

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 04. 014

淮河流域环境流变化及其对洪泽湖鱼类栖息地的生态影响

魏 卿¹, 薛联青¹, 张 敏², 杨 帆¹, 任 磊¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省洪泽湖管理委员会办公室, 江苏 洪泽 223100)

摘要:为分析淮河流域环境流要素的变化趋势及其对洪泽湖鱼类栖息地的生态影响,以淮河中下游河段为研究区,采用 IHA 法,将蚌埠水文站 1950—2015 年径流序列划分为 2002 年蚌埠闸扩建前后两个时期,采用 5 种流量事件筛选出 32 种环境流评价指标,分析了水文变异条件下 5 种环境事件的生态效应;以鳊鱼为洪泽湖指示鱼类,综合考虑栖息地限制因子,运用 PHABSIM 模型得到栖息地加权可利用面积-流量曲线,计算了鳊鱼产卵期的生态流量。结果表明:淮河中下游环境流组成趋于单一化,大洪水事件减少,枯水流量增大,高脉冲流量持续时间缩短,出现次数增加,对下游生态环境不利;洪泽湖鳊鱼 4—6 月产卵期的最小生态流量为 300 m³/s,适宜生态流量为 550 m³/s;需合理调控环境流,增加鱼类补充和物质循环,并采取湖泊生态修复等措施,维持洪泽湖的生态平衡。

关键词:环境流;IHA 指标;适宜度;栖息地模拟;生态影响;淮河流域

中图分类号:TV213. 4;TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933 (2019) 04 - 0089 - 06

Changes of environmental flow in Huaihe River Basin and its ecological impact on fish habitat in Hongze Lake// WEI Qing¹, XUE Lianqing¹, ZHANG Min², YANG Fan¹, REN Lei¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hongze Lake Management Committee Office of Jiangsu Province, Hongze 223100, China)

Abstract: In order to analyze the changing trend of environmental flow factors in Huaihe River Basin and its ecological impact on fish habitat in Hongze Lake, IHA (indicators of hydrologic alteration) method was used to study the middle and lower reaches of Huaihe River. The runoff series of Bengbu Hydrological Station from 1950 to 2015 was divided into two periods before and after the expansion of Bengbu Gate in 2002. 32 environmental flow evaluation indexes were screened out by using five flow events. Taking mandarin fish as indicator fish in Hongze Lake and considering habitat restriction factors comprehensively, the area-flow curve of habitat was obtained by using PHABSIM model, and the ecological flow of mandarin fish during spawning period was calculated. The results show that the composition of environmental discharge in the middle and lower reaches of Huaihe River tends to be simplified. The flood events are reduced, the low water flow is increased, the duration of high pulse flow is shortened and the frequency of occurrence is increased, which is harmful to the ecological environment in the lower reaches of Huaihe River. The minimum ecological flow rate of mandarin in Hongze Lake during spawning period from April to June is 300 m³/s, and the suitable ecological flow rate is 550 m³/s. In order to maintain the ecological balance of Hongze Lake, it is necessary to regulate environmental flow reasonably, increase fish replenishment and material cycle, and take measures such as lake ecological restoration.

Key words: environment flow; IHA index; suitability; habitat simulation; ecological effect; Huaihe River Basin

环境流(environment flow components,EFC)变化研究是目前国内外水文研究的热点。环境流是维护河流生态健康,寻求维持河流生态完整性所需的最低流量,枯水期能满足水量要求,汛期也能进行生态调节,具有维持河湖生态环境和生态服务的功能^[1-2]。环境流具有“自然-社会”二元属性,可调节

基金项目:国家自然科学基金(41371052);江苏省水利科技项目(2017027)
作者简介:魏卿(1996—),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:18751893266@163.com
通信作者:薛联青,教授。E-mail: lqxue@ hhu. edu. cn

河流的生态环境,具有动态性、过程性和多要素性等特征。环境流评估主要有水文学法、水力学法、栖息地模拟法和综合法。水文学法以 IHA (indicators of hydrologic alteration) 法应用较为成熟,通过筛选环境流指标来评价流域生态状况,分析环境流要素变化及其生态影响。陈昌春等^[3]在赣江流域用 IHA 法计算枯水变异过程,揭示了低流量范围内多个枯水流量事件高改变度的存在。闵倩等^[4]对漓江流域水库调节的生态影响进行了评价,认为水利工程要重视极端枯水期的调节。栖息地模拟法以 PHABSIM (physical habitat simulation) 模型为主,PHABSIM 模型结合断面条件和栖息地限制因子,计算不同条件下目标生物的生态流量,在国内外应用广泛。蒋红霞等^[5]利用 PHABSIM 模型计算了西南山区青石爬鮡的生态需水量,表明模型具有较好的适用性。李建等^[6]基于栖息地模拟分析了长江中游四大家鱼的产卵期生态流量,为流域生态保护和生态调度提供了依据。现有关于环境流的研究主要基于水文情势条件分析环境流变化趋势,或依据流域栖息地条件确定指示生物的生态流量,忽略了环境流变化带来的生态效应。本文基于洪泽湖鱼类栖息地保护需求,结合 IHA 法和 PHABSIM 模型,分析淮河中下游环境流演变趋势及其对洪泽湖鱼类栖息地的生态影响,并根据指示鱼类确定最适宜生态流量,可为流域水资源调控提供参考。

1 研究区概况

淮河发源于河南,流经河南、安徽、江苏 3 省,全长 1000 km,流域面积约 27 万 km²,由西北到东南地势逐渐降低;流域内水网纵横,季风气候显著,降雨时空分布不均,属暖温带半湿润气候。流域多年平均流量为 1 969 m³/s,淮河干流控制着洪泽湖全年 60% 以上的来水,淮河中下游河段流速分布均匀,水质良好,是鱼类较佳生存地。蚌埠站位于淮河中游,其水文资料具有较好的流域代表性。洪泽湖是我国第四大淡水湖,属平原水库型湖泊,西纳淮河,东入黄海,对维持流域生态稳定作用显著。

2 研究方法

本文采用 IHA 法,依据蚌埠水文站日测流量资

料,计算 32 个影响流域生态的关键水文特征值,分析其集中度和离散度,对比人为干扰前后的河流生态状况。32 个 IHA 指标可以分为 5 组,分别反映大小、出现时间、频率、持续时间和变化率等水文特征。为对比蚌埠闸扩建前后的淮河中下游河段径流特性,以蚌埠闸扩建时间点对研究时段进行划分,即干扰前的时段 1950—2002 年和干扰后的时段 2003—2015 年,选取的资料能够较好反映扩建前后的水文情势。水文情势在一定程度上影响着河流生态系统的稳定性,流量的日、季、年变化率和变幅影响着水生物种的分布及构成,人类活动导致的水文特征值明显变化可能会影响原有生态系统的健康与稳定,因此选用 IHA 法分析人类活动对 32 个 IHA 指标的影响。具体的 IHA 指标如表 1 所示。

运用 IHA 分析软件,对蚌埠站日流量资料人为干扰前后的水温指标进行统计分析,包括各项指标的中值、离散系数与偏差系数。

离散系数 C_D 表示各指标同均值的偏离程度,计算公式为

$$C_D = (H - L)/M \tag{1}$$

式中 H 、 L 、 M 分别为干扰前后各水文序列排序为 75%、25% 和 50% 的指标参数值。

偏差系数 F_D 反映干扰前后各指标相对天然状态的偏差,计算公式为

$$F_D = (D_{pre} - D_{post})/D_{pre} \tag{2}$$

式中 D_{pre} 、 D_{post} 分别为干扰前后的各项 IHA 指标值。

同时,采用 PHABSIM 模型建立栖息地指示鱼类适应度曲线,依据不同流量下流速及水深,分析适应度指数;运用 PHABSIM 模型软件,将代表性河段的断面数据、水力参数和栖息地适宜度曲线结合起来,预测物理栖息地参数,最终计算代表栖息地条件的加权可利用面积 (weighted usable area, WUA)。基于 WUA 与鱼类生物量的正相关假定,绘制 WUA-流量曲线,采用 WUA 最大位置对应的流量作为指示鱼类最适宜生态流量。

WUA 计算公式为

$$A_{WUA} = \sum_{i=1}^n A_i C_i / L_i \tag{3}$$

式中: A_i 为第 i 个河段水面面积; C_i 为河道综合性指标,包括基质和覆盖物; L_i 为第 i 个河段长度; n 为河

表 1 IHA 指标及其特征

分组	IHA 指标	阈值参数	水文指特征指标
I	径流月变化	程度、时间	每月平均流量
II	径流年平均极值及历时	程度、历时	1 d、3 d、7 d、30 d、90 d 年均最小流量,1 d、3 d、7 d、30 d、90 d 年均最大流量
III	年极值出现时间	出现时间	每年 1 d 最大、最小流量出现日
IV	高低脉冲出现频率和历时	程度、频率、历时	年高脉冲、低脉冲出现次数,年高脉冲、低脉冲每次出现的平均持续时间
V	流量改变率和频率	频率、涨洪落洪比率	日流量平均上升率、下降率和逆转次数

段总数。

假定各参数影响力相同,栖息地组合适宜度因子的乘积法计算公式为

$$F_i = f(v_i)f(d_i)f(C_i)f(T_i) \quad (4)$$

式中: F_i 为栖息地组合适宜度因子; v_i 为流速; d_i 为水深; T_i 为温度。

3 结果与分析

3.1 淮河流域环境流变化趋势

综合考虑资料系列长度、流域水文站分布特点,选取淮河流域蚌埠水文站 1950—2015 年的逐日径流资料进行 IHA 指标分析。考虑 2002 年为蚌埠闸扩建期,将水文序列分 2002 年前后两个阶段分析,可得图 1 所示的蚌埠站流量事件分布图。由图 1 可知,蚌埠站断面 2002 年以后大洪水事件减少,小洪水事件增多,特枯流量事件减少,而枯水流量事件出现集中度提高。受人为干扰,环境流以枯水流量事件和高脉冲流量事件为主。高脉冲流量持续时间缩短,流量变化幅度逐渐减小,出现次数增多。同时,可以看出低流量事件持续时间缩短,出现次数明显下降,流量可预测性增加,河流生态变化周期缩短,进而影响河道水生生物的生长周期。洪水脉冲流量维持河口盐分平衡和一定的地下水位,该流量事件减少不利于河道物质循环,增加了生物入侵的风险。

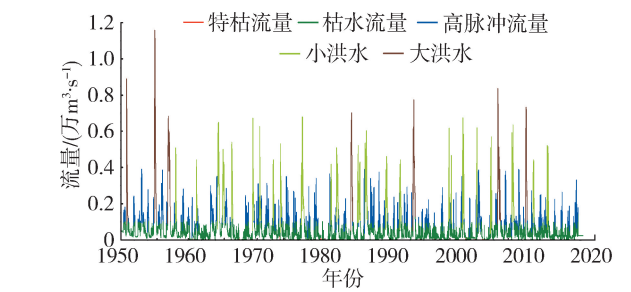


图 1 蚌埠水文站流量事件分布

图 2 为蚌埠站部分环境流要素的变化情况,红色虚线为蚌埠闸扩建期。图 2(a)蚌埠站 4、5、6 月的月平均流量在蚌埠闸扩建后明显减小,月平均流量分布离散性增加,6 月的平均流量减幅最大。4—6 月为河段鱼类主要产卵期,该时期流量减小对下游生物的栖息环境产生显著影响,特别是洄游性鱼类生存受到威胁,会导致产漂流性卵鱼类减少,需加强水文调控,减少生态影响。蚌埠闸扩建后的 1 d、3 d、7 d 和 30 d 年均最小流量多年平均值较扩建前降低(图 2(b)),年均最小流量可维持河道的基本形态,2003 年以后最小流量值呈现增大的趋势。扩建后年均最大流量均呈现减小趋势(图 2(c)),且较扩建前的流量整体下降较明显,但变幅较小,说明人

为干扰条件下,极端流量事件出现次数减少。高脉冲流量上升率、下降率多年内均不断增大(图 2(d)),说明其变化程度逐渐增强,由此引起水位、水深的变化,会改变河道植物类型和影响鱼类栖息条件。

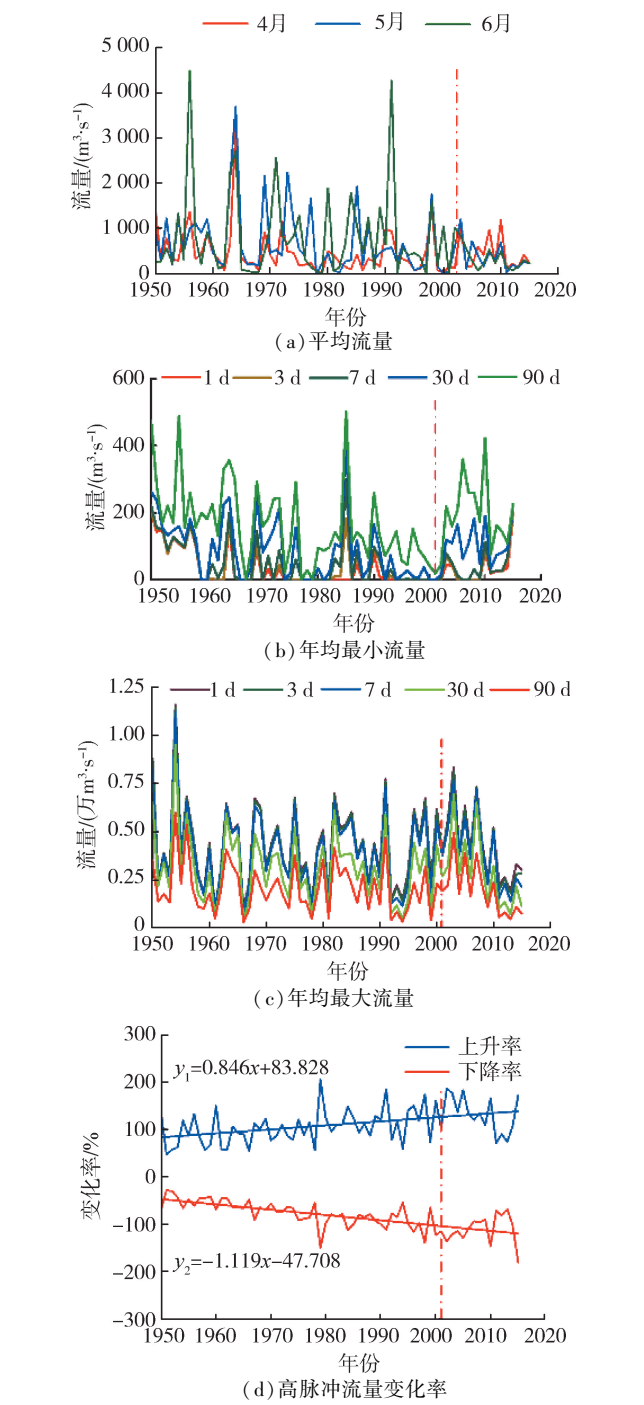


图 2 蚌埠站部分环境流要素变化情况

3.2 基于 PHABSIM 模型的生态流量计算

3.2.1 目标鱼种适宜度曲线

淮河流域鱼类包括浮性卵、漂流性卵、沉性卵、黏性卵等 4 种类型,其中产浮性、漂流性卵鱼类对流速要求较高,需在漂浮状态下孵化,过低流速会使卵沉入水底,孵化率降低,水位有效抬升可增加产卵面

积。大多数鱼类产卵期为4—6月,考虑流域各鱼类的保护程度及代表性,选取鳊鱼为指示鱼类,其生长期3 a,产卵孵化持续50 h。

由于江湖阻隔、过度捕捞和水利工程增多,鱼类生境受到严重破坏。结合流域生态需求,本文选择流速、水深、水温构建栖息地指标。查询水文年鉴和流域DEM图得到河床糙率 $n=0.040$,水力坡度 $J=0.0208\%$ 。综合淮河流域相关研究成果^[7],参考城市河流生态系统流速标准^[8],取鳊鱼喜爱流速为 $0.3\sim0.8\text{ m/s}$,产卵期最小流速为 0.8 m/s 。蚌埠水文站断面需在5—8月通过闸坝调度,保证流速在 $0.6\sim1.2\text{ m/s}$ 才能满足产卵期鱼类水量需求。当最大水深达到河段内较大鱼类体长3~4倍时,可满足其在水体内自由游动要求,成熟鳊鱼的体长一般在 $35\sim50\text{ cm}$,因此最大水深取 2.5 m 、平均水深取 0.9 m 可满足鱼类生存的水深需求。图3为鳊鱼产卵期流速、水深、水温的适宜度曲线,可以看出,鳊鱼最小生态流速为 0.6 m/s ,产卵期最适宜流速为 $0.6\sim1.5\text{ m/s}$,最适宜水深范围为 $0.9\sim2.5\text{ m}$,最适温度为 $21\sim27\text{ }^{\circ}\text{C}$,高于这一条件,适宜度指数迅速下降。在河段底质和覆盖物条件良好的条件下,各限制因子处于最优条件时,其适宜度指数为1。

3.2.2 生态流量确定与IHA法验证

PHABSIM模型假设栖息地加权可利用面积与鱼类生物量正相关,需保证生物量不受水质、其他物种、人类活动等条件的限制。淮河中下游水质条件良好,产卵期鳊鱼对栖息环境具有较强敏感性,其他物种对指示鱼种不构成威胁,研究区内的入湖通道

和河道工程对模拟不产生影响。

应用PHABSIM模型,计算各流量条件下WUA,绘制的WUA-流量曲线如图4所示,图4曲线中的第一个明显转折点 P_1 对应流量为栖息地最小生态流量,河道内最适宜生态需水量根据WUA最大值位置 P_2 而定。淮河中下游鳊鱼产卵期4—6月最小生态流量为 $300\text{ m}^3/\text{s}$,最适宜生态流量为 $550\text{ m}^3/\text{s}$ 。由IHA法,计算蚌埠闸扩建前后的月平均流量,结果如图5所示,基于曼宁公式和河道过水断面条件,计算月平均流量的水文指标偏离度,在中等水文指标改变度阈值条件下,确定4—6月的最适宜生态流量为 $371.9\sim815.4\text{ m}^3/\text{s}$,这说明采用PHABSIM模型计算得到的最适宜生态流量是合适的。蚌埠水文站2002—2015年多年平均流量为 $777.5\text{ m}^3/\text{s}$,最适宜生态流量占断面多年平均流量的 70.7% ,处于Tennant法最佳流量范围($60\%\sim100\%$)^[9],可满足鱼类生存需求。

3.3 淮河流域环境流变化对洪泽湖鱼类栖息地的生态影响

根据《洪泽湖水生生物监测报告》^[10],洪泽湖1982年鱼类有84种,近几年资料显示,洪泽湖共发现鱼类63种,鲤科鱼类占 55% ,可见鱼类种类数量上变化较大,但流水性鱼类减少了17种,同时,江海洄游性鱼类减少4种,湖泊定居性鱼类减少了3种,淮河环境流变化已经对洪泽湖鱼类生存产生显著影响。

a. 高脉冲流量变化的影响。淮河上游年入湖水量占洪泽湖总入湖水量的 87.0% ,其脉冲式水文

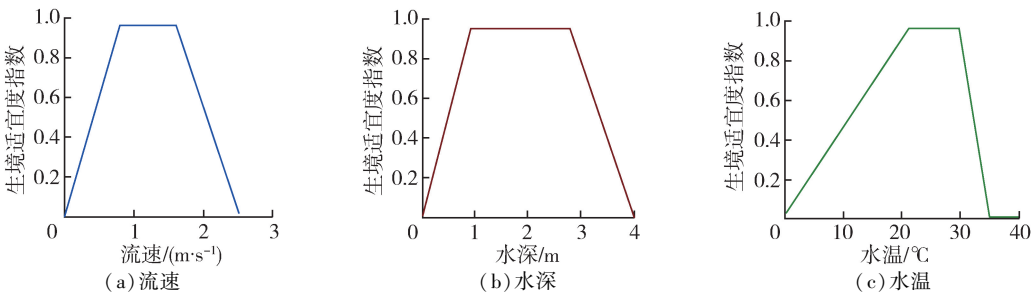


图3 鳊鱼产卵期流速、水深、水温适宜度曲线

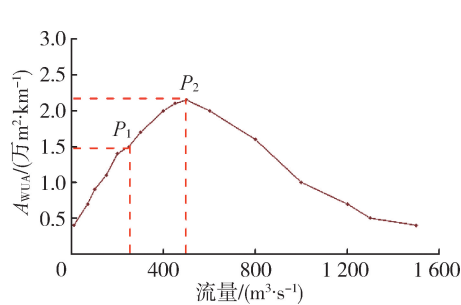


图4 WUA-流量曲线

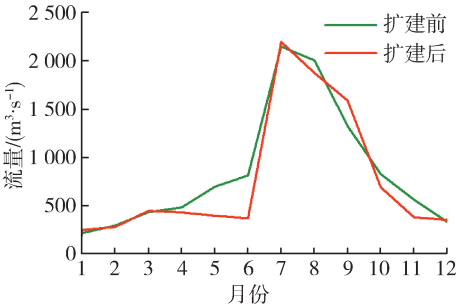


图5 蚌埠闸扩建前后各月平均流量

周期趋于均一化,高流量延时缩短,使鱼类产卵场缩小,育苗区养分供给不足。高脉冲流量事件出现时间不稳定,严重影响鱼类对栖息地的选择。高脉冲流量增加了河道侵蚀和淤积,使一些敏感性物种丧失,扰乱了鱼类的生命周期。

b. 枯水流量变化的影响。枯水流量事件增多,外来生物入侵风险增加,本地物种受到威胁,群落结构改变,河漫滩区获得的水量和有机质减少,导致鱼苗脱水,弱化植物种子传播,植物生存斑块栖息地和二级支流丧失,植被入侵河道。枯水流量事件增多会引起鱼类产卵和迁徙条件改变,水生食物链结构遭到破坏,河岸带植物生长受限,生长速度减缓。低流量持续时间的延长会引起植物形态改变或死亡,下游产漂流性卵鱼类消失,鱼类失去浅滩栖息地。

c. 洪水脉冲变化的影响。洪水脉冲的生态功能^[11]包括:①促进河流-滩区系统的有机物高效利用,提高其动态连通性;②大洪水为下游生物提供大量信息流,刺激鱼类产卵;③提高生物群落多样性结构。自然洪水可塑造河流地貌形态,大洪水事件减少,河流携沙能力减弱,引起水沙条件变化,不利于水生生物生存。洪泽湖内建闸蓄水,使物种多样性降低,目前2/3的湖区内无水生植物分布,天然湿地的减少使湖泊的调蓄作用下降。自1953年以来,洪泽湖内的二河闸、高良涧等水利工程阻断了江湖洄游性鱼类的入湖通道,影响鲤、鲫等黏性卵鱼类繁殖,阻断了淮河干流喜流水性鱼类的资源补充,洪泽湖由天然湖泊变为水库型湖泊,使得一些喜流水性鱼类和洄游性鱼类消失。

4 洪泽湖的应对措施

a. 湖泊的水文调控。良好的生态系统具有稳定和自调节能力,各项功能正常发挥^[12]。洪泽湖需具有足够的调蓄能力,较丰富的生物多样性及稳定的湖泊形态。目前,洪泽湖水文条件和物理状态的改变,导致湖泊功能退化,环境质量下降^[13-15]。因此,应根据生态阈值条件优化水量调控机制,保障下游生态需水,调控高脉冲流量,增加其持续时间,减少出现次数。在每年4—6月,要保证鱼类产卵期湖泊最低生态流量的下泄水量,维持鱼类栖息地的生态需水,促进湖泊生态系统的能量输送和物质循环^[16-18]。在枯水期维持湖泊相对稳定的水位,提高水体自净能力,汛期调控自然洪水,保证河道溶质运移,增加营养盐和有机质输入,恢复湖泊生态系统的活力。

b. 湖泊的生态调控。依据湖内食物链结构,合理投放草食性鱼种,对洄游性鱼类适时补充。调配水草结构,使沉水植物、挺水植物、浮水植物以适宜

比例分布。恢复湿生、挺水植物,与岸堤景观结合,起到调节小气候、调控水生群落的作用^[19-20]。在水生植物破坏区域进行补给式种植,依据湖堤两侧土质、降水条件,形成乔、灌、草立体结构,提高生态系统稳定性。同时,限制围湖养殖、填湖造田及沿岸土地开发,减少人为干扰,加强流域综合管理,提高湖区监测预警能力。

5 结 论

a. 蚌埠闸扩建后淮河中下游河段高流量的年平均极值降低,出现次数明显减少。洪泽湖内水利工程的修建,使枯水流量事件增加,大洪水事件减少,淮河中下游环境流组成趋于单一化,洄游性鱼类产卵受到影响,不利于当地生态环境的改善。

b. 产卵期洪泽湖鳊鱼最小生态流量为300 m³/s,最适宜流量为550 m³/s。蚌埠闸扩建后4—6月平均流量减少,影响鱼类栖息条件,应加强流域管理,保证鱼类产卵期和枯水期下泄流量,增加有机质输入和物质输送,维持流域生态平衡。

参考文献:

[1] 赖昊. 长江中下游环境流量计算方法及应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2017.

[2] 王萍. 山东沂河李庄闸下泄生态环境流量的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.

[3] 陈昌春,王腊春,姚鑫,等. 赣江流域大(I)型水库工程影响下的枯水变异研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(9):1-6. (CHEN Changchun, WANG Lachun, YAO Xin, et al. Study on the variation of low water under the influence of the large (I) reservoir project in the Minjiang River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(9):1-6. (in Chinese))

[4] 闵倩,蒋亚萍,陈余道. 定量分析青狮潭水库对漓江生态环境的影响[J]. 水文, 2012, 32(6):47-51. (MIN Qian, JIANG Yaping, CHEN Yudao. Quantitative analysis of the impact of Qingshitian Reservoir on the ecological environment of Minjiang River [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(6):47-51. (in Chinese))

[5] 蒋红霞,黄晓荣,李文华. 基于物理栖息地模拟的减水河段鱼类生态需水量研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5):141-147. (JIANG Hongxia, HUANG Xiaorong, LI Wenhua. Study on fish ecological water demand in the water-reducing section based on physical habitat simulation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5):141-147. (in Chinese))

[6] 李建,夏自强. 基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究[J]. 水利学报, 2011, 39(6):678-684. (LI Jian, XIA Ziqiang. Research on ecological flow in the middle reaches of the Yangtze River based on physical habitat simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 39

(6):678-684. (in Chinese))

[7] 蒋艳.淮河流域闸坝运行对河流生态与环境的影响研究 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.

[8] 王超,王沛芳.城市水生态系统建设与管理[M]. 北京:科学出版社,2004.

[9] 洪思扬,王红瑞,朱中凡,等.基于栖息地指标法的生态流量研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):168-175. (HONG Siyang, WANG Hongrui, ZHU Zhongfan, et al. Ecological flow research based on habitat index method [J]. Resources and Environment in Yangtze Basin, 2018, 27(1):168-175. (in Chinese))

[10] 江苏省水利厅.洪泽湖水生生物监测报告[R]. 南京:江苏省水利厅,2014.

[11] 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 effects of flood pulse [J]. Journal of Water Resources, 2009, 40(3):281-288. (in Chinese))

[12] 张媛,许有鹏,于志慧,等.太湖西苕溪流域环境流量评价分析[J].水利学报,2014,45(10):1193-1198. (ZHANG Yuan, XU Youpeng, YU Zhihui, et al. Evaluation and analysis of environmental flow in Xitiaoxi Valley of Taihu Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(10):1193-1198. (in Chinese))

[13] 叶春,李春华,王博,等.洪泽湖健康水生态系统构建方案探讨[J].湖泊科学,2011,23(5):725-730. (YE Chun, LI Chunhua, WANG Bo, et al. Discussion on the construction scheme of healthy water ecosystem in Hongze Lake[J]. Journal of Lake Science, 2011, 23(5):725-730. (in Chinese))

[14] 王苓如,薛联青,王思琪,等.气候变化条件下洪泽湖以上流域水资源演变趋势[J].水资源保护,2015,31(3):57-62. (WANG Lingru, XUE Lianqing, WANG Siqi, et al. Evolution of water resources in the basin above Hongze Lake under climate change conditions[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3):57-62. (in Chinese))

[15] 陈凯麒,陶洁.河流生物栖息地的生态水文学研究[J].水资源保护,2015,31(6):52-56. (CHEN Kaiqi, TAO Jie. Study on ecological hydrology of river biological habitat[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6):52-56. (in Chinese))

[16] 薛联青,张卉,张洛晨,等.塔里木灌区引水前后环境流特性变化[J].水资源保护,2017,33(3):31-37. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luochen, et al. Change of environmental flow characteristics before and after diversion in Tarim irrigation district[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3):31-37. (in Chinese))

[17] XUE L, YANG F, YANG C, et al. Identification of potential impacts of climate change and anthropogenic activities on streamflow alterations in the Tarim River Basin, China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):1-12.

[18] ZHANG Q, ZHANG Z, SHI P, et al. Evaluation of ecological instream flow considering hydrological alterations in the Yellow River Basin, China[J]. Global & Planetary Change, 2018, 160:61-74.

[19] 薛联青,张卉,张洛晨,等.基于改进RVA法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):189-196. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luochen, et al. Impact assessment of ecological and hydrological conditions of Tarim River based on improved RVA method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(3):189-196. (in Chinese))

[20] 齐亮,杨宇,王悦,等.鱼类对水动力环境变化的行为响应特征[J].河海大学学报(自然科学版),2012,40(4):438-445. (QI Liang, YANG Yu, WANG Yue, et al. Behavioral response characteristics of fish to hydrodynamic environment changes [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(4):438-445. (in Chinese))

(收稿日期:2018-07-21 编辑:熊水斌)

+++++
(上接第 79 页)

[11] 张卫.海绵绿地透水铺装技术试验[J].中国园艺文摘,2018(1):37-39. (ZHANG Wei. Experimental study on permeable pavement of sponge green land [J]. Chinese Horticultural Digest, 2018(1):37-39. (in Chinese))

[12] TOTA-MAHARAJ K, SCHOLZ M. Efficiency of permeable pavement systems for the removal of urban runoff pollutants under varying environmental conditions[J]. Environmental Progress Sustainable Energy, 2010, 29(3):358-369.

[13] CHANDRAPPA A K, BILIGIRI K P. Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: a state-of-the-art review [J]. Construction and Building Materials, 2016, 111:262-274.

[14] DRAKE J, BRADFORD A, VAN SETERS T. Winter effluent quality from partial-infiltration permeable pavement systems [J]. Journal of Environmental Engineering, 2014, 140(11):1-13.

[15] DRAKE J, BRADFORD A, VAN SETERS T. Hydrologic performance of three partial-infiltration permeable pavements in cold climate over low permeability soil [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(9):1-9.

[16] COLLINS K A, HUNT W F, HATHAWAY J M. Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern north Carolina [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(12):1146-1157.

[17] 王俊岭,张智贤,秦全城,等.改良型透水铺装对弱透水土质地区的水质控制试验[J].水资源保护,2019,35(3):63-68. (WANG Junling, ZHANG Zhixian, QIN Quancheng, et al. Water quality control test of improved permeable pavement under weak permeable soil conditions [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3):63-68. (in Chinese))

[18] 张玉玉.高效渗透减排透水铺装对径流的控制研究[D].北京:北京建筑大学,2015.

(收稿日期:2018-09-14 编辑:熊水斌)