

汉江桥闸工程下游河段典型鱼种栖息地模拟研究

赵晨旭¹, 宋策¹, 曹永祥², 闫文龙¹, 王卓¹

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 探究水利工程干扰下的鱼类生境变化特征是维护河流生态健康的基础性研究。以汉中平川段内汉江三桥闸下游 10 km 为研究河段, 利用水文学法和栖息地模拟法计算了生态流量。建立了河段二维水动力学模型, 选用宽鳍鱮为目标鱼种, 依据其对水深和流速的适宜性曲线确定了流量变化下的生境面积, 并采用生境质量分级分析了不同流量响应鱼类生境的变化特征。研究表明: 两种方法计算出河流生态流量相近, 分别为 54.3 和 53.1 m³/s, 最终适宜流量为 47.8 ~ 54.3 m³/s; 在流量 8.8 ~ 212.7 m³/s 时, 相比中等和低质量生境, 高质量生境面积随流量的波动更为显著, 呈现先升后降的趋势, 212.7 m³/s 以上流量的各级生境面积随流量变化较小; 高质量生境多分布于两岸和冷水河交汇口, 中等质量生境主要分布在河段下游; 低质量生境位置相对不固定; 研究成果可为桥闸运行和河流鱼类保护提供重要参考依据。

关键词: 典型鱼种栖息地; 栖息地模拟法; 流量历时曲线; 生境质量; 适宜栖息地面积; 汉江桥闸工程

中图分类号: X143

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0151-07

Simulation of typical fish habitats in the downstream reach of Hanjiang River Bridge Sluice Project

ZHAO Chenxu¹, SONG Ce¹, CAO Yongxiang², YAN Wenlong¹, WNAG Zhuo¹

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

Xi'an 710048, China; 2. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: The research of the characteristics of fish habitat changes under the impact of water conservancy projects is essential for preserving the ecological health of rivers. Taking a reach of 10 km in the downstream of the third bridge sluice of the Pingchuan section, Hanjiang River in Hanzhong as the research object, the ecological flow was calculated using the hydrological method and the habitat simulation method. A two-dimensional hydrodynamic model of the river section was established, and the targeted fish species was selected, which is *Zacco Platypus*. The habitat area of this species under the flow change was determined according to its suitability curve for water depth and flow velocity, and the classification of habitat quality was used to analyze the response of fish habitats to different flow patterns. It is found that the calculated river ecological flow of these two methods are very close, which are 54.3 m³/s and 53.1 m³/s respectively, and the final suitable flow is in the range of 47.8 - 54.3 m³/s. When the flow rate is in the range of 8.8 - 212.7 m³/s, the high-quality habitat area fluctuates more significantly with the flow compared with the medium-quality and low-quality habitats, showing a trend of rising first and then decreasing. However, when the flow rate exceeds 212.7 m³/s, all habitats varies little with the flow. Most of the high-quality habitats are distributed at the two banks of Hanjiang River and the intersection of Lengshui River and Hanjiang River, the medium-quality habitats are mainly located in the lower reaches of the river, whereas the low-quality habitats are relatively unstable. The research results can provide a technical support for the safe operation of bridges and sluices and the preservation of river fish.

收稿日期: 2020-09-25; 修回日期: 2021-01-06

基金项目: 陕西省水利科技项目(2015slkj-05)

作者简介: 赵晨旭(1997-), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 研究方向为水环境模拟与污染控制。

通讯作者: 宋策(1971-), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 副教授, 研究方向为水环境模拟与污染控制。

Key words: typical fish species habitat; habitat simulation method; flow-duration curve; habitat quality; suitable habitat area; Hanjiang River Bridge Sluice Project

1 研究背景

水利工程的修建可以实现对河流价值最大限度的开发利用,同时,也会对水生态环境造成一系列的负面影响^[1-5]。拦河大坝改变了河岸侵蚀和岸边生境,也破坏了河道的连通性,河流水文情势的显著变化甚至会致使水生生物面临灭绝的危险^[6-7]。鱼类通常被作为评价水生生态系统优劣的重要指标^[8],其活动直接关系到水域的能量流动以及物质循环^[9-10],对于河道生态环境自我调节与修复起着重要的作用。水体剧烈扰动不仅增大了鱼类游动和休憩时的能量消耗,也阻碍了鱼类的迁移行为,同时也恶化了鱼类的生存环境^[11-12]。因此,河流水文要素和水体紊动特性变化对鱼类生境的影响是河流生态研究关注的一个重要内容。

近年来,国内多采用水文学法、水力学法和栖息地模拟法计算河流生态流量。陈昌春等^[13]利用IHA法分析了枯水期的水文变异过程,明晰了枯水情势变幅较大的情况多存在于低流量范围内。闵倩等^[14]评价了水库调节对水生态的影响,揭示了极端枯水期的调节对于水库下游鱼类栖息地的重要性。栖息地模拟法以模型计算河道内目标物种的流量需求,得出最适宜流量大小^[15]。李建等^[16]通过栖息地模拟确定了目标鱼种的产卵期生态需水量,建立了流量与栖息地面积关系曲线,为三峡及葛洲坝工程的生态调度提供建议。蒋红霞等^[17]考虑不同水力条件下对鱼类不同生命时期的生态需水量,通过PHABSIM模型计算出优势种的最佳生态流量,并得以验证。本研究选取汉江平川段汉中桥闸下游河段作为研究对象,选取宽鳍鱮为目标鱼种,分别利用水文法和栖息地模拟法分析流量变化对鱼类栖息地的影响,计算不同流量条件下目标鱼种的适宜栖息地面积,基于鱼类生境质量分级方法分析不同流量响应鱼类生境质量的变化特征,从而为维护河流水生生态健康提供重要参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

汉江平川段东起勉县武侯镇,西至洋县小峡口,自西向东全长119.5 km,地势落差较小,河床平缓,坡降为0.85‰,是较为平稳的河道。研究区选取为

汉中市汉江桥闸下游10 km河段,该河段具有开阔的河谷地带,有两条支流汇入,分别为冷水河和李家石河,研究河段位置示意图1。

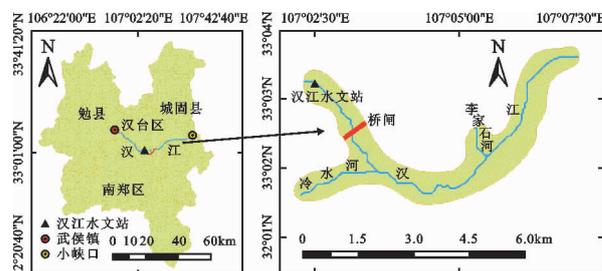


图1 研究区位置示意图

2.2 目标鱼种和水力学指标

对武侯镇沿汉江干流进行鱼类资源调查,共布设11个点位,统计得出平川段干流鱼类资源共5科29种,宽鳍鱮(*Zacco platypus*)为优势种,具有鲤科(*Cyprinidae*)鱼类的特征,体型长、呈微扁状,繁殖时间为4-7月。因此,在鱼类栖息地生境模拟分析中选取宽鳍鱮为目标鱼种。

为了定量分析水文要素与目标鱼种生境之间的关系,结合鱼类适宜的水深与流速条件确定了鱼类适宜性指数曲线,CSI为适宜性指数,其数值范围为 $0 < CSI < 1$ 之间,1赋值为最适宜生存情况,0赋值为最不宜生存情况,曲线的峰值区间则代表最适宜鱼类生存的范围^[18]。本研究依据汉江平川段的水域特征和宽鳍鱮的生活习性,确定适合宽鳍鱮生境的流速与水深,最适宜栖息的流速为0.3~1.5 m/s,最适宜栖息的水深为0.6~3 m,绘制水深与流速适应性曲线^[19-21],见图2。

2.3 工况选择

依据桥闸的运行条件,流量小于等于20.72 m³/s时,桥闸闸门关闭;流量为20.72~1 200 m³/s时,用桥闸调控流量;流量达到限值1 200 m³/s时,打开桥闸闸门泄洪。本研究选取来流流量8.8~1 200 m³/s作为模拟工况的流量范围。河段内有支流冷水河、支流李家石河汇入,设置为源汇项。根据汉水文站资料,该段干流多年平均流量为110.2 m³/s,冷水河多年平均流量为20.74 m³/s,李家石河多年平均流量为6.22 m³/s,支流流量根据干流模拟流量对应比例进行设置。具体的模拟工况设置如表1所示。

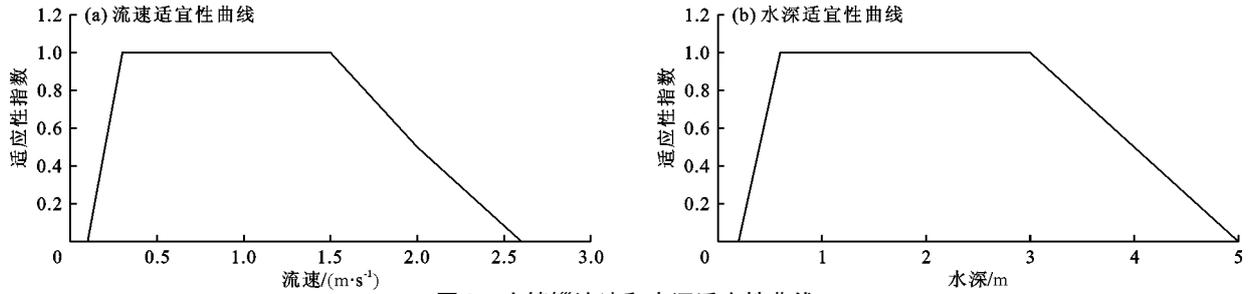


图 2 宽鳍鳊流速和水深适宜性曲线

表 1 模拟工况设置统计

桥闸泄流/ (m ³ ·s ⁻¹)	多年平均 流量占比/%	冷水河流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	李家石河 流量/(m ³ ·s ⁻¹)
381.5	346	71.8	21.5
359.5	326	67.7	20.3
335.7	305	63.2	19.0
308.9	280	58.1	17.4
279.4	254	52.6	15.8
247.4	225	46.6	14.0
212.7	193	40.0	12.0
175.4	159	33.0	9.9
150.5	137	28.3	8.5
135.5	123	25.5	7.7
103.3	94	19.4	5.8
92.9	84	17.5	5.2
53.1	48	10.0	3.0
47.8	43	9.0	2.7
20.72	19	3.7	1.1
8.8	8	1.7	0.5

2.4 研究方法

采用流量历时曲线法(水文学法)和栖息地模拟法 2 种方法分别计算了研究河段的生态流量。流量历时曲线法是通过水文比拟法推算出桥闸流量,进而计算出该方法下的生态流量;栖息地模拟法是由水动力模型和鱼类生境模拟两部分组成,模拟在不同流量条件下河道水深与流速的分布,分析目标鱼种对生境的适应性,定量分析河流流量变化对物种生境的影响。

2.4.1 水文学法

(1)水文比拟法。汉中水文站与桥闸相距 1.5 km,河段之间水流平稳,并无支流汇入,下垫面情况类同,流域面积相差 1.9%,可以应用水文比拟法进

行桥闸设计流量的计算^[22]。因此选取汉中水文站作为参考流量,计算公式为:

$$\bar{Q}_{桥} = K\bar{Q}_{汉} \tag{1}$$

$$K = F_{桥} / F_{汉} \tag{2}$$

式中: $\bar{Q}_{桥}$ 、 $\bar{Q}_{汉}$ 分别为桥闸流域和参证汉江流域的平均流量, m³/s; K 为流域面积的修正系数; $F_{桥}$ 、 $F_{汉}$ 分别为桥闸流域和参证流域的流域面积, km²。

(2) 流量历时曲线法。流量历时曲线法基于历史流量资料来构建各月流量历时曲线,用 Q_p 表示流量频率^[23],当河段达到最小流量,一般以 Q_{05} 表示。本研究采用目估适线法对桥闸区域流量 1995 - 2014 年共 20 年的流量资料进行分析,采用 P - III 型频率分布曲线,拟合度值达 0.95 以上。计算公式如下:

$$P_i = \frac{i}{N + 1} \tag{3}$$

式中: P_i 为第 i 个样本的累计频率; N 为样本个数。

2.4.2 栖息地模拟法

(1)二维水动力模型。计算网格采用非结构三角形网格,最大控制面积 20 m²,可以准确地体现研究区河段的实际河道地形;在边界条件设置时,上游入流边界采用流量边界,下游出流边界采用水位;两条支流冷水河和李家石河设为源汇项,参数率定包括河道糙率、紊动粘性系数等,模型通过监测冷水河口断面水位和流量关系来进行验证;整个模型利用 ADI 二阶精度的有限差分法对动态流的连续方程和动量守恒方程求解。该模型的控制方程由水流连续方程和动量方程组成,具体方程如下。

水流连续方程:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = S \tag{4}$$

X 方向动量方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g \sqrt{\frac{p^2}{h^2} + \frac{q^2}{h^2}} \cdot \frac{p}{h}}{C^2} - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \Omega_q - \frac{\partial}{\partial x} \left(2Eh \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left[Eh \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{\rho_w} F_y = S_{ix} \tag{5}$$

Y方向动量方程:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{g \sqrt{\frac{p^2}{h^2} + \frac{q^2}{h^2}} \cdot \frac{p}{h}}{C^2} - f V V_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \Omega_p - \frac{\partial}{\partial y} \left(2Eh \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left[Eh \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{\rho_w} F_y = S_{iy} \quad (6)$$

式中: $\xi(x, y, t)$ 为水流表面波动, m; F_x, F_y 为波浪应力所产生的分量; S 为单位水平面积的源量值, m/s; S_{ix}, S_{iy} 为在 X 轴和 Y 轴方向的源汇量值, m^2/s^2 ; C - Chezy 阻力常数 ($m^{1/2}/s$); $E(x, y)$ 为漩涡或动量扩散系数, m^2/s ; f 为风的摩阻力常数, $m^{1/2}/s$; $V_x, V_y(x, y, t)$ 为在 X 轴和 Y 轴方向上的风速分量, m/s。

(2) 鱼类生境面积计算方法。依据模拟计算的河段水深和流速的网格数据, 应用 ArcGIS 作为不同分级质量生境的提取工具, 依据宽鳍鱲对水深和流速的适应能力, 将生境分为高质量生境、中等质量生境和低质量生境 3 个级别。若水深与流速两个指标的值等于 1, 此段网格的生境质量为高; 若这两个指标中某个指标值等于 1, 而另一指标值不等于 0, 此段网格的生境质量为中等; 若两指标的值在 0 ~ 1 之间, 此段网格的生境质量为低。

3 结果与分析

通过对流量历史数据的统计及水动力模拟结果, 设置不同工况, 探究不同流量下鱼类栖息地面积的变化趋势以及高、中和低等质量面积的转化关系, 揭示桥闸在不同运行条件下对下游河段内典型鱼类生活环境的影响因素。

3.1 研究河段流量变化趋势

通过水文比拟法计算出 1995 - 2014 年桥闸的逐日流量数据并进行分析, 根据图 3 可以看出研究河段流量整体呈现上升趋势, 在 2007 年桥闸建成运行后, 流量呈明显增大趋势。为了进一步分析在鱼类增殖期间由桥闸运行工况引起的流量变化, 结合典型鱼类繁殖期 (4 - 7 月), 分析 4 - 7 月多年日流量及多年月均流量的变化过程。由图 4 ~ 5 可知, 桥闸运行后, 4 - 7 月份流量明显增大, 尤以 7 月流量最为突出。因此, 桥闸修建运行后, 河段流量有着增大的趋势, 明晰流量变化对鱼类生境质量的影响尤为关键。

3.2 流量历时曲线计算结果

研究选取保证率 $P = 95\%$ 所对应的流量 Q_{95} 作为计算最小生态需水量的参考流量。根据上述长系

列流量 $P - III$ 型频率分布曲线的分析结果见表 2。由表 2 可知, $P = 95\%$ 的年均流量为 $54.3 m^3/s$ 。

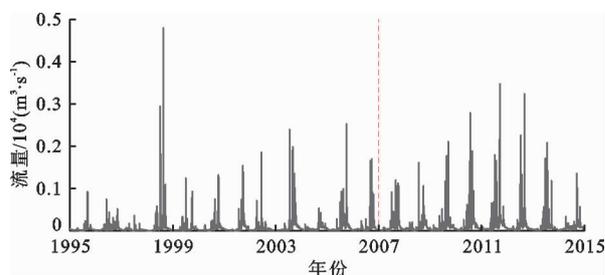


图 3 1995 - 2014 年研究河段日流量变化趋势

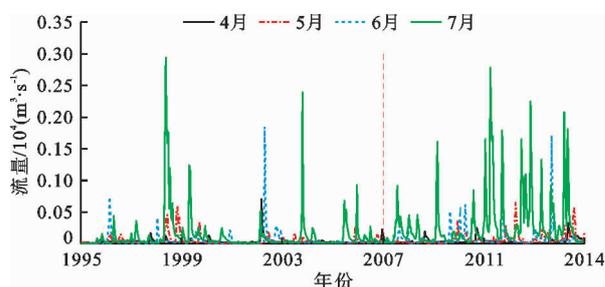


图 4 1995 - 2014 年研究河段 4 - 7 月日流量变化趋势

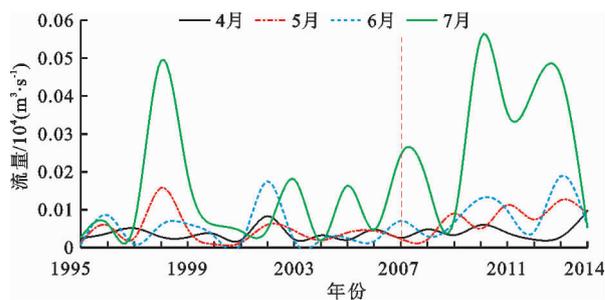


图 5 1995 - 2014 年研究河段 4 - 7 月流量变化趋势

表 2 研究河段流量历时曲线计算结果

频率/%	20	50	75	95
流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	115.7	90.1	73.2	54.3

3.3 水动力学模拟结果

河流水体对鱼类生存繁殖影响的关键因素是流速与水深, 例如草鱼洄游的适宜流速范围是 $0.4 \sim 1.0 m/s$, 当水体的流速高于其洄游的适宜流速时, 草鱼的洄游就会受到极大影响^[24]。水动力模拟结果见图 6、7。

冷水河和李家石河在汇入汉江入口处衔接良好,且水体流场平稳,对于研究河段的水动力特征的展现具有良好的基础。从水深角度分析,当流量设置为较大值时,水域面积随之增大,而流量降低会使

水域面积逐渐减小;从流速的角度分析,当河段流量增大时,除河道边缘区域外,其它水域的流速分布达到均匀状态;当河道流量降低时,大部分水域的流速呈现下降趋势。

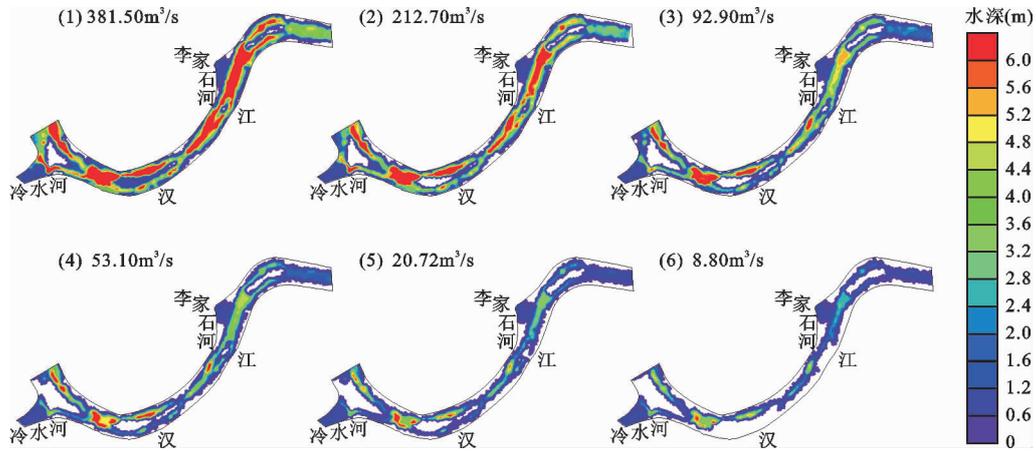


图 6 不同下泄流量研究河段水深分布

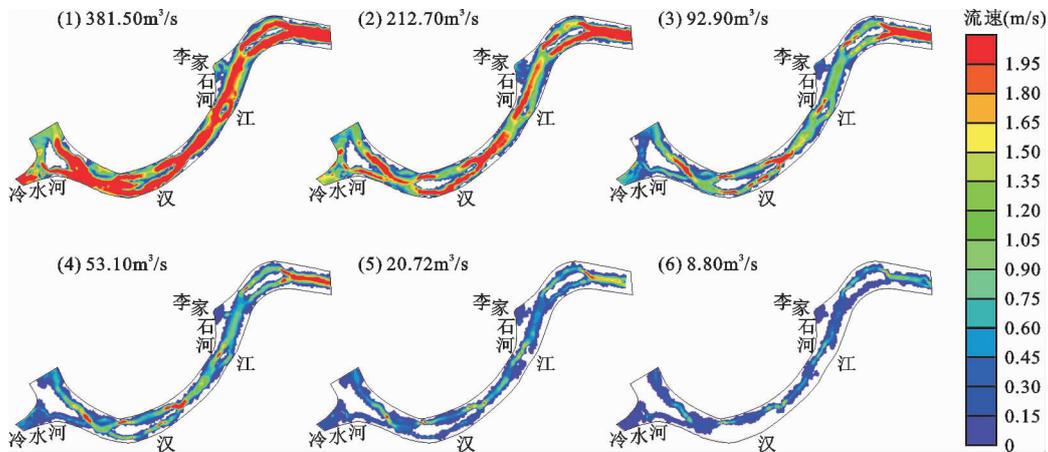


图 7 不同下泄流量研究河段流速分布

3.4 鱼类生境面积 - 流量响应关系

由模拟结果可知,研究河段 16 个计算工况下目标鱼种适宜生境面积与流量关系如图 8 所示:(1) 鱼类生境总面积随着流量的增加呈现出先上升后下降的趋势。随着流量的增大,面积也随之增大,流量达到 53.1 m³/s 时面积最大,当流量在 381.5 m³/s 时面积最小;(2) 中等质量生境面积与总面积变化趋势一致,在流量为 53.1 m³/s 时面积最大,而流量在 212.7 m³/s 面积最小;(3) 高质量生境面积总体趋势变幅很小,流量在 92.9 m³/s 时生境面积最大,在 20.72 m³/s 时最小,由此可以说明,高质量生境面积受流量变化影响较小;(4) 低质量生境面积随着流量增加而增大,流量较小时面积出现下降的趋势,与中等质量生境面积与总面积的变化趋势相反,在流量 53.1 m³/s 时最小,流量增大后面积随之变大,在 247.4 m³/s 达到最

大,总体趋势先增加后平稳保持。

总之,流量发生变化时,质量生境面积从小到大的顺序为:低质量、高质量、中等质量。说明随着流量的变化,研究河段鱼类生境面积受到影响变幅较大的主要是中等质量面积。因此,环境流量的调控与调度主要侧重于中等生境面积。

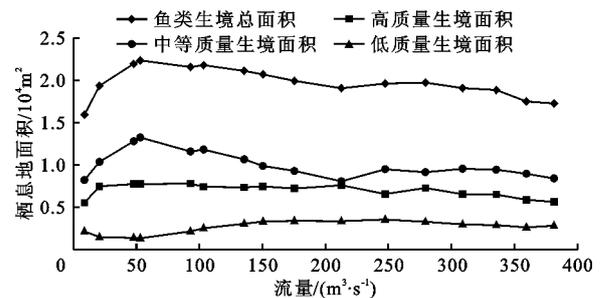


图 8 流量与栖息地面积关系

水动力模型模拟不同流量下鱼类生境面积的结果见图9。鱼类生境的区域位置分布基本固定。当流量为 $8.8 \sim 20.72 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,中等生境质量主要分布在研究区河段下游处,高等生境质量主要分布在汉江干流两岸,且流量为 $8.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 的溢流条件时生境面积质量相对较低;当流量从 $20.72 \text{ m}^3/\text{s}$ 增大到 $53.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 后,中等生境面积明显增多;当流量为

$53.1 \sim 212.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,原本在河段上游的中等生境质量逐渐消减,集中分布在上游桥闸处,高等生境质量面积增多,在冷水河与汉江交汇口处的中等质量面积转化为高等质量面积;当流量达到 $381.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,鱼类栖息地分布在两岸,河道中央形成一条深河槽。综上所述,当流量发生变化时,生境面积及质量随之发生变化。

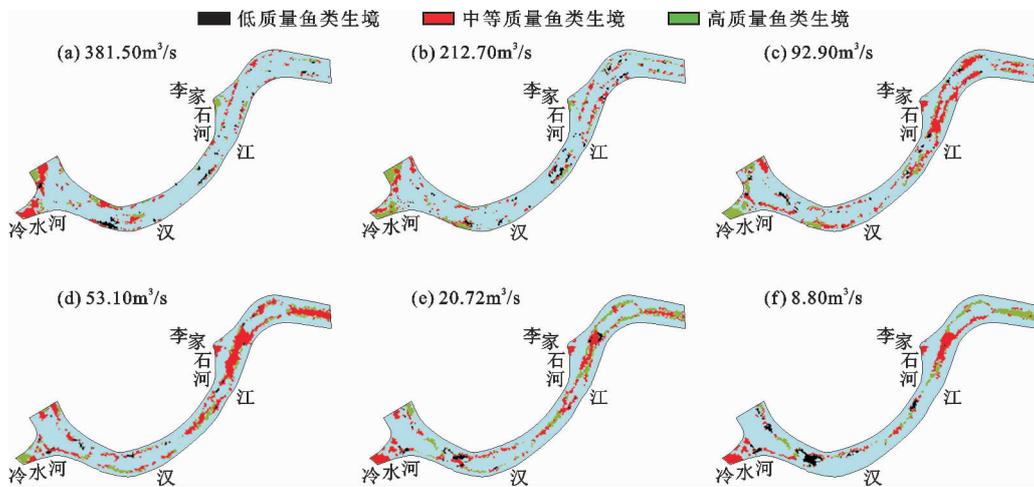


图9 不同流量下鱼类生境分布

综上所述,鱼类生境面积受到各种因素的制约,其中最大的因素为流量。根据模拟结果可知,当流量逐渐由小到大进行设置,在初期水域中的鱼类生境面积会越来越小,然而,当流量设置值超过 $53.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,鱼类的生境面积会呈下降趋势。当流量在 $54.3 \sim 212.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 范围内时,鱼类生境质量之间的相互转化优先于其面积变化。当流量设置值超出 $47.8 \sim 54.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,低质量生境面积会呈扩大趋势的变化,相应的中、高质量的生境面积会逐渐减少。

4 结论

本文采用水文学法推荐的最小生态流量的控制值为 $54.3 \text{ m}^3/\text{s}$;采用栖息地模拟法计算的宽鳍鱮生态流量为 $53.1 \text{ m}^3/\text{s}$,两种结果基本吻合,由分析得出最终最适宜流量为 $47.8 \sim 54.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在流量的变化下,不同栖息地的质量发生了相互转化,主要是高、中等质量面积向低等质量面积的转化。在三种质量等级的鱼类栖息地中,中等质量面积所占比例最大,同时也是在不同流量下受影响最大、变化幅度最明显的面积,其次是高等质量面积,低质量生境面积最少;在 $8.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 的溢流条件下,下游鱼类生境面积明显减少,且部分优良的鱼类生境质量演变为低质量;在 $92.9 \sim 212.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量条件下高生境面

积大幅度减少,这时应优先考虑下游水生生态问题,开闸放水,优先满足水生生态需水要求。

参考文献:

- [1] 汪青辽,刘媛,郝红升,等. 滇中引水工程取水口下游金沙江生态流量研究[J]. 水力发电, 2020,46(9):28-31.
- [2] 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.
- [3] 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+174.
- [4] TAYLOR J M, SEILHEIMER T S, FISHER W L. Downstream fish assemblage response to river impoundment varies with degree of hydrologic alteration[J]. Hydrobiologia, 2014, 728(1):23-39.
- [5] MIMS M C, OLDEN J D. Fish assemblages respond to altered flow regimes via ecological filtering of life history strategies[J]. Freshwater Biology, 2013, 58(1):50-62.
- [6] 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.
- [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.
- [8] SILVA A T, KATOPODIS C, SANTOS J M, et al. Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow[J].

- Ecological Engineering, 2012, 44:314 – 328.
- [9] 赵尚飞,杜彦良,王瑜,等. 松花江梧桐河生态修复工程鱼类栖息地模拟及调查[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(5):1 – 8.
- [10] 侯基,裴佳琦,黄喻威,等. 基于鱼类需求的息县枢纽工程闸下河段环境流量研究[J]. 水资源保护, 2020, 36(2):8 – 12 + 20.
- [11] MANSOR M I, MOHAMMAD – ZAFRIZAL M Z, NUR – FADHILAH M A, et al. Temporal and spatial variations in fish assemblage structures in relation to the physico-chemical parameters of the Merbok Estuary, Kedah[J]. Journal of Natural Sciences Research, 2012, 2(7):110 – 127.
- [12] WU Wei, XU Zongxue, YIN Xuwang, et al. Assessment of ecosystem health based on fish assemblages in the Wei River basin, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(6):3701 – 3716.
- [13] 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 + 11.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 常留红,徐斌,张鹏,等. 深水航道整治丁坝群对鱼类生境的影响[J]. 水利学报, 2019, 50(9):1086 – 1094.
- [19] SONG Xinxin, ZHUANG Yanhua, WANG Xuelei, et al. Combined effect of Danjiangkou Reservoir and cascade reservoirs on hydrologic regime downstream[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018, 23(6):05018008.
- [20] 吴青怡,曹振东,付世建. 鳊鱼和宽鳍鱮幼鱼流速选择与运动能量代谢特征的关联[J]. 生态学报, 2016, 36(13):4187 – 4194.
- [21] YANG Baiheng, DOU Ming, XIA Rui, et al. Effects of hydrological alteration on fish population structure and habitat in river system: A case study in the mid-downstream of the Hanjiang River in China[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 23:e01090.
- [22] 王青. 变化条件下黄土塬地区水文形势演变及其生态效应评估[D]. 西安:长安大学, 2016.
- [23] 门宝辉,林春坤,李智飞,等. 永定河官厅山峡河道内最小生态需水量的历时曲线法[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2):52 – 56 + 92.
- [24] 杨庆,胡鹏,杨泽凡,等. 草鱼洄游的适宜流速条件与适应阈值[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(4):93 – 100.

(上接第150页)

- [10] 张新智. 浅析机械系统可监测性设计理论[J]. 价值工程, 2013, 32(24):32 – 33.
- [11] 郝楠楠,韩刚,滕楷. 弧形闸门状态监测与故障诊断技术研究[J]. 中国水能及电气化, 2020(9):42 – 45.
- [12] 林良,廖军. 闸门结构可靠性分析与设计[J]. 山东工业技术, 2015(7):88 – 89.
- [13] 封山虎. 液压启闭机常见故障及应急处理措施[J]. 中国水能及电气化, 2015(5):50 – 53 + 50.
- [14] 董向妮. 浅谈水工闸门液压启闭机的故障诊断、维修与保养[J]. 内蒙古水利, 2018(8):61 – 62.
- [15] 徐珊. 探讨水利水工闸门与启闭机的安全预评价[J]. 陕西水利, 2015(S1):15 – 16.
- [16] ZHANG Yuelei, YAN Xinping, YUAN Chengqing. The research of optimal monitoring point placement for health monitoring of dredger based on analytic hierarchy process [C]// Macau, IEEE Prognostics and Health Management Conference, 2010.
- [17] 钱辉,杨森,彭琪琪,等. 基于模糊层次分析法对高电压下耐压测试系统的风险评估[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(2):111 – 116.
- [18] TAN J, LOW K Y, SULAIMAN N, et al. Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) for multi-criteria selection of microalgae harvesting and drying processes [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2016, 18(7):2049 – 2063.
- [19] ZHANG Wei, SUN Ke, LEI Changzheng, et al. Fuzzy analytic hierarchy process synthetic evaluation models for the health monitoring of shield tunnels[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2014, 29(9):676 – 688.
- [20] 董志斌,庞新宇,李博等. 基于模糊层次分析法的刮板输送机中部槽中板材料选择[J]. 机械设计与制造, 2021(3):248 – 252.
- [21] 李海华,赵红泽,李海强. 基于模糊层次分析法的煤矿工程评标指标权重确定[J]. 煤炭技术, 2013, 32(2):54 – 56.