

改进的大型底栖动物中尺度栖息地适宜度模型

史璇, 刘静玲*, 尤晓光, 包坤, 孟博, 郎思思

(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)

摘要:针对栖息地受损, 河流生态完整性受到严重威胁的现状, 以 MesoHABSIM 模型为基础, 选取易采集、分布广且能较好反映栖息地条件的大型底栖动物为目标水生生物, 对其栖息地适宜度进行了探索。针对缺乏反映河道底部特征的水文形态参数和大型底栖动物群落结构功能分析两方面的不足, 为实现量化表征大型底栖动物栖息地适宜度的目标, 改进了水文形态模型和生物模型, 建立了改进的大型底栖动物中尺度栖息地适宜度模型。水文形态模型中增加了反映河道底部条件的底部剪切力参数; 生物模型中, 除单一目标物种外, 增加功能摄食类群分析, 研究偏好不同流速、基质条件的底栖动物, 主要包含撕食者、牧食收集者、滤食收集者、刮食者、捕食者等。

关键词:大型底栖动物; 中尺度栖息地; 栖息地适宜度; 栖息地模型

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2015)05-0979-09 doi:10.11654/jaes.2015.05.022

Revised Mesohabitat Simulation Modelling-benthos Model

SHI Xuan, LIU Jing-ling*, YOU Xiao-guang, BAO Kun, MENG Bo, LANG Si-si

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Aimed at damaged habitats and seriously threatened fluvial ecological integrity, mesohabitat model was revised to better quantify the suitability of stream habitat suitability of aquatic organisms in reach scale. Revised MesoHABSIM-benthos Model was built to indicate the habitat suitability of invertebrates. In habitat analysis, the benthos community was selected as common indicators of river basin, because it can be collected widely in the artificial regions, and can well reflect the habitat conditions, especially for benthic conditions. MesoHABSIM (Mesohabitat Simulation Modelling) was mesohabitat model to quantify the relationship of river hydromorphology and presence and abundance of aquatic organisms. It can reflect more detail information of hydromorphology and is more suitable for benthos analysis. The revised model was on the basis of MesoHABSIM and two aspects were improved, including hydromorphological parameters, and structure and functions analysis of invertebrates. In detail, the bottom shear stress (BBS) was increased in the Hydromorphology Model to quantify the bottom conditions of streams that was main habitats of invertebrates. In order to show the structure and function of invertebrate communities, the Functional Feeding Groups (FFG) was also analyzed in the Biology Mode. The groups were classified based on the habitat and food preference of benthos, and the main types include shredder, collector-gatherer, collector-filterer, scraper and predator.

Keywords: macroinvertebrates; mesohabitat; habitat suitability; habitat model

河流栖息地物化属性影响生物群落的分布格局, 然而, 取水调水、土地利用改变、闸坝水库运行等人类活动对河流流量及流态变化产生较大影响, 导致水动力

条件减弱, 影响河流栖息地物理异质性, 造成河流水生生态系统结构功能改变, 影响河流生态完整性^[1-3]。栖息地适宜度表征栖息地环境要素对水生生物的适宜程度。由于大型底栖动物易采集鉴定, 且移动性较小, 能较好反映生物栖息环境条件, 是栖息地适宜度的理想目标水生生物。河流栖息地研究主要在宏观尺度(流域/水系)、中观尺度(河段/横断面)和微观尺度(斑块)上进行, 中尺度上河段栖息地的研究既能反映河段整体情况, 又符合生物特性, 适用于河流

收稿日期: 2015-02-02

基金项目: 海河流域河流生态完整性影响机制与恢复途径研究(2012ZX07203-006); 河口水生态风险响应机制研究(41271496)

作者简介: 史璇(1988—), 女, 在读博士生, 主要研究方向为河流栖息地水文生态研究。E-mail: xuan.wu163@163.com

* 通信作者: 刘静玲 E-mail: jingling@bnu.edu.cn

生态恢复及管理,因此中尺度栖息地适宜度是栖息地研究的重要方面。常用中尺度栖息地模型有 MesoScale Classification Norway、Rapid Habitat Mapping、MesoCAsiMiR、MesoHABSIM 等^[4]。Mouton 等用 Meso-CAsiMiR 模型对比利时城市河流栖息地适宜度研究考虑溶氧条件^[5]。Parasiewicz、Vezza 运用 MesoHABSIM 模型对意大利西北部河流濒危蚌类、高坡度山区一般鱼类等物种栖息地适宜度进行研究^[6-8]。我国栖息地适宜度研究也是针对洄游鱼类物种较多,代表性研究为易雨君等用 HSI(Habitat Suitability Index)研究葛洲坝和三峡工程对长江鲤鱼产卵点位的栖息地适宜度影响^[9]。李凤清等以三峡库区香溪河为例,构建基于长期野外实测数据的溪流大型底栖动物栖息地适合度模型^[10]。但在目前研究中环境要素多考虑河流表面流态,缺少对底栖动物而言重要的底部条件参数研究;同时,目标生物选取上,多关注单一的优势或珍稀物种,缺乏对水生群落整体结构功能特征的研究。因此,增加河道底部参数分析及底栖群落结构功能研究应是今后河流栖息地适宜度研究的趋势和方向。

本文面向流域河流生态完整性恢复目标,从河段尺度出发,探讨了中尺度栖息地适宜度概念和内涵。针对当前河流普遍存在的水动力条件弱、人为干扰强

的特点,以大型底栖动物作为目标水生生物,以 MesoHABSIM 模型为基础,增加河道底部条件参数和生物群落特征考虑,改进大型底栖动物中尺度栖息地模型。

1 河流栖息地适宜度概念内涵

河流栖息地适宜度(River Habitat Suitability, 又称栖息地适合度)用来描述某河流环境要素对特定水生生物的适宜程度,通过栖息地适宜度分析,对物种生存、繁殖的生态因子进行综合影响评价^[9,11]。本文中,栖息地适宜度指一定尺度范围内,河流栖息地水文形态和营养要素等物化属性对特定水生物种、群落或生态系统状态的适宜程度。图1为栖息地适宜度概念框图。

中尺度栖息地是当前河流栖息地研究关注的重要尺度,也是栖息地适宜度研究的理想尺度,既能表征河段横断面上栖息地物化属性和水文形态综合特征,又能为子流域生态修复、环境流量计算等提供定量依据^[12-13]。中尺度栖息地是河段尺度上与生物生命周期及活动区域相关的群落生境。Mesohabitat 指:河道内形象化的具有明显特征的栖息地单元,从河岸能够明显识别,具有显著物理均匀性^[14]。在 MesoHAB-

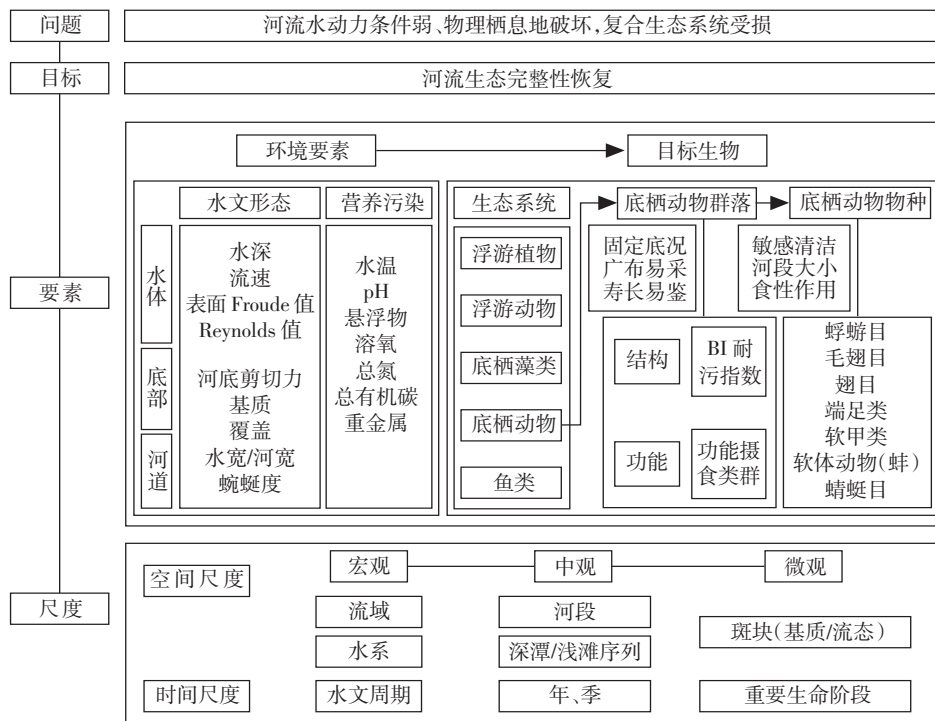


图1 栖息地适宜度概念框图

Figure 1 Theoretical framework of habitat suitability

SIM 方法中,中尺度栖息地是与物种及其生命阶段相关的特定区域,其水动力结构与提供生物庇护场所的物理属性一起为生物生存和繁殖创造有利条件^[6]。中尺度栖息地理论包含的主要概念有水文形态单元 Hydromorphologic units、水动力群落生境 Hydraulic biotope、群落生境 Physical biotope、功能性栖息地 Functional habitat 等^[13]。本研究,中尺度栖息地适宜度指特定流域水系内,河段(河长约为河宽 10 倍以上)河道内水文形态、营养要素等物化属性年内季节性时空分布特征对目标水生物种的适宜程度,且包含对群落结构功能和生态系统状态的适宜程度。三维中尺度栖息地概化图如图 2。

2 中尺度河流栖息地模型方法比较

栖息地模型是研究河流生态功能的有力工具,能够对指示物种的栖息地状况进行定性和定量的评价。栖息地模型能够考虑流量及结构特征改变的效应,并能在一定程度上预测其影响;流量改变主要影响水

深、流速和底质状况,这都是决定栖息地适宜性的主要因素^[15-16]。与其他方法相比,栖息地模拟法考虑生物本身对物理生境的要求,需要建立物种-生境评价指标^[15]。代表方法包括 IFIM(Instream Flow Incremental Methodology)、CASI-MiR (Computer Aided Simulation Model For Intream Flow Regulations)法等,其中 IFIM 框架下的 PHABSIM 方法应用最广。这些模型方法均由水文形态模型、生物模型和栖息地模型三部分组成。水文形态模型描述与目标物种相关物理属性的空间格局,生物模型描述栖息地内目标水生生物群落组成结构,栖息地模型量化计算与流量相关的可用栖息地面积。

中尺度栖息地模型方法在河段尺度上对水文形态单元的栖息地进行模拟,既能整体反映河段水文生态关系,又能对水系流域河流管理和生态修复提供科学参考。常用的中尺度栖息地模型方法有:Rapid Habitat Mapping (RHM)、Meso-Habitat Simulation (MesoHABSIM)、MesoCASI-MiR and Habitat 和 Norwe-

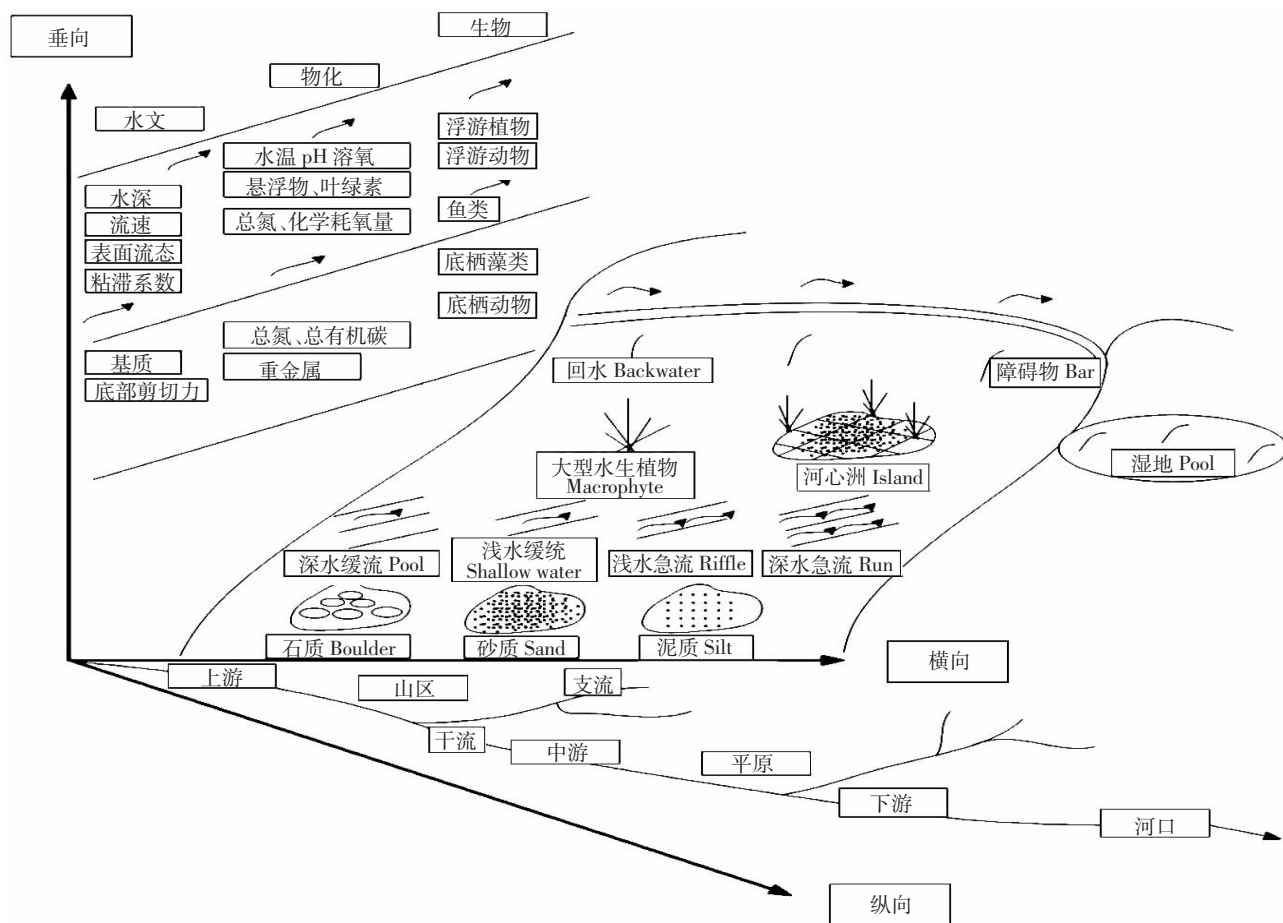


图 2 中尺度栖息地三维概化图

Figure 2 Three-dimensional framework of mesohabitat

gian Mesohabitat Classification Method (NMCM) 等^[4,6]。MesoHABSIM 与 PHABSIM 的流量分析模块相近,其与 PHABSIM 相比能较快收集较长河段的覆盖数据^[6]。MesoCASiMiR 模型在 CASiMiR 模型基础上发展而来,CASiMiR 模型针对底栖动物有 CASiMiR-benthos 模型,但其测定 FST-hemisphere 参数运用特定装置,测定数据与其他方法的栖息地适宜度可比性不足。因此,MesoHABSIM 方法相对更适合大型底栖动物中尺度栖息地适宜度研究,常用的 MesoHABSIM 和 MesoCASiMiR 模型方法比较如表 1 所示。

3 大型底栖动物中尺度栖息地模型

大型底栖动物中尺度栖息地适宜度模型基于 MesoHABSIM 模型,包含水文形态模型、生物模型、栖息地模型三部分。水文形态模型对一定流量下河流栖息地水文形态和物化属性进行空间表征,得到水深及流速的空间分布,针对底栖动物增加考虑河道底部剪切力和沉积物物化营养要素;生物模型定量化表征目标物种的存在及丰度,选定目标底栖物种基础上,进一步研究底栖动物群落结构功能特征;栖息地模型在

对不同流量下生物适宜度时空分析基础上可得到各流量下适宜栖息地面积及分布。

3.1 水文形态模型

水文形态模型是在栖息地地理条件调查基础上,确定栖息地单元空间分布与变化,以便描绘栖息地条件一致的河段。重点在于描绘各河段栖息地单元的总体分布,估计水文形态单元(表)百分比,中尺度栖息地特征、覆盖条件(木质残体、浅水边缘、树冠覆盖阴影、沉水植物等),浅水(约<30 cm)、深水(约>1.5 m)及深度适中区域,慢流(约<20 cm·s⁻¹)、快流(约>80 cm·s⁻¹)及流速适中区域,同时测定记录水宽(水流宽度)和河宽(满水宽度)及其他河道和河岸特征。聚类分析横断面组合成河段,在各河段选出一个或多个代表性点位用于进一步分析。对各水文形态单元的物理属性用三类别指标(无、存在、大量)进行估计,同时三类别指标也是单元大小的函数。对各水文形态单元随机 7 位置的平均流速和底部流速、水深、基质进行测定(测定位置数量 7 是统计上最小相关质量的经验值^[6])。测定水深和平均流速浅于 1 m 的区域用流速仪,较深区域用声学多普勒流速剖面仪(ADCP, Acoustic Doppler

表 1 MesoHABSIM 和 MesoCASiMiR 模型发展比较及实例
Table 1 Development of MesoHABSIM and MesoCASiMiR and their applications

模型方法	模型要素					模型发展及实例		
	主要水文参数	模型原理	开发者	开发时间	现存不足	创新成果	研究区	目标生物
MesoCASiMiR	FST-hemisphere (针对底栖动物)、水深、流速、基质粒径、根植性、覆盖类型、水池类型、遮蔽程度、水面高程数据	偏好函数/模糊规则	Institute of Hydraulic Engineering of Universität Stuttgart	1990s	FST-hemisphere 特定工具测定,可比性不足,模糊规则主观性较高	Mouton(2006) 环境要素中考虑溶解氧等水质条件	比利时 Zwalm 城市河流 5km 河段	四节蜉属 <i>Baetis rhodani</i>
MesoHABSIM	水文形态单元、覆盖源、基质粒径类型、水深、流速(各单元 7 随机测定)、Froude 值	逻辑回归	University of Massachusetts, Parasiewicz	2000 (Revised in 2007)	需补充针对底栖动物河道底部条件的水文形态参数;不仅限于单一物种,强化群落结构功能分析	Parasiewicz(2007) 引入“generic fish”概念,表征相同栖息特征的多物种	模型方法	一般鱼类 Generic fish
						Parasiewicz(2013) 用 CART、River2D、MesoHABSIM 多模型计算濒危蚌类栖息地适宜度	Upper Delaware River, USA	蚌类 Mussel
						Parasiewicz(2013) 确定河流恢复工程的栖息地标准可视栖息地恢复情景	Wekepeke Brook, Massachusetts, USA	5 种目标 鱼类物种
						Veza 等(2014)用 于高坡度山区河流,补充 BOD、水温、浊度等水质参数	Northwest Italy	大理石鳟鱼 Marble trout, 褐鳟 Brown trout

Current Profilers)。数据输入 GIS 表格,与对应多边形相关联。

3.1.1 水文形态单元

水文形态单元类型(HMU,Hydromorphologic unit)的划分是中尺度栖息地水文形态模型的基础。相近概念还包括群落生境(Biotope)、功能性栖息地(Functional habitat)等,主要根据河流的流态(水深、流速)、基质、覆盖条件等对河流栖息地进行分类,得到水文形态单元类型,对各单元环境要素进行定量化空间表征,为生物适宜度计算提供基础。

已有研究对河流类型、栖息地类型等划分可主要分为四个方面:

(1)河流流态:Newson and Newson 分析 30 余篇文献中物理栖息地类型,底栖生物采样常用到的物理栖息地单元有浅滩急流(Riffle)、坑塘水池(Pool)、深水快流(Run)、河道间隙/死水/大型水生植物(Marginal, deadwater, macrophytes)等^[15]。

(2)流态-基质类型:MesoHABSIM 模型应用时常用到该分类方法,主要依据水深、流速、河床形状、基质等进行划分,常分为 12 种水文形态单元类型,包括浅滩急流(Riffle)、快流(Rapid)、喷流(Cascade)、滑流(Glide)、过渡流(Ruffle)、奔流(Run)、急流(Fast run)、深潭(Pool)、跌水深潭(Plunge pool)、回水(Backwater)、侧流(Side arm)、浅水缓流(Shallow waters)^[6]。

(3)覆盖条件主要是功能性栖息地的分类方法:如低地英国河流的主要功能性栖息地包含暴露的岩石巨砾、圆石卵石、砂砾、砂、淤泥、边际植物、挺水植物、浮叶、沉水阔叶植物、沉水细叶植物、苔藓、丝状藻类、落叶层、木质物残体、树根、悬伸植物等^[15]。

(4)考虑土地利用/人为活动干扰,主要针对平原河流特别是受人为干扰较强的城市段河流:Davenport

研究英国城市河流栖息地时,按基质、物理栖息地特征、植被特征将河段分为近自然(Semi-natural, SN)、轻度改变(Lightly modified, LM)、改变(Modified, M)、中度改变(Moderately modified, MM)、重度改变(Heavily modified, HM)等类型^[17]。

根据当前河流普遍存在的水动力条件弱、人为干扰强烈等特点,考虑以基质作为第一分类级别、流态作为第二分类级别、覆盖条件作为第三分类级别(图 3),对生态条件较好的近/自然河流将大型水生植物作为分类依据,对城市河段等则将岸带树木数量和复杂性作为主要覆盖条件分类依据。一是基质:以基质作为河流栖息地一级分类依据,主要分为石质(>2 mm)、砂质(63 μm ~2 mm)、泥质(<63 μm)三大类,该粒径分类是以 Wentworth(1922)沉积物粒径 6 类分类标准为基础进行整合^[18]。二是流态:水动力条件较弱,流态类型相对较少,在 Parasiewicz 主要水文形态单元中选取典型的浅水急流(Riffle)、浅水缓流(Shallow water)、深水缓流(Pool)、深水急流(Run)四类型,其中浅水缓流 $d < 0.3 \text{ m}$, $v < 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,浅水急流 $d < 0.3 \text{ m}$, $v > 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,深水缓流 $d > 0.3 \text{ m}$, $v < 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,深水急流 $d > 0.3 \text{ m}$, $v > 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[2,9]。三是覆盖条件:分为植生、非植生,并考虑河心洲的存在。

3.1.2 水文形态参数

为建立物理栖息地属性与生物群落是否存在/丰度高低的逻辑回归关系,应考虑对目标生物影响较大的物理栖息地属性。MesoHABSIM 模型常用于鱼类栖息地研究,水文形态模型参数中常涉及水深、流速、基质粒径、覆盖条件等,近期研究也开始考虑水质环境等条件^[8]。研究底栖动物栖息地属性时除考虑以上栖息地物理属性外,还应考虑河道底部条件和影响底栖生物的营养条件等。鱼类 MesoHABSIM 模型应用中

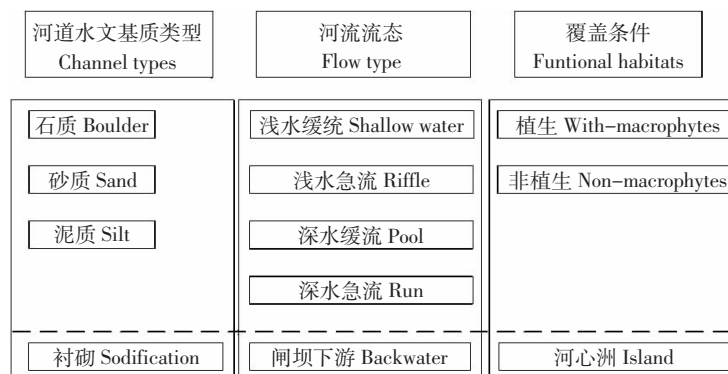


图 3 栖息地类型三级分类(HMU,水文形态单元类型)

Figure 3 Hydromorphological unit types

对水深、流速综合指标 Froude 值进行分析,该值能较好表征水体表面扰动的指标,已表明与物种和水文形态单元分布具有较强相关性。针对河流底栖生物,在水文形态参数中增加考虑反映河道底部条件的指标,包含 Reynolds 值、底部剪切力 Bottom Shear Stress 等。在 MesoHABSIM 修正模型水文形态参数基础上,选取栖息地基本属性参数见表 2。

3.2 生物模型

以物化属性作自变量,生物数据作因变量,建立栖息地环境物化属性与生物丰度的逻辑回归模型。在计算响应函数之前,通常进行交互相关分析排除多余参数。运用逐步逻辑回归模型确定目标物种使用最多的栖息地特征,为每个目标物种区分不适宜/适宜/最适栖息地。模型用概率比来确定回归公式中应考虑哪个系数:

$$R=e^{-z} \tag{1}$$

式中: e 是自然对数底; $z=b_1 \cdot x_1+b_2 \cdot x_2+\cdots+b_n \cdot x_n+a$; $x_1 \cdots x_n$ 是重要物化参数; $b_1 \cdots b_n$ 是回归系数; a 是常数。

3.2.1 目标物种

由于栖息地适宜度主要表征环境条件对目标物种的适宜程度,目标物种的确定是栖息地适宜度研究的重要基础。总结已有研究可看出目标物种的确定应满足以下原则:对环境条件相对敏感,适应较清洁水生环境;与物种种类或特定生命阶段相关;根据河段环境条件,考虑物种个体大小和移动性;考虑生物食性和在生态系统中的作用。

已有研究对 EPT 类群、蜻蜓目(Odonates)、蚌类(Freshwater mussels)、蜉蝣目(Mayfly)四节蜉属(*Baetis*)等底栖动物生物适宜性进行了分析。Jowett 研究砂砾基质河流底栖动物栖息地适宜度的水动力条件制约时,对常见的织网毛翅蝇、游动性蜉蝣目、滤食性蜉蝣目等进行研究^[12]。Mouton 运用 CASIMiR 模型,选取优

表 2 栖息地水文形态和基本属性参数
Table 2 habitat hydromorphologic and other basic parameters

参数类别	参数名称	单位/公式	等级	描述
水文形态参数	水文形态单元	是/否	5	深潭、浅滩急流、快流、浅水缓流、侧流
	水文形态单元纵向连通性	是/否	1	描述中尺度栖息地纵向连通性的二元属性
	覆盖条件	是/否	6	卵石、木冠遮蔽、木质物残体、悬伸植物、沉水植物、浅水边缘
	基质	随机测定百分比	12	7 个粒径范围、石质、木质、泥质、植物、动物残体
	水深	随机测定百分比	9	以 15 cm 为增量分类(0~120 cm 范围及以上)
	流速	随机测定百分比	9	以 15 cm·s ⁻¹ 为增量分类(0~120 cm·s ⁻¹ 范围及以上)
	Froude 值	$FR=U(gD)^{-0.5}$	1	水文形态单元内均值
	流速标准偏差	cm·s ⁻¹	1	水文形态单元内标准偏差
	河底剪切力	$\tau=\left(\frac{v}{5.75 \cdot \lg\left(\frac{12 \cdot d}{2 \cdot d_{65}}\right)}\right)^2 \cdot \rho$	1	水文形态单元内均值
	Reynolds 值	$Re=\frac{v \cdot 4 \cdot d}{\nu}$	1	水文形态单元内均值
	水宽/河宽	平均水宽/平均河宽	1	水文形态单元内均值
	水文形态多样性指数 HMID	$[1+(\delta/\mu_e)]^2 [1+\delta/\mu_w]^2$	1	水文形态单元内均值
基本理化参数和营养参数	水温	℃	1	点位测定值
	水体 pH	无	1	点位测定值
	溶解氧	%	1	点位测定值
	浊度	NTU	1	点位测定值
	电导率	μS·cm ⁻¹	1	点位测定值
	氧化还原电位	mV	1	点位测定值
	叶绿素	μg·L ⁻¹	1	点位测定值
	总溶解性固体	g·L ⁻¹	1	点位测定值
	盐度	%	1	点位测定值
	总氮	mg·L ⁻¹	1	点位测定值
	总有机碳	μg·g ⁻¹	1	点位测定值

势种蜉蛄目(Mayfly)四节蜉属(*Baetis rhodani*)作为指示生物研究城市河流栖息地适宜度^[5]。Parasiewicz 等选取蚌类,因其属于滤食动物对水体污染较敏感,尤其是幼体时期,且其繁殖周期内需要与特定鱼类物种相互作用^[7]。Caballero 等用 CASIMiR 栖息地模型方法研究水文脉冲对大型底栖动物的影响,选取四节蜉属、溪螭蜉属、纹石蛾等作为目标物种,因其具有不同的流量承受力,所以可能较大程度受水力干扰,同时还是研究河段内流动水体鱼类的重要食物来源^[9]。我国已有的大型底栖动物栖息地适宜度研究主要以调查流域优势种蜉蛄目四节蜉属(*Baetis*)为目标物种。李凤清等以香溪河(长江中游)为例,选择该流域河流大型底栖动物最优势类群四节蜉为指示生物^[10]。郑文浩等研究太子河流域大型底栖动物栖息地适宜性时,对该流域主要优势种热水四节蜉(*Baetis thermicus*)进行研究^[20]。

针对当前河流普遍存在的水动力条件弱、人为干扰较强等特点,选取目标底栖动物应满足以下筛选原则:其一,水动力条件较弱,选取适应中等流速水体的大型底栖动物;其二,水体污染较重,选取适应中等或偏清洁水体的底栖动物;其三,缺少洄游性或珍稀鱼类,选取调查河段鱼类的普食性底栖动物;其四,选取研究区域的优势种群作为目标物种;其五,已有目标物种栖息地适宜度曲线,可比较分析基础上缩小特定种群的适宜度范围,或对其他环境要素条件进行补充。结合已有生物调查数据,选择蜉蛄目、甲壳纲、蚌类等已有适宜度曲线物种作为目标物种。

此外,在单一目标物种基础上,借鉴“一般鱼”(Generic fish)概念,引入假设性概念“一般底栖动物”,研究利用相同栖息地的多物种,相对于将栖息地分配给某一特定物种。该方法更符合实际情况^[6]。

3.2.2 群落结构功能特征

在考虑目标物种基础上,大型底栖动物群落结构和功能特征的适宜度也具有重要意义,其中摄食方式是反映物种对环境条件适宜与否的典型特征,利用其摄食等功能特性可以使我们更加充分了解控制底栖动物分布的机理。根据动物的摄食对象和摄食方法的差异来分,底栖动物主要可分为撕食者 Shredder、集食者 Collector(牧食收集者 Collector-gatherer 和滤食收集者 Collector-filterer)、刮食者 Scraper、捕食者 Predator、寄生者 Parasite、杂食者 Omnivore 共 6~7 类不同的功能摄食组(Functional Feeding Groups,简称 FFG)^[13,21]。

流速、基质等环境因素影响底栖动物摄食方式,决定了底栖动物功能摄食类群组成。一般来说,平原河流(特别是城市河段)以淤泥基质为主,有机营养物质较多,可为收集者和滤食者提供丰富的食物来源;山区河流很多以卵石基质为主,表面着生的底栖藻类能够满足刮食者的摄食需求。此外,卵石能够支持以刮食者为食的更高营养级物种的生存繁殖,形成复杂的食物链,进而提高大型底栖动物群落结构的多样性^[22]。图 4 为大型底栖动物功能摄食类群示意图。

3.3 栖息地模型

对调查代表性点位描绘的每个中尺度栖息地,确定其不适宜/适宜/最适。用逻辑回归对实测数据进行分析,各类别是目标物种是否存在/丰度高低的的可能性函数。目标物种存在可能性由下式确定^[6]:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (2)$$

式中: P 是存在/丰度高的可能性; $z = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n + a$; $x_{1 \sim n}$ 是重要物化参数; $b_{1 \sim n}$ 是回归系数; a 是常数。

可能性通过预测存在和丰度的相对操作特性(ROC)曲线来对适宜度类型进行分类。分散节点概率(P_t)用于存在和丰度模型。存在可能性高于 P_t 的栖息地分为适宜性栖息地,具有高于选定 P_t 的丰度较高的适宜性栖息地视为最适栖息地。运用这些原则,在栖息地地图上可显示测定流量条件下高适宜度栖息地区域。总结河道各点位特定流量下,具有特定物种、特定生命阶段适宜或最适栖息地比例,获得两流量特性曲线,分别为适宜性和最适性栖息地;将最适栖息地权重设为 0.75,适宜栖息地设为 0.25,从而将两栖息地聚合为有效栖息地。此处权重因子的设定是为确保河流中最适栖息地的高贡献率。用插值方法计算常出现流量下的栖息地数值,用适当的线性曲线函数在不同流量下插值栖息地数值,用于构建目标物种及其特定生命阶段的流量/栖息地特性曲线。这些结果可用于分析河段内各物种适宜度。

4 结论与展望

(1)概念上,中尺度栖息地适宜度指特定流域水系内,河段(河长约为河宽 10 倍以上)河道内环境要素(水文形态、营养要素等)物化属性年内季节性时空分布特征对目标水生物种的适宜程度,且包含对群落结构功能和生态系统状态的适宜程度。

(2)模型方法上,比较常用中尺度栖息地适宜度模型,MesoHABSIM 方法能较客观详细地反映栖息地

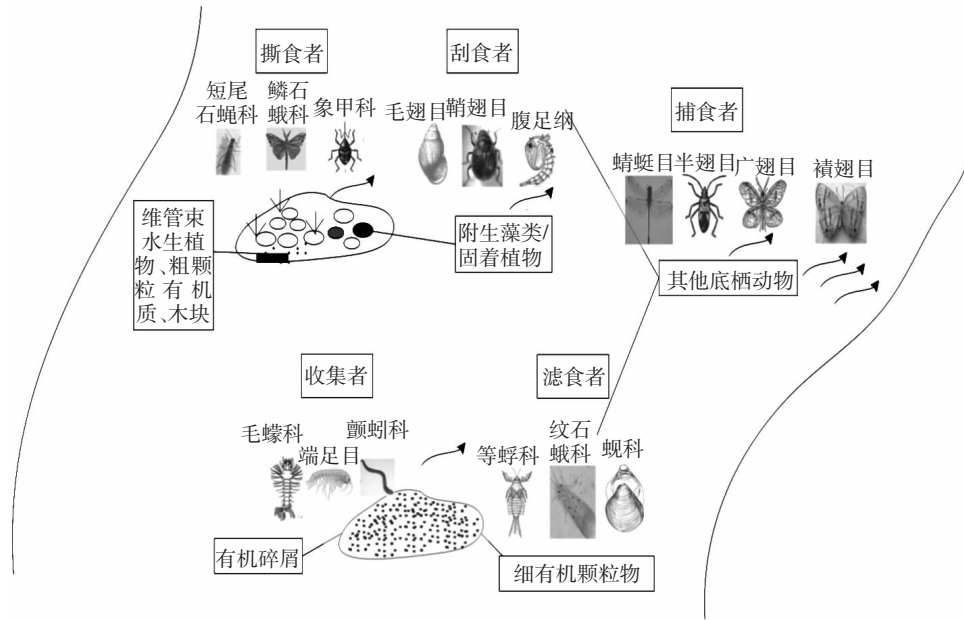


图4 大型底栖动物主要功能摄食类群示意图

Figure 4 Sketch map of Functional Feeding Groups of macroinvertebrates

条件对底栖动物的适宜程度。相比而言, Meso-CASiMiR 特定方法测定 FST-hemisphere, 可比性不足。除水深、流速、基质、覆盖类型等水文形态参数, 模型近期增加了水质和沉积物营养条件等参数, 并考虑运用相同栖息地的“一般鱼类”物种。

(3) 以 MesoHABSIM 为基础, 改进的大型底栖动物中尺度栖息地模型方法分为水文形态模型、生物模型和栖息地模型三部分: 水文形态模型的环境要素中, 针对大型底栖动物应增加底部剪切力等河道底部环境因素的考虑, 针对当前河流普遍存在的水动力条件弱、人为干扰大的特点, 以基质、流态、覆盖条件为一级、二级、三级分类依据; 生物模型的目标物种选取, 不应仅限于特定的目标物种, 也应关注水生生物的群落结构功能特征, 分析大型底栖动物群落 BI 指数和功能摄食类群, 建立改进的大型底栖动物的中尺度栖息地模型。

下一步研究应建立在大型底栖动物中尺度栖息地适宜度模型基础上, 以特定流域生态条件较好的水系为对象进行实例研究, 分析特定水深、流速、基质、覆盖类型、底部剪切力等环境要素对大型底栖动物种群、群落的影响; 同时, 结合底栖动物栖息地原位实验, 定量化分析不同类型栖息地的水文生态关系, 研究水文形态、水质营养条件对底栖动物的影响机制, 确定适宜目标底栖动物生活的栖息地条件, 减少人为河道衬砌、适度清淤, 保护河心洲, 增加河流栖息地多

样性和生物多样性, 从而增强河流生态完整性。

参考文献:

- [1] Poff N, Richter B, Arthington A, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): A new framework for developing regional environmental flow standards[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(1): 147–170.
- [2] Gostner W, Parasiewicz P, Schleiss A J. A case study on spatial and temporal hydraulic variability in an alpine gravel-bed stream based on the hydromorphological index of diversity[J]. *Ecohydrology*, 2013, 6(4): 652–667.
- [3] Zhang L L, Liu J L. Relationships between ecological risk indices for metals and benthic communities metrics in a macrophyte-dominated lake[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 40: 162–174.
- [4] Eisner A, Young C, Schnerder M, et al. MesoCASiMiR: New mapping method and comparison with other current approaches[J]. *COST*, 2006 (626): 65–74.
- [5] Mouton A M, Schneider M, Kopecki I, et al. Application of Meso-CASiMiR: Assessment of *Baetis rhodani* habitat suitability[J]. *COST*, 2006 (626): 249–258.
- [6] Parasiewicz P. The mesohabsim model revisited[J]. *River Research and Application*, 2007, 23(8): 893–903.
- [7] Parasiewicz P, Castelli E, Rogers J N, et al. Multiplex modeling of physical habitat for endangered freshwater mussels[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 228: 66–75.
- [8] Vezza P. Habitat modeling in high-gradient streams: The mesoscale approach and application[J]. *Ecological Applications*, 2014, 24(4): 844–861.
- [9] Yi Y J, Wang Z Y, Yang Z F. Impact of the Gezhouba and Three Gorges Dams on habitat suitability of carps in the Yangtze River[J]. *Journal of*

- Hydrology*, 2010, 387(3/4):283–291.
- [10] 李凤清, 蔡庆华, 傅小城, 等. 溪流大型底栖动物栖息地适合度模型的构建与河道内环境流量研究:以三峡库区香溪河为例[J]. 自然科学进展, 2008, 18(12):1417–1424.
- LI Feng-qing, CAI Qing-hua, FU Xiao-cheng, et al. Study on stream macroinvertebrates suitability model and instream environmental flow: Application to Xiangxi River, Three Gorges Reservoir area[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(12):1417–1424.
- [11] 易雨君, 王兆印, 陆永军. 长江中华鲟栖息地适合度模型研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(4):538–543.
- YI Yu-jun, WANG Zhao-ying, LU Yong-jun. Habitat suitability index model for Chinese Sturgeon in the Yangtze River[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(4):538–543.
- [12] Jowett I G. Hydraulic constraints on habitat suitability for benthic invertebrates in gravel-bed rivers[C]. Joint Meeting on Environmental Flows for River Systems/4th International Ecohydraulics Symposium, 2003, 19(5–6):495–507.
- [13] Newson M D, Newson C L. Geomorphology, ecology and river channel habitat: Mesoscale approaches to basin-scale challenges[J]. *Progress in Physical Geography*, 2000, 24(2):195–217.
- [14] Pardo L, Armitage P D. Species assemblages as descriptors of mesohabitats[J]. *Hydrobiologia*, 1997, 344(1–3):11–28.
- [15] 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 Yu-jun, CHENG Xi, ZHOU Jing. Research progress in habitat suitability assessment methods[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(5):887–893.
- [16] 蒋红霞, 黄晓荣, 李文华. 基于物理栖息地模拟的减水河段鱼类生态需水量研究[J]. 水利发电学报, 2012, 31(5):141–147.
- JIANG Hong-xia, HUANG Xiao-rong, LI Wen-hua. Ecological water demand of fish in flow reducing reach based on physical habitat simulation[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(5):141–147.
- [17] Davenport A J, Gurnell A M, Armitage P D. Habitat survey and classification of urban rivers[J]. *River Research and Applications*, 2004, 20(6):687–704.
- [18] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *Journal of Geology*, 1922, 30(5):377–392.
- [19] Caballero A D, Kopecki I, Schneider M, et al. Assessment of hydropeaking impact on Macrozoobenthos using Habitat modelling approach[J]. *Civil and Environmental Research*, 2013, 3(11):8–17.
- [20] 郑文浩, 渠晓东, 张 远, 等. 太子河流域大型底栖动物栖息地适宜性[J]. 环境科学研究, 2011, 24(12):1355–1363.
- ZHENG Wen-hao, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, et al. Habitat suitability of macroinvertebrates in the Taizi River Basin, Northeast China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(12):1355–1363.
- [21] 段学花. 河流泥沙对底栖动物的生态影响研究[D]. 北京:清华大学, 2009:15–17.
- DUAN Xue-hua. Ecological impacts of water and sediment transportation on macroinvertebrate community in rivers[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009:15–17.
- [22] 王 强, 袁兴中, 刘 红. 西南山地源头溪流附石性水生昆虫群落特征及多样性:以重庆鱼肚河为例[J]. 水生生物学报, 2011, 35(5):887–892.
- WANG Qiang, YUAN Xing-zhong, LIU Hong. Community and biodiversity of aquatic insects attached on the stones in upland headwater stream of Southwestern China: A case study of Yudu Stream in Chongqing[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(5):887–892.