

基于韧性理念的城市河流健康评价

——以郑州市金水河为例

张宇帆, 朱莹莹, 陈奕洁, 田国行

(河南农业大学 风景园林与艺术学院, 河南 郑州 450002)

摘要: [目的] 在韧性理念指导下对郑州市金水河健康水平进行评价, 为金水河修复与科学管理提供理论依据。[方法] 以郑州市金水河为例基于压力—状态—响应模型(简称 PSR), 构建城市河流健康评价指标体系, 采用组合赋权法和物元可拓模型对河流健康水平与发展趋势进行评价与预测。构建城市化—河流健康响应模型, 分析城市化对城市河流健康的影响。[结果] 研究区的河流健康水平呈现明显的空间差异性, 河段 1, 3, 6, 7, 8, 11, 14 的健康等级为健康、亚病态、亚病态、病态、亚健康、亚病态、健康(河段编号从河口向上游依次变大), 其中位于新城区的河段健康水平较老城区高, 河段 1, 3, 8, 14 健康水平有进一步恶化的趋势, 而河段 6, 7, 11 的健康水平有向好发展的趋势; 城市化水平(城市流域不透水面积比, ISC)对于河流健康水平产生显著影响的阈值在 50% 左右。[结论] 研究区各河段健康水平在周边城市环境的影响下存在明显的空间差异, 城市河流的健康水平与城市化水平密切相关, 在对城市河流保护与修复时应加强城市规划的科学性以促进水城共融。

关键词: 韧性理念; 城市河流健康评价; PSR; 物元可拓模型; 城市化响应; 金水河; 郑州市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)06-0238-09

中图分类号: S732, TV213.4

文献参数: 张宇帆, 朱莹莹, 陈奕洁, 等. 基于韧性理念的城市河流健康评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 238-246. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220929.004; Zhang Yufan, Zhu Yingying, Chen Yijie, et al. Urban river health assessment based on concept of resilience [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 238-246.

Urban River Health Assessment Based on Concept of Resilience

—Taking Jinshui River in Zhengzhou City as a Case Study

Zhang Yufan, Zhu Yingying, Chen Yijie, Tian Guohang

(College of Landscape Architecture and Art, He'nan Agricultural University, Zhengzhou, He'nan 450002, China)

Abstract: [Objective] The health level of the Jinshui River in Zhengzhou City was evaluated by using the concept of resilience in order to provide a theory basis for the restoration and scientific management of the Jinshui River. [Methods] Based on a pressure-state-response model (PSR), an urban river health evaluation index system was constructed for the Jinshui River in Zhengzhou City. The combined weighting method and a matter-element extension model were used to evaluate river health and to forecast development trends. An urbanization-river health response model was constructed to analyze the impact of urbanization on urban river health. [Results] The river health levels in the study area showed obvious spatial variability, and the health levels of reaches 1, 3, 6, 7, 8, 11, and 14 were healthy, sub-illness, sub-illness, illness, sub-healthy, sub-illness, and healthy (the reach number increased from the estuary to the upstream positions). The health levels of the river reaches that were located in the new urban area were higher than those located in the old urban area. The health level of reaches 1, 3, 8, and 14 had a tendency for further deterioration, while the health levels of reaches 6, 7, and 11 had a tendency for further improvement. The threshold for the level of urbanization (impervious area ratio in urban watersheds, ISC) that would have a significant effect on river

收稿日期: 2022-05-30

修回日期: 2022-08-11

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“基于空间博弈的中原城市绿地空间演变机制与结构调控研究”(51808198); 河南省城乡绿地资源调控与景观生态设计学科创新引智基地项目(GXJD006); 河南省高等学校重点科研项目(18A220003)

第一作者: 张宇帆(1998—), 女(汉族), 河南省洛阳市人, 硕士研究生, 研究方向为城乡绿地资源调控。Email: m15660636035@163.com。

通讯作者: 田国行(1964—), 男(汉族), 河南省封丘县人, 博士, 博士生导师, 主要从事城乡绿地资源调控方面的研究。Email: tgh0810@163.com。

health was around 50%. [Conclusion] There were obvious spatial differences in the health level of each river section in the study area due to the influence of the surrounding urban environment. The health of urban rivers was closely related to the level of urbanization. Therefore, urban planning research should be strengthened to protect and restore urban rivers, thereby promoting water-city integration.

Keywords: resilience concept; urban river health assessment; PSR model; matter-element extension model; urbanization response; Jinshui River; Zhengzhou City

高密度、高速度、高高度、大尺度的城市化发展给人类生活带来了极大的便利,但也带来了许多挑战,人口压力、极端天气、公共卫生事件等切实影响着城市的兴衰,可以说当下城市对抗风险的韧性对城市的存亡起着决定性作用,城市河流作为城市生态系统的重要组成,其健康状态制约着韧性城市建设水平^[1-2]。当前,流经城市的河流都面临着城市建设用地扩张河流污染加剧,城市下垫面改变引起河道行洪压力增加,河流渠化阻断河流与周边环境的物质能量交换等几乎相似的问题^[3-4],城市河流功能几近丧失。如何对城市河流进行修复与维护,恢复城市河流的健康成为了研究热点。城市河流健康评价作为开展河流修复与管理的前提,能够为城市河流保护、管理与利用提供决策支持。河流健康是人类期望下河流的理想状态。随着人类社会的发展与相关研究的深入,以纯自然的河流作为评价城市河流健康的标准已经不能适应当前城市内河流所具有的社会属性,无法科学地指导决策^[5]。“韧性”指遭受影响干扰后恢复原状的能力,韧性理念引入城市河流相关研究中可被解释为城市河流受干扰后自我调节的能力,其可以从生态、安全、社会3个方面定义^[6]。将韧性理念引入对城市河流的研究中,有助于建立适应不同功能的河流管理模式,提升城市的抗风险能力,在极端天气状况频发的当下具有重要的现实意义。国外对于河流健康的评价开始于20世纪70年代,到20世纪90年代已经建立了澳大利亚溪流状况指数法^[7],美国的快速生物评价协议,英国河流保护评价等^[8]一些系列评价体系,以满足河流保护管理修复的需求。国内对于河流健康评价开始于2002年,唐涛^[9]引入河流生态系统评价的内容,随着国家生态文明建设战略的推进,众多学者对河流评价体系、标准和方法等开展了深入研究,赵彦伟、杨文慧、邓晓军等^[8-10]从水生态、物理结构、河岸带生态功能、社会服务、景观等多个方面构建了河流健康评价指标体系;并以国内大尺度的河流为例展开评价,王龙、赵鑫涯、刘晓燕等^[11-12]基于健康长江理念对长江和黄河的综合健康评价以及左其亭等^[13]对于淮河的评价。上述研究都为我国河流的治理提供了大量的科学支持,但从相关研究成果可以看出,河流健康评价指标选取多从河流自然属性以及人

类社会对于城市河流的压力方面入手,缺乏对人类正面影响的考量,从而使评价结果不全面,健康评价结果缺乏前瞻性,仅可对现状进行评判,难以预测河流健康状态的发展趋势;评价尺度较为集中,对于大尺度的自然河流评估体系已形成,而对于中小尺度的城市河流评价的文献相对较少。因此,在本次研究中引入人类积极措施对河流的影响,在结果评价时加入对未来发展趋势的预测,并考虑中小城市河流与大尺度河流的差别,使评价结果更加合理且对中小城市河流更有实际参考意义。PSR模型在20世纪70年代被提出,其可以准确描述外界压力、系统状态、响应策略三者的关系^[14],在构建城市河流评价体系时引入PSR模型,考虑人类积极措施对河流健康状态的影响,可以获得较为全面合理的城市河流评价结果。物元可拓模型在20世纪80年代提出,在解决不相容问题时具有较大优势,且可以判断物元的现状与发展趋势,在对河流健康水平进行判断时引入物元可拓模型,不仅可以确定河流健康水平等级的还能判断河流健康的发展趋势,相较于传统的评价方法,更加具有参考性^[15]。

在郑州市建设国家中心城市的大背景下,金水河作为郑州市唯一串联四大城市服务中心且串联新老城区的城市内河,不仅承载着郑州人民的记忆,也是郑州“中优”战略崛起的核心抓手,大尺度和高速度的城市化严重地破坏了金水河的健康,限制了金水河与其周边城市区域社会、经济、人文、生态的协调发展。基于以上分析本研究以郑州市金水河为对象,根据城市河流汇水区域以及河段周边现状选取样段,基于PSR模型以及组合赋权法构建评价指标体系,采用物元可拓模型进行河流健康评价与发展趋势预测,并分析河流健康水平对于城市化水平的响应,为韧性视角下的水城共融提供科学参考。

1 研究区域与数据获取

1.1 研究区概况

郑州市域内的金水河,发源于二七区侯寨乡,属单干型河流,属贾鲁河主要二级支流^[16],由西南向东北方向横穿市区,流经二七区、中原区、金水区和郑东新区,是郑州市唯一发源于市郊且贯穿新老城区的河

在着密切的关系^[18],因此用土地利用对地表水污染的影响程度表征河流的污染压力,滨水建筑体量作为河流生态环境的压力指标;安全压力主要来源于城市行洪排涝的安全需求,即河流汇水区域的径流量,因此利用河流汇水区的综合径流系数表征安全压力^[19];社会服务压力即周边人群的游憩需求,人口密度能够较好地描述人群游憩需求^[20],因此用人口密度表征社会服务需求压力。②状态指标描述各种因素长期作用于城市河流生态系统后,河流功能和特征所表现出来的状态,在不同的外界干扰下,河流的生态特征、行洪排涝功能与社会服务能力等都处于一定的状态,参考相关文献,选取了水质、水量、蜿蜒度、河岸坡度、河流阻塞程度以及游人满意度^[10,21-22]6项指标分别来描述河流生态韧性、安全韧性、社会韧性3个方面的状态。③响应指标描述人类对河流处于压力作用下的状态而采取的措施,城市河流主要由人工维护^[23],如为了维护河流生态环境进行的河岸带植被绿化、边坡自然化处理,为了提升河道行洪安全建设的堤防工程,为了提升河道社会服务能力建设的基础服务设施^[12,20,24],因此选取驳岸自然程度、河岸带植被覆盖、防洪功能完善度、基础设施完善度4个指标来表征人类对于河流问题的响应。

根据上述分析构建城市河流评价指标体系,指标及其计算方法等详见表1。

2.2 组合赋权法确定指标权重

2.2.1 数据标准化处理 对原始数据进行标准化处

理,消除指标间不同量纲的影响^[20]。

正向指标: $X_{ij} = (x_{ij} - x_{j\max}) / (x_{j\max} - x_{j\min})$ (1)

负向指标: $X_{ij} = (x_{j\max} - x_{ij}) / (x_{j\max} - x_{j\min})$ (2)

式中: X_{ij} 为标准化处理后的数据值; x_{ij} 为评价系统中指标的初始值; $x_{j\max}$, $x_{j\min}$ 分别为样本数据的最大值与最小值。

2.2.2 综合权重计算 本研究选取内置权重与用户权重相结合的综合赋权方法,其中内置权重指主观权重;用户权重指客观权重。

主观权重的确定采用层次分析法,根据20位水利和风景园林学专业的老师以及研究生对评价指标的重要性进行打分与综合排序,在排序的基础上利用YAAHP软件结合层次分析法计算指标权重,并将结果通过一致性检验。

客观权重的确定采用熵权法,其是根据指标数据本身包含的信息量确定指标权重的方法,依据信息论的基本原理,使用信息熵法表征各指标的差异程度,指标的熵值越小,对目标的重要性越大^[12]。将所有指标对应的数据导入SPSS软件中,结合熵权法获取指标权重。

综合考虑主客观因素,结合内置权重与用户权重计算,指标综合权重,计算公式为:

$$\lambda_i = \frac{\sqrt{\theta_i \cdot \omega_i}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\theta_i \cdot \omega_i}}$$
 (3)

式中: λ_i 为各指标综合权重; θ_i 为内置权重由层次分析法确定; ω_i 为用户权重由熵权法确定。

表 1 城市河流健康评价指标体系

目标层	准则层	权重	指标层	内置权重	用户权重	综合权重	计算方法	主要来源
城市河流健康	压力	0.337	污染系数	0.188	0.068	0.135	土地利用比例*污染影响度	2020年资源3号卫星影像
			人口密度	0.039	0.078	0.062	各河段汇水区单位土地面积的人口数量	第七次人口普查数据
			河岸带建筑体量	0.018	0.060	0.037	建筑高度/建筑到水面距离	实地调研
			滨河城区径流量	0.087	0.089	0.103	河段汇水区综合径流系数	SWMM软件模拟
	状态	0.339	水质	0.159	0.050	0.104	以水面通透度衡量并分级赋值量化	实地调研
			水量	0.016	0.046	0.030	常水面宽度/河槽宽度	影像提取
			河流蜿蜒度	0.024	0.061	0.042	河段实际长度与其直线距离的比值	影像提取
			河道阻塞程度	0.079	0.047	0.069	阻塞河段长度/河段实际长度	实地调研
			河岸坡度	0.047	0.068	0.063	根据实地调研结合分级赋值量化	实地调研
			游人满意度	0.008	0.090	0.030	根据公众对于河流景观的总体认可程度进行分级赋值量化	实地调研
	响应	0.325	驳岸自然程度	0.026	0.173	0.076	自然驳岸河段长度/河段实际长度	实地调研
			河岸带植被覆盖率	0.031	0.052	0.045	河岸带植被覆盖面积/河岸带面积	影像提取
			防洪能力	0.201	0.058	0.128	参考《防洪标准(GB50201-94)》对河段防洪能力进行分级赋值量化	《郑州市防洪规划总体报告》
			基础设施完善度	0.075	0.060	0.076	基础设施服务覆盖长度/河段实际长度	《金水河综合整治工程》

2.3 评价标准

结合本研究所提出的城市河流健康内涵,将目标

层的河流健康水平划分为5个等级,1(健康),2(亚健康),3(中等),4(亚病态),5(病态)^[23];1,2,3,4,5分

别对应压力准则层的低压力、较低压力、中等压力、较高压力以及高压力,状态准则层分为好状态、较好状态、中等状态、较差状态、差状态,响应准则层分为高响应能力、较高响应能力、中等响应能力、较低响应能力、低响应能力。各等级的范围值按照前述研究并结合金水河实际情况制定,具体详见表 2。

表 2 河流健康指标评价标准

目标层	指标层	评价角度	健康	亚健康	中等	亚病态	病态	取值范围	依据
城市河流健康	污染系数	生态	0~0.8	0.8~1.1	1.1~1.5	1.5~1.8	1.8~3	0~3	罗坤 ^[25]
	人口密度/(人·km ⁻²)	社会	0~5 000	5 000~8 000	8 000~1.2×10 ⁴	1.2×10 ⁴ ~1.8×10 ⁴	1.8×10 ⁴ ~2.5×10 ⁴	0~2.5×10 ⁴	肖希等 ^[24]
	河岸带建筑体量	生态	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~2	0~2	M, Augusta Hermida ^[26]
	滨河城区径流量	安全	0~0.3	0.3~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~1	0~1	《室外排水设计规范》
	水质	生态	4~5	3~4	2~3	1~2	0~1	1~5	李杰等 ^[17]
	水量/%	生态	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2	0~1	李杰等 ^[17]
	河流蜿蜒度	生态	2~3	1.5~2	1.2~1.5	1~1.2	0~1	0~3	温存等 ^[21]
	河道阻塞程度/%	安全	0~0.01	0.01~0.1	0.1~0.3	0.3~0.5	0.5~1	0~1	罗坤等 ^[25]
	河岸坡度	安全	4~5	3~4	2~3	1~2	0~1	1~5	谢依涵等 ^[23]
	游人满意度	社会	4~5	3~4	2~3	1~2	0~1	1~5	侯佳明等 ^[27]
	驳岸自然程度/%	生态	0.99~1	0.75~0.99	0.5~0.75	0.25~0.5	0~0.25	0~1	谢依涵等 ^[23]
	河岸带植被覆盖率/%	生态	0.9~1	0.7~0.9	0.4~0.7	0.2~0.4	0~0.2	0~1	李杰等 ^[17]
	防洪能力	安全	4~5	3~4	2~3	1~2	0~1	1~5	《国家防洪标准》
	基础设施完善度	社会	1~2	0.8~1	0.5~0.8	0.2~0.5	0~0.2	0~2	《城市环卫设施设置标准》

2.4 物元法评价方法

对于事件的评价来说,选取的参考要素越多,评价就越全面,但在实际的操作过程中一些参考要素的获取存在限制,当前参考的有限内容并不能对事件进行全面的描述,现存条件无法达到要实现的评价目标时,即可称为不相容问题,物元可拓模型在解决不相容的复杂问题时具有较大优势,由于河流的评价参考指标广泛且获取不易,因此在本研究中引入物元可拓模型,对河流健康进行评价。

(1) 河流健康物元矩阵、经典域以及节域的构建。物元是描述事物的名称、特征及量值 3 个基本元素的简称^[28],本次研究的事物为河流的健康水平,即 T ;河流健康水平的评价指标即为事物 T 的特征,记为 F ;评价指标处于特定等级时对应的量即为特征 F 的量值,记为 M ,则 $R=(T, F, M)$ 为物元矩阵。

在对事物进行评价时一般都有多个特征 $F(f_1, f_2, f_3, f_4, \cdots, f_n)$ 以及对应的量值 $M(m_1, m_2, m_3, m_4, \cdots, m_n)$,此时物元矩阵 R 可以表示为:

$$R=(T, F, M)=\begin{bmatrix} T & f_1 & m_1 \\ & \vdots & \vdots \\ & f_n & m_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

经典域表示待评价的对象特征 F 处于各等级时对应的取值范围,根据研究所制定的评价标准即可确定相应的经典物元,表示如下:

$$\begin{aligned} R_0 &= (T_j, F_i, M_{ij}) = \begin{bmatrix} T_j & f_1 & m_{1j} \\ & \vdots & \vdots \\ & f_n & m_{nj} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} T_j & f_1 & (a_1, b_1) \\ & \vdots & \vdots \\ & f_n & (a_n, b_n) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: R_0 为经典域; T_j 为河流健康等级的第 j 个等级; F_i 为评价指标; M_{ij} 为指标 F_i 对应等级 j 时的取值范围,即第 j 个等级经典域的取值范围; a_n, b_n 分别为最小与最大值所对应的数值。

节域表示待评价事物对应特征 F 的所有数据范围,由特征相应的数值范围适当拓展可确定相应的节域矩阵物元:

$$\begin{aligned} R_p &= (T, F_i, M_{ip}) = \begin{bmatrix} T & f_1 & m_{1p} \\ & \vdots & \vdots \\ & f_n & m_{np} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} T & f_1 & (a_{1p}, b_{1p}) \\ & \vdots & \vdots \\ & f_n & (a_{np}, b_{np}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: R_p 为节域; F_i 为评价指标; M_{ip} 为指标 F_i 所有数值的范围,即节域的取值范围; a_{np}, b_{np} 分别表示各个指标的最小与最大值所对应的数值。

(2) 关联函数计算。模式识别是根据指标的量值符合要求的水平来表达的,关联函数可将这种符合程度量化^[15],可以用来表示指标所属的等级, $K_i(v_j)$ 表示第

i 个指标属于第 j 个等级的关联度,计算公式为:

$$K_i(v_j)=\begin{cases} \frac{\rho(v_i,v_{0ji})}{|v_{0ji}|} & (\text{当 } v_i \in v_{0ji} \text{ 时}) \\ \frac{\rho(v_i,v_{0ji})}{\rho(v_i,v_{pi})-\rho(v_i,v_{0ji})} & (\text{当 } v_i \notin v_{0ji} \text{ 时}) \end{cases} \tag{6}$$

式中: (v_i,v_{0ji}) 、 (v_i,v_{pi}) 分别为点 v_i 与经典域和节域的距离; v_i 为待评价事物的量值; v_{0ji} 为经典域的量值范围; v_{pi} 为节域的量值范围。

(3) 综合关联度计算与判别准则。根据最大关联度原则,待评价事物隶属于综合关联度最大的等级^[29],趋势等级为距离现状等级距离最小的等级,待评价事物 T 关于等级 j 的综合关联度计算方法为:

$$K_j(T_x)=\sum_{i=1}^m\lambda_iK_j(v_i) \tag{7}$$

表 3 各河段指标现状值及其对应等级

指标层	河段 1		河段 3		河段 6		河段 7		河段 8		河段 11		河段 14	
	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	现状值	等级
污染系数	0.834	2	1.715	4	1.585	4	1.648	4	1.484	3	1.172	3	0.985	2
人口密度	6 912	2	2.064×10 ⁴	5	1.807×10 ⁴	5	1.760×10 ⁴	4	2.080×10 ⁴	5	6 281	2	1 482	1
河岸带建筑体量	0.184	1	0.400	3	0.454	3	0.746	4	0.339	2	0.717	4	0.059	1
滨河城区径流量	0.514	3	0.857	5	0.847	5	0.860	5	0.817	5	0.623	4	0.436	2
水质	5	1	4	2	2	4	1	5	5	1	5	1	5	1
水量	1.000	1	0.725	2	0.672	2	0.660	2	0.615	2	0.837	1	0.095	5
河流蜿蜒度	1.000	5	1.067	4	1.122	4	1.026	4	1.124	4	1.096	4	1.260	3
河道阻塞程度	0.114	3	0.032	2	0.105	3	0.201	3	0.043	2	0.069	2	0.020	2
河岸坡度	4	2	2	4	2	4	3	3	3	3	4	2	5	1
游人满意度	5	1	1	5	3	3	1	5	1	5	2	4	5	1
驳岸自然程度	0.000	5	0.000	5	0.000	5	0.000	5	0.000	5	0.100	5	1.000	1
河岸带植被覆盖率	0.829	2	0.923	1	0.738	2	0.725	2	0.923	1	0.630	3	0.910	1
防洪能力	5	1	2	4	3	3	1	5	4	2	2	4	2	4
基础设施完善度	1.426	1	1.503	1	1.295	1	0.886	2	0.788	3	0.303	4	0.230	4

3.2 河段准则层及综合等级

根据单项指标的评价结果,利用物元可拓模型确定河段对不同健康等级的关联度,以最大关联度为原则,确定各河段综合健康水平与发展趋势。由表 4,图 2 可知在河流综合健康等级方面河段 1,14 处于健康等

式中: $K_j(T_x)$ 表示待评价事物 T_x 关于等级 j 的关联系数; λ_i 为各指标综合权重; $K_i(v_j)$ 表示第 i 个指标与第 j 个等级的关联度。

3 结果与分析

3.1 河段指标层现状值及对应等级

利用基础数据,根据各指标的计算方法计算指标现状值,并判断其所处的等级。由表 3 可知,虽然所处位置的自然条件差异不大,但大多数指标的等级在不同河段仍然存在较大差异性。各河段处于 1,2 等级的指标所占比例分别为 85.71%,42.86%,50.00%,35.71%,64.29%,50.00%,78.57%。总体而言,河段 1,8,14 各指标状态较好,而河段 3,7 则较差。

级,河段 8 处于亚健康等级,河段 3,6,11 处于亚病态等级,河段 7 处于病态等级。在河流综合健康发展趋势方面河段 6,7,11 健康等级有进一步优化的趋势,河段 1,3,8,14 健康等级有恶化的趋势。同样由表 4 和图 2 可知各河段压力、状态、响应准则层的现状与发展趋势。

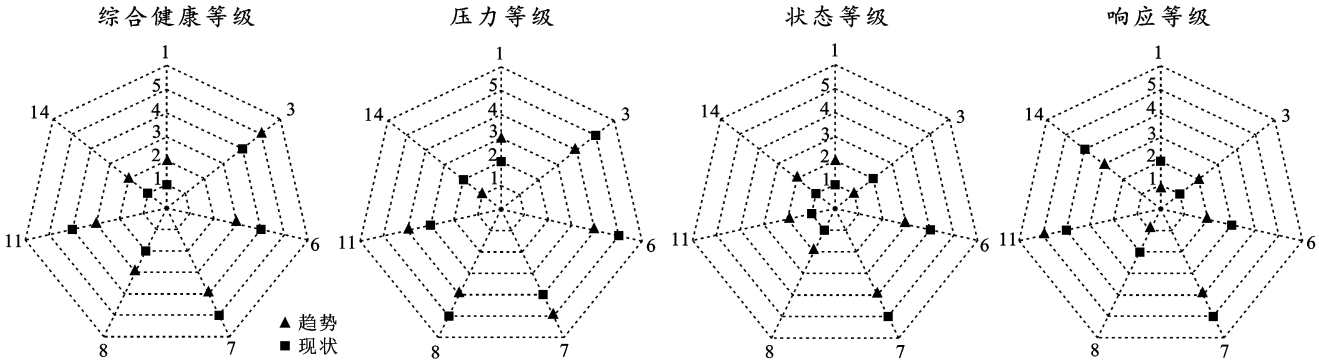


图 2 各河段准则层与综合健康评价等级及趋势图

表 4 各河段准则层及综合评价关联度计算结果

河段 编号	准则层	关联度				
		1	2	3	4	5
1	压 力	−0.662	0.054 *	−0.458	−0.734	−0.831
	状 态	−0.102 *	−0.929	−0.716	−0.893	−0.806
	响 应	0.004	0.010 *	−1.704	−1.220	−0.892
	河流健康水平	−0.256 *	−0.293	−0.950	−0.945	−0.842
3	压 力	−0.928	−0.886	−0.884	−0.401	−0.247 *
	状 态	−0.662	−0.147 *	−0.681	−0.398	−0.698
	响 应	−0.366 *	−0.844	−0.738	−0.409	−0.504
	河流健康水平	−0.655	−0.622	−0.768	−0.403 *	−0.483
6	压 力	−0.846	−0.773	−0.547	−0.208	−0.158 *
	状 态	−0.701	−0.464	−0.316	0.082 *	−0.623
	响 应	−0.483	−0.476	−0.238 *	−0.655	−0.548
	河流健康水平	−0.679	−0.572	−0.368	−0.255 *	−0.442
7	压 力	−0.934	−0.911	−0.809	−0.066 *	−0.265
	状 态	−0.873	−0.755	−0.331	−0.698	−0.246 *
	响 应	−0.753	−0.509	−0.685	−0.825	−0.043 *
	河流健康水平	−0.855	−0.727	−0.607	−0.526	−0.187 *
8	压 力	−0.802	−0.671	−0.443	−0.486	−0.107 *
	状 态	−0.316 *	−0.469	−0.500	−0.641	−0.691
	响 应	−0.660	−0.182 *	−0.756	−0.845	−0.652
	河流健康水平	−0.591	−0.444 *	−0.564	−0.655	−0.482
11	压 力	−0.546	−0.212	−0.097 *	−0.184	−0.562
	状 态	−0.180 *	−0.387	−0.631	−0.572	−0.805
	响 应	−0.842	−0.781	−0.458	−0.001 *	−0.313
	河流健康水平	−0.518	−0.456	−0.395	−0.256 *	−0.563
14	压 力	−0.439	−0.042	−0.772	−0.909	−0.937
	状 态	−0.125 *	−0.772	−0.849	−1.000	−0.871
	响 应	−0.502	−0.766	−0.729	−0.147 *	−0.734
	河流健康水平	−0.353 *	−0.524	−0.785	−0.692	−0.849

注：* 表示准则层以及河流健康水平与所处等级的关联度最大，属于该等级。

3.3 河流健康水平空间格局

城市河流除了需要具备自然河流的生态功能外，还需要具有一定的社会功能，因此在流经城市各区域时所受到的人类活动影响的差异较大，从而导致城市河流健康水平存在较大的空间差异性。本研究中河段健康水平同样存在较大的空间差异性，健康水平较高的河段 1,14 位于距离郑州市中心点较远的位置，紧邻城市公园，河岸植被覆盖良好，能够有效地吸收和拦截污染物，改善水质，提升河流系统的自我调节能力，综合健康水平较高。而距离郑州市中心点较近

严重，不仅难以削减面源污染而且也无法对于城市地表径流起到缓冲，河段所面临城市化压力较大，整体健康水平较差。河段 8 是唯一一个处于老城区，但综合健康评价为亚健康水平的河段，具体分析可以发现，河段 8 的响应能力处于较高水平，即虽然河流系统所受到的外界压力与其他老城区的河段处于相近水平，但由于人类采取了一定的措施，该段河流沿岸绿地覆盖较高，防洪能力较优，对于外界压力有一定的缓解作用，所以能够保持较好状态，整体河流健康水平较能够保持相对较高的水平。

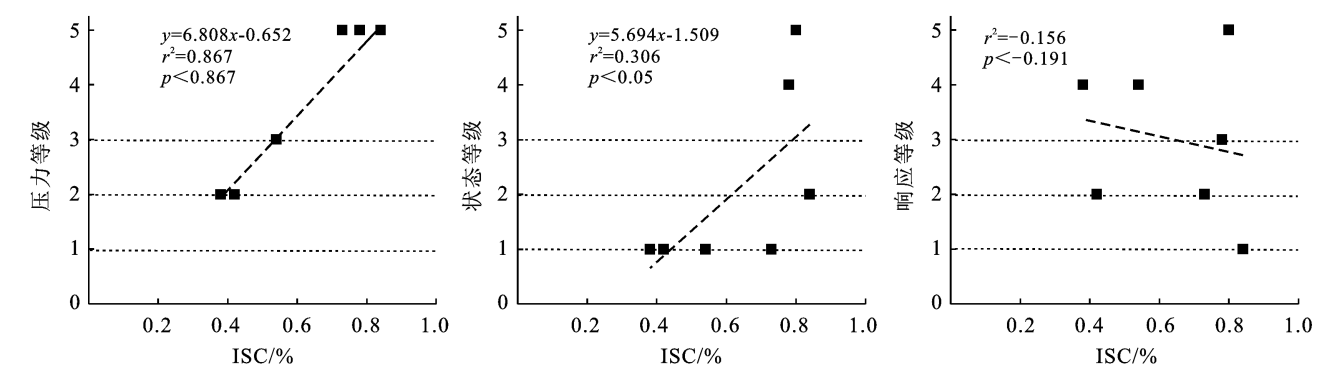
3.4 河流健康因素对城市化的响应分析

根据相关研究，流域城市化水平对河流健康水平与有较大影响^[25,30]，基于城市河流健康的准则层和综合评价结果，采用 ISC(不透水地面比例)指示城市流域城市化水平，分析河流健康因素对城市流域城市化

的相关性与响应规律,确定河流健康受损时 ISC 的阈值,为指导河流引导下的城市建设规划提供数据支持。

3.4.1 准则层对于城市化的响应 根据各准则层与城市化水平的相关分析与线性拟合结果(图 3),其中压力、状态准则层与城市化相关性显著($p<0.05$),对应的拟合模型为有效模型,说明城市化水平能对河流所受压力以及河流的状态进行有效的解释与预测,在所有有效模型中,ISC 对河段压力的解释量为 $R^2=0.833\ 19$,相较于状态拟合模型的 $R^2=0.306$ 解释效

果更好,这主要是由于面源污染系数,地表径流风险,ISC 都与土地利用状况有显著的相关性。当流域的 ISC 为 40%左右时压力开始由较低压力转变为中等压力,河流周边的城区开始对河流系统产生显著的压力输入;在 ISC 与河流状态的拟合模型中,城市流域的 ISC 增加会造成河流状态的恶化,城市流域对河流状态产生显著影响的阈值为 60%,相较于同类研究的阈值较高,可能是由于人类响应提升了城市河流系统的调节能力,使阈值变大,这对于科学管理与修复城市河流,提供了新思路。



注:图中 1,2,3,4,5 分别对应压力准则层中的低压力、较低压力、中等压力、较高压力以及高压力,状态准则层中的好状态、较好状态、中等状态、较差状态、差状态,响应准则层中的高响应能力、较高响应能力、中等响应能力、较低响应能力、低响应能力。ISC 为不透水地面比例。下同。

图 3 各准则层与对应城市流域城市化水平的线性拟合结果

3.4.2 河流综合健康度对于城市化的响应 结合评价结果利用 Origin 软件绘制河流健康等级—城市化水平线性拟合模型,可获得河流健康水平与城市化水平之间的线性关系(图 4)。根据拟合结果可知河流综合健康水平与城市流域的城市化水平也呈现了较好的线性拟合($p<0.05$ 两变量相关性显著, $R^2=0.457$,ISC 对河流健康水平的解释量为 0.457),进一步明确了当前城市化对于河流健康的负面影响。根据拟合结果可以判断,当城市化水平达到 40%时,城市化水平开始对河流健康水平产生影响,达到 50%时,河流的健康水平开始由亚健康状态变差,影响更为显著;在相关研究中,引起河流健康水平变化的阈值在 10%~30%的范围,而在本研究中,河流健康状态变差的阈值相较其他研究有所提升,在 30%~50%的范围时仍可维持亚健康状态,可能由于城市河流这个评价限定使得河流本底值远离了自然河流,另一方面,本研究引入了人类响应的因素,表明对于城市河流的维护和管理可以在一定程度上协调河流与城市化发展的冲突,达到城市与水共存的效果,说明科学指导下的城市河流维护和管理对于提升河流健康水平,增强城市韧性具有较为显著的作用。

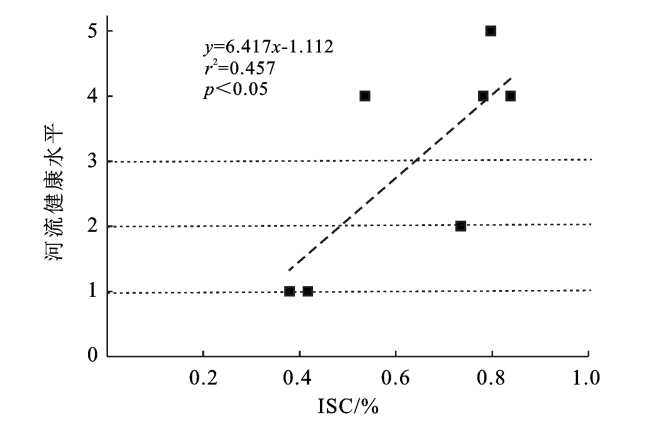


图 4 河流综合健康水平对流域城市化水平的线性拟合结果

3.5 河流健康的修复与管理策略

在精细化管理和韧性城市建设的大背景下城市河流的发展应主动适应人类社会的发展与需求,从粗放修复管理转向精细化管理的方式转变,通过评价精准识别城市河流中制约不同河段健康水平的关键因素与发展趋势,提升河流修复管理的精细化与时效性。基于金水河各河段健康评价结果,对处于病态、亚病态的河段 3,6,7,11 提出优化改进策略。河段 3 健康水平为亚健康,属于高压—较好状态—高响应类型,针对其所受外界压力较大的状况,需对滨河城

区的土地利用格局进行优化,降低河道行洪排涝压力,提升城市下垫面的渗透能力,同时对驳岸、河岸带进行软化,激活沿线的附属绿地,提升河流的韧性;河段 6 健康水平为亚病态,属于高压—较差状态—中等响应类型,在削减压力输入的同时,结合沿岸的人民公园设置生态驳岸构建绿地缓冲带,使人民公园与河流产生有机联系,发挥城市绿地对于城市河流的辅助功能,提升河流的响应能力与承载能力;河段 7 健康水平为病态,属于较高压力—差状态—低响应类型,考虑到河段 7 所处的区域空间狭小,结合防汛和生态需求,在对河段进行改造时使用人工结合自然的改造方法,将垂直与斜坡式护岸相结合,设置前硬后软的驳岸,在修复河流生态功能的同时兼顾安全要求,最终达到提升河段健康水平效果。河段 11 健康水平为亚病态,属于中等压力—好状态—较低响应类型,针对其驳岸硬化严重、防洪设施与基础服务设施欠缺的问题,应加强该段河流的人工治理,可将硬质驳岸转化为河流缓冲空间,在生态修复的同时提升其防洪能力,并完善沿河绿道基础设施建设与系统性,满足城市各类人群对公共休闲空间的需求。

4 讨论与结论

(1) 根据 PSR 模型构建的韧性理念下的城市河流评价体系包含压力、状态、响应 3 个方面,涵盖了生态韧性、安全韧性、社会韧性 3 个角度的 14 项指标,各准则层权重几乎相等。

(2) 本研究中 7 个典型河段的健康水平存在明显的空间差异,各河段的健康水平与其所对应的城市流域所输入的压力具有较大的关联性,流经建设强度大,居住区密集的河段健康水平较低,而河段周边建设强度小,紧邻大型城市绿地的健康水平高,从趋势上来看,河段 6,7,11 的健康水平有进一步优化的趋势,河段 1,3,8,14 健康水平有恶化的趋势。

(3) 城市化水平可以对河流压力输入和状态准则层进行有效的解释与预测,且对压力的解释能力更高;同时,根据河流综合健康程度对城市化水平的拟合结果,可以得知当城市化水平达到 50% 的阈值时,河流健康水平会受到显著影响。

(4) 本研究以前人研究为基础,在韧性理念指导下,引入 PSR 与物元可拓模型构建评价模型,提升了评价结果的全面性、准确性与前瞻性;河流健康水平与城市化水平响应模型的构建,确定了研究区城市化水平对河流健康影响的阈值,为韧性理念下城市蓝绿空间的精细化管理提供基础。

(5) 由于数据获取的季节性,本研究水文相关指

标仅以 9 月前后的数据为基础进行分析,可能对于水质、水量等季节性指标的评价具有局限性,下一步可以以河流季节变化为切入点,获取季节性的河流数据,评价不同季相下的河流健康程度,探索城市河流与季节变化的关系。

[参 考 文 献]

- [1] 赵雪雁,杜昱璇,李花,等.黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化[J].自然资源学报,2021,36(1):131-147.
- [2] 仇保兴.基于复杂适应系统理论的韧性城市设计方法及原则[J].城市发展研究,2018,25(10):1-3.
- [3] Kuang Wenhui. Evaluating impervious surface growth and its impacts on water environment in Beijing-Tianjin-Tangshan Metropolitan Area [J]. Journal of Geographical Sciences,2012,22(3):535-547.
- [4] 吴一帆,张璇,李冲,等.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[J].生态学报,2020,40(15):5168-5178.
- [5] Fennessy M S. Restoration of aquatic ecosystems: Science, technology, and public policy [J]. Ecological Engineering, 1993,2(2):159-161.
- [6] 陈竞姝.韧性城市理论下河流蓝绿空间融合策略研究[J].规划师,2020,36(14):5-10.
- [7] Ladson A R, White L J, Doolan J A, et al. Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia [J]. Freshwater Biology, 1999,41(2):453-468.
- [8] 高凡,蓝利,黄强.变化环境下河流健康评价研究进展[J].水利水电科技进展,2017,37(6):81-87.
- [9] 唐涛,蔡庆华,刘建康.河流生态系统健康及其评价[J].应用生态学报,2002,13(09):1191-1194.
- [10] 邓晓军,许有鹏,翟禄新,等.城市河流健康评价指标体系构建及其应用[J].生态学报,2014,34(4):993-1001.
- [11] 刘晓燕,张建中,张原锋.黄河健康生命的指标体系[J].地理学报,2006,61(5):451-460.
- [12] 李自明.基于多层次灰色聚类模型的河流健康综合评价研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [13] 左其亭,陈豪,张永勇.淮河中上游水生态健康影响因子及其健康评价[J].水利学报,2015,46(9):1019-1027.
- [14] 任建丽,金海龙,叶茂,等.基于 PSR 模型对艾比湖流域生态系统健康评价研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(2):37-41.
- [15] 李祚泳,蔺雷,邓新民.雹云识别的物元可拓模型及其效果检验[J].高原气象,2001(2):197-201.
- [16] 贺杰.郑州市城市可供水量与需水量平衡分析[D].河南郑州:华北水利水电大学,2007.
- [17] 李杰.城市化背景下郑州市河流景观廊道的时空演变与生态修复研究[D].河南 郑州:河南农业大学,2021.

(下转第 257 页)

[20] 夏品华,李秋华,林陶,等.贵州高原百花湖水水库湖沼学变量特征及环境效应[J].环境科学学报,2011,31(8):1660-1669.

[21] 杨莎莎,汤萃文,刘丽娟,等.流域尺度上河流水质与土地利用的关系[J].应用生态学报,2013,24(7):1953-1961.

[22] 朱源,吴雅玲,张磊.政府推动的环境共治格局的创建:贵阳市“两湖一库”饮用水源地的环境共治实践与启示[J].中国人口·资源与环境,2012,22(S1):24-28.

[23] 蒋啸,周旭,肖杨,等.面向湖泊生态系统健康维护的生态管控分区研究:以红枫湖流域为例[J].生态学报,2021,41(7):2571-2581.

[24] 王雨春,朱俊,马梅,尹澄清,刘丛强.西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化[J].湖泊科学,2005,17(1):54-60.

[25] 张红,陈敬安,王敬富,等.贵州红枫湖底泥磷释放的模拟实验研究[J].地球与环境,2015,43(2):243-251.

[26] 夏品华,孔祥量,喻理飞.草海湿地小流域土地利用与景观格局对氮、磷输出的影响[J].环境科学学报,2016,36(8):2983-2989.

[27] Ding Jiao, Jiang Yuan, Liu Qi, et al. Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River Basin, China: A multi-scale analysis [J]. Science of the Total Environment, 2016, 551/552:205-216.

[28] 彭勃,付永胜,赵君凤,等.小流域土地利用景观格局对水质的影响[J].生态科学,2019,38(3):90-99.

[29] Bu Hongmei, Song Xianfang, Xia Jun. The hydrogen and oxygen isotopic compositions of precipitation in a forested watershed of the South Qinling Mts, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018,25(7):6720-6728.

[30] Tong S T Y, Chen Wenli. Modeling the relationship between land use and surface water quality [J]. Journal of Environmental Management, 2002,66(4):377-393.

[31] 王一舒,吴仁人,荣楠,等.西江下游流域水质与不同空间尺度土地利用的响应关系[J].水资源保护,2021,37(4):97-104.

[32] 石峰,杜鹏飞,张大伟,等.滇池流域大棚种植区面源污染模拟[J].清华大学学报(自然科学版),2005,45(3):363-366.

[33] 焦胜,杨娜,彭楷,等.汾河流域土地景观格局对河流水质的影响[J].地理研究,2014,33(12):2263-2274.

[34] Jiang Yinghui, Xie Zhenglei, Zhang Hua, et al. Effects of land use types on dissolved trace metal concentrations in the Le'an River Basin, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017,189(12):633.

[35] Liu Ruimin, Wang Jiawei, Shi Jianhan, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions [J]. Science of the Total Environment, 2014,468/469:1069-1077.

[36] 陈优良,邹文敏,刘星根,等.东江源流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析[J/OL].环境科学:1-15 [2022-06-27].DOI:10.13227/j.hjxx.202201128.

[37] 王杰,李鹏,高海东,等.丹江上游土地利用/景观指数与水质关系初探[J].水土保持研究,2018,25(6):383-389.

[38] Zhang Guanhua, Liu Guobin, Wang Guoliang, et al. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment-bound nutrient loss, size composition and volume fractal dimension of sediment particles [J]. Pedosphere, 2011,21(5):676-684.

(上接第 246 页)

[18] 杜习乐,吕昌河.郑州市土地利用变化对地表水污染的影响[J].生态环境学报,2013,22(2):336-342.

[19] 白天,吴雅文,金牧青,等.漯河市规划区雨洪格局空间分布特征综合量化研究[J].水土保持通报,2018,38(5):269-274,287.

[20] 时珍,邢露华,郑琳琳,等.城市公园绿地游憩供需协同度评价及优化策略[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(2):197-204.

[21] 温存,高阳,高甲荣,等.河溪近自然治理技术及其评价方法[J].中国水土保持科学,2006,4(S1):39-44.

[22] 庞文君,刘伟,谢榕怡,等.基于青年人偏好的城市园林植物景观营造因子分析[J].中国园林,2019,35(10):130-134.

[23] 谢伊涵,李根,杨梦杰,等.基于 PSR 和物元可拓模型的跨界河流健康评价:以太浦河干流为例[J].华东师范大学学报(自然科学版),2020,13(1):110-122.

[24] 肖希,李敏.绿斑密度:高密度城市绿地规划布局适用指标研究:以澳门半岛为例[J].中国园林,2017,33(7):97-102.

[25] 罗坤.城市化背景下河流健康评价研究[D].重庆:重庆大学,2017.

[26] Hermida M A, Cabrera-Jara N, Osorio P, et al. Methodology for the assessment of connectivity and comfort of urban rivers [J]. Cities, 2019,95(6):102376.

[27] 侯佳明,胡鹏,刘凌,等.基于模糊可变模型的秦淮河健康评价[J].水生态学杂志,2020,41(3):1-8.

[28] 汤洁,李艳梅,卞建民,等.物元可拓法在地下水水质评价中的应用[J].水文地质工程地质,2005,32(5):1-5.

[29] 李港,陈诚,姚斯洋,等.基于压力—状态—响应和物元可拓模型的城市河流健康评价[J].生态学报,2022,42(9):1-11.

[30] 于志慧,许有鹏,张媛,等.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[J].环境科学学报,2014,34(12):3188-3193.