

中国北方沿海城市河流底栖生物群落结构特性研究

孙广辉, 冷卓宇

烟台大学土木工程学院, 山东 烟台

收稿日期: 2026年3月5日; 录用日期: 2026年4月10日; 发布日期: 2026年4月24日

摘要

河流具有提供水源、维持生物多样性、保障生态稳定和支撑社会发展等关键功能。城市河流是其中生物多样性保护和水质净化的重点区域。目前中国北方沿海城市河流与一般河流相比, 具有“短小、急促”的自然特点, 使其生态系统更脆弱, 并伴有潮汐扰动与城市化污染叠加导致生境异质性改变与自净能力衰退等问题, 本研究通过现场勘探调查, 将研究区域生境划分为三种生境, 分成三个季节采样, 分析各类生境水环境指标和底栖动物群落结构特征, 旨在建立不同生境评估体系, 为生态修复提供靶向支撑。本研究以烟台市内夹河和柳子河流域为对象, 布设共24个采样点, 覆盖了感潮、城市及半自然河段, 于2022年夏、秋、冬三季采集水样和底栖生物样本(涵盖4门48种)。基于水动力梯度划分生境类型, 采用综合污染指数评价水质, 结合Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数和BI生物指数分析群落结构, 通过Pearson相关性解析环境因子影响。研究区域水质整体呈重度污染(综合污染指数 $P > 1.0$), 柳子河污染程度高于内夹河, 城市河段冬季污染最显著。底栖动物群落呈现时空分异: 半自然河段多样性最高(Margalef指数1.53), 以节肢动物为主; 城市河段耐污物种占优(BI指数8.26), 栖息密度冬季达4104 ind/m²。

关键词

大型底栖无脊椎动物, 群落结构, 物种丰富度, 空间分布, 环境污染指数

Study on Community Structure Characteristics of Benthic Organisms in Rivers of Northern Coastal Cities of China

Guanghai Sun, Zhuoyu Leng

School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai Shandong

Received: March 5, 2026; accepted: April 10, 2026; published: April 24, 2026

Abstract

Rivers play critical roles in providing water resources, maintaining biodiversity, ensuring ecological stability, and supporting social development. Urban rivers, in particular, are key areas for biodiversity conservation and water quality purification. Compared to general rivers, those in northern coastal cities of China are characterized by their “short length and swift flow,” which renders their ecosystems more vulnerable. These systems face challenges such as altered habitat heterogeneity and diminished self-purification capacity due to combined pressures of tidal influences and urban pollution. This study conducted field surveys and divided the study area into different habitat zones based on in-situ habitat conditions and urbanization levels. Sampling was carried out over three seasons to analyze spatial variations in water quality across river sections, investigate the structural characteristics of benthic macroinvertebrate communities, and perform a biological assessment of water quality. Furthermore, the structure and properties of microbial communities were analyzed. The aim is to establish a zoning-based assessment framework to provide targeted support for ecological restoration. This study was carried out in the Neijia River and Liuzi River basins, Yantai City, China. Twenty-four sampling sites, covering tidal, urban, and semi-natural reaches, were established. Water and benthic macroinvertebrate samples (comprising 48 species from 4 phyla) were collected seasonally in summer, autumn, and winter of 2022. Habitat types were first classified based on hydrodynamic gradients. Water quality was assessed using a comprehensive pollution index. For analyzing the benthic community structure, the Margalef richness index, Shannon-Wiener diversity index, and the Biotic Index (BI) were integrated. Furthermore, Pearson correlation analysis was employed to elucidate the influences of environmental factors. The assessment revealed severe overall pollution in the study area (comprehensive pollution index, $P > 1.0$). Pollution was more pronounced in the Liuzi River compared to the Neijia River, with urban reaches exhibiting the highest pollution levels, particularly during winter. Spatiotemporal heterogeneity was evident in the benthic macroinvertebrate community. The highest diversity (Margalef richness index: 1.53) was recorded in semi-natural reaches, where arthropods constituted the dominant group. In contrast, urban reaches were dominated by pollution-tolerant species (Biotic Index, BI: 8.26), with a peak habitat density of 4104 individuals per square meter (ind/m^2) in winter.

Keywords

Benthic Macroinvertebrates, Community Structure, Species Richness, Spatial Distribution, Environmental Pollution Index

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国北方沿海城市河流因河道短小、水流急促、潮汐扰动与城市化污染叠加, 面临生境破碎和自净能力衰退等生态危机, 传统理化监测难以揭示生境异质性对生物屏障功能的深层影响[1]-[4]。底栖动物作为水生态健康的核心指示类群[5], 通过物质传递、微生境构建与污染物降解三重机制响应环境压力, 其群落结构可直接映射水环境的质量和变化[6]。本研究聚焦典型沿海城市河流, 依据水动力梯度与生境异质性建立分区评估体系。通过底栖动物-微生物多维度生物监测, 为受损河流生态修复提供理论支撑。

沿海城市河流作为水陆生态交互的关键载体, 其环境演变呈现显著的复合污染特征[7][8]。国内研究

揭示, 感潮河段引水工程导致营养盐通量激增[9], 南方雨源型河流污染负荷普遍超载[10], 长三角区域的入海河流水质优于中国其他一些主要沿海经济区域[11]。国际水质评估体系历经百年发展, 当前正朝着多源数据融合与生态参数整合方向深化[12]-[14]。

底栖动物对水环境变化具有较高的敏感性, 能够有效响应水环境的变化, 因此逐渐被广泛应用于水环境监测和评价[15]。

1931年 Farrells 提出底栖动物群落能够有效地监测水质环境, 并对水环境进行评价[16]。王备新于2005年系统地介绍了生物完整性指数(IBM)构建方法, 为水质生物学评价提供了关键方法[17]。此后, 张远等研究者有力地推动了水质生物学评价成为水体生态健康评价的核心方法[18]。

本研究对中国北方经典河流烟台市的内夹河通过实地调查划分感潮河段、城市河段及半自然河段等典型生境类型, 结合水文学参数(流速、水深)与水质指标(TN、TP、DO等), 系统评估生境质量并识别影响生态健康的关键因子。重点解析不同生境下底栖动物与微生物群落的组成特征(种类、密度、优势种), 利用生物多样性指数法构建水质生物学评价体系, 揭示生物群落结构与水环境状况和水动力条件的响应。本研究可为河流生态环境的系统研究提供理论参考, 同时为沿海城市河流水生态保护与修复提供数据支撑与科学依据。

2. 研究区域与方法

2.1. 研究区域概况

研究区域为烟台市内夹河及其支流柳子河(图1), 全长65公里, 流域面积1176平方公里, 是维持区域生物多样性的关键生态廊道。随着城市化扩张, 河流面临水质污染加剧、河床硬化及生态功能衰退等问题。在研究区域内, 将潮高最高时期河流电导率 ≥ 1 mS/m的河流区域划分为感潮河段, 其余河段根据国家地理信息公共服务平台(<https://www.tianditu.gov.cn>)提供的烟台市土地利用地表覆盖空间数据, 按照农用地总面积占区域总面积的比例是否 $\geq 50\%$ 的区域划分为半自然河段(农村河段)和城市河段。研究共布设24个采样点(含7个底栖生物专项点), 其中G1~G5属于感潮河段, C6~C11属于城市河段, N12~N14属于半自然河段(农村河段), LC1~LC5属于柳子河城市河段, LN6~LN9属于柳子河半自然河段(农村河段)。于2022年夏季(6月28~29日)、秋季(10月17~18日)和冬季(12月11~12日)开展多季节采样, 覆盖感潮、城市及半自然河段, 以揭示人类活动与自然扰动叠加下的水环境时空分异规律。

2.2. 研究方法

2.2.1. 采样方法与数据采集

1) 现场调研及水样采集

采样点现场同步开展生境调查(记录岸线植被、底质类型、排污口分布)与水样采集。采用标准多点采样法, 依据水深条件选择取水器或浅水区直接采样, 避开污染带并避免底泥扰动。现场测定水温、DO、pH及电导率, 每点采集3份500 mL水样, 密封避光冷藏, 12小时内送检。水质指标的检测方法严格参照中国水质检测的核心标准《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)进行检测。

2) 底栖生物的采集与处理

综合考虑河宽、水深、流速、植被、底质和城市化程度等因素, 本研究在内夹河和柳子河流域分别布设5个和2个采样点。采用D形抄网作为标准化底栖生物采样工具, 在深水区开展采样, 单一样点采样面积为0.5平方米, 统一采样面积标准, 覆盖不同生境以保证样品代表性。贴标签保存, 显微镜鉴定, 统计群落结构信息。

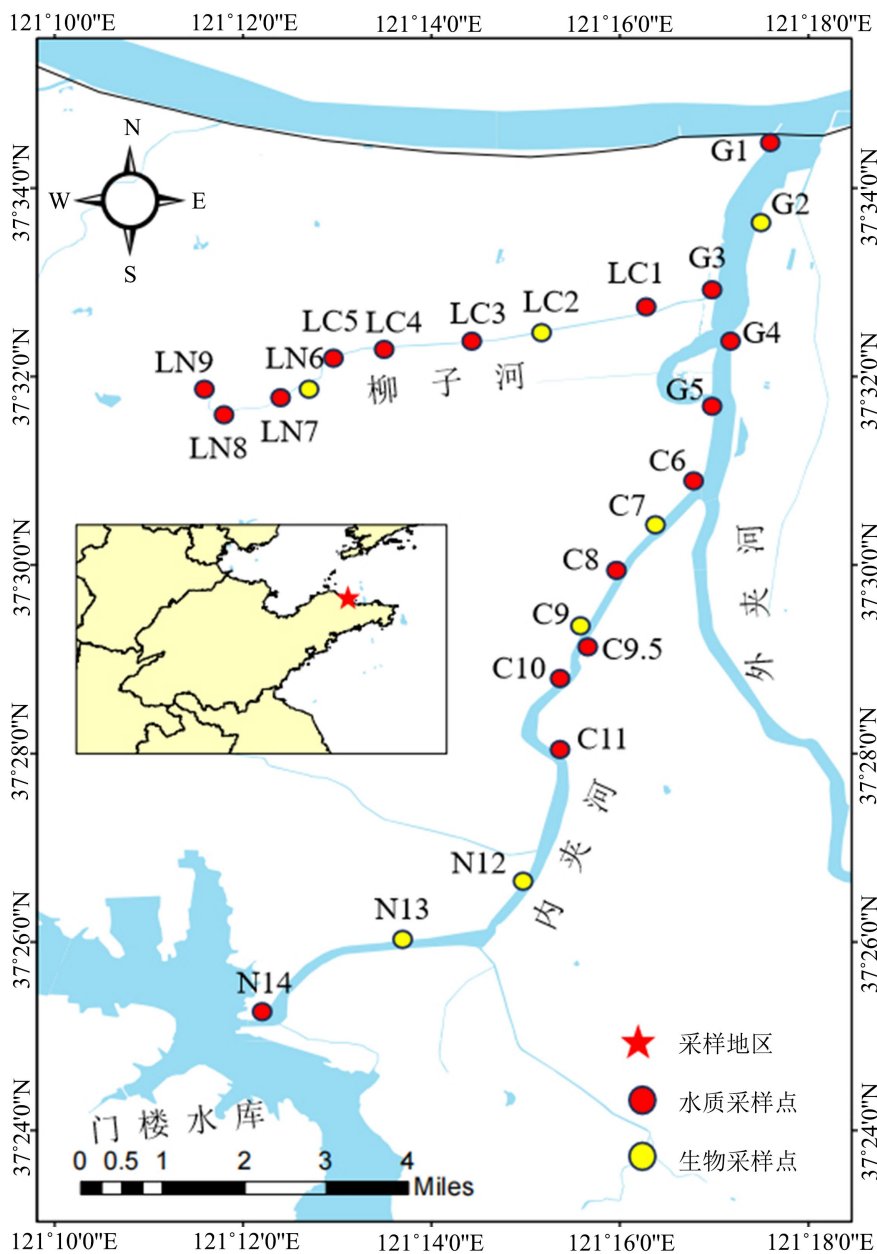


Figure 1. Sampling area and sampling sites
 图 1. 采样区域及点位图

2.2.2. 水质评价方法

本研究综合溶解氧(DO)、高锰酸盐指数、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总氮(TN)和 pH 等指标, 计算综合污染指数评价水质等级:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i}}{n} \tag{2.1}$$

上述计算公式中, P : 综合污染指数; C_i : 地表水理化指标 i 的实测值; S_i : 地表水理化指标 i 的环境质量标准值; 其中环境质量标准值选择地表水环境质量 III 类水标准, 评价水质级别如表 1 所示。

Table 1. Classification of comprehensive pollution index**表 1.** 综合污染指数评级

综合污染指数	$P \leq 0.25$	$0.25 < P \leq 0.40$	$0.4 < P \leq 0.50$	$0.50 < P \leq 1.00$	$P > 1.00$
污染程度	清洁	较清洁	轻污染	中污染	重污染

2.2.3. 底栖动物评价方法

通过多样性指数(Shannon)、丰富度指数(Margalef)、BI 指数评价群落结构。指数计算公式如下:

1) Shannon-Wiener 生物多样性指数:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2.2)$$

其中, S 物种数; P_i 第 i 种的个体数占总个体数的比例。评价水质级别由表 2 所示。

Table 2. Criteria for Shannon diversity rating**表 2.** Shannon 多样性评级标准

多样性指数	$0 < H' < 1$	$1 < H' < 2$	$2 < H' < 3$	$H' > 3$
级别	重度污染	中度污染	轻度污染	清洁

2) Margalef 丰富度指数:

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (2.3)$$

其中, D 丰富度指数; N 底栖动物的总个体数。

3) Simpson 优势度指数:

$$Y = (n_i / N) \times f_i \quad (2.4)$$

式中, n_i 为第 i 种物种的个体数; f_i 为物种 i 在各站位出现的频率。

4) BI 生物指数:

$$BI = \sum_{i=1}^S n_i a_i / N \quad (2.5)$$

式中: i 为第 i 种生物; a_i 为第 i 生物量级(属或种)的耐污值。具体评级如表 3 所示。

Table 3. Criteria for BI index rating**表 3.** BI 生物指数评级标准

BI 生物指数	$BI < 3.5$	$3.5 < BI < 5.5$	$5.5 < BI < 8.5$	$BI > 8.5$
评级	清洁	一般清洁	污染	严重污染

3. 结果与分析

3.1. 生境划分与生境调查结果

本研究通过实地调研与监测, 深入评估不同生境下的水环境特征, 为水质治理与生态修复提供数据支持。

感潮河段以周期性潮汐裸露导致盐度剧烈波动为特点; 城市河段基本为硬质水泥底与黑色淤泥底质; 半自然河段主要体现为高植被覆盖率(>60%)和底质异质性。具体生境调查结果详见表 4。

Table 4. Habitat classification and characteristics of the study area
表 4. 研究区域生境分类及特征

生境类型	底质类型	主要污染源	典型特征
感潮河段	细沙砾	潮汐倒灌盐分输入、上游淡水携带污染物	周期性潮汐裸露河床, 石砌护坡, 盐度波动显著 (电导率 > 7000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), 底栖生物以耐盐软体动物为主
城市河段	硬质水泥底/黑色淤泥	生活污水直排、工业废水、橡胶坝阻水	河道宽阔但流速缓, DO 低(夏季 < 4 mg/L), 底泥黑臭, 排污口密集, 底栖生物以耐污环节动物(颤蚓)占绝对优势
农郊河段	黄色淤泥/大颗粒沙砾	农业面源污染 (化肥流失)、自然侵蚀	河道较窄, 植被覆盖率 > 60%, 底质异质性强, 生物多样性最丰富(节肢动物占比 > 70%)

通过综合污染指数进行水质污染评价

综合污染指数(图 2)显示, 地表水综合污染指数均大于 1, 水体处于重度污染状态。从季节角度看, 夏季的综合污染指数处于最低水平, 冬季污染最严重。这可能是因为夏季降水增多会增加河流径流量, 更利于自净[19]。从空间角度分析, 从空间分布来看, 内夹河各河段的综合污染指数存在显著差异, 城市河段的污染程度整体高于农村河段与感潮河段。其中, 柳子河城市段的污染问题尤为突出, 其综合污染指数在所有河段中处于最高水平, 这与该区域人口密集、工业及生活污水排放强度大密切相关, 是流域污染管控与生态修复的重点关注区域。相比之下, 感潮河段受潮汐作用下的水体交换、海水稀释等水文过程影响, 污染物浓度相对较低, 水质状况整体较好; 而内夹河农村河段的污染水平则处于中等水平, 其污染来源与农业生产活动及农村生活污水排放紧密相关。

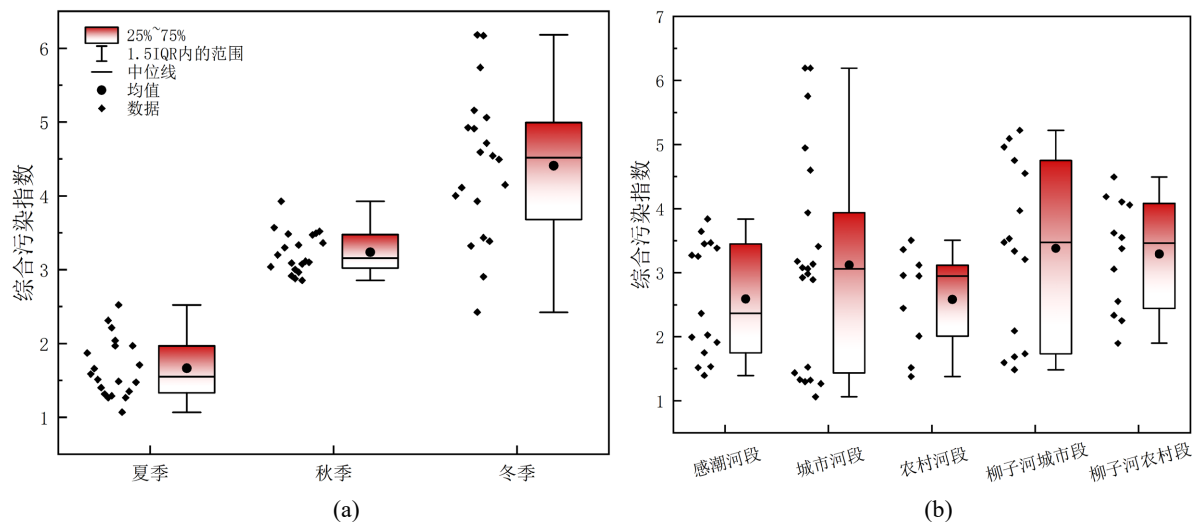


Figure 2. Distribution of the comprehensive pollution index
图 2. 综合污染指数分布

3.2. 底栖动物群落结构特征及水质生物学评价

3.2.1. 底栖动物群落组成及优势物种

本研究以内夹河流域为研究区域, 开展大型底栖动物野外调查与监测, 累计获取底栖动物个体数量共计 1639 尾, 分类鉴定结果显示, 研究区域内底栖动物隶属于 4 门、9 纲、16 目、29 科、35 属, 总计 48 个物种。

研究区域内底栖动物种类空间差异显著(见图 3)。采样点物种数范围为 2 到 9 种, 从空间分布来看, 内夹河流域底栖动物的物种数和群落组成存在显著差异。农郊河段(尤其是 N14 等上游点位)的物种数明显高于其他河段, 且全年以节肢动物为绝对优势类群, 反映出该区域生境条件更为稳定、生物多样性更高; 感潮河段 G2 物种数普遍偏低, 优势类群以软体动物和环节动物为主, 体现了潮汐作用和水文波动对底栖生物的筛选效应; 城市河段的物种数和优势类群分布则介于两者之间, 类群组成相对复杂, 反映了人类活动与自然水文过程的共同影响。

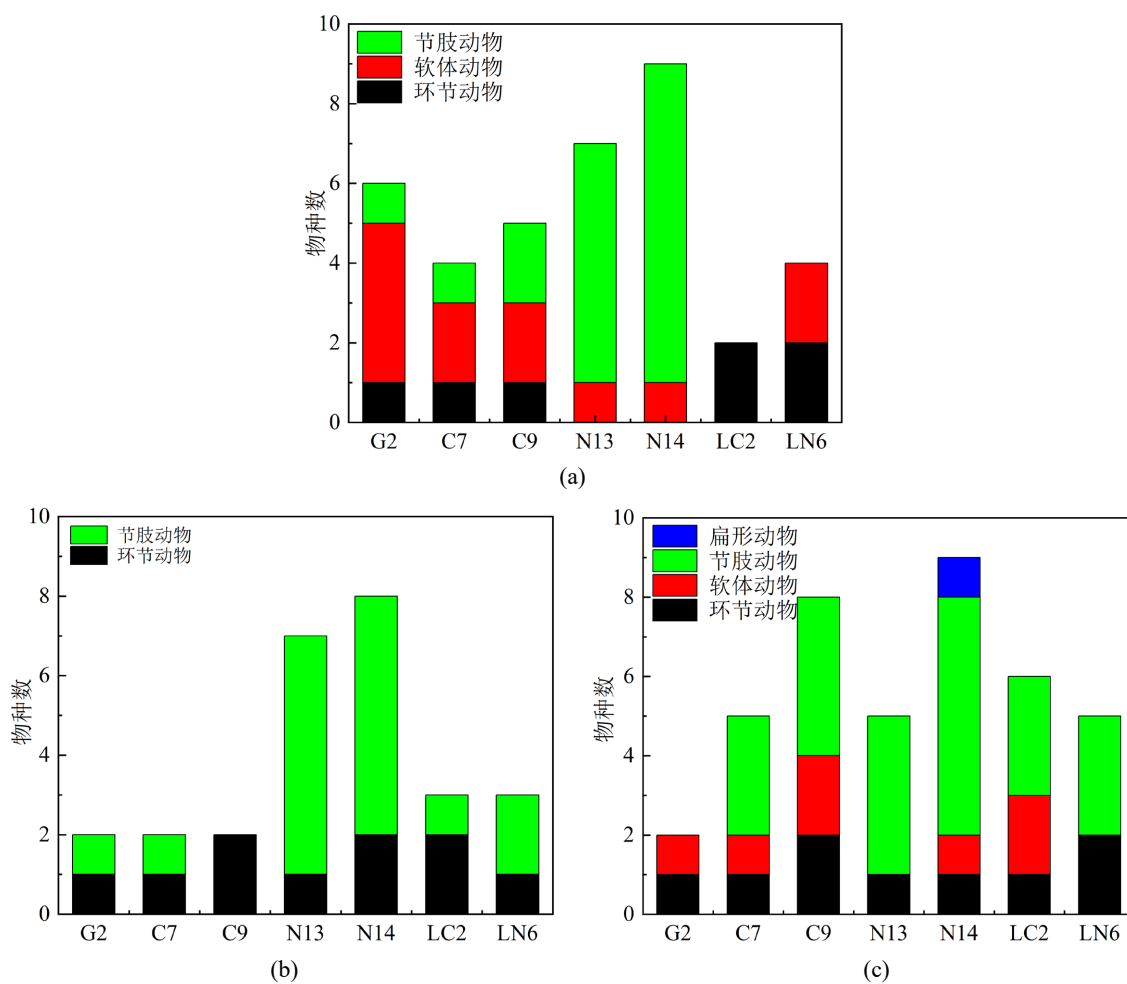


Figure 3. Spatiotemporal distribution of species number ((a): Species composition and distribution in summer; (b): Species composition and distribution in autumn; (c): Species composition and distribution in winter)

图 3. 物种数时空分布((a): 夏季物种数组成分布; (b): 秋季物种数组成分布; (c): 冬季物种数组成分布)

从时间来看, 秋季底栖生物种类平均种类最少, 不足 4 种, 冬季种类最多, 平均每个样点约 6 种。不同季节各采样点物种组成差异明显。夏季, G2 和 C7 点软体动物最多, 农郊河段节肢动物最多, LC2 点环节动物最多, 内夹河城市河段软体动物和节肢动物并列最多, LN6 点环节动物和软体动物并列最多。秋季, G2 和 C7 点节肢动物与软体动物物种数相同, 农郊河段节肢动物最多。

3.2.2. 底栖生物栖息密度

研究区域内底栖生物的栖息密度存在显著差异, 具体如图 4 所示。从季节来看, 冬季的栖息密度最高, 平均为 4104 ind/m²; 秋季次之, 平均为 1984 ind/m²; 夏季最低, 仅为 468 ind/m²。

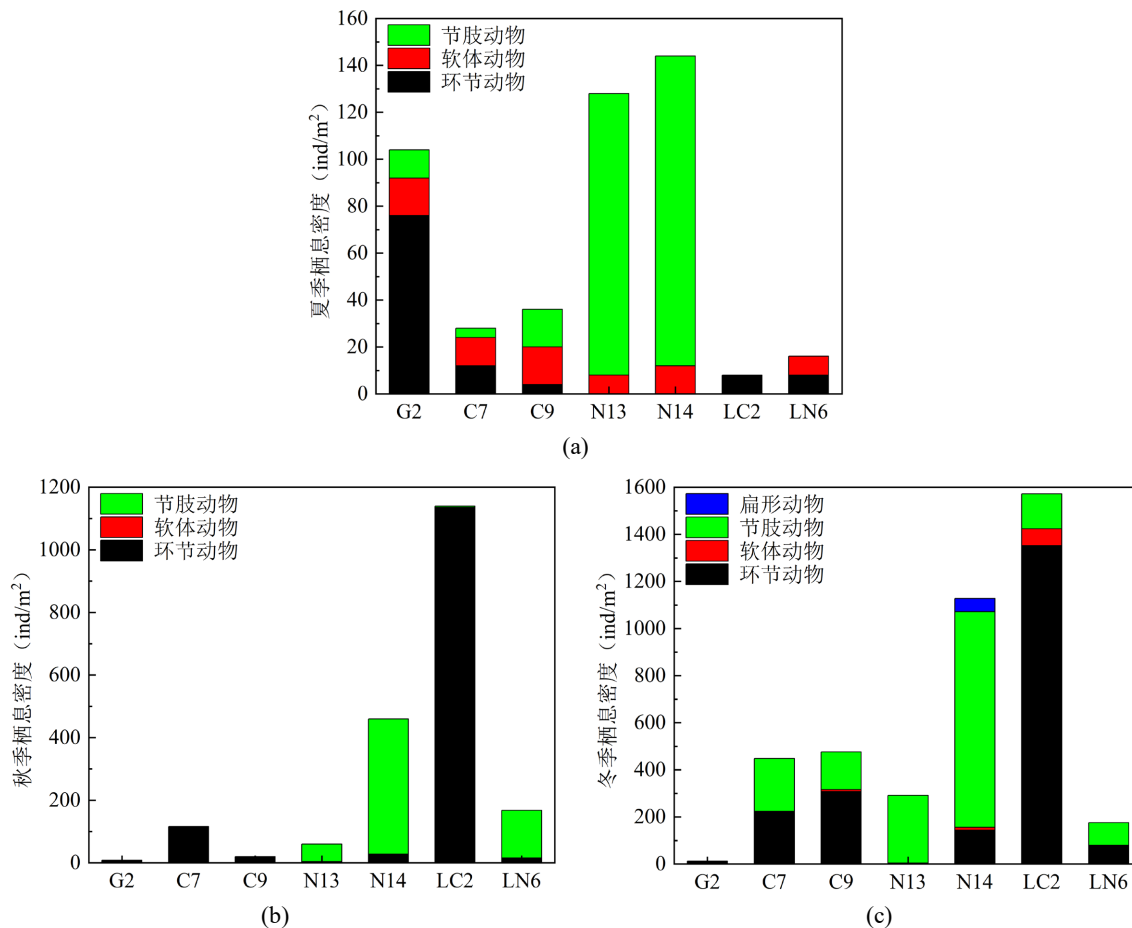


Figure 4. Benthic organism abundance ((a): Abundance composition in summer; (b): Abundance composition in autumn; (c): Abundance composition in winter)

图 4. 底栖生物栖息密度((a): 夏季栖息密度组成; (b): 秋季栖息密度组成; (c): 冬季栖息密度组成)

这种差异的主要原因是：柳子河城市河段的底质多为松软的淤泥，且河道内植被丰富，为底栖生物提供了良好的栖息环境。而 G2 采样点位于感潮河段，一方面受潮汐作用影响，栖息地周期性变化，不利于底栖生物生存[20]；另一方面，该采样点底质多为密实的细沙砾，底栖生物缺乏足够的生存空间[21]。

城市与感潮河段的环节动物(如水丝蚓)全年占优(冬季占比 > 70%)，尤其在低氧黑臭环境(DO < 4 mg/L)形成垄断；农郊与农村河段的节肢动物(如摇蚊)主导(密度占比 > 60%)，生境异质性支持多样性，但冬季低温导致稀有种减少。

3.2.3. 水质生物学评价

Margalef 丰富度指数的时空变化特征图 5(a)表明，内夹河流域底栖生物群落结构存在显著的季节与空间差异。夏季各采样点的 Margalef 指数均处于相对较高水平，所有样点均处于中度污染或轻于中度污染状态，其中农郊河段(N13, N14)的丰富度指数最高，反映出夏季底栖生物群落结构更为丰富，水质整体相对优良；秋季除农郊河段的 N13 与 N14 点外，其余各河段点位的丰富度指数显著下降，水质状况均处于重度污染，表明秋季底栖生物多样性大幅降低，群落结构趋于简单；冬季所有采样点的丰富度指数均处于中度污染或重度污染区间，其中 C9 和 N14 点的指数相对较高，水质状况相对较好。从空间分布来看，农郊河段(N13, N14)在各季节的丰富度指数均明显高于其他河段，而感潮河段(G2, C7, C9)和城市河段(LC2, LN6)的丰富度指数普遍偏低，反映出不同生境条件对底栖生物群落结构的显著影响。

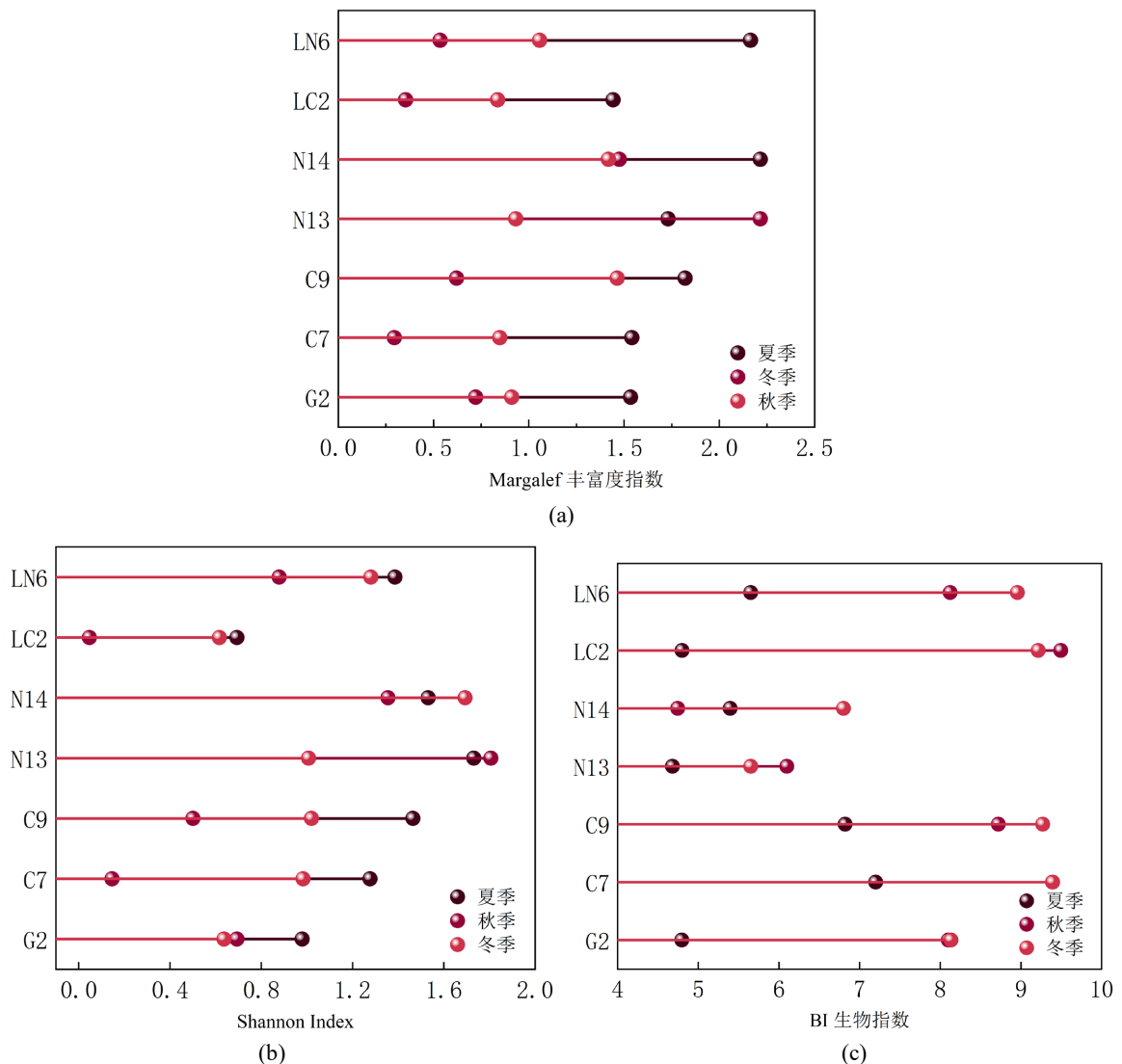


Figure 5. (a) Margalef richness index, (b) Shannon diversity index, (c) BI index
图 5. (a) Margalef 丰富度指数, (b) Shannon 多样性指数, (c) BI 生物指数

本研究计算了四季各采样点的 Shannon-Wiener 生物多样性指数, 结果如图 5(b) 所示。分析结果显示, 在整个研究区域内, 秋季的 Shannon-Wiener 生物多样性指数相对较低, 除农郊河段的 N13 和 N14 点外, 其他河段的水质大多处于重度污染状态。相比之下, 夏季的水质相对较好, 其中柳子河城市河段的 LC2 点水质最差。而在冬季, 农郊河段的 N14 点和农村河段的 LN6 点水质相对较好。

图 5(c) 表明, 夏季的 BI 生物指数普遍低于秋季和冬季, 说明夏季水质相对较好。从空间分布来看, 农郊河段的 BI 指数低于其他河段, 水质处于一般清洁水平; 而内夹河城市河段和柳子河城市河段的 BI 指数最高, 表明这些区域的水质相对较差。

3.2.4. 底栖生物与水环境因子相关性分析

冗余分析(RDA)清晰地揭示了环境因子对底栖动物群落结构的驱动模式(图 6)。前两排序轴累计解释了群落总变异的 46.23% (RDA1: 38.22%; RDA2: 8.01%)。蒙特卡洛置换检验表明, 在全部 10 个环境因子中, 仅总氮(TN, Env1)对群落结构的解释具有统计显著性($F = 3.624, p = 0.048$)。RDA1 轴主要代表了“污

染-低氧”梯度, 其与总氮(TN, $r=0.693$)、化学需氧量(COD, $r=0.629$)和氨氮($r=0.488$)呈强正相关, 而与溶解氧(DO, $r=-0.810$)呈强负相关。RDA2 轴则更多地反映了盐度(EC)和酸碱度(pH)等基础水质理化特性的变化。群落多样性指数与排序轴的相关性进一步证实了上述环境梯度的生态效应: Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均与 RDA1 轴呈极强的负相关(r 值分别为 -0.937 和 -0.882), 表明随着污染加重和溶解氧降低, 底栖生物多样性显著下降; 反之, 代表耐污程度的 BI 指数与 RDA1 轴呈强正相关($r=0.876$)。综上所述, RDA 分析表明, 以氮污染为核心的营养盐负荷及其引发的低氧条件是驱动该河流底栖动物群落结构退化、导致耐污类群占据优势的最关键环境压力。

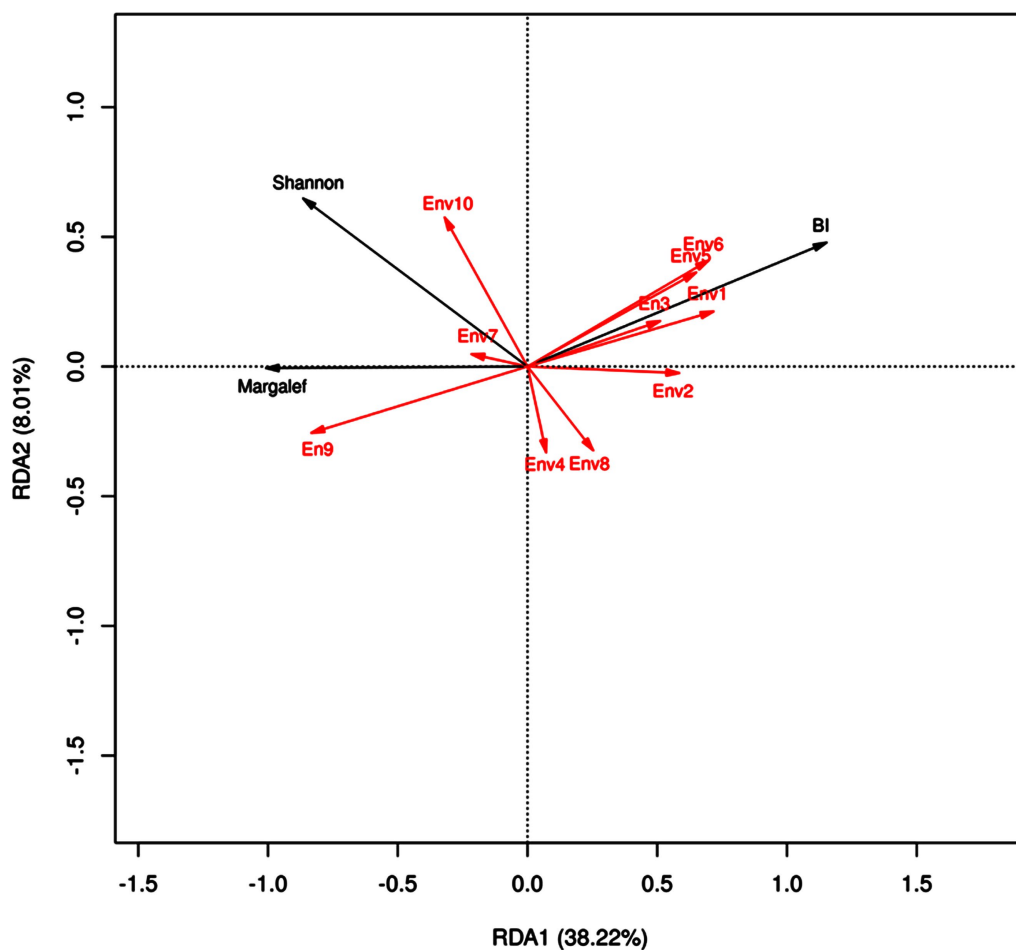


Figure 6. Redundancy analysis (RDA) biplot of biodiversity indices and environmental factors (Env1: Total nitrogen; Env2: Nitrite nitrogen; Env3: Ammonia nitrogen; Env4: Total phosphorus; Env5: Chemical oxygen demand; Env6: Dissolved oxygen; Env7: Turbidity; Env8: Electrical conductivity; Env9: Water temperature; Env10: pH)

图 6. 生物多样性指数与环境因子的冗余分析(RDA)双序图(Env1: 总氮; Env2: 亚硝态氮; Env3: 氨氮; Env4: 总磷; Env5: 化学需氧量; Env6: 溶解氧; Env7: 浊度; Env8: 电导率; Env9: 水温; Env10: pH)

4. 讨论

本研究通过野外实地勘察与综合实验分析揭示了沿海城市河流生态系统中水质污染与底栖生物群落的耦合响应机制。污染指数分析显示, 柳子河流域综合污染程度高于内夹河, 城市河段水质季节性退化特征明显(冬季综合污染指数波动最大), 印证了城市化进程中排污强度、硬质化河道与水文阻隔(如橡胶坝)对自净能力的削弱作用[22]。

水环境指标(综合污染指数 P)与底栖生物指数(如 BI 生物指数和 Margalef 丰富度指数)在反映水质污染状况上呈现高度一致性。结果显示, 研究区域水质整体处于重度污染状态($P > 1.0$), 尤其在柳子河流域和城市河段冬季表现最为显著(P 均值大于 3)。这一污染格局与底栖生物指标高度吻合: BI 生物指数在相同区域同样显示“严重污染”状态($BI > 8.5$), 如柳子河城市河段 LC2 点冬季 BI 指数高达 8.5。这表明高污染负荷(如 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$)直接驱动了耐污物的优势增长。冗余分析(RDA)显示 Margalef 丰富度指数与代表“污染-低氧”梯度的 RDA1 轴呈极强的负相关($r = -0.937$), 而该轴与总氮(TN)浓度呈强正相关($r = 0.693$)。这从生态学机制上表明, 以氮污染为核心的营养盐输入, 通过促进水体富营养化、消耗溶解氧, 恶化了底栖生物的生存环境, 导致了耐污物种的孳生, 最终表现为物种丰富度的下降。Margalef 丰富度指数在污染较轻的夏季(P 较低)显著升高(平均 1.77), 而在污染加重的冬季降至 1.06, 印证了水质改善(如夏季降水增强自净能力)可提升生物多样性。这与在黄河流域的研究中“B-IBI 指数与总氮的相关性最强(相关系数 $r = -0.401$, $P < 0.01$), 总氮浓度升高对底栖动物的生物完整性和河流生态健康有负面影响”的研究结果相同[23]。

水环境指标与生物数据的一致性表明, 底栖动物群落能有效反映污染梯度: 污染严重河段(如城市河段)以耐污物种主导(BI 指数高), 而污染较轻区域(如半自然河段)则以多样性丰富的敏感类群为主(Margalef 指数高)。

底栖动物群落结构对生境异质性与污染梯度响应显著。上游半自然河段(如 N14 点)因生境自然度高、底质异质性强, Margalef 丰富度指数(2.81)与 Shannon 多样性指数(2.02)最高, 以节肢动物(如摇蚊科)和敏感类群(如扁形动物)为主; 而城市河段(如 LC2 点)因低生境异质性与高污染胁迫, 耐污性环节动物(如水丝蚓属)占据绝对优势(冬季占比 74%), BI 指数(8.5)表明其处于“严重污染”状态。

底栖生物群落结构在不同生境类型(感潮河段、城市河段、半自然河段)中呈现显著差异, 主要由生境异质性、污染负荷和水文扰动驱动。

在半自然河段(如 N13~N14 点), 生境自然度高(植被覆盖率 $> 60\%$, 底质异质性强), 支持高生物多样性。Margalef 丰富度指数达峰值 2.22(夏季), Shannon 多样性指数最高(平均 1.63), 以节肢动物为主(占比 $> 70\%$)。栖息密度虽较低(平均 138 ind/m^2), 但群落结构稳定(物种数达 8~9 种), 反映低污染胁迫(P 较低)和底质多样性对生物群落的积极影响。

在城市河段(如 C6~C11 和 LC1~LC5), 生境均质化严重(硬质水泥底、排污口密集、 $\text{DO} < 4 \text{ mg/L}$), 导致耐污物种(环节动物)占据优势。BI 指数最高(平均 8.47), 冬季栖息密度飙升至 4104 ind/m^2 (占主导的环节动物如颤蚓密度占比 $> 70\%$)。这与高污染负荷(P 指数峰值)和低氧环境(DO 与 BI 正相关, $r = 0.580^{**}$)直接相关(低溶解氧通过呼吸胁迫直接淘汰了大多数需氧的水生昆虫等敏感类群, 从而在生态上筛选出生理上耐低氧的耐污物种(如颤蚓), 导致其种群暴发并形成单一化群落), 而群落结构单一化(物种数仅 3~4 种, 秋季最低), 印证了城市化污染(生活污水直排)和水利工程(橡胶坝阻水)对生境的破坏[24]。

在感潮河段(如 G1~G5), 受潮汐扰动周期性影响(电导率 $> 7000 \mu\text{S/cm}$), 生境不稳定(底质为细沙砾), 导致群落结构独特但脆弱。物种丰富度最低(平均 3 种), 以耐盐软体动物为主(如沙蚕科), 因为软体动物能够借助潮汐作用下进行扩散, 更利于在感潮河段栖息[25], 栖息密度季节性波动大(冬季最低, 平均 12 ind/m^2)。相关性分析显示水温(WT)对 Margalef 指数的正向影响($r = 0.516^*$), 表明温度变化加剧了群落敏感性。

5. 结论

沿海城市河流生态退化是污染胁迫与生境破碎化共同作用的结果。未来修复需重点关注: 1) 控制城市面源污染, 削减氮磷输入; 2) 通过工程措施: 人工构建并恢复底质的物理异质性、种植芦苇、香蒲等本土水生或湿生植物, 实现“复杂底质覆盖度达 20%~30%”与“自然植被岸线恢复率不低于 30%”的目

标。这可为修复工程的规划、设计与后期成效评估提供明确的科学依据和技术导向; 3) 优化水利工程调度, 通过优化橡胶坝调度、增设微地形起伏(如增设生态堰)等方式改善水动力条件, 将溶解氧水平提升至 5 mg/L 以上, 在污染治理与生境重建协同下实现水生态系统功能的有效恢复。

参考文献

- [1] 韩增林. 从大连市看北方沿海城市水资源的开发利用[J]. 国土与自然资源研究, 1993(3): 50-52.
- [2] 吴昱驹, 龙群, 何昌奋. 感潮水文资料软件处理技术研究[J]. 电子技术与软件工程, 2021(15): 42-43.
- [3] 崔博文, 汪旭明, 苏跃波, 等. 城市林木生物量对硬化地表和种植密度的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4463-4472.
- [4] Li, D.Y., Zhao, M., Cong, C.C. and Cai, Y.C. (2012) Current Status Analysis and Countermeasure Research on Water Ecological Environment of Urban Rivers and Lakes in China. *Advanced Materials Research*, **616**, 1455-1460. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.616-618.1455>
- [5] 温舒珂, 彭凯, 龚志军, 等. 近 40 年来太湖梅梁湾底栖动物群落演变特征及驱动因素[J]. 湖泊科学, 2023, 35(2): 599-611.
- [6] 曹家乐, 张亚辉, 张瑾, 等. 基于文献计量学的流域生态健康评价研究热点及趋势分析[J]. 环境保护科学, 2023, 49(1): 32-38.
- [7] 李松. 基于城市公共空间规划的河流生态治理思考[J]. 净水技术, 2020, 39(S1): 276-282.
- [8] 张博昱, 魏天怡. 深圳宝安区创新模式下的水环境治理[J]. 给水排水, 2021, 57(S2): 242-247.
- [9] 王艳平, 张伟, 苗家慧, 等. 感潮闸控型河流水污染特征及其对引水的响应[J]. 环境科学学报, 2023, 43(6): 226-237.
- [10] 吴燕霞. 雨源型城市河流水质变化规律及其模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [11] 顾骅珊, 张学刚. 基于环境容量的长三角近岸海域水污染总量控制研究[J]. 嘉兴学院学报, 2020, 32(3): 38-43.
- [12] Lobato, T.C., Hauser-Davis, R.A., Oliveira, T.F., Silveira, A.M., Silva, H.A.N., Tavares, M.R.M., et al. (2015) Construction of a Novel Water Quality Index and Quality Indicator for Reservoir Water Quality Evaluation: A Case Study in the Amazon Region. *Journal of Hydrology*, **522**, 674-683. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.021>
- [13] Ewaid, S., Abed, S., Al-Ansari, N. and Salih, R. (2020) Development and Evaluation of a Water Quality Index for the Iraqi Rivers. *Hydrology*, **7**, Article No. 67. <https://doi.org/10.3390/hydrology7030067>
- [14] Mandal, U.K., Warrington, D.N., Bhardwaj, A.K., Bar-Tal, A., Kautsky, L., Minz, D., et al. (2008) Evaluating Impact of Irrigation Water Quality on a Calcareous Clay Soil Using Principal Component Analysis. *Geoderma*, **144**, 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.014>
- [15] 刘志刚. 橡胶坝对河流水质及大型底栖动物的影响——以辽河流域为例[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 河北联合大学, 2012.
- [16] Karr, J.R. (1991) Biological Integrity: A Long-Neglected Aspect of Water Resource Management. *Ecological Applications*, **1**, 66-84. <https://doi.org/10.2307/1941848>
- [17] 王备新, 杨莲芳, 刘正文. 生物完整性指数与水生态系统健康评价[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 707.
- [18] 张远, 徐成斌, 马溪平, 等. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准[J]. 环境科学学报, 2007(6): 919-927.
- [19] 常江, 李灿坤, 冯姗姗, 李成. 煤炭城市山水林田湖草生态保护修复分区及规划策略研究——以古交市为例[J]. 生态经济, 2021, 37(6): 222-229.
- [20] 李进寿, 阮俊峰, 罗芬. 下浒海滨岩相潮间带底栖动物群落及其生态特征[J]. 宁德师范学院学报(自然科学版), 2019, 31(4): 390-394.
- [21] 谢元, 蒋晓辉, 王婷, 等. 黄河典型支流入干区底栖动物群落结构特征比较研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(5): 1067-1076.
- [22] 王加虎, 殷荣胜, 李丽, 等. 济灞河流域城市橡胶坝群景观流量补水调度研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(8): 152-160.
- [23] 刘哲, 袁璐, 张知墨, 等. 基于大型底栖无脊椎动物生物完整性指数的黄河流域河流生态健康评价[J]. 水生态学杂志, 2025: 1-13.
- [24] 刘旭东, 汪进生, 孙立娥, 等. 渤海山东近岸海域大型底栖动物的群落结构及多样性分析[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(6): 929-936+946.
- [25] 陈国贵, 王文卿, 谷宣, 等. 闽三角红树林底栖软体动物共存格局及机制[J]. 湿地科学与管理, 2021, 17(1): 9-13.