

蒋佳莉, 唐莲, 岳自慧, 等. 基于大型底栖动物完整性指数的后峡河河流健康评价[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(9): 156-166. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.012

JIANG Jiali, TANG Lian, YUE Zihui, et al. Health assessment of Houxia River based on benthic index of biotic integrity[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(9): 156-166. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.012

# 基于大型底栖动物完整性指数的 后峡河河流健康评价

蒋佳莉<sup>1,2,3</sup>, 唐莲<sup>4</sup>, 岳自慧<sup>1,2,3</sup>, 王文<sup>1,2,3</sup>, 马强<sup>1,2,3</sup>

- (1. 宁夏回族自治区水利科学研究院, 宁夏 银川 750021; 2. 水利部宁夏引黄灌区农业灌溉野外科学观测  
研究站, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏旱作节水高效农业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021;  
4. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**【目的】为全面了解后峡河流域大型底栖动物群落结构, 科学评价河流水生态健康状况。【方法】通过对后峡河流域大型底栖动物开展群落结构特征分析、*B-IBI* 健康评价指标体系构建及水环境因子相关性分析, 对群落丰富度、污染能力、功能摄食群、生物多样性指数等 4 类 18 个候选参数进行筛选, 经分布范围分析、判别能力分析及相关性分析后, 选取总分类单元数、敏感类群分类单元数、耐污类群分类单元数等 5 个核心指标开展评价, 采用比值法统一量纲, 以参照位点 25% 分位数建立评价标准。【结果】结果显示: (1) 后峡河流域共检出底栖动物隶属 3 门 4 纲 35 科, 节肢动物为该流域内优势类群。各监测位点在时间分布上, 丰水期 Shannon-wiener 多样性指数、Margalef 物种丰富度指数、Pielou 物种均匀度均高于平水期水平; 在空间分布上, 河流上游及水库进水口 3 种指数均较高。(2) 后峡河流域河流监测样点, 在时间分布上, 平水期健康状况大体优于丰水期; 在空间分布上, 中下游断面健康状况普遍较差, 河流上游断面健康状况总体较好。【结论】后峡河流域河流 *B-IBI* 健康评价标准:  $B-IBI > 3.92$  为健康,  $2.94 < B-IBI \leq 3.92$  为亚健康,  $1.96 < B-IBI \leq 2.94$  为一般,  $0.98 < B-IBI \leq 1.96$  为差,  $B-IBI \leq 0.98$  为极差。*B-IBI* 指数与水环境因子具有较强相关性, 其中与溶解氧呈极显著正相关, 与化学需氧量呈极显著负相关。本研究参照点选择合理、构建的 *B-IBI* 评价指标体系与后峡河流域河流健康状况适用性较强, 研究成果可为后峡河流域水生态系统修复与保护、山区河流健康评价方法提供科学依据与理论参考。

**关键词:** 后峡河; 大型底栖动物; 群落结构; 生物完整性指数; 健康评价; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.012

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X82

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)09-0156-11



## Health assessment of Houxia River based on benthic index of biotic integrity

JIANG Jiali<sup>1,2,3</sup>, TANG Lian<sup>4</sup>, YUE Zihui<sup>1,2,3</sup>, WANG Wen<sup>1,2,3</sup>, MA Qiang<sup>1,2,3</sup>

- (1. Hydraulic Research Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Field Scientific  
Observation and Research Station for Agricultural Irrigation in Ningxia Yellow River Diversion Irrigation Area, Ministry

收稿日期: 2024-12-12; 修回日期: 2025-02-06; 录用日期: 2025-02-13; 网络出版日期: 2025-02-25

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFD1900604); 宁夏自然科学基金项目(2024AAC03402); 2023年宁夏青年科技托举人才培养项目

作者简介: 蒋佳莉(1994—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水生态健康评价方面研究。E-mail: 549875927@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

of Water Resources, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Ningxia Dry Farming, Water Saving and Efficient Agricultural Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 4. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

**Abstract:** [Objective] In order to understand the community structure of macrobenthos in Houxia River basin and evaluate the ecological health status of river water scientifically. [Methods] Through analyzing the community structure characteristics of macrobenthos in Houxia River Basin, building *B-IBI* health evaluation index system and correlation analysis of water environmental factors, 18 candidate parameters in 4 categories, including community richness, pollution capacity, functional feeding group and biodiversity index, were screened. After distribution range analysis, discrimination ability analysis and correlation analysis, Five core indexes, including total taxa, sensitive taxa and pollution tolerance taxa, were selected for evaluation. The ratio method was used to unify the dimensions, and the evaluation criteria were established with reference to 25% quantile of loci. [Results] The result showed as follows: (1) The benthos belonging to 3 phyla, 4 classes and 35 families were detected in Houxihe River basin, and arthropods were the dominant group in the basin. Shannon-wiener diversity index, Margalef species richness index and Pielou species evenness in wet season were higher than those in normal season. In terms of spatial distribution, three indices were relatively higher in the upper reaches of the river and the inlet of the reservoir. (2) The health status of river monitoring sites in Houxia River basin was generally better than that in wet season in terms of time distribution; In terms of spatial distribution, the health status of the middle and lower reaches of the river is generally poor, while the health status of the upper reaches is generally good. [Conclusion] The assessment criteria of river *B-IBI* health in Houxia River basin are as follows:  $B-IBI > 3.92$  is healthy,  $2.94 < B-IBI \leq 3.92$  is sub-healthy,  $1.96 < B-IBI \leq 2.94$  is general,  $0.98 < B-IBI \leq 1.96$  is poor, and  $B-IBI \leq 0.98$  is extremely poor. The *B-IBI* index has a strong correlation with water environmental factors, in which the positive correlation with dissolved oxygen is extremely significant, and the negative correlation with chemical oxygen demand is extremely significant. In this study, the selection of reference points is reasonable, the construction of *B-IBI* evaluation index system is highly applicable to the river health status of Houxia River basin, and the research result can provide scientific basis and theoretical reference for the restoration and protection of water ecosystem in Houxia River basin and the evaluation method of mountain river health.

**Keywords:** Houxia River; large benthic animals; community structure; biological integrity index; health assessment; influencing factors

## 0 引言

我国河流健康现状不容乐观,水资源短缺、水污染加剧、水生态环境恶化等问题愈发突出,严重威胁水安全保障与生态功能,已成为制约经济社会可持续发展的关键因素之一<sup>[1-3]</sup>。河流生态系统因其在水质净化、生物多样性保护与修复、水源涵养、生态廊道等<sup>[4]</sup>方面发挥着重要作用,越来越受到人们的关注。目前,水生态健康评价方法主要有水质评价、生境评价、生物评价等,综合考虑水质、生境、生物等评价要素的《河湖健康评估技术导则》(SL/T 793—2020)因其适用性较强,在河湖管理与水生态保护修复中广泛应用;与此同时,考虑不同评价要素的综合指标评价法和指示物种法在学术界应用较多,前者根据水生生态特征及功能建立反映河流特征的评价指标体系,如胡嘉怡等<sup>[5-9]</sup>广泛利用模糊层次法、云模型、减法集对势、基于改进 POME 等方法评价其健康状况;后者根据指示物种受胁迫后群落结构的特征表征水生态

健康水平,如刘惠秋等<sup>[10-13]</sup>利用包括浮游植物、浮游动物、大型底栖无脊椎动物、鱼类等指示物种在内的 *P-IBI* (Phytoplanktonic-index of Biotic Integrity)、*Z-IBI* (Zooplankton-index of Biotic Integrity)、*B-IBI* (Benthic-index of Biotic integrity)、*F-IBI* (Fish-index of Biotic integrity) 等理论开展河流健康评价。其中 *IBI* 理论最早由 KEARANS 等<sup>[14]</sup>提出,并对美国田纳西流域进行健康评价,后经美国国家环保局倡导并逐步发展成为世界范围内评价水体健康状况的通用理论方法,国内最早由王备新等<sup>[15]</sup>引入并对黄山流域河流开展了健康状况评价,随之被广泛应用于国内河流生态系统健康状况评价。两类评价方法无绝对优劣之分,前者偏向利用数理统计方法直接评价河流健康水平,后者更侧重利用能够反映河流特征的生物物种作为指示物种来表征水生态状况。

近年来, BLOCKSOM 等<sup>[16-19]</sup>开展了大型底栖动物与水生态系统相关性的研究工作,围绕底栖动物群落结构特征、底栖动物在水生态河流健康评价中应

用、*B-IBI* 指数与环境因子间的关系等内容开展探讨, 对准确判断河流生态环境状况与人类活动对河流生态系统健康状况影响, 加强河湖管护及流域水生态保护与修复提供了有益借鉴。大型底栖动物作为河流生态系统中能量流动和物质循环的重要组成部分, 具有物种丰富、生命周期长、移动能力弱、方便采集且不同种类对环境变化敏感性呈现出较大差异性等特点<sup>[20-21]</sup>, 常作为指示物种广泛应用在河流、湖泊、湿地等生态系统健康评价诊断中, 学者陆续对不同级别、不同区域的河、溪生态系统开展河流健康评价工作<sup>[22-24]</sup>, 但范围多集中我国华北、华中, 属典型温带气候带, 相较之下, 西北干旱半干旱区山区型河流相关研究较少。我国西北干旱半干旱地区冬季严寒, 夏季日照强, 蒸发作用强烈, 荒漠化、水土流失严重, 河流生境遭外界生态环境变化后极难恢复。不同地区受流域地理位置、气候水文等因素影响, 加之不同河流的独特性, 选用的评价指标不同, 相应地很难用统一评价标准评价不同河流健康, 因此, 结合本地区资源禀赋条件和河流自身特性, 选择合适指示物种、确定合适评价体系及标准对河流开展相关研究工作极为重要。

后峡河流域地处宁夏南部六盘山地区, 属于宁夏重要的生态屏障区和水源涵养区, 也是我国“两屏三带”生态安全战略格局中黄土高原-滇藏生态屏障的重要组成部分, 区域降水量丰沛, 植被覆盖率高, 生物多样性丰富, 在黄河流域生态安全和社会经济发展方面具有十分重要的地位。鉴于后峡河特殊的地缘性, 且已有前人评价了该流域水质状况, 但目前利用大型底栖动物完整性评价该流域河流水生态健康状况的研究鲜有, 本研究通过开展大型底栖动物群落结构特征分析、构建 *B-IBI* 体系开展河流健康评价, 探析 *B-IBI* 指数与水环境因子关系, 实现对后峡河流域河流水生态状况综合评估, 以期对西北干旱半干旱区山区河流生态风险预测、管理保护与生态修复提供理论指导与参考, 助力黄河流域生态保护与先行区建设。

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 研究区概况

后峡河流域地处宁夏固原市泾源县西北部, 其地理位置为 106°17'E—106°33'E, 35°31'N—35°33'N, 属泾河一级支流。流域总面积为 206 km<sup>2</sup>, 后峡河干流总长 37 km, 其中, 宁夏泾源县境内流域面积为 173 km<sup>2</sup>, 河长为 27.4 km。流域整体西高东低, 北高南低, 呈现年温差和日温差较大的大陆性季风气候特

征, 夏季短暂温湿多雨, 冬季漫长寒冷干燥, 日照充足, 年平均气温 5.3 ℃, 流域多年平均降水量为 630 mm, 降雨时空分布呈明显的季节性和年际差异, 流域水系自西向东水系分散、支流众多。

### 1.2 样品采集及处理

为全面摸排后峡河河流底栖动物群落状况, 结合河流周边人为活动干扰、水文特征差异、生态功能发挥等因素, 河流全线设置 5 个采样点, 包含上游断面、水库进水口、水库出水口、中游断面、下游断面, 如图 1 所示。采样月份为 5 月(平水期)、8 月(丰水期), 共计 10 个监测位点。选择监测点上下游 100 m 范围作为采样区域, 采用索伯网(0.3 m×0.3 m, 60 目)选取具有代表性的河滩 1 m<sup>2</sup>, 将此 1 m<sup>2</sup> 内之石块检出, 夹取各种附着在石上的底栖动物, 用 40 目分样筛淘洗并筛取标本, 放入编号瓶中用 10% 甲醛溶液固定保存。将每个断面采集的底栖动物样品, 按采集编号逐号进行整理, 所采标本鉴定到属或种, 再分种逐一进行种类数量统计, 分类鉴定参考国内外相关资料<sup>[25-26]</sup>。河流监测位点水质理化指标水温(WT)、pH、溶解氧(DO)的获取采用便携式测量仪(YSI-550A、METTLER TOLEDO Seven2Go)原位测定, 化学需氧量(COD)、生物需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总磷(TP)、总氮(TN)指标的获取参照《水和废水监测分析方法》(第四版)实验室测定。

### 1.3 数据处理及分析

为评价后峡河底栖动物群落结构特征, 选取 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )、Margalef 指数( $D$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )进行生物多样性评价<sup>[11]</sup>, 计算公式为

$$H' = - \sum (n_i/N) \ln(n_i/N) \quad (1)$$

$$D = (S - 1)/\ln N \quad (2)$$

$$J = H'/\lg S \quad (3)$$

式中,  $N$  为底栖动物总个体数(个);  $n_i$  为第  $i$  种底栖动物的个体数(个);  $S$  为总物种数量(个)。

采用 SPSS 22.0 进行参数分布范围检验和相关性分析, Origin2021 绘制群落结构图、相关性热图, Arcgis10.8 绘制监测点位示意图。

### 1.4 *B-IBI* 指标体系构建

#### 1.4.1 参照点的选择

采用最小干扰法确定参照点和受损点, 同时参考国内 *B-IBI* 标准化参考点筛选相关研究, 考虑水质、栖息地质量评价、人类干扰强度、土地利用类型等因素<sup>[27-29]</sup>, 综合选定水库进水口为参照点, 其余点位为受损点。



图 1 后峡河采样监测点示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling and monitoring sites in Houxia River

#### 1.4.2 评价指标建立

参考前期研究成果<sup>[30-31]</sup>, 选取对水生态环境变化较为敏感的 4 类 18 个指标作为候选生物指标。

#### 1.4.3 核心参数的筛选

通过分布范围分析、判别能力分析及相关性分析得到评价指标<sup>[32-33]</sup>。

(1) 分布范围检验: 候选参数中若有超过 95% 的点位数值为 0 的参数, 则其表现的信息指示作用不强, 予以剔除。

(2) 判别能力分析: 剩余参照点和受损点的参数进行箱线图对比分析, 如果参照点和受损点的箱线图范围无重叠, 则记为  $IQ$  (Inter quartile) = 3; 如重叠且两者中位数值在对方箱线图范围外, 则记为  $IQ = 2$ ; 如重叠且两者只有一个中位值在对方箱线图范围内, 则记为  $IQ = 1$ ; 如重叠且两者中位值均在对方箱线图范围内, 则记为  $IQ = 0$ 。

(3) 相关性分析: 对于  $IQ \geq 2$  的参数, 进行 Pearson 相关性分析, 相关系数  $|r| > 0.75$  说明参数间反映的生物信息大部分是重叠的, 根据两参数的反

应信息的重要性, 选择性的保留其中一个参数, 作为  $B-IBI$  核心参数。

#### 1.4.4 指标的赋分及评价标准

以参照位点  $B-IBI$  值 25% 分位数作为健康评价标准, 对小于 25% 分位数值值的分布范围进行四等分, 确定出“健康”“亚健康”“一般”“差”和“极差”五个健康等级。

## 2 结果与分析

### 2.1 底栖动物群落结构

#### 2.1.1 底栖动物种类组成及优势种

本次调查后峡河流域共检出底栖动物隶属 3 门 4 纲 35 科, 其中环节动物门 1 纲 1 目 1 种, 占物种总数 2.86%; 软体动物门 1 纲 4 目 7 种, 占物种总数 20%; 节肢动物门 2 纲 8 目 27 种, 其中昆虫纲 7 目 26 科, 占物种总数 74.28%, 甲壳纲 1 目 1 科, 占物种总数 2.86%。

对不同水情期底栖动物开展群落结构特征分析, 各位点底栖动物丰富度如图 2 所示, 其中: 平水期共检出底栖动物隶属 2 门 3 纲 8 目 21 科, 丰水期共检出底栖动物隶属 3 门 4 纲 12 目 27 科, 不同水情期节肢动物物种数量占比分别为 89.3% 和 69.3%, 软体动物物种数量占比分别为 10.7%、29.0%, 说明节肢动物为该流域内优势类群, 且后峡河丰水期整体水质较好, 软体动物物种数量偏多。

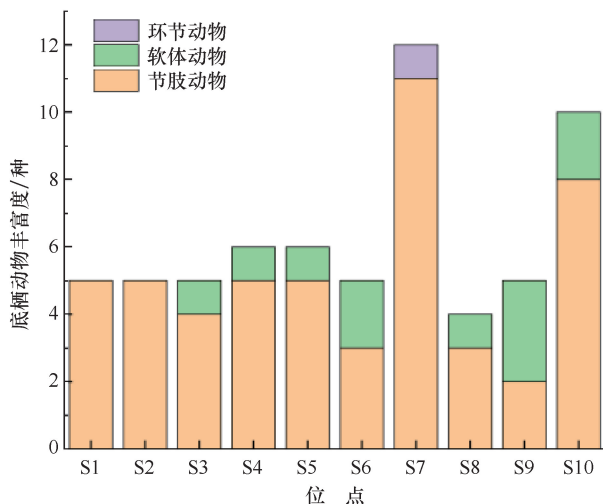


图 2 后峡河底栖动物丰富度

Fig. 2 Abundance of benthic animals in Houxia River

#### 2.1.2 底栖动物密度及生物量

本次调查底栖动物数量及多样性分布情况: 各监测样点底栖动物平水期密度为 12.2~81.1 ind/L, S3 样点最高, S1 样点最低, 平均密度为 49.98 ind/L;

底栖动物生物量为 0.33~2.35 mg/L, S4 样点最高, S2 样点最低, 平均生物量为 0.93 mg/L。丰水期密度为 8.9~68.9 ind/L, S5 样点最高, S1 样点最低, 平均密度为 31.12 ind/L; 生物量为 0.31~2.72 mg/L, S1、S2 样点最高, S3 样点最低, 平均生物量为 1.46 mg/L。

### 2.1.3 底栖动物多样性分析

选取的 3 个群落多样性指数在不同水情期变化如图 3 所示, 平水期 Shannon-wiener 多样性指数变化范围为 0.96~1.20, S5 样点最高, S3 样点最低, 平均指数为 1.16; Margalef 物种丰富度指数变化范围为 0.91~1.60, S1 样点最高, S3 样点最低, 平均指数为 1.22; Pielou 物种均匀度变化范围为 0.59~0.85, S1 样点最高, S3 样点最低, 平均指数为 0.70。丰水期 Shannon-wiener 多样性指数变化范围为 1.09~2.27, S2 样点最高, S3 样点最低, 平均指数为 1.58。Margalef 物种丰富度指数变化范围为 0.89~3.31, S2 样点最高, S3 样点最低, 平均指数为 1.89。Pielou 物种均匀度变化范围为 0.70~0.93, S1 样点最高, S4 样点最低, 平均指数为 0.83。在时间分布上, 丰水期 Shannon-wiener 多样性指数、Margalef 物种丰富度指数、Pielou 物种均匀度均高于平水期水平; 主要是丰水期水流湍急, 水面较为宽阔, 加之河流连通性较好, 河道底质多为砾石, 温度较温暖, 为底栖动物提供了良好的生存繁殖条件。在空间分布上, 河流上游及水库进水口 Shannon-wiener 多样性指数、Margalef 物种丰富度指数、Pielou 物种均匀度水平较高; 主要是上游及水库进水口受人为干扰程度较低, 水质较好, 为底栖动物良好繁育提供有利条件。

## 2.2 B-IBI 指数体系的构建

### 2.2.1 分布范围分析

计算 18 个候选参数在参照点的分布情况如表 1 所列, 剔除随干扰的增强, 值的变化范围很小或很大的生物参数<sup>[34]</sup>, 指示信息作用较低, 不适宜作为 B-IBI 指数体系参数, 故剔除 M11、M13。

### 2.2.2 判别能力分析

对剩余 16 个指标采用箱型图法分析候选指标判别能力<sup>[35]</sup>, 结果如图 4 所示, 剔除参照点和受损点中位数在彼此区间的指标 M2、M10、M12、M14、M15、M17 和 M18, 保留 M1、M3、M4、M5、M6、M7、M8、M9、M16, 上述 9 个候选指标进行下一步相关性分析。

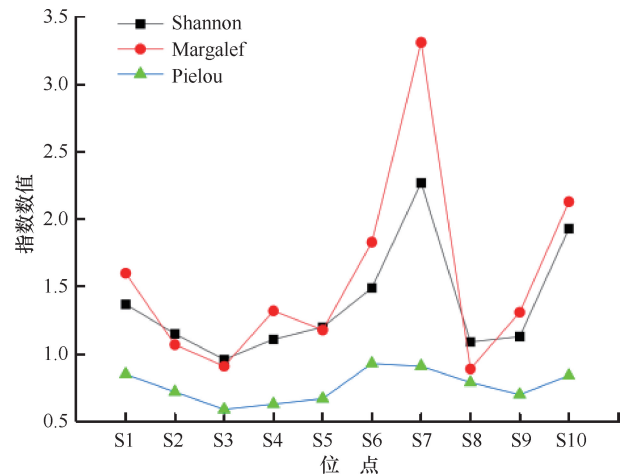


图 3 后峡河底栖动物群落多样性指数

Fig. 3 Diversity index of benthic fauna in Houxia River

### 2.2.3 相关性分析

对上述 9 个候选指标进行 Pearson 相关性分析与检验, 检验各参数反映信息的独立性, 结果如图 5 所示。结果表明: M1 与 M16 之间显著相关, M3 与 M8 之间显著相关, M5 与 M7 之间显著相关、M6 与 M9 之间显著相关, 其中 M1 为总分类单元数, M16 为 Simpson 优势度指数, 鉴于在底栖动物生物完整性指数相关研究中 M1 采用较多, 剔除 M16; M5 为耐污类群个体相对丰度, M7 为耐污类群分类单元相对丰度, 考虑到个体相对丰度较分类单元相对丰度更常用于 B-IBI 评价体系中<sup>[36]</sup>, 且个体相对丰度更能准确反应生物信息, 剔除 M7; M9 除了与 M6 显著相关, 与 M5、M7 的相关性程度较高, 均大于 0.6, 剔除 M9, 保留 M6; M8 除了与 M3 显著相关, 与 M6 相关性也大于 0.6, 剔除 M8, 保留 M3; 最终筛选 M1、M3、M4、M5、M6 作为后峡河流域河流健康评价中 B-IBI 核心参数。

### 2.2.4 指标赋分

对经相关性分析筛选后的 5 个参评指标进行赋分, 采用比值法统一量纲, 随干扰增强而变化的正向和负向的候选参数分别以全部点位 5%分位数和 95%分位数作为最佳期望值, 参数分值分布范围为 0~1, 大于 1 的记为 1, 所有参数分值得之和为该采样点 B-IBI 值, 将参照点的 25%分位数确定为健康评价标准, 小于此值进行四等分, 依次划分为亚健康、一般、差、极差健康状况, 评价标准如表 2 所列。

## 3 讨论

### 3.1 B-IBI 指数与环境因子间的关系

将各位点 B-IBI 指数与主要环境因子进行相关

表 1 后峡河 *B-IBI* 候选参数及在参照点中分布范围

Table 1 Candidate parameters of *B-IBI* in Houxia River and their distribution in reference points

指标类型	序号	候选参数	对干扰的反应	参数值						
				平均值	标准差	最小值	最大值	25%分位数	中位数	75%分位数
群落丰富度	M1	总分类单元数	减小	6.30	2.45	4.00	12.00	5.00	5.00	6.00
	M2	总生物量	减小	36.50	21.70	8.00	73.00	20.50	32.00	56.50
污染能力	M3	敏感类群分类单元数	减小	1.80	1.08	1.00	4.00	1.00	1.00	2.75
	M4	耐污类群分类单元数	增大	2.40	1.62	0.00	6.00	1.25	2.00	3.00
	M5	耐污类群个体相对丰度	增大	0.33	0.25	0.00	0.84	0.16	0.25	0.50
	M6	敏感类群个体相对丰度	减小	0.31	0.19	0.08	0.58	0.12	0.31	0.51
	M7	耐污类群分类单元相对丰度	增大	0.39	0.23	0.00	0.80	0.23	0.37	0.58
	M8	敏感类群分类单元相对丰度	减小	0.28	0.13	0.08	0.50	0.20	0.23	0.40
	M9	FBI 指数	增大	5.26	1.05	3.57	6.92	4.72	5.37	5.95
功能摄食群	M10	集食者个体相对丰度	增大	0.24	0.19	0.00	0.62	0.11	0.15	0.36
	M11	滤食者个体相对丰度	增大	0.09	0.24	0.00	0.79	0.00	0.00	0.00
	M12	捕食者个体相对丰度	减小	0.28	0.25	0.00	0.83	0.03	0.30	0.39
	M13	撕食者个体相对丰度	减小	0.08	0.16	0.00	0.55	0.00	0.00	0.05
	M14	刮食者个体相对丰度	减小	0.32	0.28	0.00	0.84	0.07	0.29	0.52
生物多样性指数	M15	Shannon-Wiener 指数	减小	1.37	0.40	0.95	2.27	1.12	1.18	1.46
	M16	Simpson 优势度指数	减小	0.66	0.12	0.52	0.88	0.57	0.61	0.74
	M17	Margalef 丰富度指数	减小	1.55	0.70	0.89	3.31	1.10	1.31	1.77
	M18	Pielou 均匀度指数	减小	0.76	0.11	0.59	0.93	0.68	0.75	0.85

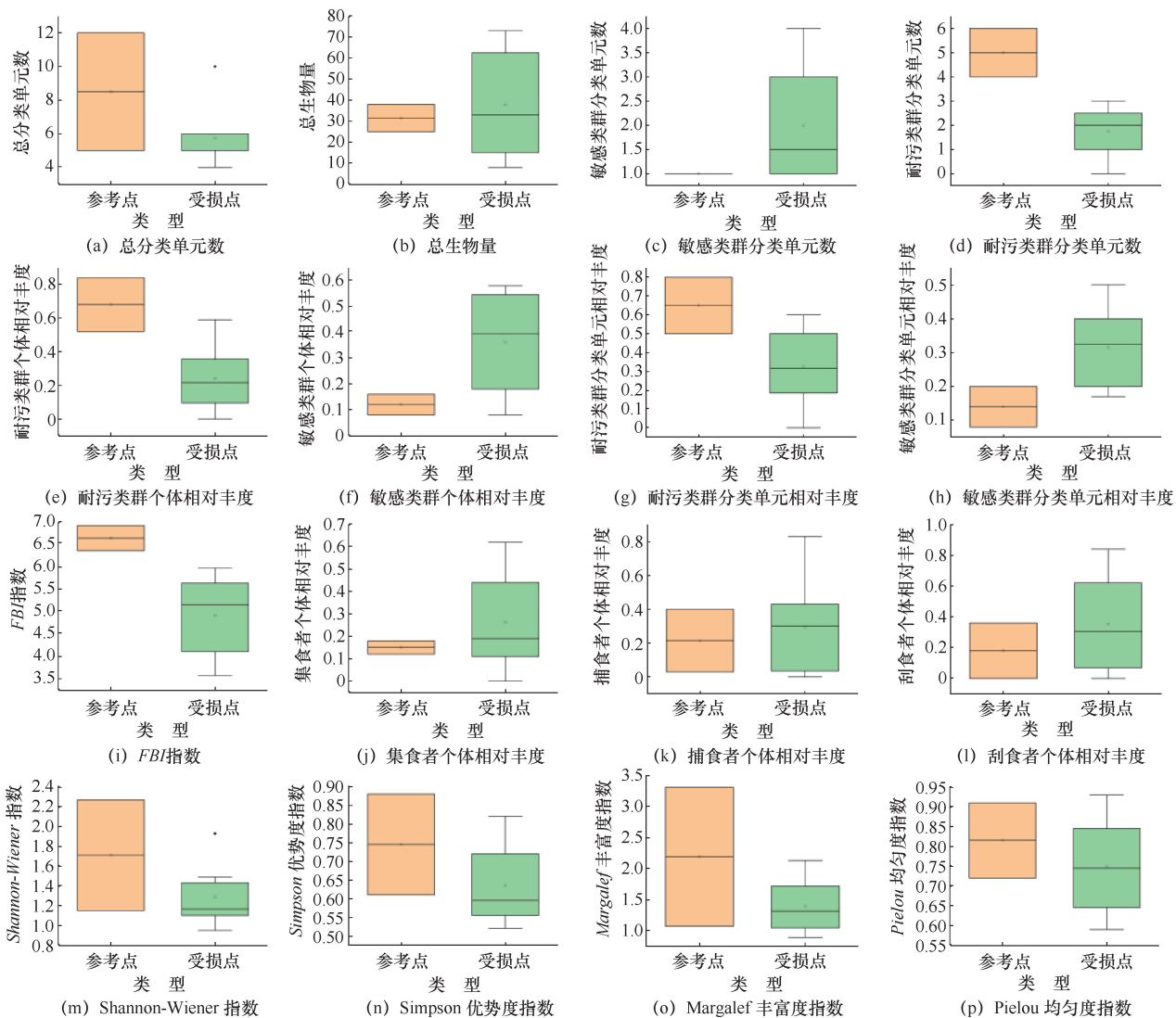


图 4 16 个候选参数箱型图分析

Fig. 4 Analysis of 16 candidate parameter box patterns

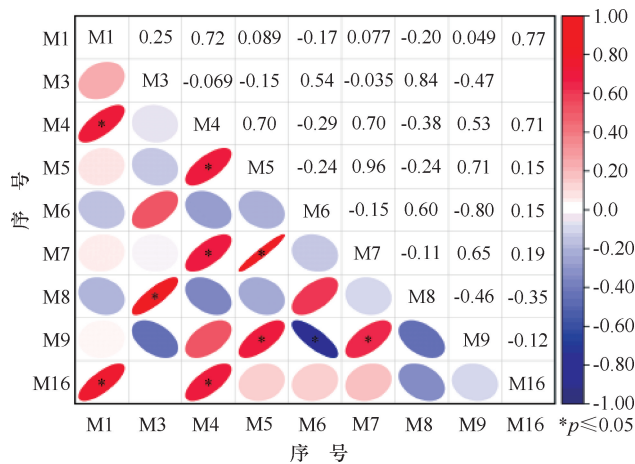


图5 候选指标 Pearson 相关性分析

Fig. 5 Pearson correlation analysis of candidate indicators

表2 后峡河健康状况 B-IBI 指数评价标准

Table 2 Evaluation criteria of B-IBI index of health status of Houxia River

健康	亚健康	一般	差	极差
>3.92	(2.94, 3.92]	(1.96, 2.94]	(0.98, 1.96]	≤0.98

性分析, 结果如表 3 所列。B-IBI 指数与溶解氧呈极显著正相关, 与化学需氧量呈极显著负相关, 与生物需氧量、氨氮、总磷、总氮指标相关性较弱呈负相关, 这与相关研究结论一致<sup>[37-40]</sup>。产生原因主要是溶解氧是底栖动物生存的关键因子, 溶解氧含量越高, 底栖动物能够维持正常生理代谢活动, 生长繁殖程条件较好, 底栖动物群落结构更趋复杂, B-IBI 指数随之上升; 当溶解氧含量下降, 水生生物间对于氧气的争夺加剧, 不利于底栖动物生长, 且底栖动物死亡也要消耗溶解氧分解尸体, 因低氧状态导致水生态环境由好氧转变为厌氧, 两者互馈使得水生态环境更差, B-IBI 指数因此降低。而化学需氧量浓度的升高与沿河农业面源污染、生活污水及环境因素等有关, 水域内有机物和无机物过多, 氧化消解过程需消耗大量氧气, 导致水体中含氧量降低, 化学需氧量增加, B-IBI 指数进而降低, 反之 B-IBI 指数升高。生物需氧量、氨氮、总磷、总氮指标也与 B-IBI 指数呈负相关, 表明底栖动物对以上指标也较为敏感, 水体中的

表3 B-IBI 指数与主要环境因子相关性分析

Table 3 B-IBI index and main environmental factor correlation analysis

水温 (WT)	pH	溶解氧 (DO)	化学需氧量 (COD)	生物需氧量 (BOD <sub>5</sub> )	氨氮 (NH <sub>3</sub> -N)	总磷 (以 P 计)	总氮 (以 N 计)
-0.15	0.29	0.75**	-0.77**	-0.59	-0.56	-0.4	-0.25

注: \*\*表示在 0.01 级别(双尾)相关性极显著。

污染因子影响底栖动物生存条件, 且已有研究表明底栖动物活动会促进沉积物中氮、磷的释放, 同时生物体自身代谢也会释放出氮、磷<sup>[41]</sup>, 过高的氮、磷水平会导致底栖动物逐渐消亡, 进而破坏群落结构完整性, 致使 B-IBI 指数降低。

### 3.2 参照点选择合理性

参照点的选择在 B-IBI 评价体系中至关重要, 通过对流域内底栖动物群落结构现状和参考状态比较分析, 判断人为干扰对底栖动物群落结构影响。理论上参照点应为没有受到人类活动干扰的点位, 拥有较自然的物理形态结构和完整生态系统结构, 目前国内相关研究报道中, 参照点的选择多依据水质、栖息地质量评价、人类干扰强度、土地利用类型等因素综合选定, 其中水质反映营养物富集和有机物污染状况, 栖息地质量特征反映底栖动物的多样性和丰度, 土地利用类型反映潜在的非点源污染<sup>[42]</sup>。考虑到后峡河为山区型农村河流, 沿河受群众生活、农业面源污染等人为因素干扰较大, 综合选定水库进水口为参照点, 其处于河流上游区域, 具有较好生态流量, 污染水平较低, 其余点位为受损点。

从群落结构特征来看, 参照位点物种数量分布在 5~12 种之间, 受损位点在 4~10 种之间, 平均物种数分别为 8.50、5.75, 节肢动物物种数量占比分别在 95% 以上、75% 以上; 且选取的 3 个生物多样性指数参照位点均高于受损位点, 说明参照点具有较好的物种多样性且水质状况较好。同时绘制参照点与受损点 B-IBI 箱型图如图 6 所示, 箱体无重叠, 且参照点整体上 B-IBI 平均值 4.13 高于受损点 B-IBI 平均值 2.60, 综上说明参照点选择是合理可行的。

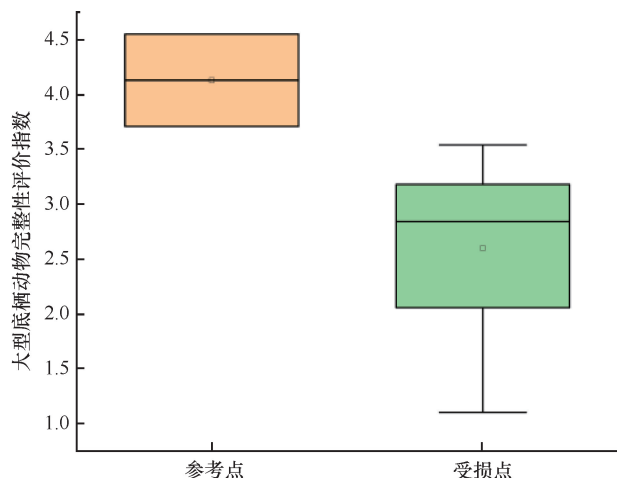


图6 参照点和受损点 B-IBI 箱型图

Fig. 6 B-IBI box type of reference point and damaged point

### 3.3 B-IBI 指标体系与后峡河流域河流健康状况适用性

河流 *B-IBI* 指数评价结果如表 4 所列, 由 *B-IBI* 结果可知, 平水期各监测点位河流健康水平处于一般、亚健康、健康, 其中健康、亚健康样点各 1 个, 占比均为 20%, 一般样点 3 个, 占比 60%; 丰水期各监测样点河流健康水平处于较差、一般、亚健康, 其中亚健康样点 3 个, 占比 60%, 一般、较差样点各 1 个, 占比均为 20%。整体而言, 后峡河各位点平水期健康状况大体优于丰水期。综合不同水情期结果来看, 健康样点 1 个, 为 S1 位点, 占比 10%; 亚健康样点 4 个, 为 S1、S6、S7、S9 位点, 占比为 40%; 一般样点 4 个, 为 S3、S4、S5、S8 位点, 占比为 40%; 较差样点为 1 个, 为 S10 位点, 占比为 10%。

表 4 后峡河健康状况 *B-IBI* 指数评价结果

Table 4 Evaluation results of *B-IBI* index of health status of Houxia River

位 点	<i>B-IBI</i>	评价等级	位 点	<i>B-IBI</i>	评价等级
S2	4.55	健 康	S7	3.71	亚健康
S1	2.88	亚健康	S6	3.07	亚健康
S3	2.80	一 般	S8	2.09	一 般
S4	2.02	一 般	S9	3.29	亚健康
S5	3.54	一 般	S10	1.10	较 差

根据 *B-IBI* 指标体系评价后峡河河流健康状况结果, 结合各核心指标对 *B-IBI* 贡献程度, 如表 5 所列, 发现 M1、M3、M6 对河流整体健康水平影响程度较大, 其中 M1(总分类单元数)平均贡献程度为 28.20%, M3(敏感类群分类单元数)平均贡献程度为 26.63%, M6(敏感类群个体相对丰度)平均贡献程度为 18.59%, 而 M4(耐污类群分类单元数)、M5(耐污类群个体相对丰度)平均贡献程度分别为 13.12%、13.46%。整体而言, 群落丰富度与敏感类群生物指

表 5 后峡河各评价位点核心指标对 *B-IBI* 指标影响程度

Table 5 Influence degree of core indexes of each evaluation site in Houxia River on *B-IBI* indexes

监测位点	健康状况	<i>B-IBI</i> 值	核心指标百分比/%				
			M1	M3	M4	M5	M6
S2(参照点)	健 康	4.55	20.36	21.95	17.22	21.95	18.52
S7(参照点)	亚健康	3.71	0.00	26.93	26.93	19.23	26.90
S1(受损点)	一 般	2.88	32.21	23.16	20.43	21.71	2.49
S3(受损点)	一 般	2.80	33.11	11.90	14.00	28.88	12.10
S4(受损点)	一 般	2.02	39.37	16.51	9.71	1.70	32.70
S5(受损点)	亚健康	3.54	22.48	28.28	11.09	9.87	28.28
S6(受损点)	亚健康	3.07	30.17	32.54	12.76	11.17	13.36
S8(受损点)	一 般	2.09	47.94	47.94	0.00	0.00	4.11
S9(受损点)	亚健康	3.29	28.19	30.40	5.96	6.60	28.85
S10(受损点)	较 差	1.10	24.16	0.00	53.66	22.17	0.00

标 M1、M3、M6 比值的增加是决定河流健康水平的主要因素, 而耐污类群生物指标 M4、M5 比值的增加将直接影响评价位点结果处于更差水平。

从各位点 *B-IBI* 值来看, S2、S7 位点健康状况为健康或亚健康, 其余位点健康状况从亚健康、一般到较差, 其差异较大。参照点受人为干扰程度较弱, 多处于河源区域, *B-IBI* 值较高, 健康状况较好; 而受损位点多处于河流中下游, 受农业面源、人类活动干扰强度、物理生境状况等因素影响, 健康状况一般, 与实际相符。从不同水情期来看, 平水期 *B-IBI* 均值 3.16 高于丰水期均值 2.65, 与上述群落结构特征分析结论相符, 说明本研究构建 *B-IBI* 评价体系在后峡河流域的适用性较强。

## 4 结 论

本文通过对后峡河大型底栖动物开展群落结构特征分析, 基于大型底栖动物生物完整性指数评价指标体系开展了河流水生态健康评价, 并探讨了 *B-IBI* 指数与环境因子间关系, 得到以下结论。

(1) 后峡河流域共检出底栖动物隶属 3 门 4 纲 35 科, 其中环节动物、软体动物及节肢动物物种占比分别为 2.86%、20.00%、77.14%, 节肢动物为该流域内优势类群。各监测位点在时间分布上, 丰水期 Shannon-wiener 多样性指数、Margalef 物种丰富度指数、Pielou 物种均匀度均高于平水期水平; 在空间分布上, 河流上游及水库进水口 Shannon-wiener 多样性指数、Margalef 物种丰富度指数、Pielou 物种均匀度水平较高。

(2) 后峡河流域河流水生态系统健康状况整体较好, 其中 5 个样点为健康或亚健康, 4 个样点为一般, 1 个样点为较差。在时间分布上, 平水期健康状况大体优于丰水期; 在空间分布上, 各监测样点健

康状况处于“健康”、“亚健康”、“一般”、“较差”四个等级, 差异较大, 中下游断面健康状况普遍较差, 河流上游断面健康状况总体较好。

(3)后峡河流域 *B-IBI* 指数与水环境因子存在相关性, 与溶解氧呈极显著正相关, 与化学需氧量呈极显著负相关, 与生物需氧量、氨氮、总磷、总氮指标相关性较弱, 呈负相关。

(4)本研究选择的参照点、受损点符合实际, *B-IBI* 评价体系及方法在后峡河流域具有较强的适用性, 可为后续该区域河流健康评价提供理论参考与借鉴。但本研究样点的布设仅为单次, 尚未开展样点物种结构在时间上的动态变化, 缺乏时间尺度的研究, 可在今后开展长时间序列、连续的监测, 进一步以流域为基本空间尺度探析 *B-IBI* 与时间尺度变化响应关系。

## 参考文献 (References):

[1] 李国英. 进一步全面深化水利改革 为推动水利高质量发展、保障我国水安全作出新的贡献: 在 2025 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 1-12.  
LI G Y. Further comprehensively deepen water conservancy reform to promote high-quality development of water conservancy and safeguard national water security: A speech at the 2025 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(1): 1-12.

[2] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.  
LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.

[3] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在 2023 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 1-11.  
LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20<sup>th</sup> National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(1): 1-11.

[4] 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.  
GAO F, LAN L, HUANG Q. Advances on evaluation of river health in changing environments[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6): 81-87.

[5] 胡嘉怡, 雷锐, 刘海霞, 等. 基于 PSR 模型和模糊层次综合评价模型的河流健康评价研究[J]. 水利发展研究, 2024, 24(8): 95-105.

HU J Y, LEI R, LIU H X, et al. Research on river health assessment based on PSR model and fuzzy AHP comprehensive evaluation model [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(8): 95-105.

[6] 熊伟, 董增川, 卢嘉琪, 等. 基于组合赋权模糊物元可拓模型的渭河流域甘肃段河流健康评价[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(4): 9-14.  
XIONG W, DONG Z C, LU J Q, et al. River health evaluation in Gansu section of Weihe River Basin based on combined weighted fuzzy matter-element extension model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(4): 9-14.

[7] 方国华, 张文慧, 郭帆, 等. 基于云模型的平原河流生态系统健康评价[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(4): 9-16.  
FANG G H, ZHANG W H, GUO F, et al. Assessment of river ecosystem health in plain river network using cloud model with improved order relation analysis [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(4): 9-16.

[8] 金菊良, 李蔓, 周戎星, 等. 减法集对势法在河流生态健康评价与诊断中的应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 198-204.  
JIN J L, LI M, ZHOU R X, et al. Application of subtraction set pair potential method in river ecological health evaluation and diagnosis [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 198-204.

[9] 马克迪, 董增川, 金大伟, 等. 基于改进的 POME 模糊综合评价模型的江苏省河流生态健康评价[J]. 水电能源科学, 2021, 39(1): 67-70.  
MA K D, DONG Z C, JIN D W, et al. Evaluation of river ecological health in Jiangsu Province based on improved POME fuzzy comprehensive evaluation model [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(1): 67-70.

[10] 刘惠秋, 李晓东, 杨清, 等. 基于浮游植物完整性指数的雅鲁藏布江中上游河流水生态健康评价[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(9): 109-117.  
LIU H Q, LI X D, YANG Q, et al. Evaluation on water ecological health in middle and upper reaches of the Yarlung Zangbo River based on phytoplankton-index of biotic integrity [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(9): 109-117.

[11] 刘慧颖. 清水河大型底栖动物和浮游植物群落特征及河流健康评价研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.  
LIU H Y. Study on Community Characteristic of Macroinvertebrates and Phytoplankton and Health Evaluation of Qingshui River [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023.

[12] 郑彪, 高欣, 李翌, 等. 基于大型底栖动物生物完整性指数的天津市城市河流水生态健康评价[J]. 生态学报, 2025, 45(4): 1723-1735.  
ZHENG B, GAO X, LI Z, et al. Evaluation of water ecological health of urban rivers in Tianjin based on macroinvertebrate biological integrity index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1723-1735.

[13] 凌文翠, 武亚林, 方瑶瑶, 等. 基于鱼类生物完整性的北京市山区河流生态健康评价[J]. 生态毒理学报, 2024, 19(4): 131-142.

- LING W C, WU Y L, FANG Y Y, et al. Ecosystem health evaluation based on fish-index of ecological integrity in Beijing mountainous area rivers[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2024, 19(4): 131-142.
- [14] KERANS B L, KARR J R. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee valley [J]. *Ecological Applications*, 1994, 4(4): 768-785.
- [15] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 等. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康[J]. *生态学报*, 2005, 25(6): 1481-1490.
- WANG B X, YANG L F, HU B J, et al. A preliminary study on the assessment of stream ecosystem health in south of Anhui Province using Benthic-Index of Biotic Integrity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1481-1490.
- [16] BLOCKSOM K A, KURTENBACH J P, KLEMM D J, et al. Development and evaluation of the lake macroinvertebrate integrity index (LMII) for new jersey lakes and reservoirs[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, 77(3): 311-333.
- [17] BERTORA A, GROSMAN F, SANZANO P, et al. Impoverished fish assemblages of temperate Neotropical streams respond to environmental degradation and support a sensitive Index of Biotic Integrity [J]. *Hydrobiologia*, 2024, 851(2): 383-408.
- [18] BONADA N, PRAT N, RESH V H, et al. Developments in aquatic insect biomonitoring: A comparative analysis of recent approaches [J]. *Annual Review of Entomology*, 2006, 51: 495-523.
- [19] BIRK S, BONNE W, BORJA A, et al. Three hundred ways to assess Europe's surface waters; An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 31-41.
- [20] 张坤, 李卫明, 陈圣盛, 等. 基于大型底栖动物的黄柏河河流健康评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(10): 2218-2229.
- ZHANG K, LI W M, CHEN S S, et al. River health assessment based on macroinvertebrates in huangbai river, a tributary of Yangtze River, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(10): 2218-2229.
- [21] CUI W Y, GUO S Y, MENG X Z, et al. Application of adapted benthic index of biotic integrity (B-IBI) for river ecosystem health assessment in Zhanghe River watershed, China[J]. *Polish Journal of Ecology*, 2018, 66(4): 407.
- [22] 田震, 敖德成, 李先福, 等. 高黎贡山南段河流生态系统健康评价[J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(1): 25-33.
- TIAN Z, AO S C, LI X F, et al. Health assessment of river ecosystem of the southern gaoligong mountains [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(1): 25-33.
- [23] 马卓萃, 胡和平, 王赛. 基于 B-IBI 的东江下游河流生态健康评价[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(9): 32-38.
- MA Z L, HU H P, WANG S. Evaluation of aquatic ecological health of rivers in the lower reaches of Dongjiang River based on Benthic-Index of Biotic Integrity [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(9): 32-38.
- [24] 王旭, 王恒嘉, 王永刚, 等. 基于大型底栖动物完整性指数 (B-IBI) 的密云水库上游河流 (北京段) 水生态健康评价 [J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(2): 157-167.
- WANG X, WANG H J, WANG Y G, et al. Ecological health assessment on upstream watershed of Miyun Reservoir (Beijing section) using Benthic Index of Biotic Integrity (B-IBI) [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(2): 157-167.
- [25] EPLER J H. Identification Manual for the Larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina [M]. Washington: Environmental Protection Agency, 2001.
- [26] 刘月英, 张文珍, 王跃先, 等. 中国经济动物志-淡水软体动物 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- LIU Y Y, ZHANG W Z, WANG Y X, et al. Economic Fauna of China-Freshwater Molluscs [M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [27] 申祺, 魏杰, 武玮, 等. 大汶河水生态环境健康状况与土地利用的相关性[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 224-233.
- SHEN Q, WEI J, WU W, et al. Correlation between ecosystem health conditions and land use in Dawen River Basin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(1): 224-233.
- [28] 邹曦, 杨志, 郑志伟, 等. 长江干流典型区域河流生境健康评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(10): 2219-2228.
- ZOU X, YANG Z, ZHENG Z W, et al. Health assessment of river habitat in typical regions of the Yangtze River mainstream [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(10): 2219-2228.
- [29] 渠晓东, 刘志刚, 张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数[J]. *生态学报*, 2012, 32(15): 4661-4672.
- QU X D, LIU Z G, ZHANG Y. Discussion on the standardized method of reference sites selection for establishing the Benthic-Index of Biotic Integrity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4661-4672.
- [30] 张宇航, 渠晓东, 王少明, 等. 浑河流域底栖动物生物完整性指数构建与健康评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(6): 1374-1386.
- ZHANG Y H, QU X D, WANG S M, et al. River health assessment of Hun River Basin based on Benthic Index of Biological Integrity [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(6): 1374-1386.
- [31] 林罗敏, 官昭瑛, 郑训皓, 等. 流溪河底栖动物群落结构及基于完整性指数的健康评价 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36(7): 2077-2084.
- LIN L M, GUAN Z Y, ZHENG X H, et al. Macroinvertebrate community structure and IBI-based health assessment of Liuxi River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(7): 2077-2084.
- [32] 王军. 新疆伊犁河与额尔齐斯河大型底栖动物的群落结构及其水体健康评价 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- WANG J. Studies on the Community Structure of Macrozoobenthos and Water Quality Assessment in the Ili River and Irtysh River, Xinjiang [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [33] 李刚. 无定河流域浮游动物群落结构特征及水生态健康评价 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- LI G. Zooplankton in the Wuding River Basin: Community Structure Characteristics and Assessment of Water Ecological Health [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [34] 王建华, 田景汉, 吕宪国. 挠力河流域河流的 B-IBI 评价 [J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6672-6680.

- WANG J H, TIAN J H, LYU X G. B-IBI assessment of streams in Naoli River Watershed, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6672-6680.
- [35] BARBOUR M T, GERRISTEN J, GRIFFITH G E, et al. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(2): 185-211.
- [36] 盛萧, 黄小追, 徐海升. B-IBI 在东江河流健康评估中的应用研究[J]. *华南师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 48(2): 52-60.
- SHENG X, HUANG X Q, XU H S. Application of Benthic Index of Biotic Integrity (B-IBI) to assess the river ecosystem health in Dongjiang Watershed[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 48(2): 52-60.
- [37] 杨强强, 徐光来, 章翮, 等. 青弋江流域大型底栖动物群落结构及水质评价[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 4169-4180.
- YANG Q Q, XU G L, ZHANG P, et al. Macroinvertebrate community structure and water quality assessment in the Qingyi River Watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 4169-4180.
- [38] 尹子龙, 杨源浩, 郭刘超, 等. 石臼湖江苏段底栖动物群落结构及与水环境因子的关系[J]. *水产学杂志*, 2021, 34(4): 59-65.
- YIN Z L, YANG Y H, GUO L C, et al. Community structure and relationship with water environmental factors of Zoobenthos in Jiangsu section of Shijiu Lake[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2021, 34(4): 59-65.
- [39] 黄子晏, 杜士林, 张亚辉, 等. 嘉兴河网大型底栖动物与氮磷、重金属的相关分析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(8): 1787-1798.
- HUANG Z Y, DU S L, ZHANG Y H, et al. Analysis of the relationship between the distribution of the macrozoobenthos community and nitrogen-phosphorus factors and heavy metals in the Jiaying river network [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8): 1787-1798.
- [40] 晁爱敏, 于海燕, 盛天进, 等. 浦阳江干流河流生态缓冲带土地利用类型对水质和底栖动物的影响[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(1): 85-92.
- CHAO A M, YU H Y, SHENG T J, et al. Effects of land uses within buffer zone on water quality and benthic macroinvertebrates in Puyangjiang River [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(1): 85-92.
- [41] 郭晶, 李利强, 黄代中, 等. 洞庭湖表层水和底泥中重金属污染状况及其变化趋势[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(1): 44-51.
- GUO J, LI L Q, HUANG D Z, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface water and sediment of Dongting Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(1): 44-51.
- [42] 赵燕楚, 王菲, 吴丹, 等. 海河流域河流大型底栖动物生物完整性指数健康评价[J]. *生态环境学报*, 2023, 32(10): 1785-1793.
- ZHAO Y C, WANG F, WU D, et al. Health assessment of Haihe River Basin based on benthic index of biotic integrity[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(10): 1785-1793.

(责任编辑 王海锋)