

DOI: 10.5846/stxb202102160445

岳启蒙, 文倩, 贺奕, 田培, 王纤阳, 鱼京善, 朱占亮. 水生态文明城市建设对城市水生态承载力的影响——以武汉市为例. 生态学报, 2021, 41(14): 5586-5597.

Yue Q M, Wen Q, He Y, Tian P, Wang Q Y, Yu J S, Zhu Z L. Influence of water ecological civilization city construction on urban water ecological carrying capacity: A case study of Wuhan City. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5586-5597.

水生态文明城市建设对城市水生态承载力的影响 ——以武汉市为例

岳启蒙^{1,2}, 文倩¹, 贺奕¹, 田培^{1,*}, 王纤阳², 鱼京善², 朱占亮¹

¹ 华中师范大学 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室/城市与环境科学学院, 武汉 430079

² 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875

摘要:城市水生态承载力能较好反映水资源-水环境-水生态-经济社会复合系统间多要素互馈关系,水生态文明城市建设对城市水生态系统具有多方面影响,对城市水生态承载力在水生态文明城市建设前后的变化进行定量研究具有重要意义。以城市“社会-经济-自然”复合生态理论为指导,充分考虑人类活动与城市水生态系统的响应关系,基于 DPSIR 框架构建城市水生态承载力评价指标体系,以水生态文明建设试点城市武汉市为例,综合运用熵权法、TOPSIS 和障碍度诊断模型等方法,分析 2008—2019 年武汉市水生态承载力的变化趋势和影响因素。结果表明,水生态文明城市试点建设期间(2015—2017 年)的水生态承载力平均水平(0.552)明显高于建设前(0.361)和建设后(0.438),建设成果主要体现在压力和影响指标的改善以及响应指标的大幅度提升上。阻碍武汉市水生态承载力提升的主要指标为生态环境状况指数、建成区绿化覆盖率、农田灌溉亩均用水量、酸雨量和饮用水源地水质达标率。根据评价结果提出水城共生共荣发展模式、引导产业结构转型等提升武汉市水生态承载力的建议。

关键词:DPSIR; TOPSIS 模型; 障碍度诊断模型; 城市水生态承载力; 水生态文明城市; 武汉市

Influence of water ecological civilization city construction on urban water ecological carrying capacity: A case study of Wuhan City

YUE Qimeng^{1,2}, WEN Qian¹, HE Yi¹, TIAN Pei^{1,*}, WANG Qianyang², YU Jingshan², ZHU Zhanliang¹

¹ Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation of Hubei Province/College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

² College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Urban water ecological carrying capacity can effectively reflect mutual feedback relationship of various factors in the compound system of water resources-water environment-water ecology-economy and society. The construction of a water ecological civilization city (WECC) has a multi-faceted impact on the urban water ecosystem. It has important theoretical value and practical significance to scientifically analyze the changes in the urban water ecological carrying capacity before and after the construction of the WECC. This paper took the “society-economy-nature” compound ecological theory as the guidance, fully considered the response relationship between human activities and urban water ecosystem, selected DPSIR model to build the evaluation index system of urban water ecological carrying capacity. Moreover, taking Wuhan City as an example, we comprehensively used entropy weight method, TOPSIS Model and obstacle diagnosis model to analyze the

基金项目:国家自然科学基金项目(41907061);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金(A314021402-2005);长江科学院水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心开放基金(CKWV2019761/KY)

收稿日期:2020-10-21; 网络出版日期:2021-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tianpei@mail.cnu.edu.cn

change trend and influencing factors of water ecological carrying capacity of Wuhan City from 2008 to 2019. The results of the TOPSIS model showed that the construction achievements were mainly reflected in the improvement of indicators in the pressure and impact rule level, as well as the substantial improvement of indicators in the response rule level. This revealed that while the economy and society of Wuhan City are achieving rapid development, the pressure on urban water ecosystem was gradually increasing, and the changes in the aquatic environment of Wuhan City had a certain impact on production and life. Moreover, the average level of water ecological carrying capacity (0.552) of Wuhan City during the pilot construction period (2015—2017) was higher than that before (0.361) and after (0.438) the pilot construction. How to maintain the positive impact of the construction achievements of the WECC construction was an urgent problem to be solved. Based on the obstacle diagnosis model, we found the main factors hindering the improvement of water ecological carrying capacity of Wuhan City were indicators of ecological environment index, the green coverage rate of built-up area, the average water consumption per mu of farmland irrigation, acid rain frequency, and the water quality compliance rate of drinking water source. The results provided decision-making reference for the planning, management and protection of urban water ecosystems, and can also explore the achievements and obstacles of the construction of a water ecological civilization city. Furthermore, the suggestions were proposed to improve the water ecological carrying capacity of Wuhan City, such as the symbiotic and co-prosperity development model of water city and the transformation of industrial structure.

Key Words: DPSIR; TOPSIS model; obstacle diagnosis model; urban water ecological carrying capacity; water ecological civilization city; Wuhan City

城市作为人类活动的高度集中地,其内部“社会-经济-自然”系统存在复杂变化特征^[1-3]。快速城镇化引发了资源短缺与低效利用、环境污染、生态失衡与承载力下降等问题,严重威胁城市宜居性与经济社会可持续发展^[4];另外,城市水污染、水生态退化等问题亦逐步凸显。水是生态系统控制性要素^[5],水利部自 2013 年开始在全国范围内先后选择了 105 个基础条件较好、代表性和典型性较强的城市,开展水生态文明城市试点建设工作,并于 2019 年完成了所有试点城市的验收。水生态文明城市建设对城市水生态系统具有多方面影响,学者们从不同角度建立评价指标体系对水生态文明城市建设成果进行了评价,如灰色粗糙集^[6]、层次分析法和 BP 神经网络^[7]、熵权法^[8]、DPSRIM 模型^[9]等。

水生态承载力是一个以生态承载力、水资源承载力和水环境承载力为基础发展而来的,具有复合性和动态性的承载力概念;城市水生态承载力是衡量城市水生态系统健康的重要维度^[10],可作为评价经济社会发展与生态环境保护是否相协调的重要依据。城市水生态系统是水生态文明城市建设的重要组成部分,城市水生态承载力也是国家《生态文明体制改革总体方案》^[11]和“三线一单”的主要关注对象之一,城市水生态承载力在水生态文明城市建设前后的定量变化可以直观反映水生态文明城市建设的成果。国内外学者开展的水生态承载力评价研究具有不同侧重点。国外少有单纯的水生态承载力研究,倾向于将其作为生态承载力和环境承载力评价的一部分进行探讨^[12]。而国内学者多是基于流域和区域进行整体评价,如任晓庆等^[13]运用主成分分析法和专家打分法从“水资源-水环境-水生态-水安全”4 个维度对滦河流域的水生态承载力进行了评价;Zhang 等^[14]结合层次分析法和系统动力学方法,设置了 6 种情景对吉林省四平区域的水生态承载力进行了模拟预测分析;Rong 等^[15]使用 ISFCCMIP 模型对新丰江水库的水生态承载力进行模拟与评价,为决策者对该区域农业结构和人口规模调整提供参考。总体而言,目前水生态承载力的研究以流域和大区域尺度为主,以单个城市为对象的研究相对较少,尤其是评价水生态文明城市建设对城市水生态承载力定量影响的研究鲜见报道。因此,将水生态承载力与生态文明建设相结合,通过对比分析水生态文明城市建设前后的水生态承载力定量变化及其驱动因素,可为城市生态建设与管理提供重要基础数据和科技支撑。

综上所述,本文以水生态文明城市试点建设为背景,以“社会-经济-自然”复合生态理论为指导,充分考虑人类活动与城市水生态系统的响应关系,基于 DPSIR 框架构建考虑水生态文明城市建设效应的城市水生态

承载力评价指标体系,采用 TOPSIS 和障碍度诊断模型定量评价城市水生态承载力并识别其制约因子,以期为促进城市可持续发展与水生态保护相协调提供科学依据;并以武汉市为例开展应用研究,研究结果可为武汉市水生态规划、管理和保护提供决策参考,也可为评价水生态文明城市建设成果及其制约因素提供参考。

1 城市水生态承载力评价方法

1.1 城市水生态承载力内涵

城市水生态系统是由水系统和人文系统两个子系统中各影响因素组成,且不同因素之间存在相互作用和制约^[16]。国内外学者对水生态承载力的定义和内涵进行了研究,如谭红武等^[17]将水生态承载力定义为:在维持河湖生态子系统自身结构、功能的稳定及其所支持的社会经济子系统可持续运行的前提下,社会经济河湖复合生态系统所能支撑的一定技术、生活水平下的社会经济规模阈值;张远等^[18]认为水生态承载力是在一定发展阶段,一定技术水平条件下,某空间范围内的水生态系统在维持自身结构功能长期稳定、水生态过程可持续运转的基础上,具有为人类社会活动提供生态服务产品的能力;Zhang 等^[14]认为水生态承载力是基于承载力理论与响应机制探索人类活动与水生态环境之间的矛盾,它可以合理评估维持区域水生态环境健康的社会经济规模阈值。总体而言,水生态承载力相比于水资源承载力和水环境承载力更加强调研究“水生态—人类社会”复杂系统间互馈关系,具有巨系统、多要素、动态互馈等特性^[19]。本文认为水生态承载力是水资源-水环境-水生态-经济社会复合系统间多要素互馈关系,如图 1 所示(实线、虚线箭头分别表示正向、负向作用)。

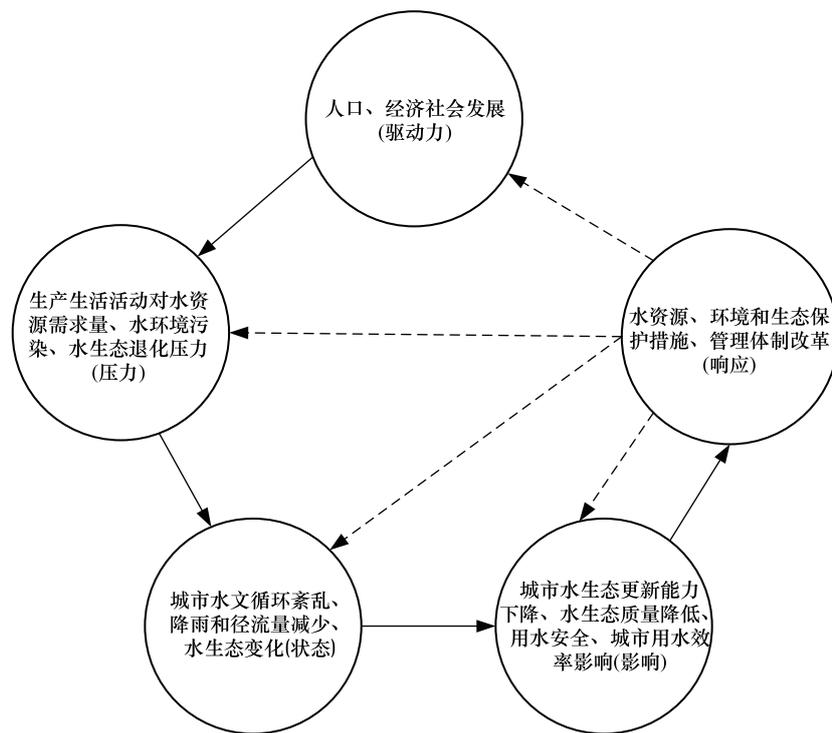


图 1 城市水生态系统不同要素正负互馈关系

Fig.1 Mutual feedback relationship reflected by urban water ecological carrying capacity

城市发展驱动因素如人口规模扩大、经济社会发展等对水资源、水环境和水生态系统造成压力(图 1),引起城市水生态系统失衡,并间接影响城市用水效率。虽然影响反馈到社会经济各部门的方式不一,但最终都会导致水资源的供需矛盾突出、水体污染加剧,进而影响城市水生态健康;另一方面会激发对水资源、水生态环境保护及管理体制的改革,而这些变化又会对经济、社会、水生态系统产生进一步影响。所以建立城市水生态承载力评价体系时需要综合考率社会、经济和自然的多项指标。

1.2 城市水生态承载力评价指标体系构建

驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)概念模型是1993年欧洲环境局在压力-状态-响应(PSR)模型基础上发展而来,其涵盖社会、经济、政治和生态等多种元素,主要反映人类社会经济活动对生态的影响^[20]。本研究参考DPSIR模型构建城市水生态承载力评价指标体系,该模型中“驱动力”是促使水生态承载力发生变化的各种经济、社会驱动因素;“压力”是生产及生活活动对水生态承载力造成的影响;“状态”是指水生态承载力在驱动力和压力共同作用下的表现;“影响”是当水生态承载力发生变化时所产生的一系列效应;“响应”是人类针对水生态承载力变化所采取的措施和对策。按照选取指标具备代表性和可获得性原则,综合已有研究成果^[21-25],结合现有水生态文明城市和城市水生态承载力内涵^[13-19],确定指标体系,如表1所示。其中生态环境状况指数(EI)是通过土地利用类型、水土流失、水资源量、降水量、主要污染物排放量和植被覆盖度等数据,分别处理得到生物丰度指数、植被覆盖指数、水网密度指数、土地胁迫指数和污染负荷指数等五个分指数,再由这五个分指数加权得到^[26-27]。本研究采用熵权法对指标权重进行赋值,可有效减少主观因素干扰^[28],具体计算过程参见文献[8]。

表1 城市水生态承载力评价体系

Table 1 Urban water ecological carrying capacity evaluation system

目标层 Target Layer	准则层 Rule Layer	指标层 Index Layer	缩写 Abbreviation	指标计算 Calculation	描述与说明 Description	指标属性 Attribute	
城市水生态承载力 评价体系	驱动力	人口密度/(人 km ²)	D1	统计数据	单位土地面积人口	-	
		人均生产总值/(元/人)	D2	统计数据	经济总体状况,以常住人口计	+	
Urban water ecological carrying capacity evaluation system	驱动力	城市化率/%	D3	城市常住人口/总常住人口	人口向城市的聚集程度	-	
		第二产业比重/%	D4	统计数据	城市经济结构阻碍程度	-	
		第三产业比重/%	D5	统计数据	城市经济结构优化程度	+	
		压力	生活耗水量/亿 m ³	P1	统计数据	城市生活用水压力	-
			生产耗水量/亿 m ³	P2	统计数据	城市生产用水压力	-
	COD 排放量/万 t		P3	统计数据	城市水环境污染压力	-	
	二氧化硫排放量/万 t		P4	统计数据	城市水环境污染压力	-	
	工业废水排放总量/万 t		P5	统计数据	城市水环境污染压力	-	
	状态	水土流失面积/km ²	P6	统计数据	城市水生态退化压力	-	
		年降雨量/亿 m ³	S1	统计数据	城市降水量状态	+	
		人均水资源量/(m ³ /人)	S2	统计数据	城市人均水资源状态	+	
		人均用水量/(m ³ /人)	S3	统计数据	城市人均水资源利用状态	-	
		产水模数/(万 m ³ /km ²)	S4	水资源总量/区域	城市的区域水产能力状态	+	
		大中型水库年末蓄水总量/亿 m ³	S5	统计数据	城市防洪发电能力状态	+	
		影响	生态环境状况指数	I1	统计数据	城市生态环境状况质量状况	+
			建成区绿化覆盖率/%	I2	统计数据	城市水生态更新能力	+
			人均公共绿地面积/m ²	I3	统计数据	城市水生态更新能力	+
			酸雨率/%	I4	统计数据	城市水生态质量	-
	饮用水源地水质达标率/%		I5	统计数据	城市用水安全	+	
	响应	万元 GDP 用水量/m ³	I6	统计数据	表征城市用水效率	-	
万元工业产值用水/m ³		I7	统计数据	表征城市用水效率	-		
农田灌溉亩均用水量/m ³		I8	统计数据	表征城市用水效率	-		
城市污水集中处理率/%		R1	统计数据	城市水污染治理作出的响应	+		
工业用水量重复利用率/%		R2	统计数据	城市水资源节约作出的响应	+		
新增水土流失治理面积/km ²		R3	统计数据	城市水生态治理作出的响应	+		
水利、环境和公共设施投资占总投资比例/%		R4	水利、环境和公共设施投资/总投资	城市水环境保护作出的响应	+		

1.3 TOPSIS 模型

Yoon 和 Hwang^[30] 提出逼近于理想解的排序法即 TOPSIS 模型,该模型旨在对多维度、多项指标进行比较。依据评价对象到最优解和最劣解的距离进行排序,其计算步骤为:

$$V_{ij} = W_i \cdot X_{ij} \quad (1)$$

$$V^+ = \{ \max V_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \} \quad (2)$$

$$V^- = \{ \min V_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \} \quad (3)$$

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (V_{ij} - V_i^+)^2} \quad (4)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (V_{ij} - V_i^-)^2} \quad (5)$$

$$T_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (6)$$

式中, X_{ij} 为标准化后的矩阵; W_i 为第 i 个指标的权重; V^+ 为正理想解; V^- 为负理想解; D_j^+ 为评价向量到正理想解的距离; D_j^- 为评价向量到负理想解的距离; T_j 为评价对象与理想解的贴近度。其中 D_j^+ 越小,说明评价指标与正理想解越接近,城市水生态状况越好; D_j^- 越小说明评价指标与负理想解越接近,城市水生态状况越差; T_j 值越大,表明第 j 年城市水生态承载力越高。

1.4 障碍度诊断模型

利用障碍度诊断模型可以诊断和测算影响城市水生态承载力的障碍因素及障碍度^[31-32]。某项指标的障碍度越小,说明城市水生态承载力受该项指标的阻碍作用越弱,反之亦然。障碍度计算涉及因子贡献度和指标偏离度两个衡量指标^[33-34]。计算步骤为:

$$F_{ij} = w_{ij} \cdot w_i \quad (7)$$

$$I_{ij} = 1 - Y_{ij} \quad (8)$$

$$P_{ij} = \frac{F_{ij} \cdot I_{ij}}{\sum_{i=1}^m (F_{ij} \cdot I_{ij})} \times 100\% \quad (9)$$

式中, w_{ij} 为第 i 个准则层第 j 个指标的权重; w_i 为第 i 个准则层的权重; F_{ij} 为因子贡献度; I_{ij} 为指标偏离度; Y_{ij} 为无量纲化后的指标值; P_{ij} 为障碍度。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

武汉地处长江中游、江汉平原东部,长江及其最大支流汉江在城中交汇,市内江河纵横、湖港交织,水域面积占全市总面积四分之一^[35],如图 2 所示。气候类型主要为亚热带季风性(湿润)气候,常年雨量丰沛、热量充足、雨热同季。根据《湖北省 2020 年统计年鉴》显示,截止 2019 年武汉市土地面积 8569 km²,人口、经济总量分别占湖北省的 21.37% 和 35.36%。武汉市社会经济快速发展对资源环境以及生态安全造成了较大压力,尤其在水生态方面较突出。1987—2016 年,武汉主城区湖泊水域面积共缩减 82 km²,减少幅度达 56.9%^[36]。武汉湿地面积由 2000 年第一次普查时的 3358.35 km²,减少到 2010 年的 3196 km²,净减少 162.5 km²^[37]。2014 年 5 月,武汉市被列入第二批 59 个全国水生态文明城市建设试点,建设期为 2015 年至 2017 年。

2.2 数据来源

D1、D2、D3、D3、D4、I2、I3、R1、R2、R4 指标数据来源于 2008—2020 年《湖北统计年鉴》、《武汉统计年鉴》和《武汉市经济与发展公报》;P1、P2、P3、P4、P5、S1、S2、S3、S4、S5、I5、I6、I7、I8 指标数据取自 2008—2019 年《湖北省水资源公报》和《武汉市水资源公报》;P6 和 R3 指标数据来自于 2008—2019 年《湖北省水土保持公

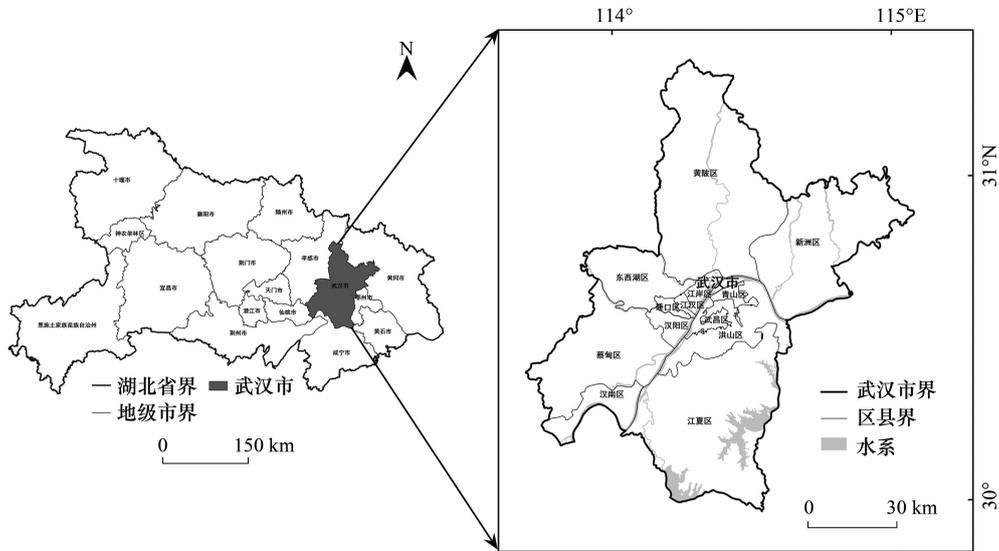


图2 研究区示意图

Fig.2 Map of study area

报》、《武汉市水土保持公报》和《湖北农村统计年鉴》;I1 和 I4 指标数据来源于 2008—2019 年《湖北省生态环境公报》。

3 结果与讨论

3.1 指标权重

通过熵权法对武汉市 2008—2019 年 28 项指标进行处理,得到各指标权重及综合权重结果如表 2 所示。

表 2 指标权重

Table 2 Indicator Weight by Entropy Method

准则层 Rule Layer	指标层 Index Layer	熵值 Entropy	权重 Weight	准则层 Rule Layer	指标层 Index Layer	熵值 Entropy	权重 Weight
驱动力 Driving(0.1827)	D1	0.9881	0.0413	影响 Impact(0.2818)	I1	0.9878	0.0423
	D2	0.9905	0.0328		I2	0.9887	0.0392
	D3	0.9844	0.0541		I3	0.9906	0.0327
	D4	0.9921	0.0272		I4	0.9898	0.0354
	D5	0.9922	0.0269		I5	0.9898	0.0353
压力 Pressure(0.2048)	P1	0.9884	0.0403	I6	0.9914	0.0299	
	P2	0.9873	0.0440	I7	0.9911	0.0310	
	P3	0.9924	0.0263	I8	0.9897	0.0357	
	P4	0.9886	0.0396	响应 Response(0.1131)	R1	0.9939	0.0211
	P5	0.9935	0.0226		R2	0.9915	0.0295
	P6	0.9908	0.0317		R3	0.9903	0.0337
状态 State(0.2175)	S1	0.9734	0.0927		R4	0.9917	0.0286
	S2	0.9907	0.0321				
	S3	0.9904	0.0334				
	S4	0.9912	0.0305				
	S5	0.9918	0.0286				

在 28 项指标中,权重不小于 0.04 的指标有 6 项,其中驱动力准则层有两项,分别为 D1 和 D3;压力准则层有两项,分别为 P1 和 P2;状态准则层有一项,为 S1,且其权重为 0.0927,远高于其他指标的权重;影响准则层有 1 项,为 I1。响应准则层的权重值最低(0.1131)且远低于其他 4 个准则层,一定程度上说明武汉市整体的水生态修复效果欠佳。影响准则层的权重(0.2886)最大,说明驱动力和压力的变化对状态产生了强大影响,而这种影响直接反映到了城市水生态的变化上,其中生态环境状况指数(I1)获得了最大权重(0.0423),这是因为 I1 是通过生物丰度指数、植被覆盖指数、水网密度指数、土地胁迫指数和污染负荷指数综合计算得出,是对城市水生态变化反应最敏感的影响指标。上述结果表明降水对城市的水资源利用上限有决定性作用,影响准则层的指标对城市水生态承载力评价有着重要意义,武汉市的水生态文明城市建设通过提高城市绿化率、用水效率、水质等措施来促进水生态承载力提升。另一方面,响应指标层的权重较低,则反映出在整个研究的时间段内,尽管对城市水生态健康的重视程度不断增强,但是政策及工程措施的实施效果还不够理想。

3.2 武汉市水生态承载力评价

3.2.1 总体评价结果

武汉市 2008—2019 年的水生态承载力得分通过贴近度的结果来反映,如表 3 所示。将研究时段分为 3 个阶段:水生态文明城市建设前(2008—2014);水生态文明城市试点建设期(2015—2017);水生态文明城市试点建设结束后(2018—2019)。

表 3 武汉市城市水生态承载力评价体系评价结果

Table 3 Evaluation results of urban water ecological carrying capacity in Wuhan City

水生态文明城市阶段 Stage of WECC construction	年份 Year	$T_{驱动}$	$T_{压力}$	$T_{状态}$	$T_{影响}$	$T_{响应}$	$T_{综合}$
建设前 Before WECC construction	2008	0.5700	0.3817	0.2437	0.2046	0.2889	0.3530
	2009	0.5533	0.3751	0.1636	0.2294	0.2678	0.3281
	2010	0.5740	0.3971	0.6340	0.1728	0.3761	0.4830
	2011	0.4448	0.3762	0.0842	0.4454	0.2798	0.3115
	2012	0.3047	0.3820	0.3726	0.4403	0.2638	0.3666
	2013	0.2557	0.4225	0.2713	0.3884	0.2439	0.3133
	2014	0.3122	0.4550	0.2775	0.6058	0.2420	0.3746
建设期 Under WECC construction	2015	0.2582	0.5491	0.5268	0.6441	0.2932	0.4836
	2016	0.3081	0.6484	0.9916	0.7106	0.6216	0.6723
	2017	0.3514	0.6428	0.3517	0.6698	0.8294	0.5010
建设后 After WECC construction	2018	0.3587	0.6184	0.2248	0.7021	0.5536	0.4347
	2019	0.4874	0.6167	0.1586	0.7893	0.4830	0.4427

WECC: 水生态文明城市 Water Ecological Civilization City; $T_{贴近度}$: 贴近度 Clooseness Evaluation Result; $T_{驱动}$: 驱动力准则层的贴近度评价结果 Clooseness Evaluation Result of Driving Rule Layer; $T_{压力}$: 压力准则层的贴近度评价结果 Clooseness Evaluation Result of Pressure Rule Layer; $T_{状态}$: 状态准则层的贴近度评价结果 Clooseness Evaluation Result of State Rule Layer; $T_{影响}$: 影响准则层的贴近度评价结果 Clooseness Evaluation Result of Impact Rule Layer; $T_{响应}$: 响应准则层的贴近度评价结果 Clooseness Evaluation Result of Response Rule Layer; $T_{综合}$: 武汉市水生态承载力的综合贴近度评价结果 Evaluation Results of Comprehensive Clooseness of Water Ecological Carrying Capacity in Wuhan City

由图 3 和图 4 可以看出准则层和综合评价结果在 2008—2019 年间的整体变化趋势,整体呈现“M”态势,水生态文明城市试点建设期间的武汉市水生态承载力平均水平(0.552)高于建设前(0.361)和建设后(0.438)。

3.2.2 水生态文明城市建设前(2008—2014)

武汉市的水生态承载力在 2008—2014 年间整体保持在较低水平,仅 2010 年有一个小高峰(0.483 分),得益于该年降水丰沛导致的自然禀赋提升,该年的驱动力、状态和响应准则层的贴近度都达到了水生态文明城市建设前的最高水平。且在 2009 年颁布《武汉市水土保持条例》和《武汉市湿地自然保护区保护条例》等条例之后,2010 年是实施的第一年,而这也明显的反映在了水土流失治理面积的增加和生态投资的提升上。然而

在 2011—2013 年武汉市的整体水生态承载力出现了大幅度下降,降水量依旧对武汉市水生态承载力有着决定性作用,尤其是 2011 年的年降水量仅为 82.42 亿 m^3 ,远低于其他年份,加上水生态保护措施力度不够和人口不断增长,从而使得 2011 年的综合得分仅为 0.312。这种情况在 2012 年武汉市颁布《武汉市水资源综合规划(2010—2030 年)》和《武汉市城市供水用水条例》之后有所改善,但是 2013 年武汉市水生态承载力再次降至 2011 年以来最低水平,2014 年武汉市开始了海绵城市试点建设,因而 2014 年的城市水生态承载力有所回升,而这主要体现在了影响准则层得分的大幅提高上。

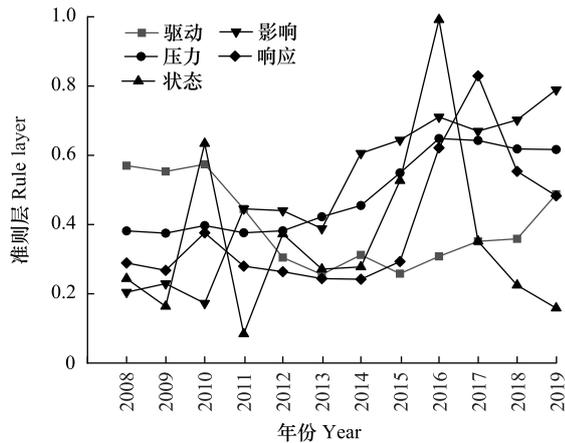


图 3 准则层评价结果

Fig.3 Evaluation results of the rule layer

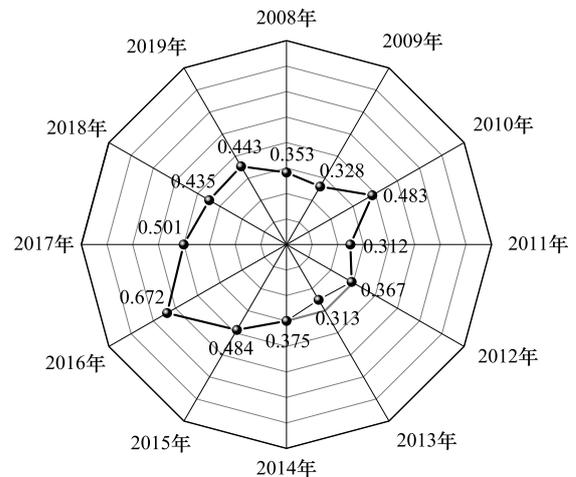


图 4 2008—2019 年武汉市水生态承载力综合贴度评价结果

Fig.4 Evaluation results of comprehensive closeness of water ecological carrying capacity in Wuhan City from 2008 to 2019

3.2.3 水生态文明城市建设期(2015—2017)

在水生态文明城市试点建设的 2015—2017 年期间,城市水生态承载力大幅提升,并在 2016 年达到峰值(0.672 分),是 2011 和 2013 年得分的两倍有余。观察降雨量数据会发现 2015—2017 年的年均降雨量要远远高于其余年份,虽然降雨的主要影响因素是自然气候变化,但是人类活动也会对降雨量产生一定影响,通过水生态文明城市建设和水文化普及,越来越多居民建立了水生态保护意识,绿色出行、节约用水等行为更普遍。尽管在建设的这段时间里人口密度和城市化率不断提高,但是产业结构的优化升级,用水效率的大幅提高致使生产耗水量持续减少,城市水生态压力减低,也使得酸雨率大幅降低,这些因素结合起来导致了生态环境状况指数的持续增长,水生态文明城市建设对城市的水生态承载力的提升是显著的。

3.2.4 水生态文明城市建设后(2018—2019)

试点建设结束后,2018—2019 年武汉市水生态承载力出现了小幅下降,但总体上仍高于建设前的水平,这主要是因为人口密度大幅增长导致了生活耗水量快速增加,经济快速发展也使生产耗水量相较试点建设期间的水平有所提高。城市水生态承载力的压力增大,而应对措施却没有跟上,水生态文明城市建设的成果没有很好继承下来。由图 5 可以看出,武汉市的正理想解和负理想解的变化大体呈对称分布,在 2008—2016 年波动下降,并于 2016 年达到最低值(0.0455)即最接近正理想解,此后又逐渐偏离正理想解。而在 2008—2016 年波动上升,并于 2016 年达到最高值(0.0934)即最远离负理想解,此后虽然有所降低,但是整体还是高于 2008—2015 水生态文明城市建设之前的水平。这说明了武汉市水生态承载力在水生态文明城市建设之后有了很大提升,但是社会经济发展与水生态保护的协调度不够。

陈威等^[38]认为武汉市 2008—2020 年水资源承载力呈持续增长趋势,而本研究显示武汉市水生态承载力在 2008—2014 年保持较低水平,在 2015—2017 年大幅提升,并在 2018—2019 年小幅降低。这主要与陈威等^[38]的研究是在水生态文明城市建设之前,采用的是 2008—2012 年武汉市相关数据有关。水生态文明城市

建设期间的评价结果与杨康煜等^[39]一致,均认为承载力在 2015—2017 年大幅提升,并在 2018 年增速大幅降低甚至为负;但杨康煜等认为 2016—2017 武汉市水资源承载力持续大幅提高,而本文结果则反映出大幅降低趋势,这主要与杨康煜等采用的是 PSR 模型及指标数量偏少有关。另外,万炳彤等^[40]认为武汉市水环境承载力在 2015—2018 年持续提高,主要是因为其指标体系未考虑降雨量和水生态指标。

3.3 武汉市水生态承载力障碍因素

3.3.1 指标层障碍度

运用障碍度诊断模型计算出 2008—2019 年阻碍武汉市水生态承载力提升的主要障碍因子及其障碍度,选取所占比重排前五的指标,如表 4 所示。

2008—2019 年武汉市水生态承载力的主要障碍因子全部来源于影响准则层,尽管排名有微小变化但排名前五的一直是 I1, I2, I8, I4 和 I5(表 4)。由于 I1 是由生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地胁迫和污染负荷指数综合计算而来,而这也是受人类活动影响最大的生态指标,会对不同的政策导向、城市规划产生应激响应。观察年际变化会发现生物丰度指、植被覆盖和水网密度指数是在不断降低的,这是由于武汉城市化发展导致了河流湖面水域面积快速缩小,栖息地大范围减少对水生生态系统造成不利影响。土地胁迫和污染负荷指数则呈现逐渐提升趋势,说明水生态文明城市建设、污水处理技术提高以及污水处理厂增多使得环境质量整体有所改善。I2 的障碍度主要体现在绿化覆盖率直接影响到了水生态循环,这种影响也导致了 I1 障碍度的提高。2012—2013 年是水生态文明建设前 I8 值最低的两年,而 2016—2017 年是整个时间序列中 I8 值最低两年,其余年份的 I8 都表现出了波动上升趋势。I4 的障碍度主要在于酸雨对生态系统会产生很大危害,这主要表现在植物叶片受到直接损害和土壤理化性质的恶化上,而 I5 的障碍度则直接和水质安全挂钩。

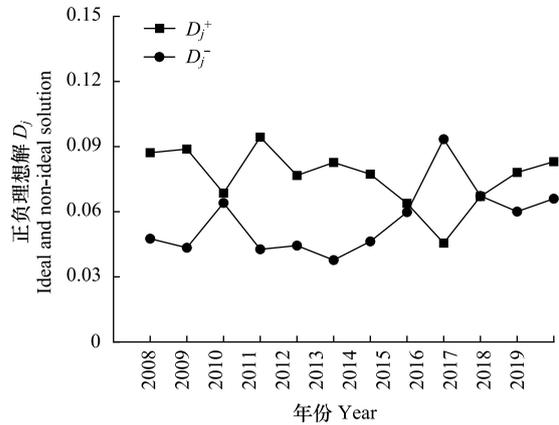


图 5 武汉市水生态承载力综合评价正负理想解的距离变化
Fig.5 Change in the distance of Ideal and non-ideal Solutions for Comprehensive Evaluation of Water Ecological Carrying Capacity in Wuhan City

表 4 2008—2019 年武汉市水生态承载力主要障碍因子及障碍度

Table 4 Main obstacle factors and obstacle degree of water ecological carrying capacity in Wuhan City from 2008 to 2019

水生态文明城市阶段 Stage of WECC construction	年份 Year	主要障碍因子及其障碍度 Main obstacle factors and obstacle degree									
		1		2		3		4		5	
建设前 Before WECC construction	2008	0.0787	I1	0.0728	I2	0.0661	I8	0.065169	I4	0.064155	I5
	2009	0.0784	I1	0.0728	I2	0.0664	I8	0.066306	I4	0.063445	I5
	2010	0.0796	I1	0.0736	I2	0.0663	I8	0.0661	I4	0.0648	I5
	2011	0.0742	I1	0.0730	I2	0.0665	I8	0.0656	I5	0.0648	I4
	2012	0.0786	I1	0.0724	I2	0.0657	I4	0.0657	I8	0.0630	I5
	2013	0.0789	I1	0.0722	I2	0.0659	I4	0.0657	I5	0.0656	I8
建设期 Under WECC construction	2014	0.0772	I1	0.0713	I2	0.0662	I8	0.0657	I4	0.0643	I5
	2015	0.0779	I1	0.0710	I2	0.0667	I8	0.0647	I4	0.0643	I5
	2016	0.0772	I1	0.0717	I2	0.0678	I5	0.0648	I4	0.0641	I8
	2017	0.0780	I1	0.0715	I2	0.0678	I5	0.0646	I8	0.0640	I4
建设后 After WECC construction	2018	0.0781	I1	0.0714	I2	0.0647	I8	0.0642	I5	0.0640	I4
	2019	0.0768	I1	0.0708	I2	0.0654	I8	0.0645	I4	0.0641	I5

I1 生态环境状况指数、I2 建成区绿化覆盖率、I8 农田灌溉亩均用水量、I4 酸雨量、I5 引用水源地水质达标率

3.3.2 准则层障碍度

进一步计算 DPSIR 五个子系统的障碍度,结果如图 6 所示。

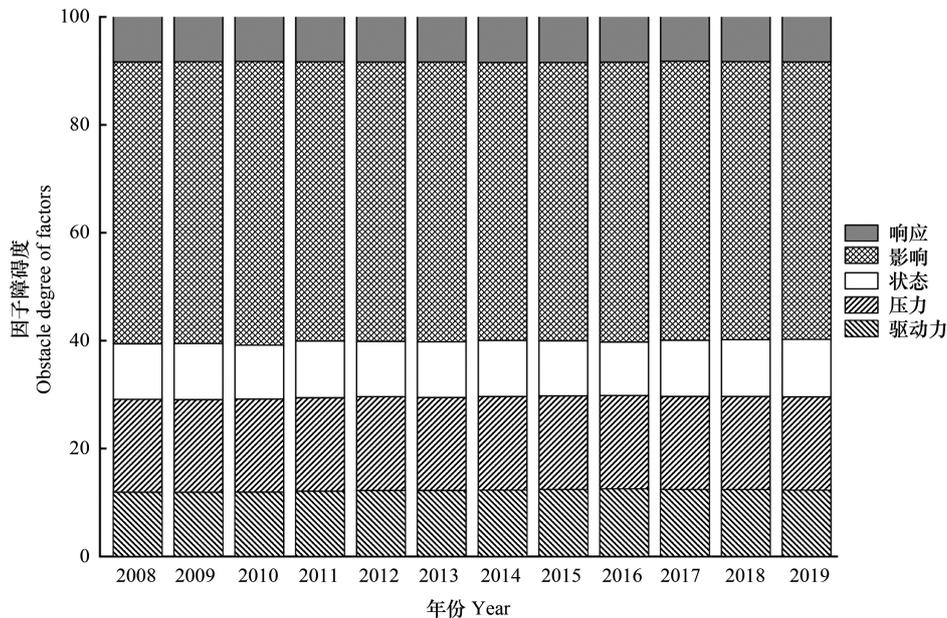


图 6 2008—2019 年武汉市水生态承载力准则层障碍度

Fig.6 Obstacle degree of Rule Layer in Wuhan City from 2008 to 2019

2008—2019 年,武汉市水生态承载力子系统障碍度尽管有一定波动但保持相对稳定,这与李少朋等^[41]的结论相同。分类障碍度的总体情况表现为影响准则层>压力准则层>驱动力准则层>状态准则层>响应准则层,其中影响准则层对整个水生态承载力的障碍度超过 50%,说明了驱动力—压力—状态的共同作用直接体现在了影响上。可见,为提升武汉市水生态承载力,必须重视影响准则层的指标。

3.4 提升武汉市水生态承载力的对策

武汉市水生态文明城市建设促进了压力和影响准则层指标的改善以及响应准则层指标的大幅提升;但值得注意的是,用水效率和酸雨率指标在武汉市试点结束之后均出现了一定程度恶化趋势,且城市绿化、水资源利用效率、污染控制依旧是维持武汉市水生态承载力的重点指标。因此,从以下三方面提出相应对策。

3.4.1 改善城市绿化水平,提升水域生态空间

生态环境状况指数和建成区绿化覆盖率是武汉市水生态承载力提高的最主要障碍因素,这与张欢等^[42]的结论吻合。根据《城市园林绿化评价标准(GB50563—2010)》,2008—2019 年武汉市的建成区绿化覆盖率仅在 2019 年达到一级水平(40.0%),其余年份均未达到一级水平。然而,Nathwani 等^[43]认为绿化覆盖率的对生态系统安全的作用并不重要,这是由于其研究对象为沿海城市。从水域面积上看,谢启姣等^[36]发现武汉主城区湖泊水域面积在 1987—2016 年共缩减 82km²,减少了 56.9%,且越靠近城市建成区,湖泊面积缩减越明显。因此,仍需改善城市绿化水平,修复河湖生态;建议划定湖泊“三线”锁定其水生态空间,采取“一河一策”、“一湖一策”,优化、保护和恢复河湖水域等水生态空间。

3.4.2 落实最严格水资源管理制度,提高水资源利用效率

农田亩均用水量 and 引用水源地水质达标率作为障碍度排名靠前的指标,反映了用水效率和用水安全对武汉市水生态承载力的显著影响。试点建设结束后,武汉市万元 GDP 用水量和农田亩均用水量均较建设期的最低值提高了 16.7%和 35.1%,说明水生态文明城市建设成果没有很好地延续。该结论与杨康煜等^[39]的结果不同,其认为 2015—2018 年武汉市的用水效率不断提高,这一差异与杨康煜等的指标数量不足且仅使用单

一评价方法有关。最严格水资源管理制度已被证明对农业^[44]和工业用水效率^[45]有显著提升作用。建议武汉市深化总量强度双控制的最严格水资源管理制度,以健全水生态空间开发保护制度为抓手,以水资源资产产权、水资源有偿使用和生态补偿制度为重点,以制度引导、规范和约束各类开发利用水资源的行为。

3.4.3 引导产业结构转型,源头控制污染排放

酸雨率是阻碍武汉市水生态承载力提高的主要指标之一,而王苗等^[46]认为武汉市 2007—2014 年间的酸雨率趋于改善,这种差异主要是因为本文的研究时段是 2008—2019 年。武汉市的酸雨率在 2009—2017 年间持续减少,尤其于水生态文明城市试点建设期间大幅降低,且在 2017 年一度降至 2.7%。但是试点结束后,武汉市酸雨率快速反弹至 7.2%。在产业能源结构上,武汉市煤炭等能源使用比例较大,造成大量废水废渣及氮氧化合物的排放,对水生态和大气环境造成了破坏^[37]。因此,须优化能源结构,积极拓展清洁能源和可再生能源;大力支持利用新能源的产业项目,围绕武汉市水生态优势领域积极培育生态和绿色产业,重点发展节能、环保项目,并将武汉市水生态保护与海绵城市和园林城市建设结合起来。

4 结论

本文创新性地在水生态文明城市建设与城市水生态承载力相结合,并基于 DPSIR 框架构建了多维度城市水生态承载力综合评价指标体系,分析了 2008—2019 年武汉市水生态承载力时空格局以及水生态文明城市建设对其水生态承载力的定量影响,主要结论为:

(1) 2008—2019 年武汉市城市水生态承载力呈“M”型走势,水生态文明城市试点建设期间的武汉市水生态承载力平均水平(0.552)高于建设前(0.361)和建设后(0.438),表明水生态文明城市建设对武汉市水生态承载力有着显著积极影响。

(2) 在水生态文明城市建设期间,除了驱动力子系统的贴适度上升幅度较小外,其他子系统的贴适度均提升很大。表明武汉市经济社会快速发展同时,面临的水生态压力也逐步增加,而武汉市水生态环境变化又对生活生产造成一定影响,水环境政策制定、水环境执法的响应性仍需提升。

(3) 武汉市水生态承载力前 5 大障碍因素为生态环境状况指数、建成区绿化覆盖率、农田灌溉亩均用水量、酸雨量、引用水源地水质达标率。

(4) 提出改善城市绿化水平,提升水域生态空间,落实最严格水资源管理制度、提高水资源利用效率,引导产业结构转型、源头控制污染排放等提升武汉市水生态承载力的建议。

参考文献 (References):

- [1] Steffen W, Grinevald J, Crutzen P, McNeill J. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2011, 369(1938): 842-867.
- [2] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin F S, Lambin E, Lenton T M, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber H J, Nykvist B, de Wit C A, Hughes T, van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder P K, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell R W, Fabry V J, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 2009, 14(2): 32.
- [3] Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell S E, Fetzer I, Bennett E M, Biggs R, Carpenter S R, de Vries W, de Wit C A, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace G M, Persson L M, Ramanathan V, Reyers B, Sörlin S. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347(6223): 1259855.
- [4] 邱国玉, 张晓楠. 21 世纪中国的城市化特点及其生态环境挑战. *地球科学进展*, 2019, 34(6): 640-649.
- [5] 陈明忠. 关于水生态文明建设的若干思考. *中国水利*, 2013, (15): 1-5.
- [6] Zhang X Y, Zhu J W, Xie J C, Liu J L, Jiang R G. Selection of an evaluation index for water ecological civilizations of water-shortage cities based on the grey rough set. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 82: 012079.
- [7] Fan X H, Li Q G, Xu Z. Green credit risk assessment under the background of water ecological civilization city construction—based on BP neural network model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 446: 032076.
- [8] 张雯婕, 岳启蒙, 温河青, 许新宜, 田培, 刘目兴. 水生态文明城市建设评价方法及其应用研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(2): 315-323.
- [9] 万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春. 区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用. *环境科学*, 2020, 42(4): 2089-2100.

- [10] 焦雯珺, 闵庆文, 李文华, Fuller A M. 基于 ESEF 的水生态承载力: 理论、模型与应用. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1041-1048.
- [11] 新华社. 中共中央 国务院印发《生态文明体制改革总体方案》. (2015-09-21). http://www.gov.cn/guowuyuan/2015-09/21/content_2936327.htm.
- [12] 张盛, 王铁宇, 张红, 李奇峰, 周云桥, 宋帅. 多元驱动下水生态承载力评价方法与应用——以京津冀地区为例. 生态学报, 2017, 37(12): 4159-4168.
- [13] 任晓庆, 杨中文, 张远, 王玉秋, 周凯文, 张鲁骏. 滦河流域水生态承载力评估研究. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 72-79.
- [14] Zhang Z, Lu W X, Zhao Y, Song W B. Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process. Ecological Modelling, 2014, 275: 9-21.
- [15] Rong Q Q, Cai Y P, Su M R, Yue W C, Dang Z, Yang Z F. Identification of the optimal agricultural structure and population size in a reservoir watershed based on the water ecological carrying capacity under uncertainty. Journal of Cleaner Production, 2019, 234: 340-352.
- [16] 曾晨, 刘艳芳, 张万顺, 汤弟伟. 流域水生态承载力研究的起源和发展. 长江流域资源与环境, 2011, 20(2): 203-210.
- [17] 谭红武, 杜强, 彭文启, 李靖. 流域水生态承载力及其概念模型. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 1-8.
- [18] 张远, 周凯文, 杨中文, 张鲁骏, 任晓庆. 水生态承载力概念辨析与指标体系构建研究. 西北大学学报: 自然科学版, 2019, 49(1): 42-53.
- [19] Wang S, Xu L, Yang F L, Wang H. Assessment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model. Science of the Total Environment, 2014, 472: 1070-1081.
- [20] Delgado L E, Zúñiga C C, Asún R A, Castro-Díaz R, Natenzon C E, Paredes L D, Pérez-Orellana D, Quiñones D, Sepúlveda H H, Rojas P M, Olivares G R, Marín V H. Toward social-ecological coastal zone governance of Chiloé Island (Chile) based on the DPSIR framework. Science of the Total Environment, 2021, 758: 143999.
- [21] 马勇, 黄智洵. 长江中游城市群生态文明水平测度及时空演变. 生态学报, 2016, 36(23): 7778-7791.
- [22] 沈威, 鲁丰先, 秦耀辰, 谢志祥, 李阳. 长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素. 生态学报, 2019, 39(11): 3937-3951.
- [23] Han H, Li H M, Zhang K Z. Urban water ecosystem health evaluation based on the improved fuzzy matter-element extension assessment model: case study from Zhengzhou city, China. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019(2): 7502342.
- [24] Bu J H, Li C H, Wang X, Zhang Y, Yang Z W. Assessment and prediction of the water ecological carrying capacity in Changzhou city, China. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123988.
- [25] Tian P, Wu H Q, Yang T T, Jiang F L, Zhang W J, Zhu Z L, Yue Q M, Liu M X, Xu X Y. Evaluation of urban water ecological civilization: a case study of three urban agglomerations in the Yangtze River Economic Belt, China. Ecological Indicators, 2021, 123: 107351.
- [26] 问青春. 《生态环境状况评价技术规范》修订及对生态评价工作的影响. 环境保护与循环经济, 2016, 36(10): 69-71.
- [27] 孟祥亮, 刘伟, 孔梅, 王琦, 史同广. 《生态环境状况评价技术规范》修订的生态管理效用评估——以山东省为例. 环境监控与预警, 2020, 12(2): 56-62.
- [28] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 贾明璐. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析. 地理科学, 2013, 33(11): 1323-1329.
- [29] 杨广, 何新林, 李俊峰, 贾筱娟. 玛纳斯河流域水资源可持续利用评价方法. 生态学报, 2011, 31(9): 2407-2413.
- [30] 洪惠坤, 廖和平, 魏朝富, 李涛, 谢德体. 基于改进 TOPSIS 方法的三峡库区生态敏感区土地利用系统健康评价. 生态学报, 2015, 35(24): 8016-8027.
- [31] 周彬, 赵宽, 钟林生, 陈田, 虞虎. 舟山群岛生态系统健康与旅游经济协调发展评价. 生态学报, 2015, 35(10): 3437-3446.
- [32] 赵宏波, 马延吉. 东北粮食主产区耕地生态安全的时空格局及障碍因子——以吉林省为例. 应用生态学报, 2014, 25(2): 515-524.
- [33] 尹鹏, 刘继生, 陈才. 东北振兴以来吉林省四化发展的协调性研究. 地理科学, 2015, 35(9): 1101-1108.
- [34] 崔馨月, 方雷, 王祥荣, 康俊锋. 基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究. 生态学报, 2021, 41(1): 302-319.
- [35] 马海良, 丁元卿, 庞庆华. 武汉市湖泊水域利用转变及其碳排放影响. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 369-375.
- [36] 谢启姣, 刘进华. 1987-2016 年武汉城市湖泊时空演变及其生态服务价值响应. 生态学报, 2020, 40(21): 7840-7850.
- [37] 夏斯晓. 武汉市政府推进水生态文明城市建设问题与对策分析[D]. 武汉: 湖北大学, 2016.
- [38] 陈威, 周毓. 武汉市水资源承载力动态评价模型的构建及其应用. 水电能源科学, 2014, 32(7): 48-51, 43-43.
- [39] 杨康煜, 王妮菲, 黄歌. 基于 PSR-MSD 模型的长江经济带水资源承载力评价研究——以武汉市为例. 价值工程, 2020, 39(5): 290-293.
- [40] 万炳彤, 赵建昌, 鲍学英, 李爱春. 基于 SVR 的长江经济带水环境承载力评价. 中国环境科学, 2020, 40(2): 896-905.
- [41] 李少朋, 赵衡, 王富强, 杨东明. 基于 AHP-TOPSIS 的江苏省水资源承载力评价. 水资源保护, 2020: 1-10. (网络首发)
- [42] 张欢, 成金华, 冯银, 陈丹, 倪琳, 孙涵. 特大型城市生态文明建设评价指标体系及应用——以武汉市为例. 生态学报, 2015, 35(2): 547-556.
- [43] Nathwani J, Lu X L, Wu C Y, Fu G, Qin X N. Quantifying security and resilience of Chinese coastal urban ecosystems. Science of the Total Environment, 2019, 672: 51-60.
- [44] 田贵良, 盛雨, 吴继云, 卢曦. 最严格水资源管理制度对长江经济带水资源利用效率的影响研究. 南京工业大学学报: 社会科学版, 2020, 19(5): 90-103, 116-116.
- [45] 张翔宇, 李玉娟, 张国玉, 姜秋, 孙闻, 靳顶. 最严格水资源管理制度对工业用水效率的影响. 长江科学院院报, 2020, 37(5): 23-27.
- [46] 王苗, 吕桅桅, 王凯, 马德栗, 万思达. 武汉市酸雨变化特征及影响因子分析. 气象, 2019, 45(2): 282-289.