

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.002

基于鱼类需求的息县枢纽工程 闸下河段环境流量研究

侯俊^{1,2}, 裴佳琦^{1,2}, 黄喻威^{1,2}, 梁小雨^{1,2}, 龚雪滢^{1,2}, 丁伟^{1,2}, 吴森^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏南京 210098;

2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098)

摘要:针对水利工程建成运行后对下游河段流量过程变化造成的鱼类原有栖息地面积减小和质量降低的潜在生态问题,对拟建息县枢纽工程闸下4.9 km河段内采用栖息地模拟法进行环境流量研究。采用MIKE数值模拟与HSI栖息地模型结合的方法,通过分析自然状态下研究河段的水流特性及鱼类栖息地现状,讨论了在不同生命期不同流量对鱼类栖息地的影响,确定了适宜环境流量范围,为水利工程建设后水生生物栖息地保护提供理论和方法指导。

关键词:环境流量;淮河上游;长春鳊;栖息地;加权可利用面积

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)02-0008-05

Study on environmental flow of lower reach of Xi County hub project based on fish demand// HOU Jun^{1,2}, PEI Jiaqi^{1,2}, HUANG Yuwei^{1,2}, LIANG Xiaoyu^{1,2}, GONG Xueying^{1,2}, DING Wei^{1,2}, WU Miao^{1,2} (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of the potential ecological problems of the reduction in the area and quality of fish habitats due to changes in the flow processes in the lower reaches of the hydraulic engineering after its completion and operation, the habitat simulation method was used to study the environmental flow in the 4.9 km section of the proposed Xi County hub project. By using the method of combining MIKE numerical simulation with HSI habitat model, this paper discussed the effects of different flow rates on fish habitat in different life stages and determine the appropriate flow range by analysis of the water flow characteristics and the status of fish habitats in the study river section under natural conditions, providing theoretical and methodological guidance for the protection of aquatic habitats after hydraulic engineering construction.

Key words: environmental flow; upper Huaihe River; *Parabramis pekinensis*; habitat; weighted usable area

大坝工程在防洪、发电、供水、航运等方面发挥着巨大效益的同时,也在改变着河流的水文情势及水流形态,产生严重的环境生态效应^[1]。河流的连通性会直接影响鱼类的洄游,对鱼类的种质交流造成阻隔^[2]。同时,闸坝的拦截会减少下游水流中的含沙量,导致下游河道冲刷作用增强,减小鱼类的栖息地面积,进而会使得鱼类生物量减少,影响河流生态系统的完整性和多样性。坝下径流的显著减少甚至出现河道脱水现象,会破坏河流生态系统基本功能的维持,流量不足或过多至物种的耐受极限时,都会导致该物种不能正常生存甚至灭绝^[3]。环境流

量指为维持河流的健康及功能所需的流量及其水文过程,全年范围内其数值是动态变化的^[4]。环境流量的计算对于流域水资源的合理开发、配置以及维持河流生态系统的健康具有重要意义,其计算结果可为制定河流生态调度方案提供理论依据^[5]。

全球约有200多种环境流量计算方法,可归为4类:水文学法、水力学法、栖息地模拟法和整体法,每类方法都各有优缺点及适用范围^[6],其中栖息地模拟法是基于河道内水生生物流量需求进行计算,所以结果较为可靠^[7-8]。Wang等^[9]对栖息地模型进行改进,考虑了栖息地的质量和数量,以栖息地

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0401709);国家自然科学基金创新研究群体项目(51421006);国家自然科学基金(51479065);国家自然科学基金优秀青年项目(51722902)

作者简介:侯俊(1979—),男,研究员,博士,博士生导师,主要从事水环境保护与生态修复研究。E-mail: hhuhyhj@126.com

斑块的连通性和破碎性指数作为评价鱼类栖息地质量的指标,并应用于评估水利工程对鱼类栖息地的影响。Zhang 等^[10]选择中华绒螯蟹作为目标物种来研究长江口的环境流量,采用基于物种空间分布的环境流量评估方法,同时考虑到中华绒螯蟹在潜在栖息地斑块中的分散情况以及淡水流量的变化。

本研究采用栖息地模拟法计算长春鳊 (*Parabramis pekinensis*) 不同生命期的环境流量,利用 MIKE 建立淮河上游息县枢纽工程闸下河段的二维水动力学模型,根据长春鳊对水动力学因子的适宜度标准确定不同流量下的栖息地加权可利用面积 (WUA),得到其不同生命阶段 WUA 随流量的变化情况。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

淮河流域位于 111°55'E ~ 121°25'E, 30°55'N ~ 36°36'N 之间,流域面积为 $2.7 \times 10^5 \text{ km}^2$,干流全长 1000 km。淮河上游指洪河口以上河段,总长约 360 km,河流落差 178 m^[11]。淮河干流的降水年际变化大、年内分布不均,年内降水量 60% 以上主要集中在汛期 6—9 月份。淮河过境水量丰富,但丰枯期变化大,汛期来水多以洪水形式出现,非汛期来水量较少、水位较低,且淮河干流上游区域内水利基础设施薄弱,现有水利工程调蓄能力差,取水困难,区域内工程性缺水和水资源供需矛盾极为突出。

拟建息县枢纽工程主要功能是城市供水及农田灌溉,枢纽闸上正常蓄水位 39.20 m,蓄水量 1.2 亿 m^3 ,设计灌溉面积 2.38 万 hm^2 。多年平均向受水区供水量 16 545 万 m^3 ,其中向城市供水 10 308 万 m^3 ,向灌区供水 6 237 万 m^3 。枢纽工程位于息县水文站下游 6.7 km 处,采用全深孔闸方案,闸底板顶高程 29.0 m,共布置 26 孔,每孔净宽 15 m,总净宽 390 m。本研究选取拟建闸址下游 4.9 km 的河段来研究河道内水生生物对河流流量的需求。研究河段面积约 2.3 km^2 ,多年平均流量为 128.68 m^3/s 。息县站断面地形多年来基本保持稳定,研究河段平均糙率的经验值为 0.025 ~ 0.040,坡降为 0.49‰。

大型水库虽然可以直接控制下游的泄流过程,但是目前大部分的水库并没有充分考虑到河道生态流量需求,导致水库的泄流量过程与天然流量过程差异较大,给下游生态系统造成不利影响^[12]。拟建息县枢纽工程的主要功能是城市供水及农田灌溉,如果取水不合理,势必会造成下游流量减少和流量

过程发生变化,导致栖息地萎缩及栖息地质量下降,严重影响水生生物的生存和繁殖。本文选用栖息地模拟法计算天然状态下淮河干流上游息县段河道内长春鳊适宜的环境流量,为闸坝建成蓄水后维持闸坝下游河道内水生生物的栖息地面积和质量而下泄的流量提供参考。

1.2 生态保护目标

作为河流生态系统中的顶级部落,鱼类对生态环境的变化最为敏感,是河流系统健康的最佳指示物种。王丽等^[13]通过考虑鱼类对摄食和产卵栖息地等方面的需求来对淮河干流鱼类进行比较分析,采用层次分析法构建判断矩阵,计算出淮河干流各种鱼类的排序权值,长春鳊的排序权值为 4.09,为所有研究鱼类中最高,在研究淮河干流中水生生物的栖息地需求时长春鳊具有较好的代表性。

长春鳊为草食性鱼类,其摄食强度随季节有很大变化。冬季一般很少摄食,春季从 3 月份开始增大食量,夏季强度最大。一般生活于水体中下层,产漂浮性卵,要求有一定的流水刺激,在静水中不能产卵,且长春鳊体型呈侧扁形,游泳能力较差,对流速和流量有较高要求。经生态调查发现,研究河段内长春鳊数量丰富,分布广泛,全年范围内均有长春鳊生活,所以选择长春鳊来判断研究河段中水生生物对流量的需求是合理的。

长春鳊的产卵繁殖行为受到很多因素的综合影响,其中最重要的水力要素是水深和流速。长春鳊不同时期对水深和流速的适宜度曲线见图 1~2。

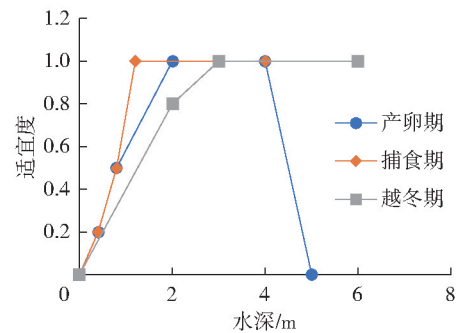


图 1 不同时期水深-适宜度曲线

Fig. 1 Water depth-suitability curves for different periods

1.3 研究方法

栖息地模拟法^[14-17]主要由两部分组成:一是水动力模型,用来模拟不同流量下河道内的水深和流速分布;二是栖息地模型,结合某一特定生命阶段时目标物种对水深、流速的偏好程度,将水力学因素转化为栖息地适宜度评价指标。

1.3.1 二维水动力模型

模拟区域选择拟建息县枢纽工程下游 4.9 km

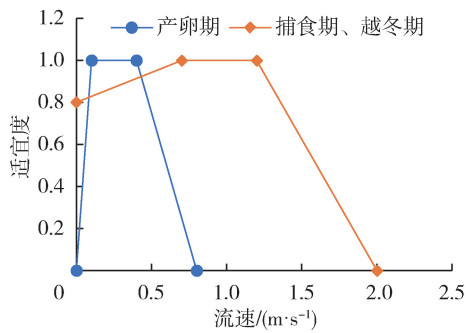


图2 不同时期流速-适宜度曲线

Fig. 2 Velocity-suitability curves for different periods

范围内的河段。研究河段位于东经 $114^{\circ}47' \sim 114^{\circ}50'$, 北纬 $32^{\circ}17' \sim 32^{\circ}18'$ 范围内, 面积约为 2.3 km^2 , 多年平均流量为 $128.68 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[18]。河段平均河宽约 300 m , 平均水深约 3 m 。由于河段在垂直方向上的尺度远小于水平尺度, 所以适宜用二维浅水方程来描述区间水流的运动。本文选用 MIKE21 Flow Model 对淮河南流息县段的河流水动力场进行数值模拟, 以期得到不同流量下河道内的流场分布。

模型选择采用非结构化的三角形网格, 计算区域内三角形网格节点共有 413 个, 三角形单元有 602 个, 时间步长为 60 s 。三角形网格可以较为准确地体现出研究河段的实际地形特征。上下游断面均采用流量边界条件, 其他为陆地边界, 上游断面流量采用息县水文站的实测流量数据, 下游断面流量采用淮滨控制断面的实测流量数据及控制面积的比例来推算。网格的二维动边界的处理采用“干湿判别法”, 模型计算中淹没水深为 0.05 m , 干水深为 0.005 m , 湿水深为 0.1 m 。

研究河段的河床底质较为均一, 所以整个研究范围的流场可选用相同的糙率。通过选取不同的河床糙率 n , 对比已知点的实测值和模拟结果, 对模型进行率定, 最终选定糙率 $n = 0.04$ 。模型模拟出的河道内水深和流速的变化趋势与实测值变化情况吻合, 水深和流速的平均偏差分别为 6.8% 和 9.5% , 在正常误差范围内, 用于研究河段模型参数的设置是合理的, 模拟结果较为可靠。通过设定不同的流量边界, 模拟得到不同流量下河道内的水深和流速的分布情况, 进行栖息地适宜性分析。

1.3.2 栖息地模型

栖息地适宜度指数模型主要以目标物种对栖息地的选择、栖息地限制因子等生态学理论为基础, 根据选定的保护物种对不同栖息地因子的需求之间的函数关系构建模型。由于研究区域的水流较为简单, 河床底质为砂质, 适宜鱼类生存, 故可将底质的适宜度指数全部取为 1 , 且水质较好, 所以只考虑流

速和水深对栖息地质量的影响。假设水深和流速对长春鳊的影响力相同, 采用乘积法来计算组合适宜度指数:

$$I_{\text{HSI}} = f(v)f(D) \quad (1)$$

式中: I_{HSI} 为栖息地适宜度指数; $f(v)$ 为流速的适宜度指数; $f(D)$ 为水深的适宜度指数。

在某一流量下, 结合水动力学模型得到的水深和流速分布和目标物种对水动力因子(水深和流速)的适宜度指数, 采用乘积法确定不同网格单元的组合栖息地适宜度指数, 将不同网格单元的 I_{HSI} 与单元面积相乘并累加, 即得到特定流量下所对应的栖息地 WUA。综合不同流量对应的 WUA, 得到 WUA-流量曲线, 即可分析目标物种在不同生长期对河流流量的需求。

2 结果与分析

通过模型计算得到研究河段内长春鳊在不同生长期内栖息地 WUA 与流量之间的变化关系, 从而得到适宜的环境流量过程。从不同时期的模拟结果得到 WUA-流量曲线, 见图 3。

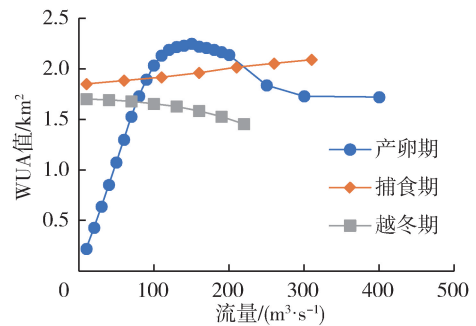


图3 不同时期 WUA-流量曲线

Fig. 3 WUA-flow curves for different periods

2.1 产卵期

4—7 月为长春鳊产卵期, 其中比较集中的产卵期是 5—7 月。对 1990—2012 年 4—7 月的平均月流量进行统计分析, 得到流量范围为 $18 \sim 378 \text{ m}^3/\text{s}$, 故模拟 $10 \sim 400 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量范围内对应的栖息地 WUA, 得到产卵期 WUA-流量曲线(图 3)。

随着流量的增大, WUA 整体上先显著增加后达到最大值, 接着略有减小后趋于平缓。淮河南流息县段流量由 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 增大至 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 的过程中, 长春鳊产卵栖息地 WUA 随着流量的增大而不断增加; 当流量超过 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 之后, WUA 随着流量的增大而呈现出逐渐减小的趋势。流量在 $100 \sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 范围内时, WUA 值达到最大, 该流量范围为最适宜长春鳊产卵的流量区间。造成这一趋势的原因可能是, 长春鳊在产卵期对流速的要求较高, 仅 $0.1 \sim$

0.4 m/s 范围内最适宜长春鳊产卵。当流量增大时,流速也不断增大,WUA 也增加。但流速过大不利于长春鳊产卵,当流速超过最适宜流速时,流速适宜性降低,导致 WUA 增加缓慢,甚至减少。

2.2 捕食期

每年的8—11月,长春鳊的捕食量增大。为了研究捕食期的栖息地现状,对10~300 m³/s 流量范围进行模拟,得到7种流量工况下对应的栖息地 WUA(图3)。

由于捕食期对水深的要求不高,研究河段水深绝大部分时间均超过1.2 m,能够满足捕食期长春鳊所需的最佳水深范围,所以即使流量很小时也有一定的 WUA。随着流量增大,流速也随之增大,部分区域可以达到长春鳊捕食期最适宜的流速范围(0.7~1.2 m/s),所以随着流量增大,栖息地 WUA 也随之增大,更加满足长春鳊捕食期对水深和流速的需求。但是 WUA 随流量增大而增加的趋势较为平缓。

在捕食期,为保证长春鳊可以捕食到所需的物质和能量资源,河流流速须小于长春鳊的临界游泳流速1.2 m/s。在河流流速小于1.2 m/s时,流速越高,适宜度指数越高;当流速超过1.2 m/s时,会影响长春鳊正常摄食,且流速适宜度随着流速的增大而降低。在研究河段,在模拟的流量范围下,流速均未达到1.2 m/s,所以水深和流速的组合适宜度指数随着流量的增加而增大,WUA 随流量增大呈现出缓慢增长的趋势。

2.3 越冬期

对长春鳊越冬期12月至次年3月河段的模拟流量范围定为10~200 m³/s,对8种不同流量工况下的栖息地现状进行整合,得到越冬期长春鳊 WUA 与流量的对应关系(图3)。

长春鳊越冬期对流速的需求与捕食期相同。由于越冬期长春鳊对流速的要求不高,在0~1.2 m/s 流速范围内,流速适宜性都高于0.8,所以水深是长春鳊越冬期栖息地需求的最主要影响因素。但由于12月至次年3月大部分时间属于枯水期,淮河干流水位较低,而长春鳊在越冬期的最佳水深应大于3 m,所以在整个研究时期,长春鳊适宜栖息地 WUA 仅在1.4~1.7 km²范围内,且随流量增大而略有降

低,整体变化不大。造成这一结果的原因是,长春鳊生活在水体下层,越冬期在深水区河底栖息,水深是影响其栖息地适宜性的主要因素。在越冬期,研究河段内的水位波动幅度不大,而流速对长春鳊越冬期的栖息地影响较小,所以综合来看,随着流量增加,长春鳊越冬期栖息地 WUA 略有减小,但整体变化不明显。

2.4 环境流量的讨论

河道中适宜环境流量的估算是为了保障河流中水生生物的栖息地 WUA。当栖息地 WUA 达到最大时,表示对应的流量最适宜鱼类生存,即该流量为适宜环境流量,可作为水资源规划依据。

为评价栖息地模拟法的计算结果,本文的计算结果与 Tennant 法的结果(表1)进行对比分析。

由表1可见,栖息地模拟法的计算结果明显高于 Tennant 法推荐的环境流量。这是因为 Tennant 法是根据历史流量资料给出河道内基本流量,没有考虑具体物种对流量的需求,因而不能反映鱼类栖息地状况。通常来说,栖息地模拟法得出的环境流量值要比水文学方法得到的结果大,适用于受人类活动影响较小的河流。

产卵期是鱼类最重要的生命阶段,对生境的要求较高。对应 Tennant 法给出的最小环境流量(12.9 m³/s),研究河段的适宜栖息地面积仅有13%左右,很难满足长春鳊产卵需求。根据栖息地模拟法结果,流量在100~200 m³/s之间时,适宜栖息地面积可达85%以上。在长春鳊捕食期和越冬期,河道流量基本都可满足长春鳊需求,适宜栖息地面积分别在80%和65%以上。

目前大部分学者聚焦于最小环境流量的研究,但是,即使满足了最小环境流量,也会导致生物多样性减少和生态完整性降低,生态系统质量下降。适宜环境流量考虑到生物的需求,是根据目标物种最适宜的水文条件模拟得到的,所以更能保证河流生态系统的健康。在水生生物较为丰富和生态资料较为齐全的河段,计算适宜环境流量采用栖息地模拟法比其他方法更有意义。

3 结 论

a. 在长春鳊产卵期,研究河段流量由10 m³/s

表1 Tennant 法的环境流量计算结果

Table 1 Calculation results of environmental flow based on Tennant method

m³/s

时间段	环境流量		栖息地生境状态对应的环境流量					
	最大	最佳范围	极好	非常好	好	中	差或最差	极差
10月至次年3月	257.4	77.2~128.7	51.5	38.6	25.7	12.9	12.9	0~12.9
4—9月	257.4	77.2~128.7	77.2	64.3	51.5	38.6	12.9	0~12.9

增大至 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 的过程中,长春鳊产卵栖息地 WUA 随着流量的增大而不断增加;当流量超过 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 之后,WUA 随着流量的增大而呈逐渐减小的趋势;流量在 $100 \sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 范围内时,WUA 达到最大值,该流量范围为长春鳊最适宜产卵的流量区间,其中, $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 是最适宜环境流量。

b. 在长春鳊捕食期,WUA 随着流量的增大呈现出缓慢增长的趋势。

c. 在长春鳊越冬期,随着流量增加,长春鳊的栖息地 WUA 略有减小,但整体变化不明显。

d. 4—7 月,环境流量适宜范围是 $100 \sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$,8 月至次年 3 月,不同环境流量均可满足长春鳊捕食和越冬的需求。

参考文献:

[1] 王沛芳,王超,侯俊,等. 梯级水电开发中生态保护分析与生态水头理念及确定原则[J]. 水利水电科技进展, 2016,36(5):1-7. (WANG Peifang, WANG Chao, HOU Jun, et al. Ecological protection analysis of cascade hydropower development and concept and principle for definition of ecological water head [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(5):1-7. (in Chinese))

[2] 吕军,汪雪格,刘伟,等. 松花江流域主要干支流纵向连通性与鱼类生境[J]. 水资源保护, 2017,33(6):155-160. (LYU Jun, WANG Xuege, LIU Wei, et al. Longitudinal connectivity and fish habitat of main tributaries in Songhuajiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2017,33(6):155-160. (in Chinese))

[3] 徐伟,董增川,罗晓丽,等. 基于改进 7Q10 法的滦河生态流量分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(5):454-457. (XU Wei, DONG Zengchuan, LUO Xiaoli, et al. Analysis of ecological flow in Luanhe River based on improved 7Q10 method [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016,44(5):454-457. (in Chinese))

[4] 刘政,姚远,陈明千. 水电开发流域环境流量适应性管理问题与进展[J]. 人民黄河, 2014(9):83-85. (LIU Zheng, YAO Yuan, CHEN Mingqian. Problems and progress on adaptive management of environmental flow in hydropower development watershed [J]. Yellow River, 2014(9):83-85. (in Chinese))

[5] 唐敏,于鲁冀,梁亦欣,等. 北方季节性河流保障环境流量研究[J]. 环境污染与防治, 2017,39(4):456-460. (TANG Min, YU Luji, LIANG Yixin, et al. Study on the guaranteed environmental flow of northern seasonal rivers [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2017, 39(4):456-460. (in Chinese))

[6] 尚松浩. 确定河流生态流量的几种湿周法比较[J]. 水

利水电科技进展, 2011, 31(4):41-44. (SHANG Songhao. Comparison of several wet-cycle methods for determining river ecological flow[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011,31(4):41-44. (in Chinese))

[7] 张远,王丁明,王西琴,等. 基于鱼类保护目标的太子河环境流量研究[J]. 环境科学学报, 2012,32(12):3143-3151. (ZHANG Yuan, WANG Dingming, WANG Xiqin, et al. Study on the environmental flow of Taizi River based on fish conservation objectives [J]. Journal of Environmental Science, 2012,32(12):3143-3153. (in Chinese))

[8] 程俊翔,徐力刚,姜加虎. 水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述[J]. 水资源保护, 2018,34(6):24-32. (CHENG Junxiang, XU Ligang, JIANG Jiahu. Review of application of hydrologic alteration index system in eco-hydrology research [J]. Water Resources Protection, 2018,34(6):24-32. (in Chinese))

[9] WANG P, SHEN Y, WANG C, et al. An improved habitat model to evaluate the impact of water conservancy projects on Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) spawning sites in the Yangtze River, China [J]. Ecological Engineering, 2017,104:165-176.

[10] ZHANG H, SUN T, XUE S. Environmental flow assessment in estuaries taking into consideration species dispersal in fragmented potential habitats [J]. Ecological Indicators, 2017(78):541-548.

[11] 冯怡,薛联青,张敏,等. 基于两种 SPEI 序列的淮河流域干湿特征变化[J]. 水资源保护, 2019,35(1):35-40. (FENG Yi, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Change of dry-wet characteristics in Huaihe River Basin based on two SPEI sequences [J]. Water Resources Protection, 2019,35(1):35-40. (in Chinese))

[12] 涂晶晶,陈森林,艾学山,等. 河流生态流量特征图及生态流量评价方法[J]. 水资源保护, 2015,31(1):99-105. (TU Jingjing, CHEN Senlin, AI Xueshan, et al. Diagram of river ecological flow characteristics and evaluation method of ecological flow [J]. Water Resources Protection, 2015,31(1):99-105. (in Chinese))

[13] 王丽,陈求稳,陈凯,等. 淮河干流基于生态流量的目标鱼类选择研究[J]. 环境科学学报, 2017(6):2379-2386. (WANG Li, CHEN Qiwen, CHEN Kai, et al. Study on target fish selection of Huai River main stream based on ecological flow [J]. Journal of Environmental Science, 2017(6):2379-2386. (in Chinese))

[14] 张文鸽,黄强,蒋晓辉. 基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究[J]. 水科学进展, 2008(2):192-197. (ZHANG Wenge, HUANG Qiang, JIANG Xiaohui. Study on ecological flow in river channel based on physical habitat simulation [J]. Advances in Water Science, 2008(2):192-197. (in Chinese))

(下转第 20 页)

- urbanization and industrialization in south areas of China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2016, 34 (2): 11-15. (in Chinese))
- [17] 邵薇薇, 刘海振, 周祖昊, 等. 东北地区城镇化、工业化进程中农业用水影响因素分析与对策[J]. 水利经济, 2015, 33(1): 1-3. (SHAO Weiwei, LIU Haizhen, ZHOU Zuhao, et al. Influencing factors and countermeasure for agricultural water during urbanization and industrialization in Northeast China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2015, 33(1): 1-3. (in Chinese))
- [18] 张士锋, 孟秀敬. 粮食增产背景下松花江区水资源承载力分析[J]. 地理科学, 2012, 32(3): 342-347. (ZHANG Shifeng, MENG Xiujing. Water resources carrying capacity of the Songhua River under the background of grain production increases [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(3): 342-347. (in Chinese))
- [19] 熊黑钢, 常春华, 冒静. 基于模糊综合评判的新疆奇台县农业水资源承载力分析[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 38-42. (XIONG Heigang, CHANG Chunhua, MAO Jing. Analysis on carrying capacity of agricultural water resources based on fuzzy comprehensive evaluation in Qitai of Xinjiang [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(4): 38-42. (in Chinese))
- [20] 封志明, 郑海霞, 刘宝勤. 基于遗传投影寻踪模型的农业水资源利用效率综合评价[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 66-70. (FENG Zhiming, ZHENG Haixia, LIU Baoqin. Comprehensive evaluation of agricultural water use efficiency based on genetic projection pursuit model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(3): 66-70. (in Chinese))
- [21] 吴丹. 中国经济发展与水资源利用的演变态势、“脱钩”评价与机理分析: 以中美对比分析为例[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2016, 18(1): 47-53 (WU Dan. An analysis of evolution trend and decoupling evaluation mechanism of economic development and water resource utilization in China based on comparative analysis of China and America [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2016, 18(1): 47-53. (in Chinese))
- [22] 左其亭, 郝林钢, 刘建华, 等. “一带一路”分区水资源特征及水安全保障体系框架[J]. 水资源保护, 2018, 34(4): 16-21. (ZUO Qiting, HAO Lingang, LIU Jianhua, et al. Characteristics of water resources in “Belt and Road” district and its framework of water security system [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 16-21. (in Chinese))
- [23] 钟太洋, 黄贤金, 韩立, 等. 资源环境领域脱钩分析研究进展[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1400-1412. (ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, HAN Li, et al. Review on the research of decoupling analysis in the field of environments and resource [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(8): 1400-1412. (in Chinese))
- [24] 吴丹. 中国经济发展与水资源利用脱钩态势评价与展望[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 46-54. (WU Dan. Evaluation and prospect on the decoupling trend of economic development and water resource utilization in China [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(1): 46-54. (in Chinese))
- [25] 贾莉, 刘彦花, 沈怡静. 水资源利用与经济发展脱钩分析: 以广西北部湾经济区为例[J]. 人民长江, 2018, 49(2): 40-45. (JIA Li, LIU Yanhua, SHEN Yijing. Decoupling analysis between economic development and water resources utilization; case of Beibu Gulf economic zone of Guangxi [J]. Yangtze River, 2018, 49(2): 40-45. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-05-02 编辑: 彭桃英)

(上接第 12 页)

- [15] 李凤清, 蔡庆华, 傅小城, 等. 溪流大型底栖动物栖息地适合度模型的构建与河道内环境流量研究: 以三峡库区香溪河为例[J]. 自然科学进展, 2008(12): 1417-1424. (LI Fengqing, CAI Qinghua, FU Xiaocheng, et al. Establishment of habitat suitability model for large benthic animals in streams and study on the environmental flow in rivers [J]. Progress in Natural Science, 2008(12): 1417-1424. (in Chinese))
- [16] 刘中, 彭瑞文, 林霞, 等. 栖息地法确定樟溪河生态流量研究[J]. 环境影响评价, 2015, 37(5): 49-51. (LIU Zhong, PENG Ruiwen, LIN Xia, et al. Habitat method to determine the ecological flow of Zhangxi river [J]. Environmental Impact Assessment, 2015, 37(5): 49-51. (in Chinese))
- [17] 刘国民, 姜翠玲, 王维琳, 等. 基于栖息地模型的新安江坝下生态流量研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 61-65. (LIU Guomin, JIANG Cuiling, WANG Weilin, et al. Study on ecological flow under Xin'an river dam based on habitat model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(4): 61-65. (in Chinese))
- [18] 魏卿, 薛联青, 张敏, 等. 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[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 89-94 (WEI Qing, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Changes of environmental flow in Huaihe River Basin and its ecological impact on fish habitat in Hongze Lake [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 89-94. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-06-28 编辑: 彭桃英)