

防洪综合治理对小清河流域幸福状况的影响

杨程珺¹, 武玮¹, 张文飞², 刘笑语¹

(1. 济南大学 水利与环境学院, 山东 济南 250022; 2. 山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心, 山东 济南 250100)

摘要: [目的] 明确防洪综合治理工程对河流幸福状况提升的影响, 提升幸福河建设水平, 为山东省河流幸福河评价与建设提供理论依据。[方法] 本研究以小清河为研究对象, 从水安全、水资源、水环境、水生态和水文化 5 个准则层选取 20 个评价指标, 建立了基于“目标层—准则层—指标层”的多层次幸福河评价指标体系, 并进行幸福状况评价, 识别了阻碍幸福河建设的主要障碍因子。运用基于层次分析法和反熵权法的组合赋权法分别确定了城区段和乡村段的指标权重, 采用河流幸福指数进行幸福河评价, 并通过障碍度筛选影响幸福河建设的主要障碍因子。[结果] ① 城区段以水域面积保留率的权重最高, 乡村段以堤岸防洪标准达标率占比最高。② 治理前城区段和乡村段幸福状况分别为幸福和一般偏下等级, 治理后幸福状况均得到提升, 城区段保持幸福等级, 乡村段提升为一般偏上等级。③ 从准则层来看, 影响城区段幸福河建设的主要障碍因子为水资源准则层, 影响乡村段的主要障碍因子主要集中在水安全、水资源和水文化准则层。[结论] 未来提升河流幸福状况需通过水库蓄水、调水等工程措施提高水资源供水能力, 保持河道行洪畅通性和河势稳定, 以保障河流防洪安全。

关键词: 幸福河; 评价体系; 反熵权法; 组合赋权法; 小清河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0234-09

中图分类号: TV213.4

文献参数: 杨程珺, 武玮, 张文飞, 等. 防洪综合治理对小清河流域幸福状况的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 234-242. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.025; Yang Chengjun, Wu Wei, Zhang Wenfei, et al. Impacts of comprehensive flood control management on happiness level of Xiaoqing River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 234-242.

Impacts of Comprehensive Flood Control Management on Happiness Level of Xiaoqing River Basin

Yang Chengjun¹, Wu Wei¹, Zhang Wenfei², Liu Xiaoyu¹

(1. School of Water Resources and Environment, Jinan University, Jinan, Shandong 250022, China; 2. Haihe Xiaoqing River Basin Water Conservancy Management Service Center, Shandong Province, Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract: [Objective] The impact of comprehensive flood control projects on the improvement of river happiness was analyzed in order to improve the construction level of happy rivers, and provide a theoretical basis for the evaluation and construction of happy rivers in Shandong Province. [Methods] Taking Xiaoqing River basin as the research object, a multi-level happy river evaluation index system, based on the “goal layer-criteria layer-index layer” was established, including 20 indices from 5 criteria layers; water safety, water resources, water environment, water ecology, and water culture. It also evaluated the state of well-being and identified the main obstacles that hindered the construction of happy rivers. A combination weighting method based on the analytic hierarchy process and reverse entropy weight method was applied to determine the indices weights at urban and rural sections and identify the main obstacles affecting the construction of happy rivers through the obstacle degree. [Results] ① Watershed area retention had the highest weight in the urban section, and the percentage of levee flood defense standard compliance had the highest weight in the rural section. ② Before the construction of the flood control project, the happiness

收稿日期: 2024-05-06

修回日期: 2024-06-14

资助项目: 小清河防洪综合治理工程科学研究试验项目“基于小清河流域的“幸福河”综合评价理论及驱动机制研究”(XQHFHZZL-KY202003)

第一作者: 杨程珺(2000—), 女(汉族), 山东省临沂市人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。Email: ferry0125@163.com。

通信作者: 武玮(1987—), 女(汉族), 山东省青岛市人, 博士, 副教授, 主要从事水文学及水资源方面的研究。Email: stu_wuw@ujn.edu.cn。

levels of the urban and rural sections were generally lower. After construction, the happiness levels in both sections improved; happiness was maintained in the urban section and improved to a generally higher level in the rural section. ③ In the criteria layer, the main obstacle affecting the construction of happy rivers in the urban section focused on the water resource layer, and the main obstacle affecting the rural section focused on the water safety, water resources, and water culture layers. [Conclusion] To improve the happiness level of rivers, it is necessary to enhance the water supply capacity through reservoir storage and water diversion projects, maintain a smooth flow in flood channels, and stabilize river courses to ensure flood control safety.

Keywords: happy river; evaluation system; anti-entropy method; combination weighting method; Xiaoqing River basin

在气候变化和经济社会发展的双重影响下,人类对河流高强度的开发利用,导致河流出现水资源量锐减、水质恶化、生态受损等问题,严重制约经济社会的可持续发展^[1-2]。为协调经济社会可持续发展和河流健康的关系,中国持续探索生态环境保护的新举措,从水生态文明建设、海绵城市、河长制到幸福河建设等,其目的均是为了改善河流水环境,营造人水和谐的生态环境^[3]。幸福河立足于国家战略,是新时代生态文明和经济社会可持续发展的重要保障^[4]。因此,科学合理地评价河流幸福状况及与经济社会的协调程度,并识别主要的障碍因子是幸福河建设的首要基础。

自幸福河提出以来,国内学者从理解幸福河的概念内涵出发,分别从评价指标体系、评价方法等方面进行了诸多研究。左其亭等^[5]、李先明^[6]、贡力等^[7]先后对幸福河的概念内涵进行了解析,虽然不同学者对其有不同的理解和认识,但都强调在河流健康的基础上关注人民幸福感的需求。结合已有幸福河定义,本研究认为幸福河就是造福人民的河流,具体是指能够维持河流自身健康,支撑流域和区域经济社会高质量发展,实现人水和谐,让流域内人民具有高度安全感、获得感与满意感的河流。目前幸福河评价已陆续在黄河、长江、汉江等开展研究^[8-10],总结已有研究,幸福河评价技术仍无统一公认的标准,多参考目前较为成熟的河流健康评价技术,常采用指标体系法,即建立评价指标体系—确定指标权重—综合评价的思路。评价指标多采用多层次级指标体系,虽然指标选取的侧重点各有不同,但是均体现了人水和谐发展。例如韩宇平等^[11]、王子悦等^[12]从流域自然属性、社会经济属性、人水和谐关系等方面构建指标体系,贡力等^[7]重点考虑了生存、生态和发展需求等方面需求,中国水利水电科学研究院幸福河湖研究课题组^[13]则从安澜之河、富民之河、宜居之河、生态之河和文化之河 6 个方面建立指标体系。常见的权重确定方法有层次分析法、模糊综合评价法、熵权法、云模型、粒子群优化投影寻踪等,以层次分析法为代表的主观法存在一定的主观片面性^[14],以熵权法等代表的客观方法考虑了实际观测数据的变化特征,对数据量要求适

中^[15],以云模型等为代表的方法对数据量要求高,实际中应用困难^[16],因此本研究采用主客观相结合的组合赋权法进行权重确定,层次分析法忽视了数据的客观性,而反熵权法得出的权重未考虑决策偏向,将二者相结合的组合赋权法可得到较为客观的综合权重,结果更加合理。

小清河流经济南市城区,对沿线城市乃至山东省经济社会可持续发展具有重要作用。经过 1996 和 2006 年等多次综合治理,河流水环境质量得到明显改善,但部分河段仍存在水质较差、防洪标准较低等问题,与幸福河建设目标仍存在一定的差距^[17]。小清河是典型平原型河流,人类干扰剧烈,河流区域差异性显著,已有的评价体系和方法在该河流的适用性有待验证。因此,本研究拟结合小清河流域与经济社会发展现状,建立幸福河评价指标技术方法,通过障碍因子分析,识别阻碍幸福河建设的主要障碍因子,为幸福河建设指明方向,也可为山东省河流幸福河评价与建设提供一定的理论依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

小清河干流(图 1)发源于济南市槐荫区,自西向东流经章丘、滨州、淄博、东营等县市,于潍坊和寿光市入海,全长 237 km,兼具水陆联运、海河联运、农田灌溉等多功能于一体的河流,对鲁中地区乃至全省的经济社会发展意义重大。流域水系复杂,呈典型的单侧梳齿状水系分布,其中一级支流共 46 条,包含较大支流 9 条,沿河湖泊洼地较多,主要有白云湖、马踏湖、巨淀湖等。从河流源头到河口,河道地貌、水文条件等各有不同,且涉及湖泊、湿地、河口等多个系统,生态系统状况存在较大的区域差异性,上游位于济南市区,中下游多流经乡镇村庄^[18],经济社会发展状况和居民对幸福河的需求存在一定差异。结合行政区域,将河流分为济南段、章丘段、滨州段、淄博段、东营段和潍坊段,其中济南段明显以城乡、工矿、居民用地为主,视为城区段,而其余河段主要流经乡村,河流两岸以耕地为主,因此视为乡村段,分别进行评价。

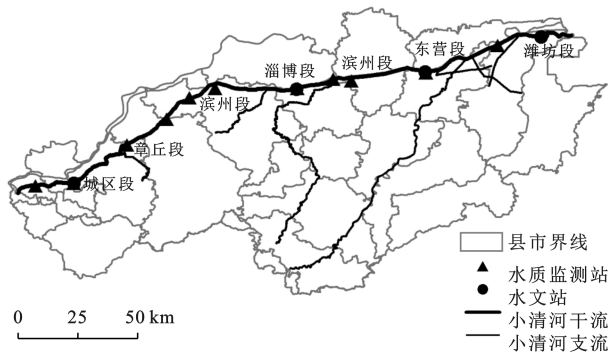


图 1 小清河不同分段监测断面分布情况

Fig.1 Distribution of monitoring sections in different segments of Xiaoqing River

1.2 数据来源

为保障小清河流域防洪安全和经济社会发展,山东省于 2019 年 12 月启动小清河防洪综合治理工程,

重点从河道堤防工程、分洪工程和蓄滞洪工程 3 个方面进行治理,工程于 2022 年底主体工程完工。为评价小清河防洪综合治理工程对小清河流域幸福河建设的影响,分别选取 2018 年和 2020 年作为工程治理前,2022 年作为工程治理后分别进行评价。评价指标计算数据主要来源 5 大类,分别是公报、年鉴、报告、实测数据和调查类数据,公报类包括各地市水资源公报、水土保持公报、生态环境公报、水旱防御灾害防御公报等,年鉴类包括各地市统计年鉴、各省水利年鉴等,报告类包含山东省第 3 次水资源调查评价报告、小清河城区段省级美丽示范河湖建设实施方案等,该数据主要由山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心提供。实测数据包括土地利用类型、部分断面水质数据、流量数据等,具体来源见表 1。其中调查类数据包括调查问卷、生态岸线调查、水工建筑物调查等。

表 1 小清河幸福状况评价指标体系中实测数据的来源

Table 1 Source of measured data in evaluation index system of happiness status of Xiaoqing River

数据类型	时间	代表站点	数据来源
土地利用	2018,2020,2022 年	全流域	中国科学院资源环境科学与数据中心,分辨率 30×30 m(https:// www.resdc.cn/)
历史水质数据	2019—2020 年	吴家铺、黄台桥、柴庄闸、五龙堂、水牛韩闸、岔河、西闸、博昌桥、石村、侯辛庄	山东省生态环境厅
现状水质数据	2021—2022 年	岔河、石村、王道闸、羊角沟	野外调查采样
流量数据	1956—2022 年	黄台桥、桓台、石村	水文年鉴

2 评价模型建立

2.1 评价指标体系构建

参考《河湖健康评价指南(试行)》和国内外相关文献^[19-22],结合流域生态环境和经济社会特征,构建了“目标层—准则层—指标层”的多层次幸福河评价指标体系。城区段和乡村段选用一套评价指标体系,均以幸福河指数为目标层,以水安全、水资源、水环境、水生态和水文化为准则层,共包含 20 个指标,指标含义和计算方法见表 2。

2.2 指标权重的确定

由于城区段和乡村段对幸福河建设的要求侧重略有不同,因此两个河段的权重应分别计算,本研究采用改进层次分析法和反熵权法分别计算主客观权重,最后用拉格朗日乘子法进行主客观组合赋权计算综合权重。

(1) 改进层次分析法。根据重要性标度法,对同一层次内的指标进行两两比较,明确指标的相对重要性程度,确定判断矩阵,并采用归一化方法计算评价指标的主观权重,具体可参考相关文献^[23]。

(2) 反熵权法(AEW)。是基于传统熵权法改进的一种赋权方法,能直接反映系统信息的变化,表征系统的无序程度,较好地反映指标间差异特征^[24]。具体计算步骤如下:

① 计算各指标反熵值 h_j 。

$$h_j = - \sum_{k=1}^n r_{jk} \ln(1 - r_{jk}) \quad (1)$$

$$r_{jk} = \frac{v_{jk}}{\sum_{k=1}^n v_{jk}} \quad (2)$$

式中: h_j 为第 j 指标的反熵值; v_{jk} 为第 j 指标 k 地区的数值;

② 计算客观权重 w'_j 。

$$w'_j = \frac{h_j}{\sum_{j=1}^m h_j} \quad (3)$$

(3) 拉格朗日乘子法组合权重。基于此方法对主观权重和客观权重进行综合,计算方法为^[25]:

$$\bar{w}_j = \frac{\sqrt{w_j w'_j}}{\sum_{j=1}^m \sqrt{w_j w'_j}} \quad (4)$$

式中: w_j 与 w'_j 分别为层次分析法和反熵权法的第 j 项指标权重; \bar{w}_j 为第 j 项指标的综合权重。

表 2 幸福河评价指标体系
Table 2 Evaluation index system of happy river

目标层	准则层	指标	指标方向	计算方法
幸福河指数 A	水安全 B ₁	堤岸防洪标准达标率 C ₁₁ /%	正向	达标堤段长度/规划堤防总长度
		水工建筑物安全稳定率 C ₁₂ /%	正向	结构稳定且运行安全的水工建筑物个数/水工建筑物总数
		河道行洪畅通性 C ₁₃ /%	正向	满足行洪能力的河道长度/干流河道总长度
		洪涝灾害经济损失率 C ₁₄ /%	逆向	当年因洪涝灾害直接经济损失/流域范围内当年 GDP
	水资源 B ₂	农村自来水普及率 C ₂₁ /%	正向	农村自来水人口数/农村总人口数
		实际灌溉水利用系数 C ₂₂ /%	正向	(渠系利用系数×田间水利用系数)/0.9
		单位国内生产总值用水量 C ₂₃ /(10 ⁴ m ³ ·亿元 ⁻¹)	逆向	年总用水量/GDP
	水环境 B ₃	水资源开发利用率 C ₂₄ /%	正向	年供水量/水资源总量
		地下水开采系数 C ₂₅ /%	逆向	区域浅层地下水总开采量/区域地下水可开采量
		流域内市控以上断面水质达标率 C ₃₁ /%	正向	市控以上断面水质达标个数/水质监测断面总数
		地表水集中式饮用水水源地合格率 C ₃₂ /%	正向	地表水集中式饮用水水源地合格个数/地表水集中式饮用水水源地总数
	水生态 B ₄	污水达标处理率 C ₃₃ /%	正向	污水处理量/污水排放总量
		亲水设施覆盖率 C ₃₄ /%	正向	滨水绿道、亲水公园、小广场等沿河流覆盖长度/河道总长度
		河湖生态流量达标率 C ₄₁ /%	正向	满足生态流量目标的控制断面(点位)数/评价断面(点位)数量
		水域面积保留率 C ₄₂ /%	正向	水域空间面积/20 世纪 80 年代水域空间面积
生态岸线比例 C ₄₃ /%		正向	河湖生态岸线长度/河流岸线总长度	
水文化 B ₅	水生生物完整性指数 C ₄₄ /%	正向	现状调查种类数量/历史参考鱼类数量	
	水文化传承载体数量 C ₅₁ /个	正向	受保护的历史文化遗产个数+现代水文化载体个数	
	水文化影响力 C ₅₂ /次	正向	年内水文化宣传次数	
		公众满意度 C ₅₃ /%	正向	调查问卷计算平均分

2.3 幸福指数分级标准

河流幸福指数从水安全、水资源、水环境、水生态和水文化 5 个准则层进行评价,计算公式如下:

$$RHI = \sum_{i=1}^5 F_i W_i^f \quad (5)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^n S_{ij} W_{ij}^s \quad (6)$$

式中:RHI 为河流幸福指数; F_i 为第 i 个准则层得分; W_i^f 为第 i 个准则层权重; S_{ij} 为第 i 个准则层内第 j 个指标得分; W_{ij}^s 为第 i 个准则层内第 j 个指标权重, n 为准则内指标总数。

借鉴《世界幸福报告》及国民幸福划分标准,河流幸福指数评价实行百分制,分为很幸福、幸福、一般偏上、一般偏下和不幸福 5 个等级^[26],分别对应区间 [100,90],(90,80],[80,70],[70,60]和(60,30]。

2.4 障碍度计算

采用障碍度因子筛选影响幸福河建设绩效的主要障碍因子,障碍度 O_j 表示层级或各指标对幸福河建设绩效影响程度的高低^[8],计算公式如下:

$$O_j = \frac{I_j \cdot F_j}{\sum_{j=1}^m (I_j \cdot F_j)} \times 100\% \quad (7)$$

式中:F_j 为因子贡献度,表示各指标对总目标的重要程度,一般为各指标权重; I_j 为因子偏离度,表示各指标实际值与最优目标值之间的差值,正向指标为

1 与指标标准化之差,逆向指标为指标标准化与 0 之差。

2.5 耦合协调度计算

耦合协调度(D)反映了河流幸福指数与区域经济社会发展的协调程度,计算公式如下:

$$D = \sqrt{T \cdot C} \quad (8)$$

$$T = \alpha U_i + \beta U_j \quad (9)$$

$$C = \left\{ \left[\frac{U_i \cdot U_j}{(U_i + U_j)^2} \right]^2 \right\} k \quad (10)$$

式中:T 为综合协调指数; C 为耦合度; α 与 β 为待定系数,一般取 0.5; U_i 代表河流幸福指数; U_j 代表城市化水平指数,本研究使用城镇化水平表征,即非农业人口占总人口的比例。耦合度 C 越高,代表 2 个系统之间的相互作用程度越高, k 为调节系数,一般取值为 0.5;耦合协调度 D 越高,代表 2 个系统之间动态演化的程度越高,根据 D 值将耦合协调状态分成优质协调、中度协调、勉强协调、中度失调和严重失调 5 类^[27],分别对应区间(0.8,1.0],[0.6,0.8],[0.4,0.6],[0.2,0.4]和(0,0.2]。

3 结果与分析

3.1 指标权重

小清河城区段和乡村段指标层的综合权重详见

表 3。从准则层来看,城区段以水资源权重最高,为 0.24,其次为水安全权重为 0.217,水生态和水环境权重分别为 0.198 和 0.192,水文化最低为 0.153;乡村段同样以水资源权重最高,为 0.26,其次为水安全和水环境,分别为 0.248,0.189,水生态权重为 0.176,水文化权重仅为 0.126。指标层中城区段以水域面积保留率、堤岸防洪标准达标率和单位国内生产总值用水量的权重最高,分别为 0.063,0.061 和 0.060,其余指标层权重相差不大;乡村段以堤岸防洪标准达标率比例最高为 0.072,水工建筑物安全稳定率、洪涝灾害经济损失率、单位国内生产总值用水量的权重均在 0.060 以上,而公众满意度权重最低仅为 0.035。综上,对于城

区段和乡村段,水资源和水安全准则层的权重均最大,其次是水安全准则层,主要是小清河流域水资源条件先天不足,用水量较大,因此水资源准则层权重最大;城区段的水环境和水生态准则层的权重相差不大,主要由于城区段自 1996 年进行了多次污染综合治理,河流水环境质量和水生态状况改善明显,因此二者相差不大。乡村段整体经济结构偏重,支流纳污量较大,水环境质量虽有较大提升,但压力依旧较大,水生态状况较差,加上当地人民的水生态保护意识不强,因此水环境准则层权重高于水生态。由于经过多年建设,小清河流域的历史文化与景观融为一体,水文化宣传次数较多,城市居民对生态文明建设重视,城区段水文化权重更高。

表 3 小清河流域幸福河评价指标权重

Table 3 Weighting of evaluation indicators for happiness river in Xiaoqing River basin

指标层	城区段			乡村段		
	主观	客观	综合权重	主观	客观	综合权重
堤岸防洪标准达标率 C_1	0.083	0.043	0.061	0.115	0.043	0.072
水工建筑物安全稳定率 C_2	0.070	0.043	0.056	0.080	0.043	0.061
河道行洪畅通性 C_3	0.058	0.043	0.051	0.067	0.043	0.055
洪涝灾害经济损失率 C_4	0.040	0.059	0.049	0.058	0.059	0.060
农村自来水普及率 C_5	0.057	0.043	0.050	0.065	0.043	0.054
实际灌溉水利用系数 C_6	0.048	0.043	0.046	0.053	0.043	0.049
单位国内生产总值用水量 C_7	0.040	0.087	0.060	0.046	0.087	0.065
水资源开发利用率 C_8	0.034	0.055	0.044	0.038	0.055	0.047
地下水开采系数 C_9	0.032	0.049	0.040	0.038	0.049	0.045
流域内市控以上断面水质达标率 C_{10}	0.067	0.043	0.055	0.064	0.043	0.054
地表水集中式饮用水水源地合格率 C_{11}	0.057	0.043	0.050	0.054	0.043	0.049
污水达标处理率 C_{12}	0.046	0.043	0.045	0.044	0.043	0.045
亲水设施覆盖率 C_{13}	0.040	0.043	0.042	0.038	0.043	0.041
河湖生态流量达标率 C_{14}	0.056	0.043	0.050	0.043	0.043	0.044
水域面积保留率 C_{15}	0.049	0.079	0.063	0.038	0.079	0.056
生态岸线比例 C_{16}	0.041	0.047	0.045	0.032	0.047	0.040
水生生物完整性指数 C_{17}	0.034	0.045	0.040	0.027	0.045	0.036
水文化传承载体数量 C_{18}	0.053	0.064	0.059	0.039	0.064	0.051
水文化影响力 C_{19}	0.053	0.044	0.049	0.034	0.044	0.040
公众满意度 C_{20}	0.045	0.043	0.045	0.027	0.043	0.035

3.2 治理前后小清河流域幸福状况对比

治理前 2018 年与 2020 年小清河幸福流域指数得分对比见图 2。各段的幸福状况并无明显变化,而经过小清河防洪综合治理工程,2022 年各段幸福状况均有所提升(图 2),其中城区段均为幸福等级,治理前后无明显变化。因此重点以 2020 年和 2022 年为主进行分析,从准则层来看(图 3),治理后仅水生态和水文化有轻微提升,水安全和水环境基本无变化,水资源轻微下降。小清河城区段分别于 1996 和 2006 年对水污染状况和防洪安全进行综合治理,治

理后堤岸防洪标准已达到百年一遇标准,因此水安全已处于幸福等级,同时伴随着城区段水环境治理力度不断加强以及污水处理和中水回用等相关政策支持,水环境质量持续改善,尤其自 2021 年辛丰庄断面水质稳定在Ⅲ类水以上^[28],水环境处于幸福等级,而本次小清河防洪综合治理工程主要集中在乡村段,因此城区段幸福指数提升不大。

乡村段幸福指数提升明显,章丘段治理后幸福指数由 78.87 分提升为 83.3 分,由一般偏上提升为幸福等级,其中水安全和水文化提升明显,其幸福程度主

要受水资源和水生态的影响。滨州段治理后幸福指数为 76.43 分,河流幸福状况由一般偏下上升为一般偏上等级,各个准则层均有所提升,其中水文化提升较为明显,由于治理成果较显著,公众对该段的满意度有较大提高。淄博段治理后幸福指数由 76.66 分提升为 82.95 分,由一般偏上上升为幸福等级,其中水文化提升显著,其次是水安全和水资源,水环境和水生态提升很小,另外该河段水生态分数较低,仅为 59.8 分,主要由于该地区整体水域面积保留率严重降低,生物多样性不高。东营段治理后幸福指数为 71.26 分,河流幸福状况由一般偏下上升为一般偏上等级,准则层的提升主要集中在安全、水文化和水生态。潍坊段治理后幸福指数为 71.86 分,河流幸福状况为一般偏上等级,除水环境外,其余准则层均有明显提升。乡村段幸福指数以章丘段和淄博段最高,其次为滨州段,潍坊段和东营段最低,治理后幸福指数的显著提升主要受防洪安全效果提升影响,其次为水文化,说明工程治理措施和政府相关政策对小清河

流域幸福指数提升影响较大,同时水生态、水文化的稳固提升与政府相关政策、公众水生态环境意识水平等关系密切。

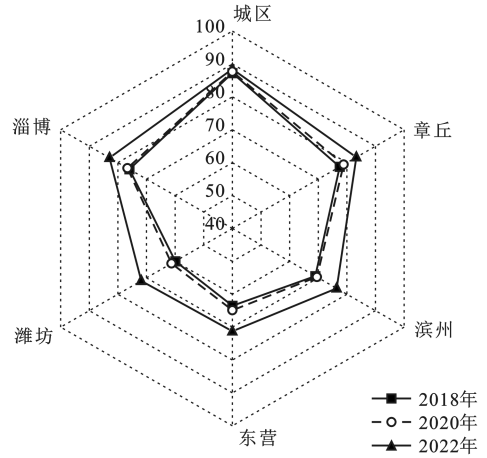


图 2 小清河流域治理前后不同河段幸福指数评价得分对比
Fig.2 Comparison of happiness index evaluation scores of different sections of Xiaoqing River basin before and after governance

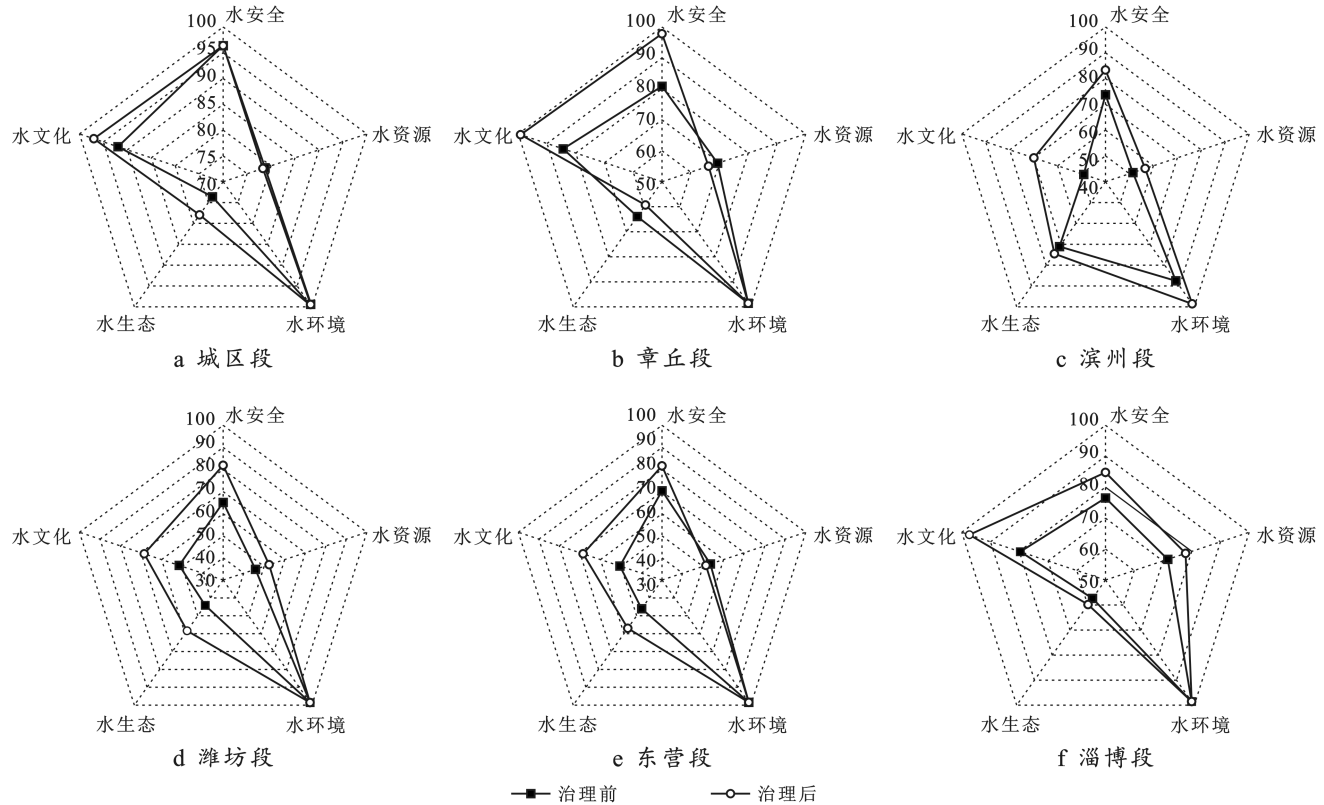


图 3 小清河流域各河段治理前后不同准则层得分对比

Fig.3 Comparison of scores of different criterion layers of each section of Xiaoqing River basin before and after governance

3.3 河流幸福与区域经济社会发展协调度分析

小清河流域河流幸福与区域经济社会发展耦合协调度结果如图 4 所示。治理前城区段、章丘段和潍坊段均为优质协调,其余河段为中度协调;治理后各河段耦合协调度均得到提升,除滨州段,其余河段均

处于优质协调状态,说明防洪治理工程有助于实现城市发展与幸福河建设的耦合协调发展。城区段的耦合协调度比乡村段高,主要由于城区段的水生态环境治理措施和治理效果相对乡村段河流更好,未来需要结合不同河段情况分别从产业结构、水污染、水生态

等方面进行治理,确保维持河流幸福指数与城市化协调发展的状态,以实现社会经济与水环境的良性可持续发展^[29]。

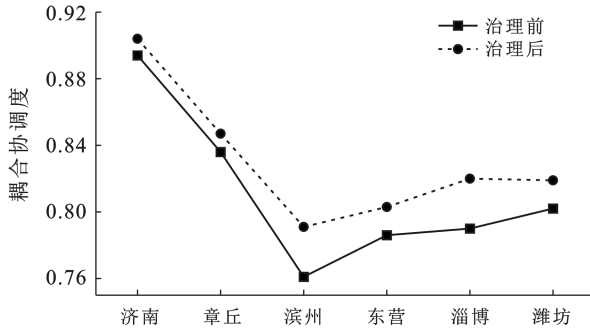


图 4 小清河流域各河段治理前后协调度对比

Fig.4 Comparison of coordination degrees of each section of Xiaoqing River basin before and after governance

3.4 幸福河建设问题分析

根据障碍因子评价结果(表 4),影响小清河城区

段幸福河建设的主要障碍因子为农村自来水普及率、实际灌溉水利用系数和水资源开发利用效率,主要集中在水资源准则层。城区段水资源条件先天不足,供需矛盾突出,人均水资源占有量仅占全国平均值的 1/10,水资源开发利用较高,城市供水水源主要依靠黄河,供水能力严重不足,未来需进一步提高用水保障^[30]。

乡村段的主要障碍因子有一定的相似性,影响章丘段的主要障碍因子为农村自来水普及率、水生生物完整性指数、公众满意度,需重点关注水资源和水生态准则层;滨州段主要为堤岸防洪标准达标率和水文化传承载体数量;淄博段和东营段的主要障碍因子均为洪涝灾害经济损失率和水文化传承载体数量;潍坊段的主要障碍因子则为堤岸防洪标准达标率、水工建筑物安全稳定率和河道行洪畅通性。滨州至潍坊段主要障碍因子较为相似,主要集中在水安全、水资源和水文化准则层。

表 4 小清河流域幸福指数障碍因子评价结果

Table 4 Evaluation results of obstacle factors for happiness index in Xiaoqing River basin

%

指标层	济南	章丘	滨州	淄博	东营	潍坊
堤岸防洪标准达标率 C_1	0.00	0.00	11.32	8.95	6.21	10.34
水工建筑物安全稳定率 C_2	0.00	0.00	9.43	8.70	6.04	12.06
河道行洪畅通性 C_3	0.00	0.00	9.43	8.70	9.05	12.06
洪涝灾害经济损失率 C_4	0.00	4.06	7.55	10.44	14.49	9.65
农村自来水普及率 C_5	34.71	13.53	2.14	0.00	4.83	9.65
实际灌溉水利用系数 C_6	19.45	10.41	7.15	6.96	0.00	6.45
单位国内生产总值用水量 C_7	0.00	2.42	7.55	6.96	5.65	1.10
水资源开发利用效率 C_8	29.96	9.43	4.57	5.22	4.23	0.00
地下水开采系数 C_9	0.00	10.45	0.00	0.00	7.24	6.51
流域内市控以上断面水质达标率 C_{10}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
地表水集中式饮用水水源地合格率 C_{11}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
污水达标处理率 C_{12}	0.00	6.76	4.40	6.96	4.22	5.63
亲水设施覆盖率 C_{13}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
河湖生态流量达标率 C_{14}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
水域面积保留率 C_{15}	15.88	10.47	7.55	6.96	6.67	8.10
生态岸线比例 C_{16}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
水生生物完整性指数 C_{17}	0.00	16.24	4.39	4.05	4.21	5.61
水文化传承载体数量 C_{18}	0.00	0.00	11.32	10.44	10.86	0.00
水文化影响力 C_{19}	0.00	0.00	9.43	8.70	9.05	8.04
公众满意度 C_{20}	0.00	16.24	3.77	6.96	7.24	4.82

章丘段受经济发展影响,河湖萎缩,湿地退化,整体水域面积保留率严重降低;生物多样性不高,水生生物完整性有待提高^[31]。其他河段水安全问题主要为堤岸防洪标准达标率偏低,行洪能力弱,部分水工建筑物带病运行,河道除涝标准低,应对洪涝灾害的能力和恢复能力有待提升。而水资源问题主要是供水水源依靠地表水和地下水,缺少备用水源,供水能力严重不足,遭遇连续枯水年份抗风险能力较弱^[32]。

乡村段水文化建设有待进一步推进,公众对历史文化遗产、水文化载体等认知较少,根据调查,公众对水文化载体、河流治理相关政策了解较少,水文化传播影响力有待提高。

4 结论

本研究以小清河为研究对象,构建了基于“目标层—准则层—指标层”的多层次评价体系,从水安全、

水资源、水环境、水生态和水文化 5 个准则层选取 20 个指标,并分别对城区段和乡村段的幸福状况进行了评价,得出以下结论。

(1) 城区段以水域面积保留率的权重最高,准则层则以水资源、水安全和水生态权重较大。乡村段以堤岸防洪标准达标率占比最高,主要受水资源、水安全和水环境准则层内指标的影响。

(2) 经过小清河防洪综合治理工程,河流幸福状况均得到提升,城区段幸福指数最高,为幸福等级,乡村段幸福指数提升明显,东营段、滨州段和潍坊段均为一般偏上等级。从准则层来看,水文化和水安全提升明显,未来提高河流幸福指数需重点改善水生态健康状况,提高水资源开发利用对经济社会发展的支撑作用。

(3) 由于城区段水资源条件先天不足,供需矛盾突出,影响城区段幸福河建设的主要障碍因子为水资源准则层的农村自来水普及率和水资源开发利用。未来应充分挖掘现有水源调蓄工程供水潜力,加强雨水洪水资源利用,提升水资源调蓄能力。影响乡村段的主要障碍因子主要集中在水安全、水资源和水文化准则层,其中堤岸防洪标准达标率偏低。未来应重点提升应对洪涝灾害的能力和恢复能力,加强河道防洪治理,定期对干流河段进行河道清淤疏通,提升城市排涝防涝水平。依托小清河流域历史文化底蕴,有机融合水工程与水文化,积极推进水文化建设。

参考文献 (References)

- [1] 杨文慧,杨宇.河流健康概念及诊断指标体系的构建[J].水资源保护,2006,22(6):28-30.
Yang Wenhui, Yang Yu. Concept and assessment indicator system of river health [J]. Water Resources Protection, 2006,22(6):28-30.
- [2] Ding Rui, Yu Kai, Fan Ziwu, et al. Study and application of urban aquatic ecosystem health evaluation index system in river network plain area [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022,19(24):16545-16555.
- [3] 张宇航,渠晓东,彭文启,等.北京市河流生态系统健康评价[J].环境科学,2023,44(10):5478-5489.
Zhang Yuhang, Qu Xiaodong, Peng Wenqi, et al. Health assessment of the stream ecosystem in Beijing, China [J]. Environmental Science, 2023,44(10):5478-5489.
- [4] 鞠茜茜,柳长顺.幸福河评价方法研究进展[J].人民黄河,2023,45(3):7-12.
Ju Qianqian, Liu Changshun. Research progress of happy river evaluation method [J]. Yellow River, 2023,45(3):7-12.
- [5] 左其亭,郝明辉,姜龙,等.幸福河评价体系及其应用[J].水科学进展,2021,32(1):45-58.
Zuo Qiting, Hao Minghui, Jiang Long, et al. Happy river evaluation system and its application [J]. Advances in Water Science, 2021,32(1):45-58.
- [6] 李先明.幸福河的文化内涵及其启示[J].中国水利,2020(11):55-59.
Li Xianming. Cultural connotation of happy river and its enlightenment [J]. China Water Resources, 2020(11):55-59.
- [7] 贡力,田洁,靳春玲,等.基于 ERG 需求模型的幸福河综合评价[J].水资源保护,2022,38(3):25-33.
Gong Li, Tian Jie, Jin Chunling, et al. Comprehensive evaluation of happy river based on ERG demand model [J]. Water Resources Protection, 2022,38(3):25-33.
- [8] 靳春玲,李燕,贡力,等.基于 UMT 模型的幸福河绩效评价及障碍因子诊断[J].中国环境科学,2022,42(3):1466-1476.
Jin Chunling, Li Yan, Gong Li, et al. Performance evaluation and obstacle factor diagnosis of happy river based on UMT [J]. China Environmental Science, 2022,42(3):1466-1476.
- [9] 杨谦.推进生态流量管理全覆盖维护长江健康水生态[J].中国水利,2020(15):40-43.
Yang Qian. Boost the full coverage of ecological flow management and preserve healthy water ecology of the Yangtze River [J]. China Water Resources, 2020(15):40-43.
- [10] 王何予,郭生练,王俊,等.“幸福河”综合评价指标体系研究:以汉江湖北省域为例[J].水文,2023,43(2):35-40.
Wang Heyu, Guo Shenglian, Wang Jun, et al. Comprehensive “happy river” evaluation system: A case study of Hanjiang River in Hubei Province [J]. Journal of China Hydrology, 2023,43(2):35-40.
- [11] 韩宇平,夏帆.基于需求层次论的幸福河评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(4):1-7.
Han Yuping, Xia Fan. Evaluation of Xingfu River based on demand level theory [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020,18(4):1-7.
- [12] 王子悦,徐慧,黄丹姿,等.基于熵权物元模型的长三角幸福河层次评价[J].水资源保护,2021,37(4):69-74.
Wang Ziyue, Xu Hui, Huang Danzi, et al. Hierarchy evaluation of Happy River in the Yangtze River delta based on entropy weight and matter element model [J]. Water Resources Protection, 2021,37(4):69-74.
- [13] 幸福河研究课题组.幸福河内涵要义及指标体系探析

- [J].中国水利,2020(23):1-4.
- Research group of the happy river. Analysis of the connotation and index system for the happy river [J]. China Water Resources, 2020(23):1-4.
- [14] 金菊良,刘东平,周戎星,等.基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型[J].水资源保护,2021,37(3):1-6.
- Jin Juliang, Liu Dongping, Zhou Rongxing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization [J]. Water Resources Protection, 2021,37(3):1-6.
- [15] Chen Yiqing, Wang Deyun, Zhang Ludan, et al. Flood risk assessment of Wuhan, China, using a multi-criteria analysis model with the improved AHP-Entropy method [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023,30(42):96001-96018.
- [16] 唐新玥,唐德善,常文倩,等.基于云模型的区域河长制考核评价模型[J].水资源保护,2019,35(1):41-46.
- Tang Xinyue, Tang Deshan, Chang Wenqian, et al. Evaluation model of regional river chief system based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2019,35(1):41-46.
- [17] 韩笑宇,武玮,李振卿,等.变化环境下小清河干流健康综合评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(3):570-580.
- Han Xiaoyu, Wu Wei, Li Zhenqing, et al. Comprehensive health assessment in the main stream of the Xiaoqing River under the changing environment [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023,21(3):570-580.
- [18] 范新风,韩美,王磊,等.小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析[J].环境科学,2020,41(4):1619-1628.
- Fan Xinfeng, Han Mei, Wang Lei, et al. Analysis of water quality change and its driving factors of the Xiaoqing River Estuary in recent ten years [J]. Environmental Science, 2020,41(4):1619-1628.
- [19] Li Jie, Huang Lintong, Zhu Kai. Ecological health assessment of an urban river: The case study of Zhengzhou City, China [J]. Sustainability, 2023,15(10):8288-8301.
- [20] Shan Chengju, Dong Zengchuan, Lu Debao, et al. Study on river health assessment based on a fuzzy matter-element extension model [J]. Ecological Indicators, 2021,127:107742-107750.
- [21] Yang Yonglin, Cao Hongye, Xia Yuyun, et al. Assessing ecological health in a semi-arid basin: A case study of the Wei River basin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31 (14): 21687-21708.
- [22] Fang Y X, Liu G J, Liu R J. Fish community structure and ecological health assessment of the Shuaishui River basin, China [J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2021,20(1):153-161.
- [23] 金菊良,魏一鸣,丁晶.基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J].水利学报,2004,35(3):65-70.
- Jin Juliang, Wei Yiming, Ding Jing. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,35(3):65-70.
- [24] 向思阳,蔡泽祥,刘平,等.基于 AHP-反熵权法的配电网低碳运行模糊综合评价[J].电力科学与技术学报,2019,34(4):69-76.
- Xiang Siyang, Cai Zexiang, Liu Ping, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the low-carbon operation of distribution network based on AHP-anti-entropy method [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019,34(4):69-76.
- [25] 马纪,刘希喆.基于序关系-熵权法的低压配网台区健康状态评估[J].电力系统保护与控制,2017,45(6):87-93.
- Ma Ji, Liu Xizhe. Evaluation of health status of low-voltage distribution network based on order relationship-entropy weight method [J]. Power System Protection and Control, 2017,45(6):87-93.
- [26] 张民强,胡敏杰,董良,等.浙江省河湖幸福指数评估指标体系与评估方法探讨[J].浙江水利科技,2021,49(4):1-3.
- Zhang Minqiang, Hu Minjie, Dong Liang, et al. Discussion on evaluation index system and evaluation method of river and lake happiness index in Zhejiang Province [J]. Zhejiang Hydraulics, 2021,49(4):1-3.
- [27] Zhang Jingqi, Jiang Shaohua. Evaluation of sustainable development capacity of water sources: A case study of China [J]. Water Science & Technology, 2024,89(6):1482-1496.
- [28] 代雪静,姜腾龙,刘杨,等.近二十年小清河济南段污染状况及其趋势分析[J].干旱区资源与环境,2022,36(1):143-150.
- Dai Xuejing, Jiang Tenglong, Liu Yang, et al. Pollution status and trend analysis of Xiaoqing River in Jinan section in recent 20 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022,36(1):143-150.
- [29] 汪顺生,杨金月,王爱丽,等.河南省黄河流域水资源—经济—生态系统耦合协调评价及预测[J].湖泊科学,2022,34(3):919-934.
- Wang Shunsheng, Yang Jinyue, Wang Aili, et al. Evaluation and forecast of coupling coordination of water resources, economy and ecosystem in the Yellow River Basin of Henan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2022,34(3):919-934.

- land use/cover change on terrestrial carbon stocks in Uganda [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2017, 101:195-203.
- [26] 段璇瑜, 龚文峰, 孙雨欣, 等. 海南岛海岸带土地利用变化及其对碳储量时空演变的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5):301-311.
- Duan Xuanyu, Gong Wenfeng, Sun Yuxin, et al. Land use change and its impact on temporal and spatial evolution of carbon storage in coastal zone of Hainan Island [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5):301-311.
- [27] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及预测: 以广东省为例[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10):4827-4839.
- Lin Tong, Yang Muzhuang, Wu Dafang, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: A case study in Guangdong Province [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(10):4827-4839.
- [28] 段璇瑜. 海南岛海岸带土地利用/覆盖变化及其对碳储量影响的评估预测[D]. 海口: 海南大学, 2023.
- Duan Xuanyu. Land use/cover change and its impact on carbon storage in Hainan Island coastal zone [D]. Haikou, Hainan: Hainan University, 2023.
- [29] 傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 等. 耦合 PLUS-InVEST-Geodetector 模型的新疆地区碳储量时空变化及驱动机制分析[J/OL]. *环境科学*. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202309230>.
- FU Kaixiang, JIA Guodong, YU Xinxiao, et al. Analysis of Temporal and Spatial Carbon Stock Changes and Driving Mechanism in Xinjiang Region by Coupled PLUS-InVEST-Geodetector Model[J/OL]. *Environmental Science*. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202309230>.
- [30] 陈竹安, 柳雪. 基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量时空变化与多情景模拟预测: 以江西省为例[J]. *上海国土资源*, 2023, 44(4):146-153.
- Chen Zhu'an, Liu Xue. Spatio-temporal variation and multi-scenario prediction of carbon storage based on the InVEST-PLUS model: A case study of Jiangxi Province [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2023, 44(4):146-153.
- [31] 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 等. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量[J]. *环境科学*, 2023, 44(6):3343-3352.
- Ding Yue, Wang Liuzhu, Gui Feng, et al. Ecosystem carbon storage in Hangzhou Bay area based on InVEST and PLUS models [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(6):3343-3352.
- [32] 王子昊, 王冰, 张宇飞, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的呼和浩特多情景土地利用变化动态模拟及碳储量评估[J/OL]. *农业资源与环境学报*. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0249>.
- Wang Zihao, Wang Bing, Zhang Yufei, et al. Dynamic simulation of multi-scenario land use change and carbon storage assessment in Hohhot City based on PLUS-InVEST model [J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0249>.
- [33] 何磊, 叶思源, 赵广明, 等. 海岸带滨海湿地蓝碳管理的研究进展[J]. *中国地质*, 2023, 50(3):777-794.
- He Lei, Ye Siyuan, Zhao Guangming, et al. Research progress on blue carbon management in coastal wetland ecotones [J]. *Geology in China*, 2023, 50(3):777-794.
- (上接第 242 页)
- [30] 张国栋, 董文平, 刘晓晖, 等. 我国水环境中抗生素赋存、归趋及风险评估研究进展[J]. *环境化学*, 2018, 37(7):1491-1500.
- Zhang Guodong, Dong Wenping, Liu Xiaohui, et al. Occurrence, fate and risk assessment of antibiotics in water environment of China [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(7):1491-1500.
- [31] 丁敬坤, 李加琦, 薛素燕, 等. 莱州湾小清河口近岸海域底栖生境健康评价[J]. *生态学报*, 2021, 41(12):4806-4817.
- Ding Jingkun, Li Jiaqi, Xue Suyan, et al. Health assessment for benthic habitats of macrobenthos in the sea area adjacent to the Xiaoqing River estuary, Laizhou Bay [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(12):4806-4817.
- [32] 刘浦东, 王远轲, 张冬, 等. 基于多源数据的小清河流域生态环境时空变化分析[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(2):600-608.
- Liu Pudong, Wang Yuanke, Zhang Dong, et al. Analysis of temporal and spatial variations of ecological environment in Xiaoqing River basin based on multi-source data [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(2):600-608.