

DOI: 10.5846/stxb202011222997

李港, 陈诚, 姚斯洋, 何梦男, 阚加力, 栾浩, 陈求稳. 基于压力-状态-响应和物元可拓模型的城市河流健康评价. 生态学报, 2022, 42(9): 3771-3781.
Li G, Chen C, Yao S Y, He M N, Kan J L, Luan H, Chen Q W. Health assessment of urban river based on pressure-state-response and matter-element extension model. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3771-3781.

基于压力-状态-响应和物元可拓模型的城市河流健康评价

李 港¹, 陈 诚^{1,2,*}, 姚斯洋¹, 何梦男¹, 阚加力³, 栾 浩³, 陈求稳¹

1 南京水利科学研究院生态环境研究所, 南京 210029

2 河海大学水利水电学院, 南京 210098

3 南京市鼓楼区水务局, 南京 210000

摘要: 城市河流作为人类活动和自然过程相互作用强烈的区域, 承受着人类资源开发利用和污染物排放的压力, 但近些年来随着对河流健康的重视, 针对城市河流实施了大量的生态治理措施。综合考虑人类正负面影响对河流健康状态的影响, 进行河流健康状态的评价, 对于城市河流的修复效果检验和管理保护具有重要意义。以南京市鼓楼区典型城市河流西北护城河为研究区, 根据河流周边土地利用类型、物理形态差异及城市管网分布将其划分为 6 个河段, 考虑人类修复措施对河流健康水平的影响, 构建了基于压力-状态-响应 (Pressure-State-Response, PSR) 模型的城市河流健康评价指标体系, 采用物元可拓模型确定了河段健康等级, 并根据各等级综合关联度之间的距离判断河流健康水平的发展趋势。结果表明: 压力、状态以及响应准则层的权重分别为 0.458、0.311、0.231, 压力指标为影响城市河流健康水平的主要因素; 西北护城河 6 个河段的健康水平表现出较强的空间异质性, 河段 A—F 的健康等级分别为中等、健康、亚健康、中等、亚病态和病态, 流经公园绿地的河段健康水平明显高于流经居民住宅区的河段, 河段 B、C、D 的健康水平有进一步提升的趋势, 而河段 A、E、F 的健康状态则有进一步恶化的趋势, 需要进行重点关注。

关键词: 城市河流; 压力-状态-响应模型; 物元可拓模型; 健康评价

Health assessment of urban river based on pressure-state-response and matter-element extension model

LI Gang¹, CHEN Cheng^{1,2,*}, YAO Siyang¹, HE Mengnan¹, KAN Jiali³, LUAN Hao³, CHEN Qiuwen¹

1 Center for Eco-Environmental Research, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

2 College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China

3 Water Affairs Bureau of Gulou District of Nanjing City, Nanjing 210000, China

Abstract: Urban rivers, located in the strong interaction area of human activities and natural processes, are under great pressure of human resource development and utilization and pollutant discharge. In recent years, people have adopted a series of management measures to improve the health of urban rivers. However, current methods about urban river health assessment mainly focus on the pressures from human activities. The positive measures taken by humans to restore the ecology of urban rivers are usually neglected. Thus, the assessment results cannot fully reflect the real river health state and may mislead the management and protection of urban rivers. Therefore, both of the negative and positive human activities should be considered when constructing the assessment index system of urban river health, which can provide a more

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0830800); 江苏省双创团队 (SC917001)

收稿日期: 2020-11-22; 网络出版日期: 2021-10-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chen Cheng@nhri.cn

scientific and accurate assessment result. In this study, a typical urban river (the Northwest-Moat) in Nanjing City was selected as the study area. Considering the spatial heterogeneity of river health, we divided the Northwest-Moat into six reaches according to the river's surrounding architecture environment, its morphological characteristics and distribution of urban pipe network. A pressure-state-response (PSR) model was then proposed to construct the health index system with the consideration of human restoration measures on river health. The matter-element extension model was used to determine the final grade of each river reach and judge the development trend of each river reach's health. The results showed that the weights of pressure, state and response criterion layer were 0.458, 0.311 and 0.231 respectively. The pressure indices were the main impact factors of river health, when compared to the state indices and response indices. The health levels of six river sections showed great spatial heterogeneity, and the health grades from reach A to reach F were moderate, health, sub-health, moderate, sub-illness and illness respectively. The health grades of the river reaches that run through parks were significantly higher than those run through residential areas. The health level of reach B, reach C and reach D has a tendency for further improvement, while the health status of reach A, reach E and reach F has a tendency for further deterioration. Therefore, more attentions should be paid to the reach A, reach E and reach F to improve their health status in future studies. Overall, the proposed method in the study, which combined PSR model and matter-element extension model, could effectively assess the ecosystem health status and change trend of urban rivers and would provide scientific guidance for future ecological restoration.

Key Words: urban river; pressure-state-response model; matter-element extension model; health assessment

城市的扩张和工业的发展使得人类活动对城市河流的干扰和破坏不断加剧,进而导致了水系衰退、水体黑臭等水生态环境问题^[1]。随着近些年来城市河流生态健康受到社会的广泛关注与重视,一系列生态修复措施得以实施以期能够改善城市河流的健康状态^[2]。因此,进行城市河流的健康评价,一方面可以检验生态修复措施的效果,同时也是进行城市河流管理与保护的重要前提,对城市的可持续发展具有重要意义。

目前,河流健康评价方法主要包括指示物种法和指标体系法。指示物种法采用鱼类、浮游动植物、底栖动物以及微生物等生物类群的物种完整性来监测河流生态系统健康,适用于受人类活动影响较小的自然河流的健康评价^[3-5]。指标体系法则是根据河流系统特征构建评价指标体系,采用数学模型确定河流健康等级,在河流健康评价中得到了广泛的应用^[6-7]。城市河流作为人类活动和自然过程相互作用较为强烈的区域,河流资源的过度开发利用以及污染物排放等压力使得城市河流健康状况不断恶化^[8],而为了应对河流健康状况的恶化,针对城市河流实施了大量的生态治理修复措施,人类活动施加给河流的压力和采取的积极措施共同影响着城市河流的健康状态^[9]。然而,目前针对城市河流构建的评价指标体系主要集中在水文、水质、生境等河流的自然属性以及人类对河流施加的压力方面^[10],而忽视了人类采取的积极措施对河流生态健康的影响,从而使得表征河流健康状态的信息考虑不够全面,综合考虑人类正负面影响对河流健康状态的影响,可提供更加全面准确的城市河流健康评价结果。

压力-状态-响应(PSR)模型于20世纪70年代由David J. Rapport和Tony Friend提出,后由经济合作与发展组织(OECD)和联合国环境规划署(UNEP)推广发展^[11],由于能够清晰的描绘外界压力、系统状态以及响应决策与行动三者之间的关系,被广泛应用于生态安全、生态环境承载力等方面的评价^[12],基于PSR模型筛选评价指标,除了可以将不同地区城市河流健康评价体系的构建统一到同一框架下,还能考虑人类积极措施对河流健康状态的影响,有效提高城市河流健康综合评价准确性和合理性。彭涛等^[13]、Zhao等^[14]采用PSR模型构建城市河流健康评价指标体系,利用集对分析方法进行了宜昌黄柏河和合肥十五里河的健康评价,取得了较为全面准确的评价结果。

采用常规数学模型进行河流健康等级评定时,其评价结果往往具有一定的模糊性^[15],并且仅能针对当前指标监测数据进行现状评价,难以根据评价结果判断河流健康状态的变化趋势。物元可拓模型最早由我国学

者蔡文提出,主要用于解决复杂的不相容问题^[16],同时可以根据相邻等级综合关联度之间的距离判断河流健康水平的发展趋势,将其与 PSR 模型相结合,能够有效提升城市河流健康的评价准确性。城市河流往往流经城市的多个区域,由于发展程度与功能定位的不同,各区域内河段包含河流物理形态、土地利用类型以及河流水环境等要素在内的生态系统往往存在较大的差异^[17],从而导致城市河流的健康状态呈现出明显的空间异质性,基于河流沿程生态系统特征的差异,进行河流分段健康评价,可以有效识别各河段生态健康的关键制约因素。同时,为避免河流尺度指标造成各河段之间差异的平均化,影响评价结果,选取的指标应集中在河段尺度和断面尺度。

本研究以城市河流鼓楼区西北护城河为对象,根据河流形态特征及其所处区域功能定位差异划分河段,基于 PSR 模型构建评价指标体系,采用物元可拓模型进行河流健康评价并判断其变化趋势,以期在城市河流的针对性生态治理与修复提供参考。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

西北护城河位于江苏省南京市鼓楼区中部,全长约 5.6 km,汇水面积 3.95 km²(图 1),主要流经公园、景区以及居民住宅区等区域,各河段所处环境存在显著的差异,河流形态沿程呈现较大变化。为准确描述西北护城河各河段健康状况的差异,考虑河流周边土地利用类型的区别以及河流形态的变化情况,并结合城市地下管网走向,将西北护城河划分为 6 个河段进行河流的分段健康综合评价。河段 A 起于小桃园泵站,止于桃园桥,全长 0.55 km,河宽 10—15 m,沿岸植被较多,沿河无居民区;河段 B 起于桃园桥,止于中山北路,河段长 1.3 km,均宽 100 m,护岸为软质护坡,功能定位为景观河道;河段 C 起于中山北路,止于绣球公园闸,为公园内湖泊,水流流速缓慢,人流量较大;河段 D 起于绣球公园闸,止于卢龙桥,河段长 0.54 km,均宽 15 m,河段蜿蜒曲折,两岸主要为商业用地;河段 E 起于卢龙桥,止于建宁西路桥,河段长 0.81 km,均宽 75 m,右岸为景区,左岸为道路;河段 F 起于建宁西路桥,止于金川门泵站,河段长 1.24 km,河段均宽 35 m,两岸均为居民住宅区,采用硬质衬砌护岸,河段内较多生态浮床及曝气设施。西北护城河的污染源主要为地表径流污染、生活污水以及本底污染,水量补给多由闸坝控制,其健康状态受人类活动影响大,具有典型的城市河流特征^[18]。

1.2 数据资料

本研究于 2019 年对西北护城河 6 个河段布设 12 个采样点(图 1)进行每个季度水环境和水生态监测,获取包括水质指标(COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP 等)、透明度、浮游植物生物量等水质水生态监测数据,计算指标现状值时参考《地表水资源质量评价技术规程》^[19]中水质评价数据频次要求,对四个季度的监测数据进行算术平均处理。城市河流污染负荷主要来自降雨携带、地表径流以及河道本底 3 个方面。降雨携带的年入河污染物负荷估算通过进行每个季度的降雨实验,获得雨水中包括 COD_{Mn}、NH₃-N 以及 TP 在内的污染物浓度,结合 2019 年水文年鉴中鼓楼区年降雨量数据,估算污染物降雨入河量;地表径流污染物入河负荷估算通过各季度降雨试验测量雨水流经不同下垫面(绿地、硬质地面等)后靠近河道一侧的地表径流中各污染物浓度,参考杨迪虎^[20]的研究确定不同下垫面面源污染物入河系数,通过解译 2019 年 9 月高分 1 号遥感影像获得各河段汇水范围内不同类型下垫面面积,估算污染物地表径流入河量;河道本底污染负荷根据水质监测数据及《地表水环境质量标准》^[21]进行估算;采取的生态修复措施及其工程量数据来自《西北护城河水质提升工程可行性研究报告》。

2 评价模型

2.1 评价指标体系

PSR 模型包含人类活动给河流带来的压力、河流在人类压力作用下的状态以及人类为改善河流状态而采取的响应措施三个方面,能够全面考虑人类对河流健康的正负面影响,因此本研究从压力、状态、响应三个方

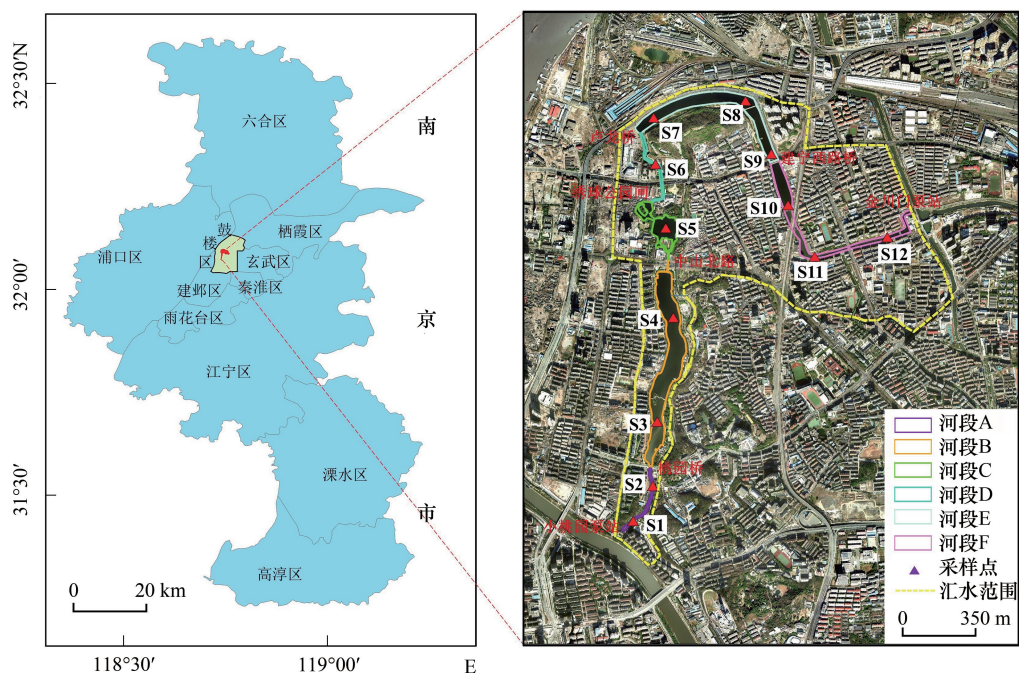


图1 西北护城河位置、分段及采样点布设情况

Fig.1 The location, segmentation and sampling sites of Northwest-Moat

S1—S12 代表采样点

面构建评价指标体系,以进行全面准确的河流健康评价。

(1) 压力指标

随着社会对城市河流健康的关注与重视,同时由于城市河流自净能力有限,对于河流点源污染排放管控也越来越严格,众多城市河流已进行了排污口的整治,禁止污染物通过管道直接排入河流,因此,河流中影响水质水生态的污染物 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 以及 TP 主要来自面源冲刷、降雨携带以及河道本底累积的内源污染^[22],考虑到各河段纳污量的差异,采用各河段 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 以及 TP 三个污染物指标的年排放量与对应河段纳污量的比值表征污染负荷对河流水质水生态造成的压力。城市河流周边滨水建筑物的体量大小会直接影响到河岸带的宽度,对河岸带的状态产生一定的胁迫,而河岸带作为水生生态系统和陆地生态系统进行物质交换的关键区域,能一定程度表征河流健康状况,因此将滨水建筑物体量作为河岸带压力来源的指标。

(2) 状态指标

城市河流在各种人类活动压力的作用下,其各方面的状态会受到一定的影响。其中污染物的排放量大小会直接影响到城市河流的水质健康状态,使得城市河流的营养状态发生改变,进而引起水生动植物的多样性的变化,对河流的水质水生态产生影响,水质状态选用透明度和水质等级两个指标表征,水质等级的计算综合考虑 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 以及 TP 三个主要污染物参考《地表水环境质量标准》^[21] 和《生态河湖状况评价规范》^[23] 确定,水生态状态采用浮游植物多样性指标表征;滨水建筑物体量会影响到河岸带的健康状态,例如滨水建筑物体量较大的一般为商业住宅区,河岸带宽度较窄,而滨水建筑物体量较小的一般为公园绿地,其河岸带宽度较宽,因此采用在滨水建筑物作用下的河岸带宽度表征河岸带的状态。

(3) 响应指标

人类为了改善河流在压力作用下的状态而采取的响应措施对于河流的健康水平会产生一定的影响。城市河流相较于自然河流,其河岸带的植被大都为人工种植和维护^[24],同时部分河段修建了生态护坡以还原护岸的自然状态,河岸带的植被种植情况及对应的岸坡自然状态共同影响着污染物的截留及水陆物质的交换,

因此将河岸带植被覆盖率和岸坡自然程度作为河岸带状态的响应指标;对于水质水生态状态而言,往往会采取减少排污口和进行生态修复从而达到改善水质水生态的目的,因此可以将排污口处理率及生态修复措施对污染物的削减情况作为水质水生态的响应指标。

根据上述分析选取指标,基于 PSR 模型构建了包含压力、状态、响应三个方面共 12 指标的城市河流评价指标体系,指标及其计算方式具体如表 1 所示。

表 1 评价指标体系及指标计算方法

Table 1 Evaluation index system and its calculation method

目标层 Destination layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	单位 Unit	计算方法 Calculation method	资料来源 Data sources
城市河流健康 Urban river health	压力	COD _{Mn} 排放量	%	年 COD _{Mn} 排放量/河段允许排放量	水环境监测
		NH ₃ -N 排放量	%	年 NH ₃ -N 排放量/河段允许排放量	水环境监测
		TP 排放量	%	年 TP 排放量/河段允许排放量	水环境监测
		滨水建筑物体量	/	张翼飞等 ^[25]	实地调研
	状态	河岸带宽度	%	河岸带宽度/河段河宽	遥感解译
		透明度	%	河段透明度/河段水深	水环境监测
		水质等级	/	地表水环境质量标准 ^[21] 生态河湖状况评价规范 ^[23]	水环境监测
		浮游植物多样性	/	$H = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$	水生态监测
	响应	岸坡自然程度	/	张翼飞等 ^[25]	实地调研
		河岸植被覆盖率	%	河段岸边植被覆盖面积/河段水面面积	遥感解译
		污染负荷削减量	%	河段总负荷削减量/河段需削减量	《西北护城河水质提升工程可行性研究报告》
		排污口处理率	%	河段已处理排污口数量/河段总排污口数量	《西北护城河水质提升工程可行性研究报告》

COD_{Mn}:高锰酸盐指数 Permanganate index;NH₃-N:氨氮 Ammonia nitrogen;TP:总磷 Total phosphorus p_i 为第 i 个物种个体数占总个体数的百分比

2.2 评价标准

目前对于城市河流的健康评价尚未制定统一的标准,因此本研究结合国内外河流健康评价的研究成果以及城市河流的实际情况,将目标层城市河流健康等级分为 I、II、III、IV、V 五个等级,分别对应于健康、亚健康、中等、亚健康、病态五个健康水平^[26]。同时采取同样方式对准则层进行分级,对于压力准则层,分为低压力(I)、较低压力(II)、中等压力(III)、较高压力(IV)以及高压力(V);对于状态准则层,分为好状态(I)、较好状态(II)、中等状态(III)、较差状态(IV)以及差状态(V);对于响应准则层,分为高响应能力(I)、较高响应能力(II)、中等响应能力(III)、较低响应能力(IV)以及低响应能力(V)。各等级标准值参考相关文献、标准规范并结合西北护城河实际情况制定,具体如表 2 所示。

2.3 评价方法

当所给的条件不能达到要实现的目标时,称为不相容问题^[30-31]。对于河流健康评价而言,理论上指标选取的越多,对于河流健康的描述就会更加全面,但往往有些指标数据的获取会存在一定难度,即当前所选的有限的指标并不能完全实现对河流健康状态的全面描述,即河流健康评价是一个不相容问题。而物元可拓模型主要用于解决不相容的复杂问题^[15],因此,本文采用物元可拓模型进行河流健康等级评定,并判断其演变趋势,同时对河流准则层进行评价,确定各准则层所处的等级。为减少权重判定的主观性影响,采用熵权法进行权重计算。

(1)河流健康物元矩阵、经典域及节域构建:物元是描述事物的名称、特征及量值 3 个基本元素的简称。将研究事物记为 M ,本研究中指河流健康水平, M 的特征记为 C ,本研究中指各个评价指标, M 关于 C 的量值

记为 V , 即为评价指标处于某一等级时对应的量值, 将有序三元组 $R = (M, C, V)$ 称为物元矩阵。若研究事物 M 具有 n 个特征 $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ 及其对应量值 $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$, 相应物元矩阵 R 表示为:

$$R = (M, C, V) = \begin{bmatrix} M & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (1)$$

表 2 河流健康指标体系评价标准

Table 2 Evaluation criteria of river health index system

目标层 Destination layer	指标层 Index layer	单位 Unit	健康 Health	亚健康 Sub-health	中等 Moderate	亚病态 Sub-illness	病态 Illness	取值范围 Value range	分级依据 Classification basis
城市河流健康 Urban river health	COD _{Mn} 排放量(P1)	%	0—0.4	0.4—0.8	0.8—1.2	1.2—1.6	1.6—2.0	0—2	[6,27]
	NH ₃ -N 排放量(P2)	%	0—0.4	0.4—0.8	0.8—1.2	1.2—1.6	1.6—2.0	0—2	[6,27]
	TP 排放量(P3)	%	0—0.2	0.2—0.4	0.4—0.6	0.6—0.8	0.8—1.0	0—1	[6,27]
	滨水建筑物体量(P4)	—	9—10	7—9	5—7	3—5	0—3	0—10	[25]
	河岸带宽度(S1)	%	0.8—1	0.6—0.8	0.4—0.6	0.2—0.4	0—0.2	0—1	[28]
	透明度(S2)	%	0.42—0.5	0.34—0.42	0.26—0.34	0.18—0.26	0.1—0.18	0.1—0.5	[29]
	水质等级(S3)	—	90—100	75—90	60—75	40—60	0—40	0—100	[21,23]
	浮游植物多样性(S4)	—	1.2—1.5	0.9—1.2	0.6—0.9	0.3—0.6	0—0.3	0—1.5	[23]
	岸坡自然程度(R1)	—	4—5	3—4	2—3	1—2	0—1	0—5	[25]
	河岸植被覆盖率(R2)	%	0.8—1	0.6—0.8	0.4—0.6	0.2—0.4	0—0.2	0—1	/
	污染负荷削减量(R3)	%	2.6—3	2.2—2.6	1.8—2.2	1.4—1.8	1.0—1.4	1—3	/
	排污口处理率(R4)	%	0.8—1	0.6—0.8	0.4—0.6	0.2—0.4	0—0.2	0—1	/

经典域表示待评价对象的特征处于各个等级时对应的取值范围, 节域表示待评价事物对应特征的所有数据范围, 根据制定的评价标准即可得到相应经典域和节域矩阵^[32]。

(2) 关联函数计算: 根据关联度计算获得指标所隶属的等级, $K_j(v_i)$ 表示第 i 个指标属于第 j 个等级的关联度, $K_j(v_i)$ 越大, 则隶属于哪个等级, 计算公式如下:

$$K_j(v_i) = \begin{cases} -\frac{\rho(v_i, v_{oji})}{|v_{oji}|}, (v_i \in v_{oji}) \\ \frac{\rho(v_i, v_{oji})}{\rho(v_i, v_{pi}) - \rho(v_i, v_{oji})}, (v_i \notin v_{oji}) \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} \rho(v_i, v_{oji}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{oji} + b_{oji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{oji} - a_{oji}) \\ \rho(v_i, v_{pi}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{oji} + b_{oji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\rho(v_i, v_{oji})$ 和 $\rho(v_i, v_{pi})$ 分别为点 v_i 与经典域 v_{oji} 和节域 v_{pi} 的距离, v_i, v_{oji}, v_{pi} 分别为待评价事物的量值、经典域的量值范围和节域的量值范围。

(3) 权重计算: 熵权法根据指标自身所含信息量确定指标权重, 是相对客观的权重确定方法^[33], 采用熵权法计算得到第 i 个指标相对于目标层的权重 w_i 。

(4) 综合关联度计算: 根据最大关联度原则, 确定研究事物评价等级, 待评价事物 $M_x (x=1, 2, 3, \dots, n)$ 关于等级 j 的关联度 $K_j(M_x)$ 为:

$$K_j(M_x) = \sum_{i=1}^m w_i K_j(v_i) \quad (4)$$

式中, m 表示指标数量。若 $K_{jx} = \max K_j(M_x)$, 则待评价事物 M_x 属于等级 j 。同时根据 K_{jx} 与 $K_{(j-1)x}$ 及 $K_{(j+1)x}$ 的距离大小, 判断当前位于等级 j 的待评价事物 M_x 的等级变化趋势。

3 结果分析

3.1 河段指标层现状值及对应等级

利用 2019 年数据资料, 根据表 1 中各指标计算方法得到指标现状值, 结合表 2 中的评价标准, 将各指标现状值代入式 (2), 获得指标关于各个等级的关联度, 从而确定各指标所处的等级, 指标现状值及其所处等级如表 3 所示。从表 3 中可以看出, 尽管选取的城市河流的尺度较小, 但同一指标的等级在不同河段仍然存在明显的差异。各河段处于Ⅲ级以上 (Ⅰ、Ⅱ) 的指标数量占比分别为 58.3%、66.7%、50.0%、25.0%、33.3% 以及 16.7%, 总体而言, 河段 A、B、C 各指标状态相对较好, 而河段 D、F 则相对较差。

表 3 各河段指标现状值及其对应等级

Table 3 The current index value and corresponding grade of each river reach

目标层 Destination layer	指标层 Index layer	河段 River reaches											
		A		B		C		D		E		F	
		现状值	等级	现状值	等级	现状值	等级	现状值	等级	现状值	等级	现状值	等级
城市河流健康	COD _{Mn} 排放量	0.974	Ⅲ	0.820	Ⅲ	1.199	Ⅲ	1.700	V	1.287	Ⅳ	1.362	Ⅳ
Urban river health	NH ₃ -N 排放量	0.889	Ⅲ	0.930	Ⅲ	1.427	Ⅳ	1.595	V	0.768	Ⅱ	1.277	Ⅳ
	TP 排放量	0.211	Ⅱ	0.340	Ⅱ	0.576	Ⅲ	0.461	Ⅲ	0.289	Ⅱ	0.677	Ⅳ
	滨水建筑物体量	9.000	Ⅰ	8.000	Ⅱ	8.000	Ⅱ	6.000	Ⅲ	4.000	Ⅳ	2.000	V
	河岸带宽度	0.740	Ⅱ	0.420	Ⅲ	0.410	Ⅲ	0.330	Ⅳ	0.230	Ⅳ	0.180	V
	透明度	0.250	Ⅳ	0.370	Ⅱ	0.280	Ⅲ	0.400	Ⅱ	0.300	Ⅲ	0.200	Ⅳ
	水质等级	83.000	Ⅱ	91.000	Ⅰ	76.000	Ⅱ	74.000	Ⅲ	79.000	Ⅱ	61.000	Ⅲ
	浮游植物多样性	0.640	Ⅲ	0.910	Ⅱ	1.030	Ⅱ	0.970	Ⅱ	0.830	Ⅲ	1.170	Ⅱ
	岸坡自然程度	3.500	Ⅱ	4.500	Ⅰ	2.500	Ⅲ	1.500	Ⅳ	2.500	Ⅲ	0.500	V
	河岸植被覆盖率	0.780	Ⅱ	0.580	Ⅲ	0.620	Ⅱ	0.590	Ⅲ	0.530	Ⅲ	0.350	Ⅳ
	污染负荷削减量	1.720	Ⅳ	2.750	Ⅰ	2.470	Ⅱ	1.560	Ⅳ	1.710	Ⅳ	1.330	Ⅳ
	排污口处理率	0.670	Ⅱ	0.930	Ⅰ	0.870	Ⅰ	1.000	Ⅰ	0.920	Ⅰ	0.740	Ⅱ
	Ⅲ级以上指标比例	58.3%		66.7%		50.0%		25.0%		33.3%		16.7%	

等级Ⅰ—Ⅴ分别代表健康、亚健康、中等、亚健康、病态

3.2 指标权重分配

根据各河段指标现状值, 采用熵权法计算获得城市河流健康评价体系指标权重, 结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出, 准则层权重表现为压力指标 > 状态指标 > 响应指标, 各指标相对于目标层的权重介于 0.049—0.140, 权重较大的指标主要为 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 排放量以及河流植被覆盖率, 权重均达到了 0.12 以上, 而其他指标的权重则相对较小, 根据熵权法的内涵, 表明 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 排放量、河流植被覆盖率四个指标在不同河段现状值的离散程度大于其他指标, 即上述四个指标在不同河段的差异性相对更大, 对综合评价结果的影响程度也更大。

3.3 河段准则层及综合等级

将指标相对于准则层和目标层的权重以及关于各等级的关联度代入式 (4), 计算得到各河段准则层以及河流健康水平关于各等级的关联度, 关联度结果如表 5 所示, 各河段准则层等级及河流综合等级如图 2 所示。从表 5 和图 2 中可以看出, 在河流健康水平综合等级方面, 河段 A、B 处于亚健康等级, 河段 C、E 处于中等等级, 而河段 D、F 则处于亚健康等级, 同时, 根据河流健康水平所处等级的关联度与其相邻水平关联度之间的距离, 可以看出河段 C、D、E 的健康水平均与更优等级的关联度距离相近, 表明该河段健康水平有进一步提升的趋势, 而河段 A、E、F 的健康水平则存在恶化的趋势, 同时, 各河段健康水平的变化趋势与该河段准则层的变化趋势也呈现出了较高的一致性。

表 4 城市河流健康评价体系指标权重

Table 4 Index weight of urban river health evaluation system

目标层 Destination layer	准则层 Criterion layer	准则层权重 Weights of criterion layer	指标层 Index layer	指标层权重 Weights of index layer	
				相对于目标层权重 Index weight relative to destination layer	相对于准则层权重 Index weight relative to criterion layer
城市河流健康 Urban river health	压力	0.458	COD _{Mn} 排放量	0.130	0.284
			NH ₃ -N 排放量	0.140	0.307
			TP 排放量	0.133	0.290
			滨水建筑物体量	0.055	0.119
	状态	0.311	河岸带宽度	0.089	0.286
			透明度	0.063	0.203
			水质等级	0.049	0.157
			浮游植物多样性	0.051	0.165
	响应	0.231	岸坡自然程度	0.059	0.190
			河岸植被覆盖率	0.049	0.211
			污染负荷削减量	0.124	0.537
			排污口处理率	0.058	0.252

表 5 各河段准则层及综合评价等级关联度

Table 5 Criterion layer grade and each river reach's grade

河段 River reach	准则层 Criterion layer	关联度 Correlation degree					现状等级 Current level	变化趋势 Trend
		I	II	III	IV	V		
A	压力	-0.226	-0.046 *	-0.060 **	-0.428	-0.572	较低压力	中等压力
	状态	-0.331	0.130 *	-0.188 **	-0.354	-0.546	较好状态	中等状态
	响应	-0.485	-0.239 *	-0.394 **	-0.220	-0.326	较高响应	中等响应
	河流健康水平	-0.318	-0.036 *	-0.177 **	-0.357	-0.507	亚健康	中等
B	压力	-0.332	0.102 *	0.031 **	-0.356	-0.519	较低压力	中等压力
	状态	-0.141 *	-0.178	-0.253	-0.441	-0.601	好状态	—
	响应	0.217 *	-0.375	-0.556	-0.711	-0.783	高响应	—
	河流健康水平	-0.146 **	-0.095 *	-0.193	-0.464	-0.605	亚健康	健康
C	压力	-0.515	-0.280	-0.091 **	-0.032 *	-0.351	较高压力	中等压力
	状态	-0.401	-0.091 **	0.072 *	-0.200	-0.435	中等状态	较好状态
	响应	-0.085 **	0.107 *	-0.362	-0.575	-0.681	较高响应	高响应
	河流健康水平	-0.380	-0.132 **	-0.103 *	-0.210	-0.453	中等	亚健康
D	压力	-0.616	-0.474	-0.182	-0.159	-0.106 *	高压	—
	状态	-0.430	-0.186	-0.182 **	-0.046 *	-0.449	较差状态	中等状态
	响应	-0.420	-0.543	-0.403 **	-0.104 *	-0.474	较低响应	中等响应
	河流健康水平	-0.513	-0.401	-0.233 **	-0.111 *	-0.298	亚病态	中等
E	压力	-0.392	-0.012 *	-0.147 **	-0.139	-0.455	较低压力	中等压力
	状态	-0.469	-0.262	0.030 *	-0.120 **	-0.342	中等状态	较差状态
	响应	-0.275	-0.398	-0.188 **	-0.144 *	-0.477	较低响应	中等响应
	河流健康水平	-0.389	-0.179	-0.102 *	-0.134 **	-0.425	中等	亚病态
F	压力	-0.605	-0.474	-0.215	0.223 *	-0.212 **	较高压力	高压
	状态	-0.608	-0.501	-0.439	-0.226	-0.085 *	差状态	—
	响应	-0.592	-0.401	-0.430	-0.050 *	-0.089 **	较低响应	低响应
	河流健康水平	-0.603	-0.466	-0.334	0.021 *	-0.144 **	亚病态	病态

* 表示某一准则层及河流健康水平与某一等级的关联度最大,即该准则层及河流健康水平属于某一等级, ** 表示当前准则层及河流健康水平与该数字对应等级的关联度距离更近,准则层及河流健康水平有向该等级发展的趋势

4 讨论

4.1 河流健康水平的空间异质性

城市河流相较于自然河流,除了需要保有部分自然生态功能外,还要发挥一定的社会服务功能^[33-35],其通常会流经城市的不同功能区域,如公园绿地、居民区、商业区等,这使得城市河流沿程周边的土地利用类型呈现出显著的差异性,影响各区域河段的污染负荷输入量及滨水景观格局。同时,为满足不同区域内河流相应服务功能的发挥,人类往往会根据区域功能定位对河流的物理形态进行一定程度的人为干预,如截弯取直、河道拓宽、岸坡衬砌^[29]等,使得城市河流自身的形态结构沿程发生较大的变化,这两方面原因使得城市河流在不同河

段的生态系统特征呈现一定的差异,进而导致河流健康水平的空间异质性。本研究中,河段 A、B 作为城市景观河段,主要处在公园绿地内,河岸带自然程度较好,能够截留一部分降雨径流冲刷过程中的污染负荷,降低入河污染负荷量,其健康水平相对较高;而采用硬质护岸的河段(如河段 D、F),往往处于人类活动较为频繁的商业区或居民区,存在较大的面源污染,在降雨期间污染物易直接冲刷入河,造成较大的外源污染,使得河段压力水平较高,难以维持较好的状态,整体健康水平较低;即使针对这些河段采取了一定的生态措施(曝气复氧、生态浮床等),但不注意控制外部点面源污染的输入,使得污染负荷入河量远高于生态修复措施对河段污染物的削减量(如河段 F),其健康水平仍然难以得到进一步改善,导致显著的河段健康水平差异。

4.2 河流健康评价方法适用性

自然河流中,不同生境的生物群落组成往往具有明显差异性^[36],但城市河流在人类活动的干扰下,其水文特征、渠化、底泥等环境因子的改变使得河流生境的复杂性和异质性降低,不同生境中生物群落组成的相似性明显增加^[37],虽然可以基于指示生物物种确定河流健康水平,但难以辨别河流健康水平的空间差异性。因此,本研究根据西北护城河周边的土地利用类型(例如公园绿地各居民小区的分界处)、河流物理形态(例如河宽即河流形状突变处)以及城市管网分布进行河段的划分;基于 PSR 框架筛选河段尺度指标构建了城市河流健康综合评价体系,考虑了人类活动对河流健康状态的正负面影响,指标分类明确,能够较为全面的描述城市河流的综合健康状态,适用于人类活动和自然过程相互作用强烈的城市河流。利用常规的模糊综合评价法^[38]、集对分析法^[39]以及灰色关联度分析法^[40]等方法确定河流健康等级时,仅能获得单次评价结果,无法进行河流未来健康状态的预测,而物元可拓模型根据河流健康水平隶属于某一等级的综合关联度与其相邻等级综合关联度的距离,除了可以确定当前河流所处的健康状态,还可以预测下一阶段河流健康水平以及各项指标的发展趋势。为管理者下一阶段城市河流的针对性管理和保护提供科学的指导。

4.3 河段健康水平的变化趋势及改善措施

根据河段准则层及健康水平关联度与相邻水平关联度的距离,可以看出河段 B、C、D 的健康水平有向更优等级发展的趋势,而河段 A、E、F 的健康水平有恶化的趋势。尽管河段 D 有向更优等级发展的趋势,但其现状健康水平接近病态,宜针对河段 D 纳污量低、污染物易沉积的情况,进行定期的河底清淤,减少内源污染。河段 A 整体上有恶化的趋势,但当前健康水平较高,为亚健康水平,保持或进一步降低当前压力输入水平及提高响应级别即可使河段 A 维持在理想的水平。合理的生态治理措施可以缓解河流的压力,改善河流的状态,最终达到提高河流健康水平的目的。从表 5 中可以看出,河段 C、F 当前压力均处于较高及以上水平,但河段 C 由于采取了较高的响应措施,河段状态水平维持在中等,最终健康水平也为中等。因此,针对河段 F 应重点排查沿河排污口设置情况,坚决取缔非法排污口,减小点源污染,同时建立完善的雨污分流系统,避免

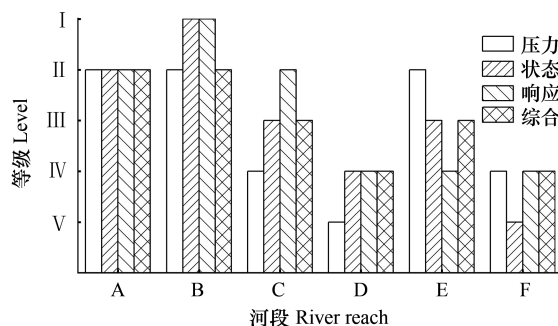


图 2 各河段准则层及综合健康等级

Fig.2 Criteria levels and comprehensive health levels of each river reach

等级 I—V 分别代表健康、亚健康、中等、亚健康、病态

降雨径流过程将大量污染物冲刷入河,增加河段压力。河段 E 的健康水平呈现出由当前中等水平向亚病态过渡的趋势,虽然响应措施向更优发展,但河段压力水平却在恶化,结合准则层权重来看,压力准则层权重最大,对河流健康水平的影响也最大,应加强生态治理措施,设立合理的河道控制红线,在控制红线内适当拓宽河岸带,多设置人工生态护岸,增加水-空气-植被-土壤之间的交互作用,为动植物提供栖息生境,增加生物多样性,以更高的响应能力抵消压力增大对河流健康的影响,改善河段 F 健康水平。同时,严抓对应河流各级河长的考核工作,保证河湖长制的长效性,也是促进城市河流生态健康改善与恢复的重要措施。

5 结论

(1) 根据 PSR 模型构建的西北护城河健康评价体系包含压力指标、状态指标和响应指标 3 个方面,涵盖 COD_{Mn} 排放量、岸坡自然程度、水质等级等 12 个指标,3 类指标的权重排序为压力指标>状态指标>响应指标。

(2) 西北护城河 6 个河段的健康水平存在明显的差异,河段 A、B 为亚健康水平、河段 C、E 为中等水平,河段 D、F 为亚病态水平;各河段生态系统组成要素的区别与其健康水平的差异有较大的关联性,流经公园绿地的河段健康水平较高,流经居民区的河段健康水平相对较低,从趋势变化上来看,河段 B、C、D 的健康水平有向更优等级发展的趋势,而河段 A、E、F 的健康水平有恶化的趋势。

(3) 本研究基于 PSR 模型构建评价指标体系,结合熵权法和物元可拓模型,能够对不同河段的外界压力程度、系统状态以及响应决策能力进行分级评估,考虑了人类修复措施对河流健康水平的影响,能较为准确全面的评价各河段当前健康水平并判断其变化趋势。

参考文献 (References):

- [1] 夏霆,朱伟,姜谋余,赵联芳.城市河流栖息地评价方法与应用.环境科学学报,2007,27(12):2095-2104.
- [2] 吴一帆,张璇,李冲,郝芳华,殷国栋.生态修复措施对流域生态系统服务功能的提升——以潮河流域为例.生态学报,2020,40(15):5168-5178.
- [3] 黄亮亮,吴志强,蒋科,佐藤辰郎,鹿野雄一,李建华.东苕溪鱼类生物完整性评价河流健康体系的构建与应用.中国环境科学,2013,33(7):1280-1289.
- [4] 刘园园,阿依巧丽,张森瑞,吴兴蓉,万彬娜,张小萍,曾波.着生藻类和浮游藻类在三峡库区河流健康评价中的适宜性比较研究.生态学报,2020,40(11):3833-3843.
- [5] 苏瑶,许育新,安文浩,王云龙,何振超,楼颖雯,沈阿林.基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价.环境科学,2019,40(3):1270-1279.
- [6] Lu W W, Xu C, Wu J, Cheng S P. Ecological effect assessment based on the DPSIR model of a polluted urban river during restoration: a case study of the Nanfei River, China. Ecological Indicators, 2019, 96: 146-152.
- [7] 高永胜,王浩,王芳.河流健康生命评价指标体系的构建.水科学进展,2007,18(2):252-257.
- [8] Deng X J, Xu Y P, Han L F, Yu Z H, Yang M N, Pan G B. Assessment of river health based on an improved entropy-based fuzzy matter-element model in the Taihu Plain, China. Ecological Indicators, 2015, 57: 85-95.
- [9] 廖迎娣,张欢,侯利军,陈达.江苏长江岸线生态修复评价指标体系研究.生态学报,2021,41(10):3910-3916.
- [10] 孙然好,魏琳沅,张海萍,陈利顶.河流生态系统健康研究现状与展望——基于文献计量研究.生态学报,2020,40(10):3526-3536.
- [11] Rapport D J, Singh A. An EcoHealth-based framework for State of Environment. Ecological Indicators, 2006, 6(2):409-428.
- [12] 许文杰,曹升乐.基于 PSR-熵权综合健康指数法的城市湖泊生态系统健康评价.水文,2010,30(5):64-68.
- [13] 彭涛,王珍,赵乔,郭倩.基于压力-状态-响应模型的黄柏河生态系统健康评价.水资源保护,2016,32(5):141-145.
- [14] Zhao Y W, Zhou L Q, Dong B Q, Dai C. Health assessment for urban rivers based on the pressure, state and response framework—a case study of the Shiwuli River. Ecological Indicators, 2019, 99: 324-331.
- [15] 于志慧,许有鹏,张媛,邓晓军.基于熵权物元模型的城市化地区河流健康评价分析——以湖州市区不同城市化水平下的河流为例.环境科学学报,2014,34(12):3188-3193.
- [16] 蔡文,杨春燕.可拓学的基础理论与方法体系.科学通报,2013,58(13):1190-1199.
- [17] Cai A L, Wang J, MacLachlan I, Zhu L K. Modeling the trade-offs between urban development and ecological process based on landscape multi-functionality and regional ecological networks. Journal of Environmental Planning and Management, 2020, 63(13): 2357-2379.

- [18] 张纵, 施侠, 徐晓清. 城市河流景观整治中的类自然化形态探析. 浙江林学院学报, 2006, 23(2): 202-206.
- [19] 水利部水文局. SL395-2007 地表水资源质量评价技术规程. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [20] 杨迪虎. 新安江流域安徽省地区水环境状况分析. 水资源保护, 2006, 22(5): 77-80.
- [21] 国家环境保护总局科技标准司. GB 3838-2002 地表水环境质量标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [22] 宋梓菡, 崔嵩, 付强, 高青峰, 李昆阳, 高尚, 赵延超, 贾朝阳. 哈尔滨市主城区河流污染物入河量初步估算与来源分析. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 134-144.
- [23] 江苏省水利厅. DB32/T 3674-2019 生态河湖状况评价规范. 南京: 江苏省水利厅, 2019.
- [24] 梁开明, 章家恩, 赵本良, 叶延琼, 孔旭晖. 河流生态护岸研究进展综述. 热带地理, 2014, 34(1): 116-122, 129-129.
- [25] 张翼飞, 于崧, 鲁萍, 车代弟. RAGA-PPE 模型在城市滨水绿地景观效果评价中的应用. 中国农学通报, 2010, 26(16): 199-205.
- [26] 张远, 郑丙辉, 刘鸿亮, 王西琴. 深圳典型河流生态系统健康指标及评价. 水资源保护, 2006, 22(5): 13-17, 52-52.
- [27] 潘宝, 王晓辉, 王秀, 周春财, 刘桂建. 南淝河主要水体污染物空间分布特征与污染源解析. 安徽农业科学, 2017, 45(13): 41-43, 75-75.
- [28] 邓晓军, 许有鹏, 翟禄新, 刘娅, 李艺. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用. 生态学报, 2014, 34(4): 993-1001.
- [29] 王琦, 高晓奇, 杨红军, 徐杉, 吕凤春, 刘高慧, 肖能文. 滇池沉水植物分布区域水环境现状与健康评价. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1392-1402.
- [30] 杨春燕, 汤龙. 不相容问题求解的理论、方法与系统研究. 智能系统学报, 2016, 11(6): 799-806.
- [31] 姜跃. 基于可拓理论的不相容问题的求解初探. 云南民族大学学报: 自然科学版, 2011, 20(2): 129-131.
- [32] Yao S Y, Li X Y, Liu C L, Yuan D Y, Zhu L H, Ma X Y, Yu J, Wang G, Kuang W M. Quantitative assessment of impact of the proposed Poyang Lake hydraulic project (China) on the habitat suitability of migratory birds. Water, 2019, 11(8): 1639.
- [33] 刘婷婷, 孔越, 吴叶, 祝凌云, 张大红. 基于熵权模糊物元模型的我国省域森林生态安全研究. 生态学报, 2017, 37(15): 4946-4955.
- [34] 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.
- [35] 赵新华, 赵胜跃, 张信阳, 王海霞. 景观河流(津河)水质变化的研究与控制. 天津大学学报, 2005, 38(9): 824-829.
- [36] McKinney M L. Urbanization, biodiversity, and conservation; the impacts of urbanization on native species are poorly studied, but educating a highly urbanized human population about these impacts can greatly improve species conservation in all ecosystems. BioScience, 2002, 52(10): 883-890.
- [37] 王强, 庞旭, 王志坚, 袁兴中, 张耀光. 城市化对河流大型底栖动物群落的影响研究进展. 生态学报, 2017, 37(18): 6275-6288.
- [38] 王慧杰, 毕粉粉, 董战峰. 基于 AHP-模糊综合评价法的新安江流域生态补偿政策绩效评估. 生态学报, 2020, 40(20): 7493-7506.
- [39] 孟宪萌, 胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用. 水利学报, 2009, 40(3): 257-262.
- [40] 张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强. 春季盘溪河水质日变化规律及水质评价. 环境科学, 2012, 33(4): 1114-1121.