

基于多物种栖息地适宜度模型的河道生态流量确定方法与应用

李友光¹, 刘士峰², 王慧亮^{2*}, 袁榆梁³

(1.信阳市浉河中小河流治理项目建设管理局, 河南 信阳 464000; 2.郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001; 3.河南省水利勘测设计研究有限公司, 郑州 450003)

摘要:【目的】河流栖息模拟法是计算生态流量的最常用最有效的方法之一,然而,传统的栖息地模拟多以单一指示物种构建栖息地模型进行栖息地适宜度评价,忽略了水生生态系统中的种间关系,不能代表河流整体的生境质量水平。【方法】本论文基于模糊逻辑法构建多物种栖息地适宜度模型进行栖息地模拟,建立河流栖息地质量与径流条件的定量响应关系,进而确定河流生态流量。【结果】以浉河信阳市区段为实例,基于多物种栖息地适宜度模型推求的河段适宜生态流量为 160~260 m³/s,最小生态流量为 60 m³/s,比以鲫鱼为单一指示物种的栖息地模型的推求结果区间更小。【结论】多指示物种的河流栖息地适宜度模型,能够考虑物种之间的竞争或促进对物种生长的影响,更有利于科学合理地确定河流生态流量。完善了河流生境评估理论体系,为河流水资源可持续开发利用提供保障。

关键词: 多物种; 模糊逻辑; 栖息地模型; 适宜生态流量; 最小生态流量

中图分类号: X143

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021545

OSID:



李友光, 刘士峰, 王慧亮, 等. 基于多物种栖息地适宜度模型的河道生态流量确定方法与应用[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 139-146.

LI Youguang, LIU Shifeng, WANG Huiliang, et al. Determining the Ecologically Sustainable River Flow Using the Multiple Species Habitat Suitability Model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 139-146.

0 引言

【研究意义】生态流量是维持河流生态系统健康的主要条件,而河流栖息地模拟法是确定河流生态流量的重要方法。河流栖息地模型依赖于指示物种生存繁殖所需要的生境条件与野外监测或数值模拟得到的河流生境因子时空分布状况,计算栖息地适宜度评价指标,模拟栖息地适宜度空间分布,评估河流生境质量水平^[1]。由于这类模型具有明确的生态学基础,能够较为准确地描述流量变化与适宜生境分布之间的定量关系,该方法在计算河流生态流量方面广泛应用^[2]。因此完善河流栖息地模型,有利于科学合理地确定河流生态流量,为河流水资源可持续开发利用提供保障。

【研究进展】栖息地模型最早为美国环保署在 20 世纪 70 年代提出的河道内流量增加法 (IFIM) 发展而来,最初应用于美国的鱼类及底栖动物,后逐渐应用在水生植物、藻类、水鸟以及河岸带植被。其中

以 IFIM 法发展的物理栖息地模拟模型 (PHABSIM) 应用最广泛。但是无论是 IFIM 法还是 PHABSIM,都是以单一生境因子为研究对象的单变量模型,没有考虑到栖息地要素之间的相互作用和相关性,不能合适表现自然水体状况^[3]。多变量栖息地适宜度模型包括回归模型、人工神经网络、模糊逻辑、决策树等^[4]。Vismara 等^[5]使用多元线性回归系统综合考虑了水深和流速双变量对意大利北部阿达河上游棕色鲑鱼栖息地适宜度的影响,但是只能处理生境因子之间的线性关系。人工神经网络有较强的预测能力,Olden 等^[6]使用人工神经网络模拟加拿大安大略省南部湖泊中物种丰度,处理了物种对生境因子和生物之间相互作用的复杂反应,认为人工神经网络比传统方法预测能力更强,但是也依赖于充足的数据量。Dakou 等^[7]使用决策树对希腊北部河流底栖无脊椎动物进行研究,虽然模拟效果良好,但是数据集集中的噪声和不当输入对模型可靠性影响较大。模糊逻辑法能够更好地利用不精确数据和经验知识确定栖息地适宜度,并且能够解释不同变量之间的相互作用,在栖息地适宜度评价中应用广泛^[8-10]。【切入点】目前,栖息地模型的研究主要集中在多个生境因子的相互作用上,对物种之间的协同和竞争关系研究较少。生态群落由不同物种构

收稿日期: 2021-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51809239)

作者简介: 李友光 (1964-), 男, 河南光山人。高级工程师, 主要从事水资源优化利用方面研究

通信作者: 王慧亮 (1982-), 男, 河南安阳人。教授, 博士, 主要从事水文学及水资源专业研究。E-mail: wanghuiliang@zzu.edu.cn

成,物种之间存在复杂的生态关系,不同物种有特定适宜生存的生境条件要求,研究表明底栖动物流量需求比鱼类大 20%左右^[11],单一指示物种代表河流整体生境状况未必可靠^[12]。

【拟解决的关键问题】为了解决河流栖息地适宜度评价中单一指示物种代表河流整体栖息地状况的局限性,本文基于模糊数学思想,综合考虑生境要素之间的相关作用和不同物种之间的协同竞争关系,构建以模糊逻辑法为基础的多指示物种河流栖息地适宜度模型,进一步丰富河流生物栖息地评估方法。应用于沂河信阳段河流栖息地质量评价中,建立河流栖息地状况与径流状况的定量响应关系,计算河流生态流量,与单一指示物种模型对比,验证多指示物种模型的合理性与适用性。

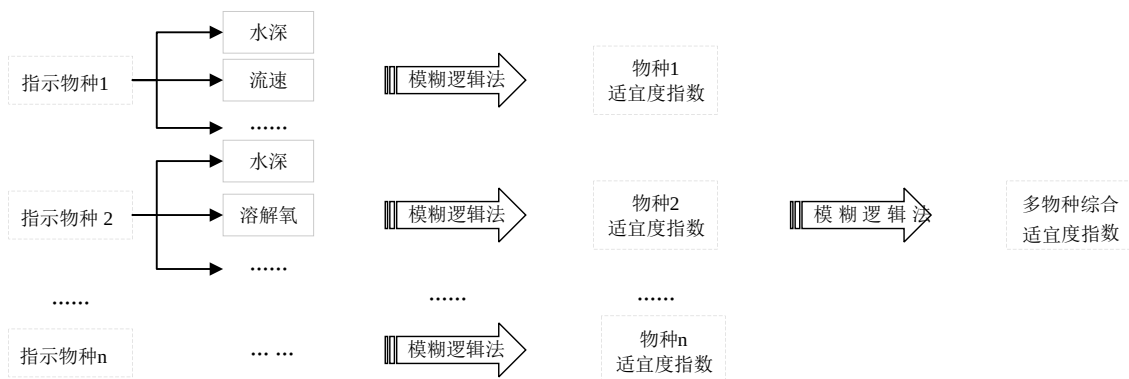


图1 基于模糊逻辑的多物种栖息地适宜度模型

Fig.1 Multi species habitat suitability model based on fuzzy logic

在构建模型过程中,无论是指示物种和关键生境因子的选择还是模糊集和模糊规则的建立,都对评价结果有直接影响,需要遵守系统性、全面性、可行性、典型性、简明科学性等原则。基于以上原则构建多物种河流栖息地适宜度模型的步骤包括:

①指示物种的选择。合理选择指示物种来反映河流生态系统整体的生物群落变化特征、建立水文要素与水生态环境之间的响应关系,是栖息地质量模拟的前提条件。河流栖息地模型中用作指示物种的主要有鱼类、大型底栖动物、水生植物、水生初级生产者和水鸟等。科学合理选定2个及以上的典型物种作为模型的指示物种。

②关键生境因子的筛选和分布。关键生境因子的选择既要较全面地反映栖息地环境的真实情况,又要与指示物种的生存和繁殖息息相关,同时还要考虑数据的可获得性和实际上的可行性。常用的生境因子包括水深、流速、底质、水温、盐度、溶解氧、水位变幅等要素,其中以水深和流速应用最为广泛。生境因子的时空分布情况可以通过实际测量数据,走访调查

1 河道生态流量确定方法

确定河流生态流量的主要思路是基于栖息地模型进行栖息地模拟,建立流量与河流生境质量之间的定量响应关系,绘制可利用栖息地面积与河道流量关系曲线,以此推求适宜生态流量。因此生态流量的确定可以分为栖息地适宜度模型的构建和基于生态-水文响应关系的生态流量推求2个步骤。

1) 栖息地适宜度模型的构建

基于模糊逻辑的多物种栖息地适宜度模型原理如图1。多物种栖息地模型用于计算区域单元栖息地适宜度,首先,把单元内各生境因子水平作为模糊逻辑法的输入要素,计算出单一指示物种对应的栖息地适宜度指数,再将每种指示物种的栖息地适宜度指数集作为模糊逻辑法的输入模糊集,计算河流生态系统整体的栖息地综合适宜度指数。

信息以及水文水质模型模拟得到,而模型模拟是最广泛使用的手段。

③基于模糊逻辑的多物种栖息地适宜度模型构建。多物种栖息地适宜度模型构建的核心方法是模糊逻辑法,其主要内容包括模糊集、模糊化过程、模糊推理以及解模糊过程(图2)。

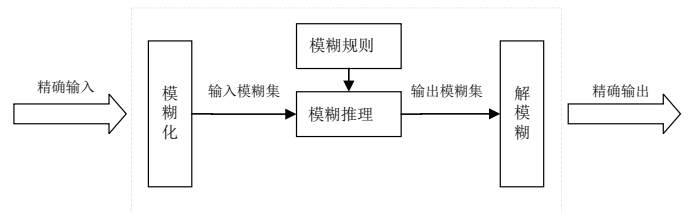


图2 模糊逻辑法计算流程图

Fig.2 Calculation flow chart of fuzzy logic method

模糊集包括输入模糊集 U 和输出模糊集 V , 分别如式(1)和式(2)所示。

$$U=\{u_1,u_2,u_3,\cdots,u_n\}, \quad (1)$$

$$V=\{v_1,v_2,v_3,\cdots,v_m\}。 \quad (2)$$

其中,单物种多指标栖息地适宜度评价中: U 是输入要素集合,即关键生境因子的集合,

$u_i(i=1,2,3,\dots,n)$ 代表各个关键生境因子； n 是影响因素的个数。 V 是输出要素集合，即栖息地适宜 $v_j(j=1,2,3,\dots,m)$ 模糊逻辑的单物种多指标适宜度评价模型的输出集合是多物种综合适宜度评价模型的输入集合。

模糊化即将输入的物理量转化为输入模糊集的过程，输入的物理量可以部分属于某个模糊集，属于模糊集的程度使用隶属度表示。隶属度函数建立水深、流速、适宜度等精确输入要素与相关模糊集语言变量之间的联系，根据物种生态习性，为每个模糊集构造合适的隶属度函数，不仅要全面涵盖所有要素，而且需要能够区分典型要素特征。

模糊推理是推算栖息地适宜度的核心，通过模糊规则将输入的模糊集合对应到特定的输出模糊集。模糊规则用来建立评价因素与评价结果之间的联系，是体现输入要素与输出结果以及多个变量之间相关关系的关键。依据物种的生态习性与物种之间的生态关系，制定一组涵盖所有对象的“if_then”（如果…，那么…）规则。例如“如果流速适中且水深适中，那么栖息地适宜度较高”，“流速”和“水深”是输入模糊集对象，“栖息地适宜度”是输出模糊集对象。每条规则下对应的输入都会产生一个该模糊规则结论的强度代表输出模糊集中的隶属度。模糊规则需要涵盖模糊集中的所有对象，也可使用模糊矩阵表示输入条件与输出结果的对应关系。

对输出模糊集进行解模糊，把模型中得到对河流栖息地质量的模糊描述转化为精确的适宜度指数。常用到的解模糊方法包括最大隶属度法、加权平均法和重心法等。重心法是解模糊使用较多的方法，重心法的原理是假设输出隶属度曲线与横坐标轴所围成面积的厚度和密度都均匀相同，取该面积的重心作为最终输出值。多物种综合栖息地适宜度指数可使用二重积分求解（式（3））。

$$CSF = \frac{\int_V v \mu_v(v) dv}{\int_V \mu_v(v) dv}, \quad (3)$$

式中： CSF 为计算单元的综合适宜度指数； $\mu_v(v)$ 为输出隶属度曲线； V 为式（2）中的输出评价集。

2) 生态流量的推求。

河流生境质量水平用可利用栖息地面积表示，模拟不同河道流量下的生境因子分布和栖息地适宜度分布，计算可利用栖息地面积，绘制可利用面积与河道流量的关系曲线，根据曲线变化推求适宜生态流量。选取曲线中缓慢上升或者缓慢下降的流量作为适宜生态流量并保证栖息地面积不小于最大栖息地面积的90%；选取曲线中快速上升或者快速下降的流量作为最小生态流量并保证栖息地面积不小于最大栖息

地面积的50%^[11]。其中，河流可利用栖息地面积等于所有计算单元面积与相应单元综合适宜度指数乘积之和（式（4））。

$$WUA = \sum_i A_i \cdot CSF_i, \quad (4)$$

式中： WUA 为河流可利用栖息地面积； A_i 为第 i 个网格的单元面积； CSF_i 为第 i 个网格的综合适宜度指数。

2 基于多物种栖息地适宜度模型的浉河生态流量确定

2.1 研究区概况

浉河位于河南省信阳市，是淮河上游右岸一级支流，流域北面为淮河干流，南部、西部与长江流域汉水接壤，东侧与淮河支流小黄河相邻。淮河流域水生生物资源丰富，已知鱼类有100多种、水生植物60余种、两栖爬行动物40余种、浮游动物200多种、浮游植物250余种、底栖动物70多种。作为淮河流域的一级支流，浉河同样具有丰富的水生生物资源。根据最近的生物调查^[13-14]，浉河鱼类资源丰富，所有鱼类中鲤科鱼类占比70%以上，与中国淡水鱼类特征一致；底栖动物种类丰富，包含寡毛类、水生昆虫、软体动物^[15]等大型底栖动物。浉河信阳市区段建有2座橡胶坝，起到调节水流、优化城市环境的作用。

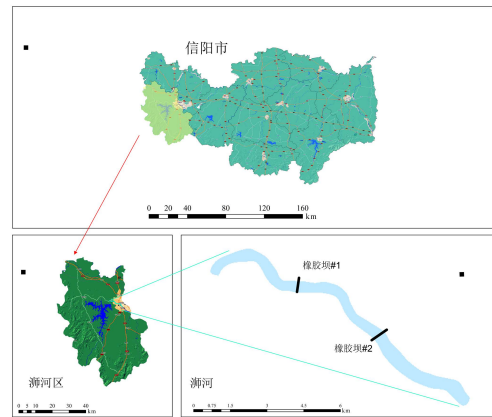


图3 研究区域位置信息

Fig.3 Location information of the study area

2.2 浉河多物种栖息地适宜度模型参数的确定

根据上述建立的基于模糊逻辑的多物种栖息地适宜度模型，模型中的主要参数包括指示物种、关键生境因子、生境因子隶属度和模糊规则。

根据浉河的生态现状以及河流生境评价的常用指标，本论文选择鱼类和底栖动物为浉河生境评价的2个指示物种，根据研究区域生物特征，鱼类选定鲫鱼为指示物种，底栖动物以水生昆虫为代表。

模型中关键生境影响因子选用最为经典的水深和流速。建立了研究河段的Mike21 FM水动力模型模拟不同流量条件下的水深和流速分布，并使用ArcGIS内置Python模块耦合水动力模型和模糊逻辑

多物种栖息地模型。

模糊集中把水深设置为“浅”、“中”、“深”3个级别；流速设置为“快”、“中”、“慢”3个级别；模型中的栖息地适宜度指数统一设定3个等级，分别是“高”、“中”、“低”。参考相关文献与经验知识^[16]，根据物种适宜生存的栖息地条件构建隶属度函数^[17]。以研究区域内物种最适宜生存的生境因子范围与不适宜物种生存的生境因子临界点作为制定隶属度函数的主要标准，能够有效区分生境因子特征的同时需要涵盖研究区域内可能出现的所有生境因子水平。以

水生昆虫的流速隶属度函数构造为例，水生昆虫最适宜的流速范围为0~0.4 m/s，流速超过0.4 m/s时水生昆虫的生存受到影响，达到1.2 m/s之后水生昆虫的生存环境将遭到严重破坏。以0.05 m/s和0.4 m/s作为2个重要节点构造了隶属度函数，把对于水生昆虫的流速水平划分为“快”、“中”、“慢”3个等级（图4）。由于栖息地适宜度指数是用来反映生境质量的无量纲数，因此模型中适宜度指数使用了相同的隶属度函数（图5）。

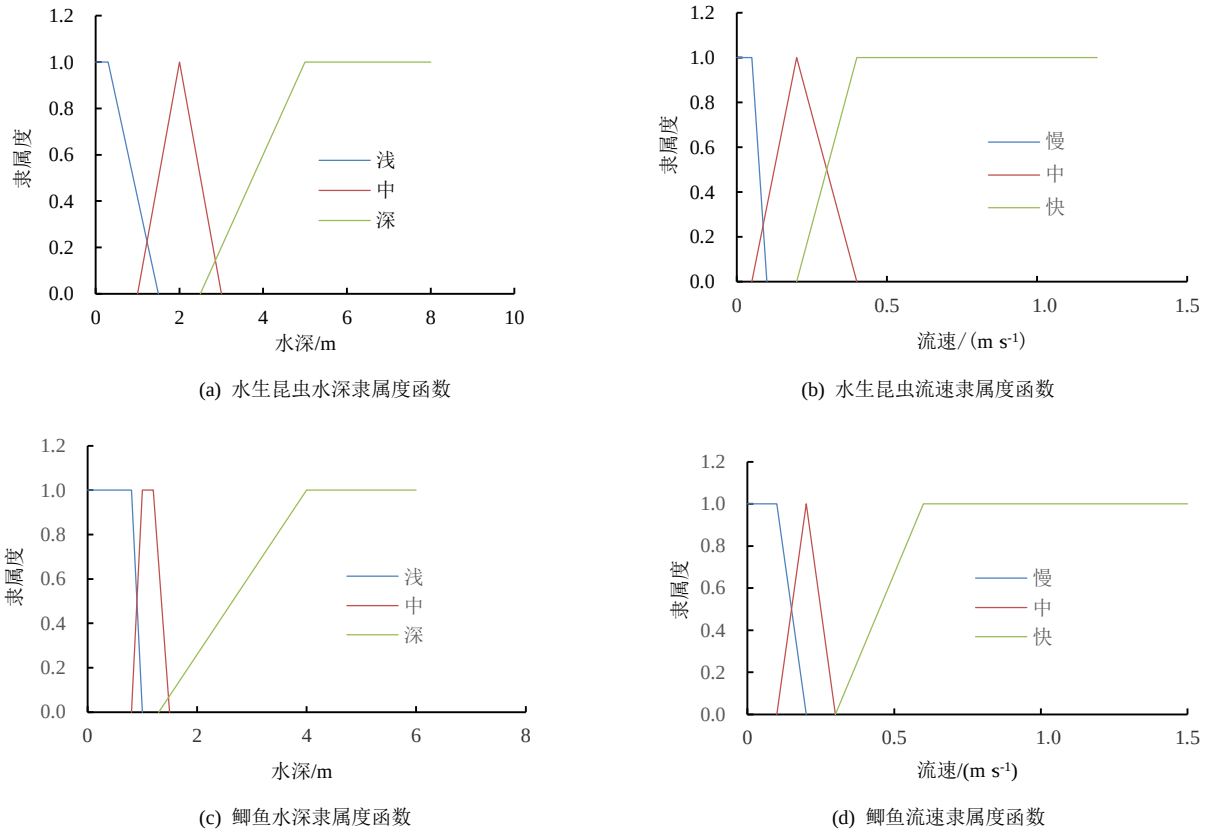


图4 沂河生境因子的隶属度函数

Fig.4 The membership function of habitat factors

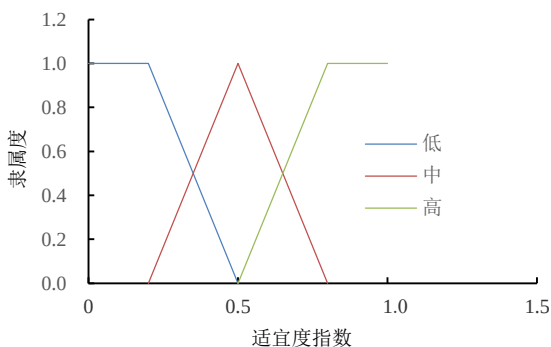


图5 沂河多物种适宜度指数的隶属度函数

Fig.5 The membership function of fitness index

根据鱼类和底栖动物生态学经验和知识确定“if_then”模糊规则，表1描述的是每个过程对应的模糊推理规则。根据模糊集和模糊规则进行模糊推理，

对输出评价模糊集使用质心法解模糊，计算各个单元内2个指示物种对应的栖息地适宜度指数和河流生态系统综合栖息地适宜度指数。

2.3 基于多物种栖息地适宜度模型确定沂河生态流量

本论文采用Mike 21二维水动力模型将研究区域划分为5148个单元网格，对每个单元的水深和流速分布状况进行模拟，使用ArcGIS内置Python模块编译模糊逻辑多物种栖息地适宜度模型，耦合了水动力模型和栖息地适宜度模型，模拟沂河栖息地适宜度空间分布，获得不同生态流量下栖息地分布状况并统计可利用栖息地面积。此次开展了沂河信阳市区段5~300 m³/s系列流量的流场模拟和栖息地适宜度模拟，模拟中河道内2座橡胶坝保持平坝状态。

表 1 多物种栖息地模型适宜度指数模糊推理规则

Table 1 Table of fuzzy inference rules for suitability index of multi species habitat model

鲫鱼栖息地适宜度指数模糊推理规则								
水深	流速	适宜度	水深	流速	适宜度	水深	流速	适宜度
浅	慢	低	中	慢	中	深	慢	低
浅	中	中	中	中	高	深	中	中
浅	快	低	中	快	中	深	快	低
水生昆虫栖息地适宜度指数模糊推理规则								
水深	流速	适宜度	水深	流速	适宜度	水深	流速	适宜度
浅	慢	中	中	慢	中	深	慢	低
浅	中	高	中	中	高	深	中	中
浅	快	低	中	快	低	深	快	低
河流综合栖息地适宜度指数模糊推理规则								
物种 a 适宜度	物种 b 适宜度	综合适宜度	物种 a 适宜度	物种 b 适宜度	综合适宜度	物种 a 适宜度	物种 b 适宜度	综合适宜度
低	低	低	中	低	低	高	低	中
低	中	低	中	中	高	高	中	高
低	高	中	中	高	高	高	高	高

2.3.1 流场模拟与栖息地适宜度模拟结果分析

图 6 展示了典型流量下的流场模拟结果，研究区域内所有单元网格流速在 0~2.92 m/s 之间，水深在 0~10.55 m 之间。说明上文创建的隶属度函数能够涵盖所有的生境因子水平。图 7 是典型流量下单一指示物种模型和多指示物种模型的栖息地适宜度模拟结果。栖息地适宜度指数越高，代表栖息地状况越好，

越适宜生物生存繁殖。选定水情比较复杂的部分河段对照流场模拟图像与栖息地模拟图像，分别抽取 20 个典型的网格单元，统计了网格的流速、水深和适宜度指数（表 2）。可以看出鲫鱼适宜栖息地主要分布在水深适中、流速较慢的区域；水生昆虫适宜栖息地主要分布在水深较浅、流速缓慢的区域，这与实际调查生物特性和栖息地分布规律一致。

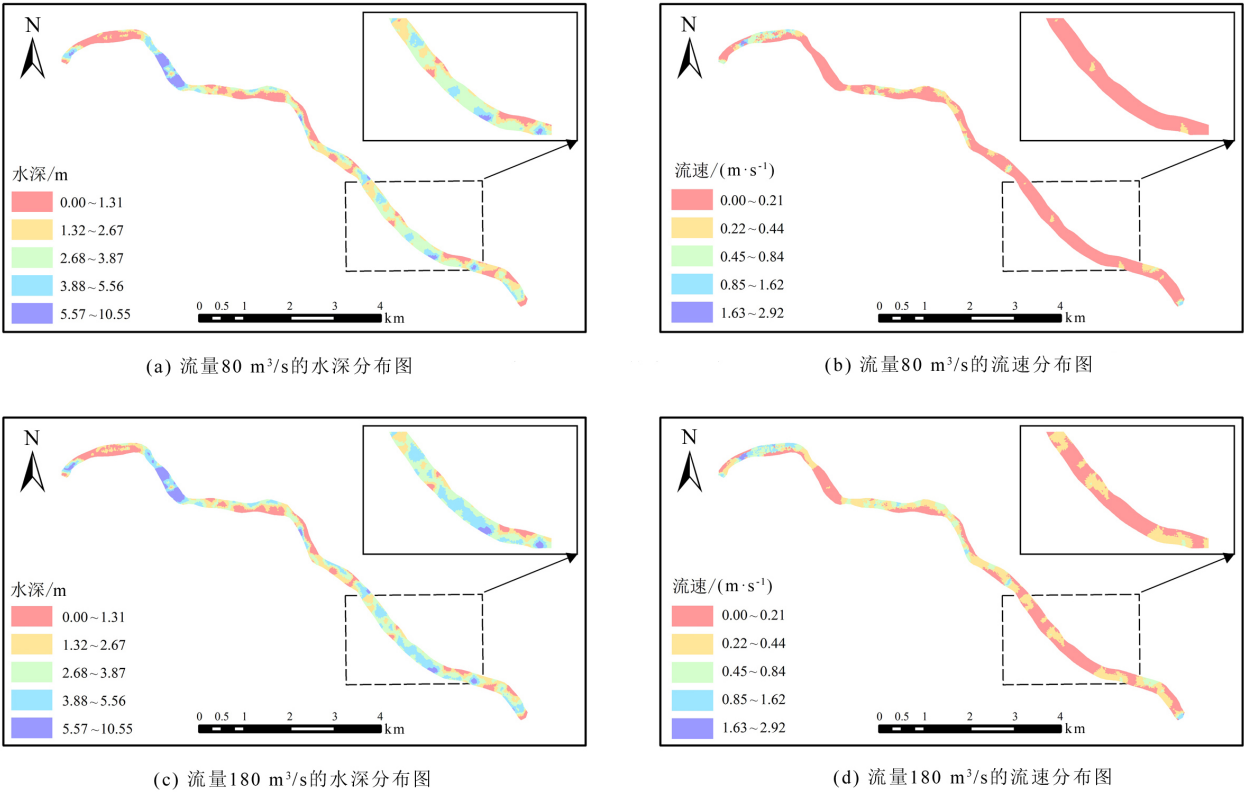


图 6 典型流量条件下栖息地水深和流速模拟结果

Fig.6 Simulation results of water depth and velocity of habitat under typical flow conditions

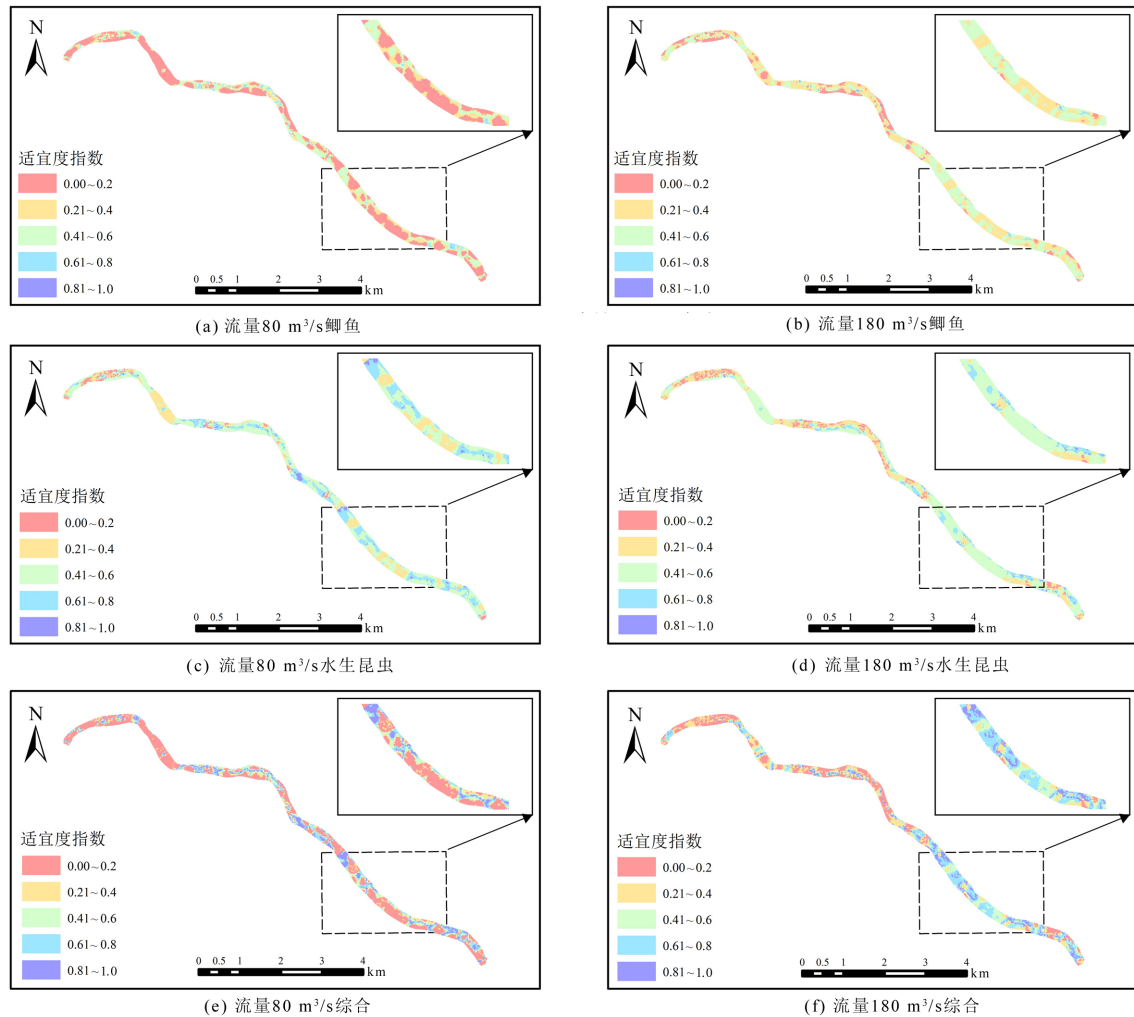


图7 典型流量条件下不同指示生物的适宜栖息地分布

Fig.7 Simulation of suitable habitat distribution of different indicator organisms under typical flow conditions

表2 样本网格流速、水深和适宜度指数统计表

Table 2 Statistical table of velocity, water depth and suitability index of typical grids

样本	水深/m	流速/ (m s^{-1})	鲫鱼 适宜度	水生昆虫 适宜度	综合 适宜度
1	0.73	0.46	0.20	0.19	0.18
2	2.22	0.47	0.21	0.19	0.18
3	2.07	0.51	0.21	0.18	0.18
4	1.70	0.47	0.22	0.19	0.18
5	1.65	0.43	0.22	0.19	0.18
6	1.46	0.45	0.44	0.20	0.20
7	1.17	0.43	0.50	0.22	0.24
8	2.37	0.09	0.21	0.68	0.40
9	2.43	0.10	0.21	0.74	0.45
10	0.83	0.10	0.24	0.77	0.51
11	0.76	0.14	0.33	0.79	0.61
12	0.98	0.26	0.73	0.55	0.80
13	1.32	0.24	0.79	0.58	0.80
14	1.22	0.28	0.77	0.51	0.80
15	0.98	0.26	0.72	0.54	0.80
16	1.35	0.19	0.73	0.78	0.81
17	1.28	0.19	0.76	0.77	0.81
18	1.08	0.27	0.78	0.51	0.81
19	1.00	0.19	0.76	0.78	0.81
20	1.06	0.19	0.79	0.77	0.81

受模糊规则影响,当网格内生境条件同时适合鲫鱼和水生昆虫生存时,综合适宜度指数比使用鲫鱼或者水生昆虫计算的单一适宜度指数更高;当网格内生境条件不能满足鲫鱼和水生昆虫的生存需求,综合适宜度指数较2个单一适宜度指数更低;当网格内生境条件能够满足一种生物生存需求,却不适合另一种生物生存时,综合适宜度指数介于2个单一适宜度指数之间,但是没有明显规律(表2)。这一结果验证了水生态系统中生物之间存在竞争与协作关系。因此多物种河流栖息地模型较传统的以单一物种构建的栖息地模型能够更加准确的反映河流的生境水平。

2.3.2 沂河生态流量的确定

根据系列流量条件下的栖息地模拟结果,计算单元可利用栖息地面积并统计研究河段整体的可利用栖息地面积,建立栖息地面积与河道内流量的定量关系曲线(图8)。图中分别展示了单独以鲫鱼或者水生昆虫作为指示物种以及综合2种指示物种得到的生态-水文响应过程。在50~80 m^3/s 的流量范围内,水生昆虫的栖息地面积随流量增加迅速增加;并在80~150 m^3/s 的流量范围内保持相对稳定水平之后快

速下降。鲫鱼的栖息地面积在 $5\sim 180\text{ m}^3/\text{s}$ 流量范围中随流量增加呈现增加趋势, 流量超过 $180\text{ m}^3/\text{s}$ 后缓慢减少。综合 2 类指示物种得到的综合栖息地面积则在 $10\sim 170\text{ m}^3/\text{s}$ 流量范围内呈随流量增加趋势并且在 $30\sim 70\text{ m}^3/\text{s}$ 流量范围内呈快速增加趋势; 河道内流量超过 $170\text{ m}^3/\text{s}$ 之后, 综合栖息地面积表现出较鲫鱼稍快、较水生昆虫慢的减少趋势。从整体趋势来说, 综合栖息地面积变化曲线与鲫鱼为指示物种的曲线更类似, 这与综合栖息地适宜度指数对应的模糊规则更注重鲫鱼对综合栖息地适宜度指数影响有关。

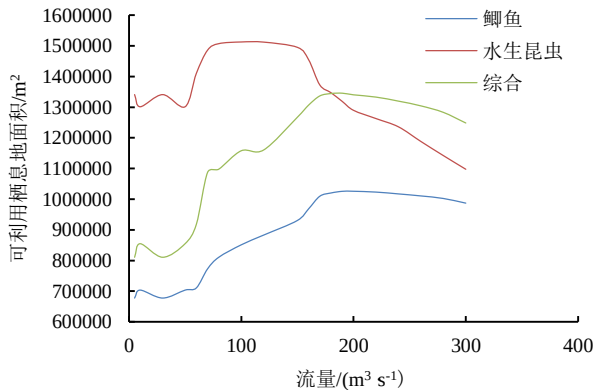


图 8 不同指示物种的可利用栖息地面积与流量关系

Fig.8 Relationship curve between habitat area and flow of different indicator species

根据可利用栖息地面积与流量的关系曲线确定沂河信阳市段适宜的生态流量与最小生态流量。可利用的栖息地面积与流量并不是单纯的线性关系, 不论是水生昆虫还是鱼类, 适宜生存的生态流量都不是越大越好也不是越小越好。选取曲线中缓慢上升或者缓慢下降的流量作为适宜生态流量并保证栖息地面积不小于最大栖息地面积的 90%; 选取曲线中快速上升或者快速下降的流量作为最小生态流量并保证栖息地面积不小于最大栖息地面积的 50%。最终以鲫鱼为指示物种得到适宜生态流量范围为 $160\sim 280\text{ m}^3/\text{s}$, 最小生态流量为 $70\text{ m}^3/\text{s}$; 双物种作为指示物种得到的适宜生态流量范围是 $160\sim 260\text{ m}^3/\text{s}$, 最小生态流量是 $60\text{ m}^3/\text{s}$; 以水生昆虫为指示物种, 适宜生态流量范围是 $60\sim 160\text{ m}^3/\text{s}$, 最小生态流量是 $60\text{ m}^3/\text{s}$ 。

3 讨论

传统的栖息地适宜度模型是目前应用最广泛的适宜度评价方法, 但无法体现不同物种之间的协同和竞争关系。利用多物种栖息地适宜度模型, 可以兼顾多种生境因子与多个物种的种间关系评价栖息地整体生境适宜度水平, 生态学意义更强, 解释性更好。在未来的研究中, 使用多物种栖息地适宜度模型结合水动力模型模拟的河流生境因子分布, 进而推求河道

生态流量, 对河流生态保护有指导作用。

基于模糊逻辑构建多物种栖息地适宜度模型, 结合水动力模型推求生态流量, 拥有更小的适宜生态流量区间。本研究中, 根据多物种模型推求的沂河适宜生态流量范围为 $160\sim 260\text{ m}^3/\text{s}$, 相较于使用鲫鱼作为单一指示物种推求的 $160\sim 280\text{ m}^3/\text{s}$ 区间范围更小。这也是多物种模型考虑了生物群落种间关系的原因。由表 2 可知, 在网格单元生境因子水平平均适合鲫鱼和水生昆虫生存时, 多物种模型得到的综合栖息地适宜度指数比单一物种的更高; 当网格生境水平平均不适宜 2 种物种生存时, 综合适宜度指数比单一物种的更低; 而网格生境要素仅适合一种物种生存时, 综合适宜度指数介于 2 个单一物种适宜度指数之间。这进一步验证了种间关系对整体栖息地适宜度的影响。

同时, 本研究中基于二维水动力模型将研究区域划分为 5 148 个计算单元, 模拟了每个单元的流速和水深分布状况, 取得较好的结果。但是在实际运用过程中, 考虑到数据获取程度的不同以及实际工作中对栖息地适宜度模拟精度需求的不同, 也可以使用其他二维或三维水动力模型 (例如 HEC-RAC 和 Delft3D 模型等) 划分研究区域计算单元, 模拟每个单元流速、水深等要素分布状况并计算单元内栖息地适宜度。

除此之外, 由于模糊逻辑法随输入要素增加, 计算量急剧增长的特性, 本文仅选取了 2 类指示物种为代表, 不能充分模拟河流生态系统内复杂的物种结构, 这也是未来仍需解决的问题。但是文章的结果仍具有一定的代表性, 可以为相关研究提供思路和参考。

4 结论

1) 以鲫鱼和水生昆虫为指示物种, 建立多物种的河流栖息地适宜度模型对沂河信阳市区段的河流栖息地适宜度进行模拟, 构建定量的生态-水文响应关系, 推求河段适宜生态流量范围为 $160\sim 260\text{ m}^3/\text{s}$, 最小生态流量为 $60\text{ m}^3/\text{s}$ 。

2) 以综合了鲫鱼和水生昆虫的多物种栖息地模型模拟的可利用栖息地面积与河道流量关系曲线, 在变化趋势上与单独把鲫鱼作为指示物种的趋势相似, 但是计算的适宜生态流量范围较单物种确定的区间更短。

参考文献:

- [1] 冯颖紫, 计勇, 刘星辰, 等. 河流栖息地健康影响因素及评价研究展望[J]. 人民珠江, 2020, 41(10): 94-101.
FENG Yingying, JI Yong, LIU Xingchen, et al. Influencing factors and assessment of river habitat health[J]. Pearl River, 2020, 41(10): 94-101.
- [2] 蔡玉鹏, 万力, 杨宇, 等. 基于栖息地模拟法的中华鲟自然繁殖适合生态流量分析[J]. 水生态学杂志, 2010, 31(3): 1-6.
CAI Yupeng, WAN Li, YANG Yu, et al. Analysis on the environmental

- flow requirements for natural reproduction of Chinese sturgeon based on habitat simulation methods[J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 31(3): 1-6.
- [3] 易雨君, 程曦, 周静. 栖息地适宜度评价方法研究进展[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(5): 887-893.
- YI Yujun, CHENG Xi, ZHOU Jing. Research progress in habitat suitability assessment methods[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(5): 887-893.
- [4] 赵进勇, 董哲仁, 孙东亚. 河流生物栖息地评估研究进展[J]. *科技导报*, 2008, 26(17): 82-88.
- ZHAO Jinyong, DONG Zheren, SUN Dongya. State of the art in the field of river habitat assessment[J]. *Science & Technology Review*, 2008, 26(17): 82-88.
- [5] VISMARA R, AZZELLINO A, BOSI R, et al. Habitat suitability curves for brown trout (*Salmo trutta fario* L.) in the River Adda, Northern Italy: Comparing univariate and multivariate approaches[J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 2001, 17(1): 37-50.
- [6] OLDEN J D, JACKSON D A. Fish-habitat relationships in lakes: Gaining predictive and explanatory insight by using artificial neural networks[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2001, 130(5): 878-897.
- [7] DAKOU E, D'HEYGERE T, DEDECKER A P, et al. Decision tree models for prediction of macroinvertebrate taxa in the river Axios (northern Greece)[J]. *Aquatic Ecology*, 2007, 41(3): 399-411.
- [8] 李若男, 陈求稳, 吴世勇, 等. 模糊数学方法模拟水库运行影响下鱼类栖息地的变化[J]. *生态学报*, 2010, 30(1): 128-137.
- LI Ruonan, CHEN Qiwen, WU Shiyong, et al. Application of fuzzy logic to model fish habitat in the downstream of Lijiang River under reservoir operations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(1): 128-137.
- [9] 李洋. 筑坝河流鱼类产卵生态流量研究: 以锦屏大河湾为例[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- LI Yang. Research on ecological flow of fish spawning in dam-building river—case study on Jinpin Dahe Bay[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019.
- [10] HOUGH I M, WARREN P H, SHUCKSMITH J D. Designing an environmental flow framework for impounded river systems through modelling of invertebrate habitat quality[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105-114.
- [11] 班璇, 郭舟, 熊兴基, 等. 长江中游典型河段底栖动物的物理栖息地模型构建与应用[J]. *水利学报*, 2020, 51(8): 936-946.
- BAN Xuan, GUO Zhou, XIONG Xingji, et al. Applying physical habitat model of zoobenthos in typical reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(8): 936-946.
- [12] 易雨君, 张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述[J]. *中国科学(技术科学)*, 2019, 49(4): 363-377.
- YI Yujun, ZHANG Shanghong. Review of aquatic species habitat simulation method and modelling[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2019, 49(4): 363-377.
- [13] 顾钱洪, 孟晓林, 周传江, 等. 信阳浉河区鱼类资源分布及区系组成特征[J]. *河南水产*, 2015(5): 31-35, 37.
- GU Qianhong, MENG Xiaolin, ZHOU Chuanjiang, et al. Current status and floristic characteristics of fishery resources in Shihe District of Xinyang[J]. *Henan Fisheries*, 2015(5): 31-35, 37.
- [14] 李峥, 段家慧, 赵良杰, 等. 两河口国家湿地公园河流鱼类群落结构和多样性研究[J]. *水产学杂志*, 2020, 33(5): 45-51.
- LI Zheng, DUAN Jiahui, ZHAO Liangjie, et al. Community structure and species diversity of fishes in river of Lianghekou national wetland park[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2020, 33(5): 45-51.
- [15] 池仕运, 韦翠珍, 胡俊, 等. 南湾水库底栖动物群落结构初步研究[J]. *环境保护科学*, 2018, 44(6): 34-41.
- CHI Shiyun, WEI Cuizhen, HU Jun, et al. Preliminary study of macroinvertebrate communities in Nanwan reservoir[J]. *Environmental Protection Science*, 2018, 44(6): 34-41.
- [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 cyprinid habitat hydrological and ecological response in the lower Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1175-1187.
- [17] 夏振民. 复杂水动力条件下沿海城市水体生态健康诊断[D]. 烟台: 烟台大学, 2020.
- XIA Zhenmin. Diagnosis of urban river ecological health in coastal cities under complex hydrodynamic conditions[D]. Yantai: Yantai University, 2020.

Determining the Ecologically Sustainable River Flow Using the Multiple Species Habitat Suitability Model

LI Youguang¹, LIU Shifeng², WANG Huiliang^{2*}, YUAN Yuliang³

(1. Shihe River Treatment Project Construction Administration of Xinyang, Xinyang 464000, China;

2. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

3. Henan Water & Power Engineering Consulting CO., Ltd, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: 【Objective】 The ecological functions of a river are manifold; and how to determine river flow rates which are ecologically sustainable is important but not trivial. In this paper, we proposed a new approach to model river habitat. 【Method】 The model is based on multiple indicator species and considers their competition as well as the consequence for growth of individual species. The model is constructed based on the fuzzy logic method to establish the quantitative relationship between river habitat quality and runoff conditions. We applied the model to the Xinyang section of the Shihe River. 【Result】 The sustainable ecological water flow in this section of the river calculated by the model is 160~260 m³/s, and the minimum ecological flow rate is 60 m³/s. The result interval is stricter than that calculated from the single indicator species model using crucian carp as the indicator. 【Conclusion】 Multiple indicator species model we proposed for determining ecologically sustainable river flow is robust and accurate. It can be used for designing sustainable development and utilization of river water resources.

Key words: multi species; fuzzy logic; habitat model; suitable ecological flow; minimum ecological flow

责任编辑: 赵宇龙