

doi: 10.12029/gc20220323001

杨劲松, 刘林敬, 赵华, 刘哲, 宋磊, 张鹏, 唐亮. 2023. 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, 50(4): 1004–1015.

Yang Jinsong, Liu Linjing, Zhao Hua, Liu Zhe, Song Lei, Zhang Peng, Tang Liang. 2023. Late Holocene sedimentary records along the abandoned channel areas of the Yellow River and their response to flood hazards[J]. *Geology in China*, 50(4): 1004–1015(in Chinese with English abstract).

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

杨劲松^{1,2}, 刘林敬¹, 赵华¹, 刘哲¹, 宋磊¹, 张鹏³, 唐亮⁴

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 河北 石家庄 050061; 2. 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029; 3. 河北省地质调查院, 河北 石家庄 050011; 4. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要:【研究目的】黄河故道区蕴藏了丰富的古洪水灾害信息, 深入挖掘地层中相应的沉积记录, 有助于扩展黄河流域洪水记录的时空范围, 增进对洪水灾害的科学认识。【研究方法】本文选取河北大名龙王庙剖面作为黄河故道区的典型代表剖面, 利用光释光、¹⁴C、粒度和地球化学元素等测试手段, 综合对比洪水史料记载与区域研究成果。【研究结果】研究认为: (1) 古土壤、湖沼相沉积、泛滥沉积与平流沉积物之间存在一定的继承性与相关性; (2) 晚全新世以来研究区内 4 次主要的洪水沉积单元, 分别对应了周、西汉、北宋和明朝的异常洪水事件; (3) 人类活动对流域洪水灾害产生了一定的影响, 由高频低能的季节性洪水转变为低频高能异常洪水事件。【结论】该项研究基本查明了黄河故道区不同沉积相的岩性特征及环境代用指标特征, 探讨了人类活动对洪水特征的影响, 为黄河故道区洪水灾害沉积记录的判别与重建提供了理论参考和示范, 同时有助于进一步深入认识黄河流域洪水灾害的过程及演化机制。

关键词:洪水灾害; 古河道; 晚全新世; 粒度; 地球化学元素; 水文地质调查工程; 黄河

创新点: (1) 黄河故道区古洪水沉积记录的区内极端水文事件与历史记录基本吻合; (2) 历史时期人类活动对洪水的频次规律产生了一定影响。

中图分类号: P512.2; TV122.2 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2023)04–1004–12

Late Holocene sedimentary records along the abandoned channel areas of the Yellow River and their response to flood hazards

YANG Jinsong^{1,2}, LIU Linjing¹, ZHAO Hua¹, LIU Zhe¹, SONG Lei¹, ZHANG Peng³, TANG Liang⁴

(1. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environmental Evolution, Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China; 3. Hebei Institute of Geological Survey, Shijiazhuang 050011, Hebei, China; 4. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

收稿日期: 2022–03–23; 改回日期: 2022–05–28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807428)、河北省自然科学基金(D2020504008)和中国地质科学院基本科研业务费项目(YK202308)共同资助。

作者简介: 杨劲松, 男, 1987 年生, 副研究员, 从事第四纪地质调查与环境演变研究; E-mail: yangjinsong@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 刘林敬, 男, 1982 年生, 高级工程师, 从事第四纪地质调查与环境演变研究; E-mail: liulinjing@mail.cgs.gov.cn。

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] Late Holocene sedimentary records along the abandoned channel areas contain lots of paleoflood information in the lower Yellow River, which can help to extend extreme flood records, and are of great value in understanding flood hazard patterns. **[Methods]** This paper selects Longwangmiao (LWM) profile (located in Daming County), Hebei Province, as the typical paleoflood section in the lower Yellow River. Luminescence dating, radiocarbon dating, grain size, and geochemistry analyses are combined with a synthesis of historical flood records and regional previous works. **[Results]** The study concluded that: (1) Different facies in LWM profile, including paleosols, lacustrine deposits, overbank deposits, and slackwater deposits, have some close relationships with the others. (2) Four major flood deposits during the late Holocene are corresponding to four abnormal flood events in Zhou Dynasty, Western Han Dynasty, Northern Song Dynasty, and Ming Dynasty in this area. (3) Human activities have a profound impact on flood scale and frequency in the lower Yellow River, from seasonal floods to extreme floods. **[Conclusions]** The study identified the characteristics of different sedimentary facies on lithology and environmental proxies, and explored the influence of human activities on floods. It provides a reference for paleoflood research along the abandoned channels in the lower Yellow River, and helps to further understand the processes and evolutionary mechanisms of flood hazards in the Yellow River.

Keywords: flood; abandoned channels; Late Holocene; grain size; geochemical element; hydrogeological survey engineering; the Yellow River

Highlights: (1) The extreme hydrological events recorded by the paleoflood sediment of the abandoned channel areas in the lower Yellow River correspond to the historical documents; (2) Human activities during the historical periods have a profound impact on flood scale and frequency.

About the first author: YANG Jinsong, male, born in 1987, associate researcher, engaged in environmental evolution research; E-mail: yangjinsong@mail.cgs.gov.cn

About the corresponding author: LIU Linjing, male, born in 1982, senior engineer, engaged in Quaternary research; E-mail: liulinjing@mail.cgs.gov.cn

Fund support: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41807428), the Natural Science Foundation of Hebei Province (No. D2020504008), and the Basic Research Program of Chinese Academy of Geological Sciences (No. YK202308).

1 引言

洪水灾害是中国面临最重要的自然灾害之一。20世纪以来全球最严重的前十大洪水事件中,有9次是发生在中国(www.disastercenter.com/disaster/TOP100K.html)。而且随着全球变化的影响,极端灾害事件变得更加频繁、更加严重。例如,“千年一遇”的2021年郑州“7.20”水灾,造成了河南省共150个县(市、区)1478.6万人受灾,因灾死亡失踪398人,直接经济损失高达1200.6亿元,给河南省经济建设和人民生活产生了深远影响(国务院灾害调查组,2022)。过去洪水记录能够为未来区域洪水风险预测和防治提供重要参考,但是中国水文监测数据和相关史料记载的时间尺度较短和空间分布有限,很难进行长周期、大范围的综合分析。古洪水研究是基于洪水的地质记录开展地质历史时期以来的洪水记录,能够有效扩展和延长洪水的时

空记录,更加科学地认识洪灾规律及驱动机制(Kochel and Baker, 1982),因而成为当前第四纪地质学和全球变化科学研究的热点问题之一(Baker et al., 2022; George et al., 2020; Wilhelm et al., 2019)。目前,学界较为常用的方法是基于古洪水行洪过程中遗存下的平流沉积物(也称滞流沉积物)开展洪水事件重建及古水文参数恢复(Wilhelm et al., 2019; 郭永强等, 2021; 王浩宇等, 2021)。

黄河下游频繁的改道决口在华北平原遗留了大量的古河道(Wu et al., 1996; 雷雁翔等, 2021),这些古河道区域蕴藏了大量的古洪水沉积记录(Toonen et al., 2012)。近年来结合考古学工作,研究者在黄河故道区考证了汉代(Kidder et al., 2012)、北宋(Storozum et al., 2018)和明代—清代(Storozum et al., 2020)等历史时期水灾事件的地层记录,为探索历史时期黄河下游的人地相互关系提供了一定的基础素材。但遗憾的是,上述研究主要从环

境考古等角度对区内重要的洪水事件进行了考证分析,对于区域内洪水事件的沉积特征及其洪水灾害的指示意义等尚未开展详细分析和对比研究。同时,黄河流域洪灾频发,风险巨大(王尧等,2021),但相比于黄河中上游地区丰硕的研究成果而言(王浩宇等,2021),下游工作仍然较为零星,亟需加强古洪水相关研究,获取更多的洪水灾害沉积记录。

本文选取河北大名龙王庙(LWM)剖面作为豫北黄河故道区典型沉积剖面,利用¹⁴C和光释光(OSL)等测年手段,结合史料和区域资料,建立剖面年代格架,选取粒度和地球化学元素等环境代用指标,分析了古洪水沉积特征,并对比区域研究成果,重建了研究区历史时期以来的重大洪水灾害事件序列。该项研究有助于深入了解黄河故道区异常洪水的沉积特征及历史,指导沉积地层中长序列洪水灾害识别分析工作,进而为黄河下游的洪灾风险防控提供科学数据和理论依据。

2 研究区概况和剖面特征

黄河下游作为“善淤、善决、善徙”的多沙性堆

积河流,素有“三年两决口,百年一改道”之说,经历了多次的洪水泛滥和决口改道,形成了众多的黄河故道(Chen et al., 2012; Chen, 2019)。河北大名县位于冀鲁豫三省交界处,是历史时期黄河北流的重要区域,区内古河道和古洪水记录十分丰富(图1a)。据史料记载和现代考古发掘成果(大名县县志编纂委员会, 1994; 梁洪和蔚芝炳, 2011),大名县内曾多次发生黄河和漳卫河等决口改道的极端水文事件,其中最严重的一次是明建文三年(公元1401年,约0.6 ka),位于县城北5 km的大名府故城被洪水迅速掩埋于地下(图1b)。

LWM剖面位于河北省邯郸市大名县东南10 km处的龙王庙镇废弃砖厂内,剖面中可见洪水沉积物与湖相和古土壤多期次交互,沉积特征清楚。基于前人在全球(Baker, 1987; Benito et al., 2003)和黄河流域(Huang et al., 2011)中有关古洪水沉积物的特征总结,对剖面中沉积单元和沉积环境予以判别。

LWM剖面总厚度为9 m,根据剖面野外沉积特征,从顶至底可划分为10个沉积单元(表1)。其中,单元1、3、5对应的古土壤层,具有明显的孔隙及壤

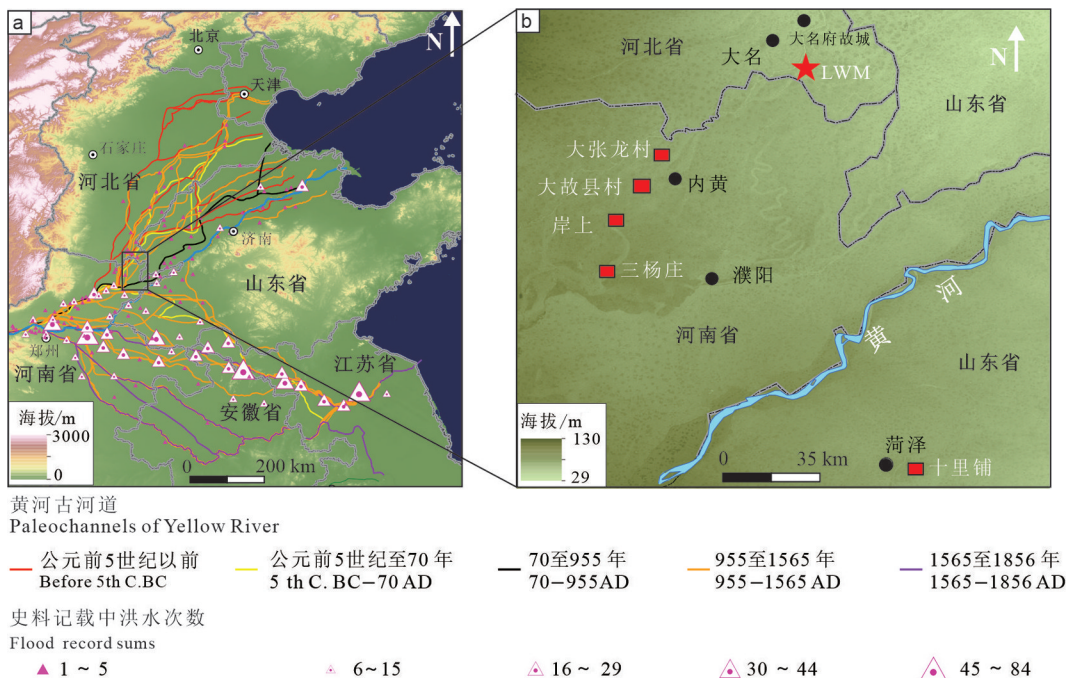


图1 研究区区域位置图

a—历史时期主要的黄河古河道及洪灾记录,黄河古河道及洪水记载相关数据来源于Chen et al.(2012)和Chen (2019);b—LWM剖面位置,红色方框代表相邻区域已研究剖面

Fig.1 The location of study area

a—Abandon channels and flood records in the lower Yellow River during the historical times, the data from Chen et al. (2012) and Chen(2019); b—Location of LWM and the previous research profiles showed by red rectangles

表1 LWM地层划分及岩性描述

Table1 Stratigraphic descriptions and subdivision units of the LWM profile			
沉积单元	地层	深度/cm	岩性描述
1	古土壤	0~20	棕灰色黏土,为现代植物耕作层,中部见有碎片状粉质黏土
		20~110	灰黄色夹灰白色细砂层,弱水平层理,见有泥砾。73 cm处见有薄的棕红黏土薄膜
2	古洪水沉积	110~190	棕红色黏土,厚层块状具油脂光泽,剖面中受后期植物根系影响,碎裂面发育砖红色薄膜
3	古土壤	190~280	棕红色黏土,厚层块状具油脂光泽,剖面中受后期植物根系影响,碎裂面发育砖红色薄膜。沿碎裂面可见颗粒状土壤充填
4	古洪水沉积	280~320	灰白色粉砂,顶部夹有棕色黏土质粉砂薄层。粉砂质地疏松,成分较为均一。
5	古土壤	320~330	棕红色黏土层,贝壳状断口,油脂光泽,局部有细小的灰白色粉砂薄层
		330~358	黄棕色黏土质粉砂,团粒质地疏松,植物根茎较发育
6	古洪水沉积	358~430	灰白色夹灰黄色含细砂粉砂,上部见有棕黄色含黏土粉砂夹层
		430~495	棕红色黏土,块状,油脂光泽
7	季节性洪水沉积	495~600	灰黄色粉砂与棕红色粉砂质黏土互层,具水平层理
		600~720	黄灰色粉砂,结构松散。局部见黄褐斑状锈染,岩性无明显变化,向下过渡为黄色细砂
8	古洪水沉积	720~755	棕红色黏土,油脂光泽,块状贝壳状断口,上部夹有灰白色粉砂薄层,层面可见龟裂构造
9	湖相沉积	755~825	灰色粉砂质黏土,局部可见螺类,与上层界线平直,指示了突变特征,与下伏地层呈过渡关系
10	古洪水沉积	825~890	灰黄色粉砂夹棕色黏土,下部可见泥砾
		890~900	棕红色黏土,致密块状,表面具有油脂光泽,未见底

化特征,通常与下伏地层呈渐变过渡关系。单元9对应的湖沼相沉积,为灰黑色粉砂质黏土,见有螺壳,指示了强还原环境。而其余沉积单元均为洪水沉积物,其中单元2、4、6、8、10具有相似的沉积特征,均表现为下部细粒的古洪水水平流沉积和上部的河流泛滥细砂沉积物,且与下伏地层间的界线清晰,为突变接触关系,分别代表了一期异常洪水沉积事件,指示了河流发生决口、改道等重大水文突变事件(高白水等,2015; Dan et al., 2016; Knight and Evans, 2017; 李华勇等, 2021)。而单元7表现出较为独特的沉积特征:多个灰黄色粉砂与棕红色粉砂质黏土互层,这符合前人调查黄河下游河漫滩典型的二元结构特征(Gelder et al., 1994),代表了该时间段内多期次季节性洪水的垂向加积作用。

在详细的野外观察描述基础上,结合各地层分布情况,选取5 cm的取样间距对该剖面进行了详细的野外描述和取样分析,同时在合适的层位采集¹⁴C和OSL年代样品。

3 研究方法

3.1 环境代用指标方法

本次研究中选用常规的粒度和地球化学元素

代用指标进行综合分析,均在中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室完成相关测试分析。粒度分析使用英国Malvern Instrument公司生产的Mastersize2000激光粒度仪完成粒度测试,测试范围为0.02~2000 μm,实验误差小于5%。元素分析使用荷兰Panlytical公司生产的PW4400 X-Ray荧光光谱仪测定。

3.2 年代学方法

本研究主要利用¹⁴C、OSL等测年手段建立地层的基本格架,同时为了提高洪水事件重建的可靠性,参考区域内洪水事件的相关历史进行多重对比分析。本研究中¹⁴C样品挑选剖面中沉积物有机质送往国家地震动力学重点实验室和西安加速器质谱中心进行测试分析;OSL样品在中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室完成;此外,有关河北大名的水灾记录历史参阅了地方志(大名县县志编纂委员会,1994)。

4 结果

4.1 粒度结果

LWM剖面粒度结果表明,剖面整体粒度变化情况与岩性划分结果保持较好的一致性(图2)。剖

面整体粒度以粉砂(4~63 μm)为主,体现出了黄河下游泛滥平原以细粒泛滥沉积为主的特征。其中古土壤和平流沉积以粉砂及以下成分(<63 μm)为主,而河流泛滥沉积与湖相沉积以极细砂及以上粒度(>63 μm)为主。对应的剖面粒度特征中,整体平均粒径(M_z)分布范围为:9.33~93.31μm(平均值为33.61μm);分选系数(S)分布范围为:1.72~3.69,平均值为2.29;偏度(S_k)分布范围为:-0.4~0.05,平均值为-0.24;丰度(K_g)分布范围为0.91~1.83,平均值为1.29。值得注意的是,在单元2、4、6、8、10中均表现为下细上粗的粒度组合特征,这与剖面中岩性特征基本吻合。

4.2 地球化学元素结果

本文选取 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、

Fe_2O_3 为代表的主量元素进行分析,可以看出在LWM剖面的元素变化特征与粒度变化曲线较为相似。剖面氧化物平均含量的大小顺序为: Na_2O (平均值为:1.25%;分布范围为:0.50%~1.77%) < MgO (平均值为:2.15%;分布范围为:1.45%~3.21%) < K_2O (平均值为:2.19%;分布范围为:1.78~2.78%) < Fe_2O_3 (平均值为:4.63%;分布范围为:2.74%~7.81%) < CaO (平均值为:7.01%;分布范围为:1.78%~12.17%) < Al_2O_3 (平均值为:11.21%;分布范围为:8.86%~13.96%) < SiO_2 (平均值为:58.45%;分布范围为:45.85%~67.24%),不同岩性组中该变化趋势基本一致。

根据剖面中各层位主量元素含量分析结果(表2,图3),可以看出 SiO_2 和 Na_2O 在泛滥沉积和湖沼

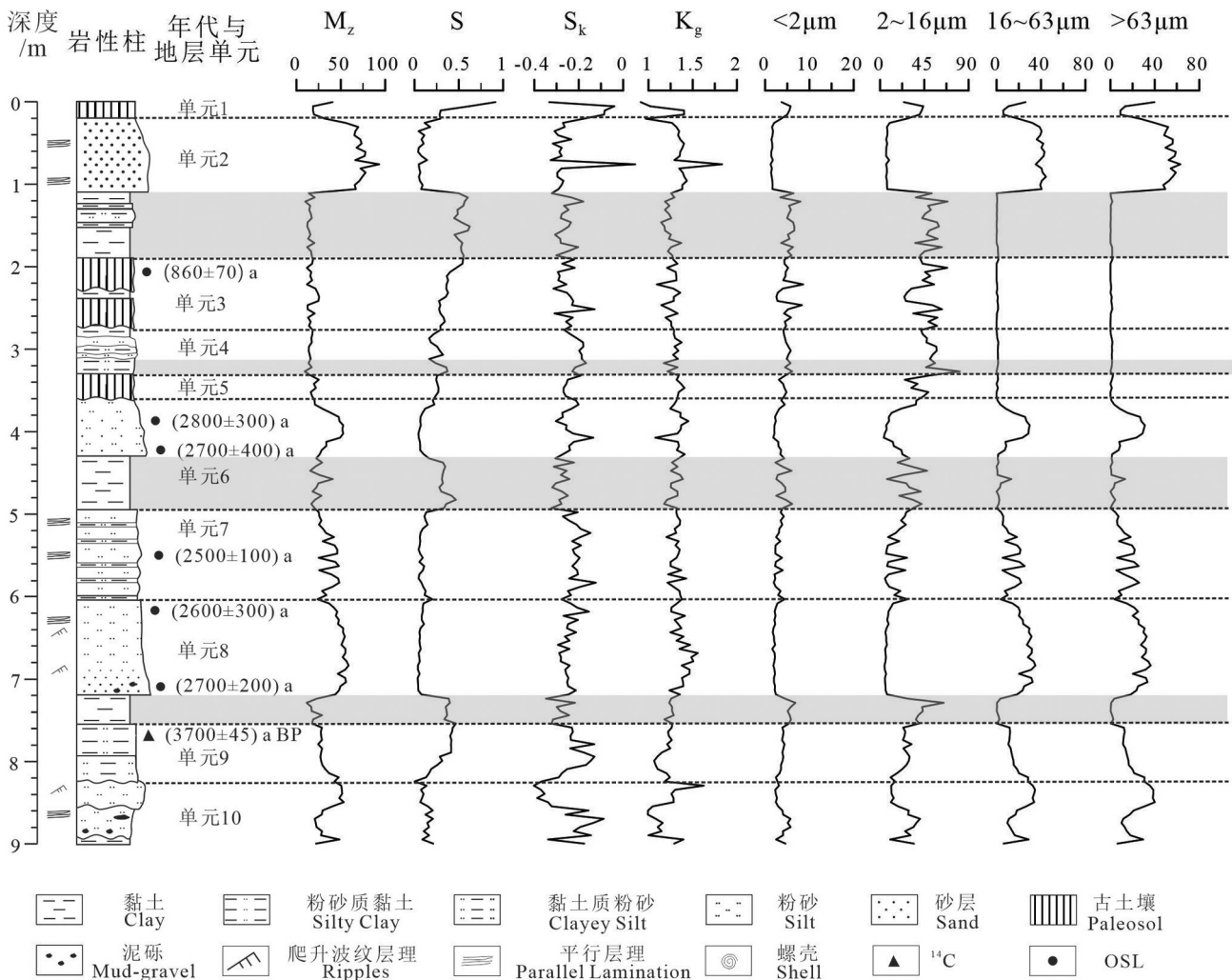


图2 LWM剖面粒度参数及不同粒度含量变化曲线(灰色阴影部分表示异常洪水单元下部的古洪水平流沉积层)
Fig.2 Stratigraphy and grain size distribution in the LWM profile(the shades of blue represents lackwater deposits as the lower part of extraordinary flood units)

表2 LWM剖面主要元素指标PC1和PC2与元素变量的相关系数

Table 2 Correlations between the first two principal components and major elements in LWM profile								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	组分贡献率%
PC1	-0.916	0.217	0.034	-0.052	0.255	0.073	0.200	98.44
PC2	0.042	-0.479	-0.112	0.05	0.820	-0.100	-0.267	1.48

沉积中相对较为富集,而Al₂O₃、K₂O、CaO、MgO和Fe₂O₃在古洪水平流沉积和古土壤中相对富集。这主要是由于河流沉积物中元素存在一定的粒度效应,粗颗粒砂层中SiO₂高含量对其他元素存在一定稀释效应(Grygar and Popelka, 2016)。而Al₂O₃、K₂O和Fe₂O₃等主量元素在表生地球化学过程中往往通过黏土矿物的形式富集在黏土等细颗粒(顾静等, 2010)。剖面垂向上,元素变化特征根据沉积单元的差异而呈现出峰谷变化,尤其是在平流沉积中表现出明显的突变特征,指示了沉积环境上的特殊性。同时,主量元素的主成分分析中主成分1(PC1)和主成分2(PC2)分别揭示了化学元素组成变化的98.44%和1.48%,共累计解释变量为99.92%,可以

看出PC1和PC2累计解释变量占绝对主导。其中,PC1与SiO₂相关性高,而PC2与CaO相关性高。

4.3 年代结果

该剖面共测试了4个AMS¹⁴C年代数据,测试材料主要为土壤有机质,所有样品用OxCal V4.4程序(<https://c14.arch.ox.ac.uk>)经IntCal20曲线(Reimer et al., 2020)进行树轮校正(表3)。由于洪水沉积物的快速堆积特征存在老碳的二次搬运使得剖面上部的¹⁴C测年结果存在明显倒转,不符合地层层序特征。笔者在剖面中湖相层之上选取了6个OSL测试样品,其中洪水沉积物年龄结果相对集中在2~3 ka BP。同时,古土壤(单元3)的OSL年龄结果为(860±70) a,这与上部疑似明代洪水沉积(单元2)的

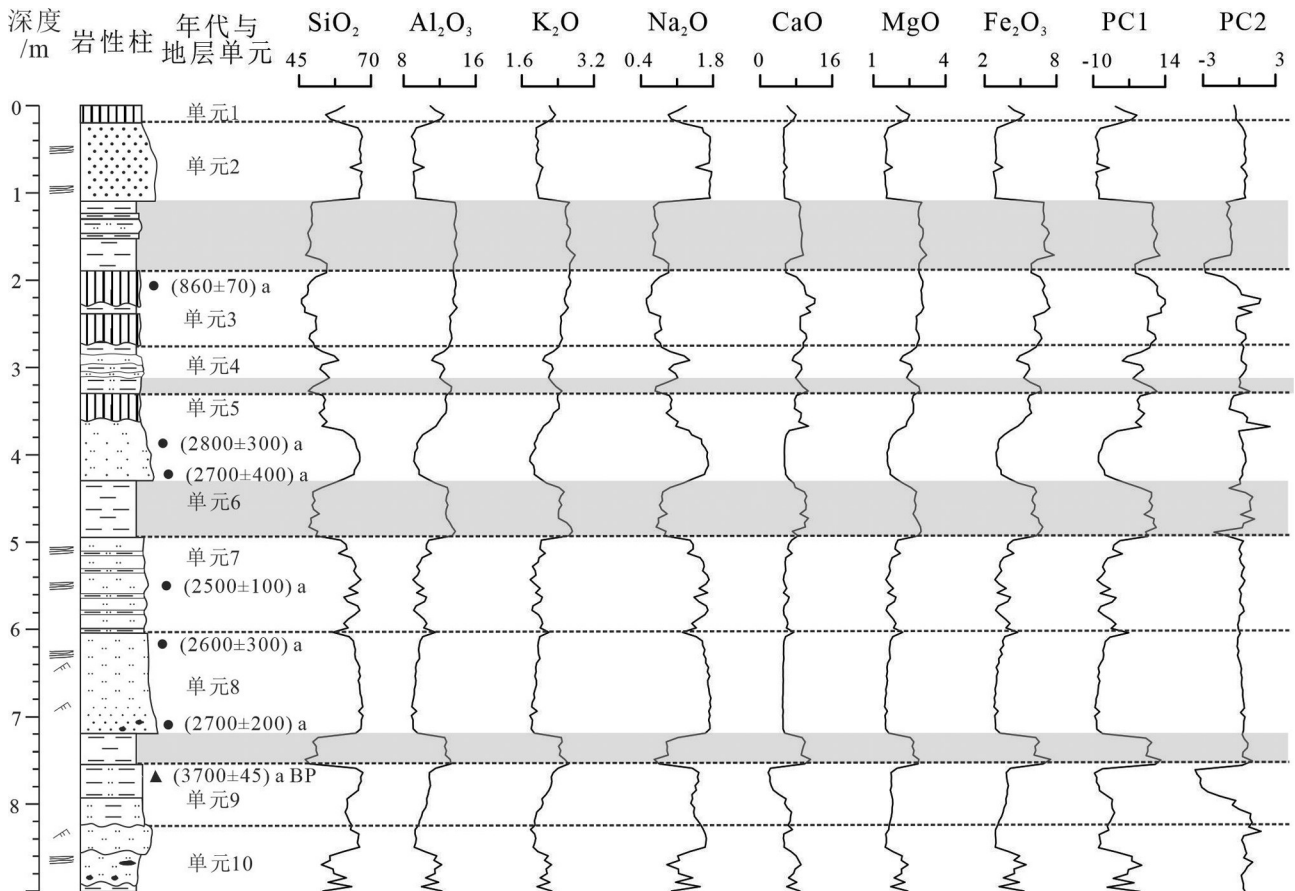


图3 LWM剖面常量元素及主成分变化曲线(图例同图2)

Fig.3 Stratigraphy, major elements and principal components distribution in the LWM profile(The legend is identical to Fig. 2)

表3 LWM剖面AMS-¹⁴C和OSL测年结果
Table 3 AMS-¹⁴C and OSL dating results in LWM profile

取样点号	埋深/m	地层	测年材料	测年结果	14C校正年龄(2σ)/(cal a BP)
LWM- ¹⁴ C-1	1.53	古土壤	全样有机质	(2850±20)a BP	3057~2877
LWM- ¹⁴ C-2	2.1	古土壤	全样有机质	(4380±30)a BP	5042~4860
LWM- ¹⁴ C-3	7.5	洪水沉积物	全样有机质	(4790±25)a BP	5586~5477
LWM- ¹⁴ C-4	7.56	湖相沉积物	全样有机质	(3700±45)a BP	4218~3901
LWM-8	2.03	古土壤	粉砂	(860±70)a	
LWM-9	3.83	洪水沉积物	细砂—粉砂	(2800±300)a	
LWM-2	4.23	洪水沉积物	细砂—粉砂	(2700±400)a	
LWM-4	5.53	洪水沉积物	细砂—粉砂	(2500±100)a	
LWM-5	6.23	洪水沉积物	细砂—粉砂	(2600±300)a	
LWM-6	7.13	洪水沉积物	细砂—粉砂	(2700±200)a	

地层关系基本吻合。洪水沉积物OSL测年中需要考虑OSL信号存在曝光不充分等情况,部分结果仅能作为洪水事件的最大年龄参考。整体而言,LWM剖面湖相沉积物发育于4 ka前后,湖相层之上主要为晚全新以来古洪水的沉积记录。

5 讨论

5.1 沉积特征及环境代用指标特征

通过地层对比表明(表1,图2),LWM剖面中最为明显的沉积特征是在单元2、4、6、8、10中均表现为下部棕红色平流沉积与上部的河流泛滥砂层,组成了一个反粒序特征。结合近现代洪水决口等极端水文事件的灾后调查结果(高白水等,2015; Dan et al., 2016; Knight and Evans, 2017; 李华勇等, 2021),表明这是河流在平原区发生决口改道等重大水文事件的沉积特征。尤其是,在这些单元沉积中以棕红色粉砂—粉砂质黏土为主的平流沉积,其成分均一、结构致密,指示了洪水期的快速堆积过程,这些特征与古土壤、湖沼相沉积与泛滥沉积存在较为明显的区别,易于识别(杨劲松等,2022)。

前人在黄河流域的古洪水研究工作主要利用了洪水期平流沉积与非洪水期的坡积物、黄土—古土壤序列之间在沉积环境上的差异来识别古洪水沉积物(张鹏等,2020;王浩宇等,2021)。相比于中上游地质地貌条件,在河流下游平原区非洪水期形成稳定的古土壤或者湖沼相沉积,而在洪水期对应沉积除了平流沉积之外,还包括了河流泛滥沉积。在相邻的区域,包括河南濮阳三杨庄遗址(Kidder et al., 2012)、内黄大张龙村、大故县村、岸上剖面(Storozum et al., 2018)和山东菏泽十里铺遗址(Yu

et al., 2020)等(图1),均发现了平原区洪水沉积物并非单一的沉积特征,而是由多期次、不同特征的洪水沉积物叠加组合,代表了洪水不同阶段的沉积组合。同时,由于泛滥沉积与正常的河漫滩沉积和河道沉积等存在一定相似性,但古洪水平流沉积物在颜色、粒度、结构、构造等方面与这些沉积物存在较为明显的差别,依然可以作为黄河故道区重要的洪水识别标志之一(杨劲松等,2022)。综上,在基岩峡谷区可以将单独的平流沉积对应一个洪水期次(Huang et al., 2011),但在黄河故道区洪水沉积物存在不同的组合形式,洪水沉积单元的划分需要结合上下地层的接触关系和沉积相变特征综合分析。

为了更好地反映不同沉积单元沉积环境和水动力条件的差异,利用粒度的C-M图和地球化学元素的主成分分析进一步对剖面中不同环境的沉积物进行分析。首先,LWM剖面沉积物整体投影分布基本平行于C=M基线,主要分布在Passegga的图形分区中的VI、VII和VIII中($C < 1000 \mu\text{m}$, $0 < M < 100 \mu\text{m}$)(图4),属于悬浮沉积物(Passegga, 1964, 1969)。其中,平流沉积与古土壤主要分布在静水悬浮沉积VIII区和均匀悬浮沉积VI区,两者在C-M图中分布区域较为相似。一方面是由于古土壤的成壤改造作用会使得粒度组分不同程度地发生一定变化;另一方面是由于冲积平原区古土壤的形成通常是在前期洪水退却时堆积的细粒沉积悬浮物质基础上形成的,正是这种继承性使得在粒度指标上具有一定的相似性。而河流泛滥沉积和湖相沉积物主要集中在递变悬浮VII区,但部分泛滥沉积物跨度较大,甚至存在零星的滚动沉积物(III区),表明LWM剖面中泛滥沉积物的水动力条件最

为复杂。

通过主量元素主成分分析也可以看出各沉积相的化学元素特征与粒度特征存在一定的相似性(图5)。洪水平流沉积与古土壤主要位于PC1的正值,而湖泊沉积与泛滥沉积主要分布在PC1的负值区间。其中,泛滥沉积分布范围较广,在不同区域均有一定分布,指示了泛滥沉积物与其他沉积在成因上具有一定的联系。平流沉积的分布趋势相对较为集中,与古土壤较为接近,但零星的古土壤在PC1的负轴上也有一定分布,表明古土壤与部分泛滥沉积之间也存在一定过渡特征。此外,根据主成分分析结果和区域地球化学特征,表明PC1负值指示硅酸盐盐输入量增加,PC2正值指示碳酸盐输入量增加。当碳酸盐和硅酸盐输入量同时增加,即PC1突然减少,PC2同时增加时,可以视为洪水发生的主要阶段,如图3中单元2、4、6、8和10的上部均出现了PC1和PC2同步变化的情况,可能指示了规模较大的洪水堆积事件。

综上所述,结合岩性特征、粒度与元素特征,可以看出黄河故道区古洪水的识别相对更复杂。由于古土壤、湖沼相和洪水沉积物等均与河流泛滥沉积物之间存在一定继承性,因此对洪水事件的识别需要综合沉积特征、不同沉积相间的接触关系以及

多种环境代用指标综合分析,才能更加准确地识别古洪水的沉积记录。

5.2 洪水灾害事件的区域响应

冲洪积平原沉积物测年的不确定性一直是洪水重建工作重要的制约因素之一(Toonen et al., 2015),本次测年结果也存在结果倒转等现象。通过河北平原区域地层的年代对比(Wu et al., 1996),综合相邻区域在考古遗址中的地层及年代学研究(Kidder et al., 2012;王松娜,2017;Storozum et al., 2018),笔者对湖相沉积之上地层记录的晚全新世古洪水记录进行了综合对比分析(图6)。

如图6所示,黄河故道区内主要的地层单元均由古土壤或湖沼相沉积与洪水沉积组成的一系列沉积旋回,且在主要的洪水期—洪水间歇期旋回中,不同剖面的地层在深度和沉积特征上具有很好的对比性。通过对比发现,LWM剖面中历史时期较为重要的北宋洪水(单元4)、西汉洪水(单元6)和周朝洪水(单元8)均在研究区相邻区域内广泛分布(Kidder et al., 2012;Storozum et al., 2018)。而剖面顶部单元2所记录的明代洪水在其他剖面中并没有相应的沉积记录,这主要是由于该次洪水为公元1401年漳、卫两河同时泛滥,摧毁了大名府的异常洪水堆积(大名县县志编纂委员会,1994)。推测该次

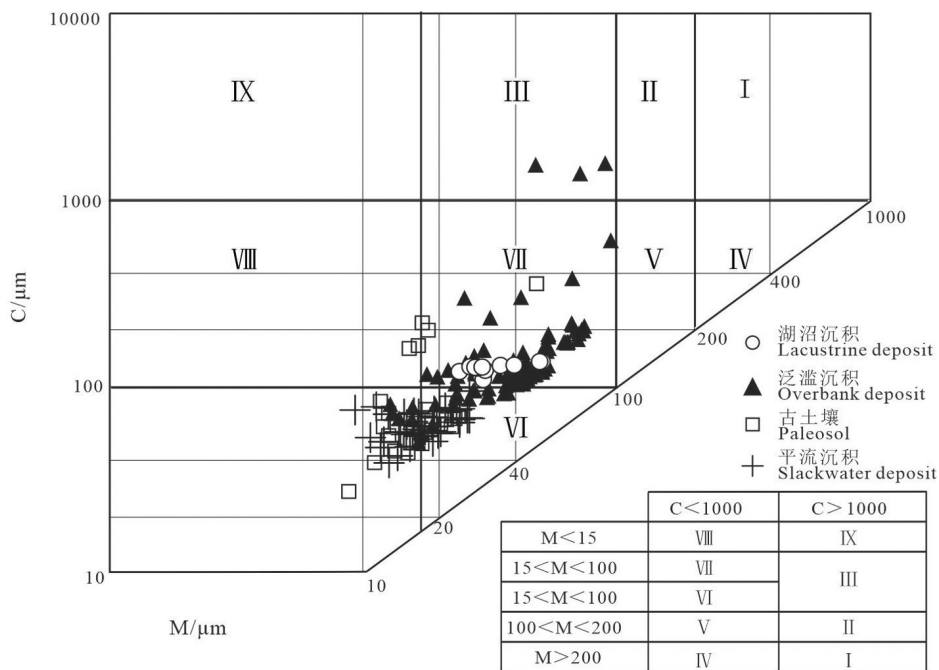


图4 LWM剖面各沉积相粒度C-M图

Fig.4 C-M diagram of sediment facies in LWM profile

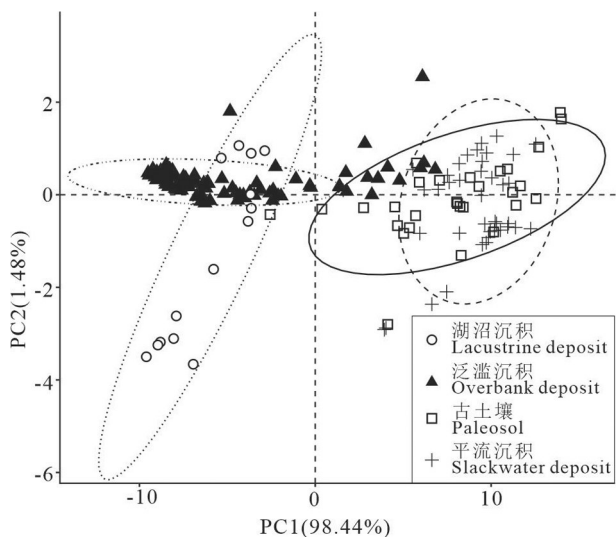


图5 LWM剖面各沉积相的主成分聚点分析图
Fig.5 Scatter plot with the first two principal components of different facies in LWM profile

洪水为局部洪水作用,对位于LWM剖面上游的其他剖面并无明显影响。同时,笔者在LWM剖面北约20 km的大名府遗址及周边若干露头剖面进行追索调查,结果表明遗址被掩埋在3~5 m的洪水沉积物之下,沉积物厚度与特征均与LWM剖面保持一致。而

在洪水间歇期,地层中古土壤/湖沼沉积代表了河流安流期,可作为区域地层对比的重要标志层。如剖面中单元5对应的唐宋古土壤代表了东汉之后长达数百年的安流时期,该时期土壤作用发育,在区域内形成了较为稳定的古土壤层(谭其骧,1962)。

值得注意的是,单元6和单元7所体现的西汉季节性洪水与异常洪水沉积组合和特征差异,在三杨庄地层中表现出完全相似的沉积特征和深度,表明当时该区域具有相似的沉积环境,共同受到黄河等重大河道变迁事件的影响(Kidder et al., 2012; 王松娜,2017)。其中,季节性洪水沉积(河漫滩)表现为多旋回的薄层粉砂和粉砂质黏土组合,而异常的洪水沉积(如决口改道等)表现为不同的沉积单元组合,以厚层的平流沉积与粉砂组成的反粒序组合为特征,同时为突变接触,指示了异常洪水的快速堆积过程(Kidder et al., 2012)。

5.3 历史时期人地关系探讨

黄河故道区历史时期的古洪水记录为分析洪水与人类活动之间的关系提供了独特的时间窗口,不同时期的沉积旋回特征指示了人地关系演变的历史。前人在黄河流域的古洪水研究中,通过长时间序列的洪水记录,指出了洪水灾害多发生在气候转型期

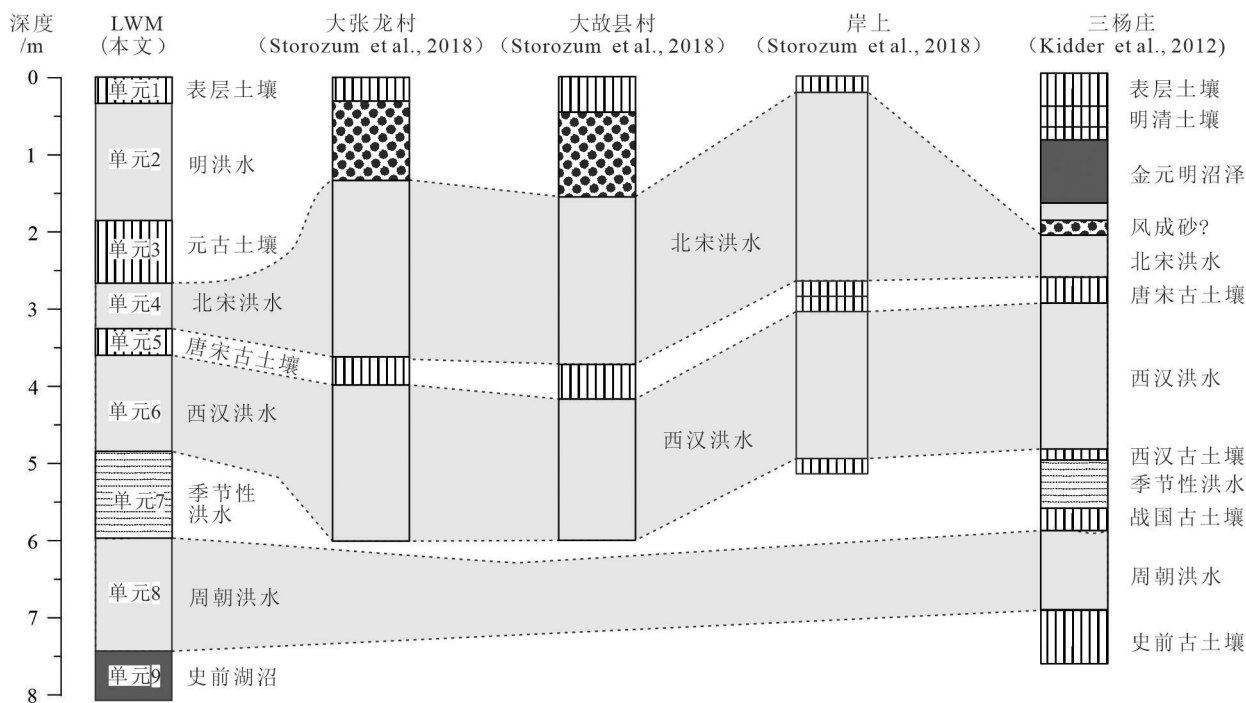


图6 黄河故道区古洪水沉积剖面对比图
Fig.6 Comparison of the LWM profile with previous paleoflood profiles along the abandoned channels in the lower Yellow River

(Huang et al., 2011; Yu et al., 2020),但下游考古遗址上开展的环境考古工作也指出人类活动对洪灾存在重要影响(Kidder and Zhuang, 2015)。

河流在安流期时,相对低洼的地方发育成为湖沼相,而在洪水期时发育为洪水沉积单元。LWM剖面记录中4 ka前后沉积记录从湖相沉积转变为较为明显的洪水沉积旋回,代表了华北平原在中—晚全新世之间一次重大的环境转型事件(Wu et al., 1996)。前人在黄河流域不同河段均发现在该时期存在大范围洪水记录,相关研究也表明该时期洪水主要受气候转型影响(Huang et al., 2011; Yu et al., 2020)。另一方面,虽然洪水频发给人类生存环境造成了严重的威胁,但在与洪水的斗争中,先民不断提高生产能力和水平,也在一定程度上推动了中华文化的发展和华夏文明的诞生(夏正楷和杨晓燕, 2003)。

进入历史时期,区内各剖面主要为古土壤层与洪水沉积物的多期次沉积旋回,分别对应了洪水间歇期与洪水期,从侧面反映了河进人退、河退人进的历史进程。在西汉早期,研究区维持了相对稳定的一段时间,沉积特征上表现为季节性洪水沉积(单元7);但河床淤积使得洪水风险越来越大,并最终决口改道,在区域内广泛形成异常的洪水堆积(单元6)。这表明随着人类活动的逐渐增强,在一定程度上改变了原有洪水的特征和规律,即从高频低能的季节性洪水(单元7)转变为低频高能的异常洪水(单元6)。相邻的河南内黄岸上剖面还保留有商代晚期的水利设施,代表了华北平原人地关系的重要转变(Storozum et al., 2018)。在同样被黄河泛滥掩埋的三杨庄遗址开展的环境考古研究中, Kidder et al. (2015)同样指出,正是由于早期先民开始掌握修建大型防洪堤坝和洪水控制系统的技能,使得人类能够在曾经的黄泛区居住和生活;但另一方面,这些水利设施使得黄河淤积更加严重,河床逐步抬升,下游河道成为地上悬河,并最终经过长时间积累,发生河流改道、决口泛滥等灾害事件。综上所述,在史前时期黄河故道区的洪水事件主要受气候变化等自然因素影响,但随着历史时期人类生产能力的提升,人类活动在一定程度上也改变了洪水的频次规律特征。今后随着黄河流域城镇化的逐步推进,应当在充分尊重自然规律的前提下,

防范高强度人类活动,如土地开垦、水利建设等因素对河流地质作用的干扰和影响。同时,基于未来不同气候变化情景进行对比分析,重点关注气候突变转型时期,针对性地制定区域洪灾防控方案。

6 结 论

(1)LWM剖面作为黄河故道区的典型代表剖面,地层中包括了古土壤、湖沼沉积、泛滥沉积与平流沉积等不同沉积相旋回,代表了河流洪水期与洪水间歇期的沉积组合。其中,洪水期主要形成泛滥沉积和平流沉积,而在洪水间歇期主要发育古土壤和湖沼沉积。

(2)不同沉积相在粒度和地球化学元素等代用指标特征中存在一定差别,其中平流沉积特与古土壤较为相似,而泛滥沉积与湖沼沉积较为接近,表明冲积平原区不同沉积相之间存在一定的相关性和继承性。

(3)LWM剖面中记录了周、西汉、北宋和明朝的四次重大决口事件,在剖面中均对应由平流沉积和泛滥沉积组成的反粒序特征组合,这些特大洪水事件在区域上具有相似的地层结构和沉积响应。

(4)4.0 ka前后,该区由湖沼相—洪泛沉积旋回转变为古土壤—洪泛沉积旋回,代表了重大环境变迁事件的区域沉积响应。进入历史时期随着人类活动影响的逐渐增强,对区域洪水过程也产生了一定影响,洪水频次由高频低能的季节性洪水逐步转变为低频高能的异常洪水。

致谢:与水利部徐海亮高级工程师进行了有益探讨,中山大学陈蕴真老师无私分享了黄河故道区相关史料记载资料,匿名审稿专家对本文提出了有益的修改意见,在此一并表示感谢!

References

- Baker V R. 1987. Paleoflood hydrology and extraordinary flood events[J]. *Journal of Hydrology*, 96(1): 79–99.
- Baker V R, Benito G, Brown A G, Carling P A, Enzel Y, Greenbaum N, Herget J, Kale V S, Latrubesse E M, Macklin M G, Nanson G C, Oguchi T, Thorndycraft V R, Ben Dor Y, Zituni R. 2022. Fluvial palaeohydrology in the 21st century and beyond[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(1): 58–81.
- Benito G, Sánchez-Moya Y, Sopena A. 2003. Sedimentology of high-stage flood deposits of the Tagus River, Central Spain[J]. *Sedimentary Geology*, 157(1/2): 107–132.

- Chen Yunzhen. 2019. Flood dynamics of the lower Yellow River over the last 3000 years: Characteristics and implications for geoarchaeology[J]. *Quaternary International*, 521: 147–157.
- Chen Yunzhen, Syvitski J P M, Gao Shu, Overeem I, Kettner A J. 2012. Socio-economic impacts on flooding: A 4000-year history of the yellow river, China[J]. *Ambio*, 41(7): 682–698.
- Daming County Local Gazetteers Compilation Committee. 1994. Daming County Local Gazetteers[M]. Beijing: Xinhua Publishing House, 99–112 (in Chinese).
- Dan M, Sawai Y, Yamada M, Namegaya Y, Shinozaki T, Takeda D, Fujino S, Tanigawa K, Nakamura A, Pilarczyk J E. 2016. Erosion and sedimentation during the September 2015 flooding of the Kinu River, central Japan[J]. *Scientific Reports*, 6(1): 34168.
- Disaster Investigation Team of the State Council. 2022. Investigation Report on "July 20th" Torrential Rain Disaster in Zhengzhou, Henan[R]. 1–8(in Chinese).
- Gao Baishui, Jin Zhenkui, Li Yan, Shi Liang, Li Guizi. 2015. Sedimentary model and evolutionary process of crevasse splays: A case of crevasse splays around Fuqiancun village along Xinjiang River[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 36(5): 564–572 (in Chinese with English abstract).
- Gelder A V, Berg J H V D, Cheng G, Xue C. 1994. Overbank and channelfill deposits of the modern Yellow River delta[J]. *Sedimentary Geology*, 90(3): 293–305.
- George S S, Hefner A M, Avila J. 2020. Paleofloods stage a comeback[J]. *Nature Geoscience*, 13(12): 766–768.
- Grygar T M, Popelka J. 2016. Revisiting geochemical methods of distinguishing natural concentrations and pollution by risk elements in fluvial sediments[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 170: 39–57.
- Gu Jing, Zhou Jie, Zhao Jingbo. 2010. Flood events indicated by elements and compounds of sediment in the Jingyang reach of Jinghe River[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 30(2): 9–14 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yongqiang, Ge Yonggang, Chen Xiaoqing, Liu Weiming, Mao Peini, Liu Tao. 2021. Progress in the reconstruction of palaeoflood events in the mountain canyon valleys around the Tibetan Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(2): 168–180 (in Chinese with English abstract).
- Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, Su Hongxia, Jia Yaofeng. 2011. 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*, 30: 460–468.
- Kidder T R, Zhuang Yujie. 2015. Anthropocene archaeology of the Yellow River, China, 5000–2000 BP[J]. *The Holocene*, 25(10): 1602–1623.
- Kidder T, Liu Haiwang, Xu Qinghai, Li Minglin. 2012. The alluvial geoarchaeology of the Sanyangzhuang site on the Yellow River Floodplain, Henan Province, China[J]. *Geoarchaeology*, 27(4): 324–343.
- Knight J, Evans M. 2017. The sediment stratigraphy of a flood event: An example from the Sabie River, South Africa[J]. *Catena*, 151: 87–97.
- Kochel R C, Baker V R. 1982. Paleoflood hydrology[J]. *Science*, 215 (4531): 353–361.
- Li Huayong, Zhu Jiali, Zhang Hucai, Yuan Junying, Zhang Yanan, Zhang Wenqing, Wu Shuaihu. 2021. Grain-size characteristics of crevasse splays from the lower reaches of Dan River in northern Shandong province and reconstruction of sedimentary process[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 35 (2): 176–182 (in Chinese with English abstract).
- Liang Hong, Yu Zhibing. 2011. The history of the Daming ancient city and its value[J]. *China Ancient City*, (6): 42–47 (in Chinese with English abstract).
- Lei Yanxiang, He Lei, Ye Siyuan, Zhao Lihong, Yuan Hongming, Yang Shixiong, Xue Chunting, Edward A. Laws. 2021. Paleochannel distribution, delta development and paleoenvironment evolution in Bohai Bay since the Late Pleistocene[J]. *Geology in China*, 48(6): 1947–1964 (in Chinese with English abstract).
- Passega R. 1964. Grain size representation by CM patterns as a geologic tool[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34(4): 830–847.
- Passega R. 1969. Grain size image of clastic deposits[J]. *Sedimentology*, (13): 233–252.
- Reimer P J, Austin W E N, Bard E, Bayliss A, Blackwell P G, Bronk Ramsey C, Butzin M, Cheng H, Edwards R L, Friedrich M, Grootes P M, Guilderson T P, Hajdas I, Heaton T J, Hogg A G, Hughen K A, Kromer B, Manning S W, Muscheler R, Palmer J G, Pearson C, van der Plicht J, Reimer R W, Richards D A, Scott E M, Southon J R, Turney C S M, Wacker L, Adolphi F, Büntgen U, Capano M, Fahrni S M, Fogtmann-Schulz A, Friedrich R, Köhler P, Kudsk S, Miyake F, Olsen J, Reinig F, Sakamoto M, Sookdeo A, Talamo S. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (–55 cal kBP)[J]. *Radiocarbon*, 62(4): 725–757.
- Storozum M, Lu Peng, Wang Sanying, Chen Panpan, Yang Ruixia, Ge Qifeng, Cao Jinping, Wan Junwei, Wang Hui, Qin Zhen, Liu Haiwang, Park E. 2020. Geoarchaeological evidence of the AD 1642 Yellow River flood that destroyed Kaifeng, a former capital of dynastic China[J]. *Scientific Reports*, 10(1): 1–12.
- Storozum M, Qin Zhen, Ren Xiaolin, Li Haiming, Cui Yifu, Fu Kui, Liu Haiwang. 2018. 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*, 28(11): 1759–1770.
- Tan Qixiang. 1962. Why the Yellow River experienced a long period of peaceful flow after the Eastern Han Dynasty[J]. *Academic Monthly*, (2): 23–35 (in Chinese).
- Toonen W H J, Kleinhans M G, Cohen K M. 2012. Sedimentary architecture of abandoned channel fills[J]. *Earth Surface Processes*

- and Landforms, 37(4): 459–472.
- Toonen W H J, Winkels T G, Cohen K M, Prins M A, Middelkoop H. 2015. Lower Rhine historical flood magnitudes of the last 450 years reproduced from grain-size measurements of flood deposits using End Member Modelling[J]. *Catena*, 130: 69–81.
- Wang Haoyu, Jia Yana, Zhang Yuzhu, Wang Ninglian, Luo Pingping, Qiu Haijun, AyidinaSailebieke, Xiao Qili, Chen Dou. 2021. Research progress of paleoflood events in the Yellow River Basin since the Last Deglaciation[J]. *Progress in Geography*, 40(7): 1220–1234 (in Chinese with English abstract).
- Wang Songna. 2017. Optically Stimulated Luminescence Dating of Flood Deposits at Sanyangzhuang Profile, Henan Province[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science (in Chinese with English abstract).
- Wang Yao, Chen Ruishan, Guo Chihui, Xia Zilong. 2021. Changes of resource and environmental pattern of the Yellow River Basin in the past 40 years and suggestions on geological work[J]. *Geology in China*, 48(1): 1–20 (in Chinese with English abstract).
- Wilhelm B, Ballesteros Cánovas J A, Macdonald N, Toonen W H J, Baker V, Barriendos M, Benito G, Brauer A, Corella J P, Denniston R, Glaser R, Ionita M, Kahle M, Liu T, Luetscher M, Macklin M, Mudelsee M, Munoz S, Schulte L, George S S, Stoffel M, Wetter O. 2019. Interpreting historical, botanical, and geological evidence to aid preparations for future floods[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1(6): 1–22.
- Wu Chen, Xu Qinghai, Ma Yonghong, Zhang Xiuqing. 1996. Palaeochannels on the North China Plain: Palaeoriver geomorphology[J]. *Geomorphology*, 18(1): 37–45.
- Xia Zhengkai, Yang Xiaoyan. 2003. Preliminary study on the flood events about 4 ka B.P. in North China [J]. *Quaternary Science*, 23(6): 667–674 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jinsong, Wang Yong, Yin Jinhui, Zhao Hua, Liu Zhe, Jiang Gaolei, Zhang Peng, Qi Jiahao. 2022. Progress and Prospects in Reconstruction of Flood Events in Chinese Alluvial Plains[J]. *Earth Science*, 47(11): 3944–3959 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jinsong, Wang Yong, Yin Jinhui, Zhao Hua, Liu Zhe, Jiang Gaolei, Zhang Peng, Qi Jiahao. 2022. Progress and prospects in reconstruction of flood events in Chinese alluvial plains[J]. *Earth Science*, 47(11): 3944–3959 (in Chinese with English abstract).
- Yu Shiyong, Hou Zhanfang, Chen Xuexiang, Wang Yixuan, Song Yougui, Gao Mingkui, Pan Jianrong, Sun Ming, Fang Hui, Han Jianye, Kidder T R, Chen Fahu. 2020. 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*, 350: 106878.
- Zhang Peng, Yang Jinsong, Zhao Hua, Liu Zhe, Song Lei, Zhang Run, Cao Wengeng. 2020. Research progress of the Holocene paleoflood in the Yellow River basin and a future prospect[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(6): 178–188 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 大名县志编纂委员会. 1994. 大名县志[M]. 北京: 新华出版社, 99–112.
- 高白水, 金振奎, 李燕, 石良, 李桂仔. 2015. 河流决口扇沉积模式及演化规律——以信江府前村决口扇为例[J]. *石油学报*, 36(5): 564–572.
- 顾静, 周杰, 赵景波. 2010. 泾河泾阳段高河漫滩沉积元素与化合物指示的洪水事件[J]. *水土保持通报*, 30(2): 9–14.
- 国务院灾害调查组. 2022. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R]. 1–2.
- 郭永强, 葛永刚, 陈晓清, 刘维明, 毛沛妮, 刘涛. 2021. 高山峡谷区古洪水事件重建研究进展[J]. *地学前缘*, 28(2): 168–180.
- 李华勇, 朱佳丽, 张虎才, 袁俊英, 张雅楠, 张雯清, 吴帅虎. 2021. 鲁北丹河下游洪水决口扇沉积岩芯粒度特征与沉积过程重建[J]. *干旱区资源与环境*, 35(2): 176–182.
- 梁洪, 蔚芝炳. 2011. 北京大名府的历史沿革及其价值所在[J]. *中国名城*, (6): 42–47.
- 雷雁翔, 何磊, 叶思源, 赵俐红, 袁红明, 杨士雄, 薛春汀, Edward A. Laws. 2021. 渤海湾晚更新世晚期以来古河道分布和三角洲发育及其古环境的演变[J]. *中国地质*, 48(6): 1947–1964.
- 谭其骧. 1962. 何以黄河在东汉以后会出现一个长期安流的局面——从历史上论证黄河中游的土地合理利用是消弭下游水害的决定性因素[J]. *学术月刊*, (2): 23–35.
- 王浩宇, 贾雅娜, 张玉柱, 王宁练, 罗平平, 邱海军, 阿依迪那·赛勒别克, 肖奇立, 陈豆. 2021. 黄河流域末次冰消期以来古洪水事件研究进展[J]. *地理科学进展*, 40(7): 1220–1234.
- 王松娜. 2017. 河南三杨庄剖面洪水事件的光释光年代学研究[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 王尧, 陈睿山, 郭迟辉, 夏子龙. 2021. 近40年黄河流域资源环境格局变化分析与地质工作建议[J]. *中国地质*, 48(1): 1–20.
- 夏正楷, 杨晓燕. 2003. 我国北方4 ka B.P.前后异常洪水事件的初步研究[J]. *第四纪研究*, 23(6): 667–674.
- 杨劲松, 王永, 尹金辉, 赵华, 刘哲, 姜高磊, 张鹏, 戚甲豪. 2022. 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*, 11(47): 3944–3959.
- 张鹏, 杨劲松, 赵华, 刘哲, 宋磊, 张润, 曹文庚. 2020. 黄河流域全新世古洪水研究进展及展望[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 40(6): 178–188.