yu S Y, Chen X X, Cheng P, et al. Freshwater radiocarbon reservoir age in the lower Yellow River floodplain during the Late Holocene [J]. *The Holocene*, 2018, 28(1): 119-126.
- [61] Matsumoto D, Sawai Y, Yamada M, et al. Erosion and sedimentation during the September 2015 flooding of the Kinu River, central Japan [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34168.
- [62] Toonen W H J, Winkels T G, Cohen K M, et al. Lower Rhine historical flood magnitudes of the last 450 years reproduced from grain-size measurements of flood deposits using End Member Modelling [J]. *CATENA*, 2015, 130: 69-81.
- [63] Peng F, Kasse C, Prins M A, et al. Paleoflooding reconstruction from Holocene levee deposits in the Lower Meuse valley, the Netherlands [J]. *Geomorphology*, 2020, 352: 107002.
- [64] Shen H Y, Yu L P, Zhang H M, et al. OSL and radiocarbon dating of flood deposits and its paleoclimatic and archaeological implications in the Yihe River Basin, East China [J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 398-404.
- [65] Zhao H, Liu Z, Song L, et al. OSL dating of flood sediments in the North China Plain [J]. *Quaternary Geochronology*, 2019, 49: 101-107.
- [66] 杨铭, 王松娜, 康树刚, 等. 河南三杨庄剖面光释光年代学研究[J]. *地球环境学报*, 2018, 9(6): 580-588. [YANG Ming, WANG Songna, KANG Shugang, et al. Optically stimulated luminescence dating of Sanyangzhuang profile, Henan Province [J]. *Journal of Earth Environment*, 2018, 9(6): 580-588.]
- [67] Yu S Y, Li C H, Chen X X, et al. Rates of organic carbon burial in a floodplain lake of the Lower Yellow River Area during the Late Holocene [J]. *Radiocarbon*, 2014, 56(3): 1129-1138.
- [68] Huang C C, Pang J L, Zha X C, et al. Extraordinary floods related to

- the climatic event at 4200 a BP on the Qishuihe River, middle reaches of the Yellow River, China [J]. [Quaternary Science Reviews](#), 2011, 30(3-4): 460-468.
- [69] 周晓龙, 于学峰. 长江、黄河流域全新世古洪水事件对比研究[J]. [地球环境学报](#), 2013, 4(5): 1427-1436. [ZHOU Xiaolong, YU Xuefeng. Correlation studies on palaeoflood events in the drainage area of Yangtze and Yellow River during the Holocene [J]. [Journal of Earth Environment](#), 2013, 4(5): 1427-1436.]
- [70] Tan L C, Shen C C, Cai Y J, et al. Great flood in the middle-lower Yellow River reaches at 4000 a BP inferred from accurately-dated stalagmite records [J]. [Science Bulletin](#), 2018, 63(4): 206-208.
- [71] Yang Q, Ma Z G, Xu B L. Modulation of monthly precipitation patterns over East China by the Pacific Decadal Oscillation [J]. [Climatic Change](#), 2017, 144(3): 405-417.
- [72] Su K, Kidder T R. Humans and climate change in the middle and lower Yellow River of China [J]. [Quaternary International](#), 2019, 521: 111-117.