

模糊数学方法模拟水库运行影响下鱼类栖息地的变化

李若男¹, 陈求稳^{1,*}, 吴世勇², 蔡德所³, 王洪梅²

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 二滩水电开发有限责任公司, 成都 610021;
3. 广西壮族自治区水利厅, 南宁 530023)

摘要: 水库调度改变了河流水文情势, 从而使得水生动植物栖息地的空间分布发生明显的变化。针对水库运行对鱼类栖息地的影响, 利用模糊数学方法建立栖息地模型, 并与水环境模型耦合, 分析不同水文情势下鱼类在不同生长期的栖息地变化情况。基于专家分析法建立模糊函数隶属度及规则集, 计算栖息地适宜性指数(HSI), 提出适宜栖息地宽度指数(HSWI)表征河道内栖息地连通性, 并对栖息地变化的有效性进行分析。选取漓江下游的某个复式河道为对象, 模拟特征鱼种光倒刺鲃(*Spinibarbus hollandi*) 在典型水文年份中水库不同调节模式下的栖息地变化情况。结果表明, 在丰水年及枯水年的产卵期, 水库补水明显增加了鱼类适宜栖息地面积, 其中高适应性区域面积增幅近 50%, 而平水年影响较小; 水库补水对越冬场的影响则相对微弱, 仅增加 5% 左右。

关键词: 水库调节; 栖息地适应性; 栖息地模型; 模糊数学

Application of fuzzy logic to model fish habitat in the downstream of Lijiang River under reservoir operations

LI Ruonan¹, CHEN Qiuwen^{1,*}, WU Shiyong², CAI Desuo³, WANG Hongmei²

1 Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Ertan Hydropower Development Cooperation, Chengdu 610021, China

3 Water Resources Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530023, China

Abstract: Reservoir operations changed the river hydrological regimes, thus significantly altered the spatial distributions of species habitats. This research developed a fuzzy logic habitat model and combined it with a water quality model to investigate the impacts of reservoir operations on fish habitats, in particular during different life-stages. Ecologist's knowledge was involved in this model to link environmental conditions to the quantitative Habitat Suitability Index of aquatic species. Moreover, Habitat Suitability Width Index was introduced to quantitatively characterize habitat continuity and analyze the validity of habitat variation. The model was applied to a compound channel of the Lijiang River, and simulated the habitat variations of the special fish *Spinibarbus hollandi* for different reservoir operation schemes in three typical hydrological years. The results indicated that water recharge from the reservoir in dry season significantly improved the suitability for fish spawning, in particular for wet and dry years that the high suitability area was increased about 50%. The water recharge had relatively small effects for fish overwintering, and the increase was only 5% in average.

Key Words: reservoir operation; habitat suitability; habitat model; fuzzy logic

河流生态系统是一个包含水体、岸边带、床质及其所承载的生物的复杂性系统。河流的水文情势对河流生态的结构和功能具有重要的影响^[1-7]。水库大坝等水利工程的修建改变了河流的水文情势, 使得环境因子发生变化, 从而改变了水生生物栖息地时间和空间上的分布。栖息地是由生物及非生物因子组成的一个生物

基金项目: 国家自然科学基金委重点基金资助项目(50639070, 50879086); 广西水利厅“十一五”重点资助项目

收稿日期: 2009-01-15; **修订日期:** 2009-07-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qchen@rcees.ac.cn

生长栖息的多维空间^[8-10],生物对每个因子都有一定的耐受范围,且趋向于最适宜的生存空间^[10]。栖息地的变化影响生物的生长、繁衍以及种群的结构与分布,栖息地的退化也是生物多样性下降的主要原因之一^[9, 11-13]。

自 20 世纪 70 年代起,鱼类栖息地的研究一直备受关注,并且成为河流健康影响评价中的重要部分。已经有许多学者从各种角度对鱼类的生存环境进行了评估^[14-21],如,水文、水质及鱼类生理机能和过程等。目前,模糊逻辑、人工神经网络,回归分析、决策树等多种智能方法都已应用在栖息地特别是鱼类栖息地的计算评估中^[22-29]。Jorde^[27]等人指出了现有栖息地模型中存在的问题,如栖息地模型输出的定量值如何映射现实中无法精确描述的实际需求;模型中通常假设不考虑各因子间的相互影响,但实际情况并非如此;缺乏高精度高质量的实测数据等。此外,对于栖息地模型来说栖息地的连续性、连通性很少被考虑在内;有效栖息地面积与鱼类生物量之间的关系也没有明确的理论依据。

模糊数学由 Zadeh 于 20 世纪 60 年代中期提出。相比其他方法,在处理生物与非生物关系的不确定系统中,模糊数学更容易应用专家知识^[30],不需要大量数据进行前期驯化,便于在模型中增加参数,易于理解和应用。迄今为止,大部分以模糊算法为基础的栖息地模型中隶属函数及模糊规则仍然以专家分析法为主^[31-34],但已有许多学者在这方面进行了改进,例如:基于案例的规则提取方法^[30,35],利用爬山法进行优化的数驱模型^[36-37]等。

本文以漓江为研究对象,针对水库运行对鱼类栖息地的影响采用模糊数学方法建立栖息地模型,并与水环境模型耦合,分析不同水文情势下鱼类在不同生长期的栖息地变化情况。基于专家分析法确定模糊函数隶属度及规则集,计算栖息地适宜性指数,并提出适宜栖息地宽度指数表征河道内栖息地连通性,进而分析栖息地变化的有效性。

1 研究区域概况

漓江属于珠江水系,是桂江上游的俗称。发源于华南第一峰猫儿山,源头在八角田铁杉林^[21],源头至阳朔河段长 164km,流域面积达 5660km²,地势北高南低,为一倾斜开阔的岩溶谷地。流域内裸露或者潜覆的岩溶面积约占流域总面积的 65%。本次选取青狮潭水库下游靠近阳朔的一段复式河道进行研究,如图 1。

由于流域降雨的时空不均以及独特的喀斯特地貌,漓江的流量存在显著的季节性差异,丰枯流量变化在 12000—12m³/s 之间,曾出现过 3.8 m³/s 的纪录,严重威胁了漓江的水生态系统。而且,当桂林水文站的流量低于 30 m³/s 时,游船需要的 0.7m 航深无法得到保证,制约了桂林的旅游经济。

青狮潭水库是漓江流域的主要水利设施,在 2005 年前是漓江流域(源头至阳朔段)唯一建成并完全投入使用的大型水库,担负着灌溉、发电、城市供水等方面的任务,自 1987 年开始承担枯季向漓江补水的任务。

2 模型研究

2.1 数据收集

通过 1:50000 的 DEM 数据提取河网,计算各子流域面积。综合漓江流域水文站点的设置及流域面积等方面因素,选取流域面积大于 200km²的支流设置控制端点。

研究河段的水下地形由 YSI 公司生产的多普勒声学测量仪测出,岸边部分人工测量。断面高程使用 GPS 与漓江流域等高线图对照得出,并采用广西水利厅所测的大溶江、桂林、阳朔等断面进行高程校正。水质参数选取温度、溶解氧两项参数,使用 YSI 水质监测仪测量。监测频率为每月 1 次。

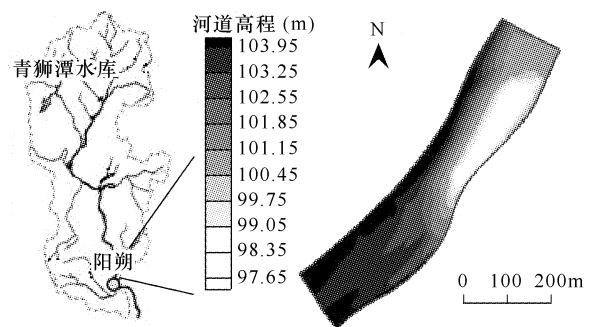


图 1 研究区域和重点研究河段的河床高程

Fig. 1 The study site and the bed elevation of the studied compound channel

2.2 典型年份

应用水文分析方法,以桂林为控制点,经过对 1987—2004 年水文资料的分析计算,确定了研究河段的丰、平、枯水文年份(表 1)。

表 1 典型水文年份
Table 1 Typical hydrologic year

典型水文年份 Typical years			\bar{R}	C_V	C_S/C_V
丰水年 Wet year ($P=10\%$)	平水年 Even year ($P=50\%$)	枯水年 Dry year ($P=90\%$)			
1993	1999	2004	40.59	0.21	2.0

\bar{R} :多年平均径流 $\times 10^8 \text{m}^3$; C_V :变差系数; C_S :偏差系数

2.3 研究鱼类选取

通过 2006—2007 年 2 次的现场鱼类调查结果,并结合对当地渔业部门以及渔民的访谈情况,确定了研究物种为光倒刺鲃(*Spinibarbus hollandi*)。S. hollandi, 鲤科,多居住在水流较急、水质清澈、砂石底质的河道中^[38]。S. hollandi 是漓江主要的经济鱼类,在珠江水系的上游和中游都有分布^[38]。

1970 年前,S. hollandi,是漓江流域内产量仅次于鲤鱼的鱼类。但近年来由于酷渔滥捕,该鱼的产量急剧下降。目前,国内外对该鱼种的研究主要围绕鱼塘经济养殖。蔡子德等人对 S. hollandi 繁殖方面的研究表明该鱼种需要 3a 的时间才可达到性成熟^[39]。胡隐昌等人确定了人工养殖状态下 S. hollandi 最适温度和溶解氧范围^[40]。

2.4 水环境模型

研究中水环境模拟采用二维浅水方程组及对流扩散方程^[41-42]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = Q_a \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} \tau_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + fu + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} \tau_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_x \partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D_y \partial c}{\partial y} \right) + S + f_R(c, t) \quad (4)$$

式中, Q 为流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); H 为水位(m); t 为时间(s); u, v 为 x, y 方向上的流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); ν 为水平粘性系数($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), c 为 t 时刻 x 位置物质浓度($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); S 为源相($\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$); f 为科氏力系数; τ_x, τ_y 为底部切应力($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$); D_x, D_y 为扩散系数($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。 $f_R(c, t)$ 为反应项,其具体表达形式根据物质的不同而不同。

溶解氧计算中考虑水体自身负荷、对流扩散过程、大气复氧及有机物耗氧过程。由于漓江河道内浮游植物很少,水生植物多为沉水植物,在冬春季生物量较低,而且监测资料非常少,光合作用产氧与大气复氧相比可忽略。污染物耗氧来主要包括碳化过程及硝化过程,一般情况下只考虑 BOD_5 ,本文中各端点断面 BOD_5 指标由实验室进行月监测。这样式(4)中的 $f_R(c, t)$ 变为:

$$f_R(C_D, t) = K_2(C_s - C_D) - K_1 C_B \quad (5)$$

$$\frac{dC_B}{dt} = -K_1 C_B \quad (6)$$

$$K_1 = \left(K_{1,20} + \alpha \frac{u}{h} \right) \theta_r^{T-20} \quad (7)$$

$$\alpha = 0.197 t^{0.599} \quad (8)$$

$$\alpha = K_{2,20} \theta_r^{T-20} \quad (9)$$

其中, BOD_5 模型中式(8,9)采用经验公式^[43]。

式中, C_D 为溶解氧浓度(g/m^3); C_s 为水温 T 下饱和溶解氧浓度(g/m^3); C_B 为五日生化需氧量(g/m^3); K_1 为水温 T 下 BOD_5 降解速率常数; $K_{1,20}$ 为水温 $20^\circ C$ 时 BOD_5 降解速率常数; α 为水动力影响系数; i 为河流坡降(%); u 为流速(m/s); h 为水深(m); K_2 为水温 T 下大气复氧速率系数, 与河流水深、流态及温度有关, $K_{2,20}$ 为温度为 $20^\circ C$ 时的大气复氧度率, $\theta_r = 1.024$; t 为污染物在水体中停留时间(d)。

河流水温变化主要与太阳辐射及大气和河床底部的热量交换有关, 一般认为土壤与水体的热量交换较小, 可忽略不计。在源项中, 考虑太阳辐射^[44]、水面蒸发及与大气间的热传导通量, 这样式(4)中的 $f_R(c, t)$ 变为:

$$f_R(C_p, t) = \frac{\varphi}{\rho C_p h} \quad (10)$$

$$\varphi = \varphi_s - \varphi_e - \varphi_c \quad (11)$$

$$\varphi_s = S_{s0}(1 - \gamma)(1 - 0.65C^2) \quad (12)$$

$$\varphi = \beta f(W)(T_s - T_d) \quad (13)$$

$$\varphi_c = 0.47f(W)f(T_s - T_a) \quad (14)$$

式中, φ 为进入水体的热通量(W/m^2); ρ 为水的密度(g/m^3); C_p 为水的比热; h 为水深(m); φ_s 为太阳总辐射(W/m^2); φ_{s0} 晴天太阳总辐射, (W/m^2); γ 为水面反射率, 一般取 0.03; C 为云层覆盖率; $f(W)$ 为风函数, $f(W) = 9.2 + 0.46W^2$; W 为水面上 10m 处风速(m/s); T_s 为水表面温度(K); T_d 为露点温度(K); $\beta = 0.35 - 0.015T + 0.0012T^2$, $T = (T_s + T_d)/2$; φ_c 为热传导通量(W/m^2); T_a 为水面上 2m 处气温(K)。

水动力模型中, 以日均流量作为上游边界条件; 以日均水位作为下游边界条件。水质模型考虑溶解氧及水温两个参数, 输入频度为每个控制端点每月 1 次。

水动力模型的流速初始条件以冷启动形式给出, 同时端点赋予当日流量及水位值, 在完成 3d 的计算后可以消除冷启动带来的影响。水质参数的初始值由观测值给出, 通过与水动力模型的耦合计算, 在完成 3d 的计算后也可以消除由水动力冷启动带来的误差。

模型参数初始值根据实际测量计算及资料查阅^[45-48]确定:

(1) 模型时间步长设为 1s, 空间步长设为 20—40m。

(2) 曼宁糙率系数取值范围为 0.4—0.5 之间。

(3) BOD_5 降解速率取 0.04—0.08 d^{-1} 之间, 硝化速率取 0.16—0.25 d^{-1} 之间。

(4) 大气复氧速率采用丘吉尔公式, $K_2 = (0.746U^{2.695}/H^{3.085}J^{0.823}) \cdot 1.024^{t-20}$, 其中 U 为平均流速, H 为平均水深, J 为水面坡降。

2.5 栖息地模型

鱼类栖息地模型采用模糊数学方法评价环境条件对于研究的目标生物的适宜程度, 其中利用专家分析法、野外调查与实验相结合确定鱼类对各种因子的模糊隶属度及模糊规则。用水环境模型的结果作为栖息地模型的输入条件, 根据规则判断物种对环境因子的敏感程度, 模型结果为栖息地适应度指数及相关指标。

模糊数学方法的实现是通过一系列的 if-and-then 形式, 并采用几何平均法进行多输入-单输出推理, 模拟结果的解模糊化采用重心法。

S. hollandi 是淡水杂食性鱼类, 整个生命周期都在河流中度过。其中产卵孵化场、捕食场及越冬场对于环境因子的要求各不相同。根据以往的鱼类栖息地研究^[14-19, 25-29, 36-37], 选取 4 个基本的影响因子对栖息地进行分析, 分别是 2 个水动力因子(流量、流速)和 2 个水质因子(水温、溶解氧), 根据对 *S. hollandi* 的生物习性研究^[39-40, 49-52]结合当地鱼类专家经验总结, 确定隶属函数(图 2)及模糊规则(表 2)。

研究选取 *S. hollandi* 的两种生存环境进行适宜性评价, 分别为产卵场和越冬场。*S. hollandi* 的产卵期在每年上半年的 4 月至 5 月份, 越冬期为每年 12 月至翌年 1 月份。由水环境的模拟结果看出, 研究区域内溶解

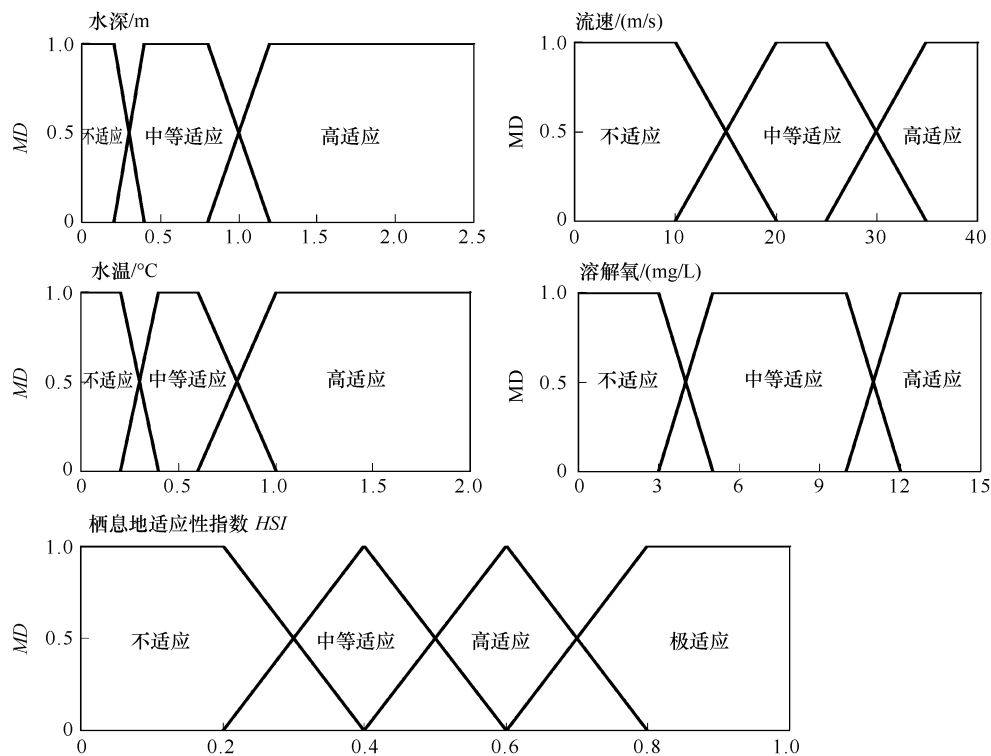


图2 各参数隶属度

Fig. 2 Membership degree

氧的变化范围始终在非常适宜的范围内,所以在模糊规则表中没有列出溶解氧这一项。模糊规则的建立根据对 *S. hollandi* 的生物习性研究结果并结合当地鱼类专家经验,最终规则如表 2 所示。

模型结果除了 *S. hollandi* 栖息地适应性外,还包括加权栖息地面积和水力栖息地适宜指数^[13]:

$$WUA = \sum_{i=1}^n A_i HSI_i \quad (15)$$

$$HHS = \frac{1}{\sum_{i=1}^n A_i} \sum_{i=1}^n A_i HSI_i \quad (16)$$

$$MD_{HSI} = \sqrt[4]{MD_D MD_T MD_V MD_{DO}} \quad (17)$$

式中, WUA 为加权栖息地面积(m^2); HHS 为水力栖息地适宜指数; A_i 为计算单元 i 的面积(m^2); HSI_i 为计算单元 i 的栖息地适应性指数; MD_{HSI} 为栖息地适应性指数的隶属度; MD_D 为水深的隶属度; MD_T 为水温的隶属度; MD_V 为流速的隶属度; MD_{DO} 为溶解氧的隶属度。

通常认为栖息地适应性指数越高的水域越适于鱼类生存。河流中高适应性栖息地成斑块状分布,面积大、距离近而且连通性好的高适应性斑块能够提供更有效的栖息地。为了在评价栖息地面积的同时考虑栖息地的质量,本研究提出了适宜栖息地宽度指数,定义参见图 3。

图 3 中 A 和 B 为栖息地适应性指数大于 HSI 阈值且单个面积高于面积阈值的任意两个相邻的斑块,其重心分别标记为 A、B, $D_{A,B}$ 为 A 和 B 两点的欧氏距离(m), d_A 和 d_B 为重心到斑块边界的距离(m),则栖息地斑块的宽度指数定义如下:

(1) 若河道中有且仅有一个栖息地斑块,则 $HSWI = 1$ 。

表 2 模糊规则

Table 2 Fuzzy rules used in the model

水深 Water depth	流速 Velocity	水温 Water temperature	栖息地适应性 Habitat suitability		水深 Water depth	流速 Velocity	水温 Water temperature	栖息地适应性 Habitat suitability	
			产卵场 Spawning ground	越冬场 Overwintering ground				产卵场 Spawning ground	越冬场 Overwintering ground
L	L	L	L	L	M	M	H	H	VH
L	L	M	L	M	M	H	L	M	M
L	L	H	L	L	M	H	M	H	H
L	M	L	M	L	M	H	H	M	H
L	M	M	H	M	H	L	L	L	L
L	M	H	M	M	H	L	M	M	M
L	H	L	L	L	H	L	H	L	M
L	H	M	M	M	H	M	L	M	M
L	H	H	L	M	H	M	M	H	H
M	L	L	M	L	H	M	H	M	H
M	L	M	H	H	H	H	L	L	M
M	L	H	M	M	H	H	M	M	M
M	M	L	H	M	H	H	H	L	M
M	M	M	VH	H					

L: 不适应, M: 中等适应, H: 高适应, VH: 极其适应

(2)若河道中有两个或两个以上栖息地斑块,则 *HSWI* 如式(18)所示:

$$HSWI = \sqrt{\frac{\prod_{i=1}^{c_n} \frac{S_A + S_B}{D_{AB}}}{\prod_{i=1}^{c_n} \frac{S_A + S_B}{d_A + d_B}}} \quad (18)$$

式中, n 为栖息地斑块数目, *HSWI* 为适宜栖息地宽度指数; S_A 和 S_B 为两栖息地斑块的面积(m^2)。

3 结果分析

在选取的 3 个典型年份中,河道内水环境因子受补水工程影响有不同程度的变化。补水工程实施后,在 *S. hollandi* 产卵期间,丰水年河道内的水位和流速下降约 13%,枯水年上升约 9%。越冬期间,3 种典型年份

中水动力因子平均升高 1.5%。由于越冬期处于漓江的枯水期,也是旅游淡季,水库补水调控影响较弱。对水质因子来说,该期间水库调节使溶解氧降低了 0.5%,水温平均升高了 0.1%。

由图 4 可以看出研究区域产卵场栖息地适应性指数 (*HSI*) 在补水前后发生了比较明显的变化。实施补水后,研究河段内各典型水文年中高适应性 ($HSI > 0.5$) 区域面积均有所增加。在丰水和枯水年,高适应性区域是补水前近 150%。模拟结果表明,在流速接近 $1 m \cdot s^{-1}$ 、温度约 $22^\circ C$ 时, *HSI* 达到峰值。当流速超过 $1.2 m \cdot s^{-1}$,温度高于 $26^\circ C$ 时, *HSI* 会突然下降。高适应性区域主要位于水深小于 3m 的地方,这里的强对流适于刺激鱼类产卵,也导致溶解氧高于周围水体。在丰水和枯水年,最适宜的产卵区在研究河段下游附近,而在平水年则在上游附近。

由图 5 可以看出,该河段作为越冬场其适应性普遍低于 0.2。但与产卵场类似,水库补水增加了适于越冬的区域面积。较高的 *HSI* 位于水深较大的水域,因为相对浅水区这里温度较高。根据模型结果,当水温 $11-13^\circ C$ 、水深超过 1m、流速约 $0.3-0.4 m \cdot s^{-1}$ 时, *HSI* 较高,但仍不到 0.2。所以,从模拟结果来看,此河段不适合作为该鱼种的越冬场。

表 3 给出了 *WUA* 和 *HHS* 的变化情况。补水工程对两个指数在丰水年和枯水年都有较大的影响,而对平

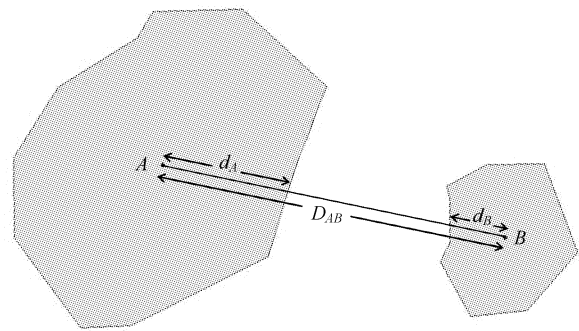


图 3 适宜栖息地宽度示意图

Fig. 3 Sketch of Habitat Suitable Width Index

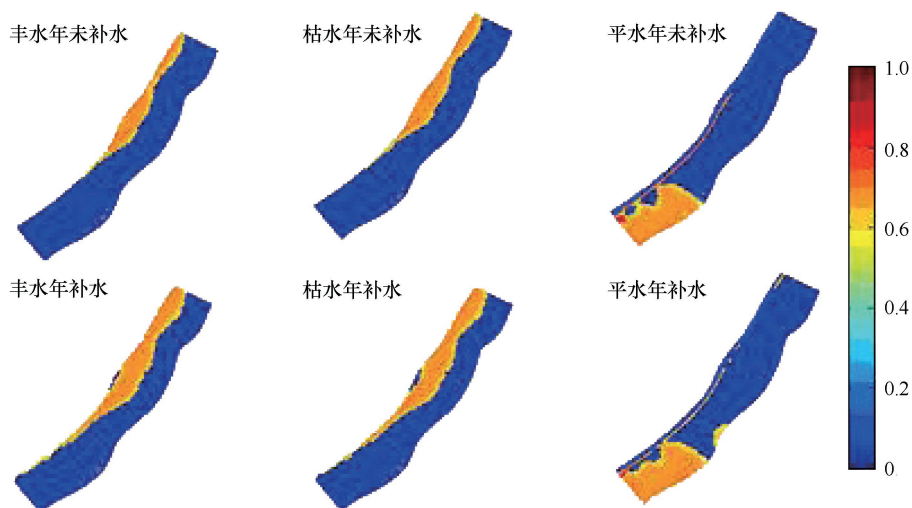


图4 研究河段作为 *S. hollandi* 产卵场 HSI 变化情况
 Fig. 4 HSI variation of spawning ground of *S. hollandi*

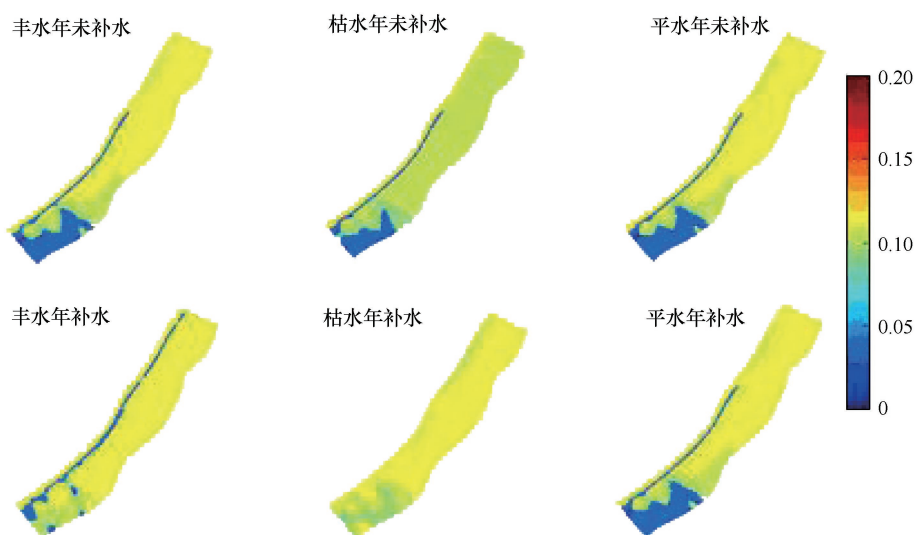


图5 研究河段作为 *S. hollandi* 越冬场 HSI 变化情况
 Fig. 5 HSI variation of overwintering ground of *S. hollandi*

水年影响较小。模型结果表明,在丰水年和枯水年,产卵场面积增幅比越冬场更为明显,其中产卵场高适应性 ($HSI > 0.5$) WUA 面积增幅为 44.2%,越冬场仅增加 5% 左右。

表3 水库补水前后 WUA 和 HHS 变化

Table 3 The variation of WUA and HHS with and without water recharge

项目 Item	产卵场 Spawning ground		越冬场 Overwintering ground		
	非补水 No water recharge	补水 With water recharge	非补水 No water recharge	补水 With water recharge	
WUA	丰水年 Wet year	20982.2	32721.5	14821.2	15562.2
	枯水年 Dry year	24549.7	32817.0	14591.4	16675.1
	平水年 Even year	27580.8	29438.8	14830.0	14838.6
HHS	丰水年 Wet year	0.1398	0.2180	0.0987	0.1036
	枯水年 Dry year	0.1635	0.2186	0.0972	0.1110
	平水年 Even year	0.1837	0.1961	0.0988	0.0989

表4列出了水库补水前后 *HSWI* 指数变化情况,其中产卵场 *HIS* 阈值定为0.5,越冬场 *HIS* 阈值定为0.1。综合表3、表4及图4、图5可以看出:研究河段作为产卵场,在丰水年和枯水年中水库补水导致适宜栖息地面积增加,并且栖息地的连通性持平;在平水年中,适宜栖息地面积增加,但栖息地连通性明显下降,表明增加的栖息地破碎化严重,没有全部形成有效面积。在研究河段作为越冬场时,水库补水导致丰水年栖息地面积增加,连通性虽降至0.803,但仍保持较高水平(图5B);枯水年栖息地面积增大的同时栖息地连通性也有所增大,从而增加了有效栖息地的面积。

表4 水库补水前后 *HSWI* 变化
Table 4 The variation of *HSWI* with and without water recharge

项目 Item	产卵场 Spawning ground		越冬场 Overwintering ground		
	非补水 No water recharge	补水 With water recharge	非补水 No water recharge	补水 With water recharge	
<i>HSWI</i>	丰水年 Wet year	1.000	1.000	0.946	0.803
	枯水年 Dry year	1.000	1.000	0.822	1.000
	平水年 Even year	0.858	0.319	1.000	1.000

综合以上结果,水库补水增加了该河段作为产卵场和越冬场的适宜栖息地面积,但总体来说该河段作为越冬场的适宜性较差。对于产卵场来说,补水工程后丰水年和枯水年的栖息地连通性没有变化,增加的栖息地面积可视为有效栖息地面积,而平水年的栖息地连通性明显下降,增加的面积没有完全成为有效面积。对于越冬场来说,补水工程后3个典型年中栖息地连通性均能保持较高的水平,表明补水工程可以有效增加该河段越冬场的面积。

4 讨论

本研究从流速、水深、溶解氧和水温4个要素分析了研究河段作为 *S. hollandi* 鱼类产卵场和越冬场的适应性,并设定底质均为卵石(10—15cm)。而野外调查表明该河段的部分深水区(水深大于2.5m)有水草生长,由于 *S. hollandi* 喜欢在卵石底质的河道内产卵,因此相对于真实情况,模型计算的 *HSI* 指数有所偏高。另外,当前建立的模型没有考虑捕食场,这部分将结合野外调查进一步完善。

根据实际的调查结果,*S. hollandi* 的生物量并没有随适宜栖息地面积增加而升高。酷渔滥捕和大型水利设施的修建是主要的因素,但所增加的栖息地面积并非全部有效也是影响因素之一。从结果看,适宜栖息地宽度指数(*HSWI*)能有效地分析栖息地的连通性,能够作为评价栖息地质量的指标。在下一步研究中,应考虑根据鱼类个体或群体的迁徙能力将散落的栖息地斑块合并后再对连续性进行评估。另外,*S. hollandi* 经常在漓江干流与支流间迁徙,水坝也阻断了栖息地的连通性,这些因素也将被考虑在内。

模型中的模糊规则的生成主要是根据专家知识及有限的野外调查数据。由于专家经验主要是定性或半定量,所以会对结果带来一定程度的误差。在今后的模型改进过程中,将从更多的实际数据中提取模糊规则,并用遗传算法对隶属函数及模糊规则进行优化。

References:

- [1] Yu G R, Xia Z Q, Ye H, Wang G H, Wu Y. On ecological runoff adjustment in downstream waters of dams. Resources and Environment in Yangtze Basin, 2008, 17:606-611.
- [2] Chen Q W, Ouyang Z Y. Integrated ecohydraulics model and the application. Journal of Hydraulics Engineering, 2005, 36(11): 1273-1279.
- [3] Chen Q W, Mynett A E, Wang F. Application of soft computation to ecological models. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2594-2601.
- [4] Costanza R, d' Arge R, Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [5] Whiting P J. Stream flow necessary for environmental maintenance. Annual review of Earth And Planetary Sciences, 2002, 30: 181-206.
- [6] Hironobu S, Varawoot V, Whitaker A C. Stochastic flow duration curves for evaluation of flow regimes in rivers. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39: 47-58.
- [7] Tomlinson S M, d' Carlo H E. The need for high resolution time series data to characterize Hawaiian streams. Journal of the American Water

- Resources Association, 2003, 39:113-123.
- [8] Hutchinson G E. An Introduction to Population Ecology. New Haven: Yale University Press, 1978.
- [9] Wetzel G W. Limnology: Lake and River Ecosystems. New York: Academic Press, 2001.
- [10] Jochen H E, Schaffer K M, Ortmann C, Winkelmann C. Towards environmental assessment of river ecosystems by analyzing energy reserves of aquatic invertebrates. *Limnologia*, 2008, 38: 378-387.
- [11] Lin Z S, Wang S G. Study on the Relation s Between the Animal Species Extinct ion and Habitat Destruction. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (4): 535-540.
- [12] Cui B S, Zhai H J. Quality evaluation of habitats disturbed by the Manwan Hydropower Dam. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(2): 227-234.
- [13] Moutona A M, Matthias S, Jochen D. Fish habitat modelling as a tool for river management. *Ecological Engineering*, 2007, 29: 305-315.
- [14] Barmutal L. Habitat patchiness and macrobenthic community structure in an upland stream in Temperate Victoria, Australia. *Canadian Journal of Freshwater Biology WBLAB*, 1989, 21:223-236.
- [15] Blachuta J Witkowski A. The longitudinal changes of fish community, in the Nysa Klodzka River (Sudety Mountains) in relation to stream order. *Polish Archives of Hydrobiology*, 1990, 38, 235-242.
- [16] Crkspin De B V, Usseglio P P. Traits of brown trout prey in relation to habitat characteristics and benthic invertebrate communities. *Journal of Fish Biology*, 2002, 60: 687-714.
- [17] Detenbeck N E, Elonen C M, Taylor D L, Anderson L E, Jicha T M, Batterman. Effects of hydro geomorphic region, catchment storage and mature forest on baseflow and snowmelt stream water quality in second-order Lake Superior Basin tributaries. *Freshwater Biology*, 2003, 48, 912-927.
- [18] Jowett I G. Models of the abundance of large brown trout in New Zealand rivers. *North Amercian Journal of Fish. Management*, 1992, 12: 417-432.
- [19] Nehring R B, Anderson R M. Determination of population-limiting critical salmonid habitats in colorado streams using physical habitat simulation system. *Rivers*, 1993, 4: 1-19.
- [20] Scruton D A, Heggenes J, Valentin S, Harby A, Bakken T H. Field sampling design and spatial scale in habitat-hydraulic modeling: comparison of three models. *Fisheries Management and Ecology*, 1998, 5: 225-240.
- [21] Vilizzi L, Copp G H, Roussel J M. Assessing valiation in suitability curves and electivity profiles in temporal studies of fish habitat use. *River Research and Applications*, 2004, 20:605-618.
- [22] Baptist M, Silvert W, Angel D L, Krost P. Assessing benthic impacts of fish farming with an expert system based on neural networks. Wallace C T, Braasch E F. *Proceedings of Gulf of Maine Ecosystem Dynamics Scientific Symposium and Workshop, Regional Association for Research on Gulf Maine (RARGOM) Report*, 1997, 313.
- [23] Binns N A, Eiserman F M. Quantification of fluvial trout habitat in Wyoming. *Trans Am Fish Soc*, 1979, 108, 215-228.
- [24] Copp G H. An empirical model for predicting microhabitat of 0 + juvenile fishes in a lowland river catchment. *Oecologia*, 1992, 91:338-345.
- [25] Dakou E, D'heygere T, Dedecker A P, Lazaridou-Dimitriadou M, De Pauw N. Decision trees model for prediction of macroinvertebrate taxa in the river Axios (Northern Greece). *Aquatic Ecology*, 2007, 41:399-411
- [26] Hayes J W, Jowett I G. Microhabitat models of large drift-feeding brown trout in three new zealand rivers. *Noah American Journal of Fisheries Management*, 1994, 14: 710-725.
- [27] Jorde K, Schneider M, Peter A, Zoellner F. Fuzzy based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment. *Proc 3rd International Symposium on Environmental Hydraulics*, 2001, 5 8 December, Tempe, AZ,.
- [28] Willhelm J G O, Allan J D, Wessell K J, Merritt R W, Cummins K W. Habitat assessment of non-wadeable river in Michigan. *Environmental Management*, 2005, 36:592-609.
- [29] Zuther S, Schulz H K, Lentzen G A, Schulz R. Development of a habitat suitability index for the noble crayfish *Astacus astacus* using fuzzy modeling. *Bulletin Francais de la Peche et de la Pisciculture*, 2005, 376-377, 731-742.
- [30] Chen Q, Mynett A E, A robust fuzzy logic approach to modelling algal biomass. *Journal of Hydraulic Research*, 2004, 42: 303-309
- [31] Ahmadi N B, St H A, Berube M, Ouarda T B M J, Robichaud É. Instream folw determination using a multiple input fuzzy-based rule system: a case study. *River Research and Applications*, 2008, 24: 279-292.
- [32] Broekhoven V E, Adriaenssens V, Baetsa D B, Verdonschot F M P. Fuzzy rule-based macroinvertebrate habitat suitability models for running waters. *Ecological Modelling*. 2006,198:71-84.
- [33] Levner E, Ganoulis J, Linkov I, Benayahu Y. NATO. Multiobjective risk/cost analysis of artificial marine systems using decision trees and fuzzy expert estimations. *Environmental Security in Harbors and Coastal Areas*, 2007, 161-174.
- [34] Me'rigoux S, Ponton D, de Me'rona B. Fish richness and species-habitat relationships in two coastal streams of French Guiana, South America. *Environmental Biology of Fishes*, 1998, 51: 25-39.
- [35] Chen Q, Mynett A E. Integration of data mining techniques with heuristic knowledge in a fuzzy logic modelling of eutrophication in Taihu Lake. *Ecological Modelling*, 2003, 162: 55-67.
- [36] Mouton A M, De Baets B, Goethals P L M. Knowledge-based versus data-driven fuzzy habitat suitability models for river management.

- Environmental Modelling & Software, 2009, 24:982-993.
- [37] Mouton A M, Schneider M, Peter A, Holzer G, Muller R, Goethals P L M, De Pauw N. Optimisation of a fuzzy physical habitat model for spawning European grayling (*Thymallus thymallus* L.) in the Aare river (Thun, Switzerland). *Ecological Modelling*. 2008, 215: 122-132.
- [38] Wu X W. *Cyprinidae ichthyography of China Volume II*. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1977.
- [39] Cai Z D, Lin G, Ni J Y, Ye Z, Tang Z B. Study on the reproductive biology of *Spinibabus calddwellis*. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2007, 38 (2): 200-204.
- [40] Hu Y C, Xie G, Chen K C, Deng G C, Li C W. Study on the Critical Value of Water Temperature and Dissolved Oxygen in *Denticulatus Denticulatus*. *Journal of Aquaculture*, 2003, 24(3):39-41.
- [41] Zhou X Y. *Computational Hydraulics*. Beijing: Tsinghua University Press, 1995: 238-251.
- [42] Lu J F, Guan Z. Numerical solution of partial differential equations, version II. Beijing:Tsinghua University Press, 2004: 77-80.
- [43] Huang Z L, Li Y L. Water quality prediction and water environmental carry capacity calculation for three gorges reservoir. Beijing: China Water Power Press, 2006: 198-210, 369-375.
- [44] Su Z, Tu F X. Calculation of total solar radiation and its distribution characteristics in Guangxi. *Jouturnal of Guangxi Meteorology*, 2003, 2(4): 43-46.
- [45] Gong R Y, Zhou Y G. Study on Capacity of Water Environment of Liuzhou Section of Liujiang River. *Water Resources Protection*, 2001, 1: 31-32, 48.
- [46] Guo R, Li Y B, Fu G. Controlling factors of degradation coefficient on organic pollutant in river. *Journal of Meteorology and Environment*, 2008, 24(1): 56-59.
- [47] Lu Y S. *environmental impact statement*. Beijing: Higher Education Press, 2007: 60-80.
- [48] Luo W S, Li L H, He T. Advances and prospects in the research of water reaeration theory and reaeration coefficient. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 11: 64-70.
- [49] Cai Z D, Lin G, Ni J Y, Ye Z, Tang Z B, Zhang S. Study on the reproductive biology of *Spinibabus calddwellis*. *Guangxi Agriculture Sciences*, 2007,2:200-204.
- [50] Jang Y L, Deng X H. A primary study on artificial propagation of *Spinibarbus hollandi* Oshima. *China Fisheries*, 2003, 3:44-46
- [51] Lü Y J, Zhang S, Lin G, Ni J Y, Ye Z. Research on the High-yielding *Spinibabus hollandi* Oshima Cultured in Cage. *Journal of Anhui Agriculture Sciences*, 2008, 36(35): 15522-15523, 15547
- [52] Zhang S, Ye Z, Lin G, Ni J. Broodstock Culture of *Spinibarbus hollandi* Oshima. *Fisheries Science & Technology of Guangxi*, 2008, 3: 54-55.

参考文献:

- [1] 于国荣,夏自强,叶辉,王桂华,吴瑶. 大坝下游河段的河流生态径流调控研究. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(4): 606-611.
- [2] 陈求稳,欧阳志云. 生态水力学耦合模型. *水利学报*, 2005, 36(11): 1273-1279.
- [3] 陈求稳, Mynett A E, 王菲. 软计算在生态模型中的应用. *生态学报*, 2006, 26(8): 2594-2601.
- [11] 林振山,汪曙光. 栖息地毁坏与动物物种灭绝关系的模拟研究. *生态学报*, 2002, 22(4): 535-540.
- [12] 崔保山,翟红娟. 水电大坝扰动与栖息地质量变化——以漫湾电站为例. *环境科学学报*, 2008, 28(2): 227-234.
- [38] 伍献文. *中国鲤科鱼类志,下卷*. 上海:上海人民出版社, 1977.
- [39] 蔡子德,林岗,倪家延,叶钊,唐志斌. 光倒刺鲃的繁殖生物学研究. *广西农业科学*, 2007, 38(2): 200-204.
- [40] 胡隐昌,谢刚,陈焜慈,邓国成,李丛伟. 倒刺鲃的临界水温和临界溶氧量的测定. *水产养殖*, 2003, 24(3): 39-41.
- [41] 周雪漪. *计算水力学*. 北京:清华大学出版社, 1995: 238-251.
- [42] 陆金甫,关治. *偏微分方程数值解法. 第二版*, 北京:清华大学出版社, 2004: 77-80.
- [44] 苏志,涂方旭. 广西太阳总辐射的计算及分布特征. *广西气象*, 2003, 2(4): 43-46.
- [45] 龚若愚,周源岗. 柳江柳州段水环境容量研究. *水资源保护*, 2001, 1: 31-32, 48.
- [46] 郭儒,李宇斌,富国. 河流中污染物衰减系数影响因素分析. *气象与环境学报*, 2008, 24(1): 56-59.
- [47] 陆玉书主编. *环境影响评价*. 北京:高等教育出版社, 2007: 60-80.
- [48] 雒文生,李莉红,贺涛. 水体大气复氧理论和复氧系数研究进展与展望. *水利学报*, 2003, 11: 64-70.
- [49] 蔡子德,林岗,倪家延,叶钊,唐志斌,张盛. 光倒刺鲃的繁殖生物学研究. *广西农业科学*, 2007, 3(2): 200-204.
- [50] 蒋云龙,邓小红. 光倒刺鲃人工繁殖技术初探. *中国水产*, 2003, 3:44-46.
- [51] 吕业坚,张盛,林岗,倪家延,叶钊. 光倒刺鲃网箱高产养殖研究. *安徽农业科学*, 2008,36(35): 15522-15523,15547.
- [52] 张盛,叶钊,林岗,倪家延. 光倒刺鲃的亲鱼培育技术. *广西水产科技*, 2008, 3: 54-55.