

# 乡镇尺度下河流生态系统健康评价： 以宜昌市良斗河为例<sup>\*</sup>

栗一帆 李卫明 朱澄浩 李金京 孙徐阳 胡 威 刘德富

(三峡大学 水利与环境学院,湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 为探明乡镇尺度下河流健康状况,采用层次分析法、BP 神经网络和赋分法评价良斗河河流健康程度。健康等级评价结果表明:全流域 8 个样点中,有 50% 的样点为 I 级,37.5% 为 II 级,12.5% 为 III 级。健康状况较好的样点主要分布在河流上游,随径流河流健康状况逐渐变差,良斗河河流生态系统健康状况具有较强的空间异质性。单因子评价结果显示:引起各乡镇河段生态系统健康状况变化的主要因素各不相同,水环境指标的影响最为突出,是良斗河健康评价中必不可少的指标类型。

**关键词:** 乡镇尺度; 河流生态系统; 健康评价; 水环境; BP 神经网络

DOI: 10.13205/j.hjgc.201910015

## HEALTH ASSESSMENT OF RIVER ECOSYSTEM AT THE TOWNSHIP SCALES: A CASE STUDY OF LIANGDOU RIVER IN YICHANG

SU Yi-fan, LI Wei-ming, ZHU Cheng-hao, LI Jin-jing, SUN Xu-yang, HU Wei, LIU De-fu

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

**Abstract:** In order to study river health status located in township scales, this paper was based on the analytic hierarchy process, BP neural network and the score method to evaluate the health of the Liangdou River. The result indicated that: among the eight samples in the whole basin, 50% of the samples were grade I, 37.5% are grade II, and 12.5% were grade III. The samples with better health status were mainly distributed in the upper reaches of the river. The upstream was better than the midstream and downstream where the spatial heterogeneity of the health condition was stronger. Results of single factor evaluation showed that the reason of the descent of the health status in each township river section was different in its own way. However, water environment indicators played the most significant role in the health status of Liangdou River.

**Keywords:** township scales; river ecosystem; health assessment; water environment; Back Propagation Neural Network

### 0 引 言

河流生态系统是不可替代的自然生态系统之一,在自然界的物质、能量和信息交换中起着重要的枢纽作用<sup>[1-2]</sup>。随着城市化进程的加快,高频率的人类活动引起水资源供需不平衡、河流生态环境退化等问题,自然状态下的河流生态系统受到极大破坏<sup>[3]</sup>。乡镇尺度下的河流,因其流域面积较小、河道长度较短等特点,生态系统健康状况常受到忽视,但小尺度河流的健康状况却直接影响大江大河的生态系统健康。因此,如何评价乡镇尺度下的河流生态系统健康

现状,已成为流域健康管理的新问题。

国外对于河流生态系统健康评价的研究起步较早,评价方法研究成果丰富<sup>[4-5]</sup>。如美国的生物完整性指数评价法( IBI )<sup>[6]</sup>、澳大利亚提出的溪流状态指数评价法( ISC )<sup>[7]</sup>等。近年来,由于生态健康概念的提出,国内众多学者也开始关注河流健康研究,并提出了各自的评价方法<sup>[8-11]</sup>。王硕等<sup>[12]</sup>基于大型底栖动物多度量指数评价法,对漓江进行河流健康评价;顾晓昀等<sup>[13]</sup>选取水生生物、水质等指标,对北京北运河进行了健康评价。虽然我国众多研究人员对河流健康评价进行了研究,但目前依旧存在部分不足:一是小尺度下的河流健康状况关注较少,现有文献中,

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金青年科学基金项目( 51309139 )。

收稿日期: 2018-12-13

目前仅曹宸等<sup>[3]</sup>针对北京房山区河流进行健康评价。

良斗河是长江一级支流,自三峡水库蓄水以来,下游河道与长江连为一体,成为长江航运的重要组成部分。河流受人为影响严重,河道断流等现象频发。本文以良斗河为研究对象,利用层次分析法建立评价指标体系,采用人工神经网络对评价指标赋权重,对良斗河流域生态系统健康状况进行评价,以期对小流域尺度下的河流生态系统管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

良斗河是长江北岸的支流,发源于兴山县境内的关门山,河道全长为 101.5 km,流域面积为 426 km<sup>2</sup>,主河道平均坡降为 23.6‰。河流流经南阳镇、高桥乡、水田坝乡、归州镇 4 个乡镇。本研究于 2017 年 10 月对良斗河水系进行采样调查,样点分布如图 1 所示。

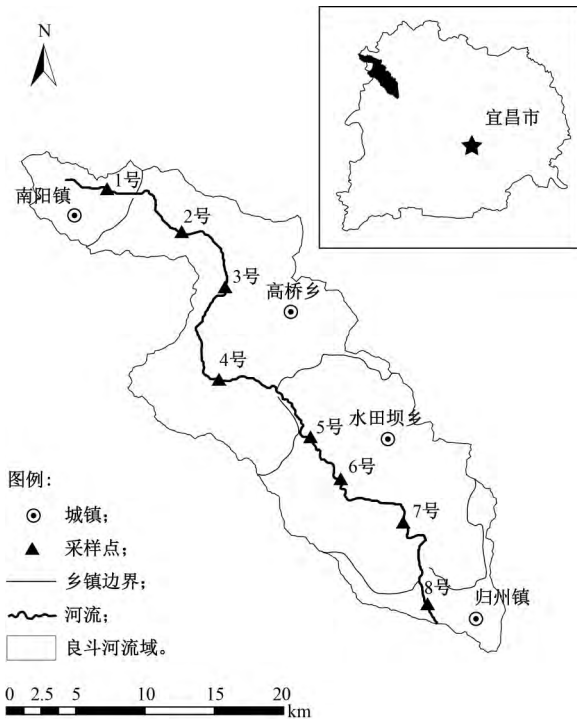


图 1 良斗河地理位置

Fig.1 Location of the Liangdou River

## 1.2 评价指标因子选取与度量

### 1.2.1 水生生物因子

#### 1) 浮游植物。

利用 2.5 L 有机玻璃采水器,采集良斗河表层、中层、底层水样于塑料桶内,混合均匀后取 1 L 水加 15 mL 鲁戈氏液固定,并带回实验室经筒型分液漏斗静置沉淀 48 h,吸去上清液,保留 30 mL 浓缩样品,取 0.1 mL 浓缩

样品在 400 倍显微镜下进行物种鉴定,鉴定结果尽量精确到属或种<sup>[14]</sup>。取 0.1 mL 样品在 400 倍显微镜下进行物种鉴定,鉴定结果精确至属或种<sup>[14]</sup>。

#### 2) 鱼类。

采用电鱼法进行鱼类调查,参考图鉴对鱼类现场鉴定,记录种类、数量等数据后,将鱼类立即放回河流<sup>[15]</sup>。

本文采用浮游植物 Shannon-Wiener 指数( L1) 和鱼类 Shannon-Wiener 指数( L2) 作为水生生物因子的代表指标,具体计算方法如式( 1) :

$$H = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i \quad (1)$$

式中:  $H$  为 Shannon-Wiener 指数;  $s$  为样品分类单元总数;  $p_i$  为第  $i$  种个体占总样品个数的比例。

### 1.2.2 水环境因子

本研究监测水环境因子 6 个: 水文因子 1 个,为水温( L3); 水质因子 5 个,包括 pH( L4)、溶解氧( DO)( L5)、总氮( TN)( L6)、总磷( TP)( L7)、化学需氧量( COD)( L8)。采样时利用 Hydrolab DS5 多参仪( 美国) 测定水温、pH、DO; 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》。

### 1.2.3 栖息地因子

参考美国 EPA 快速生物评价手册,选择河岸植被覆盖程度( L9) 与河流连通性( L10) 作为栖息地因子指标,河岸植被覆盖程度通过 NDVI 指数法进行表征,河流连通性计算方法通过河道断点或节点闸、坝数量与河流长度的比值表征。

## 1.3 指标权重分配

采用神经网络算法求解指标权重,可以避免传统的专家评分法、最小二乘法等存在的主观问题<sup>[16]</sup>。具体的 BP 神经网络参数表见表 1。采用《湖北省统计年鉴》的多年统计数据与兴山县与秭归县水利局的实测数据为训练样本,对模型进行训练。

表 1 BP 神经网络参数

Table 1 Parameters table of back propagation

neural network				
模型结构参数	输入层神经单元数	输出层神经单元数	隐含层个数	隐含层神经单元数
健康评价模型	9	1	1	6

由于 BP 神经网络中隐含层的存在,通过算法计算得出的结果只是神经网络中各神经元之间的权重关系,需要对各神经元权重关系进行分析处理,最终得到输入因素与输出因素之间的具体权重,分析处理

方法如下<sup>[17]</sup>:

相关显著性系数:

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^p W_{ki} (1 - e^{-x}) / (1 + e^{-x}) \tag{2}$$

$$x = w_{kj} \tag{3}$$

相关指数:

$$R_{ij} = | (1 - e^{-y}) / (1 + e^{-y}) | \tag{4}$$

$$y = r_{ij} \tag{5}$$

绝对影响系数:

$$S_{ij} = R_{ij} / \sum_{i=1}^m R_{ij} \tag{6}$$

式中:  $i$  为输入单元,  $i = 1, \cdots, m$ ;  $j$  为输出单元  $j = 1, \cdots, n$ ;  $k$  为隐含层单元,  $k = 1, \cdots, p$ ;  $W_{ki}$  为输入层与隐含层节点间的权重关系;  $w_{kj}$  为隐含层与输出层节点间的权重关系。

绝对影响系数  $S_{ij}$  即为所求的输入层要素与输出层要素间的权重关系。

1.4 评价标准及方法

本文选择赋分法进行健康评价,具体方法是利用 SPSS 22.0 软件统计各指标的平均值、最值、5%、25%、50%、75%、95%分位数,按照赋分法评分标准对指标进行评分。评分标准见表 2,其中分值越高,代表河流越健康。

表 2 赋分法评分标准

Table 2 Criteria of assignment method					
分位数	<5%	5%~24.5%	25%~49.9%	50%~74.9%	>75%
评分	6~8	4~6	2~4	0~2	0
健康等级	I	II	III	IV	V

根据构建的河流健康评价指标体系和指标权重,计算河流生态系统健康指数,计算方法见式(7)<sup>[18]</sup>:

$$H = \sum_{i=1}^n (W_i \times I_i) \tag{7}$$

式中:  $H$  为健康指数;  $W_i$  为评价指标权重;  $I_i$  为评价指标值。

2 结果

2.1 评价指标模型构建

参考顾晓昀等<sup>[13]</sup>的评价指标分类方法,利用层次分析法对选定指标进行分类,指标体系如图 2 所示。

2.2 指标权重赋值

利用 Matlab 2014a 中的 BP 神经网络工具箱计算评价指标权重,良斗河健康评价指标权重计算结果见表 3。可知:指标权重排序为水环境指标>栖息地指标>水生生物指标。

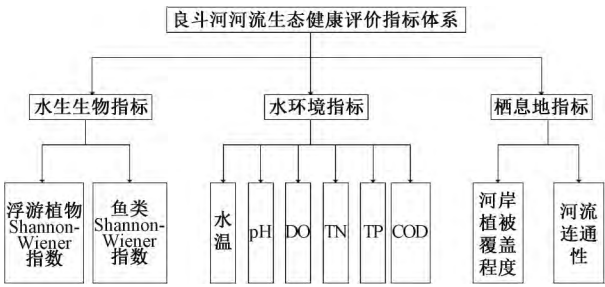


图 2 良斗河河流生态系统健康评价指标体系

Fig.2 Evaluation index system of ecosystem health of Liangdou River

表 3 良斗河健康评价指标权重计算结果

Table 3 The result of index weight			
类别	权重	指标	权重
水生生物指标	0.287	L1: 浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数	0.461
		L2: 鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数	0.539
水环境指标	0.409	L3: 水温	0.211
		L4: pH	0.146
		L5: DO	0.155
		L6: TN	0.135
		L7: TP	0.183
		L8: COD	0.170
栖息地指标	0.304	L9: 河岸植被覆盖程度	0.377
		L10: 河流连通性	0.623

2.3 评价标准与评价等级

根据指标的平均值、最值、标准差、5%、25%、50%、75%、95%分位数的统计结果,得到赋分法评价指标标准,指标评价标准结果见表 4。

表 4 指标评价标准结果

Table 4 The result of the evaluation criteria of each index					
指标	分值标准				
	6~8	4~6	2~4	0~2	0
L1	2.74~3.37	1.97~2.74	1.36~1.97	0.57~1.36	<0.57
L2	1.67~1.91	1.58~1.67	1.36~1.58	1.24~1.36	<1.24
L3/℃	18.57~19.08	18.06~18.57	17.55~18.06	17.04~17.55	<17.04
L4	8.62~8.79	8.79~8.96	9.13~8.96	9.13~9.30	>9.30
L5/(mg·L <sup>-1</sup> )	12.28~12.98	12.63~12.98	12.98~13.33	13.33~13.68	>13.68
L6/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.48~1.71	1.71~1.92	1.92~2.13	2.13~2.40	>2.40
L7/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.02~0.31	0.31~0.63	0.63~0.96	0.96~1.24	>1.24
L8/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.42~1.56	1.56~1.71	1.71~1.83	1.83~2.01	>2.01
L9	0.46~0.53	0.33~0.46	0.25~0.33	0.14~0.25	<0.14
L10/%	88.5~95.4	81.6~88.5	74.7~81.6	67.8~74.7%	<67.8

评价指标共 10 项,每项最高得分 8 分,则总分为 80 分。将评价总分五等分,构建良斗河河流健康评价评分表,结果见表 5。

表 5 良斗河河流健康评价评分表

Table 5 River health assessment scale of Liangdou River					
健康等级	I	II	III	IV	V
分值	64.1~80.0	48.1~64.0	32.1~48.0	16.1~32.0	0~16.0

## 2.4 良斗河河流健康评价结果

良斗河河流生态系统健康评价结果如图3所示。可知:在设立的8个采样点中4个为Ⅰ级,占总采样点数的50%;3个为Ⅱ级,占总采样点数的37.5%;仅1个采样点的评价结果为Ⅲ级,占总采样点数的12.5%。

为探明乡镇尺度下的河流健康状况,利用Arc GIS 10.2对良斗河河流生态健康评价结果进行反距离插值运算,得到河流健康指数在整个流域上的空间分布状况,插值运算结果见图4a。为明确各乡镇中影响良斗河河流生态的主导因素,对良斗河健康评价体系中的水生生物指标、水环境指标和栖息地指标进行单项插值运算,得到的单项指标插值结果如图4b—d所示。

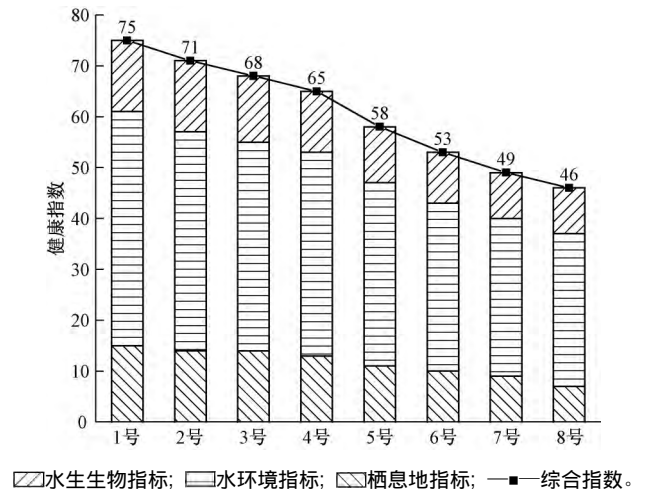


图3 良斗河河流生态系统健康综合评价结果

Fig.3 Ecosystem health assessment result of Liangdou River

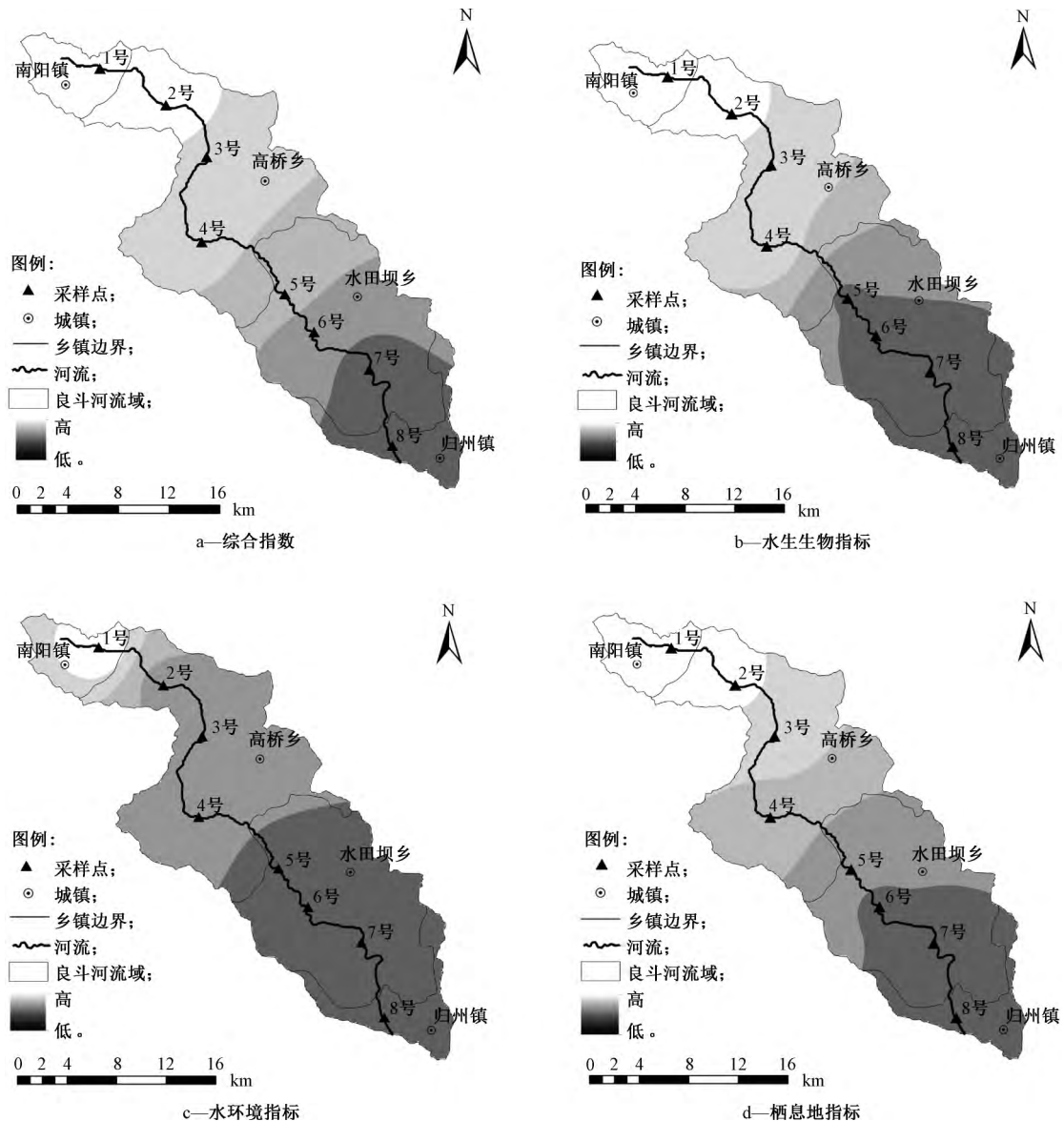


图4 良斗河河流生态系统健康插值结果

Fig.4 Interpolation result of ecosystem health of Liangdou River

插值结果显示:影响南阳镇段河流健康的主要因素为水环境指标;高桥乡段河流健康受水环境指标和栖息地指标的共同影响;水田坝乡段与归州镇段流域情况复杂,河流健康状况受水生生物、水环境和栖息地因素的综合影响。

### 3 讨论

#### 3.1 评价指标权重分配

本文基于 BP 神经网络计算各个评价指标的权重。结果表明:小尺度河流健康评价体系中,评标指标权重表现为水环境指标>栖息地指标>水生生物指标。研究结果与大江大河有一定的区别。顾晓昀等<sup>[13]</sup>的研究结果为水生生物指标>水质指标>栖息地指标。水生生物指标是主要分歧,这可能与不同河流生态系统的生物多样性有关。不同河流生境异质性明显,流域内存在生潭、浅滩等多种生境,生物多样性较大,食物网关系复杂,对河流生态系统健康的贡献度较大,水生生物的存活状况直接反映河流健康状况,因此近来利用水生生物单独进行河流健康评价工作的研究较多,典型的有等生物多度量指数法(MRMMI)<sup>[12]</sup>。小尺度河流生境空间异质性小,水生生物群落稀疏,重大水灾害事件对水生生物的存活起决定性的影响,水生生物指标对小尺度河流的健康影响相对较小,故单独利用水生生物进行河流健康评价的方法在小尺度河流中不能很好适应。但水质指标(水环境指标)与栖息地指标的排序结果两者类似,说明小尺度河流与大江大河亦有一定的相关性。

#### 3.2 良斗河生态系统健康评价

从各乡镇角度上来看,水系上游南阳镇段健康状况较好,可能与南阳镇段靠近神农架自然保护区,区域内人口密度小,河流生态系统大部分处于未开发状态相关。另外,南阳镇段河段具有明显的山区河流特性<sup>[19]</sup>,其河道狭窄、流速大的特点可以将污染物输运至下游区域,保证本区域的河流健康。

良斗河高桥乡段的河流健康状况相较于南阳镇段有所下降,4号采样点的健康综合指数接近Ⅱ类健康等级分值,且水环境指标评价结果较差,分析发现这可能与高桥乡居民的活动和田家坪水库的修建有关。高桥乡经济发展主要以畜牧业为主,且养殖场主要分布于国道、省道两侧 200~500 m。猪粪沼液池由于未进行覆盖,沼液外溢,富含氮、磷和重金属等的猪粪沼液随着地表径流汇入河流,给河流生态系统带来极大的负担<sup>[20]</sup>;此外,田家坪水库的运行引起河

流流速减缓,河流自净能力下降,氮、磷等营养物质在坝后大量沉积<sup>[21-22]</sup>,导致河流健康状况下降<sup>[23-24]</sup>。

良斗河水田坝乡段的河流健康状况虽然为Ⅱ级,但是其综合评价结果不容乐观:6号和7号采样点相较于上游的采样点评分结果,下降趋势明显,3类指标单项评价结果也较差,分析发现这可能与水田坝乡的经济结构和多个小水电的建设相关。水田坝乡的经济发展主要以种植业为主,存在过度种植和不科学不合理的现象。根据当地农业局的统计资料显示,水田坝乡化肥平均施用强度为 0.23 t/hm<sup>2</sup>左右,略高于国际公认化肥施用上限 0.225 t/hm<sup>2</sup>,农药利用率不足 30%。过量的农药和化肥随着降雨过程进入河道,严重污染良斗河水质。另外,由于灌溉等的需要,水田坝乡境内建有河鑫、田家河等多小水电,众多小水电的建立破坏河流连通性,河道生态基流严重不足<sup>[25]</sup>,使河流健康状况下降明显。

良斗河归州镇段的健康状况持续下降,其境内 8号采样点的健康综合指数为 46,3类指标单项评价结果均较差,可能是上游污染物随河流输移,在下游沉积导致。归州镇河段地势低平,河流特征由山区性河流向平原区河流转变,河流流速下降,易于污染物沉积<sup>[26]</sup>。此外,由于三峡水库的修建蓄水,归州镇河段成为三峡水库的回水区,受长江水流的顶托影响,污染物无法排出。同时,原陆地生境迅速变为冬水夏陆交替型的水库消落带生境,绝大多数物种类难以适应,甚至灭绝<sup>[27]</sup>。研究表明,随着水库水位下降,许多漂浮物包括水体中动植物尸体滞留在水库消落带,如无对应的预防措施,水库消落带将变成垃圾带,严重影响河流生态系统健康<sup>[28-29]</sup>。

#### 3.3 小尺度河流管理和维护策略

本研究显示,影响小尺度河流生态系统健康的主要因素为水环境指标,氮、磷等营养盐的含量对河流健康状况起决定性的作用。小尺度河流因其流量小、河道窄且浅等特点,相较于大江大河,其纳污能力较小,经排污管道排入的污水不能很好地进行自净处理,污染物质在河道内长期储存,破坏河流健康。建议在未来的河流管控工作中,重点排查沿河排污口设置情况,坚决取缔非法排污口,拟建和可存排污口要严控其排放水体的水质情况,对于不达标的,相应污水处理厂要限期内进行提标改造,使水质达标。依法进行河道空间管控,设立合理的河道控制红线也是保护小尺度河流生态系统健康的重要方法之一。严禁

在规划红线内进行采砂等作业,以保持河流原始自然形态,利于恢复河流的自净能力;同时禁止河道规划红线内的违规种植行为,可以有效阻止农药化肥等直排河道现象。近来的河湖长制工作的推行,对小尺度河流生态系统健康恢复工作也有着深远的积极影响。未来的河湖长制工作应严抓各级河长的绩效考核工作,保证河湖长制的长效性。

#### 4 结 论

本文通过构建小流域河流生态系统健康评价体系,并针对良斗河流域进行了健康评价,评价结果如下:

1) 良斗河河流生态系统健康评价指标体系包括水生生物指标、水环境指标、栖息地指标 3 个方面,涵盖浮游植物 Shannon-Wieners 多样性指数、pH、河流连通性等共 10 个指标;利用 BP 神经网络计算指标权重排序为水环境指标>栖息地指标>水生生物指标。

2) 在良斗河水系的 8 个采样点中,有 4 个指标健康等级评价结果为 I 级,3 个为 II 级,1 个为 III 级;良斗河河流生态系统健康状况较好的区域主要分布在河道上游,靠近河口的区域健康状况较差。

引起良斗流生态系统健康状况变化的主要因素为水环境指标,未来的良斗河治理修复工作应多关注水环境指标的达标情况,河流开发治理等工程也应着重考虑对水环境指标的影响效应。

#### 参考文献

- [1] Fan H, He D M, Wang H L. Environmental consequences of damming the mainstream Lancang-Mekong River: a review [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 146: 77-91.
- [2] 栗一帆,李卫明,艾志强,等.汉江中下游生态系统健康评价指标体系构建及其应用[J].生态学报,2019,39(11):3895-3907.
- [3] 曹宸,李叙勇.区县尺度下的河流生态系统健康评价:以北京房山区为例[J].生态学报,2018,38(12):4296-4306.
- [4] Luo Z, Zuo Q, Shao Q. A new framework for assessing river ecosystem health with consideration of human service demand [J]. Sci Total Environ, 2018, 640/641: 442-453.
- [5] Li T, Ding Y, Xia W. An integrated method for waterway health assessment: a case in the Jingjiang reach of the Yangtze River, China [J]. Physical Geography, 2018, 39(1): 67-83.
- [6] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [7] Sudaryanti S, Trihadiningrum Y, Hart B T, et al. Assessment of the biological health of the Brantas River, East Java, Indonesia using the Australian River Assessment System (AUSRIVAS) methodology [J]. Aquatic Ecology, 2001, 35(2): 135-146.
- [8] 陈森,苏晓磊,党成强,等.三峡水库河流生境评价指标体系构建及应用[J].生态学报,2017,37(24):8433-8444.
- [9] 曹冷然,李品良,李深奇,等.模糊综合评判与灰色聚类分析在河流健康评价的应用[J].环境工程,2018,36(8):189-192.
- [10] 张祺,景朝霞,刘熾,等.针对正态样本的模糊综合评价法在巢湖水质评价中的应用[J].环境工程,2015,33(3):110-112,135.
- [11] 刘宁,田力威,赵宏伟.基于层次分析法的徒骇河适宜性评价[J].环境工程,2016,34(4):142-145,115.
- [12] 王硕,张建云,林育青,等.基于大型底栖动物多度量指数的河流多尺度评价[J].环境科学研究,2018,32(2):284-292.
- [13] 顾晓昀,徐宗学,刘麟菲,等.北京北运河河流生态系统健康评价[J].环境科学,2018,39(6):2576-2587.
- [14] 邱阳凌,林育青,刘俊杰,等.淮河干流及主要支流夏季浮游植物群落生物多样性评价[J].环境科学学报,2018,38(4):1665-1672.
- [15] 邓明星,黄亮亮,莫苑敏,等.应用鱼类生物完整性指数评价荔浦河河流健康[J].生态毒理学报,2018,13(4):111-119.
- [16] 徐伟,董增川,付晓花,等.基于BP神经网络的河流生态健康预警[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(1):54-59.
- [17] 孙会君,王新华.应用人工神经网络确定评价指标的权重[J].山东科技大学学报(自然科学版),2001,20(3):84-86.
- [18] 李卫明,艾志强,刘德富,等.基于水电梯级开发的河流生态健康研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(6):957-964.
- [19] 李梦娣,范俊韬,孔维静,等.河流山区段水生生态安全评估:以太子河为例[J].应用生态学报,2018,29(8):2685-2694.
- [20] 王愿珠,程鹏飞,刘德富,等.生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果[J].环境科学,2017,38(8):3354-3361.
- [21] 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 [J]. Aquaculture Research, 2017, 48(7):3433-3449.
- [22] 刘清香,王婷,许旭明,等.汉江中下游硅藻群落时空分布及其影响因素研究[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(4):848-856.
- [23] Fabricius A L, Duester L, Ecker D, et al. Metal and metalloid size-fractionation strategies in spatial high-resolution sediment pore water profiles [J]. Environmental science & technology, 2016, 50(17):9506-9514.
- [24] Wang J, Zhao L, Wei H. Variable diffusion boundary layer and diffusion flux at sediment-water interface in response to dynamic forcing over an intertidal mudflat [J]. Chinese science bulletin, 2012, 57(13):1568-1577.
- [25] Ryan Bellmore J, Duda J J, Craig L S, et al. Status and trends of dam removal research in the United States [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2017, 4(2):1164.
- [26] 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.
- [27] 郭燕,杨邵,沈雅飞,等.三峡库区消落带现存草本植物组成与生态位[J].应用生态学报,2018,29(11):3559-3568.
- [28] 徐建霞,王建柱.三峡库区香溪河消落带植被群落特征与土壤环境相关性[J].生态学杂志,2018,37(12):3661-3669.
- [29] 郭燕,程瑞梅,杨邵,等.三峡库区不同植被类型消落带土壤重金属含量的时空变异[J].生态学杂志,2018,37(8):2497-2504.

第一作者:栗一帆(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为生态水力学。296653041@qq.com

通信作者:李卫明(1979-),男,博士,副教授,主要研究方向为生态水力学。lwm000001@126.com