

DOI: 10.5846/stxb201909201973

粟一帆, 李卫明, 李金京, 孙徐阳, 胡威. 桥边河大型底栖动物生境适宜性. 生态学报, 2020, 40(16): 5844-5854.

Su Y F, Li W M, Li J J, Sun X Y, Hu W. Habitat suitability of macroinvertebrates: a case study in Qiaobian River, a tributary of Yangtze River, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5844-5854.

## 桥边河大型底栖动物生境适宜性

粟一帆, 李卫明\*, 李金京, 孙徐阳, 胡威

三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002

**摘要:** 构建精度高, 适用性强的水生生物生境适宜性评价模型, 为河流生境质量评价和生境修复提供理论依据。以长江一级支流桥边河为例, 采用典范对应分析和独立性分析, 筛选出影响桥边河大型底栖无脊椎动物优势种河蚬生境质量的关键化学因子和物理因子, 利用广义加性模型与多项式拟合模型构建生境因子与生物选择的关系。结果表明: (1) 影响桥边河河蚬生境质量的主要因子为  $COD_{Mn}$ 、TN、DO、Tur (浊度) 和 Dep (水深); 其中  $COD_{Mn}$ 、TN、Tur、Dep 与大型底栖无脊椎动物分布成负相关, DO 与大型底栖无脊椎动物分布成正相关; (2) 桥边河流域河蚬的最适宜  $COD_{Mn}$  含量为 1.228 mg/L, 最适宜 TN 含量为 0.269 mg/L, 最适宜 DO 含量为 11.170 mg/L, 最适宜 Dep 为 0.3 m, 最适宜 Tur 为 1.130 NTU。 (3) 线性拟合情况下两种方法均适用; 非线性拟合情况下广义加性模型较优于传统多项式拟合模型, 且 GAM 模型在处理离散程度大的数据集时, 可以很好的规避多项式拟合过程中出现的过拟合现象。研究显示, 运用 GAM 模型可以更加精确、合理的模拟生境因子与生物选择之间的关系。

**关键词:** 大型底栖无脊椎动物; 广义加性模型; 多项式拟合; 生境适宜性

## Habitat suitability of macroinvertebrates: a case study in Qiaobian River, a tributary of Yangtze River, China

SU Yifan, LI Weiming\*, LI Jinjing, SUN Xuyang, HU Wei

College of Hydropower and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

**Abstract:** The health of the Yangtze River Basin is threatened by increasing hydropower development and human activities. How to properly diagnose river has become a global concern. Constructing high accuracy and strong applicability habitat suitability assessment model to evaluate river habitat health statue can provide theoretical basis for habitat quality assessment and habitat restoration in rivers. In this paper, the habitat suitability of macroinvertebrates in Qiaobian River, a tributary of the Yangtze, China was evaluated by investigating the distribution of macroinvertebrates, chemical and physical parameters during January and April, 2019. Base on macroinvertebrate habitat suitability, the key habitat factors were screened by Canonical correlation analysis (CCA) and Independent analysis (Pearson correlation analysis and Spearman correlation analysis). Suitability curves were determined by Generalized Additive Model (GAM) and Polynomial Fitting Model (PFM). The results indicated that: (1) five factors, including  $COD_{Mn}$ , total nitrogen (TN), dissolved oxygen (DO), turbidity and water depth, had significant effects on *Corbicula fluminea*, the dominant species of Qiaobian River. The *Corbicula fluminea* was negatively correlated with  $COD_{Mn}$ , TN, turbidity and water depth and positively correlated with DO. (2) Most suitable  $COD_{Mn}$  of 1.228 mg/L, TN of 0.269 mg/L, DO of 11.170 mg/L, water depth of 0.300m and turbidity of 1.130 NTU. (3) While both methods were applicable in the case of linear fitting, Generalized Additive Model is better than Polynomial Fitting Model in the case of nonlinear fitting, and the GAM can avoid the over-fitting phenomenon in the process

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(51979149)

收稿日期: 2019-09-20; 网络出版日期: 2020-06-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lwm00001@126.com

of polynomial fitting when dealing with data sets with large discretization degree. The research shows that the GAM can more accurately and reasonably simulate the relationship between habitat factors and biological selection, which has important practical significance for river habitat quality evaluation and habitat restoration.

**Key Words:** macroinvertebrates; generalized additive model; polynomial curve fitting; habitat suitability

河流生态系统作为陆地生态系统和水生生态系统在物质、能量和信息交换中的纽带,是自然生态系统的重要组成部分之一<sup>[1]</sup>。受水利水电工程建设和人类活动的影响,自然河流生态系统健康受到了严重威胁,引发了保护河流生态水环境的热潮<sup>[2-3]</sup>。水生生物是河流生态系统的重要组成部分,其生境质量状况对流域水资源管理、河流生态恢复有重要的意义<sup>[4]</sup>。如何选择合适的水生生物生境适宜性评价方法,建立准确的生物与环境因子间的响应关系,受到学术界的广泛关注。

建立水生生物与环境因子之间的适宜性曲线,是水生生物生境适宜性研究最常用的方法<sup>[5]</sup>。最早运用适宜性曲线描述河流生境质量的是专家评判法,利用专家知识和实践经验对环境因子与生物选择在 $[0, 1]$ 之间进行评分。最常见的专家评判法有 PHABSIM 模型和模糊逻辑评价法<sup>[6-7]</sup>,当数据集偏小且对评价结果的主客观性要求不高时,专家评判法适用性较好;如果考虑的环境因子过多,数据量过大,专家评判法不再适用。数学统计方法、数学模型可以较好的解决这一问题,生境适宜性研究中常用的数学统计方法、模型有多项式拟合、广义线性模型 (Generalize Linear Model, GLM) 和广义加性模型 (Generalized Additive Model, GAM) 等<sup>[8-10]</sup>。Martínez-Rincón 等利用 GAM 模型和改进回归树模型对刺鲃生境适宜性进行拟合<sup>[11]</sup>, Mouton 等利用模糊逻辑模型和单变量适宜性曲线方法进行褐鳟鱼生境适宜性评价<sup>[12]</sup>。郑文浩等通过加权平均法研究了太子河流域大型底栖无脊椎动物生境适宜性<sup>[13]</sup>,李若男等利用模糊逻辑模型研究了漓江光倒刺鲃的生境适宜性<sup>[14]</sup>,易雨君等利用 GAM 模型对长江中华鲟进行了生境适宜性评价<sup>[15]</sup>。

水生生物生境适宜性研究方法虽然很多,但优缺点各异,使用单一的方法很难满足精度和适应性的问题。为探寻精度高,适用性强的水生生物生境适宜性研究模型,本研究选取长江一级支流桥边河为研究对象,利用典范对应分析 (Canonical correlation analysis, CCA) 与独立性分析探寻影响桥边河大型底栖无脊椎动物生境变化的关键因子,采用多项式拟合和 GAM 模型分别拟合关键因子与底栖动物优势种的联系,并进行拟合结果精度比较,得到精度高、适用性强的的大型底栖动物生境适宜性研究模型。以期为河流生境质量评价和生态修复提供理论基础。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区域

桥边河发源于宜昌市点军与长阳交界的土城红岩湾,于点军社区注入长江,系长江右岸的一级支流。流域面积 295 km<sup>2</sup>,主河道长 40 km,最高海拔 568 m,最低海拔 55 m,是宜昌市重要的引用水源地之一。课题组于 2019 年 1 月和 4 月对桥边河进行采样调查,主要包括 3 个区域 (图 1):点军—桥边 (S1—S3),桥边—土城 (S4—S6),土城—源头 (S7—S8)。

### 1.2 数据收集

#### 1.2.1 底栖动物采集

依据 HJ 710.8—2014《生物多样性观测技术导则淡水底栖大型无脊椎动物》的规定,考虑河流形态、宽度、底质类型等因素,采用 500  $\mu\text{m}$  D 形网在每个采样点两岸上下游 100 m 内的可涉水区域各采集 3 个分样,每个分样点采样面积 0.3 m<sup>2</sup>,将 6 个分样点的样品汇聚为一个样品,每个采样点采样总面积均为 1.8 m<sup>2</sup>。大型底栖无脊椎动物样本经 0.5 mm 钢筛网筛洗后装入 500 mL 标本瓶,样本加入 10% 甲醛溶液固定<sup>[16]</sup>,在底部印有 5 cm×5 cm 网格线的白色搪瓷盘中进行底栖动物人工挑拣取样,室内挑拣并鉴定所有个体至可行的最低分类

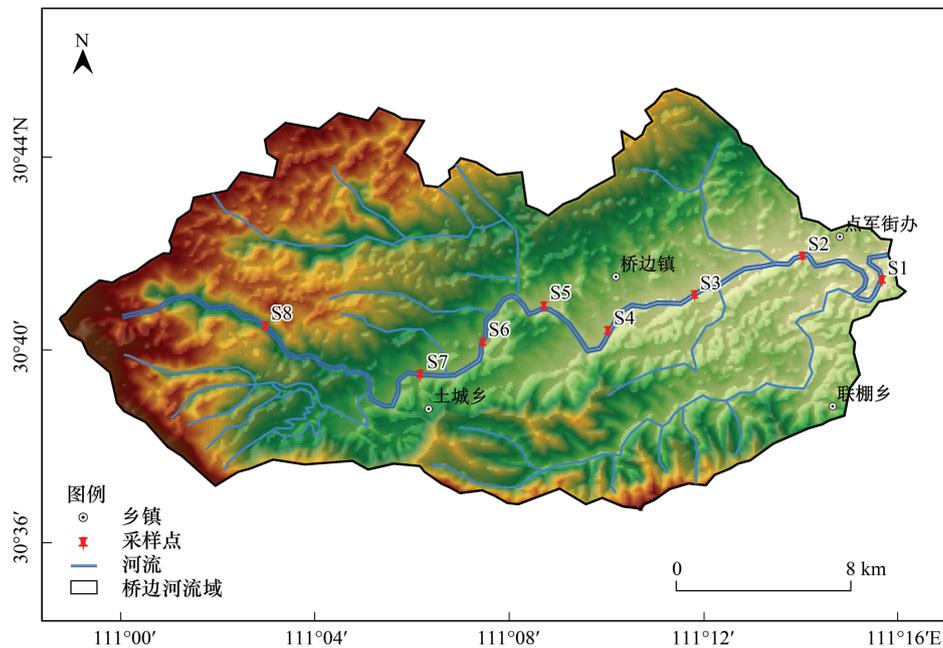


图1 桥边河采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling points in Qiaobian River

单元,其中寡毛类鉴定至纲,摇蚊类鉴定至亚科。样品在分类计数时,若标本损坏则只统计头部,计算密度(个/ $\text{m}^2$ )。称重时,先用滤纸将样品表面的水分吸干,再用万分之一电子天平称重,计算生物量( $\text{g}/\text{m}^2$ )<sup>[17]</sup>。

### 1.2.2 生境因子采集

本次调查收集的生境因子包括水深(Dep)、浊度(Tur)、河床中值粒径( $D_{50}$ )、温度(Tem)、流速(Vel)、pH、溶解氧(DO)、化学需氧量( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、正磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ )。Dep、Tem、pH、Tur、DO等利用Hydrolab DS5多参仪(美国)现场测定;Vel采用Vector声学多普勒点式流速仪(挪威)现场测定; $D_{50}$ 采用马尔文2000激光粒度仪自动分析;其余因子通过低温保温箱带回实验室后测定。水样的鉴定与保存参照《水和废水监测分析方法》(第四版)。

### 1.3 统计分析方法

#### 1.3.1 大型底栖无脊椎动物分布特征

运用优势度指数选取桥边河底栖动物优势种<sup>[18]</sup>,优势度指数计算见式(1):

$$P = (n_i/N)f_i \quad (1)$$

式中, $n_i$ 为第*i*种的总个体数, $N$ 为所有物种的总个体数, $f_i$ 为第*i*种在各站位出现的频率,以 $P>0.02$ 作为优势种判定阈值。

#### 1.3.2 生境因子选择

利用束缚型排序(Constrained ordination)确定大型底栖无脊椎动物生境的水环境驱动因子<sup>[19]</sup>。大型底栖无脊椎动物群落的除趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)最大梯度长度为3.6,单峰模型的典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)适用本研究<sup>[20]</sup>。为减少实验分析误差,选择在3个或以上样品中出现,且相对丰度 $>1\%$ 的底栖动物种群进行CCA分析<sup>[21]</sup>,为保证CCA分析时物种数大于环境因子数,本文选取相对丰度排名前10的物种进行分析。采用Pearson相关性分析法与Spearman相关性分析法剔除相关性高的生境因子。运用CANOCO 5进行DCA与CCA分析,运用SPSS 22进行相关性分析。

#### 1.3.3 底栖动物生境拟合

以优势种在点位出现的个数为自变量,以关键生境因子为因变量,利用多项式拟合和广义加性模型构建

大型底栖无脊椎动物与生境因子的隶属度模型。

多项式拟合的一般公式<sup>[22]</sup>为

$$f(c_0 + c_1x + \dots + c_nx^n) \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

式中,  $c_n$  为多项式拟合系数。

广义加性模型(GAM)的一般公式<sup>[23]</sup>为

$$g(\mu(Y)) = \beta_0 + f_1(x_1) + \dots + f_m(x_m) \quad (3)$$

式中,  $g(\cdot)$  函数为连接函数,  $\mu(Y)$  为  $Y$  的期望,  $\beta_0$  为截距,  $f_i(\cdot)$  是非参数光滑函数。

利用 Origin 9 进行多项式拟合,利用 R 软件(version 3.3.2)的“mgcv”工具包进行 GAM 分析,基础数据处理与统计在 Excel 2016 中完成。

## 2 结果

### 2.1 底栖动物组成与生境因子

#### 2.1.1 底栖动物组成

调查共采集到底栖动物 1152 头,隶属于 3 门 5 纲 19 科。其中节肢动物种类最多,占总物种数的 68.4%,其次为软体动物,占总物种数的 26.3%,环节动物最少,占总物种数的 5.3%。优势度指数计算结果显示,桥边河主要优势物种有黄色羽摇蚊、溪蟹、方格短沟蜷、圆顶珠蚌、耳萝卜螺、梨形环棱螺和河蚬。各优势种沿程分布见表 1,黄色羽摇蚊、方格短沟蜷、圆顶珠蚌和耳萝卜螺主要分布于点军—桥边,谭氏泥蟹主要分布于土城—源头段。由于河蚬在河流各个区域均有出现,本研究以河蚬为指示物种进行研究。

表 1 桥边河优势种分布

Table 1 Distribution of dominant species in Qiaobian River

物种名 Species	采样点编号 Sampling point							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
黄色羽摇蚊 <i>Chironomus flaviplumus</i>		√	√	√				
谭氏泥蟹 <i>Ilyoplax deschampsii</i>						√	√	√
方格短沟蜷 <i>Semisulcospira cancellata</i>	√	√		√		√		
圆顶珠蚌 <i>Unio douglasiae</i>		√	√	√				
耳萝卜螺 <i>Radix auricularia</i>	√	√					√	
梨形环棱螺 <i>Bellamyia purificata</i>		√	√	√		√		
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	√	√	√	√	√	√	√	√

1) “√”表示优势种在样点出现; 2) S1—S8 为采样点编号。

#### 2.1.2 生境因子

桥边河水深等生境因子的统计结果见表 2。总体来看,桥边河流域生境状况较好,TN、TP 平均值分别为 0.470、0.078 mg/L,未超过 GB 3838—2002 II 类标准限值。但局部地区的生境状况较差,TN 的最大值(1.064 mg/L)超过 GB 3838—2002 II 类标准限值 2 倍以上, $\text{NO}_3\text{-N}$  与 TP 的最大值也超过了 II 类标准限值。桥边河沿程水深不大,最浅的地方为 8 号样点,水深仅 0.2 m。桥边河河床底质粒径空间异质性明显,下游底质多为细沙为主;靠近上游区域河床底质以卵砾石为主, $D_{50}$  在 50 mm 左右。

### 2.2 化学因子与底栖动物的关联性

底栖动物物种与化学因子的 CCA 分析见表 3 与图 2,前四轴的变异解释率累积为 47.72%,蒙特卡罗检验( $n=499$ )对所有轴均有显著性意义( $P<0.05$ )。与第二排序轴相关性较高的化学因子有 TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、pH、DO。TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  与第二排序轴呈显著负相关,pH、DO 与第二排序轴呈显著正相关。优势种河蚬与 DO、pH 的夹角为锐角,河蚬与 DO 呈正相关;河蚬与 TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的夹角为钝角,河蚬与这些因子呈负相关。

表 2 桥边河生境因子值

Table 2 Values of habitat factor in Qiaobian River

生境因子 Habitat factors		平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum
化学因子 Chemical factor	TN/(mg/L)	0.470	0.232	1.064
	NO <sub>3</sub> -N/(mg/L)	0.350	0.185	0.695
	NH <sub>4</sub> -N/(mg/L)	0.041	0.011	0.124
	TP/(mg/L)	0.078	0.013	0.168
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /(mg/L)	0.017	0.005	0.032
	COD <sub>Mn</sub> /(mg/L)	1.831	1.058	2.413
	DO/(mg/L)	11.813	11.000	12.710
	pH	8.230	7.860	8.660
物理因子 Physical factor	Tur/NTU	11.073	0.530	41.740
	Tem/°C	9.673	7.680	11.540
	Vel/(m/s)	0.781	0.250	1.600
	Dep/m	0.929	0.200	2.100
	D <sub>50</sub> /mm	17.896	0.054	61.321

TN: 总氮, Total nitrogen; NO<sub>3</sub>-N: 硝态氮, Nitrate; NH<sub>4</sub>-N: 铵态氮, Ammonium; TP: 总磷, Total phosphorus; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>: 正磷酸盐, Orthophosphate; COD<sub>Mn</sub>: 化学需氧量, Chemical oxygen demand; DO: 溶解氧, Dissolved oxygen; pH: 氢离子浓度指数, Hydrogen ion concentration; Tur: 浊度, Turbidity; Tem: 温度, Temperature; Vel: 流速, Flow velocity; Dep: 水深, Water depth; D<sub>50</sub>: 河床中值粒径, Median bed size

表 3 化学因子 CCA 相关性

Table 3 Weighted correlation of chemical variables with CCA

化学因子 Chemical factor	轴 1 Axis1	轴 2 Axis2	化学因子 Chemical factor	轴 1 Axis1	轴 2 Axis2
TN	-0.460	-0.501	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-0.356	-0.095
NO <sub>3</sub> -N	-0.521	-0.543	COD <sub>Mn</sub>	-0.754	-0.556
NH <sub>4</sub> -N	-0.529	-0.482	pH	0.380	0.611
TP	-0.177	-0.079	DO	0.392	0.489

### 2.3 物理因子与底栖动物的关联性

底栖动物物种与物理因子的典范对应分析见表 4、图 3, 前四轴的变异解释率累积为 67.4%, 蒙特卡罗检验 ( $n=499$ ) 对所有轴均有显著性意义 ( $P<0.05$ )。与第二排序轴相关性较高的因子有 D<sub>50</sub>、Dep、Tur。Tem 与第一轴的相关性较高, 但第一轴解释类群变化的贡献相较第二轴较小, 所以 Tem 的贡献较小。优势种河蚬与 D<sub>50</sub>、Dep、Tur 的夹角为钝角, 表明河蚬与这些环境因子呈负相关关系。

表 4 物理因子 CCA 相关性

Table 4 Weighted correlation of physical variables with CCA

物理因子 Physical factor	轴 1 Axis1	轴 2 Axis2	物理因子 Physical factor	轴 1 Axis1	轴 2 Axis2
Vel	0.263	-0.199	Tem	0.503	-0.144
D <sub>50</sub>	-0.358	-0.691	Tur	-0.262	-0.532
Dep	-0.475	0.708			

### 2.4 生境因子与底栖动物的响应关系

对生境因子进行独立性分析, 首先进行 K-S 正态检验, 对符合正态分布的指标进行 Pearson 相关分析, 对不符合正态分布的指标进行 Spearman 相关分析, 以相关系数  $|R|>0.75$  为阈值<sup>[24]</sup>, 相关性分析结果见表 5。水质因子中, COD<sub>Mn</sub> 与 NH<sub>4</sub>-N、TN 与 NO<sub>3</sub>-N、TN 与 NH<sub>4</sub>-N 相关系数均超过 0.75, 具有较高的相关性。鉴于数

据的易得性,剔除 NH<sub>4</sub>-N 与 NO<sub>3</sub>-N;pH 与 DO 存在较高的相关性,桥边河沿程 pH 变异度不高,因此剔除 pH 因子。环境因子中,D<sub>50</sub>与 Tur 和 Dep 之间存在较高的相关性,因此剔除 D<sub>50</sub>。

利用多项式拟合和广义加性模型构建底栖动物与生境因子的隶属度关系,拟合结果见图 4。由于 Tur 数据变异度过大,采用 lg(x+1)进行数据处理。河蚬的最适宜 COD<sub>Mn</sub> 含量为 1.228 mg/L,最适宜的 TN 含量为 0.269 mg/L,最适宜的 DO 含量为 11.170 mg/L,最适宜的 Tur 为 1.130 NTU,最适宜的 Dep 为 0.3 m。

### 3 讨论

#### 3.1 生境适宜性模拟对比

GAM 广义加性模型与传统多项式拟合模型的拟合结果对比见表 6。COD<sub>Mn</sub>、TN、Tur、Dep 的拟合结果显示 GAM 广义加性模型优于传统多项式拟合模型,非线性拟合情况下 GAM 广义加性模型拟合结果较好;DO 模拟结果显示两种方法的 R<sup>2</sup> 大致接近,多项式拟合结果较优于 GAM 拟合结果,线性拟合情况下多项式拟合结果较好。TN 拟合结果两者接近,GAM 拟合结果较优,多项式拟合结果出现过拟合情况,TN 处于 0.65—1.00 mg/L 时,底栖动物适宜性出现负值,多项式拟合过拟合现象在 Tur 拟合中也有体现。多项式拟合是预测水生生物物种丰富度和栖息地适宜性的常用方法<sup>[25-26]</sup>,但由于其处理非线性问题时常出现多重共线问题和过拟合等现象,因此,多项式拟合方法有很大的局限性。广义加性模型因其灵活性和处理非线性问题的优越性,被广泛应用于预测河流中鱼类、大型底栖无脊椎动物、沉水植物的分布中<sup>[27-28]</sup>。Myers 等<sup>[29]</sup>的研究表明,当线性模型不能很好表征物种与各因子相关性时,GAM 等模型可以进行相应替代,但需注意 GAM 模型难以输出具体拟合函数的问题。本研究显示,线性拟合情况下两种方法均适用;非线性拟合情况下 GAM 广义加性模型较优于传统多项式拟合模型,且 GAM 模型在处理离散程度大的数据集时,可以很好的规避多项式拟合过程中出现的过拟合现象。

#### 3.2 生境因子与大型底栖无脊椎动物联系

CCA 排序与 Pearson 相关性分析结果显示,影响桥边河大型底栖无脊椎动物优势种生境质量的主要因子为 COD<sub>Mn</sub>、TN、DO、Tur、Dep。COD<sub>Mn</sub>、TN、Tur 和 Dep 与河蚬的分布成负相关关系,DO 与河蚬的分布成显著正相关关系,分析结果与段学花等人的研究结果

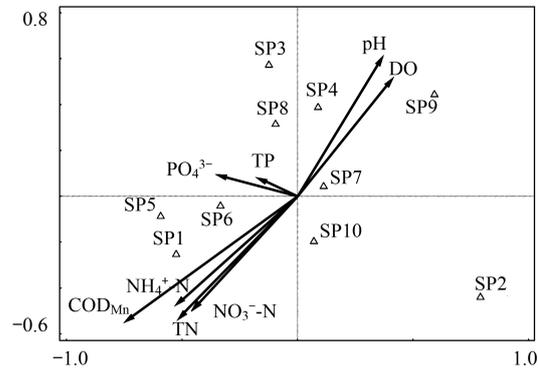


图 2 化学因子 CCA 排序图

Fig.2 Canonical correspond analysis of chemical factors  
SP1 为 *Chironomus flaviplumus*; SP2 为 *Ilyoplax deschampsi*; SP3 为 *Semisulcospira cancellata*; SP4 为 *Unio douglasiae*; SP5 为 *Radix auricularia*; SP6 为 *Bellamyia purificata*; SP7 为 *Corbicula fluminea*; SP8 为 *Corophium acherusicum costa*; SP9 为 *Chinese white prawn*; SP10 为 *Bellamyia aeruginosa*; TN: 总氮, Total nitrogen; NO<sub>3</sub>-N: 硝态氮, Nitrate; NH<sub>4</sub>-N: 铵态氮, Ammonium; TP: 总磷, Total phosphorus; PO<sub>4</sub>-P: 正磷酸盐, Orthophosphate; COD<sub>Mn</sub>: 化学需氧量, Chemical oxygen demand; DO: 溶解氧, Dissolved oxygen; pH: 氢离子浓度指数, Hydrogen ion concentration

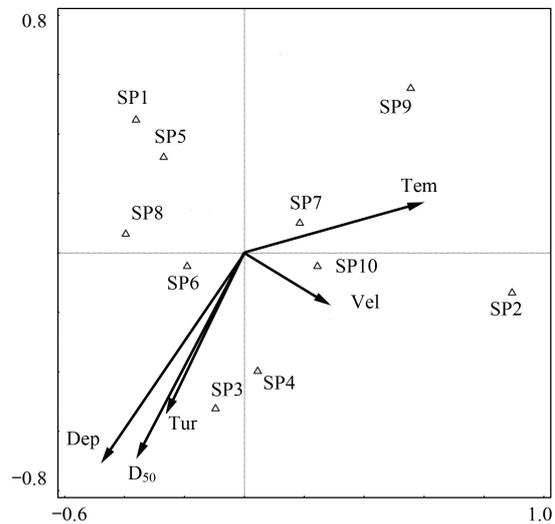


图 3 环物理子 CCA 排序图

Fig.3 Canonical correspond analysis of physical factors  
SP1 为 *Chironomus flaviplumus*; SP2 为 *Ilyoplax deschampsi*; SP3 为 *Semisulcospira cancellata*; SP4 为 *Unio douglasiae*; SP5 为 *Radix auricularia*; SP6 为 *Bellamyia purificata*; SP7 为 *Corbicula fluminea*; SP8 为 *Corophium acherusicum costa*; SP9 为 *Chinese white prawn*; SP10 为 *Bellamyia aeruginosa*; Tur: 浊度, Turbidity; Tem: 温度, Temperature; Vel: 流速, Flow velocity; Dep: 水深, Water depth; D<sub>50</sub>: 河床中值粒径, Median bed size

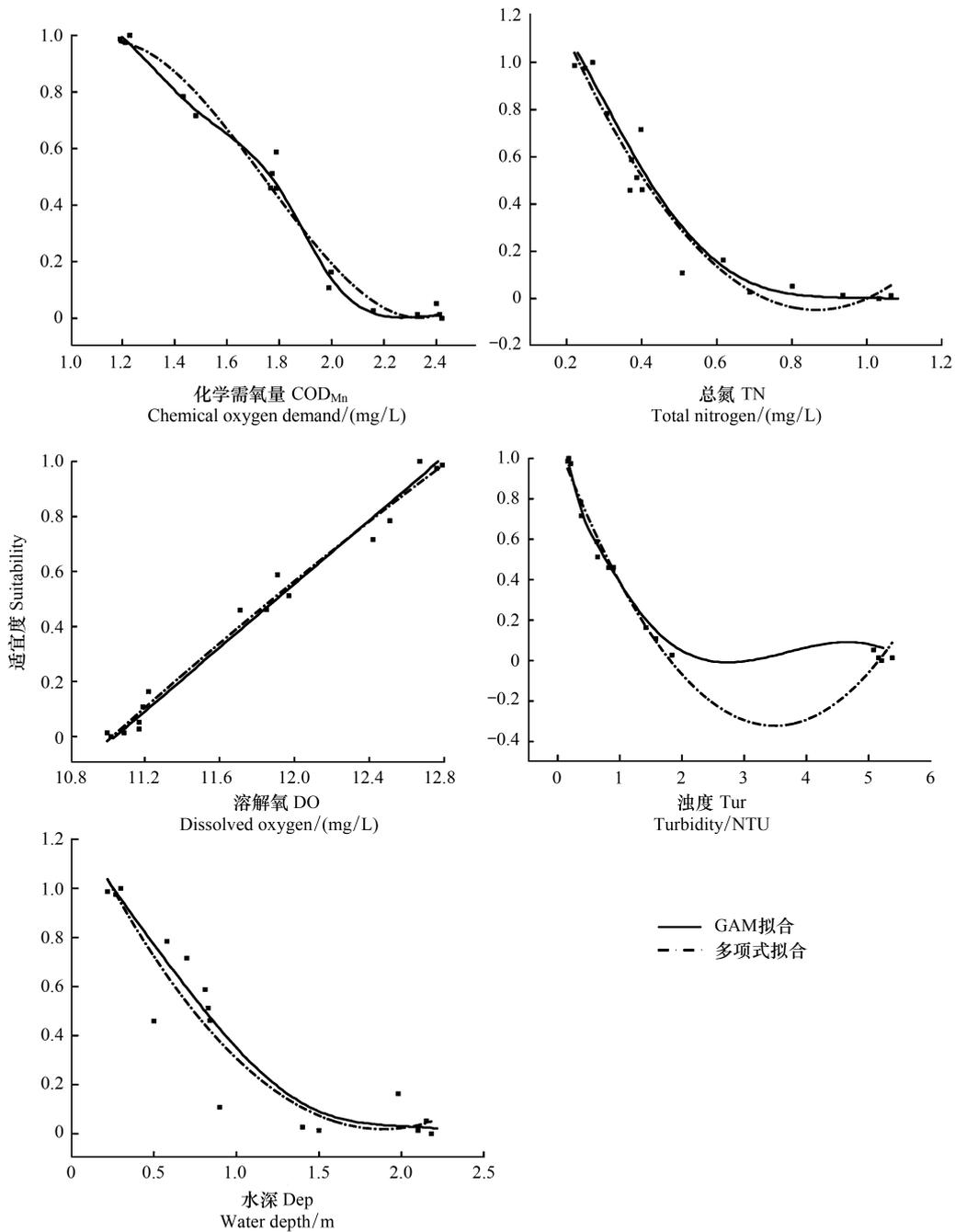


图4 桥边河生境因子隶属度

Fig.4 Membership degree of habitat factors in Qiaobian River

类似<sup>[30-32]</sup>。

COD<sub>Mn</sub>是测定河流有机物含量的重要指标,主要应用于河流污染评估和工业废水性质的研究以及废水处理厂的运行管理<sup>[33]</sup>。广义加性模型与多项式拟合模型结果显示,桥边河流域河蚬的最适宜 COD<sub>Mn</sub> 含量为 1.228 mg/L,多项式拟合结果显示河蚬生境适宜性随着 COD<sub>Mn</sub> 升高而降低,当 COD<sub>Mn</sub> 超过 2.159 mg/L 时,河蚬生境适宜性降低为 0。河蚬多分布河流近岸带,靠近工业废水排污口、污水处理厂排污口,水体 COD<sub>Mn</sub> 较高易造成水体缺氧和富营养化<sup>[34]</sup>,因此随着桥边河水域 COD<sub>Mn</sub> 增高,河蚬生境适宜性显著降低。广义加性模型显示,当 COD<sub>Mn</sub> 升至 1.6—1.8 mg/L 时,河蚬生境适宜性下降趋势有一定减缓,分析发现这可能与河蚬是一种中

度耐污种有一定关系。大型底栖无脊椎动物耐污值研究结果显示, 蝇类耐污值约为 6—8(总分 10 分), 可以在一定的污染环境中生存<sup>[35]</sup>, 且一定浓度的污水可以为河蚬提供生产所需有机物, 因此, 适宜性模拟结果出现较小波动。然而较高的 COD<sub>Mn</sub> 依旧对河蚬的生产生活呈显著的抑制作用。

表 5 相关分析结果

Table 5 Results of Spearman and Pearson correlation analysis

项目 Projects	COD <sub>Mn</sub>	TN	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N	pH	DO	Tur	D <sub>50</sub>	Dep
COD <sub>Mn</sub>	1.000 a								
TN	0.721a **	1.000a							
NO <sub>3</sub> -N	0.724a **	0.967a **	1.000a						
NH <sub>4</sub> -N	0.824a **	0.811a **	0.826a **	1.000a					
pH	-0.201a	-0.182a	-0.191a	0.658a	1.000a				
DO	-0.324a	-0.243a	-0.286a	-0.287a	0.767a **	1.000a			
Tur	-0.165b	0.361b	0.293b	0.397b	-0.241b	-0.273b	1.000b		
D <sub>50</sub>	-0.134b	0.397b	0.231b	0.296b	-0.283b	-0.237b	0.773b **	1.000b	
Dep	-0.309b	-0.244b	-0.189b	-0.155b	0.299b	-0.585b	0.719b **	0.785b **	1.000b

a 表示 Pearson 相关性分析, b 表示 Spearman 相关性分析; \*\* 表示  $P < 0.01$

表 6 隶属度对比分析

Table 6 Comparative analysis of membership degree

项目 Projects	COD <sub>Mn</sub>	TN	DO	Tur	Dep
多项式拟合 $R^2$ Polynomial fitting model $R^2$	0.953	0.914	0.983	0.749	0.832
GAM 拟合 $R^2$ Generalized additive model $R^2$	0.986	0.945	0.982	0.984	0.893

TN 是判别河流富营养化的主要因子之一<sup>[36]</sup>。广义加性模型与多项式拟合模型结果显示, 桥边河流域河蚬的最适宜 TN 含量为 0.269 mg/L, 多项式拟合结果显示随着 TP 升高河蚬生境适宜性急剧降低。水体中 N 等营养物质含量过多将导致水体富营养化, 河流生态系统失衡, 藻类等单一物种迅速繁殖, 严重挤占河流中大型底栖无脊椎动物生态位, 抑制底栖动物的生长繁殖<sup>[37]</sup>。水体中大量营养物质经水域微生物分解, 会消耗水中溶氧, 也会抑制底栖动物生长<sup>[38]</sup>。多项式拟合结果当 TN 升至 0.8—1.0 mg/L 时, 河蚬生境适宜性出现一定程度回升, 这可能与底栖动物食物链有一定联系。当水体有机物增多时, 水体中的藻类能够利用环境中的氮素等显著提高其初级生产力, 为河蚬提供充足食物, 河蚬生境适宜性有一定提升。

DO 是水生生物赖以生存的必要生命因子之一, 水体中 DO 的多寡极大影响水生生物的摄食、繁殖等生命过程。广义加性模型与传统多项式拟合模型结果显示, 桥边河流域河蚬的最适宜 DO 含量为 11.170 mg/L, 桥边河流域 DO 处于有益于河蚬生长的范围, 且一定范围内 DO 的增高, 河蚬生境适宜性有进一步提升的趋势。河蚬等原生底栖动物物种可以直接利用水中的溶解氧进行生长繁殖, DO 是河蚬生境分布的直接驱动因素之一, 因此河蚬生境适宜性与 DO 呈显著正相关; 另一方面, DO 的增加可以抑制水体的反硝化过程<sup>[39]</sup>, 亚硝酸盐、硝酸盐等不易在反硝化细菌作用下生成氨氮, 减弱了河蚬等的氨氮中毒风险<sup>[40]</sup>。同时溶解氧的增加将提高河蚬的食物同化率, 促进河蚬的增长。

水深是研究大型底栖无脊椎动物生境适宜性的常用因子之一, 一般认为随着水深的增加, 底栖动物群落密度等会相应递减<sup>[41]</sup>。桥边河流域大型底栖无脊椎动物生境适宜性研究显示, 水深因子与河蚬生境质量成负相关, 这与 Buss 等的研究结果类似<sup>[42]</sup>。广义加性模型与传统多项式拟合模型结果显示, 桥边河流域河蚬的最适宜水深为 0.3 mg/L。水深因子主要通过影响其他生境因子的变化, 来作用于大型底栖无脊椎动物生境质量的变化。随着水深的增加, 深层水流的光照骤减<sup>[43]</sup>, 初级生产力降低, 河蚬食物来源减少, 生物量受影

响。同时深水区 DO 浓度较小,厌氧细菌的强烈活动增加反硝化过程,抑制河蚬的生长繁殖<sup>[44]</sup>。

河流中泥沙、黏土、有机物等悬浮物质含量过多将造成河流 Tur 增高,Tur 因子是影响大型底栖无脊椎动物生境质量的重要因子之一<sup>[45]</sup>。广义加性模型与传统多项式拟合模型结果显示,桥边河流域河蚬的最适宜 Tur 为 1.130 NTU,在一定范围类 Tur 的升高导致河蚬栖息地适宜性的降低,但当 Tur 在 3—5 NTU 范围内时,河蚬生境适宜性出现短暂的回升现象。浊度较高的水体河床底质大多为淤泥,河床基质稳定性较差,大型底栖无脊椎动物生境质量较低<sup>[46]</sup>。同时浊度较高的河流水体透明度较低,水生藻类等水生植物光合作用受到抑制,水体 DO 含量降低,抑制底栖动物生长。而河床泥沙再悬浮过程会释放沉积物中蕴藏的大量有机物<sup>[47]</sup>,小范围的河床扰动给河蚬的生长提供了充足的营养物质,短期内可能造成河蚬生境适宜性出现上升现象。

#### 4 结论

(1) 影响桥边河大型底栖无脊椎动物优势种生境质量的主要因子为  $COD_{Mn}$ 、TN、DO、Tur、Dep; 其中  $COD_{Mn}$ 、TN、Tur、Dep 与其分布成负相关,DO 与其分布成正相关。

(2) 桥边河流域河蚬最适宜  $COD_{Mn}$  浓度为 1.228 mg/L, $COD_{Mn}$  升高导致河蚬生境适宜性降低;最适宜 TN 浓度为 0.269 mg/L,TN 升高导致河蚬生境适宜性急剧下降;最适宜 DO 浓度为 11.170 mg/L,DO 与大型底栖无脊椎动物境适宜性呈显著正相关。最适宜 Dep 为 0.3 m,Dep 因子与河蚬生境质量成负相关。最适宜 Tur 为 1.130 NTU,一定范围内 Tur 的升高导致河蚬生境适宜性的降低,但超过某一限定值时,河蚬生境适宜性存在回升的趋势。

(3) GAM 广义加性模型与传统多项式拟合模型的拟合结果显示,线性拟合情况下两种方法均适用;非线性拟合情况下 GAM 广义加性模型较优于传统多项式拟合模型,且 GAM 模型在处理离散程度大的数据集时,可以很好的规避多项式拟合过程中出现的过拟合现象。

#### 参考文献 (References):

- [1] 粟一帆,李卫明,艾志强,刘德富,朱澄浩,李金京,孙徐阳. 汉江中下游生态系统健康评价指标体系构建及其应用. 生态学报, 2019, 39(11): 3895-3907.
- [2] 陈森,苏晓磊,党成强,高婷,黄慧敏,董蓉,陶建平. 三峡水库河流生境评价指标体系构建及应用. 生态学报, 2017, 37(24): 8433-8444.
- [3] 粟一帆,李卫明,朱澄浩,李金京,孙徐阳,胡威,刘德富. 乡镇尺度下河流生态系统健康评价:以宜昌市良斗河为例. 环境工程, 2019, 37(10): 91-96
- [4] 陈凌娜,董斌,彭文娟,高祥,黄慧,王成,叶小康,朱鸣,吕典,赵抗抗,张双双,倪燕华. 升金湖自然湿地越冬鹤类生境适宜性变化研究. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 556-563.
- [5] Armour C L, Taylor J G. Evaluation of the instream flow incremental methodology by U.S. Fish and Wildlife Service field users. Fisheries, 1991, 16(5): 36-43.
- [6] Bockelmann B N, Fenrich E K, Lin B, Falconer R A. Development of an ecohydraulics model for stream and river restoration. Ecological Engineering, 2004, 22(4/5): 227-235.
- [7] Noack M, Schneider M, Wieprecht S. The habitat modelling system CASiMiR: a multivariate fuzzy-approach and its applications//Maddock I, Harby A, Kemp P, Wood P, eds. Ecohydraulics: An Integrated Approach. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2013: 75-91.
- [8] Yigezu G, Mandefro B, Mengesha Y, Yewhalaw D, Beyene A, Ahmednur M, Abdie Y, Kloos H, Mereta S T. Habitat suitability modelling for predicting potential habitats of freshwater snail intermediate hosts in Omo-Gibe river basin, Southwest Ethiopia. Ecological Informatics, 2018, 45: 70-80.
- [9] Vasconcelos R, Le Pape O, Costa M J, Cabral H N. Predicting estuarine use patterns of juvenile fish with generalized linear models. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, 120: 64-74.
- [10] Yi Y J, Sun J, Yang Y F, Zhou Y, Tang C H, Wang X, Yang Z F. Habitat suitability evaluation of a benthic macroinvertebrate community in a shallow lake. Ecological Indicators, 2018, 90: 451-459.

- [11] Martínez-Rincón R O, Ortega-García S, Vaca-Rodríguez J G. Comparative performance of generalized additive models and boosted regression trees for statistical modeling of incidental catch of wahoo (*Acanthocybium solandri*) in the Mexican tuna purse-seine fishery. *Ecological Modelling*, 2012, 233: 20-25.
- [12] Mouton A M, Alcaraz-Hernandez J D, De Baets B, Goethals P L M, Martínez-Capel F. Data-driven fuzzy habitat suitability models for brown trout in Spanish Mediterranean rivers. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(5): 615-622.
- [13] 郑文浩, 渠晓东, 张远, 孟伟. 太子河流域大型底栖动物栖境适宜性. *环境科学研究*, 2011, 24(12): 1355-1363.
- [14] Li R N, Chen Q W, Tonina D, Cai D S. Effects of upstream reservoir regulation on the hydrological regime and fish habitats of the Lijiang River, China. *Ecological Engineering*, 2015, 76: 75-83.
- [15] Yi Y J, Sun J, Zhang S H, Yang Z F. Assessment of Chinese sturgeon habitat suitability in the Yangtze River (China): comparison of generalized additive model, data-driven fuzzy logic model, and preference curve model. *Journal of Hydrology*, 2016, 536: 447-456.
- [16] 王硕, 张建云, 林育青, 陈求稳, 陈凯, 李卫明. 基于大型底栖动物多度量指数的河流多尺度评价. *环境科学研究*, 2019, 32(2): 284-292.
- [17] 陈丽, 王东波, 君珊. 拉萨河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2019, 39(3): 757-769.
- [18] 刘艳, 郑越月, 敖艳艳. 不同生长基质的苔藓植物优势种生态位与种间联结. *生态学报*, 2019, 39(1): 286-293.
- [19] 邢圆, 吴小平, 欧阳珊, 张君倩, 徐靖, 银森录, 谢志才. 赣江水系大型底栖动物多样性与受胁因子初探. *生物多样性*, 2019, 27(6): 648-657.
- [20] Griboff J, Baroni M V, Horacek M, Wunderlin D A, Monferran M V. Multielemental+ isotopic fingerprint enables linking soil, water, forage and milk composition, assessing the geographical origin of Argentinean milk. *Food Chemistry*, 2019, 283: 549-558.
- [21] 宋秀凯, 程玲, 付萍, 何健龙, 李佳蕙, 于广磊, 刘爱英. 莱州湾金城海域网采浮游植物年际变化及与环境因子的关系. *生态学报*, 2019, 39(8): 2784-2793.
- [22] Brosse S, Lek S. Relationships between environmental characteristics and the density of age-0 Eurasian perch *Perca fluviatilis* in the littoral zone of a lake: a nonlinear approach. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2002, 131(6): 1033-1043.
- [23] Wood S. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. London: Chapman & Hall /CRC, 2006.
- [24] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, Frydenborg R, McCarron E, White J S, Bastian M L. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(2): 185-211.
- [25] Muñoz-Mas R, Lopez-Nicolas A, Martínez-Capel F, Pulido-Velazquez M. Shifts in the suitable habitat available for brown trout (*Salmo trutta* L.) under short-term climate change scenarios. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 686-700.
- [26] Mouton A M, Dillen A, Van Den Neucker T, Buysse D, Stevens M, Coeck J. Impact of sampling efficiency on the performance of data-driven fish habitat models. *Ecological Modelling*, 2012, 245: 94-102.
- [27] Stoner A W, Manderson J P, Pessutti J P. Spatially explicit analysis of estuarine habitat for juvenile winter flounder: combining generalized additive models and geographic information systems. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 213: 253-271.
- [28] Veza P, Parasiewicz P, Calles O, Spairani M, Comoglio C. Modelling habitat requirements of bullhead (*Cottus gobio*) in Alpine streams. *Aquatic Sciences*, 2014, 76(1): 1-15.
- [29] Myers R H, Montgomery D C, Vining G G, Robinson T J. *Generalized Linear Models: with Applications in Engineering and the Sciences*. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.
- [30] 杨晨昱, 张敏, 渠晓东, 彭文启, 余杨, 朱翔. 鄱阳湖大型底栖动物群落结构的分布及影响因子研究. *生态毒理学报*, 2018, 13(4): 91-100.
- [31] 段学花. 河流水沙对底栖动物的生态影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [32] Li D, Erickson R A, Tang S, Zhang Y, Niu Z C, Liu H L, Yu H X. Structure and spatial patterns of macrobenthic community in Tai Lake, a large shallow lake, China. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 179-187.
- [33] Beisel J N, Usseglio-Polatera P, Thomas S, Moreteau J C. Stream community structure in relation to spatial variation: the influence of mesohabitat characteristics. *Hydrobiologia*, 1998, 389(1/3): 73-88.
- [34] 李晋鹏, 董世魁, 彭明春. 澜沧江梯级水坝库区大型底栖动物群落结构及水质生物学评价. *环境科学学报*, 2018, 38(7): 2931-2940.
- [35] 赵瑞, 高欣, 丁森, 张远, 渠晓东, 刘思思. 辽河流域大型底栖动物耐污值. *生态学报*, 2015, 35(14): 4797-4809.
- [36] Yu C Q, Huang X, Chen H, Godfray H C J, Wright J S, Hall J W, Gong P, Ni S Q, Qiao S C, Huang G R, Xiao Y C, Zhang J, Feng Z, Ju X T, Ciais P, Stenseth N C, Hessen D O, Sun Z L, Yu L, Cai W J, Fu H H, Huang X M, Zhang C, Liu H B, Taylor J. Managing nitrogen to restore water quality in China. *Nature*, 2019, 567(7749): 516-520.
- [37] Wang Z H, Chen S G, Cao X. Micro-nutrients effects on algae colony: growth rate and biomass response to various micro-nutrients and competitive inhibitions among multi-microelements//Proceedings of the 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering.

- Chengdu: IEEE, 2010: 1-8.
- [38] Siuda W, Grabowska K, Kaliński T, Kiersztyn B, Chróst R J. Trophic state, eutrophication, and the threats for water quality of the Great Mazurian Lake System//Korzeniewska E, Hamisz M, eds. Polish River Basins and Lakes-Part I. Cham: Springer, 2020: 231-260.
- [39] 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆. 春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性. 环境科学, 2018, 39(3): 1113-1121.
- [40] 靳辉, 罗旭光, 谷娇, 宁晓雨, 蔡永久, 何虎, 于谨磊, 杨桂军, 李宽意. 河蚬(*Corbicula fluminea*)对霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)生物扰动的抑制效应. 湖泊科学, 2016, 28(6): 1348-1353.
- [41] 徐兆东, 石洪华, 李乃成, 赵瑞, 刘晓收. 庙岛群岛南部海域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. 环境科学研究, 2015, 28(5): 704-712.
- [42] Buss D F, Baptista D F, Nessimian J L, Egler M. Substrate specificity, environmental degradation and disturbance structuring macroinvertebrate assemblages in neotropical streams. *Hydrobiologia*, 2004, 518(1/3): 179-188.
- [43] Yan H Y, Zhang X R, Dong J H, Shang M S, Shan K, Wu D, Yuan Y, Wang X, Meng H, Huang Y, Wang G Y. Spatial and temporal relation rule acquisition of eutrophication in Da'ning River based on rough set theory. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 180-189.
- [44] Lu X X, Bade D L, Leff L G, Mou X Z. The relative importance of anammox and denitrification to total N<sub>2</sub> production in Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research*, 2018, 44(3): 428-435.
- [45] Govenor H, Krometis L A H, Willis L, Angermeier P L, Hession W C. Macroinvertebrate sensitivity thresholds for sediment in Virginia streams. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2019, 15(1): 77-92.
- [46] Zhao W H, Wang H J, Wang H Z, Close P G. Macroinvertebrates in the bed sediment of the Yellow River. *International Journal of Sediment Research*, 2011, 26(3): 255-268.
- [47] 柴朝晖, 方红卫, 姚仕明, 王茜. 黏性泥沙絮凝-沉降-再悬浮运动过程数学模型研究. 水利学报, 2016, 47(12): 1540-1547.