

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.026

裁弯河道内生物栖息地改造及生态流量估算

南军虎¹, 刘一安¹, 陈 垚¹, 张书峰²

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 四川省安全科学技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要:为探讨砾石群布置对裁弯取直河道内生物栖息地的改造效果,并估算改造河段的生态流量,以江西金沙溪为研究区域,选取鲢鱼为研究对象,采用正交试验法和数值模拟方法,研究了最优砾石群的布置形式,并采用生物栖息地法估算了河道内生态流量。结果表明:流量对裁弯河道生物栖息地加权可用面积(WAU)的影响最大,砾石堆积体边长次之,堆积体间距最小,单体砾石边长20 m、砾石间距9 m为最优砾石群布置形式;在原河道平滩流量条件下,裁弯取直后河道内WAU较原河道减小约30%,布置最优砾石群后,裁弯河道内WAU较原河道增加20%,生物栖息地自然化改造效果明显,且不影响河道行洪能力;原河道基本生态流量为 $50\text{ m}^3/\text{s}$,目标生态流量为 $718\text{ m}^3/\text{s}$,改造后裁弯河道基本生态流量为 $218\text{ m}^3/\text{s}$,目标生态流量为 $618\text{ m}^3/\text{s}$ 。

关键词:生态流量;生物栖息地;裁弯河道;砾石群;正交试验;鲢鱼;金沙溪

中图分类号:TV213.4;X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)03-0189-09

Reconstruction of biological habitat and ecological flow estimation in curving cut-off river channel//NAN Junhu¹, LIU Yi'an¹, CHEN Yao¹, ZHANG Shufeng² (1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Sichuan Academy of Safety Science and Technology, Chengdu 610041, China)

Abstract: To explore the effect of gravel group arrangement on the reconstruction of biological habitats and estimate the ecological flow in the reconstructed reaches, selecting Jinshaxi River in Jiangxi Province as the study area, silver carp as the study object, the optimal gravel group arrangement pattern was examined based on methods of orthogonal test design and numerical simulation, and the river ecological flow is estimated based on biological habitat method. The results indicated that flow has the most influences on the weighted usable area (WAU) of the habitat, followed by side length of the gravel accumulation body, while distance between the accumulation bodies has the least influences. The optimal gravel group arrangement type should have 20 m side length of single gravel and 9 m spacing between adjacent gravels. The WAU in the curving cut-off river channel is decreased by approximately 30% compared to that in the original river channel under bank-full discharge condition. The arrangement of optimal gravel group improves WAU by 20% compared to that in the original channel, and significantly improve the biological habitat in the curving cut-off river, with little influence on the flood discharge capacity. The basic ecological flow and the target ecological flow of the original river were $50\text{ m}^3/\text{s}$ and $718\text{ m}^3/\text{s}$, respectively. After the reconstruction in curving cut-off river channel, the basic ecological flow and optimal ecological flow are $218\text{ m}^3/\text{s}$ and $618\text{ m}^3/\text{s}$, respectively.

Key words: ecological flow; biological habitats; curving cut-off river channel; gravel groups; orthogonal test; silver carp; Jinshaxi River

河道裁弯取直是一种常见的自然现象或工程措施,天然的游荡型河流在较长的周期内由于洪水的冲刷,可能会导致河道自然裁弯^[1];将演变到一定程度的弯曲河道人工裁弯是基于防洪目的的河道整

治措施之一^[2]。河道裁弯取直后可以有效改善其行洪条件,解决蜿蜒河道自身存在的一些弊病^[3]。然而,裁弯取直的河道整治方法很大程度上简化了河道形态,导致河流沿岸堆积地貌萎缩,生物群落结

基金项目:国家自然科学基金(52069011,51509123);西北旱区生态水利国家重点实验室开放基金(2019KFKT-9);兰州理工大学红柳优秀青年人才支持计划(HLYQ-9);教育厅产业支撑计划(2021CYZC-27)

作者简介:南军虎(1985—),男,副教授,博士,主要从事水工水力学和生态水力学研究。E-mail:nanjh08@126.com

构简化,同时由于水流流速增大,河道内营养物质流失,导致鱼类等生物的栖息地面积大幅缩小,种群密度下降^[4]。维持适宜的栖息地面积及流量是保证河道内生物生存的前提条件,因此,对自然或人工裁弯河道内生物栖息地的自然化改造及生态流量的研究显得尤为重要。

对水生生物栖息地修复常采用在河道内添加巨石、设置小型丁坝、深槽等方法^[5]。例如:常留红等^[6]研究了丁坝群对鱼类不同成长阶段的影响,并通过工程实例验证了修复效果;Acre 等^[7]对科罗拉多河流域的长背亚口鱼进行了标记和追踪,结果表明目标鱼类多栖息于砾石、巨石和基岩之间,认为人造栖息地能对流域内鱼类保护产生积极效果;Dongkyun 等^[8]对比了在城市渠化河道内分别布置单个巨石、丁坝和深槽后宽鳍鱲栖息地的变化情况,为河道生物栖息地修复提供了参考;Mozzaquattro 等^[9]评估了环境变量(河段坡度和宽度)和空间变量(障碍物高度、距离、水流方向等)对鱼类群落结构的影响,进一步阐述了阻水建筑物对改善鱼类栖息地的重要性。

生态流量的计算对于生物栖息地保护^[10]、流域水资源规划^[11]及生态环境修复^[12]具有重要意义。在生态流量研究方面,基本和目标生态流量分别指维持河流、湖泊、沼泽给定的生态保护目标所对应的生态环境功能不丧失和维持给定生态保护目标需要保留的水流过程^[13]。目前生态流量计算方法主要有水文学法、水力学法^[14]、生物栖息地法和综合法,其中栖息地法因具有针对性强、物理意义明确等特点^[15],在国内外生态流量评估中得到广泛应用。王瑞玲等^[16]构建了黄河鲤栖息地面积与流量的关系曲线,估算了黄河鲤繁殖期最小和适宜生态流量;Wang 等^[17]通过估算生态流量建立了水库运行优化模型,有效解决了生态系统与人类生产生活之间的用水矛盾;Zhou 等^[18]研究了雅尼湿地裂腹鱼产卵期的需水量,并对不同径流条件下裂腹鱼的适宜栖息地面积和连通性进行了预测;侯俊等^[19]分析了流量对长春鳊各个生命阶段栖息地的影响,并采用栖息地法估算了适宜生态流量,可为水利工程建设后的鱼类栖息地保护及生态调度提供参考。

上述关于河道的自然化改造和生态流量的研究大多基于天然河道,鲜有从河道整治到河道栖息地修复,再到生态流量调度完整过程的研究。南军虎等^[20]针对人工裁弯的河道,提出采用砾石群修复河道内的生物栖息地,结果表明在裁弯河道的凹岸布置高密度的砾石群能有效改善生物栖

息地质量,为河道自然化改造提供了新思路。本文以江西省金沙溪弯曲河段为研究区域,以鲢鱼为研究对象,通过设计正交试验研究砾石群的布置形式对裁弯河道的自然化改造效果,并分析流量与鲢鱼适宜栖息地面积的相应关系,确定鲢鱼栖息地的生态流量。

1 研究区概况

金沙溪位于江西省玉山县境内,为信江源河,区域多年平均降水量为 1 857.4 mm。研究河段位于十七都大桥至博士大道弯曲段,长约 2 km,河道平均宽度约 100 m,平均坡降为 0.610‰,河床综合糙率率在 0.032~0.037 之间,上游流域面积为 1 014.5 km²。金沙溪为雨洪式河流,河道呈深“V”形,区域汇流快、洪峰流量大。因弯曲河道在水流的长期侵蚀下,凸岸淤积泥沙,河道过流能力减弱,易发生洪水灾害^[3]。研究假定对金沙溪弯曲段实施裁弯取直,疏通河道并将其拓宽至 200 m 左右,以增强河道的泄洪能力。裁弯河段起始断面桩号为 1+909,终止断面桩号为 3+502(图 1)。



图 1 裁弯前后河道

Fig. 1 River channel before and after curving cut-off

信江流域主要鱼类有鲢鱼、青鱼、鳊鱼等,鲢鱼作为区域优势鱼种^[21],其生长周期短,疾病少,易饲养且经济价值较高,故选取鲢鱼为目标物种。鲢鱼主要以浮游生物为食,喜居于水体上层,是水库、河湖养殖的主要鱼种。根据研究区流量、季节及鲢鱼摄食习性^[22],确定其栖息地类型为索饵场。根据鲢鱼的流速和水深适宜性曲线^[23-24]确定其最佳适宜流速范围为 0.3~0.5 m/s,最佳适宜水深范围为 2~4 m(图 2)。

为提升河道内生物栖息地质量,在裁弯河道内布置如图 3(a)(b)所示的砾石群。因河道凹岸水流受砾石群的影响明显,高密度的砾石群布置可在

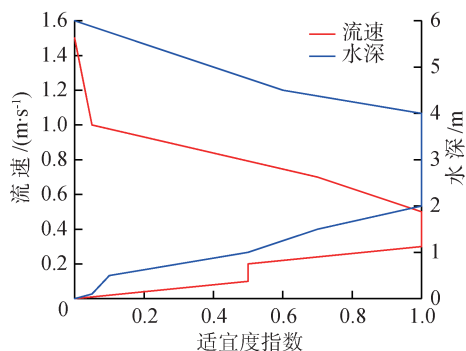


图2 鲢鱼流速水深适宜性曲线

Fig.2 Water velocity and depth adaptivity index curve for silver carp

其下游形成较大面积的低速水域,对提升鱼类的栖息地质量最为有效,因此将砾石群布置于裁弯河道凹岸^[20];同时为便于筛选分析砾石群的最优布置形式,选定布置断面位于裁弯段的四等分线处。单个砾石堆积体由中间为小块石、四周为大块石的砾石堆积而成,并用生态网格固定,高度为4~5 m,物理模型简化为等边三角形。为减小砾石堆积体对河道行洪能力的影响,砾石群仅包含3个单体砾石堆积体,且堆积体之间有一定的间距。裁弯河道两岸由仿石型生态框(图3(c))错落堆积形成护坡结构,腔内回填碎石,常水位以上放入绿化桶,种植绿植,以增加景观效果。

2 研究方法

本文基于 River2D 模型对原河道及改造河道内水动力环境进行数值模拟,并建立生物栖息地与流量变化的动态关系,进而选用栖息地法确定具有生态学意义的生态流量值。

2.1 数值模拟

栖息地模拟模型主要包括水力学模型和栖息地

模型。通过模拟研究河道内不同流量下的流速、水深分布,结合目标生物适宜性曲线计算其栖息地数量。

2.1.1 水力学模型

River2D 水动力模块是基于二维圣维南浅水方程的平均深度有限元模型。模型假定沿水深垂直方向符合静水压强,流速沿深度方向取平均值,科氏力和风力忽略不计^[25]。River2D 模型控制方程包括能量方程、 x 方向动量守恒和 y 方向动量守恒方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

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

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

式中: H 为水深; u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的流速; q_x 、 q_y 分别为 x 、 y 方向上的流量; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; S_{0x} 、 S_{0y} 分别为 x 、 y 方向上的河床坡度; S_{fx} 、 S_{fy} 分别为 x 、 y 方向上的摩阻坡度; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} 为水平方向上的剪切应力张量的分量。

摩阻坡度是根据河床剪应力计算的,假设剪应力与平均流速水深的大小和方向有关, x 方向摩阻坡度可用下式计算:

$$S_{fx} = \frac{\tau_{bx}}{\rho g H} = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{g H C_s} u \quad (4)$$

式中: τ_{bx} 为 x 方向上的河床剪切应力; C_s 为谢才系数。

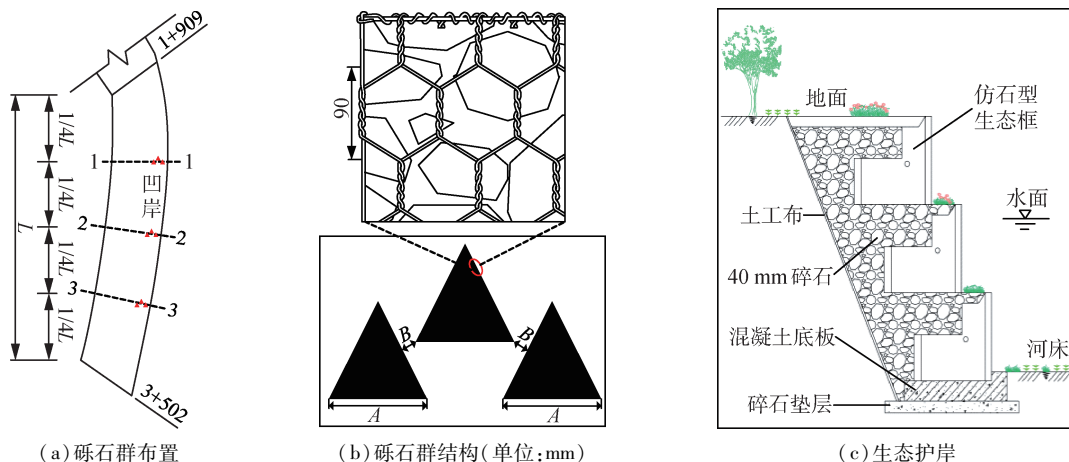


图3 河道自然化改造方案

Fig.3 Naturalized reconstruction scheme of river channel

2.1.2 栖息地模型

采用河道内流量增量法 (instream flow incremental methodology, IFIM) 进行生物栖息地研究,该方法利用栖息地加权可用面积 (weighted usable area, WUA) 对生物栖息地质量进行评价^[26],栖息地加权可用面积表征目标物种适宜物理栖息地面积^[27],计算公式为

A_WU = \sum_{i=1}^n f(V_i, D_i, C_i) A_i \tag{5}

式中:A_WU为栖息地加权可用面积;f(V_i, D_i, C_i)为适宜性组合函数,其中 V_i、D_i、C_i分别代表流速、水深与河床底质的适宜度指数,由于缺少目标物种对河床底质及覆盖物的适宜性资料,C_i默认为 1;A_i为单元网格 i 的面积;n 为单元网格总数。

可用面积百分率 A_PU 表征目标物种 A_WU 与河道总面积的比值^[28]。为便于分析,将 A_WU 转化为 A_PU 以说明河道生物栖息地的质量,二者之间有如下关系:

A_{PU} = \frac{A_{WU}}{A_T} \times 100\% \tag{6}

式中 A_T 为河道总面积。

2.1.3 网格划分

模型网格采用 Delauney 三角剖分,网格密度依据计算结果和河床地形设定,原河道网格大小为 3~10 m,裁弯后的河道较为规整,网格大小为 8~25 m。

2.1.4 边界条件

定义桩号 1+250 和 3+502 分别为上、下游边界,其中上游边界为流量进口边界,下游边界为水位出口边界。金沙溪 20 年一遇设计洪水流量由两部分叠加组成,其中水库下泄流量为 700 m³/s,水库下游区间流域产生的流量为 718 m³/s。以 1418 m³/s 作为研究工况的流量上限,设置丰水期、枯水期和洪水期 3 个流量序列:自 718 m³/s 以 50 m³/s 的流量梯度依次递减至 118 m³/s 的序列作为丰水期流量工况,自 100 m³/s 以 10 m³/s 的流量梯度依次递减至 10 m³/s 的序列作为枯水期流量工况,自 1418 m³/s 以 100 m³/s 的流量梯度依次递减至 818 m³/s 的序列作为洪水期流量工况,共计 30 个流量工况。利用 HEC-RAS 软件,基于伯努利方程采用步推法求解各工况的上下游边界水位^[29],得到各工况下的流量-水位关系作为数值模拟的边界条件。

2.1.5 模型可靠性验证

以原河道中心剖面的水深为对象评估模型的可靠性,在 1418 m³/s 流量下,通过上下游水位边界实测数据,模拟得出特征断面水深,并与实测水深进行

对比,结果见表 1,可见各特征断面中心处的实测水深与模拟水深基本一致,二者的差值小于 0.20 m,说明模拟结果准确,模型合理。

表 1 特征桩号实测与模拟水深对比
Table 1 Comparison between measured and simulated water depth

桩号	实测值/m	模拟值/m	误差/m
1+250	2.45	2.31	-0.14
1+610	4.45	4.37	-0.08
1+909	4.78	4.76	-0.02
2+158	6.03	6.05	0.02
2+522	6.18	6.06	-0.12
3+111	5.16	4.96	-0.20
3+347	5.41	5.32	-0.09
3+502	6.94	6.91	-0.03

2.2 正交试验设计

利用正交试验法设计试验方案能以较少的试验次数找到影响因素与水平之间的最佳搭配。根据实际需要采用 3 因素 (砾石堆积体边长 A、砾石堆积体间距 B、河道流量 C) 正交试验分析砾石群布置形式及流量对河道内生物栖息地质量的影响,表 2 为正交试验影响因素和水平。

表 2 正交试验影响因素和水平
Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	A/m	B/m	C/(m³·s⁻¹)
1	20	3	1418
2	15	6	418
3	10	9	118

3 结果与分析

3.1 裁弯取直的影响

对原河道弯曲段做裁弯取直处理后,河道进出口水位有了明显下降,在 20 年一遇设计洪水流量下,1+250 和 3+502 断面水位分别下降了 0.64 m 和 2.23 m。同时,裁弯河道内水流流速增大、水深减小、河道内垂向速度梯度增大、沿河道长度方向水流的弗劳德数沿程减小,这些变化有利于提高河道的行洪、输沙能力。然而,以上裁弯河道内水流流态的改变对河道内的生物栖息地产生了较大的破坏。表 3 为 718 m³/s 流量下裁弯前后河道内鲢鱼栖息地模拟结果对比,裁弯河道面积较原河道减少 47434 m², A_WU 较原河道减少 19157 m²,对应 A_PU 减小 2.79%。适宜栖息地主要分布在两岸的有限范围内且不连续,难以为鲢鱼提供稳定的索饵栖息地,因此,需采取一定的措施对裁弯河道内的鲢鱼栖息地进行自然化改造。

3.2 正交试验结果与分析

正交试验方案下鲢鱼栖息地数值模拟结果如表

4 所示,仅以栖息地加权可用面积 A_{WU} 作为评价指标时,方案 6 ($A_1B_1C_1$) 为最优的砾石群特征与流量单个组合,其对应的砾石群布置方案为堆积体边长 20 m、间距 3 m,河道流量 1418 m³/s,裁弯河道总面积为 485 449 m²,其中适合鲢鱼生存的 A_{WU} 为 73 116 m²,相应的 A_{PU} 为 15.06%。

表 3 裁弯前后鲢鱼栖息地模拟结果

Table 3 Silver carp habitat simulation results before and after cutting			
河道类型	A_T/m	A_{WU}/m^2	$A_{PU}/\%$
原河道	532 883	63 394	11.90
裁弯河道	485 449	44 237	9.11

表 4 正交试验方案与试验结果

Table 4 Orthogonal test scheme and results					
试验方案	砾石堆积体边长/m	砾石堆积体间距/m	河道流量/(m ³ ·s ⁻¹)	A_{WU}/m^2	$A_{PU}/\%$
方案 1	20(A_1)	6(B_2)	118(C_3)	37 142	7.65
方案 2	10(A_3)	6(B_2)	418(C_2)	52 466	10.81
方案 3	10(A_3)	3(B_1)	118(C_3)	38 016	7.83
方案 4	15(A_2)	3(B_1)	418(C_2)	53 131	10.94
方案 5	10(A_3)	9(B_3)	1418(C_1)	66 968	13.80
方案 6	20(A_1)	3(B_1)	1418(C_1)	73 116	15.06
方案 7	15(A_2)	9(B_3)	118(C_3)	34 879	7.18
方案 8	20(A_1)	9(B_3)	418(C_2)	64 851	13.36
方案 9	15(A_2)	6(B_2)	1418(C_1)	66 523	13.70

3.2.1 极差分析

极差分析是对正交结果可靠性进行分析和验证的关键步骤,极差 R 表征试验影响因素对结果的影响程度, R 越大,表明相应的影响因素对结果的影响越大。砾石群特征及流量对鲢鱼栖息地的 A_{PU} 极差分析结果如表 5 所示。

表 5 鲢鱼栖息地 A_{PU} 极差分析结果

Table 5 Range analysis on A_{PU} of silver carp habitats					
影响因素	$k_1/\%$	$k_2/\%$	$k_3/\%$	$R/\%$	最优水平
A	12.02	10.61	10.81	1.41	1
B	11.28	10.72	11.45	0.73	3
C	14.19	11.70	7.55	6.64	1

由表 5 可知 R_A 、 R_B 、 R_C 分别为 1.41、0.73 和 6.64,表明流量大小对鲢鱼栖息地 A_{PU} 的影响最大,砾石堆积体边长次之,砾石堆积体间距的影响最小。同时为探讨砾石群特征及流量的最佳组合,遵循评价指标 A_{PU} 越大越好的原则,各影响因素应取指标值最大的水平。分析不同水平下各影响因素对 A_{PU} 的影响指标,得出因素与水平的最佳组合为 $A_1B_3C_1$,与之对应的砾石群特征与流量最佳组合为:砾石堆积体边长 20 m、间距 9 m,河道流量 1418 m³/s。最佳组合并未出现在正交试验中,这也体现出正交试验设计的客观性^[30]。

3.2.2 方差分析

多因素方差分析主要用于研究多个自变量对因变量产生影响的显著性。以砾石群特征及河道流量为自变量, A_{PU} 为因变量,用 SPSS 软件进行方差分析,结果如表 6 所示。对于指定的显著水平,将各个自变量相对应的 P 值与之进行比较,若小于或等于显著水平,可以认为自变量的不同水平对因变量产生了显著影响,相反,则认为没有显著影响。按显著水平 $\alpha=0.05$ 来检验,自变量河道流量 P 值小于显著水平 0.05,即河道流量对 A_{PU} 产生了显著影响,根据显著性 P 值的大小,河道流量对 A_{PU} 影响最大,砾石堆积体边长次之,砾石堆积体间距最小,这与极差分析所得结论一致。

表 6 砾石群特征及流量对鲢鱼栖息地 A_{PU} 的方差分析

Table 6 Variance analysis of gravel group characteristics and flow over A_{PU} of silver carp habitats					
方差来源	偏差平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
A	3.514	2	1.757	3.140	0.242
B	0.867	2	0.433	0.775	0.563
C	67.391	2	33.695	60.223	0.016
误差	1.119	2	0.560		

3.3 布置砾石群的影响

3.3.1 生物栖息地

枯水期、丰水期和洪水期 30 个流量工况的模拟结果表明,当流量达到 818 m³/s 时,水流会大范围溢出主河道,故取 718 m³/s 为原河道的平滩流量。为确定砾石群对鲢鱼栖息地的自然化改造效果和最优砾石群的布置形式,以此流量为典型流量工况,对比分析原河道、布置砾石群前后的裁弯河道内鲢鱼栖息地的变化,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,无砾石布置的裁弯河道内鲢鱼的 A_{WU} 最小,且零散分布在河岸附近,河道内垂向速度梯度较大,河道下游劳德数 Fr 约为 0.4;布置砾石群的裁弯河道下游形成了较大面积的低速水流区, Fr 约为 0.1,垂向流速差明显减小; A_1B_1 和 A_1B_3 砾石群布置方案的 A_{WU} 较无砾石布置方案分别增加了 25 882 m² 和 31 886 m²,较原河道分别增大 6 725 m² 和 12 729 m²,两种方案下流速剪切值均存在较大的横向分布差异,流速大小和分布总体上接近,适宜栖息地分布广泛,并且形成了类似原河道的连续片状栖息地,表明在裁弯河道内布置砾石群能有效改善鲢鱼栖息地质量,为鲢鱼的索饵提供了良好的条件。

为进一步研究 A_1B_1 和 A_1B_3 两种砾石群布置方案对鲢鱼栖息地的改造效果,在典型流量工况下对两种方案进行数值模拟,结果如表 7 所示。除 1418 m³/s 和 418 m³/s 两个流量工况外,其余 6 个工

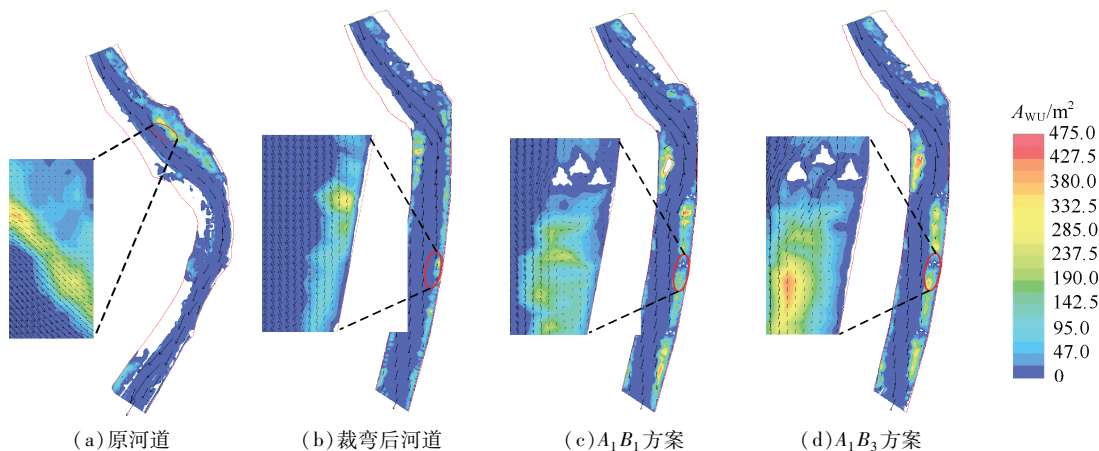


图4 河道内鲢鱼栖息地分布

Fig.4 Silver carp habitat distribution in river channels

况下 A_1B_3 方案的 A_{WU} 均大于 A_1B_1 方案,且 A_{WU} 最大值出现在 A_1B_3 方案的流量序列中,为 $76\,621\text{ m}^2$;在整体河道面积小于原河道,的情况下, A_1B_3 方案中裁弯河道的 A_{WU} 在 $318 \sim 718\text{ m}^3/\text{s}$ 流量区间内均大于原河道,对应的 A_{PU} 也有显著提升。因此,裁弯河道内砾石群的最佳布置方案为 A_1B_3 ,对应的砾石边长为 20 m ,间距为 9 m 。

表7 不同流量下的数值模拟结果

Table 7 Numerical simulation results with different flows

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	A_{WU}/m^2			$A_{PU}/\%$		
	原河道	A_1B_1 方案	A_1B_3 方案	原河道	A_1B_1 方案	A_1B_3 方案
1418	95885	73116	70217	17.99	15.06	14.46
718	63394	70119	76123	11.90	14.44	15.68
618	59587	70481	76621	11.18	14.52	15.78
518	55563	69469	70954	10.43	14.31	14.62
418	50392	71679	64851	9.46	14.77	13.36
318	47377	50121	55066	8.89	10.32	11.34
218	46442	42447	44791	8.72	8.74	9.23
118	44706	37132	38858	8.39	7.65	8.00

3.3.2 水面线

通过布置砾石群改善河道内生物栖息地的方法,其本质是利用砾石群的阻水效应改变裁弯河道内的水流流态,创造类似原河道的流速、水深条件。为探讨砾石群对河道过流能力的影响,在平滩流量 $718\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,对砾石群布置前后裁弯河道典型断面的水面线进行对比,结果见图5,各典型断面平均水面高程的平均值如表8所示。

表8 裁弯河道典型断面的平均水面高程

Table 8 Average water surface elevation in typical section of curving cut-off river channel

断面	水面高程/m	
	有砾石群河道	无砾石群河道
1—1	91.37	91.13
2—2	91.09	91.05
3—3	90.98	90.96

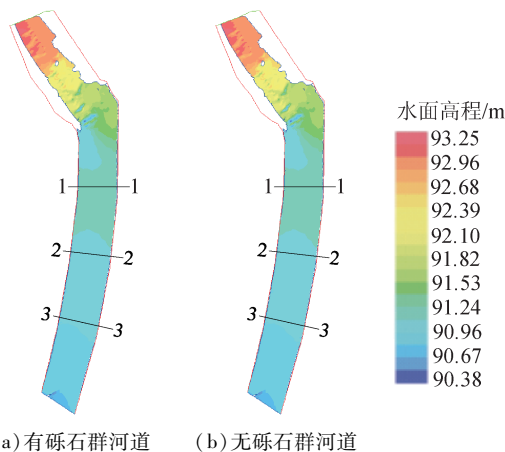


图5 布置砾石群前后裁弯河道水面高程

Fig.5 Water surface elevations of curving cut-off river channel before and after arranging gravel groups

布置砾石群的裁弯河道水面线总体趋势与无砾石群河道相似,裁弯段进口处二者水位基本一致,表明该区域水位受砾石群的影响较小。受河道和砾石群的影响,布置砾石群的河道断面1—1凹岸出现明显的壅水,该断面平均水面高程较无砾石群布置时高 0.24 m ,沿河道宽度方向水面线最大差值为 0.22 m 。沿水流方向砾石群引起的河道内局部壅水高度逐渐减小,在断面3—3上两种河道内下游断面平均水面高程差小于 0.02 m 。综上所述,砾石群的布置对裁弯河道过流能力没有明显影响,能够满足一定的行洪需求。

3.4 河道内生态流量

由前文分析可知,流量对河道内鲢鱼的 A_{WU} 影响最大,因此对河道内生态流量的估算尤为必要。为能够更加全面、准确地估算河道内生态流量,以平滩流量以下的模拟结果作为河道生态流量的估算依据,以20年一遇洪水下的模拟结果作为参照,对计算所得的 A_{WU} 值做归一化处理,定义各工况下 A_{WU} 与

所有工况中最大 A_{WU} 之比为适宜栖息地面积百分比,其随流量的变化如图 6 所示。参考 NB/T 35091—2016《水电工程生态流量计算规范》及相关研究^[16,31]中采用栖息地法确定生态流量的方法,取流量与适宜栖息地面积百分比曲线的明显转折点对应的流量为原河道鲢鱼索饵的基本生态流量,最高点对应的流量为目标生态流量。确定裁弯河道生态流量时,在栖息地法的基础上,同时要求所取生态流量下目标物种的 A_{PU} 不小于原河道。

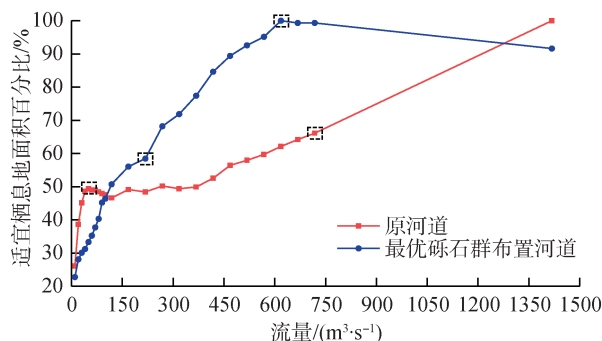


图 6 流量与适宜栖息地面积百分比关系

Fig. 6 Relationship between flow and percentage of suitable habitat area

由图 6 可知,原河道 A_{WU} 的变化趋势可分为 3 个阶段:10 ~ 40 m^3/s 流量区间为原河道 A_{WU} 的快速增长段;50 ~ 368 m^3/s 流量区间内, A_{WU} 在 $(46\ 000 \pm 2\ 000)$ m^2 区间内波动,可见原河道在小流量下具有较强的生物栖息地调控能力,其中 50 m^3/s 是曲线转折点,此时 A_{PU} 为 8.89%,取其为基本生态流量;在 368 ~ 1 418 m^3/s 流量区间, A_{WU} 与流量呈线性正相关变化,但在 718 m^3/s 之后水流会溢出主河道,所增加的水域面积给防洪安全及生物栖息地带来了不确定性,并不能作为鱼类生存的稳定栖息地,故取原河道目标生态流量为 718 m^3/s ,此时 A_{PU} 为 11.90%。

在布置砾石群的裁弯河道内,当流量小于 618 m^3/s 时 A_{WU} 随流量的增大而增大,80 m^3/s 是流量与适宜栖息地面积百分比关系曲线的快速增长点,但此时裁弯河道的 A_{PU} 为 6.36%,小于原河道基本生态流量下的 A_{PU} ,可能是因为河道拓宽以后,水深显著下降导致 A_{WU} 减小;218 m^3/s 是曲线的第二个快速增长点,此时裁弯河道的 A_{PU} 为 9.23%,大于原河道基本生态流量下的 A_{PU} ,确定裁弯河道基本生态流量为 218 m^3/s ;当流量为 618 m^3/s 时 A_{WU} 达到最大值,此时对应的 A_{PU} 为 15.78%,随着流量的进一步增大,曲线呈缓慢下降的趋势,表明在一定的流量范围内,砾石群对河道生物栖息地的影响较为有限,因此取裁弯河道目标生态流量为 618 m^3/s 。

研究表明栖息地法的计算结果一般较水文学法

推荐的生态流量大^[15],同时适宜成鱼索饵的水深较产卵期大^[32],因此适宜鲢鱼索饵的生态流量可能存在偏大问题,工程设计中应予以考虑。本文是对单一鱼种成鱼索饵场流速水深的分析,并未考虑生物化学因素对鱼类生境的影响,如氨氮浓度、溶解氧、浮游生物等,如何综合考虑多种影响因素、多种鱼类、多个成长阶段是未来栖息地改造及生态流量研究的重点。

4 结 论

a. 将河道弯曲段裁弯取直处理后,河道水位下降,流速增加,有利于河道行洪能力的提升,但对河道内的生物栖息地产生了较大的破坏,裁弯取直后河道内 A_{WU} 较原河道减小约 30%。

b. 河道流量对裁弯河道 A_{WU} 的影响最大,砾石堆积体边长次之,砾石堆积体间距最小,最优的砾石群特征组合为砾石堆积体边长 20 m,间距 9 m。

c. 在最优砾石群布置方案下,裁弯河道内 A_{WU} 较无砾石群布置方案增加了 72%,较原河道增加了 20%,为鲢鱼提供了较大范围的索饵场,且布置砾石群后对裁弯河道过流能力没有明显影响,能够有效改善河道的行洪能力。

d. 原河道基本生态流量为 50 m^3/s ,目标生态流量为 718 m^3/s 。布置砾石群的裁弯河道基本生态流量 218 m^3/s ,目标生态流量为 618 m^3/s 。

参考文献:

- [1] SLOWIK M. The influence of meander bend evolution on the formation of multiple cutoffs: findings inferred from floodplain architecture and bend geometry [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41 (5): 626-641.
- [2] SHUKLA S S, MISHRA M. Tracing of palaeochannels of Bakulahi River system in Uttar Pradesh, India [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12 (9): 1-9.
- [3] 李肖男,张红武,钟德钰,等. 黄河内蒙古河段洪水演进与冲淤模拟研究[J]. 水利学报, 2017, 48 (10): 76-89. (LI Xiaonan, ZHANG Hongwu, ZHONG Deyu, et al. Numerical simulation research on the flood propagation and riverbed deformation in the Inner Mongolia reach of the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (10): 76-89. (in Chinese))
- [4] NAKAMURA F, ISHIYAMA N, SUEYOSHIM, et al. The significance of meander restoration for the hydrogeomorphology and recovery of wetland organisms in the Kushiro River, a lowland river in Japan [J]. Restoration Ecology, 2014, 22 (4): 544-554.
- [5] 董哲仁,孙东亚,赵进勇,等. 生态水工学进展与展望 [J]. 水利学报, 2014, 45 (12): 1419-1426. (DONG

- Zheren, SUN Dongya, ZHAO Jinyong, et al. Progress and prospect of eco-hydraulic engineering [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 (12): 1419-1426. (in Chinese)
- [6] 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. (CHANG Lihong, XU Bin, ZHANG Peng, et al. The influence of spur dikes for deep-water channel regulation on fish habitat [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(9): 1086-1094. (in Chinese))
- [7] ACRE M R, GRABOWSKI T B, LEAVITT D J, et al. Blue sucker habitat use in a regulated Texas River: implications for conservation and restoration [J]. Environmental Biology of Fishes, 2021, 104 (4): 501-516.
- [8] DONGKYUN I M, HYEONGSIK K. Two-dimensional physical habitat modeling of effects of habitat structures on urban stream restoration [J]. Water Science and Engineering, 2011, 4 (4): 386-395.
- [9] MOZZAQUATTRO L B, DALA-CORTE R B, BECKER F G, et al. Effects of spatial distance, physical barriers, and habitat on a stream fish metacommunity [J]. Hydrobiologia, 2020, 847: 3039-3054.
- [10] 华祖林, 董越洋, 褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (1): 140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU Kejian. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 140-144. (in Chinese))
- [11] YU Lei, WU Xiufeng, WU Shiqiang, et al. Multi-objective optimal operation of cascade hydropower plants considering ecological flow under different ecological conditions [J]. Journal of Hydrology, 2021 (6): 126599.
- [12] 李泽君, 黄本胜, 邱静, 等. 变化环境下韩江生态流量演变特征分析 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (5): 22-29. (LI Zejun, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Analysis on evolution characteristics of ecological flow of Hanjiang River under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (5): 22-29. (in Chinese))
- [13] 中华人民共和国水利部. 河湖生态环境需水计算规范: SL712—2021 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [14] 金纯, 姜翠玲, 吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (2): 8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2): 8-14. (in Chinese))
- [15] 侯俊, 黄喻威, 苗令占, 等. 基于鱼类栖息地需求的雅鲁藏布江中游环境流量计算 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (4): 8-12. (HOU Jun, HUANG Yuwei, MIAO Lingzhan, et al. Calculating environmental flows in middle reach of Yarlung Tsangpo River based on fish habitat requirements [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (4): 8-12. (in Chinese))
- [16] 王瑞玲, 黄锦辉, 葛雷, 等. 基于黄河鲤鱼栖息地水文-生态响应关系的黄河下游生态流量研究 [J]. 水利学报, 2020, 51 (9): 1175-1187. (WANG Ruiling, HUANG Jinhui, GE Lei, et al. Study of ecological flow based on the relationship between cyprinus carpio habitat hydrological and ecological response in the lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (9): 1175-1187. (in Chinese))
- [17] WANG Z Z, ZHANG L L, CHENG L, et al. Optimizing operating rules for a reservoir system in Northern China considering ecological flow requirements and water use priorities [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2020, 146 (7): 04020051.
- [18] ZHOU Zili, DENG Yun, LI Yong, et al. The ecological water demand of schizothorax in Tibet based on habitat area and connectivity [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16 (17): 16173045.
- [19] 侯俊, 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. (HOU Jun, PEI Jiaqi, HUANG Yuwei, et al. Study on environmental flow of lower reach of Xi County Hub Project based on fish demand [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (2): 8-12. (in Chinese))
- [20] 南军虎, 张书峰, 袁福民, 等. 基于砾石群布置的河道生物栖息地自然化改造 [J]. 水科学进展, 2021, 32 (4): 608-617. (NAN Junhu, ZHANG Shufeng, YUAN Fumin, et al. Naturalization of biological habitat based on arrangement of gravel groups [J]. Advances in Water Science, 2021, 32 (4): 608-617. (in Chinese))
- [21] 童晓峰. 信江水域渔业现状及资源保护策略 [J]. 江西水产科技, 2009 (4): 9-11. (TONG Xiaofeng. Present situation of fisheries and resource protection strategy in Xinjiang water area [J]. Jiangxi Fishery Science and Technology, 2009 (4): 9-11. (in Chinese))
- [22] 陈玲玲, 高月香, 张毅敏, 等. 鲢鳙混养对水环境及氮素迁移转化的影响 [J]. 中国环境科学, 2019, 39 (3): 1181-1188. (CHEN Lingling, GAO Yuexiang, ZHANG Yimin, et al. Effects of *Plagiogathops micrloepis* Bleeker, *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* polyculture on water environment and nitrogen migration and transformation [J]. China Environmental Science, 2019, 39 (3): 1181-1188. (in Chinese))
- [23] 党莉, 马超, 练继建. 水库调节对下游鱼类栖息地适宜性的影响 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2018, 51 (6): 566-574. (DANG Li, MA Chao, LIAN Jijian. Effects of reservoir regulation on downstream fish

- habitat suitability [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51 (6): 566-574. (in Chinese))
- [24] 李鸿源,施上粟,游蕙绫. 利用数值模式分析鱼类栖地多样性研究[C]//第二届黄河国际论坛论文集. 郑州:黄河水利出版社,2005:225-342.
- [25] STEFFLER P, BLACKBURN J. River2D two dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fishhabitat: introduction to depth averaged modeling and user's manual [R]. Edmonton, Canada: University of Alberta, 2002.
- [26] KIDOO P, LEE K S, KIM Y O. Use of instream structure technique for aquatic habitat formation in ecological stream restoration[J]. Sustainability, 2018, 10(11): 1-24.
- [27] 张新华,邓晴,文萌,等. 弯曲分汊浅滩潜坝对洄游鱼类栖息地的影响研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(1): 18-28. (ZHANG Xinhua, DENG Qing, WEN Meng, et al. Impact of submerged spur dike on migrating fish habitat in bending branched shoal [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(1): 18-28. (in Chinese))
- [28] 王晓刚,严忠民. 河道汇流口水力特性对鱼类栖息地的影响[J]. 天津大学学报, 2008, 41(2): 204-208. (WANG Xiaogang, YAN Zhongmin. Effect of hydraulic characteristics of confluent channel on physical habitat for fish communities[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(2): 204-208. (in Chinese))
- [29] CENTER H E. HEC-RAS user's manual version3.1[G]. Davis, CA: U. S. Army Corp of Engineering, 2002.
- [30] 王建东,龚时宏,李光永,等. 低压下流道结构参数对锯齿型滴头水力性能影响的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(1): 72-78. (WANG Jiandong, GONG Shihong, LI Guangyong, et al. The influence of geometrical parameters of dental flow passage of labyrinth emitter on the hydraulic performance under low working pressure [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(1): 72-78. (in Chinese))
- [31] 于子钺,张晶,赵进勇,等. 考虑关键物种全生命周期的减脱水河段生态流量研究[J/OL]. 水资源保护: 1-16 [2021-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20211117.1130.002.html>. (YU Zicheng, ZHANG Jing, ZHAO Jinyong, et al. Ecological flow study of dewatered river sections considering the whole life cycle of key species [J/OL]. Water Resources Protection: 1-16 [2021-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20211117.1130.002.html>. (in Chinese))
- [32] 吕翠美,刘苗苗,王民,等. 基于四大家鱼生境需求的灌河生态需水过程研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(5): 149-157. (LYU Cuimei, LIU Miaomiao, WANG Min, et al. Habitat demand of four major Chinese carps-based study on process of eco-water demand of Guanhe River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(5): 149-157. (in Chinese))

(收稿日期:2021-11-29 编辑:熊水斌)

(上接第 188 页)

- [25] 张应华,仵彦卿,温小虎,等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展, 2006(5): 738-747. (ZHANG Yinghua, WU Yanqing, WEN Xiaohu, et al. Application of environmental isotopes in water cycle[J]. Advances in Water Science, 2006(5): 738-747. (in Chinese))
- [26] 乔红杰,卜东平,张志林,等. 长江口北支枯季盐水倒灌变化趋势分析[J]. 人民长江, 2018, 49(增刊2): 17-20. (QIAO Hongjie, BU Dongping, ZHANG Zhilin, et al. Study on seawater back flowing change trend in dry season at north branch of Changjiang River estuary [J]. Yangtze River, 2018, 49(Sup2): 17-20. (in Chinese))
- [27] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [28] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [29] BELLO M, KETCHEMEN T B, NLEND B, et al. Shallow groundwater quality evolution after 20 years of exploitation in the southern Lake Chad: hydrochemistry and stable isotopes survey in the far north of Cameroon [J]. Environmental Earth Science, 2019, 78(15): 474.
- [30] AGHAZADEH N, MOGADDAM A A. Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater in the Harzandat aquifer, Northwest of Iran [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 176(1/2/3/4): 183-195.

(收稿日期:2021-03-25 编辑:俞云利)