

文章编号:0559-9350(2020)08-0936-11

## 长江中游典型河段底栖动物的物理栖息地模型构建与应用

班璇<sup>1</sup>, 郭舟<sup>2</sup>, 熊兴基<sup>2</sup>, 刘学勤<sup>3</sup>, 马雅雪<sup>3,4</sup>, 王洪铸<sup>3</sup>

(1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 环境与灾害监测评估湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430077;

2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

3. 中国科学院水生生物研究所 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 考虑水生生物生境需求的物理栖息地模型被认为是评估河流流量变化对水生态系统影响的最可信的方法之一。本研究选取长江干流含有河漫滩的监利江段为实例, 建立底栖动物各类群的物理栖息地模型, 计算变化流量下栖息地适宜面积的时间序列, 并据此进行生态流量决策。结果显示长江中游底栖动物最敏感的环境参数是流速, 适宜范围为0~0.2 m/s; 其次是水深, 适宜范围为0~6 m。在考虑敏感环境参数的前提下, 得出监利江段底栖动物的最佳生态流量为20 000 m<sup>3</sup>/s。三峡大坝蓄水后枯水期和平水期底栖动物适宜面积的低值部分减小, 丰水期适宜面积增加。为了保护底栖动物栖息地, 建议三峡大坝在防洪蓄水的同时能兼顾底栖动物的生态流量需求, 调节枯水期和平水期的流量, 让监利江段接近4000 m<sup>3</sup>/s, 丰水期接近20 000 m<sup>3</sup>/s。在枯水年增大枯水期和平水期的流量, 平水年增大枯水期的流量, 丰水年减少丰水期的流量。本研究方法可以供长江其他河段目标物种的生态流量决策和生态修复方案设计参考。

**关键词:** 底栖动物; 物理栖息地模型; 栖息地适宜度指数; 栖息地适宜面积; 生态流量决策

**中图分类号:** X171.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20200026

## 1 研究背景

目前, 长江流域已经修建了5万多座水利工程, 其中诸如三峡大坝、丹江口大坝、南水北调工程等大型水利工程极大地改变了河流的水文情势, 对水生态系统的影响不容忽视<sup>[1]</sup>。习近平总书记强调当前和今后相当长一个时期, 要把修复长江生态环境摆在压倒性位置。河流生态流量的评估是修复长江生态环境的重要环节和依据。目前, 我国传统的基于水文统计分析的生态流量评估已难以综合反映复杂河流系统的水生态完整性和时空差异, 如何在现有基础上开展系统性和综合性的河流生态流量过程评估, 加强与水生生物的关联, 探索流量与栖息地适宜状况的响应机制, 构建基于“目标物种需求量化—栖息地模拟评估—生态流量决策优化”的水生态评估体系, 是制定合理的生态流量调度措施和优化河流生态系统修复方案的重点和难点问题<sup>[2]</sup>。

物理栖息地模型是生态流量研究中与水生态系统联系较紧密的方法, 它将目标物种对栖息地流速、水深、底质及覆盖物等的喜好性纳入考虑, 进而将目标物种所需的流量概念转换成流量与栖息地加权适宜面积(Weighted Usable Area, WUA)间的关系。该方法耦合了水文情势和生态过程的变化, 能够定量反映出流量变化对河流栖息地质量的影响, 预测水文情势改变对水生态系统的影响<sup>[3]</sup>。物理栖息地模型认为水生生物生活史特征与水力学条件之间存在着适宜性关系并符合下列原则: 生物不同生活史阶段对于栖息地需求可根据水力条件变量进行衡量; 对于一定类型水力条件的偏好能

收稿日期: 2020-01-14; 网络首发时间: 2020-08-20

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200818.1816.001.html>

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目(XDA23040402); 国家自然科学基金面上项目(51479186, 51579234);

湖北省自然科学基金创新群体项目(2019CFA019)

作者简介: 班璇(1981-), 博士, 副研究员, 主要从事生态水文研究。E-mail: banxuan@whigg.ac.cn

够用适宜度指数(Habitat Suitability Index, HSI)进行表述;生物物种在生活史的不同阶段通过选择水力条件变量适宜的区域来应对环境变化而做出响应。

物理栖息地模型可以应用到不同的目标物种上,本文以长江干流的底栖动物为目标物种。底栖动物对水文因素的响应较为敏感,可以作为水文指示物种。同时,底栖动物是鱼类的天然饵料,在河流生态系统的物质循环和能量流动中有非常重要的作用<sup>[4]</sup>。近些年研究表明底栖动物的流量需求比鱼类大20%左右,因此有很多研究学者将底栖动物作为生态流量研究的一个重要类群<sup>[5-6]</sup>。据调查,影响长江干流底栖动物现存量最重要的环境参数为水文参数,其次为底质参数,最后为水质参数<sup>[7]</sup>。由于河流修建水利工程后最直接的影响是改变了河流的水文情势,因此研究水文参数与底栖动物栖息地适宜面积之间的相互关系,可以定量评估水文变化对底栖动物栖息地质量的影响。

本文以监利水文站附近的一个含有河漫滩的典型江段为例,首先应用适宜度指数分析长江干流多个河段底栖动物的监测数据,量化目标物种的栖息地需求特性;然后建立二维水动力模型模拟栖息地流速和水深的时空分布,最后筛选出不同流量下目标物种的栖息地适宜面积分布范围。在此基础上,得出流量与适宜面积关系曲线,计算目标物种在三峡大坝蓄水前后栖息地适宜面积变化过程,进行生态流量决策。

## 2 研究区域概况

监利江段位于长江中游荆江河段尾段,全长约12 km。监利江段最宽处为3.2 km(乌龟洲),河段属于典型的蜿蜒型河道,平面形态为弯曲分汉型,乌龟洲将水流分为左右两汉<sup>[7]</sup>。监利江段气候湿润,雨量丰沛,年降雨量超过1000 mm。1951—2006年,监利站多年实测平均年径流量3536亿 $m^3$ ,多年平均流量11 300  $m^3/s$ ,历年最大流量为46 300  $m^3/s$ ,历年最小流量为2650  $m^3/s$ <sup>[8]</sup>。对监利站1975—2018年的年平均流量数据进行频率排序计算后利用皮尔逊3型曲线进行配线,取 $P=25\%$ 、 $50\%$ 、 $75\%$ 频率所对应的流量值作为丰、平、枯水年的设计值,分别为12 573、11 832、11 135  $m^3/s$ 。

本研究于2016年汛前(5月)、汛后(11月)在长江中游采集与监测了13个江段(宜昌、宜都、枝江、公安、监利、城陵矶、洪湖、嘉鱼、武汉、鄂州、武穴、湖口、安庆等江段)的底栖动物及其环境参数数据,共466个样点(图1(a)),图1(b)显示了5月和11月监测底栖动物的总生物量的空间分布,这些数据用来进行目标生物环境需求的量化分析。其中,底栖动物用德国HYDRO-BIOS公司437332 Van Veen采泥器(抓斗式采泥器)和1/16  $m^2$ 加重的彼得森采泥器,泥样经100目(孔径150  $\mu m$ )的铜筛清洗后将底栖动物检出,样品用10%的福尔马林保存。所有样品带回实验室进行鉴定、计数并称量(电子天平量程220 g,精度0.0001 g),底栖动物湿重转换为干重。环境参数(水深、流速、底质)与底栖动物同步监测,水深用SM-5型便携式超声波测深仪测定;流速用声学多普勒流速剖面仪(RiverRay ADCP;产自美国SonTek/YSI公司,型号M9)测定。这些数据用来建立目标物种的适宜度

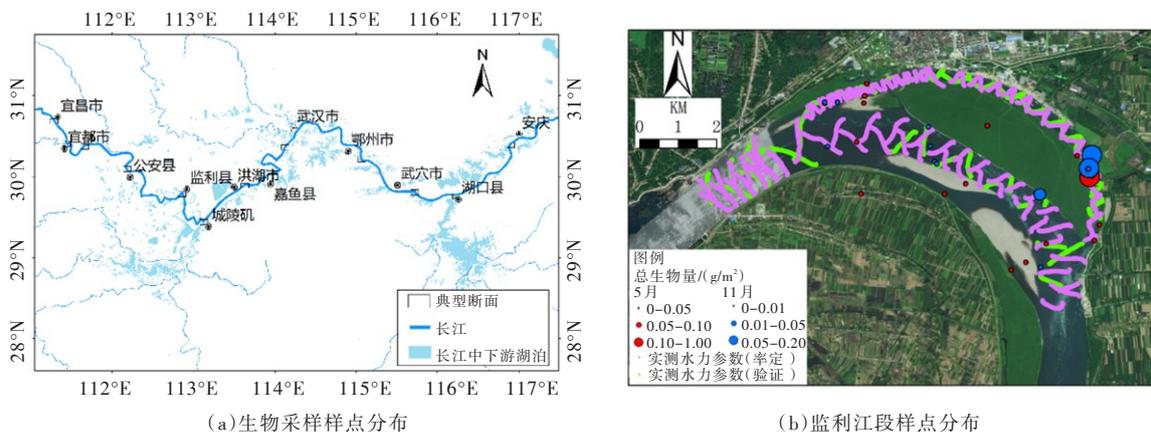


图1 监利江段底栖动物和水力参数样点采集位置信息

指数模型。监利江段 2016 年 5 月的月均流量为  $14\ 822\ \text{m}^3/\text{s}$ ，11 月的为  $10\ 288\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

本研究于 2019 年 4 月在监利江段应用声学多普勒流速剖面测量水深和流速(图 1(b))，水下地形测量的数据由长江航道局提供。利用这些数据来进行栖息地水流环境的水动力学模型建模与率定。

### 3 研究方法

**3.1 栖息地生物需求分析** 调查采集到目标物种所在处的生物量并监测对应的环境参数，然后采用栖息地适宜度指数(Habitat Suitability Index, HSI)对采样数据进行量化，得出不同环境参数范围的 HSI，以及适宜等级<sup>[9]</sup>。栖息地适宜度指数的基本假设是物种会选择与使用最能满足其生活需求的地点，而最高品质的栖息地出现在最频繁使用的地点<sup>[10]</sup>。因此，栖息地适宜度指数计算式为：

$$HSI = N_i / N \quad (1)$$

式中： $N_i$  为不同环境参数范围内观察到的目标物种生物量； $N$  为研究区域内目标物种总生物量。

通过求得目标物种栖息地环境变量不同范围内的 HSI 可以得出目标物种的栖息地适宜度曲线。该指数范围介于 0 到 1 之间，其中 0 代表完全不适宜目标物种的栖息地状况，1 代表最适宜目标物种的栖息地状况<sup>[11]</sup>。

栖息地环境参数模拟 应用 DHIMIKE 软件中的 MIKE21FM 模块建立监利江段的二维水动力学模型，模拟栖息地流速、水深等环境参数的时空分布。水动力学模型主要由建立河床地形模块、划分计算网格模块、确定进出口边界条件、率定和验证模型等 4 个步骤完成<sup>[10]</sup>；给出研究河段进出口的流量水位条件，通过该模型可以计算出不同流量下研究河段的流速和水深分布。本研究利用 2019 年 4 月实测的 2 期数据对模型的参数进行率定和验证，然后按照恒定流的方式给定监利江段入口流量边界和出口水位边界进行不同流量的情景模拟。

栖息地适宜面积空间分布 栖息地环境模拟可以得出每一个面积单元的水深  $D$ 、流速  $V$ ，而这些值在栖息地适宜度曲线上又对应一个栖息地适宜度指数 GHSI。因此，栖息地模拟的环境参数依据栖息地适宜度标准进行筛选与赋值，最终可以得到每一个环境参数对应的栖息地 HSI 空间分布图<sup>[12]</sup>。如果考虑多个环境参数对目标物种栖息地适宜度的综合影响，可以采用权值乘积方程来求解栖息地综合适宜度指数值(Composite Habitat Suitability Index, CHSI)，具体求解公式如下：

$$CHSI_i = HSI_1 \times b_1 + HSI_2 \times b_2 + \dots + HSI_n \times b_n \quad (2)$$

式中： $HSI_1, \dots, HSI_n$  为各单因子适宜度指数； $b_1, \dots, b_n$  为目标物种对不同环境因子的响应权值，由生物学统计方法确定权值<sup>[9,13]</sup>。

最终，每一个流量都可以求解一个目标物种栖息地权值适宜面积(Weighted Usable Area, WUA)的空间分布。

栖息地生态流量决策 栖息地生态流量决策主要依据水文站实测流量和物理栖息地模型得出的流量  $Q$  与  $WUA$  关系曲线得出  $WUA$  的历时变化过程，它能够即时直观地用曲线和表格的形式反映不同流量下目标物种  $WUA$  的变化过程，提供一个可量化的水生态调度决策方法<sup>[14-15]</sup>。通过下式编程获得研究河段上的权值适宜栖息地面积( $WUA$ )：

$$WUA = \sum_{i=1}^n \Delta A_i \times CHSI_i \quad (3)$$

式中： $\Delta A_i$  为每个栅格单元的面积； $CHSI_i$  为该栅格单元对应的综合适宜度指数。

对于每一个模拟流量都重复这一过程，最终获得目标流量  $Q$  与  $WUA$  的关系曲线( $Q-WUA$ )，结合流量历时曲线( $Q-t$ )，每一个流量  $Q$  可以从  $Q-WUA$  关系曲线上找到一个对应的  $WUA$  值，最终获得栖息地适宜面积历时曲线( $WUA-t$ )，基于适宜面积越大物种生物量越高的假设，可与实测的目标物种生物量建立联系，从而评估出流量变化过程对目标物种栖息地的潜在影响<sup>[14]</sup>。

## 4 研究结果

### 4.1 栖息地生物需求分析

4.1.1 确定目标物种的敏感环境因子 分析13个调查江段底栖动物采样数据中生物量与环境参数的相关关系。底栖动物种类多样，习性差别较大，对水文等环境的响应也存在较大差异。因此依据本研究的466个样点数据的分析结果把长江中游的底栖动物分为寡毛类、水生昆虫、软体动物、其他(多毛纲、蛭纲、甲壳纲)等4大类群。本文采集共记录底栖动物99属种，隶属于3门10纲，其中水生昆虫50属种(占总种类数50.5%)、寡毛类20属种(20.2%)、软体动物15属种(15.2%)，此外还发现甲壳纲、蛭纲、多毛纲等<sup>[16]</sup>。

通过分析各类群生物量与环境参数的显著相关系数，确定其敏感环境因子<sup>[17]</sup>，见表1。结果显示底栖动物总生物量和流速显著负相关，相关系数为-0.081；寡毛类与流速显著负相关，相关系数为-0.107；软体动物对水深和流速都显著不相关，因而本模型不考虑软体动物的计算；水生昆虫与流速和水深显著负相关，相关系数为-0.088和-0.095，水生昆虫的环境因子响应权值由其对应的相关系数占总相关系数绝对值的百分比求解；其他类群的底栖动物与水深显著正相关，相关系数为0.091。以上结果显示大部分底栖动物类群与流速显著负相关，说明流速越小，底栖动物的生物量越大。但是这些相关系数的数值不高，说明除了流速和水深外，底栖动物生物量还受到其它因素的影响，比如底质、摄食等影响。不过，由于底质与摄食对于同一江段在较短时间内属于比较稳定的环境因素<sup>[18-19]</sup>，模型采样的时候已经考虑在底栖动物适宜底质的区域进行采样，本文的目标是探讨底栖动物的适宜流量过程，在较短的时间内流量往往不会引起河床底质的变化，因而在物理栖息地模型中暂不考虑这两个因素的影响。

表1 底栖动物各类群生物量与环境参数的相关关系

	总生物量		寡毛类		软体动物		水生昆虫		其他类群	
	相关性	显著性(单侧)	相关性	显著性(单侧)	相关性	显著性(单侧)	相关性	显著性(单侧)	相关性	显著性(单侧)
流速 $V$	-0.081*	0.042	-0.107*	0.011	-0.077	0.05	-0.088*	0.03	0.029	0.27
水深 $D$	-0.048	0.15	-0.055	0.119	-0.048	0.15	-0.095*	0.02	0.091*	0.026

注：\*为在0.05水平(单侧)上显著相关。

4.1.2 求解敏感环境参数的适宜度指数 依据式(1)，计算目标物种敏感环境参数的HSI值，结果如图2所示，结果显示底栖动物总生物量在0~0.2 m/s的流速范围内，适宜度指数为0.68，属于高适宜范围；0.2~0.6 m/s的流速范围内，适宜度指数为0.32，属于低适宜范围；寡毛类的结果显示0~0.2 m/s的流速范围，适宜度指数为0.8，属于高适宜范围，0.2~1.12 m/s的流速范围，适宜度指数为0.2，属于低适宜范围；水生昆虫的结果显示0~0.4 m/s的流速范围，适宜度指数为0.9，属于高适宜范围，0.4~1.2 m/s的流速范围，适宜度指数为0.1，属于低适宜范围；0~3 m的水深范围，适宜度指数为0.83，属于高适宜范围，3~14 m的水深范围，适宜度指数为0.17，属于低适宜范围；其他类群的结果显示，3~6 m的水深范围，适宜度指数为0.6，属于高适宜范围，6~15 m的水深范围，适宜度指数为0.4，属于低适宜范围。该结果说明底栖动物偏向于选择较小流速的地方为适宜栖息地，水生昆虫高适宜栖息地的流速范围大于寡毛类和底栖动物栖息地的流速范围。

### 4.2 栖息地环境参数模拟

4.2.1 水动力模型构建与率定 水动力模型构建包括导入地形，划分网格，设置边界条件和模拟参数等(图3(a))。应用监利江段的实测水下地形数据，建立二维水动力学模型(图3(a))。并利用2019年4月11日与4月12日的流量边界条件进行模拟与验证。对比流速和水深实测值与模拟值之间的相对误差，调整模型中的曼宁系数(Manning Number)，涡黏系数(Eddy viscosity)以及边界条件，使相对

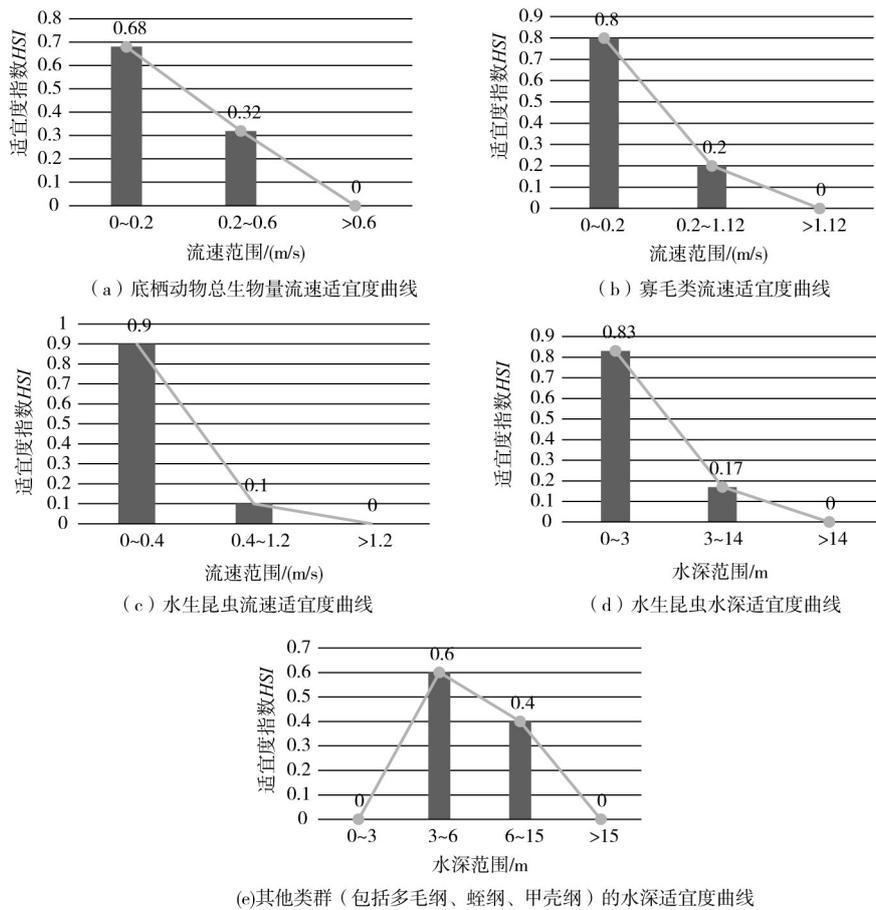


图2 底栖动物不同类群栖息地适宜度曲线

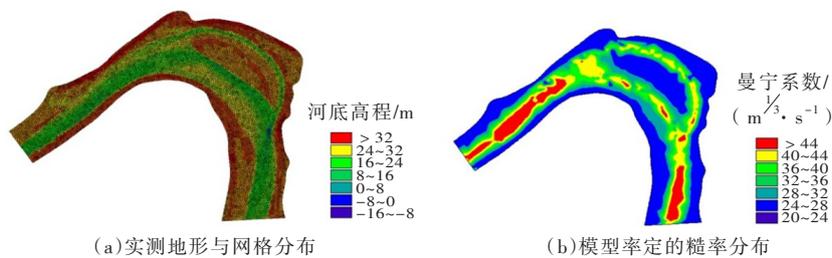


图3 河床高程和曼宁系数空间分布

误差最小。涡黏系数采用 smagorinsky formulation 公式计算，设定为全局分布，率定结果为 0.25，曼宁系数的率定结果见图 3(b)，结果显示流速和水深相对误差小于 7%，相关系数高于 0.96，纳什系数接近 1，说明模型质量好，模拟结果可信度高(图 4、表 2)。

依据 1975—2018 年监利水文站的流量和水位数据绘制流量  $Q$  与水位  $E$  关系曲线( $Q-E$ )(图 5(a))，

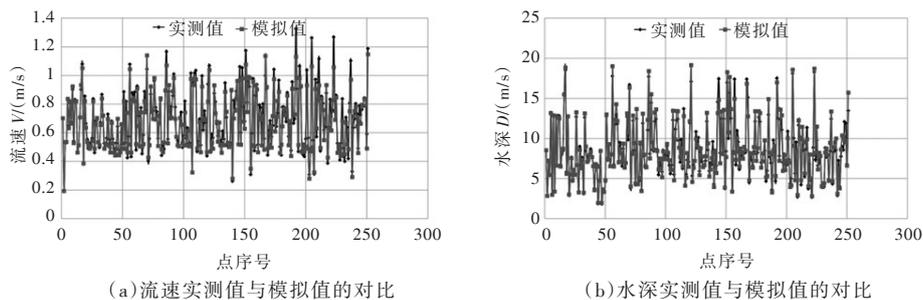


图4 实测值与模拟值的误差分析

表2 水深和流速误差分析表

率定参数	相对误差	相关系数	纳什系数
流速 $V$	6.8%	0.96	0.91
水深 $D$	6.9%	0.97	0.94

找到水位与流量关系的函数关系，依据此期间流量的最大值与最小值确定模拟流量  $Q_{模}$  的范围为 2000 ~ 50 000  $m^3/s$ 。因此模拟流量依据此范围来设定，并以 2000  $m^3/s$  为一个流量间隔来设置水动力学模型上游边界的模拟流量值，通过 1975—2018 年流量与水位建立的函数关系来推算下游边界的模拟水位值  $E_{模}$  (图 5(b))。

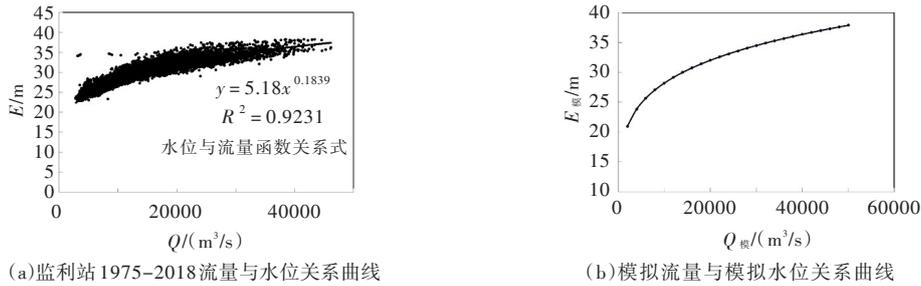


图5 监利站流量与水位关系曲线

4.2.2 模型结果 水动力学的模拟结果显示(图 6)，在流量为 4000  $m^3/s$  时，研究区域的江心洲和河漫滩出露面积较大，河道淹没区域的水深范围为 4 ~ 8 m (图 6(a))，流速范围为 0 ~ 0.6 m/s (图 6(d))。随着流量的增大，研究区域水面面积和江段水深也逐渐增大，在流量达到 20 000  $m^3/s$  时，研究区域的江心洲被淹没，主河道水深达到 20m 左右，流速范围为 1.2 ~ 2.1 m/s，靠近河岸的区域水深范围为 4 ~ 12 m，流速范围为 0 ~ 1 m/s (图 6(b)(e))。随着流量的继续增加，淹没区域的水深也越来越大，在流量达到 40 000  $m^3/s$  时，主河道水深范围为 24 m 左右，流速范围为 1.2 ~ 2.4 m/s，江心洲区域的水深为 4 ~ 8 m (图 6(c)(f))。该结果说明流量的变化会引起研究区域的水深和流速空间分布的变化，从而影响底栖动物的适宜栖息地范围的变化。

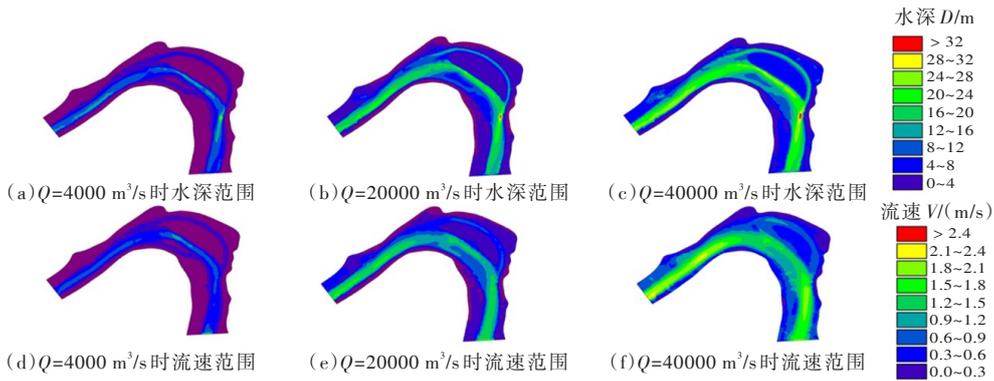


图6 不同流量下水深和流速空间分布

4.3 栖息地适宜面积计算 底栖动物以两岸河漫滩和江心洲滩区域为高适宜区，主河道和干区为低适宜区和不适宜区。水生昆虫高适宜区域的范围最大，其次是寡毛类，总生物量是同时考虑了各种群底栖动物综合需求的结果，是各类物种适宜面积的叠加值，因而适宜范围最小。当流量为 4000  $m^3/s$  时(图 7(a)(d)(g))，高适宜区域基本分布在靠近河岸和江心洲岸边的区域。随着流量的增加，两岸河漫滩和江心洲滩逐渐被水流淹没，底栖动物适宜区域范围逐渐增加；当流量为 20 000  $m^3/s$  时，江心洲被全部淹没，江心洲整个区域都变成底栖动物的高适宜区(图 7(b)(e)(h))；随着流量的继续增大，两岸河漫滩和江心洲滩区域的水深和流速越来越大，江心洲从高适宜区变为低适宜区，高适宜区的范围越来越小(图 7(c)(f)(i))。该结果说明底栖动物喜好在浅水区生存，因此两岸河漫滩和江心洲滩是其

生存的重要栖息地。随着流量的增加，河漫滩和江心洲逐渐被淹没，底栖动物的适宜栖息地范围也随之变化；流量增加到一定数值后，底栖动物的栖息地适宜范围达到最大，但是随着流量的继续增加，河漫滩和江心洲淹没深度越来越大，底栖动物的栖息地适宜范围又逐渐减小。

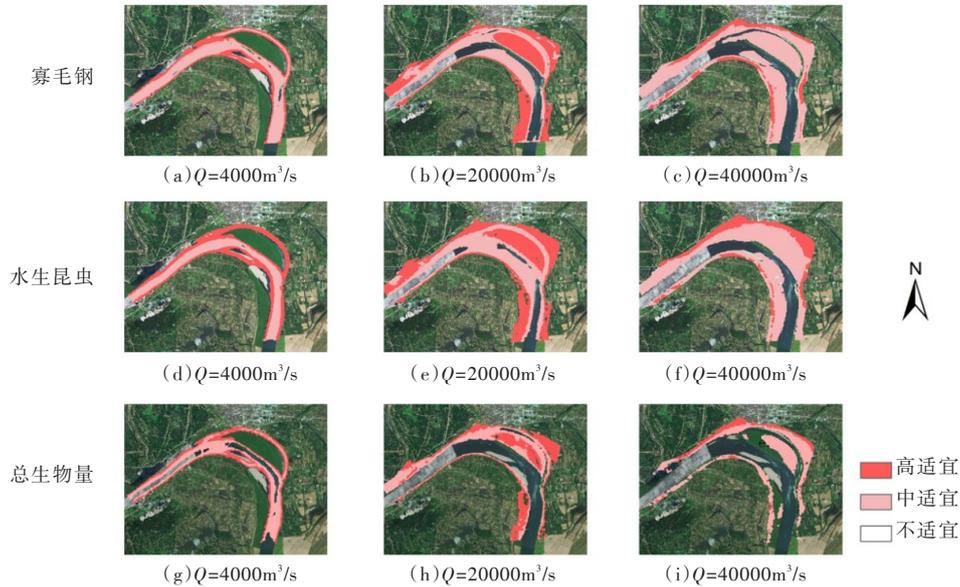


图7 底栖动物适宜面积的空间分布

**4.4 栖息地生态流量决策** 依据式(3)计算监利江段各模拟流量下适宜面积的总和，绘制底栖动物各类群与总生物量的流量与栖息地适宜面积( $Q-WUA$ )关系曲线(图8)，从图8可以看出，寡毛类、水生昆虫与总生物量的 $Q-WUA$ 曲线的变化趋势基本相同，呈现出抛物线的趋势，且出现峰值和拐点时的流量相同。当流量逐渐增大到 $12\ 000\ m^3/s$ 时出现适宜面积大幅度增加的拐点；当流量为 $20\ 000\ m^3/s$ 时，适宜面积达到最大值，然后开始逐渐递减；当流量升高到 $36\ 000\ m^3/s$ 时，适宜面积降低到拐点之前的水平，约为最大适宜面积的60%。其他类群(多毛纲、蛭纲、甲壳纲)的 $Q-WUA$ 曲线的变化趋势与寡毛类、水生昆虫、总生物量不一样，呈现出单值曲线的变化趋势，当流量为 $20\ 000\ m^3/s$ 时出现上升拐点，流量为 $36\ 000\ m^3/s$ 时达到峰值以后，适宜面积变化出现平稳趋势。由于采集的其他类群生物量在总生物量中只占很小的比例(14.1%)，而且反映的是多个类群的结果，不具有代表性，因此在后续的综合比较中，不考虑其他类群的结果。综合比较各类群适宜面积变化的结果显示，水生昆虫的适宜面积最大，其次是寡毛类，最后是总生物量。由于总生物量的适宜面积代表的是同时能够满足寡毛类、水生昆虫、以及其他类群底栖动物栖息地需求特性的面积范围，是各类群叠加后的适宜面积，因此其适宜面积最小。因此，在分析生态流量时可以用底栖动物总生物量的 $Q-WUA$ 曲线代表整个类群的变化趋势。该结果显示各类群出现 $WUA$ 峰值和拐点的流量相同，说明底栖动物各类群对生态流量的需求具有共性。在同一流量下，水生昆虫适宜面积的范围大于寡毛类的底栖动物。对于监利江段， $20\ 000\ m^3/s$ 的流量为底栖动物的最佳生态流量， $12\ 000\sim 36\ 000\ m^3/s$ 为底栖动物的适宜面积出现拐点变化的生态流量。

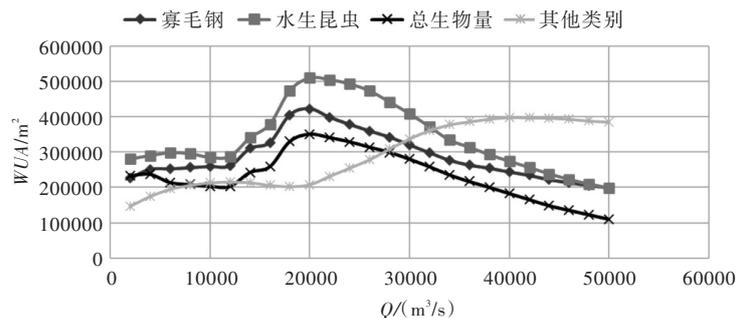


图8 监利江段底栖动物各种群的流量与适宜面积关系曲线

#### 4.5 三峡大坝蓄水前后底栖动物适宜面积对比

4.5.1 三峡大坝蓄水前后底栖动物适宜面积的年际变化 依据流量历时曲线和 $Q$ - $WUA$ 关系曲线,可以求解底栖动物适宜面积的时间序列曲线。图9显示的是三峡大坝蓄水前后32年(1987—2018年)监利江段底栖动物月均适宜面积的变化曲线。结果显示三峡大坝蓄水后, $WUA$ 的低值部分减小(图中虚线框),低值部分出现的时间段为11月至次年4月之间。从流量的变化趋势来看(图9实线框),蓄水后11月及次年4月的月均流量较蓄水前均增加,这是因为三峡水库蓄满后库水位在缓慢消落,使得出库流量与蓄水前相比增加。这期间监利站的流量值基本在 $5000 \sim 10\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的范围,还未达到底栖动物适宜面积大幅上升的拐点流量( $12\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ),但是在这个拐点之前,底栖动物总生物量的 $Q$ - $WUA$ 曲线上还有一个拐点 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (图8虚线框),当流量大于 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的时候, $WUA$ 值开始减小。蓄水后11月及次年4月监利江段的流量较蓄水前虽然增加但又未增加到 $12\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的 $WUA$ 上升的拐点流量,而是在 $5000 \sim 10\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间,依据图8虚线框内的曲线趋势,这时 $WUA$ 值有一个减小的趋势,因此造成底栖动物适宜面积低值部分减少。 $WUA$ 的高值部分除了2006年和2018年较蓄水前降低,其它年份没有明显变化趋势。2006年的年均流量为 $8464 \text{ m}^3/\text{s}$ ,处于皮尔逊P-III曲线对应的流量频率为99%的位置,属于特枯年份;2018年的年均流量为 $13191 \text{ m}^3/\text{s}$ ,处于皮尔逊P-III曲线对应的流量频率为10%的位置,属于特丰年份。这两个年份 $WUA$ 的高值较蓄水前明显降低。而蓄水前的1998,1999和2000年都属于特丰年/洪水年, $WUA$ 出现极低值。

除去极端气候的影响三峡蓄水后减少了三峡大坝下游发生特丰流量的机率,对 $WUA$ 的高值部分是一个有利影响,而对 $WUA$ 的低值部分是一个不利影响。 $WUA$ 低值出现的时段(11月至次年4月)属于长江干流的平水期和枯水期,期间监利江段的江心洲和河漫滩都没有被淹没,底栖动物生活在靠近洲滩岸边的区域,因此其适宜面积较洲滩淹没时要小得多。 $WUA$ 高值出现的时段(5月至10月)由于洲滩被淹没,所以适宜面积大幅度增加。但由于洲滩有着季节性的波动,洲滩并不是底栖动物的主要生长区域,因此 $WUA$ 高值时段对底栖动物的影响没有 $WUA$ 低值时段关键。因此,三峡大坝的调蓄对底栖动物总体上是一个不利的影

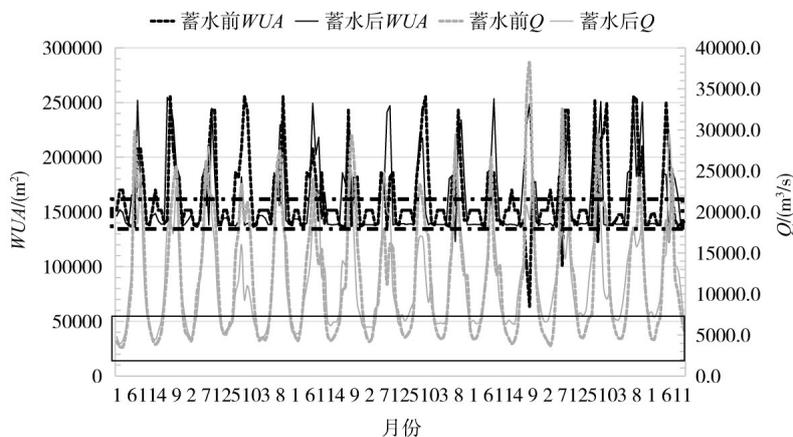


图9 三峡大坝蓄水前后底栖动物适宜面积的年际变化曲线

4.5.2 三峡大坝蓄水前后底栖动物适宜面积的月均值变化 分析三峡大坝蓄水前后32年各月份底栖动物适宜面积的在三峡大坝蓄水后的变化率(图10),结果显示9月一次年4月适宜面积较蓄水前减少了 $0 \sim 10\%$ ,5—8月份适宜面积较蓄水前增加了 $0 \sim 20\%$ ,特别是7月份增加的面积达到 $20\%$ 。该结果说明三峡大坝蓄水后枯水期和平水期由于大坝蓄水水位消落增加了下游的流量,使得低流量值较蓄水前更加高于底栖生物的 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的拐点流量,因而造成底栖动物适宜面积的低值部分减少。而丰水期由于防洪需求大坝调节最大流量,使得高流量部分不会出现极高值,较蓄水前更接近底栖动物的适宜生态流量 $20\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,因此,底栖动物适宜面积高值部分增加。从枯水期到丰水期,随着流量的增大,河漫滩和江心洲被水流逐渐淹没,因而可以给底栖动物提供更大的生存空间;但流量如果太大,又会使得淹没的洲滩水太深,流速太急,变得不适宜底栖动物的生长,因而流量控制在

适宜范围内对底栖动物的生长才是最有利的。依据之前的计算结果，底栖动物在监利站的最适宜生态流量为  $20\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，建议三峡大坝在蓄水的同时能兼顾底栖动物的生态流量需求，尽量调节枯水期和平水期的流量接近  $4000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，丰水期的流量接近  $20\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，以减小对底栖动物栖息地的影响。

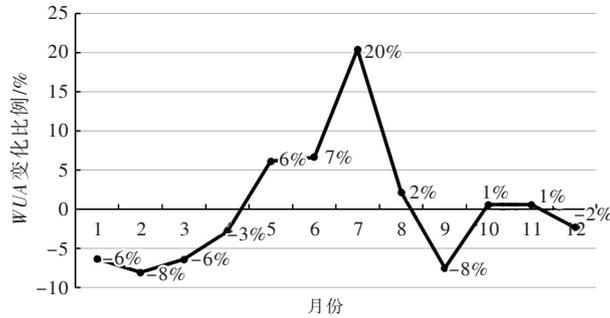


图10 三峡大坝蓄水前后各月份WUA变化率

4.5.3 三峡大坝蓄水前后典型水文年的底栖动物适宜面积变化 分析三峡蓄水前后典型水文年底栖动物栖息地适宜面积(WUA)月均值的变化(图11)。对监利站1975—2018年的年平均流量数据进行频率排序计算后利用皮尔逊3型曲线进行配线，取  $P=25\%$ 、 $50\%$ 、 $75\%$  频率所对应的流量值作为丰、平、枯水年的设计值，在已有的实测系列中选取与设计值相等或接近的年份作为相应的丰平枯代表年。结果显示三峡蓄水前的丰、平、枯水年依次为1990年、1988年、1977年，蓄水后的为2005年、2003年、2013年。结果显示丰水年的丰水期(5月、7月、8月)WUA减少，枯水期(3月)的WUA增加；平水年的7月和10月WUA减少，8月和9月WUA增加；枯水年，除了8月WUA增加，其他月份WUA减少。该结果说明为了保护三峡大坝下游底栖动物栖息地，建议在枯水年增大枯水期和平水期的流量，平水年增大枯水期的流量，丰水年减少丰水期的流量。

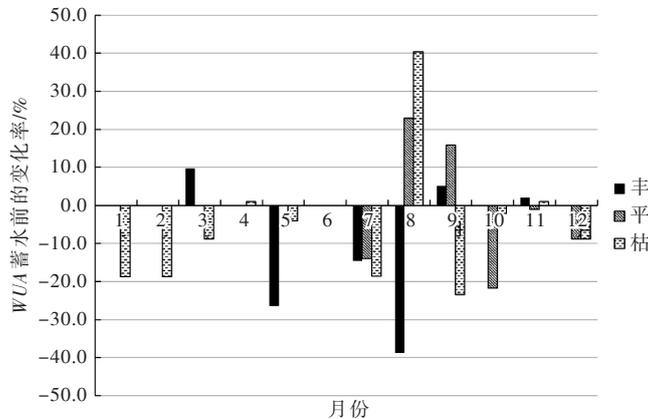


图11 三峡大坝蓄水前后典型水文年的适宜栖息地面积WUA月均值

## 5 结论

本文建立长江中游监利江段底栖动物多个类群的物理栖息地模型，以流速和水深为敏感环境参数评估了底栖动物各类群对栖息地环境参数需求特性，评估变化流量下各类群底栖动物栖息地适宜面积的变化，并对比了三峡大坝蓄水前后32年时间段内底栖动物适宜面积的变化率，依据变化趋势给出针对性的生态流量调度建议。本研究方法可以为长江其它河段不同目标物种的栖息地质量评估提供参考，进行生态流量决策和生态修复方案设计。本研究得到的主要结论如下：

依据长江干流13个江段的底栖动物采样数据分析了不同类群底栖动物的敏感水文因子，并量化了其适宜范围和适宜程度，结果显示在水文要素中，底栖动物最敏感的环境参数是流速，高适宜流速范围为  $0 \sim 0.2\ \text{m/s}$ 。其次是水深，高适宜范围在  $0 \sim 6\ \text{m}$  范围内。不同类群的流速适宜范围有略微

不同,但整体上是低流速的范围内(0~0.2 m/s),适宜度等级较高。

建立了长江干流包含河漫滩特征的典型江段物理栖息地模型,模拟了变化流量下典型江段的水力分布,并耦合底栖动物的栖息地适宜度指数,筛选出变化流量下底栖动物栖息地适宜面积的空间分布,得出底栖动物的 $Q$ - $WUA$ 曲线。结果显示流量的变化只影响各类群 $WUA$ 的量值大小,同一流量下水生昆虫的适宜面积最大,其次是寡毛类,不影响 $WUA$ 随流量的变化趋势,因此可以用总生物量代表各类群底栖动物的 $Q$ - $WUA$ 变化趋势。监利江段底栖动物的最佳生态流量为20 000 m<sup>3</sup>/s,出现拐点变化的生态流量为12 000~36 000 m<sup>3</sup>/s。

依据 $Q$ - $WUA$ 曲线与流量历时曲线进行生态流量决策,得出 $WUA$ 的时间序列曲线,分析底栖动物在三峡大坝蓄水前后适宜面积的年际变化过程。结果显示三峡大坝蓄水后枯水期和平水期由于大坝调控造成底栖动物适宜面积的低值部分减小,对底栖动物造成不利影响;丰水期由于调节最大流量,使得底栖动物适宜面积的高值部分增加,对底栖动物是一个有利的影响。三峡大坝在考虑保护底栖动物的生态调度时,尽量使监利江段流量在枯水期和平水期时接近4000 m<sup>3</sup>/s,在丰水期时接近20 000 m<sup>3</sup>/s;在枯水年增大枯水期和平水期的流量,平水年增大枯水期的流量,丰水年减少丰水期的流量以减小对底栖动物栖息地的影响。为了保护底栖动物栖息地,建议三峡大坝在蓄水的同时能统筹考虑,在满足其他多目标调度的同时,能兼顾底栖动物的生态流量需求,尽量使得各河段获得较大面积的低流速栖息地。

致谢:感谢长江科学院黄仁勇博士对本文有关三峡生态调度方面提出的修改建议,中国科学院水生生物研究所的冯伟松老师和高文娟老师在野外采样方面给予的支持。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 黄真理,傅伯杰,杨志峰. 21世纪长江大型水利工程中的生态与环境保护[M]. 北京:中国环境科学出版社,1998.
- [ 2 ] 蔡玉鹏,万力,杨宇,等. 基于栖息地模拟法的中华鲟自然繁殖适合生态流量分析[J]. 水生态学杂志, 2010, 31(3): 1-6.
- [ 3 ] 班璇. 物理栖息地模型在中华鲟自然繁殖生态流量决策中的应用[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(3): 59-65.
- [ 4 ] 杨振冰,刘园园,何蕊廷. 三峡库区不同水文类型支流大型底栖动物对蓄水的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 86-96.
- [ 5 ] 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, 42(6): 678-684.
- [ 6 ] 潘保柱. 长江泛滥平原水体底栖动物的宏观生态格局研究[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2009.
- [ 7 ] 陈秀粉,夏炜,潘保柱,等. 长江中游宜昌至武汉段底栖动物群落结构特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(5): 973-981.
- [ 8 ] 赖昊,杨国录,骆文广. 长江监利河段环境流量估算方法初探[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(3): 205-209, 214.
- [ 9 ] 陈新军,龚彩霞,田思泉,等. 基于栖息地指数的西北太平洋柔鱼渔获量估算[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(4): 29-33.
- [ 10 ] 班璇. 中华鲟产卵栖息地的生态需水量[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 47-55.
- [ 11 ] BROWN S K, BUJA K R, JURY S H. Habitat suitability index models for eight fish and invertebrate species in casco and sheepsfoot bays, Maine[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2000, 20(2): 408-435.
- [ 12 ] 冯波,陈新军,许柳雄. 多变量分位数回归构建印度洋大眼金枪鱼栖息地指数[J]. 广东海洋大学学报, 2009, 29(3): 48-52.
- [ 13 ] 赵越,周建中,张华杰,等. 三峡水库提前蓄水对中华鲟产卵的影响[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 83-89.
- [ 14 ] BOWEN Z H, BOVEE K D, WADDLE T J. Effects of flow regulation on shallow-water habitat dynamics and floodplain connectivity[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2003, 132(4): 809-823.
- [ 15 ] ARTHINGTON H A. Environmental flows: Saving rivers in the third millennium[M]. Berkeley: University of

California Press, 2012.

- [ 16 ] 马雅雪, 姚维林, 袁塞波, 等. 长江干流宜昌-安庆段大型底栖动物群落结构及环境分析[J]. 水生生物学报, 2019, 43(3): 634-642.
- [ 17 ] 王志铮, 倪梦麟, 吴一挺, 等. 养殖滩涂生态系中生物环境敏感因子筛选方法数学模型的建立与实验验证[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2005, 24(2): 95-99, 113.
- [ 18 ] 蔡文倩, 刘静, 周娟, 等. 基于生物量的大型底栖动物功能摄食群结构及生态质量评价[J]. 生物多样性, 2016, 24(9): 1045-1055.
- [ 19 ] 韩洁, 宋蒙蒙, 张杰, 等. 浑河流域大型底栖动物摄食功能群对栖息地环境的选择适应性[J]. 生态学报, 39(6): 140-147.

## Applying physical habitat model of zoobenthos in typical reaches of the Yangtze River

BAN Xuan<sup>1</sup>, GUO Zhou<sup>2</sup>, XIONG Xingji<sup>2</sup>, LIU Xueqin<sup>3</sup>, MA Yaxue<sup>3, 4</sup>, WANG Hongzhu<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Environment and Disaster Monitoring and Evaluation of Hubei Province,

Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, WuHan 430077, China;

2. Wuhan University, Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan 430072, China;

3. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The physical habitat model considering the habitat demand of aquatic organisms is considered to be one of the most popular method to evaluate the impact of the flow change on river ecosystem. In this study, the Jianli river section of the main stream of the Yangtze River with islands and floodplain is selected as an example to establish the physical habitat model for different macrozoobenthos groups, calculate the time series of the suitable habitat area under the changing flow to make the ecological flow decision accordingly. The results show that the most sensitive environmental parameter of macrozoobenthos is velocity, and the suitable range is 0 ~ 0.2 m/s. The second is water depth, and the suitable range is 0 ~ 6 m. Considering the sensitive environmental parameters, the best ecological flow of macrozoobenthos is 20 000 m<sup>3</sup>/s in wet period and 4000 m<sup>3</sup>/s in dry period. After impounding the Three Gorges dam, the low value of weighted usable area in dry period and normal period decreases, while increases in wet period. In order to protect the habitat of benthic animals, it is suggested that the Three gorges dam can take into account the ecological flow demand of benthic animals while flood control and water storage, increase the flow in the dry period and the normal period in the dry year, increase the flow in the dry period in the normal year, and reduce the flow in the wet period in the wet year. The results of this study can be used as a reference for the ecological flow decision-making and ecological restoration scheme design of different target species in other reaches of the Yangtze River.

**Keywords:** macrozoobenthos; physical habitat model; habitat suitability index; habitat suitability area; ecological flow decision

(责任编辑: 杨 虹)