

DOI: 10.5846/stxb202003070437

胡威, 李卫明, 王丽, 栗一帆, 孙徐阳, 李金京, 陈求稳. 基于 GA-BP 优化模型的中小河流健康评价研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1786-1797.

Hu W, Li W M, Wang L, Su Y F, Sun X Y, Li J J, Chen Q W. Health assessment of small and medium rivers based on GA-BP optimization model. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1786-1797.

基于 GA-BP 优化模型的中小河流健康评价研究

胡 威^{1,2}, 李卫明^{1,*}, 王 丽², 栗一帆^{1,2}, 孙徐阳¹, 李金京¹, 陈求稳²

1 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002

2 南京水利科学研究所, 南京 210029

摘要: 河流健康评价是河流生态修复的前提和依据,但目前中小河流还缺乏相应的评价标准。为客观评估中小河流健康状况,以桥边河为例,构建了河流水生生物、水环境、水文、形态、社会服务功能 5 个要素 17 个指标的健康评价体系,利用遗传算法(GA)优化 BP 神经网络方法建立 GA-BP 模型确定其指标权重,采用赋分法进行评价。GA-BP 模型输出结果显示,指标权重中水环境指标赋值最大,其次是河流水文指标>河流水生生物指标>河流形态指标>河流社会服务功能指标。通过建立的评价体系对桥边河进行评价,结果表明有 3 个点健康等级评价为 I 级,3 个点评价为 II 级,2 个点评价为 III 级。总体来看,桥边河流域基本处于健康状态,上游健康状况明显优于下游,从上游到下游越靠近河口位置,河流的健康状况越差。

关键词: 中小河流;健康评价;评价体系;GA-BP 模型;水环境

Health assessment of small and medium rivers based on GA-BP optimization model

HU Wei^{1,2}, LI Weiming^{1,*}, WANG Li², SU Yifan^{1,2}, SUN Xuyang¹, LI Jinjing¹, CHEN Qiuwen²

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

2 Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

Abstract: River health assessment is the premise and basis of river ecological restoration, but up to date there is no corresponding health assessment standard for small and medium-sized rivers. In order to objectively evaluate the health status of small and medium-sized rivers, this paper takes Qiaobian River as an example and constructs a health evaluation system around 5 elements, namely the river aquatic organisms, water environment, hydrology, morphology and social service functions, which contains 17 indexes. Then we capitalize genetic algorithm (GA) to optimize BP neural network method to establish GA-BP model to confirm the weight of these indexes, and use the scoring method to evaluate. According to the output of GA-BP model, the river's water environment has the largest value in the weights of indexes, sequentially followed by river hydrological index, river aquatic organism index, river shape index, and river social service function indicators. The result of evaluating in Qiaobian River through the established evaluation system shows that 3 points of them have a health rating of level I, 3 points are rated level II, and 2 points are rated level III. Overall, the Qiaobian River is basically in a healthy state, and the health status of the upper reaches of the basin is significantly better than that of the downstream. The closer to the estuary from upstream to downstream, the worse the health of the river is.

Key Words: small and medium river; health assessment; evaluation index system; GA-BP model; water environment

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51979149)

收稿日期: 2020-03-07; 网络出版日期: 2021-01-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lwm000001@126.com

河流生态系统作为水生态系统和陆地生态系统的枢纽,在气候调节、供水、生物多样性维持等方面发挥着重要作用^[1]。近年来,随着河流水环境、水生态问题不断凸显,如何准确评价河流生态系统的健康状况已经成为国内外河流健康管理的热点问题^[2-4]。河流健康评价不仅可以对河流生态系统的整体状况进行综合评估,而且能够评估河流管理行为的有效性,对河流保护和修复具有重要意义。

河流健康评价中评价方法和指标体系的确定至关重要。国外对河流健康评价的研究起步较早,澳大利亚 1992 年提出了澳大利亚国家河流健康计划,美国环保署在 1999 年推出了新的快速生物评估协议^[5],Karr 等提出了生物完整性指数评价法^[6],澳大利亚学者 Sudaryanti 提出了溪流状态指数评价法^[7]。近年来,国内对河流生态健康评价也逐渐重视起来,健康黄河^[8]、健康长江^[9]、健康珠江^[10]、健康太湖^[11]等理念逐渐被提出。我国学者对河流健康评价建立了多种评价方法和体系,例如张晶^[12]等人从影响河流生态系统的生物、生境要素出发,构建了包括水文、水质、河流地貌特征等 5 个方面,共 36 项指标的河流健康评价指标体系;熊春晖^[13]等人利用底栖动物完整性指数对上海市河流进行健康评价;但相关研究大多集中于大江大河,对中小河流生态健康研究相对较少。

目前,对中小河流没有明确的定义,依据 2013 年水利部公布的《第一次全国水利普查公报》,流域面积在 100—10000 km² 为中小河流。近年来,“乡村振兴”、“农村饮水安全”等政策的提出,中小河流的生态系统健康状况备受关注。彭苏丽等^[14]基于粗糙集理论提出植被覆盖率是中小河流健康评价中的重要指标;王兰兰等^[15]认为洪水泛滥是中小河流的常见问题,并提出中小河流的水沙变化是其健康状况的重要影响因素之一;陈宇婷等^[16]提出基于人水和谐度分区图的中小河流健康评价方法。中小河流是长江、黄河等大型河流的源,是农村饮水安全的命脉,如何诊断中小河流健康状况,是未来流域水资源管理的重要问题。但当前研究仍存在不足之处,一是现有的河流健康评价方法和指标体系有待完善,二是河流健康评价中指标权重赋值具有较大主观性。

本文基于中小河流的特征,以长江一级支流桥边河流域为研究对象,考虑到河流的环境功能、生态功能、开发利用功能、河流社会服务功能^[17],遵循科学、实用的评价原则,构建了桥边河流域河流健康评价体系,利用 GA-BP 神经网络计算评价指标权重,对桥边河流域健康状态进行评价,旨在为中小河流尺度下的河流健康诊断提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

桥边河流域是长江的一级支流,发源于点军与长阳交界的土城红岩湾,流经车溪村、土城乡、桥边镇和点军街办。流域面积 295 km²,主河道长约 40 km,最高海拔 568 m,最低海拔 55 m,平均比降 11.4‰。河流上游地区是饮用水源地保护区,中下游地区地势平缓,人口耕地较为密集。近年来,由于流域内人口增长过快、工业发展加速等问题,河流断流、水质恶化等现象不断发生,桥边河流域的健康状况面临威胁。为探索桥边河流域健康状况,本研究布点遵循人口密集处前后布设点位的原则,采样点位能够代表附近河段的水体自然特征^[18],共选取了 8 个样点对桥边河流域健康状况进行评价,基本覆盖全流域内的生境特点,样点编号依次为车溪源头—土城乡(B1—B2),土城乡—桥边镇(B3—B5),桥边镇—点军街办(B6—B8)。于 2019 年 4 月对桥边河水系 8 个样点进行了水生态、水环境调查(图 1)。

1.2 河流健康评价指标体系构建

1.2.1 指标体系构建及指标筛选

本文查阅分析了国内外河流健康评价相关的期刊论文,并根据董哲仁^[19]等对健康河流的表述,将桥边河健康评价指标体系分为 3 个层次:目标层、准则层、指标层。其中目标层是桥边河健康评价,准则层分为 5 大类:(1)河流水生生物,水生生物作为河流生态系统中重要的组成部分,能综合反映水体中的生物学状况和河流健康水平,常用鱼类、底栖动物、浮游植物等生物类型来表征;(2)河流水环境,水环境因子能直观反应河流

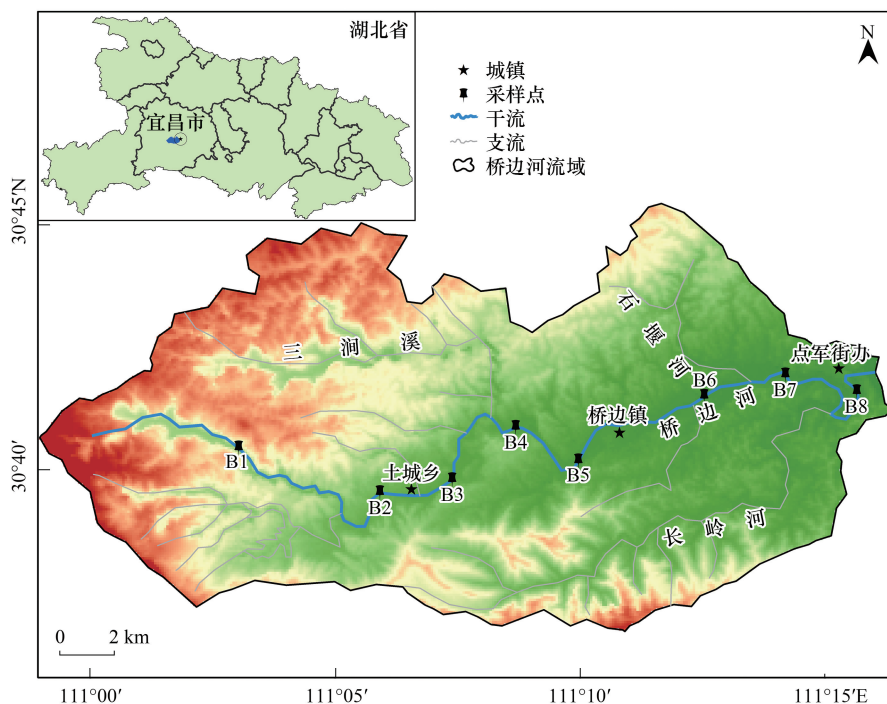


图1 桥边河采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points in Qiaobian River

B1:车溪源头, Che xi yuan tou; B2:土城乡上, Tu cheng xiang shang; B3:土城乡下, Tu cheng xiang xia; B4:三涧溪, San jian xi; B5:桥边镇上, Qiao bian zhen shang; B6:桥边镇下, Qiao bian zhen xia; B7:长岭上, Chang ling shang; B8:长岭下, Chang ling xia

的健康水平,常分为化学环境因子(总氮、总磷、氨氮等)和物理环境因子(水深、流速、浊度等);(3)河流水文,水文条件是河流生态系统中理化和生物的基础,常用流量过程变异程度、河流水量状态、生态基流保证度等指标来反映河流流量、水量的变化过程;(4)河流形态,指构成河流的物理结构条件,包括河岸、河床、植被、土壤等各种形态因子,河流形态不稳定的情况下,水流形态会发生变化,常用河道稳定性、河流连通阻隔状态等指标来表征;(5)河流社会服务功能,由于人类的干扰,河流社会服务功能是直接作用在河流的基本特征和空间构成上,河流社会服务功能包含内容较多,常用水资源开发利用率、防洪达标率等来反映河流健康状况。

按照上述准则层进行分类,确定河流健康评价体系的指标层,通过频次分析法初次筛选指标层,将筛选后的结果进行相关性分析,消除各指标层之间存在信息重复对河流健康评价结果的影响。选择 10% 作为筛选频次^[20],将超过该频次的指标作为筛选结果,利用 Pearson 相关性分析(K-S 正态检验符合正态分布)计算各指标间的相关性系数,剔除相关性系数 $|R| > 0.75$ 的指标^[21]。采用 Excel 2010 进行频次分析,SPSS 22 进行 Pearson 相关性分析。

1.2.2 指标权重确定

(1) GA-BP 模型

为了提高指标权重的科学性、合理性、可靠性,避免传统的专家评分法、最小二乘法等存在的主观影响问题^[22],本文采用 Matlab2018a 中的遗传算法(GA, Genetic Algorithm)优化反向传播(BP, Back Propagation)神经网络方法建立 GA-BP 模型来确定其指标权重^[23],模型的具体流程见图 2。GA-BP 模型需首先确定 BP 神经网络的拓扑结构,根据桥边河流域河流评价体系构建了 6 个 BP 神经网络(表 1)。然后将初始 BP 神经网络权值阈值长度进行结构编码,依据神经网络的输入层、输出层、隐含层的节点个数确定编码长度^[24]。最后通过 GA-BP 模型高效率的算法及其强大的寻优能力便可得到 BP 神经网络的最优权值阈值。

建立 GA-BP 模型是为了确定指标的权重,而模型得到的结果是各神经元之间的关系,为得到各指标间的

决策权重,需对各神经元之间的权重系数进行分析处理^[25]。确定模型各参数后,将训练数据输入到各神经网络模型中加以训练,得到各神经网络的训练结果,即神经网络各神经元权重系数,再通过公式(1)―(5)计算得到相关显著性系数、相关指数和绝对影响系数,其中绝对影响系数为各指标层权重值。具体处理方法如下:

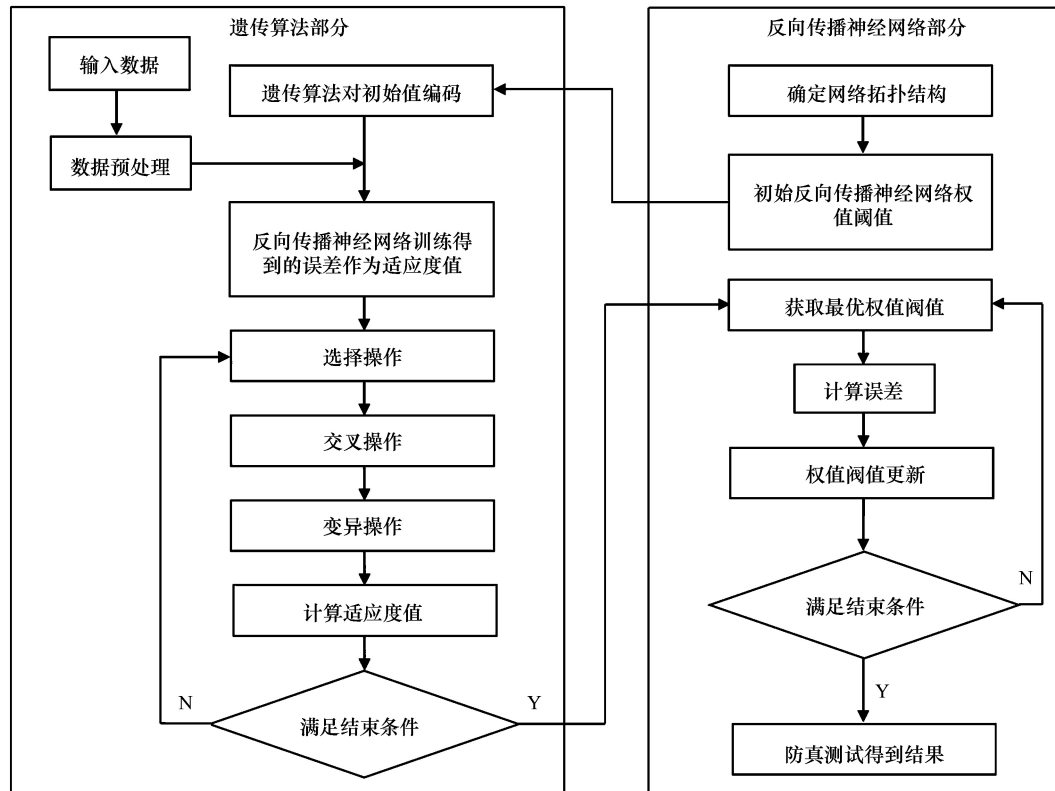


图2 GA-BP 模型流程图

Fig.2 Flow chart of GA-BP model

表1 BP 神经网络参数表

Table 1 Parameters table of BP neural network

网络名称 Network name	模型参数 Model parameter			
	输入层神经元数 Number of neural units in input layer	输出层神经元数 Number of nerve units in output layer	隐含层个数 Number of hidden layers	隐含层神经元数 Number of hidden layer neurons
河流水生生物神经网络 River aquatic biological neural network	3	1	1	2
河流水环境神经网络 River water environment neural network	8	1	1	6
河流水文神经网络 River hydrological neural network	3	1	1	2
河流形态神经网络 River morphology neural network	2	1	1	2
河流社会服务功能神经网络 River social service function neural network	2	1	1	2
河流健康神经网络 River health neural network	5	1	1	4

1) 相关显著性系数

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^p W_{ki} (1 - e^{-x}) / (1 + e^{-x}) \quad (1)$$

$$x = w_{jk} \quad (2)$$

2) 相关指数

$$C_{ij} = |(1 - e^{-y}) / (1 + e^{-y})| \quad (3)$$

$$y = a_{ij} \quad (4)$$

3) 绝对影响系数

$$R_{ij} = C_{ij} / \sum_{i=1}^m C_{ij} \quad (5)$$

式中, a_{ij} 为相关显著性系数, i 为神经网络输入单元, $i=1, \dots, m$; j 为神经网络输出单元, $j=1, \dots, n$; k 为神经网络隐含层单元, $k=1, \dots, p$; W_{ki} 为隐含层神经元与输入层神经元间的权重系数; W_{jk} 为输出层神经元与隐含层神经元间的权重系数; C_{ij} 为相关指数; R_{ij} 为绝对影响系数。

(2) GA-BP 模型参数设置

GA-BP 模型参数在选取上没有统一的标准, 本文结合实际情况, 在多次对比试验结果的情况下, 取参数的最优值。BP 神经网络基本计算参数取值分别为: 网络学习速率为 0.05, 最大训练次数为 1000 次, 训练精度为 10^{-4} 。GA 算法的基本参数分别为: 种群规模为 30, 进化代数为 100, 选择概率为 0.08, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.006。

1.2.3 指标评价标准与方法

本文选择赋分法进行河流的健康评价^[20]。利用 Excel 软件统计各指标的最大值、最小值与平均值, 计算各指标的 5%、25%、50%、75%、95% 分位数, 并将河流健康等级划分为 I、II、III、IV、V 个等级, 对应的河流健康程度分为很健康、健康、亚健康、不健康、病态, 评价指标为很健康对应的指标赋值为 100 分, 健康、亚健康、不健康、病态分别赋值 80、60、40、20 分。

通过构建桥边河流域的健康评价体系, 确定各指标权重分配后, 再利用加权平均方法计算河流的健康指数, 具体方法如下式:

$$Q = \sum_{i=1}^m H_i I_i \quad (6)$$

式中, Q 为河流健康指数, H_i 为第 i 项各指标的权重, I_i 为第 i 项各指标的评分值。

2 结果与分析

2.1 评价指标的筛选

通过频次分析法对指标体系进行初步筛选, 共获得指标层 23 个指标。其中河流水生生物指标有 3 个, 包括底栖动物 Shannon-Wiener 多样性指数、浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数等; 河流水环境指标有 11 个, 包括总氮、总磷、流速等; 河流水文指标有 3 个, 包括生态需水量、河流径污比等; 河流形态指标有 3 个, 包括岸坡植被完整性、河道稳定性等; 河流社会服务功能指标有 3 个, 包括水资源开发利用、防洪达标率等。采用 Pearson 相关性分析对这 23 个指标进行再次筛选, 分析结果见表 2。

相关性分析结果表明, 河流水生生物指标中, C1、C2、C3 间的相关系数均未超过 0.75, 故保留此 3 个指标。河流水环境指标中, C10 与 C4、C5、C14, C11 与 C6、C7 间的相关系数均超过 0.75, 具有较高的相关性, 故剔除 C10 与 C11。由于桥边河沿程 pH 变异度不高, 因此剔除 C7。C8 与环境因子 C13、C14 相关性较高, 剔除 C8。河流水文指标中各指标间的相关性系数均未超过 0.75, 故保留此 3 个指标。河流形态指标中, C20 与 C18、C19 间的相关性系数大于 0.75, 故剔除 C20。河流社会服务功能指标中, C23 与 C21、C22 之间的相关性系数超过 0.75, 故剔除 C23。通过评价指标筛选, 并咨询相关专业的专家学者, 得到桥边河流域评价指标体系 (表 3)。

2.2 GA-BP 模型优化结果

GA-BP 模型输入训练数据进行参数训练, 进化到 43 代得到最佳适应度值为 0.036 (图 3)。将实测数据

代入 GA-BP 神经网络中进行检测,得到 GA-BP 模型的误差曲线(图 4)。GA-BP 模型仅用了 25 步达到了预期设置的精度值,可见 GA-BP 模型在优化权值和阈值后能迅速收敛到目标值,模型拟合程度很好。GA-BP 模型的平均相对误差和均方误差分别为 0.0095% 和 1×10^{-4} ,说明 GA-BP 模型拟合精度高,拟合误差稳定,适用性较好。

表 2 相关性分析结果
Table 2 Results of Pearson correlation analysis

	C1	C2	C3									
C1	1											
C2	-0.098	1										
C3	0.524	-0.184	1									
	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	
C4	1											
C5	0.424	1										
C6	0.353	-0.057	1									
C7	-0.156	0.406	-0.812 **	1								
C8	-0.113	-0.590	-0.078	-0.145	1							
C9	-0.242	0.234	-0.321	0.530	-0.070	1						
C10	0.784 **	0.756 **	0.380	-0.006	-0.409	-0.188	1					
C11	0.497	-0.104	0.846 **	-0.765 **	0.140	-0.328	0.362	1				
C12	-0.087	-0.330	0.705 **	-0.520	0.066	-0.240	-0.035	0.474	1			
C13	0.095	0.245	0.620 *	-0.398	-0.790 **	-0.223	0.484	0.506	0.538	1		
C14	0.339	0.678 *	0.177	0.192	-0.813 **	0.028	0.844 **	0.029	-0.099	0.516	1	
	C15	C16	C17									
C15	1											
C16	0.589	1										
C17	0.645 *	0.327	1									
	C18	C19	C20									
C18	1											
C19	0.488	1										
C20	0.811 **	0.759 **	1									
	C21	C22	C23									
C21	1											
C22	-0.104	1										
C23	-0.755 **	0.769 **	1									

1) C1: 鱼类 Shannon-Wiener 指数, Fish Shannon-Wiener index; C2: 底栖动物 Shannon-Wiener 指数, Benthic Shannon-Wiener index; C3: 浮游植物 Shannon-Wiener 指数, Phytoplankton Shannon-Wiener index; C4: 总氮, Total nitrogen; C5: 总磷, Total phosphorus; C6: 化学需氧量, Chemical oxygen demand; C7: 氢离子浓度指数, Hydrogen ion concentration; C8: 温度, Temperature; C9: 溶解氧, Dissolved oxygen; C10: 铵态氮, Ammonium; C11: 硝态氮, Nitrate; C12: 流速, Flow velocity; C13: 浊度, Turbidity; C14: 水深, Water depth; C15: 生态需水量, Ecological water demand; C16: 河流径污比, River dilution ratio; C17: 河流水量状态, River water quantity state; C18: 河道稳定性, River stability; C19: 水系连通性, River connectivity; C20: 岸坡植被完整性, Vegetation integrity of bank slope; C21: 水资源开发利用, Exploitation rate of water resources; C22: 防洪达标率, Flood control qualified rate; C23: 灌溉保证率, Irrigation guarantee rate; 2) ** 表示在 0.01 级别(双尾)显著性相关; * 表示在 0.05 级别(双尾)显著性相关

2.3 桥边河流域评价指标权重赋值

运用 GA-BP 模型算出各神经元之间的权重值后,根据公式(1)——(5)可得到桥边河流域各评价指标权重结果(表 4)。结果显示,河流水环境指标权重>河流水文指标>河流水生生物指标>河流形态指标>河流社会服务功能指标。

表3 桥边河河流健康评价指标体系
Table 3 Index system of health assessment for Qiaobian River

目标层 Destination layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	计算方法 Calculation method	数据来源 Data sources
河流健康 River health	水生生物指标	鱼类 Shannon-Wiener 指数 底栖动物 Shannon-Wiener 指数 浮游植物 Shannon-Wiener 指数	$H' = - \sum_i (\frac{n_i}{N}) \ln(\frac{n_i}{N})$; H' 为 Shannon-Wiener 指数, S 为采样区域样品物种数, n_i 为采样中某类物种数量, N 为采样中总体物种数量	实地调查
	水环境指标	总氮 总磷 化学需氧量	在实验室参照《水和废水监测分析方法》(第四版)对水样进行处理、鉴定、分析,得到相应的指标数据	实地调查
		溶解氧 流速 浊度 水深	现场使用 Hydrolab DS5 多参仪(美国)测定相应的数据	实地调查
	水文指标	生态需水量	选取涉及较少水文资料的生态水力学法计算桥边河流域生态需水量	高家堰水文站水文数据
		河流径污比	河流径流量(Q)与该河流纳污(水)量(q)之比	实地调查及参考文献 ^[26]
		河流水量状态	$Q = \bar{v} \cdot s$; Q 是河道断面流量; $\bar{v}$ 是水流平均流速, s 是水流平均横断面积	实地调查及参考文献 ^[27]
	形态指标	河道稳定性	$S_r = \frac{w_1 - w_0}{w_0}$, $w = \frac{s}{S}$; S_r 为河流蜿蜒性指数, w_1 为现状蜿蜒度, w_0 为历史蜿蜒度, w 为河流蜿蜒度, s 为流域长度, S 河流主河道长度	遥感影像数据
		水系连通性	$R = 1 / (1 + 0.7B_1 + 0.3B_2) \times 100\%$; R 为水系连通指数, B_1 为水坝的数量, B_2 为水闸的数量	实地调查及参考文献 ^[28]
	社会服务功能指标	水资源开发利用率	$A = \frac{U_m}{C_m}$; A 为水资源开发利用率; U_m 为水资源利用总量; C_m 为水资源总量	地表水开采数据及水资源总量数据
		防洪达标率	$B = \frac{Y_1}{Y_0}$; B 为防洪达标率; Y_1 为符合防洪标准的长度; Y_0 河道总长度	实地调查及参考文献 ^[29]

表4 指标权重计算结果
Table 4 The result of index weights

目标层 Destination layer	准则层 Criterion layer	权重 Weights	指标层 Index layer	权重 Weights
河流健康 River health	河流水生生物指标	0.194	鱼类 Shannon-Wiener 指数	0.068
			底栖动物 Shannon-Wiener 指数	0.046
			浮游植物 Shannon-Wiener 指数	0.037
	河流水环境指标	0.307	总氮	0.068
			总磷	0.051
			化学需氧量	0.065
			溶解氧	0.062
			流速	0.043

续表				
目标层 Destination layer	准则层 Criterion layer	权重 Weights	指标层 Index layer	权重 Weights
	河流水文指标	0.248	浊度	0.045
			水深	0.041
			生态需水量	0.075
			河流径污比	0.063
	河流形态指标	0.136	河流水量状态	0.078
			河道稳定性	0.073
			水系连通性	0.066
	河流社会服务功能指标	0.115	水资源开发利用率	0.068
			防洪达标率	0.051

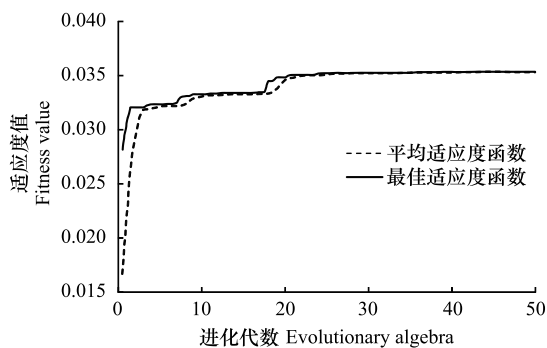


图3 个体适应度值进化曲线

Fig.3 Evolutionary curve of individual fitness value

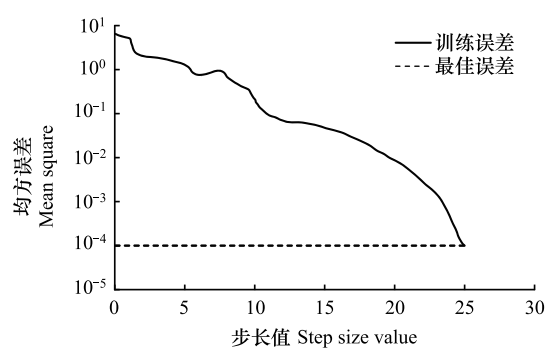


图4 GA-BP 神经网络误差曲线

Fig.4 Error curve of GA-BP neural network

2.4 桥边河流域指标体系评分标准

根据统计的各指标的最大值、最小值与平均值,并计算各指标的 5%、25%、50%、75%、95% 分位数,得到桥边河流域指标评分标准(表 5)。

表 5 河流健康评价指标赋值标准

Table 5 The evaluation criterion of river health indexes

指标 Index	赋值 Assignment				
	100	80	60	40	20
C1/(-)	1.60—1.92	1.48—1.59	1.31—1.47	0.63—1.30	<0.63
C2/(-)	1.73—1.95	1.32—1.72	1.17—1.31	0.75—1.16	<0.75
C3/(-)	1.83—2.24	1.57—1.82	1.11—1.56	0.72—1.10	<0.72
C4/(mg/L)	0.22—0.51	0.52—0.86	0.87—1.13	1.14—1.35	>1.35
C5/(mg/L)	0.02—0.13	0.14—0.30	0.31—0.46	0.47—0.63	>0.63
C6/(mg/L)	1.51—2.27	2.28—2.93	2.94—3.37	3.38—4.15	>4.15
C9/(mg/L)	10.62—13.69	9.23—10.61	8.55—9.22	7.41—8.54	<7.41
C12/(m/s)	1.84—2.55	1.53—1.83	0.82—1.52	0.55—0.81	<0.55
C13/(NTU)	2.50—6.47	6.48—11.25	11.26—23.48	23.49—54.60	>54.60
C14/(m)	4.40—5.75	2.34—4.39	1.15—2.33	0.62—1.14	<0.62
C15/(m ³ /s)	0.60—1.55	0.41—0.59	0.32—0.40	0.20—0.31	<0.20
C16/%	3.5%—6.7%	6.8%—10.5%	10.6%—25.4%	25.5%—38.6%	>38.6%
C17/(m ³ /s)	15.4—25.5	11.6—15.3	8.4—11.5	5.3—8.3	<5.3
C18/%	80%—95%	60%—79%	40%—59%	20%—39%	<20%
C19/%	77%—100%	62%—76%	50%—61%	40%—49%	<40%
C21/%	10%—20%	21%—30%	31%—40%	41%—50%	>50%
C22/%	90%—95%	80%—89%	65%—79%	50%—64%	<50%

桥边河流域评价指标体系共 17 个指标,每项最高得分 100 分,最低得分 20 分,总得分最高、最低分别为 100、20 分。将评分分成 5 等分,构建桥边河流域河流健康评价得分表,具体见下表 6。

表 6 桥边河河流健康评价评分表

Table 6 Health assessment scale table of Qiaobian River

健康等级 Health level	I	II	III	IV	V
评分 Score	84—100	68—83	52—67	36—51	20—35

2.5 桥边河流域健康状况评价结果

2.5.1 数据来源

GA-BP 模型的构建需要训练数据和测试数据对其训练和测试,本文采用《湖北省环境健康公报》(2017—2018)、《宜昌市统计年鉴》(2017—2018)、宜昌市水资源信息管理系统多年统计水环境数据(网址)对 GA-BP 模型进行训练,用沿河 8 个监测断面实测数据(表 7)作为模型的测试数据。

2.5.2 评价结果

利用公式(6)计算桥边河流域健康指数,评价结果见下图 5。桥边河流域健康等级为 I 级的有 3 个点,占总采样点数的 37.5%;健康等级为 II 有 3 个,占总采样点的 37.5%;健康等级为 III 有 2 个,占总采样点的 25%;不存在健康等级为 IV、V 的采样点。总体来看,桥边河流域上游健康状况明显优于下游,从上游到下游健康指数逐渐减小,除了 B7、B8 其他各点均到达 68 分以上。水生生物指标中,B8 点得分较低。河流水环境指标中,B7、B8 监测断面得分较低。河流水文指标中,B8 点得分较低。河流形态指标中,各监测断面得分差别不大,整个河道的蜿蜒性指数都在 3% 以内,河道较为稳定,各点水系连通性较好,无大型水坝等拦水建筑物。河流社会服务功能指标中,各点得分差别不大,流域内防洪和水资源开发功能处于良好状态。

表 7 桥边河水生态环境调查数据

Table 7 Survey data of water ecological environment in Qiaobian River

监测数据 Monitoring data		平均值 Average value	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value
化学因子 Chemical factors	C4/(mg/L)	0.460	0.225	1.167
	C5/(mg/L)	0.075	0.020	0.188
	C6/(mg/L)	1.772	0.985	2.523
	C9/(mg/L)	10.552	9.220	13.649
	C11/(mg/L)	0.350	0.185	0.695
	C10/(mg/L)	0.035	0.171	0.706
	C7/(—)	8.230	7.860	8.670
物理因子 Physical factors	C13/(NTU)	12.005	2.610	41.750
	C12/(m/s)	0.780	0.250	1.600
	C14/m	0.811	0.200	2.300
	C8/°C	9.673	7.680	11.540
生物因子 Biological factors	C1/(—)	1.236	0.621	1.738
	C2/(—)	1.172	0.533	1.856
	C3/(—)	0.927	0.474	1.649

3 讨论

3.1 GA-BP 模型在河流健康评价中的应用

河流健康评价中指标权重的确定尤为重要,不同指标权重的计算方法会导致不同的评价结果^[30]。目前,河流健康评价方法众多,如熵值法^[31]、主成分分析法^[32]、超标倍数法^[33]等,但这些方法在权重确定上具有很

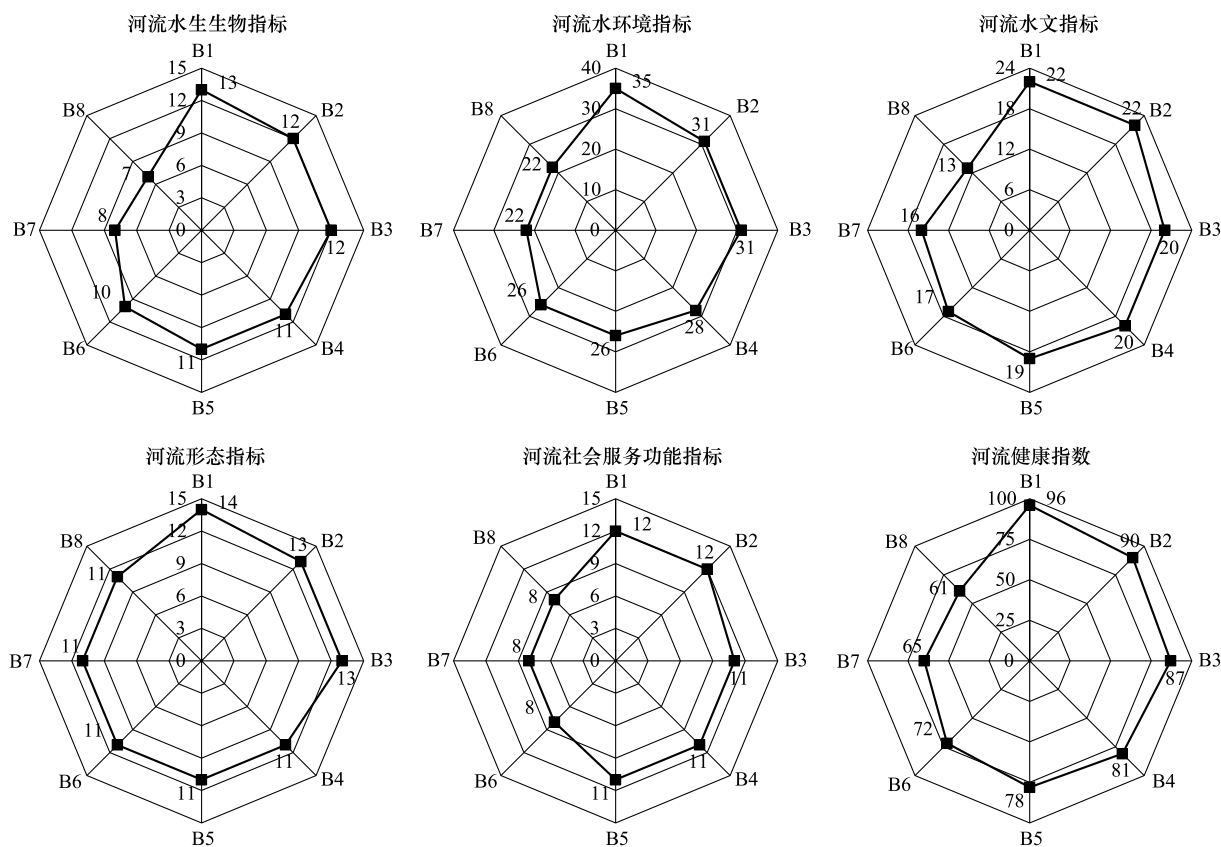


图5 桥边河河流健康综合评价结果

Fig. 5 Comprehensive health evaluation results of Qiaobian River

大的模糊性,受人为因素的影响较大。科学合理的确权权重是河流健康评价的关键,而河流健康评价是一个复杂的非线性系统,必须建立权重的学习机制^[24]。GA-BP 模型通过对已知样本的学习和训练,消除了以往评价方法中的人为影响因素,保证了评价指标权重的合理性。同时,GA-BP 模型是一种基于随机算法的强大预测区域^[34],与单独使用 BP 神经网络相比,可解决其算法收敛缓慢,对初始权值和阈值比较敏感等问题,从而使模型输出结果更精确^[35]。GA-BP 模型结果显示,评价指标权重大小为河流水环境指标>河流水文指标>河流水生生物指标>河流形态指标>河流社会服务功能指标,水环境指标影响最为突出且权重最大,与粟一帆^[36]等研究结果一致。与大江大河相比存在差异性,例如顾晓昀^[18]等研究北京北运河健康评价指标权重大小为水生生物指标>水质指标>水文指标。大尺度河流物种多样性丰富,受自然条件影响较小,而小尺度河流中河道窄、水量少、物种多样性低,受自然条件影响较大,大多水生生物种类难以存活^[36],所以水生生物指标对小尺度河流的健康程度影响相对较小。综上,本文基于 GA-BP 模型对评价指标权重进行赋值,研究结果适用于中小河流健康评价中,对其具有一定的指导意义。

3.2 河流健康状况主要影响因素

根据 GA-BP 模型算出的指标权重赋值结果,评价指标中河流水环境指标权重最大。调查发现,影响流域水环境主要原因是周边的种植业、畜牧业以及居民生活污水。国际公认的化肥使用上限为 $0.225\text{t}/\text{hm}^2$,根据当地农业部门统计资料显示,流域附近的化肥使用量为 $0.235\text{t}/\text{hm}^2$,过量的化肥流入河内,导致河流中氮、磷含量增大,对河流水环境造成严重影响^[37]。河流水环境评价指标作为河流健康评价体系的重要组成部分,可以直接揭示河流水质总体状况^[38],而且与其他指标关联性很大,溶解氧的高低与大型无脊椎动物数量密切相关^[39],总氮、总磷以及化学需氧量变化对浮游植物的群落结构产生很大的影响^[40]。此外,水环境指标对河流健康状况起着决定性作用,中小河流因具有流量小、自净能力弱等特点,工厂、生活污水等直排现象仍然存在,

应通过截污纳管限制污水直排、设置合理的河道控制红线等措施予以解决。

3.3 基于城镇尺度的河流健康状况分析

由于桥边河流经乡镇地带,上中游地区人为干扰较小,因此得分较高,下游有较多建筑和排污口,居民活动较为集中,导致得分低。从城镇尺度来看,B1、B2、B3 属于土城段,各指标得分综合均在 80 分以上,可能是与土城段靠近车溪风景保护区,流域未开发,附近居民少相关。桥边镇段河流健康指数较土城段略低,其中 B4 点附近有一座小型拦水坝,氮、磷等污染物在坝后大量沉积^[41],库区内流速小,污染物的输移缓慢,导致河流健康状况日益低下。B5、B6 点健康等级为 II,但该区域水环境指标得分较低,分析发现桥边镇附近有大片农田和一定规模的畜牧业,在流域附近发现少量废弃农药瓶,在施肥过程中,大量含氮、磷的猪粪沼液流入河道内,导致水体污染严重,河流生态系统遭到破坏^[42]。B7、B8 点位属于点军街办段,各点的评分都不高,其中 B8 点评分最低,调查发现,B8 点处于桥边河流域入江口位置,附近有大量居民,流域内还存在多处排污口,工业废水、生活污水的排放对河流的健康状况有很大的影响,且该河段处于平原区,河道内流速缓慢,易于污染物堆积^[43]。

4 结论

1) 本文全面评估中小河流健康状况,构建了河流水生生物、河流水环境、河流水文、河流形态、河流社会服务功能 5 个要素 17 个指标的桥边河流域健康评价体系。

2) 本文通过构建 GA-BP 模型确定了河流健康评价指标权重,权重的大小排序为河流水环境指标>河流水文指标>河流水生生物指标>河流形态指标>河流社会服务功能指标。研究表明,河流水环境指标对桥边流域健康状况影响最大。

3) 在桥边河流域 8 个采样点中,有 3 个点健康等级评价为 I 级,3 个点评价为 II 级,2 个点评价为 III 级,没有健康等级为 IV、V 的采样点。总体来看,桥边河流域基本上处于健康状态,流域上游健康状况明显优于下游,从上游到下游越靠近入河口位置,河流的健康状况越低。

参考文献(References):

- [1] 朱卫红,曹光兰,李莹,徐万玲,史敏,秦雷. 图们江流域河流生态系统健康评价. 生态学报, 2014, 34(14): 3969-3977.
- [2] Luo Z L, Zuo Q T, Shao Q X. A new framework for assessing river ecosystem health with consideration of human service demand. Science of the Total Environment, 2018, 640-641: 442-453.
- [3] Wang S, Zhang Q, Yang T, Zhang L Q, Li X P, Chen J. River health assessment: proposing a comprehensive model based on physical habitat, chemical condition and biotic structure. Ecological Indicators, 2019, 103: 446-460.
- [4] Li C W, Kang L. A new ecological flow assessment method based on spatial-temporal variability and transferability. Applied Mechanics and Materials, 2014, 522-524: 791-794.
- [5] 徐后涛. 上海市中小河道生态健康评价体系构建及治理效果研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [6] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [7] Sudaryanti S, Trihadiningrum Y, Hart B T, Davies P E, Humphrey C, Norris R, Simpson J, Thurtell L. Assessment of the biological health of the Brantas River, East Java, Indonesia using the Australian River Assessment System (AUSRIVAS) methodology. Aquatic Ecology, 2001, 35(2): 135-146.
- [8] Ge M, Liu G J, Liu H Q, Yuan Z J, Liu Y. The distributions, contamination status, and health risk assessments of mercury and arsenic in the soils from the Yellow River Delta of China. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(34): 35094 -35106.
- [9] Ma D Y, Luo W G, Yang G L, Lu J, Fan Y Z. A study on a river health assessment method based on ecological flow. Ecological Modelling, 2019, 401: 144-154.
- [10] Xie H W, Hao H S, Xu N, Liang X X, Gao D X, Xu Y R, Gao Y, Tao H C, Wong M H. Pharmaceuticals and personal care products in water, sediments, aquatic organisms, and fish feeds in the Pearl River Delta: occurrence, distribution, potential sources, and health risk assessment. Science of the total environment, 2019, 659: 230-239.
- [11] Xu Z A, Li T, Bi J, Wang C. Spatiotemporal heterogeneity of antibiotic pollution and ecological risk assessment in Taihu Lake Basin, China.

- Science of the Total Environment, 2018, 643: 12-20.
- [12] 张晶, 董哲仁, 孙东亚, 王俊娜. 基于主导生态功能分区的河流健康评价全指标体系. 水利学报, 2010, 41(8): 883-892.
- [13] 熊春晖, 张瑞雷, 徐玉萍, 张玮, 陈萍萍, 王丽卿. 应用底栖动物完整性指数评价上海市河流健康. 湖泊科学, 2015, 27(6): 1067-1078.
- [14] 彭苏丽, 夏继红, 蔡旺炜, 汪颖俊, 窦传彬. 基于粗糙集的中小河流健康关键因子识别及分析. 水电能源科学, 2019, 37(4): 48-51.
- [15] 王兰兰. 中小河流健康评价体系及其在马金溪河流上的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [16] 陈宇婷, 王卫标, 俞佳, 傅雷. 基于人水和谐目标的中小河流评价指标研究. 水利发展研究, 2019, 19(9): 25-26, 65-65.
- [17] 耿雷华, 刘恒, 钟华平, 刘翠善. 健康河流的评价指标和评价标准. 水利学报, 2006, 37(3): 253-258.
- [18] 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨. 北京北运河河流生态系统健康评价. 环境科学, 2018, 39(6): 2576-2587.
- [19] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 张晶. 河流生态系统结构功能整体性概念模型. 水科学进展, 2010, 21(4): 550-559.
- [20] 栗一帆, 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.
- [21] 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.
- [22] 苏辉东, 贾仰文, 牛存稳, 童伟军. 河流健康评价指标与权重分配的统计分析. 水资源保护, 2019, 35(6): 138-144.
- [23] 徐伟, 董增川, 付晓花, 谈娟娟, 刘倩, 杜芙蓉. 基于 BP 人工神经网络的河流生态健康预警. 河海大学学报: 自然科学版, 2015, 43(1): 54-59.
- [24] 孙会君. 区域工业经济可持续发展评价方法与技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2000.
- [25] 孙会君, 王新华. 应用人工神经网络确定评价指标的权重. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2001, 20(3): 84-86.
- [26] 李添意, 肖秀婵, 杨小黎, 张成, 罗怀清, 邱诚. 都江堰内江干渠蒲阳河健康状况评价. 成都工业学院学报, 2018, 21(2): 58-61.
- [27] 曹冷然, 李品良, 李深奇, 李红霞, 覃光华. 模糊综合评判与灰色聚类分析在河流健康评价的应用. 环境工程, 2018, 36(8): 189-192.
- [28] 李景保, 于丹丹, 杨波, 代稳, 李欢. 长江荆南三口水系调蓄能力演变及其与水系结构的关联性. 水资源保护, 2019, 35(5): 19-26.
- [29] 索妮. 县域水利现代化指标体系研究——以江都区为例[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
- [30] 舒持恺, 杨侃, 王启明, 朱大伟, 刘炜. 河流健康评价中赋权方法的研究. 水电能源科学, 2017, 35(2): 61-65.
- [31] Shi Y T, Liu J, Wang P, Zhang X N, Wang J Q, Guo L. Application of entropy method in river health evaluation based on aquatic ecological function regionalization. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 63(1): 012046.
- [32] 薛建民, 李娟芳, 舒持恺, 杨侃, 朱大伟, 梁永静, 赵敏. 基于一致性分析的主客观组合赋权法在河流健康评价中的应用. 水电能源科学, 2017, 35(12): 22-25, 70-70.
- [33] 高明美, 孙涛, 张坤. 基于超标倍数赋权法的济南市大气质量模糊动态评价. 干旱区资源与环境, 2014, 28(9): 150-154.
- [34] Wang S X, Zhang N, Wu L, Wang Y M. Wind speed forecasting based on the hybrid ensemble empirical mode decomposition and GA-BP neural network method. Renewable Energy, 2016, 94: 629-636.
- [35] 张维砚, 沈蓓雷, 童琰, 胡雪芹, 徐春燕, 由文辉, 薄芳芳. 基于 GA-BP 模型的景观小水体富营养化评价方法. 中国环境科学, 2011, 31(4): 674-679.
- [36] 栗一帆, 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.
- [37] Logan B, Taffs K H. Relationship between diatoms and water quality (TN, TP) in sub-tropical East Australian estuaries. Journal of Paleolimnology, 2013, 50(1): 123-137.
- [38] 冯彦, 何大明, 杨丽萍. 河流健康评价的主评指标筛选. 地理研究, 2012, 31(3): 389-398.
- [39] Beyene A, Addis T, Kifle D, Legesse W, Kloos H, Triest L. Comparative study of diatoms and macroinvertebrates as indicators of severe water pollution: Case study of the Kebena and Akaki rivers in Addis Ababa, Ethiopia. Ecological Indicators, 2009, 9(2): 381-392.
- [40] 王振方, 张玮, 杨丽, 徐玉萍, 赵凤斌, 王丽卿. 异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系. 环境科学, 2019, 40(5): 2249-2257.
- [41] Montanhini Neto R, Nocko H R, Ostrensky A. Carrying capacity and potential environmental impact of fish farming in the cascade reservoirs of the Paranapanema River, Brazil. Aquaculture Research, 2017, 48(7): 3433-3449.
- [42] 王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中. 生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果. 环境科学, 2017, 38(8): 3354-3361.
- [43] 李柏山. 水资源开发利用对汉江流域水生态环境影响及生态系统健康评价研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.