

小清河济南段水生态质量评价体系指标筛选研究

郑琳琳,王光勇,吴慧,王辉,刘建军,张水燕,田勇*

(山东省济南生态环境监测中心,山东 济南 250101)

摘要:小清河是山东省一条防洪除涝、灌溉、航运综合利用河道,科学评价其水生态质量状况可以更好地指导生态修复和复航。该文通过实地监测、分析水质因子与生物多样性指数相关性等方法,从物种、种群和群落水平三个层级筛选适合小清河济南段的生物评价指标。通过耦合理化过程、生境质量与生态组织三级层次的指标响应,构建了一个综合的水生态质量评价体系,并首次应用于小清河济南段的评价。运用水生态质量综合评价体系进行评价,评价结论与小清河水质自源头向下游呈现“高—低—高”的变化趋势基本一致。该研究不仅为小清河流域的生态修复与复航管理提供科学依据,更为我国城市受纳型河流的水生态质量评价提供了方法论参考。

关键词:小清河济南段;水生态质量;评价体系;指标筛选

中图分类号:X826

文献标志码:A

文章编号:1002-4026(2026)03-0075-12

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Index selection for a water ecological quality evaluation system in the Jinan section of Xiaoqing River

ZHENG Linlin, WANG Guangyong, WU Hui, WANG Hui, LIU Jianjun, ZHANG Shuiyan, TIAN Yong*

(Jinan Ecological Environment Monitoring Center, Jinan 250101, China)

Abstract: The Xiaoqing River serves as a multifunctional waterway in Shandong Province, supporting flood control, irrigation, and navigation activities. Accurate evaluation of its water ecological quality is crucial for informing ecological restoration and guiding the resumption of navigation. This study conducted field monitoring to assess correlations between water quality parameters and biodiversity indices, aiming to identify appropriate biological indicators at the species, population, and community levels for the Jinan section. A hierarchical evaluation framework was developed by integrating indicators across three levels: physicochemical characteristics, habitat quality, and ecological structure. This system was applied for the first time to assess the water ecological quality of the Jinan section. The results aligned with the observed spatial trend of water quality, characterized by a “high-low-high” pattern from upstream to downstream. The study provides a scientific foundation for ecological restoration and navigation planning in the Xiaoqing River basin and offers a

收稿日期:2025-02-14 修回日期:2025-03-28

基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2019JZZY020705);济南市民生专项(201913015);山东省重点研发计划(软科学)(2024RKY0604)

作者简介:郑琳琳(1984—),女,硕士,高级工程师,研究方向为环境监测、水生生物监测。E-mail:251230037@qq.com,Tel:18363095665

* 通信作者,田勇,男,研究员,研究方向为环境监测、生态监测研究。E-mail:6103161@qq.com,Tel:13606371220

methodological reference for evaluating urban river ecosystems in China.

Key words : Jinan section of Xiaoqing River; water ecological quality; evaluation system; index selection

小清河作为黄河山东段最重要的伴行河流,不仅是济南市区唯一的排洪干道,也是工农业污水与生活污水的集中排放通道。长期以来,由于大量未经处理的污染物直接排入,其水质一度严重恶化,生态系统遭受显著破坏^[1]。自 2017 年起,济南市启动为期三年的污染治理攻坚战,通过截污纳管、污水处理厂提标改造、生态补水等综合治理措施,小清河水质实现历史性突破:2019 年稳定达到Ⅴ类水质标准,2022 年首次提升至Ⅱ类水标准^[2]。然而,水质达标仅是水生态恢复的第一步,如何科学评估其生态质量状况成为识别生物多样性保护的关键瓶颈,成为当前流域管理的核心挑战。

建立河流健康评价指标体系目的在于通过选择适当指标,客观科学地反映和衡量河流所处的状态,识别和诊断制约河流健康的因素,从而为寻求河流的可持续管理提供方向^[3]。国内外学者在水生态健康评价领域已开展了广泛探索。例如,边博等^[4]提出城市河流生态系统健康评价的多准则指标体系,彭涛等^[5]针对河口生态系统构建了涵盖水文、生物及社会服务功能的评价框架。国内众多学者对河湖健康评价体系多采用层次分析法、综合指数法构建湖泊健康评价模型^[6],例如,邹兰等^[7]对乌伦古湖、吴桨等^[8]对九江市赛城湖、刘子钰等^[9]对永定河、雷保栋^[10]对潼湖平塘湖、杨萍萍等^[11]对洱海的健康评价以及王志凯等^[12]基于灰色关联分析法的小流域水生态环境综合评价研究,为区域河湖的生态修复提供了建议。2020 年,水利部印发了《河湖健康评估技术导则》(SL/T793—2020)^[13],主要从水文水质、形态结构、生物完整性和社会服务功能 4 项来构建河流健康评价指标体系。2023 年国家印发了《水生态健康评价技术指南》(GB/T43476—2023)^[14],主要从物理指标、化学指标、生物指标 3 项来构建指标体系。目前对小流域河流健康的研究尚处于起步阶段^[15],评价多以水文水质、生物生境等准则为主,如通过 Z-IBI^[16]、P-IBI^[17]或水质指数^[18]等进行表征。在流域生态健康评价方面,我国目前仍然处在起步和探索阶段^[18-19],流域水生态健康评价是实施水生态功能分区管理的重要基础^[20-21]。现有的多准则综合评价体系则存在着部分指标数据获取难度大,数据计算及综合评价流程繁琐等问题,难以满足城市河流精细化管理需求^[22]。从国内外水生态系统保护的实践来看,建立“监测—惩治—治理—恢复—监督”的水环境保护机制至关重要^[23]。

针对上述问题,本研究以小清河济南段为对象,构建了一套耦合“理化过程—生境质量—生态组织”三级层次的水生态质量综合评价体系。不仅为小清河流域的生态修复与复航管理提供了科学依据,更为我国城市受纳型河流的水生态质量评价提供了方法论参考,对推动黄河流域生态保护和高质量发展具有重要实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

小清河发源于槐荫区玉符河,是山东境内的一条重要河流,小清河济南段经济南市区、历城区、章丘区进入滨州市,承担防洪除涝、灌溉和航运等综合利用功能^[24],同时也是济南市区和章丘市区废水、生活污水及地表径流的唯一排放去向。小清河济南段全长 70.3 km,流域面积 2 792 km²,其中睦里庄是源头断面,还乡店为市区生活污水出市区控制断面,大码头为东部工业区工业废水控制断面^[25]。

1.2 监测与分析方法

1.2.1 采样点布设

遵循全面性、代表性和可行性原则,采样点优先选择现有国控断面,布设于河道形态变异点、主要支流汇入口以及邻近陆域土地利用状况差异分区点,以有效反映所在河段环境的污染特征,并根据现场调研作出调整,以保证能有效进行采样监测。综合考虑河滨带形态差异、河道形态特征以及河长管辖段,在小清河济南段选取源头睦里庄(ML)、腊山河西路(LSH)、五柳岛(WLD)、还乡店(HXD)、G35 高速窄口(G35)、大码头(DMT)共 6 个采样断面。各断面的基本情况见表 1。

表 1 小清河济南段采样断面基本情况

Table 1 Basic information on sampling cross-sections along the Jinan section of Xiaoqing River

序号	采样断面名称	采样断面性质
1	睦里庄 (ML)	小清河源头断面
2	腊山河西路 (LSH)	上游郊区断面
3	五柳岛 (WLD)	城区断面
4	还乡店 (HXD)	城区断面
5	G35 高速窄口 (G35)	下游郊区断面
6	大码头 (DMT)	出城断面

1.2.2 样品采集及分析

本研究于 2021 年 6 月,开展小清河济南段水生态监测,测定理化因子包括水中总氮、氨氮、总磷、化学需氧量的质量浓度,避开雨季采样 1 次,采集水生生物包括浮游生物、底栖动物、鱼类以及微生物。理化指标的测定参考《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—89)^[26]《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012)^[27]《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)^[28]《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(HJ 828—2017)^[29]。

生境栖息地和水生生物的监测参考《水生态监测技术指南 河流水生生物监测与评价(试行)》(HJ 1295—2023)^[30]。底栖动物用抓斗式采泥器和 D 型网采集样本,现场用分样筛初步筛洗后置于低温保温箱中,带回实验室挑出动植物标本计数。浮游植物的监测用采水器采集 1 L 水样并加入鲁哥氏碘液固定,进行数量与生物量定量分析时样品用沉淀法制取,用显微镜计数。鱼类采用网捕法和地笼法采集。

生物指数分析方法参考下列公式:

丰富度指数 (Margalef index)

$$d = (S - 1) / \log_2 N , \tag{1}$$

式中, S 为种类数; N 为个体总数;

多样性指数 (Shannon-Wiener index)

$$H' = - \sum P_i \ln P_i , \tag{2}$$

式中, P_i 为某种个体数占总个体数之比;

均匀性指数 (Pielou evenness index)

$$E = H' / \log_2 S ; \tag{3}$$

优势度指数 (Simpson index)

$$C = \sum (n_i / N)^2 , \tag{4}$$

式中, n_i 为第 i 类群的个体数。

Berger-Park 优势度指数 (F)

$$F = \frac{N_{\max}}{N_s} , \tag{5}$$

式中, $N_{\max}$ 为各个样点数量最多物种的个体数; N_s 为各个样点出现物种的总个数。

2 评价指标体系构建

2.1 建立评价指标体系的原则

在流域水生态完整性评价中,可以采用的指标不胜枚举,需要根据生态区域和特定流域的实际状况,因地制宜地选择合适的指标集。河流健康评价指标的设置应遵循以下几方面的规则:科学性与代表性原则;整

体性与层次性原则;简明性与可操作性原则。指标应该具有良好的重现性,存在统一的监测标准或规范^[31]。本研究针对小清河自身流域特点,以源头为背景点,各项指标以源头断面设为期望值,同时设置临界阈值进行归一化处理,重点完善生态质量指标体系,科学、全面、准确评估小流域水生态环境质量状况及变化趋势,重点筛选具有科学性、可行性生物指标。

2.2 评价指标体系构建

按照生态组织层次,能够用来评价水体质量的生物学指标可以划分为物种水平、种群水平和群落水平等三个层级的指标。根据生境调查结果、水生生物调查数据及统计分析结果,考虑到小清河济南段具有城市纳污河与城市景观河的双重属性,体系耦合了理化过程、生境质量与物种水平、种群水平和群落水平等三级生态组织层次的指标响应,构建了一个综合的水生态系统评价体系(表 2)。

表 2 小流域水生态系统综合评价指标体系

Table 2 Comprehensive evaluation index system for small watershed aquatic ecosystems

系统层	状态层	指标层
理化因素	营养盐指数	氨氮质量浓度
		总氮质量浓度
		总磷质量浓度
生境质量	生境质量指数	栖息地评价
生态组织	浮游植物指数	特有物种数
		种类数
	微生物指数	氨氮相关种类数
		中华鲢鲢多度
	鱼类指数	种类数
		多样性指数
		Simpson 优势度指数
		F 优势度指数

2.2.1 设定评价指标期望值与临界阈值

依据小清河济南段水质稳定达标水平,遵循尊重现实、促进改善的原则,体系设定了各项指标的期望值和临界阈值。

(1)体系设定氨氮、总氮、总磷等营养盐指标参考《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[32]规定的Ⅱ类水质标准限值作为期望值(ML 断面稳定达标水质介于Ⅰ类标准与Ⅱ类标准之间),Ⅴ类水质标准限值作为临界阈值(小清河济南段全域达标准);

(2)栖息地评价测量值的 95%分位数作为期望值,5%分位数作为临界阈值;

(3)水生生物分类单元数测量值的 95%分位数作为期望值,5%分位数作为临界阈值;

(4)中华鲢鲢种群多度、Shannon-Wiener 多样性指数测量值的 95%分位数作为期望值,5%分位数作为临界阈值;

(5)Simpson 优势度指数、Berger-Parker 优势度指数测量值的 5%分位数作为期望值,95%分位数作为临界阈值。

2.2.2 评价指标标准化处理

(1)水质指标标准化

氨氮、总氮、总磷的标准化公式为:

$$\text{指标得分} = \frac{\text{临界阈值} - \text{测量值}}{\text{临界阈值} - \text{期望值}}。$$

(6)

(2)生境质量指标标准化

栖息地评价值的标准化公式为：

$$\text{指标得分} = \frac{\text{测量值} - \text{临界阈值}}{\text{期望值} - \text{临界阈值}}。$$

(7)

(3)生物学指标标准化

特有物种数、水生生物分类单元数、中华鲢种群多度、Shannon-wiener 多样性指数使用公式(7)作标准化处理;Simpson 优势度指数、Berger-Parker 优势度指数使用公式(6)作标准化处理。

2.2.2.3 指标综合得分计算方法

小流域生态系统评价参考值或期望值的设定对于河流生态精准管理至关重要,体系设定各项指标均以参考断面睦里庄的同期测量值为期望值,还乡店断面的同期测量值为临界阈值。对各项评价指标进行标准化处理。水生态系统评价综合得分为各项指标得分的平均数。

$$\text{营养盐指数} = \frac{G_{\text{NH}_3\text{-N}} + G_{\text{TN}} + G_{\text{TP}}}{3},$$

(8)

式中, $G_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 为氨氮标准化后的指标得分; G_{TN} 为总氮标准化后的指标得分; G_{TP} 为总磷标准化后的指标得分。
栖息地质量为栖息地质量标准化后的指标得分。

$$\text{浮游植物指数} = \frac{K_a + M}{2},$$

(9)

式中, K_a 为浮游植物特有物种数标准化后的得分; M 为浮游植物种类数标准化后的得分。

微生物指数为氨氮相关微生物总属级分类单元数标准化后得分。

$$\text{鱼类指数} = \frac{B + S + H' + C + F}{5},$$

(10)

式中, B 为中华鲢种群多度; S 为种类数; H' 为鱼类多样性指数; C 为鱼类 Simpson 优势度指数; F 为鱼类 Berger-Park 优势度指数。

$$\text{综合得分} = \frac{\text{营养盐指数} + \text{栖息地质量} + \text{浮游植物指数} + \text{微生物指数} + \text{鱼类指数}}{5}。$$

(11)

本体系采用等分法将水生态系统健康状况分为 5 个等级,各个等级的名称、分级标准和等级描述如表 3。

表 3 水生态系统健康状况划分与分级标准

Table 3 Classification and grading criteria for the health status of aquatic ecosystems

健康等级	分级标准	等级描述
优	0.8~1.0	轻微改变,水生态系统的自然生境和群落组成有变化,但生态功能仅轻微变化
良	0.6~0.8	轻微改变,水生态系统的自然生境和群落组成有一定程度的变化,生态功能部分丧失
中	0.4~0.6	中等程度改变,浮游植物出现单一化趋势
差	0.2~0.4	显著改变,浮游植物、鱼类出现单一化,耐污类群占据优势
劣	0~0.2	严重退化,只剩下极度耐污类群,基本生态功能丧失,短期内不可逆转

3 结果与分析

3.1 生境质量

河流栖息地评价数据表^[33]中列出了十大指标:河流底质、栖息地复杂性、流速-深度结合特性、河岸稳定

性、河道变化、河水水量状况、河岸植被多样性、水质状况、人类活动强度、河岸土地利用类型。小清河济南段流经城区,河岸固化,雨污分流,城区几乎没有耕地,因此河岸土地利用类型中的耕地和土壤营养状况指标不适用于小清河济南段大部分断面,在本系统中未采用。本次调查统计汇总后的结果(表 4)显示,小清河五柳岛到还乡店断面的底质因河道硬化影响底质状况较差,还乡店断面整体生境条件较差。

表 4 小清河栖息地评价指标筛选和统计结果

Table 4 Selection and statistical results of habitat evaluation indicators for the Xiaoqing River

类别	ML	LSH	WLD	HXD	G35	DMT
底质	18.25	6	2	0.25	1.75	2
栖息复杂性	15	14	14	2.25	7	5.75
流速-深度结合特性	13.75	13	13	2.5	7.75	8
河岸稳定性	18.25	18	19	19	18.75	18.25
河道变化	9.5	13	13	1.25	14.75	10.25
河水水量状况	9.75	18	18	19.75	15.5	18.5
河岸植被多样性	19.5	18	18	14.5	19	13.75
水质状况	14	14	10	9.25	12.25	8.75
人类活动强度	14	13	5	3.25	12.25	8.75
合计得分	132	127	112	72	109	94

3.2 生物学指标的筛选

按照生态组织层次,能够用来评价水体质量的生物学指标可以划分为物种水平、种群水平和群落水平等三个层级的指标。本文分别从物种、种群和群落水平筛选适合小清河济南段的生物学评价指标。

主要依据化学需氧量、氨氮、总氮和总磷的质量浓度在不同断面的变化情况(表 5)分析其理化数据与生物学指标的相关性,筛选具有指示作用的生物学指标。

表 5 小清河济南段不同断面理化指标测定结果

Table 5 Measurement results of physicochemical indicators at different cross-sections of the Jinan section of Xiaoqing River

断面编号	化学需氧量/(mg·L ⁻¹)	氨氮质量浓度/(mg·L ⁻¹)	总磷质量浓度/(mg·L ⁻¹)	总氮质量浓度/(mg·L ⁻¹)
DMT	23	1.46	0.17	8.87
G35	28	1.93	0.28	9.27
HXD	27	2.02	0.34	9.06
WLD	23	0.798	0.19	7.61
LSH	12	0.380	0.08	7.42
ML	9	0.315	0.04	2.08
检出限	4	0.025	0.01	0.05

3.2.1 物种水平

考虑浮游植物的易变性和监测调查的可操作性,生物量较低的物种不宜作为指示生物。根据细胞计数方法和过程,当细胞密度低于 1.0×10⁵ cell/L 时,发现细胞的难度会明显增加。生物量较高的特有浮游植物物种,作为筛选断面水质指示物种的依据。各断面浮游植物的特有物种数如表 6。浮游植物特有物种数和总氮指标值具有很强的负相关性($R=-0.933$, $F=16.03$, $p=0.004$),表明特有浮游植物物种对水质条件有潜在的指示作用。

表 6 浮游植物特有物种数

Table 6 Number of endemic phytoplankton species identified

断面名称	特有物种数	断面名称	特有物种数
ML	31	HXD	1
LSH	12	G35	4
WLD	18	DMT	9

3.2.2 种群水平

统计了同样努力强度下(捕网法)不同断面各物种的渔获量(表 7),为了尽量排除偶然因素对结果的影响,仅选择渔获量大于 15 尾的物种筛选种群水平的指标(图 1)。

表 7 同样努力强度下不同断面的渔获量

Table 7 Catch volume at different cross-sections under equal sampling effort

物种	ML	LSH	WLD	HXD	G35	DMT	总个体数
中华鲢鳊	60	1	1	1	4	7	74
鲫	5	6	6	5	8	8	38
鲮	1	1	2	5	10	6	25
麦穗鱼	7	1	6	2	3	1	20
泥鳅	11	1	0	1	0	3	16
子陵吻鰕虎鱼	10	0	4	0	0	1	15
高体鲢鳊	0	9	0	0	4	0	13
大鳞副泥鳅	1	6	0	4	0	0	11
大鳍鲮	7	0	4	0	0	0	11
棒花鱼	1	0	2	0	0	3	6
鮠	2	1	2	1	0	0	6
黄鲮	3	0	0	0	0	0	3
乌鳢	0	0	0	0	0	3	3
小黄鲮鱼	1	1	1	0	0	0	3
圆尾斗鱼	2	0	0	0	0	0	2
鳊	0	0	0	0	0	1	1
鲢鱼	0	0	0	0	0	1	1

捕网法对中上层鱼类样本有明显的偏向性,对底栖性鱼类样本的采集效率较低。泥鳅为底栖性鱼类,受不同断面水体深度的影响,捕网法对泥鳅的渔获量存在较大的偏差,不宜作为后续分析的数据依据。将潜在指示种群的多度数据与理化指标作相关性分析(表 8),结果表明,中华鲢鳊种群多度与总氮指标值具有强烈的负相关性($R=-0.938$)。

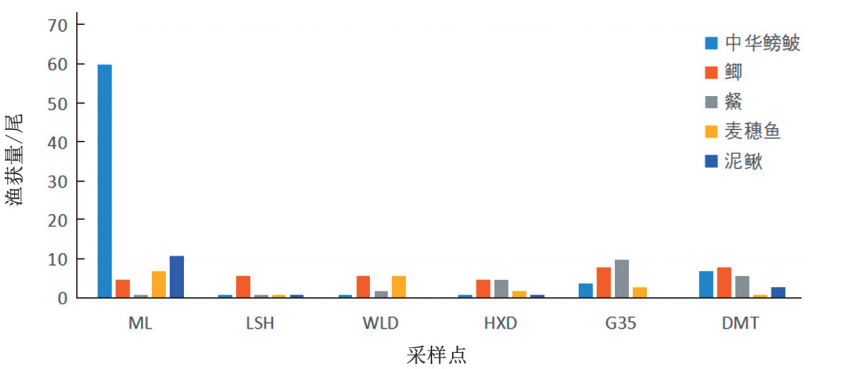


图 1 渔获量大于 15 尾的物种在各断面的种群多度
Fig.1 Species with a catch greater than 15 individuals
in the population abundance at each section

表 8 鱼类指示种群多度数据与总氮的相关性分析

Table 8 Correlation between the abundance of fish indicator species and total nitrogen levels

项目	ML	LSH	WLD	HXD	G35	DMT	与总氮的 Person 相关系数
中华鲢数量	60	1	1	1	4	7	-0.938
鲫鱼数量	5	6	6	5	8	8	0.560
鳊数量	1	1	2	5	10	6	0.652
麦穗鱼数量	7	1	6	2	3	1	-0.722
总氮质量浓度/(mg·L ⁻¹)	2.08	7.42	7.61	9.06	9.27	8.87	

3.2.3 群落水平

在群落水平上,多种生物多样性指数可以用来评价水质状况。分别对浮游植物、浮游动物、鱼类、微生物类群进行各个生物多样性指数计算,结果见表 9~14。计算得出的各项生物多样性指数与理化指标做 Person 相关性分析,根据相关性对生物多样性指数进行了筛选。

表 9 浮游动物各生物指数汇总

Table 9 Summary of zooplankton biological indices

生物学参数	ML	LSH	WLD	HXD	G35	DMT
<i>S</i>	4	3	1	1	2	1
<i>N</i>	850	91	50	25	50	75
<i>d</i>	0.308	0.307	0	0	0.177	0
<i>H'</i>	0.557	1.00	0	0	0.693	0
<i>E</i>	0.279	0.631	—	—	0.693	—
<i>C</i>	0.74	0.40	1	1	0.5	1

注:*S* 为种类数,*N* 为个体总数,*d* 为丰富度指数,*H'* 为多样性指数,*E* 为均匀性指数,*C* 为优势度指数。

表 10 浮游植物各生物指数汇总

Table 10 Summary of phytoplankton biological indices

生物学参数	ML	LSH	WLD	HXD	G35	DMT
<i>S</i>	113	48	98	64	68	61
<i>N</i>	7.45×10^7	6.78×10^6	5.81×10^7	6.62×10^7	2.72×10^7	3.50×10^7
<i>d</i>	4	2	4	2	3	2
<i>H'</i>	2.35	1.48	2.77	2.46	1.69	2.62
<i>E</i>	0.34	0.26	0.42	0.41	0.27	0.44
<i>C</i>	0.31	0.50	0.14	0.23	0.21	0.15
<i>F</i>	0.54	0.70	0.29	0.47	0.45	0.27

注:*S* 为种类数,*N* 为个体总数,*d* 为丰富度指数,*H'* 为多样性指数,*E* 为均匀性指数,*C* 为优势度指数,*F* 为鱼类 Berger-Park 优势度指数。

表 11 鱼类各生物指数汇总

Table 11 Summary of biological indices for fish species

生物学参数	ML	LSH	WLD	HXD	G35	DMT
<i>S</i>	7	5	2	3	2	6
<i>N</i>	9	15	7	3	5	10

表11(续)

生物学参数	ML	LSH	WLD	HXD	G35	DMT
d	1.89	1.02	0.36	1.26	0.43	1.51
H'	1.89	1.36	0.68	1.10	0.67	1.70
E	0.67	0.59	0.68	0.69	0.67	0.66
C	0.16	0.30	0.51	0.33	0.52	0.20
F	0.22	0.40	0.57	0.33	0.50	0.30

注: S 为种类数, N 为个体总数, d 为丰富度指数, H' 为多样性指数, E 为均匀性指数, C 为优势度指数, F 为鱼类 Berger-Park 优势度指数。

表 12 微生物种类数

Table 12 Total number of microbial taxonomic units

生物学参数	ML	LSH	WLD	HXD	G35	DMT
S (微生物种类数)	1 342	753	956	880	1 017	1 389

表 13 氨氮相关微生物的总属级单元数

Table 13 Total number of genus-level units associated with ammonia nitrogen-related microorganisms

生物学参数	ML	LSH	WLD	HXD	G35	DMT
总属级单元数	22	21	22	27	26	27

表 14 生物指数与总氮、氨氮的 Person 相关性

Table 14 Pearson correlation between biological indices and concentrations of total nitrogen and ammonia nitrogen

生物指数类别	总氮 Person- R	氨氮 Person- R
浮游植物丰富度指数	-0.621	-0.428
鱼类丰富度指数	-0.581	-0.260
浮游植物多样性指数	-0.084	0.094
鱼类多样性指数	-0.606	0.445
浮游植物均匀性指数	0.140	0.237
鱼类均匀性指数	0.037	0.534
浮游植物优势度指数	-0.325	-0.556
鱼类优势度指数	0.325	0.365
浮游植物的种类数	-0.744	-0.409
鱼类种类数	-0.650	-0.541
微生物种类数	-0.411	-0.052
氨氮相关微生物的总属级单元数	—	0.926
浮游植物 F 指数	-0.339	-0.410
鱼类 F 指数	0.518	0.155

为了验证上述评价体系的实施效力,提出优化调整策略,以小清河济南段调查数据为基础,按照体系制定的水生态系统健康状况五级标准,对照综合得分,对各个断面的水生态系统健康状况做出判断。设定睦里庄、还乡店两个断面为参考断面,分别设为优、劣等级,计算各个断面的综合得分。计算结果详见表 15。

表 15 评价体系对小清河济南段实测数据的评价得分

Table 15 Evaluation scores for the measured data of the Jinan section of Xiaoqing River using the assessment system

状态层	指标层	指标层标准化得分					
		ML	LSH	WLD	HXD	G35	DMT
营养盐指数	氨氮质量浓度	1.00	0.96	0.72	0.00	0.05	0.33
	总氮质量浓度	1.00	0.23	0.21	0.00	-0.03	0.03
	总磷质量浓度	1.00	0.87	0.50	0.00	0.20	0.57
	总得分	1.00	0.69	0.47	0.00	0.07	0.31
生境质量指数	栖息地评价	1.00	0.92	0.67	0.00	0.62	0.37
	总得分	1.00	0.92	0.67	0.00	0.62	0.37
浮游植物指数	特有物种数	1.00	0.37	0.57	0.00	0.10	0.27
	种类数	1.00	-0.33	0.69	0.00	0.08	-0.06
	总得分	1.00	0.02	0.63	0.00	0.09	0.10
微生物指数	氨氮相关种类数	1.00	1.20	1.00	0.00	0.20	0.00
	总得分	1.00	1.20	1.00	0.00	0.20	0.00
鱼类指数	中华鲟多度	1.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.10
	种类数	1.00	0.50	-0.25	0.00	-0.25	0.75
	多样性指数	1.00	0.33	-0.53	0.00	-0.54	0.76
	Simpson 优势度指数	1.00	0.18	-1.06	0.00	-1.12	0.76
	F 优势度指数	1.00	-0.64	-2.18	0.00	-1.55	0.27
	总得分	1.00	0.07	-0.80	0.00	-0.68	0.53
综合得分		1.00	0.58	0.39	0.00	0.06	0.26
等级		优	中	差	劣	劣	差

运用水生态系统综合评价体系进行评价,得出如下结论,从源头到大码头断面,各断面的评价结果分别为:睦里庄为优,腊山河断面为中,五柳岛为差,还乡店为劣,G35 高速口为劣,大码头为差。评价结论与小清河水质自源头向下游“高一低—高”的变化趋势基本一致,如图 2。

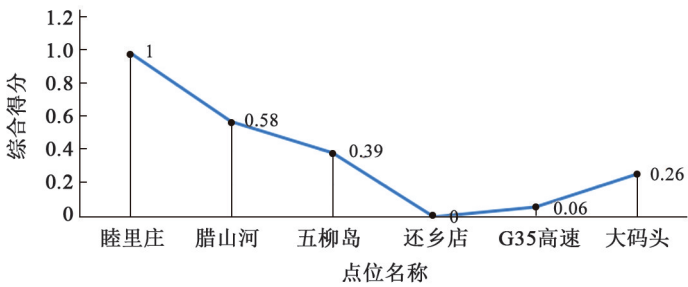


图 2 小清河济南段不同断面体系综合得分变化趋势

Fig.2 Trend of comprehensive scores across different cross-sections in the Jinan section of Xiaoqing River

4 结论

本研究通过耦合理化过程、生境质量与生态组织三级层次的指标响应,构建了适用于小清河济南段的综合水生态质量评价体系,整合了物种、种群和群落水平的生物指标,弥补了传统评价体系中生物类指标不足的缺陷。

评价体系的应用结果表明,小清河济南段水生态质量自源头向下游呈现“高一低—高”的变化趋势,与

水质监测数据高度吻合,验证了该体系的科学性与适用性。其实际应用价值体现在:通过识别关键污染断面(如还乡店、G35 高速口),可为管理部门制定针对性生态修复措施(如栖息地恢复、污染物管控)提供科学依据;该体系兼顾普适性与区域特色,通过调整阈值和指标权重,可扩展至其他具有类似水文特征的城市河流或受人为干扰较强的流域。

然而,本研究仍存在一定局限性。数据时间跨度有限:仅基于 2021 年 6 月的单次采样数据,未能反映季节性变化对水生态的长期影响。采样点代表性不足:断面设置集中于主河道,未涵盖支流及关键生态敏感区,可能影响评价结果的全面性。未来可开展多季节、多年度连续监测,分析水生态质量的时空演变规律。

综上所述,本评价体系不仅为小清河流域的生态修复与管理提供了技术支撑,也为我国城市河流的精准治理与可持续发展提供了方法论参考。通过持续优化与多维度应用,该体系有望成为城市流域水生态文明建设的重要实践工具。

参考文献:

- [1] 战锡林,赵娇娇,王秋香. 济南小清河沉积物重金属污染现状及来源解析[C]// 中国环境科学学会. 2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第三卷). 山东省济南生态环境监测中心, 2020: 846-851. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.040327.
- [2] 辛宏杰. 小清河上游段生态恢复技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [3] 张世明, 陈虎, 李晓红, 等. 大溪河南川段健康评价指标体系及方法研究[J]. 科技创新导报, 2013, 10(25): 12-13. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2013.25.038.
- [4] 边博, 程小娟. 城市河流生态系统健康及其评价[J]. 环境保护, 2006, 34(02B): 66-69. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9705.2006.04.016.
- [5] 彭涛, 陈晓宏. 海河流域典型河口生态系统健康评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 631-634. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2008.03.010.
- [6] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 基于层次分析法的塔里木河流域生态系统健康评价[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1535-1544.
- [7] 邹兰, 高凡, 马英杰, 等. 基于距离协调发展度模型的乌伦古湖健康评价[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(7): 206-212. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.07.032.
- [8] 吴棠, 刘聚涛, 付莎莎, 等. 九江市赛城湖健康评价研究[J]. 江西水利科技, 2023, 49(2): 143-149.
- [9] 刘子钰, 任良锁, 白乙娟, 等. 永定河流域健康评估及其变化分析[J]. 广西科学, 2022, 29(3): 482-490. DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20220720.011.
- [10] 雷保栋. 基于综合指标的潼湖平塘湖泊生态系统健康评价[J]. 广西水利水电, 2023(5): 36-41. DOI: 10.16014/j.cnki.1003-1510.2023.05.023.
- [11] 杨萍萍, 朱江, 杨晓雪, 等. 洱海流域水生态监测评价发展与展望[J]. 四川环境, 2023, 42(3): 237-242. DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2023.03.034.
- [12] 王志凯, 毛晓月, 许瑶, 等. 基于灰色关联分析法的小流域水生态环境综合评价研究: 以南河小流域(邛崃段)为例[J]. 四川环境, 2020, 39(5): 48-53. DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2020.05.009.
- [13] 中华人民共和国水利部. 河湖健康评估技术导则: SL/T 793—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [14] 全国环境管理标准化技术委员会. 水生态健康评价技术指南: GB/T 43476—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [15] 陈宇飞, 严航, 夏霆, 等. 基于浮游动物生物完整性指数的太湖流域生态系统评价[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(3): 335-343.
- [16] 马廷婷, 范亚民, 李宽意, 等. 基于浮游植物完整性指数的太湖主要河口生态健康评价[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(4): 501-508. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2020.0446.
- [17] WU Z S, KONG M, CAI Y J, et al. Index of biotic integrity based on phytoplankton and water quality index: Do they have a similar pattern on water quality assessment? A study of rivers in Lake Taihu Basin, China[J]. Science of The Total Environment, 2019, 658: 395-404. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.216.

- [18] 孟伟, 张远, 郑丙辉, 等. 生态系统健康理论在流域水环境管理中应用研究的意义、难点和关键技术:代“流域水环境管理战略研究”专栏序言[J]. 环境科学学报, 2007, 27(6): 906-910. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2007.06.003.
- [19] LI C H, CUI W, PANG A P, et al. Progress on theories and methods of watershed eco-health assessment[J]. Progress in Geography, 2008, 27(1): 9-17.
- [20] 王业耀, 阴琨, 杨琦, 等. 河流水生态环境质量评价方法研究与应用进展[J]. 中国环境监测, 2014, 30(4): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6002.2014.04.001.
- [21] 阴琨, 王业耀, 许人骥, 等. 中国流域水环境生物监测体系构成和发展[J]. 中国环境监测, 2014, 30(5): 114-120.
- [22] 周星宇, 吴建斌, 白瑞泉, 等. 太湖流域高密度平原河网地区河流健康快速评价[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(17): 165-170. DOI: 10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2021.17.059.
- [23] 祁泽慧. 大汶河流域水生态系统评价与水生态文明建设研究[D]. 济南: 济南大学, 2017.
- [24] 郑琳琳, 李海滨, 唐厚全, 等. 高通量测序分析小清河济南段微生物群落结构[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(2): 221-224. DOI: 10.13349/j.cnki.jdxbn.20211216.001.
- [25] 张晓瑾, 矫桂丽等. 小清河流域水生态状况评价及生态修复研究[J]. 治淮, 2016(1): 55-56.
- [26] 国家环境保护局标准处. 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法: GB 11893—89[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [27] 中华人民共和国环境保护部. 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: HJ 636—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [28] 中华人民共和国环境保护部. 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法: HJ 535—2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [29] 中华人民共和国环境保护部. 水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法: HJ 828—2017[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- [30] 中华人民共和国生态环境部. 水生态监测技术指南 河流水生生物监测与评价: HJ 1295—2023[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2023.
- [31] 张华, 骆永明. 美国流域生态健康评价体系的发展和实践[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 2063-2072. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0404.
- [32] 国家环境保护总局科技标准司. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [33] 中国环境监测总站. 河流水生态环境质量监测与评价技术指南(试行)(总站水字[2021]0223号)[S]. 2021.

