

松花江梧桐河生态修复工程鱼类栖息地模拟及调查

赵尚飞^{1,2}, 杜彦良¹, 王瑜³, 殷淑华¹, 王世岩¹, 徐建新²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046;

3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:通过对松花江一级支流梧桐河中下游河道栖息地模型模拟和实地鱼类调查,分析了修复工程丁坝的水动力变化对鱼类栖息地的改善作用。基于流量内增加法(IFIM),应用水生生物栖息地模型(River 2D),考虑鱼类栖息地的流速、水深、遮蔽回水面积比3项指标,定义栖息地为差、中、良3个等级,模拟从小到大4个不同流量条件下顺直河道和丁坝河道鱼类栖息地等级的分布及变化,并通过实地鱼类调查数据验证修复工程丁坝对鱼类栖息地质量的改善情况。结果表明,在不同流量条件下,顺直河道和丁坝河道鱼中等级栖息地占84%以上;从生态流量到多年平均流量的过程中,顺直河道和丁坝河道不同综合适宜性指数(Combined Suitable Indexes, CSI)等级的栖息地面积变化较大,其中两者CSI差等级的栖息地面积占比分别减少4.9%和4.8%,顺直河道CSI中等级的栖息地面积占比升高4.9%,丁坝河道CSI中等级的栖息地面积占比下降6.0%,丁坝河道CSI良等级的栖息地面积占比从0%升高到10.8%;当流量大于多年平均流量26.42 m³/s时,各种等级的栖息地比例变化不大,多年平均流量对鱼类生长而言是最佳下限流量。从2016年和2017年9月两河段的鱼类调查情况来看,丁坝河段鲫(*Carassius auratus*)和蛇鮈(*Saurogobio dabryi*)的平均体重和平均体长更大,模拟和实测数据一致,说明丁坝在一定程度上改善了鱼类栖息地的质量。

关键词:鱼类栖息地评估;栖息地修复;River-2D模型;丁坝;梧桐河

中图分类号:Q142 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2019)05-0001-08

河流的水动力条件是影响其生态健康和功能的重要指标之一,水流通过影响溶氧、营养、水温和河底地形等要素作用于鱼类栖息地,水利工程改变了水流特性,进而改变鱼类栖息地。为量化评价鱼类栖息地优劣,20世纪80年代美国鱼类和野生动物保护委员会(US Fish and Wildlife Service)针对不同鱼类生活需求提出系列的水体参数,表征栖息地的适宜性。Dudgeon等(2005)认为河流的阻断往往对河道生物群产生负面影响;Railsback & Harvey(2002)发现所有的鱼类在极端高流速区存活率低,在中等水深和流速以及有掩体区域的存活率高。大量研究表明,不同年龄的鱼类适宜不同的水流特性水域,幼鱼群对水流的变化最为敏感,在平缓的河岸

线带,随着鱼类的生长,鱼群的栖息地向更深水的地带转移(Korman et al, 2011);深水区域能为鱼类提供更多和更高质量的栖息地(Binns, 1994)。

人类活动导致河岸带的土地利用类型发生改变,对河流的水生态系统产生不同程度的影响。在河流水生态修复实践中,采用河道及岸带整治,营建修复工程,达到改善局部河段鱼类栖息环境的目的。一般认为,在河道中建设束窄河道的丁坝对鱼类栖息地质量有积极影响,一方面会增加一定的水面面积;另一方面可使水流形态多样化,再塑深池和浅滩,这些措施在美国栖息地改善项目经常被采用(Larscheid & Hubert, 1992; Roni et al, 2008)。各种耦合生态需求的二维及三维模型已应用于生态修复工程方案设计、鱼类栖息地质量、河道稳定性工程分析评估等方面,成为河道生态修复中不可缺少的工具(孙嘉宁等, 2013; Kolden et al, 2016);其中, River-2D是较为成熟的鱼类栖息地模型并被广泛使用。国内外通常采用水深和流速进行栖息地的质量评价,马冰等(2017)使用 River-2D,考虑水深和流速指数,研究了丁坝间距对鲤栖息地面积的影响。近年来,有学者还开展了水力学变量(湍流、涡度、环

收稿日期:2018-06-23

基金项目:国家科技重大专项(2015ZX07201-008, 2017ZX07101004);中国水利水电科学研究院重大水利工程水生态安全保障及调控技术研究创新团队项目(WE0145B592017)。

作者简介:赵尚飞,1991年生,男,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:842432207@qq.com

通信作者:杜彦良,1974年生,女,教授级高级工程师。E-mail:duyl@iwhr.com

流、速度梯度和动能梯度)的重要性研究(Cotel & Webb, 2012; Lacey et al, 2012)。水流的强紊动可增加鱼类游动和休息的能量消耗并造成伤害,还可以触发或阻止鱼类的迁移行为(Smith, 1975; Silva et al, 2012); Yi等(2010)运用耦合鱼类生境适宜性曲线的一维水动力学模型,研究了长江中游不同流量以及不同日流量变化对“四大家鱼”产卵适宜性的影响。Kolden等(2016)采用FLOW-3D模型模拟分析圣弗兰河上天然顺直河段和有工程束窄河段不同鱼类的幼鱼和成鱼的栖息地适宜性,模型结果显示有工程束窄的河道对成年褐鳟和虹鳟更适宜,而两个河段对幼鱼并没有明显差别。

本研究区域为松花江一级支流梧桐河,历史上梧桐河是重要的鱼类栖息地和产卵场,渔业资源较为丰富。据历史调查,梧桐河有40余种土著经济鱼类,但近几十年来,随着社会经济的发展,梧桐河渔业资源出现衰退,种群数量减少、群体呈小型化。通

过采用水生生物栖息地模型(River 2D),考虑了流速、水深以及遮蔽回水面积比3个指标,对顺直河道与丁坝河道的栖息地质量进行评价,并与2016年和2017年鱼类采样数据相对照,以期探究丁坝对鱼类栖息地质量的改善作用。

1 研究区域与调查数据

1.1 区域概况

本研究区域位于松花江一级支流梧桐河中下游小山亮子段(图1-a)。梧桐河流域地处小兴安岭南麓山丘及山前过渡到平原地带(129°35′~130°48′E; 47°13′~48°05′N),河流长237 km,流域面积4 516 km²;其中山区占流域面积的80.5%,平原区占19.5%。上游为山区河道,V型断面,弯曲度小,中游坡度减缓,下游为平原型弯曲河道,弯曲系数1.5~3.0,比降为1/800~1/20000,断面呈多级河漫滩型,主槽宽30~100 m。

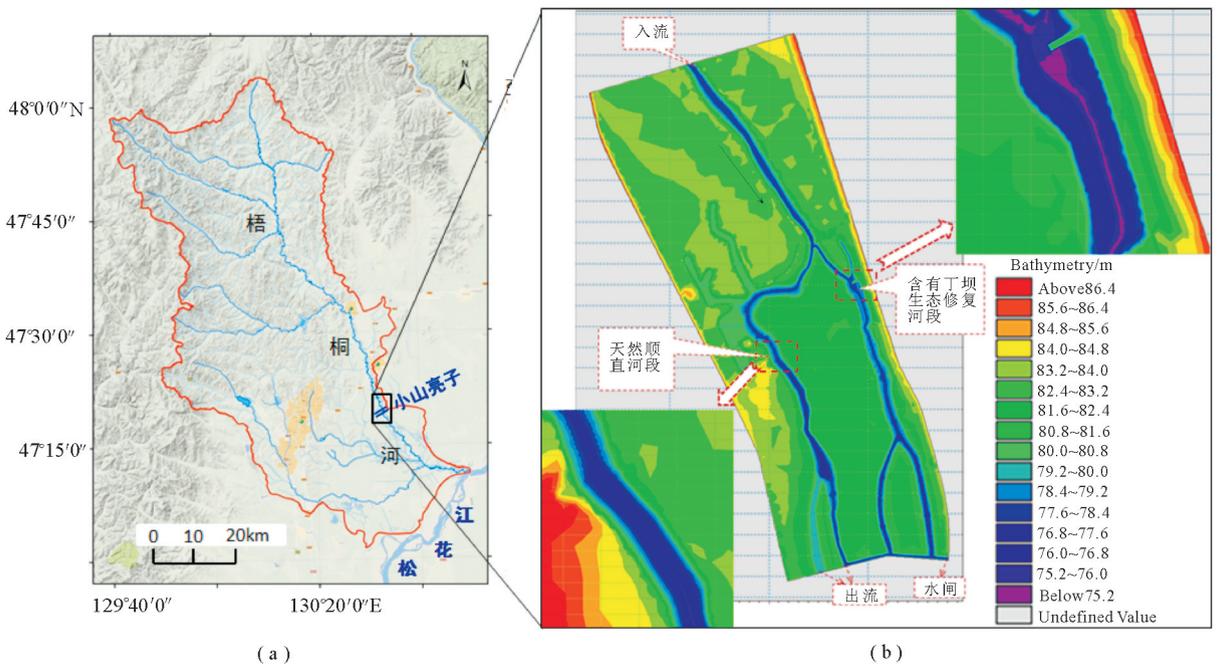


图1 梧桐河流域(a)及小山亮子河道地形(b)

Fig.1 Schematic diagram of Wutong River basin and topography of the Xiaoshanliangzi section

1.2 数据获取

本文模拟计算区域为小山亮子河段,长度约2.6 km,加河漫滩河道宽度约为1 km(图1-b)。模型设定两个计算边界条件:(1)上游入口为流量边界条件;(2)下游为水位边界,主河槽和河漫滩的曼宁系数分别为0.02和0.03。模型采用三角形网格,网格平均尺度为10 m,总节点数为28 774。主河道在1.1 km处分成两条河道,左汊河道是含有丁坝的生

态修复河道(以下简称丁坝河道),右汊河道为天然顺直河道。左汊河道含有一条长约50 m、宽约7 m、高约3.5 m的丁坝,右河道沿程均匀,无水利工程。地形数据由黑龙江省宝泉岭农垦诚信测绘有限公司测量得到,鱼类取样数据由中国环境科学院和黑龙江水产所进行实地调查得到,其中顺直河道鱼类实地调查日期为2016年9月,丁坝河道鱼类调查日期为2017年9月。

2 研究方法

采用 River 2D 模型对顺直河道和丁坝河道的栖息地适宜性进行模拟计算。River 2D 由加拿大 Alberta 大学、Alberta 渔业部、淡水研究所、美国地质调查局中部生态科学中心等共同开发, 用于鱼类栖息地适宜性模拟及评价。通过模拟结果和鱼类调查数据进行比较, 验证模型结果的合理性, 同时分析工程对鱼类栖息地适宜性的影响。

2.1 水动力模型

River 2D 水动力模型为深度平均的二维水动力模型, 其方程组如下。

$$(1) \text{ 连续性方程: } \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程:

$$X \text{ 方向: } \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Uq_x) + \frac{\partial}{\partial y} (Vq_x) +$$

$$\frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial x} H^2 = gH(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) \right] + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) \right] \quad (2)$$

$$Y \text{ 方向: } \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Uq_y) + \frac{\partial}{\partial y} (Vq_y) +$$

$$\frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial y} H^2 = gH(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{yx}) \right] + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) \right] \quad (3)$$

式中: H 为水深; U 、 V 分别是在 X 、 Y 方向水深的平均速度; g 是重力加速度; ρ 是水体密度; S_{0x} 、 S_{0y} 是河床 X 、 Y 方向的坡度; S_{fx} 、 S_{fy} 是相应的摩阻坡度; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} 是水平方向湍流应力张量的分量; q_x 、 q_y 是 X 、 Y 方向的单宽流量, 按下式计算:

$$q_x = H \cdot U \quad (4)$$

$$q_y = H \cdot V \quad (5)$$

2.2 栖息地模型

River2D 中的栖息地模型是运用河道内流量增加法 (IFIM) 来分析物种栖息地分布。IFIM 由美国鱼类和野生动物服务中心于 20 世纪 70 年代提出, 该方法通过结合水力学模型和生物信息数据, 建立不同流量和目标物种有效栖息地之间的关系。加权可利用栖息地面积 (WUA) 是 IFIM 中有关栖息地评价的核心内容, 是由计算单元面积和计算单元的栖息地综合适宜性指数乘积得到, 公式如下:

$$WUA = \sum_{i=1}^n CSI_i \cdot A_i \quad (6)$$

$$CSI_i = (V_i \cdot D_i \cdot C_i)^{1/3} \quad (7)$$

式中: CSI_i 为计算单元的栖息地综合适宜性指数, 范围 0~1; 其中 0 表示鱼类最不适应, 1 表示鱼类最为适应; A_i 为计算单元的面积; CSI_i 由 V_i 、 D_i 、 C_i 即流速、水深、河道指数 (包括底质和覆盖物状况) 适宜值组成, 这三者是表征河流物理栖息地最具代表性的变量; n 为计算单元的数量。

2.3 栖息地适宜性曲线

目前调查得到梧桐河及其支流有鱼类 40 余种, 主要冷水鱼有细鳞鱼和哲罗鱼, 其中细鳞鱼为国家二级野生保护动物, 其他经济鱼类有鲤、鲫、鲢、银鲫、怀头鲢、须鳅、黑龙江花鳅和黑龙江泥鳅。据流域鱼类调查数据分析, 鲤科鱼类占 64%, 鲤科鱼类为绝对优势科类。根据鱼类生活习性不同, 可以分为产卵期、育肥期、越冬期 3 个时段, 鱼类栖息地一般分为繁殖栖息地和生长栖息地。通常鱼类在繁殖期和生长期对流速、水深的需求不同 (Austin & Wentzel, 2001), 许多产卵期的鱼类需要一定的流速刺激, 且流速大的水体一般携带更高的溶解氧。在鱼类育肥期, 有些鱼类为了避免体能消耗, 偏好流速相对较小和食物丰富的水域, 本次实地调查时间为 9 月鱼类生长期。为了模型研究成果与原位调研数据相结合, 量化生长期栖息地的质量, 采用生长期适宜性指数曲线来描述, 通常指数有水深、流速、水温、底质、溶解氧、水质、水塘、回水区、湿地占比等 (Hubert, 1984; Elizabeth et al, 1982), 定量分析不同变量指数因素与鱼类适宜性的对应关系。考虑到顺直河道和丁坝河道位于梧桐河流域基本一致的位置, 可认为底质、水温、水质等指标对鱼类的影响基本相同, 模型中不做考虑。本文对梧桐河一般生活期的鱼类适宜性曲线由实地调查和参考文献 (Elizabeth & Twomey, 1982) 确定, 该文献综述了鲤的栖息地需求和偏好, 建立主观的 HSI 模型, 描述影响鲤习性的各种适宜性指数。由流域鱼类调查数据可知, 梧桐河鲤科鱼类为绝对的优势科类, 模型采用生活期鲤科鱼类的流速、水深以及水塘、回水区、湿地占比适宜性指数曲线, 采用公式 (7) 对栖息地适宜性进行计算, 3 种指标所占权重相同, 其中水塘、回水区、湿地占比曲线参考美国鱼类和野生动物保护委员会对鲤栖息地适宜性指数所做的研究 (Elizabeth & Twomey, 1982)。本文所采用的适宜性指数曲线只代表所研究区域的鲤科鱼类, 如图 2。其中图 2-a 为流速适宜性曲线, 图 2-b 为水深适宜性曲线, 图 2-c 为水塘、回水区、湿地占比适宜性曲线。

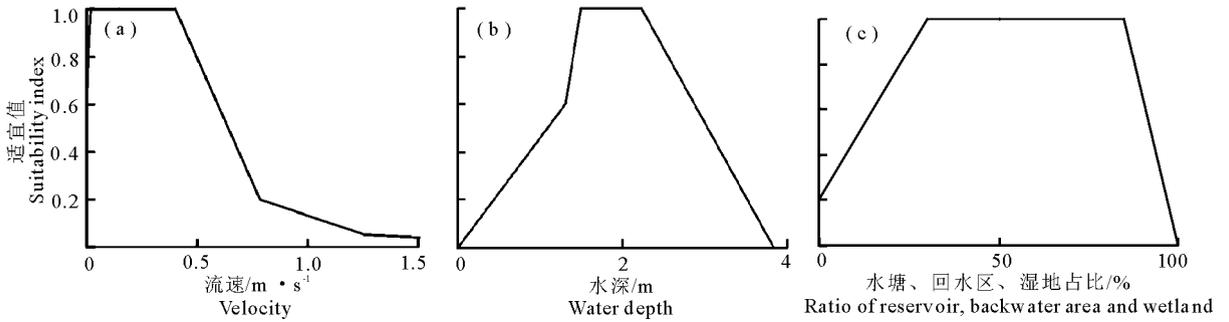


图2 鲤科鱼类适宜指数曲线

Fig.2 Suitability curves for Cyprinidae

3 结果与分析

3.1 模拟工况

梧桐河流域属于中温带大陆性季风气候区,具有典型的水文特征,径流年内丰枯变化较大,主要是受降雨量大小影响。夏季水量较丰,冬季径流较小,冰封期为11月中旬至翌年4月中旬。径流年内分配不均,大部分径流量集中在夏秋汛期,其中6-9月径流量占全年68%。小山亮子断面处多年月均流量过程见图3。多年平均流量为 $26.42 \text{ m}^3/\text{s}$,产卵和育肥的敏感用水期(4-9月)生态流量为 $7.92 \text{ m}^3/\text{s}$,年内最大月均流量发生在8月,为 $68.79 \text{ m}^3/\text{s}$,9月平均流量为 $45.32 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

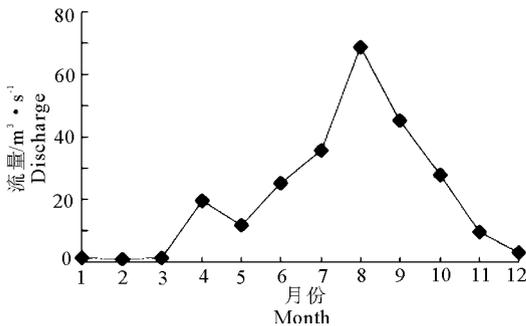


图3 梧桐河小山亮子断面多年平均流量统计

Fig.3 Variation of average monthly flow in the Xiaoshanliangzi section of the Wutong River

由以上数据对小山亮子栖息地进行模拟,选取4个典型流量进行工况分析,由小至大分别为:敏感用水期生态流量($7.92 \text{ m}^3/\text{s}$) < 多年平均流量($26.42 \text{ m}^3/\text{s}$) < 9月月均流量($45.32 \text{ m}^3/\text{s}$) < 8月月均流量($68.79 \text{ m}^3/\text{s}$)。

3.2 模拟计算

据模型水动力计算结果,在4个流量工况下,顺直河道和丁坝河道的分流流量十分相近,其中丁坝河道流量占总流量的49.1%~51.7%,顺直河道和丁坝河道的模拟计算结果具有可比性。傅菁菁等

(2016)将不同河段栖息地适宜性模拟结果分为3个等级, $0 < \text{CSI} \leq 0.2$ 为适宜性较差, $0.20 < \text{CSI} \leq 0.60$ 为适宜性一般, $0.60 < \text{CSI} \leq 1.00$ 为适宜性较好; Kolden等(2016)在天然顺直河段和有工程束窄河段的模拟中,将栖息地适宜性分为两个等级, $\text{CSI} > 0.5$ 表示良好, $\text{CSI} \leq 0.5$ 表示较差; Leclerc等(1995)将栖息地质量按CSI指数分成了4个等级: $0 < \text{CSI} \leq 0.1$ 为极低, $0.1 < \text{CSI} \leq 0.4$ 为低, $0.4 < \text{CSI} \leq 0.7$ 为中等, $0.7 < \text{CSI} \leq 1.0$ 为高等。

为了比较顺直河道和丁坝河道的计算结果数据,现分别在两条河道中截取250 m长度的水域进行对比。参考傅菁菁等(2016)对河道栖息地适应性划分为3个CSI级别: $0 < \text{CSI} \leq 0.2$ 表示适宜性差; $0.20 < \text{CSI} \leq 0.60$ 表示适宜性中; $0.60 < \text{CSI} \leq 1.00$ 表示适宜性良。根据栖息地模拟计算结果特征,选取 7.92 、 26.42 、 $68.79 \text{ m}^3/\text{s}$ 共3个流量工况分别为典型的小流量、中流量、大流量进行对比分析。栖息地适宜值分布的模拟计算结果如图4。

分析模型计算结果,考虑到 $45.32 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况是中流量与大流量的过渡阶段,故选取4个流量工况,顺直河道与丁坝河道不同CSI级别的栖息地面积比例变化见图5和表1。丁坝河道的最大河宽明显大于顺直河道,增幅为10.3%~33.6%,较宽的河道增大了水面面积,有利于鱼类生长活动(Larscheid & Hubert, 1992; Roni et al, 2008)。4个流量的顺直河道和丁坝河道最大河宽见表1。

由图5和表1可见,在不同流量工况下顺直河道和丁坝河道CSI以中高级别为主,该级别的栖息地面积占总面积的84%以上。在生态流量条件下,良等级的栖息地均为0,表明生态流量是维持鱼类生长的流量值。傅菁菁等(2016)进行的河道栖息地适应性模拟结果表明,适宜性较差($0 < \text{CSI} \leq 0.2$)和适宜性一般($0.2 < \text{CSI} \leq 0.6$)的不同河段水域面积和占总面积的79.2%~87%,与本文模拟结果相近。

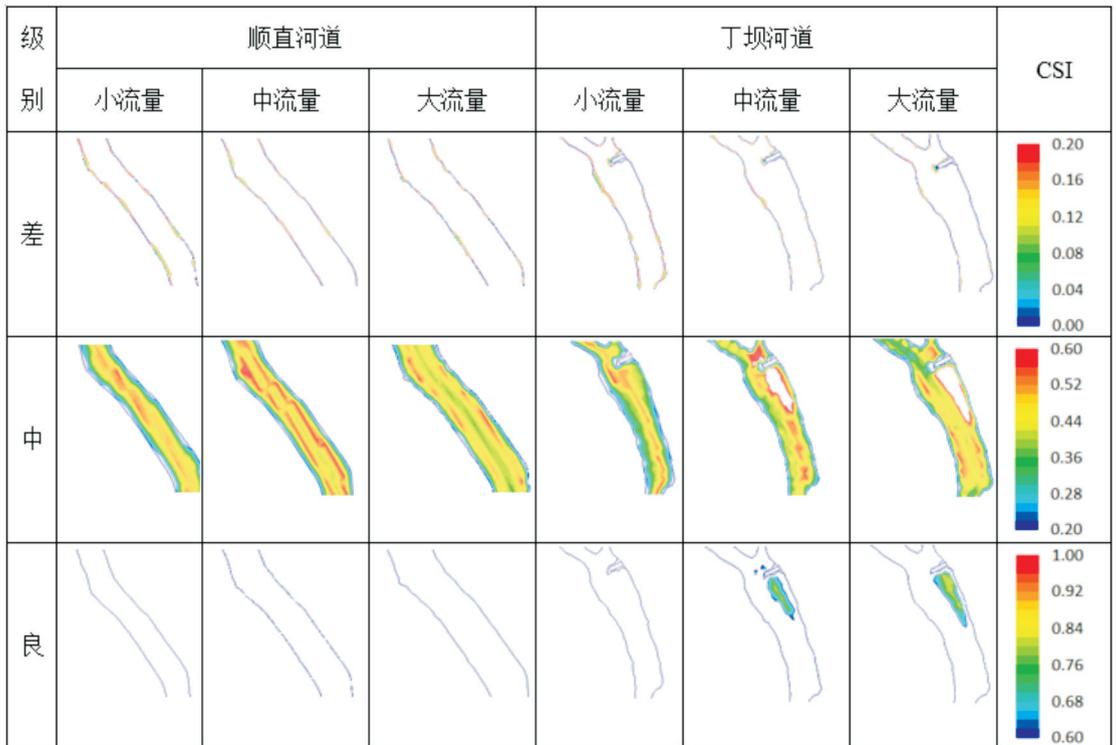


图 4 顺直河道和丁坝河道栖息地适宜值模拟

Fig.4 Distribution of habitat CSI values in the straight reach (SR) and spur dike reach (SDR) of the Xiaoshanliangzi section of Wutong River

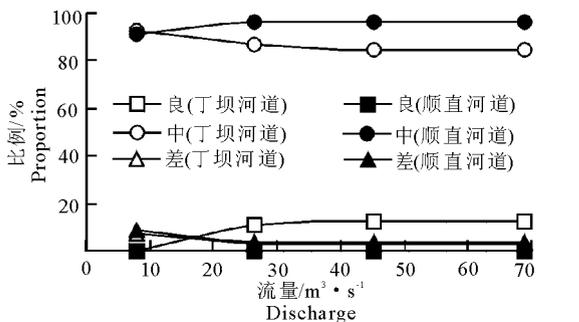


图 5 顺直河道和丁坝河道不同 CSI 级别的栖息地面积比例
Fig.5 Proportions of habitats with different CSI values in the straight reach (SR) and spur dike reach (SDR) of the Xiaoshanliangzi section of Wutong River

从图 5 可以看出, 多年平均流量为不同 CSI 等级的栖息地变化的“拐点”流量, 即生态流量到多年平均流量的过程中, 顺直河道和丁坝河道不同 CSI

等级的栖息地面积变化较大, 其中两者 CSI 差等级的栖息地面积占比分别减少 4.9% 和 4.8%, 顺直河道 CSI 中等级的栖息地面积占比升高 4.9%, 丁坝河道 CSI 中等级别的栖息地面积占比下降 6.0% (下降的主要原因是丁坝河道掩体区域的部分栖息地 CSI 由中等级变化为良等级), 丁坝河道 CSI 良等级的栖息地面积占比从 0 升高到 10.8%。从多年平均流量到多年平均最大月均流量的过程中, 顺直河道和丁坝河道不同 CSI 等级的栖息地面积变化不大, 在 0.2%~2.1%。本文多年平均流量对鱼类生长而言是最佳的下限流量。

4 个流量工况下顺直河道 CSI 为良等级的栖息地面积为 0, 丁坝河道 CSI 良等级的栖息地面积占比分别为 0%、10.8%、12.5%、12.7%。在小山亮子

表 1 4 种流量条件下顺直河道和丁坝河道不同 CSI 级别所的栖息地面积比例和最大河宽比较

Tab.1 Comparison of habitats with different CSI values and maximum water width in the straight reach (SR) and spur dike reach (SDR) of the Xiaoshanliangzi section under the four flow conditions

CSI 级别 与河宽	不同流量工况的栖息地面积占比/%							
	7.92 m³/s		26.42 m³/s		45.32 m³/s		68.79 m³/s	
	顺直河道	丁坝河道	顺直河道	丁坝河道	顺直河道	丁坝河道	顺直河道	丁坝河道
差(0~0.2)	8.7	7.5	3.8	2.7	3.5	3.0	3.3	2.9
中(0.2~0.6)	91.3	92.5	96.2	86.5	96.5	84.5	96.7	84.4
良(0.6~1.0)	0	0	0	10.8	0	12.5	0	12.7
最大河宽/m	42.9	63.2	48.3	70.0	57.3	74.2	60.0	77.2

多年平均流量、9月月均流量以及8月月均流量3个工况下,丁坝河道 CSI 良级别的栖息地面积比例均高于顺直河道。丁坝在局部上束窄水流,改变流向,加强紊动,同时在其周围形成多样的水流形态,在坝后产生回水区域。

由以上分析可知,总体上丁坝河道尤其是坝后回水区域是鱼类更好的生活栖息环境。鱼类在极端高流速区存活率低,在中等水深和流速以及有躲避区域的水域存活率高(Railsback & Harvey, 2002);坝后回水区域有稳定的水深和流速,相比顺直河道,可能对鱼类产生一些稳定的庇护场所,坝后

回水区域更适合鱼类生长。

3.3 鱼类调查

在实地取样中,顺直河道采集到鱼类 118 尾,丁坝河道采集到 100 尾,其中鲤科鱼类占到 64%。为了比较两个区域对不同种类、不同年龄的鱼类的适宜性,本次选取实地调查中获得 的 鲫(*Carassius auratus*)和蛇鮈(*Saurogobio dabryi*)两种鲤科鱼类进行比较,其中在顺直河道捕获鲫 17 尾、蛇鮈 29 尾;丁坝河道捕获鲫 18 尾、蛇鮈 35 尾。顺直河道和丁坝河道鲫和蛇鮈的生物学形体指标比较结果见图 6 表 2。

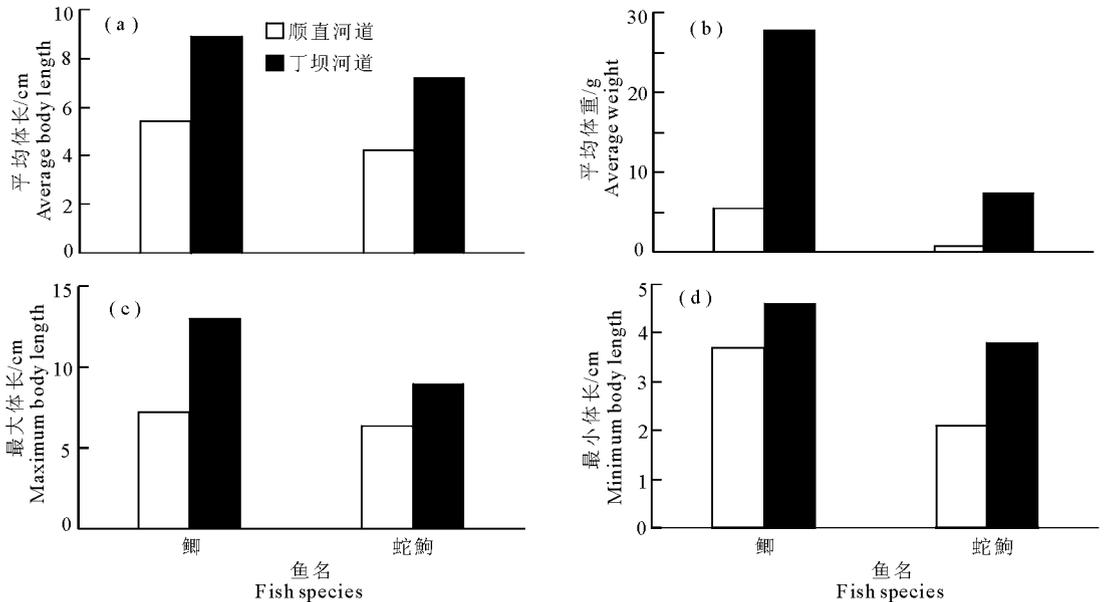


图 6 顺直河道和丁坝河道鲫与蛇鮈的形体指标比较

Fig.6 Comparison of morphological parameters for *Carassius auratus* and *Saurogobio dabryi* in the straight reach (SR) and spur dike reach (SDR) of the Xiaoshanliangzi section

表 2 顺直河道和丁坝河道鲫和蛇鮈的统计结果对比

Tab.2 Comparison of *Carassius auratus* and *Saurogobio dabryi* populations in the straight reach (SR) and spur dike reach (SDR) of the Xiaoshanliangzi section

指标 (Indicator)	鲫			蛇鮈		
	顺直河道	丁坝河道	增加/%	顺直河道	丁坝河道	增加/%
最大体长/cm	7.20	13.00	44.60	6.30	8.90	29.20
最小体长/cm	3.70	4.60	19.60	2.10	3.80	44.70
平均体长/cm	5.45	8.92	38.90	4.20	7.17	41.42
平均重量/g	5.38	27.74	80.61	0.70	7.27	85.10
体长均方差	1.76	2.40		2.20	1.73	

从图 6 和表 2 可以看出,鲫和蛇鮈的体长、重量数值在丁坝河道均比顺直河道的要大;此外,研究人员在 2018 年 6 月对丁坝河道和顺直河道的再次调查时发现,在丁坝河道下游捕有 2 条食物链等级高的鲶,体长均超过 20 cm,而其他几个顺直河道中均

未捕到,其他鱼类体长也明显较小。

丁坝坝后回水区有着适宜的稳定生境环境,更适合鱼类生长。参考 Kolden 等(2016)的模型,在不同流量情况下,有丁坝束流河段与顺直河道相比,对成鱼的适宜性更高,有丁坝束流河段的栖息地应有更高的成鱼比例,但实际鱼类调查结果却没有得到一致的结论。本次鱼类调查结果表明,丁坝河道鲫和蛇鮈的体长和重量比顺直河道更大,证实了模型的可靠性。

4 结论

基于流量内增加法(IFIM),应用水生生物栖息地模型(River 2D),考虑流速、水深、遮蔽回水面积比 3 个指标,对小山亮子顺直河道和丁坝河道鱼类一般生活期的 4 个典型流量条件下栖息地适宜性进

行模拟, 得出以下结论:

(1) 在不同流量情况下, 顺直河道和丁坝河道栖息地 CSI 以中等级别为主; 与顺直河道相比, 丁坝河道中鱼类活动空间有一定的增加。

(2) 在生态基流基础上增加流量对栖息地有所改善; 与顺直河道相比, 丁坝河道鱼类栖息地改善程度较高, 但超过多年平均流量的水量对栖息地没有明显改善作用, 多年平均流量对鱼类生长而言是最佳的下限流量。

(3) 丁坝的建设为鱼类提供了遮蔽掩体, 减少了大流速对鱼类的能量消耗, 流量形态的多样性, 一定程度上提高了栖息地质量; 在栖息地适宜性大的河段, 鱼类个体较大, 证明了人工工程对鱼类栖息地的修复和改善有一定作用; 鱼类习性需求复杂, 湍流、涡度、环流、速度梯度和动能梯度均可能对其生长产生影响。

参考文献

傅菁菁, 黄滨, 芮建良, 等, 2016. 生境模拟法在黑水河鱼类栖息地保护中的应用[J]. 水生态学杂志, 37(3): 70-75.

马冰, 张新华, 张小霞, 2017. 丁坝间距对改善水生生物栖息地作用的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 17(27): 93-100.

孙嘉宁, 张土乔, Zhu D Z, 等, 2013. 白鹤滩水库回水支流的鱼类栖息地模拟评估[J]. 水利水电技术, 44(10): 17-22.

Austin B, Wentzel M, 2001. Two-dimensional fish habitat modelling for assessing instream flow requirements[C]. Integrated Water Resources Management. Selected Papers From An International Symposium on Integrated Water Resources Management: 393-399.

Binns N A, 1994. Long-term responses of trout and macrohabitats to habitat management in a Wyoming headwater stream [J]. North American Journal of Fisheries Management, 14(1): 87-98.

Cotel A J, Webb P W, 2012. The Challenge of Understanding and Quantifying Fish Responses to Turbulence-Dominated Physical Environments[C]. In natural locomotion in fluids and on surfaces: 15-33.

Dudgeon D, Arthington A H, Gessner M O, et al, 2005. Freshwater biodiversity: Importance, threats, status, and conservation challenges[J]. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 81: 163-182.

Edwards E A, Twomey Katie, 1982. Habitat Suitability Index Models: Common carp[J]. Fws/obs: 4-9.

Hubert W A, 1984. Habitat suitability index: models and instream flow suitability curves: paddlefish[J]. Fws/obs: 12-32.

Kolden E, Fox B D, Bledsoe B P, et al, 2016. Modelling whitewater park hydraulics and fish habitat in Colorado [J]. River Research and Applications, 32: 1116-1127.

Korman Josh, Walters Carl, Martell S J D, et al, 2011. Effects of flow fluctuations on habitat use and survival of age-0 rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in a large, regulated river 1[J]. Can J Fish Aquat Sci, 68(6): 1097-1109.

Lacey R W J, Neary V S, Liao J C, et al, 2012. The IPOS framework: linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers [J]. River Research and Applications, 28(4): 429-443.

Larscheid J G, Hubert W A, 1992. Factors Influencing the Size Structure of Brook Trout and Brown Trout in Southeastern Wyoming Mountain Streams [J]. North American Journal of Fisheries Management, 12(1): 109-117.

Leclerc M, Boudreault A, Bechara T A, 1995. Two-Dimensional Hydrodynamic Modeling: A Neglected Tool in the Instream Flow Incremental Methodology [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 124(5): 645-662.

Poff N L, Allan J D, Bain M B, et al, 1997. The natural flow regime [J]. BioScience, 47(11): 769-784.

Railsback S F, Harvey B C, 2002. Analysis of habitat-selection rules using an individual based model [J]. Ecology, 83(7): 1817-1830.

Roni P, Hanson K, Beechie T, 2008. Global review of the physical and biological effectiveness of stream habitat rehabilitation techniques [J]. North American Journal of Fisheries Management, 28(3): 856-890.

Silva A T, Katopodis C, Santos J M, et al, 2012. Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow [J]. Ecological Engineering, 44: 314-328.

Smith I, 1975. Turbulence in lakes and rivers [M]. Freshwater Biological Association: 79-80.

Yi Y J, Wang Z Y, Yang Z F, 2010. Impact of the Gezhouba and Three Gorges Dams on habitat suitability of carps in the Yangtze River [J]. Journal of Hydrology, 387: 283-291.

Wutong River Fish Habitat Survey and Modeling Under Ecological Restoration

ZHAO Shang-fei^{1,2}, DU Yan-liang¹, WANG Yu³, YIN Shu-hua¹, WANG Shi-yan¹, XU Jian-xin²

(1.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P.R.China;

2.North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, P.R.China;

3.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P.R.China)

Abstract: Wutong River is the primary tributary of Songhua River, and historical data shows that it was an important fish spawning ground. In recent years, the fishery resources in Wutong River have declined as a result of rapid economic development. In this study, we analyzed the effects of hydrodynamic changes resulting from ecological restoration of Wutong River fish habitat, based on field investigations and habitat modeling. The reaches investigated are in the Xiaoshanliangzi section of the lower Wutong River. The fish survey was conducted in a straight reach (SR) in September, 2016 and the spur dike reach (SDR) in September, 2017. Based on the intra-flow increase method (IFIM), The RIVER-2D model was applied to simulate fish habitat in the SR and SDR sections under four different flow regimes. Habitat suitability under the different flow conditions was evaluated based on flow velocity, water depth and the proportions of pool, backwater and marsh areas. The combined habitat suitability index (CSI) was used to classify habitat as good, moderate or poor. The distribution of different habitat grades in the SR and SDR sections under the four flow regimes were modeled and the results were verified using fish survey data. These results were used to evaluate the improvement of fish habitat due to the ecological restoration project. Overall, moderate level habitat accounted for $>84\%$ in both the SR and SDR at the different flow rates. Increasing the flow rate from the ecological (base) flow ($7.92 \text{ m}^3/\text{s}$) to the average annual flow ($26.42 \text{ m}^3/\text{s}$) significantly changed the proportions of habitat area for each grade. The proportion of poor habitat decreased by 4.9% in the SR and 4.8% in the SDR. The proportion of moderate habitat increased by 4.9% in the SR and decreased by 6.0% in the SPR, and the proportion of good habitat in the SDR increased from 0% to 10.8% . When the flow rate was higher than the annual average flow, the changes in habitat grade were small. Therefore, the average annual flow is the lower limit of optimal flow for the fish community. According to the field fish survey data in the two reaches in September 2016 and 2017, the average body weight and length of *Carassius auratus* and *Saurogobio dabryi* in the SDR were heavier and longer than those in the SR. The modeling results and field data were generally consistent and indicate that the spur dike improved, to some extent, the quality of fish habitat.

Key words: fish habitat evaluation; habitat restoration; RIVER-2D; spur dike; Wutong River