

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.005

洪水过程对水生生态系统影响的研究进展

黄振宇, 潘保柱

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 洪水灾害不仅对人民生命财产安全、社会经济发展造成严重影响,更显著影响着水生生态系统的结构和功能。本文首先介绍了洪水脉冲的生态功能,讨论了洪水脉冲对河流-滩区生态系统进程的重要性,进而结合国内外研究成果,探讨了洪水过程对水生生态系统中水环境、浮游生物、底栖动物和鱼类的影响。并且建议从系统角度出发,建立综合的指标体系以研究洪水过程对水生生态系统格局的影响。本文最后指出,在水库联合调度方面,在满足防洪、兴利目标的同时,也应统筹考虑大坝下游水生生态系统的需水要求,制定相应的生态流量以维系河流生态系统的健康发展;在行蓄洪区规划管理方面,应以国家当前“管理洪水”的治洪策略为指导思想,统筹防洪减灾与生态保护要求,逐步恢复部分行蓄洪区的湿地生态功能。本研究可为水生生态系统对洪水过程响应的相关研究提供思路与建议。

关键词: 洪水脉冲; 水生生态系统; 水文连通; 水库调度; 行蓄洪区

中图分类号: Q148 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2020)03-0300-07

Research on the impact of flood process on aquatic ecosystem

HUANG Zhenyu, PAN Baozhu

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The flood disaster not only have a serious impact on the safety of people's lives and property, social and economic development, but also affect the structure and function of the water ecosystem significantly. This paper first introduces the ecological functions of flood pulse, summarizes the importance of flood pulse to the process of river-floodplain ecosystem, and then discusses the responses of the water environment, plankton, benthic macroinvertebrates and fish to floods based on domestic and foreign research results. It is suggested that a comprehensive index system should be established to study the impact of flood processes on the pattern of aquatic ecosystem from a system perspective. Finally, it is pointed out that in terms of joint dispatch of reservoirs, the water requirements for the downstream water ecosystem of the dam should also be considered as a whole while achieving the goals of flood control and benefit, with the corresponding ecological flow formulated to maintain the healthy development of the river ecosystem. In terms of planning and management of flood storage areas, the current flood control strategy for management of flood should be taken as the guiding ideology, and the requirements of flood prevention and disaster reduction and ecological protection should be coordinated, gradually restoring the wetland ecological function of some flood storage areas. This study can provide ideas and suggestions for the research on the response of water ecosystem to flood process.

Key words: flood pulse; aquatic ecosystem; hydrological connection; reservoir dispatch; flood storage area

收稿日期: 2020-09-03; 网络出版日期: 2020-09-29

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200929.1312.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51939009,51622901)

第一作者: 黄振宇,男,博士生,研究方向为生态水利。E-mail: zyhuang95@163.com

通信作者: 潘保柱,男,博士,教授,博导,研究方向为淡水生态和生态水利。E-mail: zhuzipan@xaut.edu.cn

在全球气候变化背景下,洪水等极端水文事件频发。洪水作为常见的自然干扰,具有利害两重性。在人类文明尚未形成时期,河流洪水基本不受人因为因素的干扰,大量泥沙沉积物、养分等随洪水落淤至流域中下游,为中下游平原、沿河湿地的形成提供了丰富的物质基础^[1],人类文明因洪水资源得以发展,在我国更是形成了以黄河三角洲、长江三角洲为主的经济格局。另一方面,洪涝灾害也对人民生命财产安全产生重大威胁,严重影响着社会经济的发展。洪水灾害对人类社会的影 响首先表现为人口的伤亡,其次对农业、交通、水利设施均有一定程度的影响;洪水对生态环境的破坏主要表现为水土流失导致的中上游地区土壤贫瘠化、淹没区土壤盐渍化;其次,洪水泛滥可能会使有毒重金属及其他化学污染物大量扩散而造成水体污染,加剧水环境恶化。目前,关于洪水的研究多集中于洪水成因、洪水预报、洪水灾害风险评估,防洪措施等方面^[2-5],关于洪水对水生生态系统影响的研究相对较少。水生生态系统作为生态环境的重要组成部分,对生态系统的良性循环至关重要。因此,研究洪水对其发生地区的水生生态系统影响的重要性不言而喻。

1 洪水脉冲的生态功能

洪水脉冲理论(Flood Pulse Concept)由 Junk 等^[6]于 1989 年提出,主要强调周期性的洪水对河流及洪泛区生态过程的影响,是河流生态理论体系的重要组成部分。洪水脉冲不仅是河流-洪泛区生态系统的重要驱动力,更显著影响着河流生态系统的结构、功能及其动态特征^[7]。洪水脉冲主要有三大生态功能。①将河流与洪泛区联结成有机物高效利用的生态系统,促进了水生生物与陆生生物间的能量交换和物质循环。洪水期间,河流中的营养物质随水位的抬升涌入滩区,使滩区的初级生产力显著提升,浮游动物和无脊椎动物快速生长,为迁徙至此的鱼类提供丰富的饵料资源,有效完善了食物网的结构;洪水退去后,滩区的有机物及营养物质又随水流消退至河流中,提高了河流中单位面积的生物量。②提高了河流-洪泛区的动态连通性。洪水引起的水位抬升使位于滩区的湖泊、水塘等水体从静水系统变为动水系统,为各类水生生物提供了栖息地、避难所和觅食所,增强了物理栖息地结构的多样性,进而提高了水生生物群落的多样性。③为生物提供信息流功能。洪水水位涨落会引发各类生物不同的行为特点,如鱼类洄游及产卵、鸟类迁徙和陆生无脊椎动物的繁殖和迁徙等(见图 1^[8])。有研究发现,长

江四大家鱼在洪水期进行产卵,产卵规模与洪水流量和持续时间等因素密切相关^[9]。

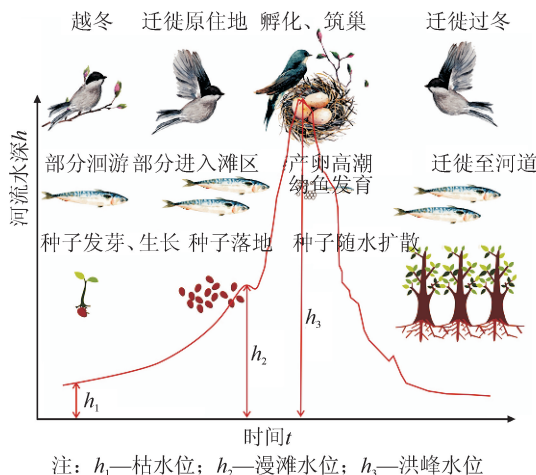


图 1 河流水文过程与鱼类、鸟类生活史及树种扩散的关系
Fig. 1 Relationship between river hydrological processes and the life history of fish and birds and the spread of tree species

不同频率的洪水对河流生态系统的干扰程度也不尽相同,董哲仁等^[8]认为,中等洪水脉冲干扰对河流-滩区生态系统的生物多样性往往会产生有利影响,但特大罕见洪水会破坏河流及洪泛区生态系统的稳定性,甚至会造成灾难性的后果。

2 洪水过程对水生生态系统的影响

水生生态系统是河流生态系统的重要组成部分,也是一个开放和动态的体系,在此体系中,生物与非生物环境相互作用、相互影响。洪水作为河流生态系统中常见的自然干扰,显著影响着水生生物的群落结构、功能与物种多样性等,其发生频率、周期和强度影响着下游水体的物理化学和生物的年际变化和季节变化特征。本文就国内外针对水生生态系统对洪水过程响应的相关研究进行梳理总结。

2.1 洪水对水环境的影响

洪水不仅对流域内防洪安全有严峻挑战,对地表水环境也产生了不可忽视的影响^[10]。国内外学者就洪水过程对水环境的影响进行了大量的研究工作,结果表明,洪水频率、持续时间和洪水强度等条件会显著影响水环境的物理、化学和生物学特性^[11-12]。洪水的冲刷作用将泥沙、营养物质等带入江河湖泊中,水体的环境容量随洪水过程不断发生变化,并可能会造成水体污染物浓度上升,引发水质恶化^[13]。水温、透明度、pH、溶解氧、悬浮颗粒物含量、营养盐(总氮、总磷、氨氮、硝氮)等是反映水质状况的主要水质参数,也是控制水体内部生化反应的

基本条件和了解物质变化的基础,对维持水生生物群落结构等方面发挥着重要作用。由于上游来水来沙等复杂因素的影响,水体环境中发生着物理、化学及生命活动等复杂的过程,因此要了解洪水对水体生命活动的影响,必须先了解水体内物质循环的变化。

水体透明度是反映水体浑浊程度的关键参数,洪水事件通过改变下游水体泥沙沉积和悬浮平衡,进而影响水体透明度^[14]。由于洪水往往携带大量泥沙,同时大坝拦截使水流流动性变差,水库中的颗粒物含量受重力作用的影响不断发生沉积,使水体透明度降低^[15]。陈修康等^[16]研究表明,洪水过后的水体再混合过程使悬浮颗粒物再悬浮,降低了水体透明度且减少了浮游植物生物量。溶解氧是影响水生态系统生化条件的关键指标,在夏季,由于水体表层水温持续升高,导致变温层位置下移,水体热分层尤为显著,而由于洪水影响进行的洪水调控会使水体混合均匀,无明显热分层的现象^[17]。洪水过程也会通过影响水体热分层结构从而改变水体溶解氧的垂向分布。秦国帅等^[18]研究发现在洪水年份,径流以异重流形式进入水库,使水体发生混掺,破坏水体的热分层结构,促进上下层水体间溶解氧、热量和营养盐的交换,增加了底层水体溶解氧含量,但随之输入的污染物在分解过程中会产生一定的酸性物质,消耗了大量溶解氧,造成水体 pH 值和溶解氧浓度降低。

营养盐是判断水体营养状况的重要指标,洪水泛滥对水体营养状况主要有两方面的影响。一方面,一些类似于絮凝剂的固体颗粒物随洪水进入水体,对营养盐产生吸附并沉积在底泥中,降低了磷等可利用性营养盐的浓度^[19];另一方面,洪水也直接将大量的营养盐带入水体,增加了水体营养盐的负荷^[20]。朱伟等^[21]研究发现,洪水过后太湖大部分水域磷浓度显著上升,磷在底泥中累积对后续湖泊水质变化也产生了间接的影响。不同流域、土地利用类型、洪水类型等条件下水体营养盐含量对洪水过程的响应也不尽相同。Siwek 等^[22]针对波兰 Carpathian 丘陵地区淡水环境中水体营养盐的调查研究显示,在林地流域,由风暴引起的洪水造成水体中的 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 离子浓度要比降雨强度增加引起的洪水时更高;在农业和综合用途流域,由融雪引发的洪水造成水体中的 NO_3^- 值最高,由暴雨引发的洪水造成水体中的 NO_3^- 值最低。

2.2 洪水对浮游生物的影响

浮游生物是指在海水或淡水中能适应悬浮生活

的动植物群落,易在风和水流的作用下做被动运动,包括浮游植物和浮游动物两大类群,它们的群落结构受水体物理、化学、水文水动力等因素的影响^[23]。洪水对浮游生物的影响主要体现在两个方面:一方面,洪水的冲刷作用破坏了生物栖息地,浮游生物随洪水直接流失,其生物量、丰度、分布等均受到影响^[24];另一方面,洪水事件使水体环境发生剧烈变化,进而影响浮游生物的群落结构。因此,洪水过程虽属于短期事件,但对水生态系统和浮游生物群落却产生长远的影响。

水体营养盐和悬浮颗粒物是影响浮游生物生长和分布的重要环境因子,从这两个环境因子角度看,洪水会对浮游生物产生多面的影响。通常情况下,洪水将大量的悬浮颗粒物输送到湖泊中,使水体透明度下降,导致藻类初级生产力下降,同时会对浮游动物的过滤器官造成机械损伤而导致其死亡,但悬浮颗粒物却对小型浮游动物物种(如轮虫)的繁殖具有刺激作用^[25];另一方面,洪水也可能将磷酸盐等营养物质带入湖泊,导致藻类生物量迅速增加,这种现象在贫营养湖泊尤为显著。Godlewska 等^[26]研究发现,在波兰 Dobczyce 水库夏季洪水发生后,硅藻取代绿藻和金藻成为浮游植物的主要类群,轮虫取代桡足类和枝角类成为浮游动物的主要类群,这主要是因为洪水带入了高浓度的营养物质且引起了水体上下层的强烈混合,促使了硅藻和轮虫的大量繁殖。但也有相关研究认为,在没有河水泛滥的情况下,湖泊的养分浓度相对较高,而在洪水泛滥后,养分浓度会降低^[27]。陈修康等^[16]发现,洪水导致高州水库水体总氮浓度和磷浓度明显降低,硅藻和甲藻取代蓝藻、绿藻成为主要优势类群。

洪水引起的水位变化是影响浮游生物群落结构的另一重要环境因子。Donagh 等^[28]研究表明,水位上涨会使湖泊的连通性及营养物质的交换速率发生变化,进而影响浮游植物的组成分布和浮游动物的群落结构。Zhang 等^[29]研究发现,在极端洪水期,湖泊连通性的增强使浮游甲壳动物中的一些稀有物种进入通江湖泊,湖泊中浮游动物物种丰富度明显高于常规水位期。Dube 等^[30]研究结果发现,洪水前后湖泊水位波动范围较大,在高水位阶段,小型浮游甲壳动物代替轮虫成为浮游动物群落的主要组成部分。

2.3 洪水对底栖动物的影响

大型底栖无脊椎动物简称底栖动物,是一类生活史的全部或大部分时间生活于水体底部的个体大于 $500\ \mu\text{m}$ 的水生动物群,它们的寿命较长,迁移能

力有限,处于食物链的中间环节,是淡水生态系统的重要组成部分,对环境的变化具有很好的指示作用^[31]。目前,关于洪水过程对底栖动物影响的相关研究相对较少,但有研究发现,洪水的冲刷作用会破坏原有的河床底质,直接破坏底栖生物栖息地,进而降低底栖动物的丰度、密度和生物多样性^[32]。Li等^[33]研究发现,季风洪水显著影响了湘西地区河流中大型无脊椎底栖动物群落,洪水发生后,主要优势类群(四节蜉)的丰度、生物量降低了约80%。Mundahl和Hunt^[34]对美国明尼苏达州东南部不同级别冷水溪流的底栖动物调查研究发现,洪水发生后,不同溪流中无脊椎动物的密度和类群丰富度分别减少了75%~95%和30%~70%。此外,洪水也可能导致水质恶化,进而影响底栖动物的群落结构和物种多样性。Smith等^[35]对美国纽约东部Catskill山区河流中的底栖动物调查发现,在特大暴雨洪水发生后,河流水质严重恶化,进而导致大型底栖无脊椎动物的物种多样性和丰度降低。

尽管洪水会对底栖动物的群落结构产生一定的影响,但它们也会通过垂直或水平位移来躲避洪水,且有很强的恢复能力。许多类群会通过改变自身的形态、生理结构或进化出特定生活史阶段来适应洪水对自身的影响^[36]。一些研究也发现,洪水虽会暂时减少大型底栖动物的数量和多样性,但之后它们能迅速恢复^[37]。

2.4 洪水对鱼类的影响

鱼类作为水生生态系统中的顶级类群,对其他类群的存在和丰度有着重要的影响。鱼类会产生各种变化以适应环境的影响。自然状态下,洪水脉冲往往对鱼类资源产生有利影响。在洪泛区,洪水脉冲增强了河流与滩区的动态连通性,位于滩区的沼泽、湖泊和池塘等水域为大多数鱼类特别是江湖洄游性鱼类提供丰富的饵料资源和优质的栖息地环境。

洪水对鱼类的群落结构、分布和生活史等方面也有较大的影响^[38]。在鱼类生活史方面,Wantzen等^[39]研究发现巴西Pantanal河中许多鱼类选择在洪水期间进行产卵。Arrington^[40]等对密西西比河泛滥平原的鱼类研究表明,鱼类个体的性腺成熟率随洪水水位的升高而增加,洄游性鱼类数量与洪水持续时间高度相关,且持续时间越长,数量越多。在鱼类群落和分布方面,Huang等^[41]在极端洪水期对长江高坝州水库鱼类调查研究发现,洪水导致水库中的平均鱼类密度显著降低,但生物量却从汛期前的 $237 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加至 $526 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,这主要是因为洪水造成超过70%的围网养殖鱼类被冲至水

库中,此外洪水也使水库中的鱼类分布和大小组成发生变化。Miranda等^[42]发现洪水引起的水位抬升增强了江湖连通性,河流性鱼类在不同生境斑块中的迁徙影响了湖泊性鱼类的群落组成,导致湖泊中的鱼类更加同质化。Lewis等^[43]发现鱼类群落结构随洪水发生改变,呈现出明显的聚集状态。

鱼类功能多样性也与洪水脉冲的影响紧密相关,Baumgartner等^[44]发现洪水脉冲对巴西Parana河鱼类功能多样性产生长达3年的影响,洪水爆发后鱼类功能丰富度迅速上涨并且在1.5年后达到峰值。王朝等^[45]对安徽菜子湖鱼类功能多样性的研究结果显示,鱼类群落在洪水驱动作用下得到了重要的功能补充,水位抬升对功能丰富度指数、功能分散指数等指标均有显著影响。

3 总结与展望

目前,关于洪水对水生生态系统影响的研究多集中于热带洪泛区,该类型区域受人类活动干扰程度较轻,洪水脉冲通常是水生生态系统最主要的干扰因子。然而在其他地区特别是中纬度的温带地区,人类活动干扰强烈,除洪水脉冲外,还存在其它影响水生生态系统生物进程的影响因素,如水质污染、土地利用类型等^[7]。因此在此类型区域进行相关研究时,需综合考虑洪水与其他主要影响因子对水生生态系统的复合影响。此外,国内外多采用单一的指示生物类群或环境因子来评价水生生态系统对洪水的响应,指示生物多集中在鱼类和浮游生物,对底栖动物的系统性研究十分稀少,并且也多采用群落结构指标来评价洪水过程对水生生物的影响,缺乏从整体角度认识洪水对水生生态系统的影响。而从系统层面分析洪水对水环境与各生物间的相互作用及其导致的影响,更能准确地把握水生生态系统的现状。从个体角度出发,可以探究水生生物的繁殖、洄游等生活史过程对洪水过程的响应;从种群角度出发,可以探究种群密度、资源量等种群动态对洪水过程的响应;从群落水平和群落层面出发,可以探究水生生物的密度、生物量、群落结构及物种多样性等对洪水过程的响应;从生态系统角度出发,可以探究时空多样性格局、食物网结构稳定性等生态系统功能对洪水过程的响应。

自然状态下,洪水泛滥增强了河流与洪泛滩区湖泊、湿地等水域的连通性,为水生生物类群提供了多样的栖息地环境,提高了物种多样性。而作为当今世界最频繁的自然灾害之一,洪水也对社会发展也产生了重大影响。为应对洪水灾害,人类修

建了大规模的防洪工程来管理洪水,但也因此制约了自然洪水资源特性的发挥,并且导致了一系列的生态问题。例如,水坝的修建阻隔了洪泛区与河流的连通,改变了河流的自然演变过程,打破了流域中下游湖泊、湿地等水域的生态平衡^[46];行蓄洪区的修建导致湖泊、湿地面积大幅减少,使湿地生态结构破碎化,影响了湖泊、湿地作为水文“调节器”发挥其蓄积洪水、丰富生物多样性等生态服务功能^[47]。因此,在进行洪水管理时,不仅要满足流域内的防洪、兴利要求,也应当统筹考虑水生态系统的需水要求,合理开发利用,促进河流生态系统健康发展。在水库联合调度方面,可考虑采取制定兼顾生态的多目标调度策略,在保障防洪安全的前提下,营造生态洪水脉冲,尽可能恢复河流自然水文过程,以此减轻水坝建设对河流生态系统带来的负面影响,维持河流生态系统健康^[48]。在行蓄洪区规划管理方面,应以国家当前“管理洪水”的治洪策略为指导思想,统筹防洪减灾与生态保护要求,恢复部分行蓄洪区的湿地生态功能,促进河流生态系统健康发展,实现“人水和谐”的治水目标^[49]。

参考文献:

- [1] 向立云,魏智敏. 洪水资源化—概念、途径与策略[J]. 水利发展研究,2005,5(7):24-29.
- [2] 任洪玉,邹翔,张平仓. 我国山洪灾害成因分析[J]. 中国水利,2007(14):18-20.
REN Hongyu, ZOU Xiang, ZHANG Pingcang. An elementary study on causing-factors of Chinese mountain torrents disaster [J]. China Water Resources, 2007 (14): 18-20.
- [3] 姜树海,范子武. 水库防洪预报调度的风险分析[J]. 水利学报,2004(11):102-107.
JIANG Shuhai, FAN Ziwu. Risk analysis for flood control operation of reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(11): 102-107.
- [4] 张行南,罗健,陈雷,等. 中国洪水灾害危险程度区划[J]. 水利学报,2000(3):1-7.
ZHANG Xingnan, LUO Jian, CHEN Lei, et al. Zoning of Chinese flood hazard risk[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(3): 1-7.
- [5] 周魁一. 防洪减灾观念的理论进展—灾害双重属性概念及其科学哲学基础[J]. 自然灾害学报,2004,13(1): 1-8.
ZHOU Kuiyi. Theoretical progress in idea of flood disaster reduction: the concept of dual attribute of disasters and its scientific and philosophical base[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(1): 1-8.
- [6] JUNK W, BAYLEY P B, SPARKS R E. The flood pulse concept in river-floodplain systems[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1989, 106: 110-127.
- [7] 卢晓宁,邓伟,张树清. 洪水脉冲理论及其应用[J]. 生态学杂志,2007,26(2):269-277.
LU Xiaoning, DENG Wei, ZHANG Shuqing. Flood pulse concept and its application in river-floodplain system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(2): 269-277.
- [8] 董哲仁,张晶. 洪水脉冲的生态效应[J]. 水利学报, 2009,40(3):281-288.
DONG Zheren, ZHANG Jing. Ecological effect of flood pulses[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40 (3): 281-288.
- [9] 长江水利委员会. 三峡工程生态环境影响研究[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1997.
- [10] 郝秀平,夏军,王蕊. 气候变化对地表水环境的影响研究与展望[J]. 水文,2010,30(1):67-72.
HAO Xiuping, XIA Jun, WANG Rui. Influence of climate change on surface water environment[J]. Hydrology, 2010, 30(1): 67-72.
- [11] FOVET O, HUMBERT G, DUPAS R, et al. Seasonal variability of stream water quality response to storm event[J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 282-293.
- [12] HUANG Tinglin, LI Xuan, RIJNAARTS H, et al. Effects of storm runoff on the thermal regime and water quality of a deep, stratified reservoir in a temperate monsoon zone, in Northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 485/486: 820-827.
- [13] 程光均,向文英,李晓红,等. 频率洪水对水环境质量的影响研究[J]. 重庆建筑大学学报,2005,27(5): 96-100.
CHENG Guangjun, XIANG Wenyong, LI Xiaohong, et al. Research on influence of frequency flood on water environment quality [J]. Journal of Chongqing Jianshu University, 2005, 27(5): 96-100.
- [14] 殷子瑶,江涛,杨广普,等. 1986-2017年胶州湾水体透明度时空变化及影响因素研究[J]. 海洋科学,2020, 44(4):21-32.
YIN Ziyao, JIANG Tao, YANG Guangpu, et al. The spatial-temporal variation of water clarity and its influencing factors in Jiaozhou Bay from 1986 to 2017[J]. Marine Sciences, 2020, 44(4): 21-32.
- [15] 黄新莹,姚鹏,宋国栋,等. 小浪底水库关键水体环境要素的时空变化特征及其影响因素[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2020,50(4):111-120.
HUANG Xinying, YAO Peng, SONG Guodong, et al. Controls on spatial-temporal variation of hydrological features in the Xiaolangdi Reservoir[J]. Periodical

- of Ocean University of China, 2020, 50(4), 111-120.
- [16] 陈修康,郭跃华,冯喻,等. 特大洪水对浮游植物群落及其演替的影响——以广东高州水库为例[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 137-146.
- CHEN Xiukang, GUO Yuehua, FENG Yu, et al. Impact of great flood on phytoplankton assemblages and their succession: a case study of Gaozhou Reservoir, Guangdong Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(1): 137-146.
- [17] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 12-13.
- [18] 秦国帅, 刘建卫, 许士国, 等. 洪水事件对碧流河水库水质影响[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(1): 110-117, 143.
- QIN Guoshuai, LIU Jianwei, XU Shiguo, et al. Impact of flood events on water quality of the Biliuhe reservoir [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 110-117, 143.
- [19] KIEDRZYŃSKA E, KIEDRZYŃSKI M, ZALEWSKI M. Flood sediment deposition and phosphorus retention in a lowland river floodplain: impact on water quality of a reservoir, Sulejów, Poland [J]. Ecohydrology & Hydrobiology [J]. 2008, 8(2): 281-289.
- [20] VINCON-LEITE B, BOURNET P E, GAYTE X, et al. Impact of a flood event on the biogeochemical behaviour of a mesotrophic alpine lake: Lake Bourget (Savoy) [J]. Hydrobiologia, 1998, 373: 361-377.
- [21] 朱伟, 胡思远, 冯甘雨, 等. 特大洪水对浅水湖泊磷的影响: 以 2016 年太湖为例 [J]. 湖泊科学, 2020, 32(2): 325-336.
- ZHU Wei, HU Siyuan, FENG Ganyu, et al. Effects of great floods on phosphorus in shallow lakes: a case study of Lake Taihu in 2016 [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(2): 325-336.
- [22] SIWEK P J, ŻELAZNY M, CHELMICKI W. Influence of catchment characteristics and flood type on relationship between streamwater chemistry and streamflow: case study from Carpathian Foothills in Poland [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2011, 214: 547-563.
- [23] PADISÁK J, HAJNAL E, NASELLI-FLORES L, et al. Convergence and divergence in organization of phytoplankton communities under various regimes of physical and biological control [J]. Hydrobiologia, 2010, 639: 205-220.
- [24] IBÁÑEZ M S R. Phytoplankton composition and abundance of a central Amazonian floodplain lake [J]. Hydrobiologia, 1997, 362: 79-83.
- [25] TILZER M M, GOLDMAN C R, RICHARDS R C, et al. Influence of sediment inflow on phytoplankton primary productivity in lake Tahoe (California-Nevada) [J]. Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie, 1976, 61(2): 169-182.
- [26] GODLEWSKA M, MAZURKIEWICZ-BOROŃ G, POCIECHA A, et al. Effects of flood on the functioning of the Dobczyce reservoir ecosystem [J]. Hydrobiologia, 2003, 504: 305-313.
- [27] SOKAL M A, HALL R I, WOLFE B B. The role of flooding on inter-annual and seasonal variability of lake water chemistry, phytoplankton diatom communities and macrophyte biomass in the Slave River Delta (Northwest Territories, Canada) [J]. Ecohydrology, 2010, 3(1): 41-54.
- [28] DONAGH M E M, CASCO M A, CLAPSM C. Plankton relationships under small water level fluctuations in a subtropical reservoir [J]. Aquatic Ecology, 2009, 43(2): 371-381.
- [29] ZHANG Kun, XU Mei, LIN Zhi, et al. The response of zooplankton communities to the 2016 extreme hydrological cycle in floodplain lakes connected to the Yangtze River in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(23): 23286-23293.
- [30] DUBE T, DENECKER L, VAN VUREN J H J, et al. Spatial and temporal variation of invertebrate community structure in flood-controlled tropical floodplain wetlands [J]. Journal of Freshwater Ecology, 2017, 32(1): 1-15.
- [31] SUREN A M, JOWETT I G. Effects of floods versus low flows on invertebrates in a New Zealand gravel-bed river [J]. Freshwater Biology, 2006, 51(12): 2207-2227.
- [32] LAMBERTI G A, GREGORY S V, ASHKENAS L R, et al. Stream ecosystem recovery following a catastrophic debris flow [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 1991, 48(2), 196-208.
- [33] LI Fengqing, CAI Qinghua, JIANG Wanxiang, et al. Flow-related disturbances in forested and agricultural rivers: influences on benthic macroinvertebrates [J]. International Review of Hydrobiology, 2012, 97(3): 215-232.
- [34] MUNDAHL N D, HUNT A M. Recovery of stream invertebrates after catastrophic flooding in southeastern Minnesota, USA [J]. Journal of Freshwater Ecology, 2011, 26(4): 445-457.
- [35] SMITH A J, BALDIGO B P, DUFFY B T, et al. Resilience of benthic macroinvertebrates to extreme floods in a Catskill Mountain river, New York, USA: implications for water quality monitoring and assessment

- [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 107-115.
- [36] 舒薇薇,高耶. 湖泊水文情势变化及其生态响应概述[J]. *湿地科学与管理*,2020,16(1):69-73.
SHU Weiwei, GAO Ye. An overview of lake hydrological changes and its ecological responses[J]. *Wetland Science & Management*, 2020, 16(1): 69-73.
- [37] COLLIER K J, QUINN J M. Land-use influences macroinvertebrate community response following a pulse disturbance[J]. *Freshwater Biological*, 2003, 48(8): 1462-1481.
- [38] TAO Jiangping, YANG Zhi, CAI Yupeng, et al. Spatiotemporal response of pelagic fish aggregations in their spawning grounds of middle Yangtze to the flood process optimized by the Three Gorges Reservoir operation[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 103(A): 86-94.
- [39] WANTZEN K M, MACHADO F A, VOSS M, et al. Seasonal isotopic shifts in fish of the Pantanal wetland, Brazil[J]. *Aquatic Sciences*, 2002, 64: 239-251.
- [40] ARRINGTON D A, WINEMILLER K O. Habitat affinity, the seasonal flood pulse, and community assembly in the littoral zone of a Neotropical floodplain river[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2006, 25(1): 126-141.
- [41] HUANG Geng, WANG Qidong, CHEN Xiaohang, et al. evaluating impacts of an extreme flood on a fish assemblage using hydroacoustics in a large reservoir of the Yangtze River basin, China[J]. *Hydrobiology*, 2019, 841: 31-43.
- [42] MIRANDA L E. Fish assemblages in Oxbow Lakes relative to connectivity with the Mississippi River[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2005, 134(6): 1480-1489.
- [43] LEWIS W M, HAMILTON S K, LASI M, et al. Ecological determinism on the Orinoco floodplain: a 15-year study of the Orinoco floodplain shows that this productive and biotically diverse ecosystem is functionally less complex than it appears. Hydrographic and geomorphic controls induce a high degree of determinism in biogeochemical and biotic processes[J]. *BioScience*, 2000, 50(8): 681-692.
- [44] BAUMGARTNER M T, DE OLIVEIRA A G, AGOSTINHO A A, et al. Fish functional diversity responses following flood pulses in the upper Paraná River floodplain[J]. *Ecology of Freshwater Fish*. 2018, 27(4): 910-919.
- [45] 王朝,周立志,戴秉国,等. 水位洪枯变化对菜子湖江湖过渡带鱼类物种和功能多样性的影响[J]. *湖泊科学*,2019,31(5):1403-1414.
WANG Chao, ZHOU Lizhi, DAI Bingguo, et al. The impacts of water level fluctuations between wet and dry seasons on taxonomic and functional diversity of fish communities in the ecotone floodplain of Lake Cai-zi[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(5): 1403-1414.
- [46] 徐薇,杨志,陈小娟,等. 三峡水库生态调度试验对四大家鱼产卵的影响分析[J]. *环境科学研究*,2020,33(5):1129-1139.
XU Wei, YANG Zhi, CHEN Xiaojuan, et al. Three Gorges Reservoir ecological operation effect on the spawning of the four major Chinese carps[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1129-1139.
- [47] 傅娇艳,丁振华. 湿地生态系统服务、功能和价值评价研究进展[J]. *应用生态学报*,2007,18(3):681-686.
FU Jiaoyan, DING Zhenhua. Research progress on wetland ecosystem service and its valuation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3): 681-686.
- [48] 徐杨,常福宣,陈进,等. 水库生态调度研究综述[J]. *长江科学院院报*,2008,25(6):33-37.
XU Yang, CHANG Fuxuan, CHEN Jin, et al. Review of research on ecological operation of reservoir[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, 25(6): 33-37.
- [49] 王艳艳,刘树坤,向立云. 蓄滞洪区综合利用多目标情景分析模型研究[J]. *自然资源学报*,2009,24(2): 209-217.
WANG Yanyan, LIU Shukun, XIANG Liyun. Study on the multi-object and scenario analysis model for the integrative utilization of flood detention basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(2): 209-217.

(责任编辑 王绪迪)