

水库运行对汉江流域草鱼洄游影响评价研究

刘洪蕊^{1,2}, 刘玉芳³, 王结良¹, 尹心安²

(1.32182 部队, 北京 100042;

2.北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;

3.北京环宇立业环保科技有限公司(河北分公司), 河北 唐山 063000)

摘要:水库运行导致河流水文条件发生改变,对鱼类洄游及其性腺发育产生显著负面影响。为了探究丹江口水库运行对汉江草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)洄游的影响,在库区选取 8 个代表点位,设置低水位(142 m)、中水位(153 m)和高水位(165 m) 3 种初水位条件,在获取 2009 年全年实测下泄序列的基础上,另设提高 20%和降低 20%两种下泄情景;根据 2012-2018 年水文年鉴,分别建立黄家港、襄阳、皇庄站断面流量-流速曲线,再结合丹江口水库的下泄流量获取各断面流速;利用三维水动力模型 EFDC 模拟水库不同运行情景下的库区和下泄口水动力条件,建立带有外源输入的非线性自回归神经网络(NARX)模型,预测下游水动力条件;通过室内试验获取草鱼洄游与水文条件响应关系,并建立草鱼洄游适宜度计算公式,评价丹江口水库上游、库区和下游的洄游适宜性。结果表明,时间上,由于 4 月水温升温较慢,且流速较低,草鱼洄游状况劣于 5-7 月;空间上,无论是水库下游还是库区,鱼类洄游状况都劣于未受丹江口水库影响的上游区域。库区极低的流速是影响草鱼上溯的限制因素,而下游降低的流速和水温对草鱼上溯和性腺发育都造成了阻碍。在鱼类洄游期间,降低库区水位、增大下泄量有利于提升库区及下游的流速和水温,改善草鱼洄游的外部环境条件。根据已有水库下泄方案(初始水位 153 m),如果初始水位降至 142 m、下泄流量增大 20%,库区平均洄游适宜度可提高 6.5%,下游可提高 22.0%。

关键词:汉江流域;丹江口水库;草鱼;洄游习性;水文变化

中图分类号:Q958.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)05-0069-09

许多淡水鱼类具有洄游特性(何大仁,1998; Harris et al,2017);对具有生殖洄游习性的鱼类来说,其在适宜水温、流速等环境条件的刺激下,启动洄游习性,伴随着性腺的进一步发育,最终到达产卵场并完成繁殖活动(Northcote,1984; Wang et al,2014;陈求稳等,2020)。然而,大量水库的建设运行不仅阻隔了鱼类洄游通道,还极大地改变了河流的水动力和水温过程,进而影响了鱼类的洄游,最终造成洄游鱼类产卵推迟、繁殖受阻等问题。受水库建设运行影响,1970-2016 年全球范围内淡水洄游鱼类种群数量下降了 76%(Deinet et al,2020)。

汉江是长江最大的支流,也是我国重要经济鱼类“四大家鱼”繁殖的主要河流之一。每年 4-7 月,“四大家鱼”从长江中下游洪泛湖泊启动洄游至长江及支流中上游区域产卵,汉江流域其产卵场分布较

多。在丹江口水库库尾以上,汉江干流的“四大家鱼”有 4 个产卵场(雷欢等,2018);丹江口水库建设运行对汉江流域的洄游鱼类造成了显著的不利影响(汪登强等,2019),其中“四大家鱼”受影响最为严重,其卵苗径流量已从 20 世纪 70 年代的 171.27 亿尾(粒)降至 2014 年的 0.43 亿尾(粒),资源严重衰退(雷欢等,2018)。

除物理阻隔外,水库运行后水文条件的改变也是造成洄游鱼类种群数量锐减的关键因素。适宜的水文条件不仅是生殖洄游鱼类洄游的引导因子,也是促进洄游过程中性腺发育的关键因素(Wang et al,2014;Huang & Wang,2018)。探索水库运行后水文条件的改变对洄游鱼类游泳行为和性腺发育的影响,可为水库生态调度及缓解水利工程的生态影响提供技术支撑。本研究以草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)为研究对象,分析汉江中游丹江口水库不同运行条件对库区及下游河段流场和温度场的影响,评价水库运行对汉江流域草鱼洄游的影响,以期“四大家鱼”洄游环境改善以及汉江流域水生态保护提供基础数据。

收稿日期:2021-07-19

基金项目:国家自然科学基金(52079007)。

作者简介:刘洪蕊,1992 年,女,博士研究生,研究方向为生态水利。E-mail:remain7@163.com

通信作者:尹心安,1981 年,男,教授,主要从事生态水利研究。E-mail:yinxinan@bnu.edu.cn

1 区域概况

丹江口水库位于汉江干流与丹江支流汇合处，是汉江流域水资源开发利用的控制性水利枢纽，具有防洪、供水、发电、航运等功能(图 1)。水库正常蓄水位 170 m，蓄水位库容 290.5 亿 m³，库区具有显著的水温分层结构(段扬等,2018;欧阳炜,2018;秦鹏程等,2018)。丹江口水库坝下至皇庄断面约 285 km 长的河段受水库影响较大,该河段有黄家港、襄阳和皇庄 3 个重要的水文站,分别距离丹江口大坝 6 km、111 km 和 285 km。

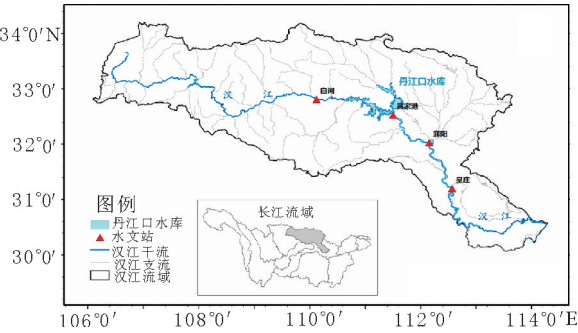


图 1 汉江流域丹江口水库地理位置
Fig.1 Location of Danjiangkou reservoir in Hanjiang river basin

2 研究方法

2.1 库区三维水动力-水温耦合模拟

采用美国环境保护署发布的三维水环境建模系统 EFDC 模型对汉江流域中游水库库区和下泄口水动力、水温条件进行模拟。在前期 EFDC 模型研究的基础上(陈立斌,2015;徐志豪,2018),对水温参数进行了进一步率定和验证,进而设置不同的初水位、下泄条件,分析对应的库区水文变化。由于草鱼为典型的中层栖息鱼类,因此研究选取库区中层水温和流速条件进行分析。在库区选取 8 个代表点位(图 2),开展鱼类洄游评价。

通过 EFDC 模型对 2009 年的丹江口水库水动力条件进行模拟,发现在一定的蓄水位和入流条件下,库区流速基本随下泄量增大而增大,而表层和底层水温差会随蓄水位降低而减小。近 10 年,丹江口水库水位实际运行区间多集中在 139~170 m,为了使水位波动范围尽可能覆盖水库实际运行过程中的水位波动区间,本研究设置了 3 种初水位条件,其中 142 m 代表低水位,153 m 代表中水位,165 m 代表高水位。在获取 2009 年全年实测下泄序列的基础上,另设 2 种下泄情景,即在 2009 年全年实测下泄

的基础上整体分别提高 20%和降低 20%。

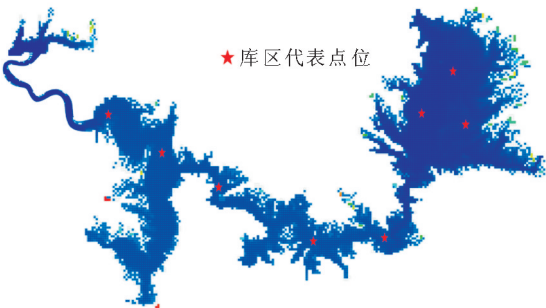


图 2 丹江口水库鱼类洄游适宜度评价点位布设
Fig.2 Location of evaluation points for fish migration suitability in Danjiangkou reservoir

2.2 水库下游河段水动力-水温条件分析

2.2.1 下游河道流速计算 在研究范围内,丹江口水库下泄流量远大于汉江支流流量,因此本研究不再考虑支流汇入。根据水文年鉴 2012-2018 年实测流速、流量数据,分别建立黄家港、襄阳、皇庄站断面的流量-流速曲线,再结合丹江口水库的下泄流量获取各断面的流速。

$$v_1=4.1\times10^{-4}\times f_1-4.95\times10^{-8}\times f_1^2-0.0056$$
$$v_2=2.35\times10^{-4}\times f_2-4.18\times10^{-9}\times f_2^2+0.000298$$
$$v_3=3.3\times10^{-4}\times f_3-7.9\times10^{-8}\times f_3^2+0.27784$$

①

②

③

式中: $v_1\sim v_3$ 分别为黄家港断面、襄阳断面、皇庄站断面流速(m/s); $f_1\sim f_3$ 分别为黄家港断面、襄阳断面、皇庄站断面流量(m³/s)。

2.2.2 下游河道水温计算 水温变化较为缓慢,且当前时刻水温主要与前一时刻的水温和气温有关(图 3)。因此,研究采用带有外源输入的非线性自

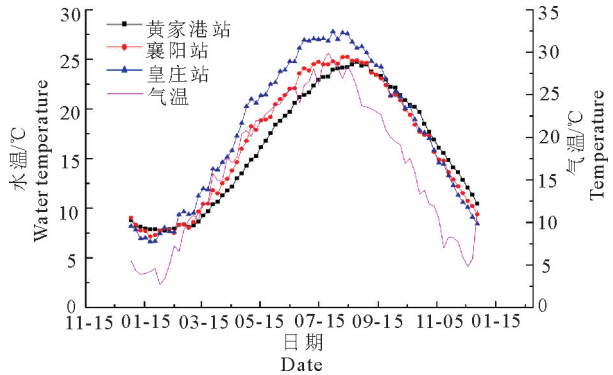


图 3 丹江口水库下游代表断面多年平均水温变化
Fig.3 Changes in the average water temperature of representative sections downstream of Danjiangkou reservoir

回归神经网络建立动态人工神经网络(NARX)模型,分析下泄水温对水库调度方式的响应。NARX可将普通静态神经网络的输出向量延时保持后,通过外部反馈,引入到输入向量中。基于NARX建立的动态ANN模型,可实现对下泄口水温的预测,模型定义如下:

$$y(t) = f[y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n), x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n)] + \text{error} \quad (4)$$

式中: f 为非线性过程函数; $y(t)$ 为 t 时刻的输出; $x(t)$ 为 t 时刻的输入量; n 为延迟时间; error 为误差项。

选取气温、下泄口水温为自变量,以襄阳断面、皇庄断面水温作为响应变量。NARX模型的性能通过平均平方误差(MSE)以及输出的预测值和实际值之间的相关性判定系数(R^2)评估,使用MATLAB2016b完成NARX的训练和测试。测试结果表明,襄阳断面水温预测模型的 R^2 值为0.988、MSE值为0.306;皇庄断面水温预测模型的 R^2 值为0.989、MSE值为1.046,表明新建的2个水温预测模型可有效对下游断面水温进行预测。由于黄家港断面距离丹江口水库下泄口仅6 km,研究直接将下泄口水温视为黄家港断面水温。

2.3 鱼类洄游适宜性评价

2.3.1 适宜度计算公式 鱼类洄游适宜性评价主要涉及游泳行为及性腺发育两方面。根据前期所得室内试验结果(Liu et al, 2021),研究选取上溯成功率作为游泳行为评价指标、性激素浓度增加比作为性腺发育评价指标,采用曲面拟合的方式获取了流速0~0.45 m/s、水温16~24℃范围内草鱼上溯和性腺发育各指标与流速、水温的关系(式⑤、式⑥)。其中,式⑤可以解释试验条件下响应变量上溯成功率43%的变异性($R^2=43\%$),式⑥可解释试验条件下响应变量性激素浓度增加比99%的变异性($R^2=99\%$)。在此基础上,将各指标值进行离散标准化以消除量纲影响,并分别赋予各指标权重,最终建立了草鱼洄游适宜度计算公式(式⑦)。

$$f_1 = -371.08 + 562x + 31.4y - 515.7x^2 - 0.74y^2 - 3.152xy \quad (5)$$

$$f_2 = 0.495 + (0.325 - 0.495)/(1 + y/20.384)^{48.93} \quad (6)$$

$$MS = w_1 \times \frac{f_1 - f_{1,\min}}{f_{1,\max} - f_{1,\min}} + w_2 \times \frac{f_2 - f_{2,\min}}{f_{2,\max} - f_{2,\min}} \quad (7)$$

式中: f_1 和 f_2 分别为鱼类上溯成功率(%)和性激素浓度增加比(m); x 为流速变量(m/s); y 为

水温变量;MS为洄游适宜度,表征鱼类洄游对水文条件的响应,取值在0~1,洄游适宜度值越高,表明洄游效果越好; w_1 、 w_2 分别为上溯成功率及性腺发育指标的权重,均为0.5。 $f_{1,\min}$ 、 $f_{2,\min}$ 分别为上溯成功率、性激素浓度增加比的最小值; $f_{1,\max}$ 、 $f_{2,\max}$ 分别为上溯成功率、性激素浓度增加比的最大值。

2.3.2 上游洄游适宜性评价 丹江口水库上游河段水文条件受水库影响相对较小,选取上游白河水文站作为代表断面,利用2006-2011年水温、流速监测数据计算出对应的上溯成功率、性激素浓度增加比,并将其作为库区和下游洄游适宜性评价的上限标准。

2.3.3 库区洄游适宜性评价 选取丹江口库区8个点位对应上溯成功率的最小值作为库区上溯成功率参考值。选取8个点位对应的鱼类性腺发育计算值的平均值作为性腺发育水平参考值。在整个洄游期(4月1日-7月31日),以旬为时间单位,将库区的逐旬上溯成功率、性腺发育值与上游白河断面的逐旬上溯成功率、性腺发育值作比较,可以得到库区的上溯适宜值和性腺发育适宜值。

2.3.4 下游洄游适宜性评价 与库区鱼类上溯成功率和性腺发育值计算方法相似,选取下游3个断面对应上溯成功率的最小值作为下游上溯成功率参考值,选取整个洄游期性腺发育值平均值作为性腺发育水平值。

3 结果与分析

3.1 水库不同运行情景对水温和流速的影响

不同水库初始水位下的水温变化趋势如图4所示。初始水位越低,库区和下泄口水温升高越快。现状下泄流量下,初始水位142 m时,5月中上旬下泄水温可达到18℃;而初始水位153 m和165 m情景下,水温达到18℃的时间分别为5月下旬和6月初,较1986年水温监测结果推迟15 d以上(易伯鲁等,1988)。在6月初,汉江干流上游的水温可达20℃,比高水位运行状态下的水库库区和下游水温达到20℃的时间提前15 d。当库区初始水位较低时,水深较浅,水体流动也较水位较高时明显,有利于促进热量交换。增大下泄量可以降低库区水位,同时增大水体流动,促进热量交换,因此有利于提高库区及下游河道水温。当水库初始水位为142 m,下泄量增大20%,洄游期(4-7月)的下泄水温最高;而水库初始蓄水位为165 m、下泄量降低20%的时候,洄游期间的下泄水温最低。

增加 20% 的下泄对库区水温改善作用随着库区水位增大而增大。当水库位于 165 m 时,增大 20% 的下泄量可以提高库区水温约 1℃。与改善库区水温的方式相似,下泄量的增大有利于提高下游水温。当水库初始水位为 142 m,下泄量在现行下

泄规则下增大 20% 的时候,洄游期(4 月-7 月)的下泄水温最高;而水库初始蓄水位为 165 m、下泄量降低 20% 的时候,洄游期间的下泄水温最低。可以看出,在鱼类洄游期间降低库区水位、或者增大下泄量都是改善库区和下游水温的方法。

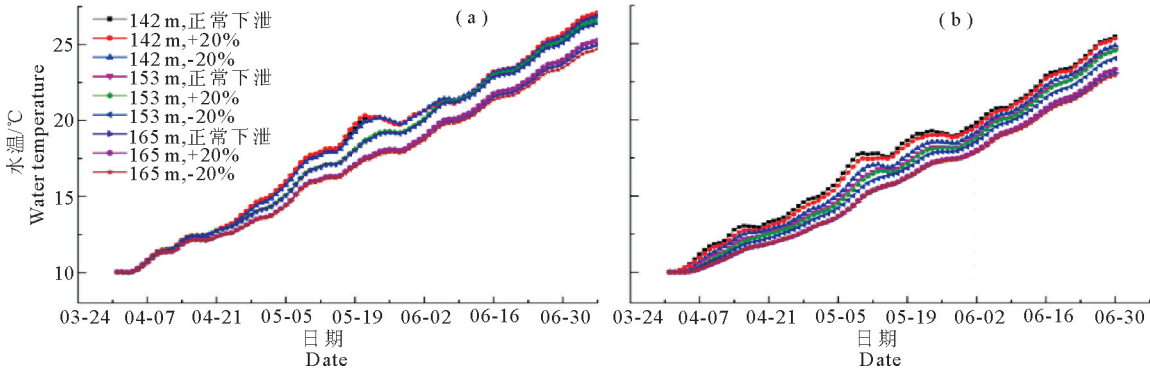


图 4 不同初始库区水位条件下库区(a)和下泄口(b)水温变化

Fig.4 Water temperature changes in the reservoir(a) and discharge outlet(b) under different initial reservoir water levels

对库区来说,丹江口水库在 4-7 月的流速都不超过 0.2 m/s(图 5),这也意味着“四大家鱼”很难在丹江口库区识别出洄游路线。丹江口水库的水流环境也造成了库区鱼类以非洄游性、喜静缓流鱼类居多(伦峰等,2016;白敬沛等,2020)。水库不同运行方式会造成库区流速略有差异,但影响不显著。当水库运行水位较低、下泄量较大时,库区的流速状况整体上好于水库运行水位高、下泄量小的流速状态;同时,当水位较低时,加大下泄可以在一定程度上提高库区流速。

水库正常下泄状态下,下游流速大大降低,黄家港断面的日均流速在 0.17~0.40 m/s,平均流速为 0.26 m/s;襄阳断面的日均流速在 0.26~0.47 m/s,平均流速为 0.41 m/s;皇庄断面的日均流速在 0.39~0.51 m/s,平均流速为 0.47 m/s(图 6)。

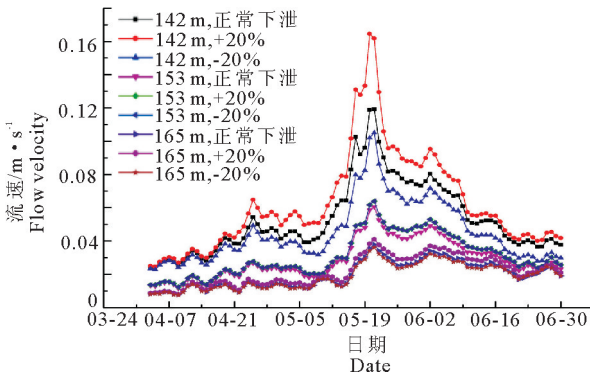
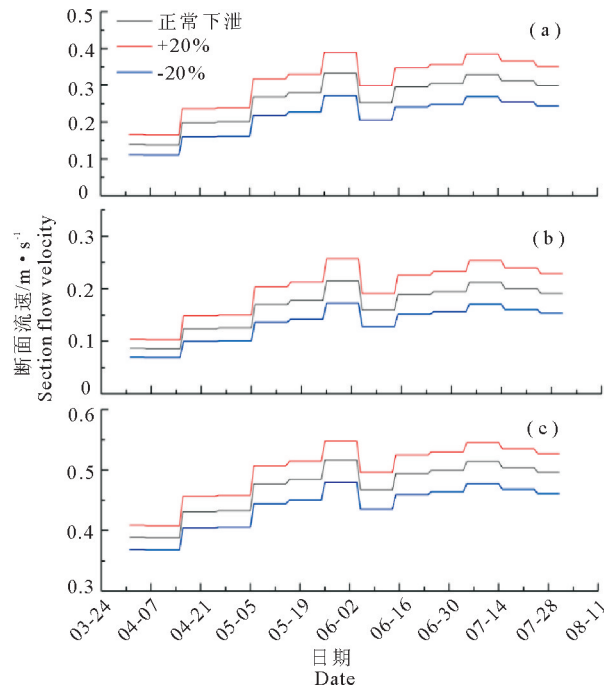


图 5 不同水库初水位和下泄情景下丹江口库区平均流速变化

Fig.5 Changes of average flow velocity in the reservoir area under different initial reservoir water levels and discharge scenarios

草鱼洄游期间,水库运行大大降低了下游各断面的流速。在整个鱼类洄游期间,白河水文站的日均流速在 0.4~1.9 m/s,平均流速为 1.0 m/s;而在



(a)黄家港;(b)襄阳;(c)皇庄

图 6 不同下泄情景时下游各断面流速变化

(a)Huangjiagang; (b) Xiangyang; (c) Huangzhuang

Fig.6 Flow velocity changes at different sections under different initial reservoir water levels and discharge scenarios

在草鱼洄游期间,下泄量对下游的流速影响较大,当下泄增大 20% 时,黄家港、襄阳和皇庄断面的流速都能满足“四大家鱼”洄游的流速条件。当下泄量过少,即低于正常下泄的 20% 时,鱼类的洄游受到较大影响,直到 5 月下旬,黄家港下游的水流刺激才可以为鱼类洄游提供方向指引。

3.2 不同运行情景下库区鱼类洄游适宜性

库区的上溯适宜值整体偏低,最大值不足 0.2。大型水库往往具有较高水位和较大面积,库区水体

接近于静水环境,这对鱼类的洄游是很大的挑战 (Xu et al, 2017)。水位对上溯适宜值有负面影响,这主要是因为高水位带来水深增大和库区流速减小,导致鱼类失去洄游的“指示线索”;而低水位情景下,增大下泄能更加有效提高库区流速。除 4 月上旬外,库区的性腺发育适宜值都接近于 1,这意味着库区草鱼的性腺发育速率与丹江口水库上游白河监测断面的草鱼性腺发育速率类似。不同水库运行情景下草鱼的上溯适宜值和性腺发育适宜值见图 7。

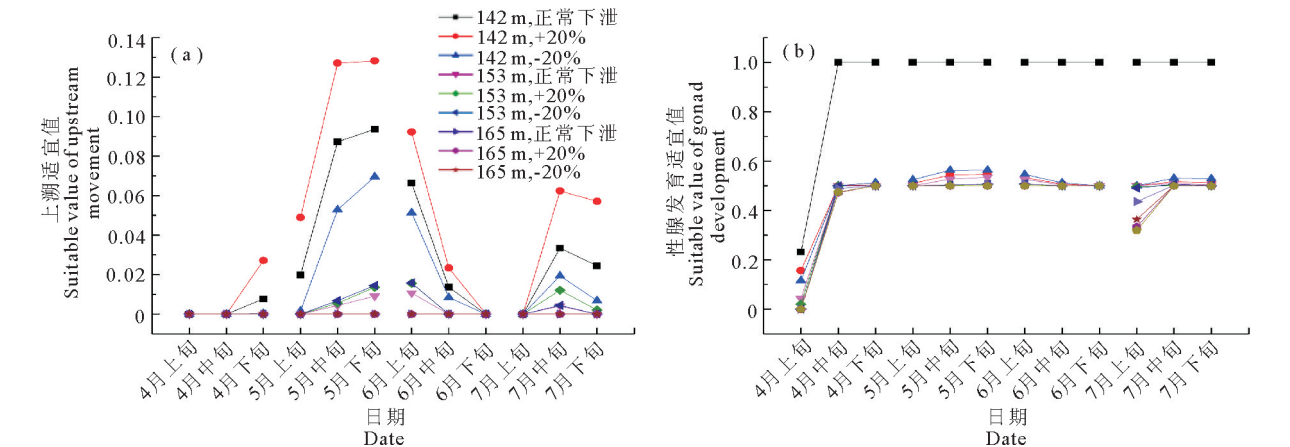


图 7 不同水库运行情景下草鱼在库区的上溯适宜值(a)和性腺发育适宜值(b)
Fig.7 Upstream movement suitability value (a) and gonad development suitability value (b) of grass carp in the reservoir under different reservoir operation scenarios

基于式⑦计算了库区草鱼洄游适宜度(图 8)。在丹江口库区,4 月上旬的鱼群洄游适宜度偏低,各种水库运行情景下的洄游适宜度不超过 0.20,表明保证鱼类洄游和性腺发育的水文条件适宜性很低。4 月中下旬后气温和水温有明显上升,库区的洄游适宜度也有显著上升,从 4 月上旬的均值 0.07 直接上升至 0.50,表明 4 月中旬的鱼群洄游适宜度达到了一般水平;此后的鱼类洄游适宜度平均值一直在

0.50 左右波动。低流速条件使得库区的洄游适宜值始终处于极低水平,各种情景下都不超过 0.20,这也最终增大了提高库区洄游适宜度的难度。

分析各种情景对应洄游指标(表 1),可见低水位和加大下泄量的情况下,鱼类性腺发育适宜值、上溯适宜值、库区草鱼洄游适宜度略高于其他情景对应值。当初始水位降至 142m、下泄流量增大 20% 时,库区草鱼洄游适宜度可提高 0.03,增幅达 6.5%。与未受丹江口水库影响的白河站洄游结果相比,库区的洄游适宜度整体偏低,这主要由库区洄游成功率偏低导致。当库区水位处于 142 m 水平时,在原有下泄策略下将下泄量提高 20%,上溯适宜值可提高 62%,但也仅 0.05,仍然处于极低水平。相较于提高下泄量,水位的降低可直接改善库区的流速,进而有效提高库区的洄游成功率;此外,当库区水位较高时,水温会有所降低,而低水温、低流速下鱼类的洄游意愿被进一步降低。当水位较低时,库区平均水温有所提高,有利于促进草鱼的性腺发育。

3.3 不同运行情景水库下游河段鱼类洄游适宜性

与库区的流速环境不同,下游的流速较高,对应的上溯适宜值也较库区有明显上升(图 9-a)。下

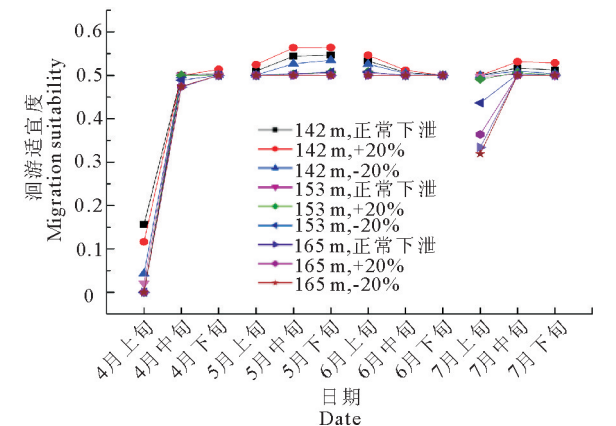


图 8 不同水库运行情景下库区草鱼洄游适宜度
Fig.8 Migration suitability for grass carp in the reservoir under different reservoir operation scenarios

泄量直接影响下游的流速,因此提高或减少下泄量对下游上溯适宜值有很大影响。与库区水温不同,洄游期间下游水温偏低,因此下游对应的性腺发育适宜值低于库区(图 9 - b)。下游河流水温主要受下泄水温影响,而在高水位运行状态时往往会造成

库区底层水温降低,进而导致下泄水温偏低。下泄量对于性腺发育适宜值的影响低于水位的影响,同一时期,142 m 水位、下泄量减 20% 情景对应的下游性腺发育适宜值高于 165 m 水位、下泄量增加 20% 情景对应的下游性腺发育适宜值。

表 1 洄游期不同水库水位和下泄情景下的库区草鱼洄游适宜值

Tab.1 Migration suitability of grass carps in the reservoir under different reservoir water levels and discharge scenarios during the migration period

库区水位	142 m			153 m			165 m		
下泄情景	正常下泄	+20%	-20%	正常下泄	+20%	-20%	正常下泄	+20%	-20%
性腺发育适宜值	0.94	0.94	0.92	0.92	0.92	0.90	0.88	0.89	0.88
上溯适宜值	0.03	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
洄游适宜度	0.49	0.49	0.47	0.46	0.46	0.45	0.44	0.45	0.44

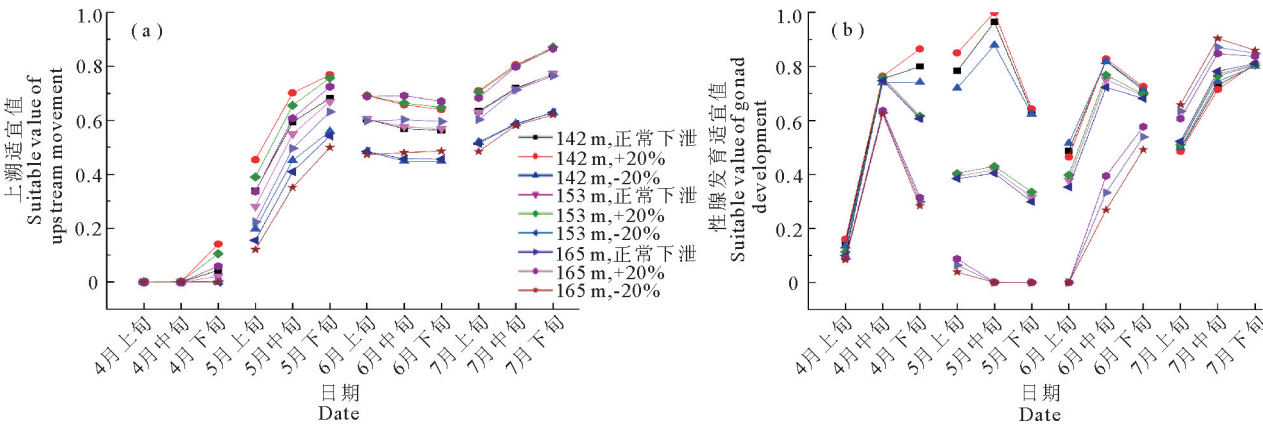


图 9 不同水库运行情景的下游草鱼上溯适宜值(a)和性腺发育适宜值(b)

Fig.9 Upstream movement suitability value(a) and gonad development suitability value(b) of grass carp downstream of the dam under different reservoir operation scenarios

与库区草鱼洄游适宜度类似,4月上旬,下游的洄游适宜度也很低,各种运行情景下都不超过 0.1 (图 10)。随着下游河道水温和流速的改善,洄游适

宜度有一定的提高。整体上,下游的鱼类洄游适宜度受库区水位和下泄量影响都较大。同一时期,低水位、高下泄情景的洄游适宜度远高于高水位、低下泄情景对应的洄游适宜度。水位对洄游适宜度的影响高于下泄量,165 m 水位、下泄量增加 20% 情景下的洄游适宜度仅有 0.20,远低于 142 m 水位下对应的 0.70。同一时期,洄游适宜度的高低对应顺序为:低水位+高下泄情景>低水位+低下泄情景>高水位+高下泄情景。水温是下游洄游适宜度的限制因子,其主要与水库水位相关。

整体上看,下游草鱼洄游适宜度在 0.35~0.61,其性腺发育适宜值低于库区,上溯适宜值高于库区(表 2)。下游河道的流速比库区流速大,而流速对鱼类的上溯有较大的刺激作用(杨庆等,2019),因此下游的鱼类上溯成功率要显著高于库区。然而,由于水库运行显著降低了下游流速,下游鱼类的洄游成功率与上游汉江干流相比,仍处于较低水平,导致下游鱼类的上溯适宜值整体也处于偏低水平。改变下泄量对下游鱼类性腺发育刺激作用不明显,但可

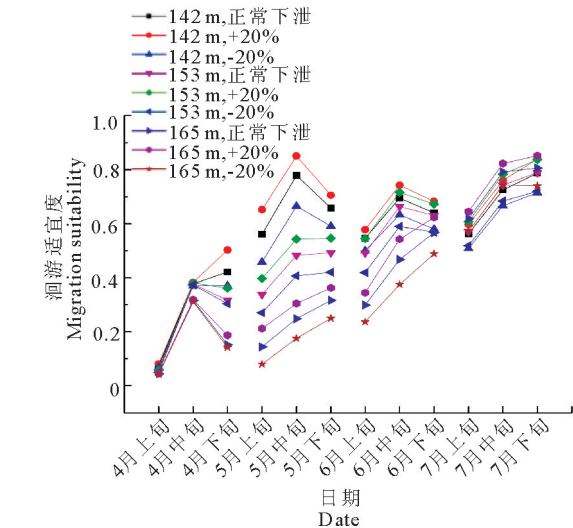


图 10 水库不同运行情景的下游河段草鱼洄游适宜度
Fig.10 Migration suitability for grass carp in the downstream area under different reservoir operation scenarios

以有效提高洄游成功率。在现有下泄策略基础下,提高20%下泄量时可提高下游鱼类洄游成功率7%左右,对应洄游适宜值提高0.07左右;而降低20%下泄可降低鱼类洄游成功率约9%,对应洄游适宜值下降约0.10。

相较于下泄量,水位对下游的草鱼洄游成功率影响较小,主要是因为流速直接影响下游的鱼类洄游成功率,而流速直接受下泄量影响,并不直接受库区初始水位影响。但库区水位对下游鱼类性腺发育有一定影响,在水库初始水位为142 m的情景下,下游鱼类的性腺发育适宜值均在0.65以上,而在165 m水位情景下,下游鱼类的性腺发育适宜值仅

在0.30左右,差别较大。这主要是因为库区水位影响库区和下泄口的水温,而水温是影响鱼类性腺发育的关键参数。因此,为进一步提高下游鱼类洄游成功率,增大下泄是较为直接有效的方式,而为了提高下游的鱼类性腺发育水平,降低水位是最为有效的途径。无论是下游还是库区,水位较低、下泄量较大时,洄游适宜度较高。当初始水位降至142 m、下泄流量增大20%时,下游草鱼洄游适宜度可提高0.11,增幅达22.0%。这主要是因为低水位、大下泄量时,无论是库区还是下游,水温和流速状况都较高水位、低下泄时较好,而较高的水温和较大的流速都有利于提高草鱼的洄游适宜度。

表2 不同水库水位和下泄情景的下游草鱼洄游适宜度

Tab.2 Migration suitability for grass carp in the downstream area under different water level and discharge scenarios during the migration period

库区水位		142 m			153 m			165 m		
下泄情景	正常下泄	+20%	-20%	正常下泄	+20%	-20%	正常下泄	+20%	-20%	
性腺发育适宜值	0.68	0.69	0.66	0.54	0.55	0.54	0.36	0.37	0.35	
上溯适宜值	0.46	0.54	0.36	0.45	0.52	0.35	0.44	0.51	0.34	
洄游适宜度	0.57	0.61	0.51	0.50	0.54	0.44	0.40	0.44	0.35	

无论是洄游成功率还是性腺发育,库区和下游的指标值都低于未受丹江口水库运行影响的汉江上游对应指标值。由于性腺发育具有时间累积性(Honsey et al,2019;Gillooly et al,2002;Kocovsky et al,2012),而库区和下游都对草鱼的性腺发育产生了一定的不利影响,在库区和下游河段连续的影响下,鱼类的性腺发育受到的影响可能高于库区或下游影响的简单加和,最终导致鱼类在产卵场无法达到性成熟。

4 小结

(1)丹江口水库的运行极大地改变了汉江中下游的水温和流速条件。相较于受丹江口水库影响较小的上游,库区流速被严重减缓,最大不超过0.20 m/s;下游流速也大大降低,整体在0.26~0.47 m/s。库区水温高的地方主要分在水深较浅、水动力交换较为频繁处;下游水温随着距离下泄口的距离增加而提高,温差不超过3℃。

(2)整个洄游期间,库区和下游的草鱼洄游适宜度都低于未受丹江口水库影响的上游白河段适宜度。在给定的水库运行情景下,库区草鱼洄游适宜度为0.44~0.49,下游为0.35~0.61。库区主要问题是流速降低导致洄游鱼类难以上溯至中、上游产卵场;下游主要问题是流速、水温降低导致草鱼上溯、性腺发育均受到一定阻碍。无论库区还是下游,

4月的草鱼洄游适宜度都低于5~7月。
(3)水库生态调度可有效改变河流的水动力条件。通过优化水库生态调度方式,在关键时期增大水库下泄、降低水库水位、采取分层取水等方式,可缓解水库运行对鱼类洄游的不利影响。

参考文献

白敬沛,黄耿,蒋长军,等,2020.丹江口水库鱼类群落特征及其历史变化[J].生物多样性,28(10):1202-1212.
陈立斌,2015.南水北调工程影响下丹江口水库水质三维数值模拟研究[D].北京:北京师范大学.
陈求稳,张建云,莫康乐,等,2020.水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施[J].水科学进展,31(5):793-810.
段扬,秦韬,王京晶,等,2018.丹江口水库三维水动力模拟研究[J].人民黄河,40(3):119-122.
何大仁,1998.鱼类行为学[M].厦门:厦门大学出版社.
雷欢,谢文星,黄道明,等,2018.丹江口水库上游梯级开发后产漂流性卵鱼类早期资源及其演变[J].湖泊科学,30(5):1319-1331.
伦峰,李峥,周本翔,等,2016.丹江口水库(河南辖区)鱼类资源调查[J].河南农业科学,45(2):150-155.
欧阳炜,2018.水位变化下丹江口库区消落带土壤氮磷释放规律模拟研究[D].武汉:华中农业大学.
秦鹏程,刘敏,肖莺,等,2018.丹江口水库入库水量与气象因子的响应及其预测[J].长江流域资源与环境,27(3):638-647.

- 汪登强,高雷,段辛斌,等,2019.汉江下游鱼类早期资源及梯级联合生态调度对鱼类繁殖影响的初步分析[J].长江流域资源与环境,28(8):1909-1917.
- 徐志豪,2018.基于生态水文过程的河湖生态流量调控方法研究[D].北京:北京师范大学.
- 杨庆,胡鹏,杨泽凡,等,2019.草鱼洄游的适宜流速条件与适应阈值[J].水生态学杂志,40(4):93-100.
- 易伯鲁,余志堂,梁秩荣,1988.葛洲坝水利枢纽与长江四大家鱼[M].武汉:湖北科学技术出版社.
- Deinet S, Scott-Gatty K, Rotton H, et al, 2020. The Living Planet Index (LPI) for migratory freshwater fish[R]. Technical Report. Groningen, The Netherlands: World Fish Migration Foundation.
- Gillooly J F, Charnov E L, West G B, et al, 2002. Effects of size and temperature on developmental time[J]. Nature, 417:70-73.
- Harris J H, Kingsford R T, Peirson W, et al, 2017. Mitigating the effects of barriers to freshwater fish migrations: the Australian experience[J]. Marine and Freshwater Research, 68(4):614-628.
- Honsey A E, Venturelli P A, Lester N P, 2019. Bioenergetic and limnological foundations for using degree-days derived from air temperatures to describe fish growth[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 76(4):657-669.
- Huang Z, Wang L, 2018. Yangtze Dams Increasingly Threaten the Survival of the Chinese Sturgeon[J]. Current Biology, 28(22):3640-3647.
- Kocovsky P M, Chapman D C, McKenna J E, 2012. Thermal and hydrologic suitability of Lake Erie and its major tributaries for spawning of Asian carps[J]. Journal of Great Lakes Research, 38(1): 159-166.
- Liu H R, Yin X A, Qiu X T, et al, 2021 Coupled influence of flow velocity and water temperature on grass carp swimming behaviour and gonad development [J]. Hydrological Processes, 35(4): e14052.
- Northcote T G, 1984. Mechanisms of fish migration in rivers [M]//Mechanisms of migration in fishes. Springer, Boston, MA:317-355.
- Wang J N, Li C, Duan X B, et al, 2014. The relationship between thermal regime alteration and spawning delay of the four major Chinese carps in the Yangtze River below the Three Gorges Dam[J]. River Research and Applications, 30(8): 987-1001.
- Xu Z H, Yin X A, Sun T, et al, 2017. Labyrinths in large reservoirs: An invisible barrier to fish migration and the solution through reservoir operation [J]. Water Resources Research, 53(1):817-831.

(责任编辑 万月华)

Impact of Reservoir Operation on Grass Carp (*Ctenopharyngodon idella*)
Migration in the Hanjiang River Basin

LIU Hong-rui^{1,2}, LIU Yu-fang³, WANG Jie-liang¹, YIN Xin-an²

- (1.Chinese People's Liberation Army 32182, Beijing 100042,P.R.China;
- 2.School of Environment, State Key Laboratory of Water Environmental Simulation,
Beijing Normal University, Beijing 100875,P.R.China;
- 3.Beijing Uni-Foundation Environment Technology Co., Ltd.
(Hebei Branch), Tangshan 063000,P.R.China)

Abstract: Danjiangkou reservoir is located at the confluence of Hanjiang River and Danjiang river and is the key water control project for water resource development and utilization in the Hanjiang River basin. Reservoir operation alters the riverine hydrological regime and has significant negative impacts on fish migration and reproduction. In this study, grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) were used to explore the impact of Danjiangkou reservoir on the migration of grass carp in Hanjiang River. A three-dimensional hydrodynamic model (Environmental Fluid Dynamics Code, EFDC) was used to simulate hydrodynamic conditions in the reservoir and discharge outlet under different operating scenarios, and a nonlinear autoregressive neural network with external input (NARX) was established to predict hydrodynamic conditions downstream of the dam. The relationship between grass carp migration and hydrological conditions were obtained using laboratory experiments, and a formula for grass carp migration suitability was established to evaluate migration suitability upstream, within and downstream of Danjiangkou Reservoir. Eight representative sites were selected to evaluate grass carp migration. Results show that the operation of Danjiangkou reservoir significantly changes water temperature and flow velocity in and downstream of the reservoir. The highest flow velocity in the reservoir was less than 0.20 m/s, and the downstream velocity ranged 0.26–0.47 m/s. Higher water temperatures primarily distributed in shallow water areas where residence time was low. Temporally, water temperatures increased slowly and flow velocity was low in April, so conditions for fish migration were less suitable in April than in May, June and July. Spatially, suitability for fish migration was lower in the reservoir and downstream than in the upper Hanjiang River, which is not affected by Danjiangkou reservoir. The extremely low flow velocities in the reservoir limit upstream movement of grass carp, and low flow velocity and water temperature below the dam hinder upstream movement and gonad development of grass carp. During the migration period, decreasing the reservoir water level and increasing the discharge will improve flow velocity and water temperature conditions in the middle and lower reaches of Hanjiang River, thereby improving fish suitability for migration. Under the existing reservoir operating scheme (with an initial water level of 153 m), when the initial water level drops to 142 m or the water discharge is increased by 20%, the average migration suitability in the reservoir increases by 6.5%, and downstream suitability increases by 22.0%.

Key words: Hanjiang River basin; Danjiangkou reservoir; *Ctenopharyngodon idella*; migratory characteristics; hydrological changes