

文章编号:1005-3832(2026)02-0060-12

沅江流域底栖动物群落结构及生物完整性评价

乔祺¹, 彭增辉², 石林¹, 赵丽子¹, 胡娟¹

(1.湖南省水利水电科学研究院, 湖南 长沙 410007;

2.湖南水天地环保科技有限公司, 湖南 长沙 410205)

摘要:为探究湖南省沅江流域生态健康状况,于2024年冬季(2月)和夏季(8月)对沅江干流及其一级支流澧水、酉水开展了2次底栖动物监测、采样与分析研究。流域内共采集鉴定出底栖动物81属种,隶属于3门6纲57科。冬、夏两季底栖动物物种数量与群落结构差异较小,但冬季生物密度、生物量均高于夏季。分别针对冬季和夏季建立了2套底栖动物生物完整性指数(B-IBI)评价体系,对22个候选指标进行筛选。冬季保留的核心指标为摇蚊类个体数百分比、Hilsenhoff生物指数和刮食者个体数百分比;夏季保留的核心指标为Shannon-Wiener多样性指数、总分类单元数、蜉蝣目、毛翅目和襁翅目分类单元数及敏感类群分类单元数。评价结果表明:沅江流域冬、夏季中等及以上健康等级的样点均占68%,整体生态健康状况良好,支流健康状况明显好于干流。评价结果与实际调研情况相符,表明分季节建立B-IBI评价体系对沅江流域适用度高,提高了评价结果的准确性与可靠性。本研究可为沅江流域乃至整个湖南省后续河流健康评价与管理、水生态保护与修复、生态资源利用等提供理论支撑。

关键词:沅江流域;底栖动物;群落结构;生物完整性;季节性特征

中图分类号:Q178.1

文献标识码:A

Characteristics of Benthic Animal Community Structure and Evaluation of Biological Integrity in Yuanjiang River Basin

QIAO Qi¹, PENG Zenghui², SHI Lin¹, ZHAO Lizi¹, HU Juan¹

(1. Hunan Institute of Water Resource and Hydropower Research, Changsha 410007, China;

2. Hunan Shuitiandi Environmental Technology Co. Ltd., Changsha 410205, China)

Abstract: In order to explore the ecological health status of the Yuanjiang River Basin in Hunan Province, two benthic animal monitoring sampling and analysis studies were conducted on the main stream of the Yuanjiang and its primary tributaries, Wushui River and Youshui River, in the winter (February) and summer (August) in 2024. 81 species of benthic animals were collected and identified belonging to 3 phylums, 6 classes, and 57 families. The difference in the number and structural composition of benthic animal species between winter and summer was relatively small, but the biological density and biomass in winter were higher than those in summer. Two sets of benthic index of biological integrity (B-IBI) evaluation systems were established for winter and summer, and 22 candidate indexes were screened. The core indexes of winter were percentage of chironomidae individuals, Hilsenhoff biological index, and percentage of scraper individuals. The core indexes of summer were Shannon-Wiener diversity index, total classification units, classification units of ephemeroptera, trichoptera and plecoptera, and sensitive group classification units. The evaluation results showed that 68% of the sampling points in the Yuanjiang River Basin achieved or exceeded medium level in winter and summer, and the overall ecological health status was good. The health status of tributaries was significantly better than that of the main stream. The evaluation results were consistent with actual research situation, indicating that establishing a B-IBI evaluation system based on seasons was very applicable to the Yuanjiang River Basin, and increased the accuracy and reliability of the results. The research provided theoretical support for subsequent river health evaluation and management, water ecological protection and restoration, and ecological resource utilization in the Yuanjiang River Basin and even the entire Hunan Province.

Key words: Yuanjiang River Basin; benthic animals; community structure; biological integrity; seasonal characteristics

收稿日期:2025-03-27

基金项目:湖南省水利科技项目(XSKJ2023059-18、XSKJ2025056-27)。

作者简介:乔祺(1990-),女,硕士,工程师,研究方向为河湖生态环境评价与管理研究.E-mail: 906500442@qq.com

底栖无脊椎动物在江河湖泊水库生态系统中占有重要地位,历来是水生态系统研究的热点。多项研究表明,大型底栖无脊椎动物具有个体较大、活动范围小,对环境条件变化反应灵敏等特征^[1]。当出现水质污染、生态环境退化、水体连通性下降等问题时,底栖动物的生理功能、种群生物量及密度、群落结构等都会随之发生相应变化^[2],因此被广泛用于评价水体生态健康状况。

底栖生物评价指标主要有 HBI^[3]、FBI^[4]、APST^[5]、BMWP^[6]等指数。为综合考虑多种环境因素对底栖生物的影响,最大程度地消除单一指标评价的偶然性与局限性,以及更加客观精准地描述河流状态,从 19 世纪 90 年代末开始采用底栖动物生物完整性指数(benthic index of biological integrity, B-IBI)进行河流生态健康评价^[7-9]。近年来,国内在这方面也取得了一定成果。王丑明等^[10]根据洞庭湖大型底栖动物 30 多年的群落特征数据构建出生物完整性指数;张宇航等^[11]对北京市不同区域的 115 个河流样点进行分析研究,分别构建了山区、平原区底栖动物完整性指数;宋聘等^[12]构建了呼兰河底栖动物完整性指数,对寒温带山区典型河流的健康现状进行评价并分析了其主要健康威胁;陶艳茹等^[13]分别于枯水期、平水期、丰水期对太湖底栖动物进行采样分析,从而对太湖水生态健康状况进行评估;赵丽子等^[14]对长株潭都市圈典型河流进行了评价并提取出影响底栖动物优势类群的主要水环境因子。

沅江全长 1 033 km,其中湖南省境内 568 km,是湖南省第二大河流。干流发源于贵州省东南部,至怀化市会同县金子村进入湖南境内,流经湖南省怀化、湘西和常德等 3 个市州共 12 个县,最终于常德德山汇入洞庭湖。沅江两岸支流众多,澧水和酉水是其湖南省境内最大两条支流。沅江流域对沿岸生产、生活、生态用水起着极为重要的作用,其生态健康状况对流经区域经济社会发展、人民群众幸福感和获得感影响深远。本研究基于底栖动物群落结构及生物完整性对沅江流域生态健康状态进行评价并对影响生态健康程度的因素进行了分析。

1 材料与方法

1.1 研究对象

研究选取沅江干流及其重要一级支流澧水和酉水为对象,根据《生物多样性观测技术导则》^[15]

《河湖健康评估技术导则》^[16]等规范标准,并结合沅水流域水文地理特性及行政区划,以及河流健康评价需求,共设置 25 个监测样点(其中选择 3 个为参考点,22 个为受损点)分别于 2024 年冬、夏季进行 2 次底栖动物监测(表 1)。2 次监测所选参考样点位于澧水、酉水上游,河水清澈、水生植物丰富、无点源污染、附近居民少、人为活动干扰小,水质常年保持为 II 类。结合调查过程中对水环境质量的定性评价,认为符合参考样点选择条件。

1.2 样品采集与分析方法

1.2.1 样品采集

样品为定量采样,考虑采样点所属的 3 条河流均为深水河流,使用 1/16 m² 彼得森底泥采集器等装置进行采样。

表 1 监测点位坐标

Tab. 1 Coordinates of monitoring points

| 河流 river | 点位 site | 类型 type | 经度(E) longitude | 纬度(N) latitude |
|--|------------|------------|--------------------|-------------------|
| 沅江干流 main stream of Yuanjiang River | YJ1 | 受损点 | 109.798148 | 27.199099 |
| | YJ2 | 受损点 | 110.024566 | 27.173510 |
| | YJ3 | 受损点 | 110.217458 | 27.410433 |
| | YJ4 | 受损点 | 110.263697 | 27.913750 |
| | YJ5 | 受损点 | 110.106442 | 28.082184 |
| | YJ6 | 受损点 | 110.388377 | 28.415791 |
| | YJ7 | 受损点 | 111.007045 | 28.804040 |
| | YJ8 | 受损点 | 111.460933 | 28.825552 |
| | YJ9 | 受损点 | 111.625671 | 28.958599 |
| 澧水 Wushui River | WS1 | 参考点 | 109.123026 | 27.345890 |
| | WS2 | 参考点 | 109.265690 | 27.373679 |
| | WS3 | 受损点 | 109.416596 | 27.427045 |
| | WS4 | 受损点 | 109.659433 | 27.476530 |
| | WS5 | 受损点 | 109.769110 | 27.460548 |
| | WS6 | 受损点 | 109.850476 | 27.546813 |
| | WS7 | 受损点 | 109.949522 | 27.498364 |
| 酉水 Youshui River | YS1 | 参考点 | 109.512328 | 29.573164 |
| | YS2 | 受损点 | 109.366159 | 29.329291 |
| | YS3 | 受损点 | 109.324193 | 28.786391 |
| | YS4 | 受损点 | 109.496344 | 28.835833 |
| | YS5 | 受损点 | 109.591623 | 28.709260 |
| | YS6 | 受损点 | 109.749854 | 28.726593 |
| | YS7 | 受损点 | 109.930715 | 28.746171 |
| | YS8 | 受损点 | 110.305938 | 28.704451 |
| | YS9 | 受损点 | 110.295929 | 28.539400 |

1.2.2 底栖动物洗涤和分拣

采集到的底质如淤泥等,泥样直接过 60 目筛网分选;若以砂石为主,则利用砂石密度较大的原理,将采集的砂石置于水桶中,加水后柔和搅动砂石,将上层的漂浮物用 60 目的筛网筛洗,如此反复几次,直到将底栖动物全部漂洗出,至目测检查不出为止,若出现密度较大的软体动物,则需逐个检出。然后将筛网中的残渣置于白瓷盘中,用细吸管、尖嘴镊、解剖针等工具进行分拣,将底栖动物标本置于标本瓶中,加入 75% 的乙醇,保存待检。

1.2.3 底栖动物鉴定、计数和称重

依据底栖动物的分类特征,参考相应的分类资料进行种类鉴定。按照一般规则,软体动物须至少鉴定到属,水生昆虫(除摇蚊幼虫外)至少鉴定到科,寡毛类和摇蚊幼虫至少鉴定到属^[17,18]。采用万分之一电子精密天平进行样品称重。

1.3 指标计算方法

底栖动物耐污值及 BMWP 敏感值根据《水生态监测技术指南 河流水生生物监测与评价(试行)》^[19] 确定,将耐污值 ≥ 7 的物种归为耐污类群;将耐污值 ≤ 3 的物种归为敏感类群。功能摄食类群和生活习性采用 Barbour 等^[20] 的研究结果,主要指标计算

方法如表 2 所示。

2 结果与分析

2.1 底栖动物群落结构

2024 年冬季,湖南沅江流域共采集并鉴定出底栖动物 62 种,隶属于 3 门 6 纲 46 科,其中环节动物 4 种,软体动物 16 种,节肢动物 42 种。2024 年夏季,湖南沅江流域共采集并鉴定出底栖动物 63 种,隶属于 3 门 6 纲 44 科,其中环节动物 4 种,软体动物 15 种,节肢动物 44 种。综合 2 次监测结果,沅江流域全年共采集鉴定出底栖动物 81 种,隶属于 3 门 6 纲 57 科,其中环节动物 4 种,软体动物 19 种,节肢动物 58 种属(表 3)。监测结果表明,沅江流域冬季和夏季底栖动物物种数量与结构构成差距较小,底栖动物以节肢动物为主,冬、夏季分别占总种属的 67.7% 与 69.8%。

2.2 生物量与生物密度

沅江流域冬夏季 2 次监测的生物量及生物密度如表 4 所示。冬季流域平均生物量为 54.69 g/m²,夏季为 20.13 g/m²;冬季流域平均生物密度为 88.78 ind./m²,夏季为 65.86 ind./m²。总体而言,冬季的生物量和生物密度高于夏季,这主要是由于冬季水位低流速小,夏季则反之。据《水文年鉴(2024 年)》长江

表 2 主要指标的计算方法

Tab. 2 Calculation methods for main indexes

| 指标 index | 计算方法 calculation method |
|--|--|
| 优势度指数 advantage index | 表示样点中某个物种出现的频率,优势度指数 ≥ 0.02 的物种被认定为优势种 |
| Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index | 用 Shannon-Wiener 公式表示生态系统中物种的多样性 |
| Simpson 多样性指数 Simpson diversity index | 用 Simpson 公式表示生态系统中物种的多样性 |
| Margalef 丰富度指数 Margalef richness index | 用 Shannon-Wiener 多样性指数与总物种数取对数的比值表示物种总体丰富程度 |
| Pielou 均匀度指数 Pielou uniformity index | 表示各物种在一个群落或生态系统中分布的均匀程度 |
| Hilsenhoff 生物指数 Hilsenhoff biological index | 表示底栖无脊椎动物对污染的耐受能力,通常用来量化水体的污染状况,值越大表示污染程度越高(以种为单位计算) |
| 科级耐污指数(FBI 指数) family biotic index | 表示底栖无脊椎动物对污染的耐受能力,通常用来量化水体的污染状况。值越大表示污染程度越高(以科为单位计算) |
| BMWP 指数 biological monitoring working party index | 表示所有科级物种的敏感值之和,用于快速评估水体质量 |

表 3 沅江流域底栖动物种类名录
Tab. 3 Benthic animal species in Yuanjiang River Basin

| 物种 species | 冬季 winter | 夏季 summer | 物种 species | 冬季 winter | 夏季 summer |
|---|--------------|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------|
| 环节动物门 Annelida | + | + | 39.扁蜉 <i>Heptagenia</i> sp. | + | + |
| 寡毛纲 Oligochaeta | + | + | 毛翅目 Trichoptera | + | + |
| 1.苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i> | + | + | 40.径石蛾 <i>Ecnomidae</i> sp. | + | |
| 2.霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> | + | + | 41.长角石蛾 <i>Phlaeothripidae</i> sp. | + | + |
| 蛭纲 Hirudinea | + | + | 42.小石蛾 <i>Hydroptilidae</i> sp. | + | |
| 3.石蛭 <i>Erpobdellidae</i> sp. | + | + | 43.原石蛾 <i>Rhyacophia</i> sp. | + | + |
| 4.扁蛭 <i>Glossiphoniidae</i> sp. | + | + | 44.沼石蛾 <i>Limnophilidae</i> sp. | + | + |
| 软体动物门 Mollusca | + | + | 45.短石蛾 <i>Brachycentridae</i> sp. | | + |
| 腹足纲 Gastropoda | + | + | 46.纹石蛾 <i>Hydropsyche</i> sp. | | + |
| 5.环棱螺 <i>Bellamya</i> sp. | + | + | 47.畸距石蛾 <i>Dipseudopsidae</i> sp. | | + |
| 6.河螺 <i>Rivularia</i> sp. | + | + | 蜻蜓目 Odonata | + | + |
| 7.短沟蜷 <i>Simulcospira</i> sp. | + | + | 48.东方春蜓 <i>Orientogomphus</i> sp. | + | + |
| 8.萝卜螺 <i>Radix</i> sp. | + | + | 49.小叶春蜓 <i>Gomphidia</i> sp. | + | + |
| 9.椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i> | + | | 50.螽 <i>Coenagrionidae</i> sp. | + | + |
| 10.小土蜗 <i>Galba pervia</i> | | + | 51.弓蜻 <i>Macromia</i> sp. | + | + |
| 11.纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i> | + | + | 52.蜻 <i>Libellulidae</i> sp. | + | |
| 12.长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i> | + | + | 鞘翅目 Coleoptera | + | + |
| 13.大沼螺 <i>Parafossarulus eximius</i> | | + | 53.溪泥甲 <i>Elmidae</i> sp. | + | + |
| 14.赤豆螺 <i>Bithynia fuchsiana</i> | + | + | 54.扁泥甲 <i>Psephenidae</i> sp. | + | + |
| 15.圆扁螺 <i>Hippeutis</i> sp. | + | | 55.隐翅甲 <i>Staphylinidae</i> sp. | | + |
| 16.膀胱螺 <i>Physa</i> sp. | + | + | 56.龙虱 <i>Dytiscidae</i> sp. | + | + |
| 17.光滑狭口螺 <i>Stenothyra glabra</i> | + | + | 57.叶甲 <i>Chrysomelidae</i> sp. | | + |
| 18.福寿螺 <i>Pomacea canaliculata</i> | + | + | 58.牙甲 <i>Hydrophilidae</i> sp. | | + |
| 19.鱼盘螺 <i>Valvata piscinalis</i> | | + | 59.象甲 <i>Curculionidae</i> sp. | | + |
| 双壳纲 Bivalvia | + | + | 半翅目 Hemiptera | + | + |
| 20.河蚬 <i>Corbicula fluminea</i> | + | + | 60.划蝽 <i>Corixidae</i> sp. | + | + |
| 21.圆顶珠蚌 <i>Unio douglasiae</i> | + | | 61.水黾 <i>Gerridae</i> sp. | | + |
| 22.无齿蚌 <i>Anodonta</i> sp. | + | | 双翅目 Diptera | + | + |
| 23.淡水壳菜 <i>Limnoperna fortunei</i> | + | + | 62.蚊 <i>Culicidae</i> sp. | | + |
| 节肢动物门 Arthropoda | + | + | 63.大蚊 <i>Tipula</i> sp. | + | |
| 甲壳纲 Crustacea | + | + | 64.朝大蚊 <i>Antocha</i> sp. | + | |
| 24.沼虾 <i>Macrobrachium</i> sp. | + | + | 65.毛黑大蚊 <i>Hexatoma</i> sp. | | + |
| 25.米虾 <i>Caridina</i> sp. | + | + | 66.螻 <i>Ceratopogonidae</i> sp. | + | + |
| 26.钩虾 <i>Gammaridae</i> sp. | + | + | 67.长足虻 <i>Dolichopodidae</i> sp. | + | |
| 27.栉水虱 <i>Asellidae</i> sp. | + | + | 68.蝇 <i>Muscidae</i> sp. | + | |
| 昆虫纲 Insecta | + | + | 69.齿斑摇蚊 <i>Stictochironomus</i> sp. | + | + |
| 鳞翅目 Lepidoptera | + | + | 70.多足摇蚊 <i>Polypedilum</i> sp. | + | + |
| 28.草螟 <i>Crambidae</i> sp. | + | | 71.羽摇蚊 <i>Chironomus plumosus</i> | + | + |
| 29.水螟 <i>Nymphulinae</i> sp. | + | + | 72.隐摇蚊 <i>Cryptochironomus</i> sp. | + | + |
| 30.星齿蛉 <i>Protohermes</i> sp. | + | | 73.哈摇蚊 <i>Harnischia</i> sp. | | + |
| 蜉蝣目 Ephemeroptera | + | + | 74.长跗摇蚊 <i>Tanytarsus</i> sp. | + | + |
| 31.蜉蝣 <i>Ephemera</i> sp. | + | + | 75.二叉摇蚊 <i>Dicrotendipes</i> sp. | + | + |
| 32.四节蜉 <i>Baetis</i> sp. | + | + | 76.枝长跗摇蚊 <i>Cladotanytarsus</i> sp. | + | |
| 33.新蜉 <i>Neophemeridae</i> sp. | + | | 77.环足摇蚊 <i>Cricotopus</i> sp. | + | + |
| 34.河花蜉 <i>Potamanthus</i> sp. | + | | 78.毛突摇蚊 <i>Chaetocladius</i> sp. | | + |
| 35.细蜉 <i>Caenis</i> sp. | | + | 79.前突摇蚊 <i>Procladius</i> sp. | + | + |
| 36.宽基蜉 <i>Euthraulus</i> sp. | + | | 80.无突摇蚊 <i>Ablabesmyia</i> sp. | | + |
| 37.柔裳蜉 <i>Habrophlebiodes</i> sp. | | + | 81.菱跗摇蚊 <i>Clinotanypus</i> sp. | | + |
| 38.小蜉 <i>Ephemerellidae</i> sp. | + | | | | |

流域水文资料,以沅江干流为例,干流中游(洪江至凌津滩)冬季流速为 0.4~0.7 m/s, 夏季流速为 1.5~2.0 m/s;下游(凌津滩至德山)冬季流速为 0.3~0.6 m/s, 夏季流速为 1.2~1.8 m/s。冬季相对平缓的水流更适宜底栖动物的生存繁衍,而夏季流速大,时有暴雨强力冲刷河床,易导致河流底质被掀翻、迁移,底栖动物生境遭到破坏,这与殷旭旺等^[21]、韦建福等^[22]的研究结论基本一致。冬季酉水的生物量和生物密度均最高,夏季澧水的生物量和生物密度均最高。由此可见,澧水、酉水 2 条支流的生物量和生物密度状况均优于沅江干流。

2.3 优势种群

对优势度指数大于 0.02 的物种判定为优势种(表 5)。冬季沅江干流优势种共 5 种,其中淡水壳菜(*Limnoperna fortunei*)为第一优势种;澧水优势种共 7 种,其中第一优势种为萝卜螺(*Radix* sp.);酉水优

势种共 5 种,其中第一优势种为环棱螺(*Bellamya* sp.);3 条河流冬季采样第一优势种均为软体动物。夏季沅江干流优势种共 3 种,其中米虾(*Caridina* sp.)为第一优势种,为节肢动物;澧水优势种共 6 种,其中第一优势种也为米虾;酉水优势种共 5 种,其中第一优势种为环棱螺。

2.4 底栖动物生物完整性分析

利用底栖动物生物完整性指数 B-IBI 对沅江干流、澧水及酉水生态健康进行评价。确定参考点和受损点,分别对冬、夏 2 季监测采样建立评价指标体系。通过分布范围、判别能力、冗余度与变异度分析^[23],从候选指标中筛选核心指标,计算各评价点指标分值,将各指标分值取平均得到各样点的 B-IBI 指数。

2.4.1 参考点选取

2 次监测采用澧水中游的 2 个样点和酉水上游

表 4 沅江流域底栖动物生物量和密度

Tab. 4 Biomass and density of benthic animals in Yuanjiang River Basin

| 河流 river | 生物量 biomass/(g/m ²) | | 生物密度 biological density/(ind./m ²) | |
|-------------------------------------|---------------------------------|-----------|--|-----------|
| | 冬季 winter | 夏季 summer | 冬季 winter | 夏季 summer |
| 沅江干流 main stream of Yuanjiang River | 19.31 | 9.18 | 50.47 | 30.76 |
| 澧水 Wushui River | 36.26 | 31.51 | 99.43 | 137.60 |
| 酉水 Youshui River | 104.40 | 22.21 | 118.82 | 45.17 |
| 总体平均 total average | 54.69 | 20.13 | 88.78 | 65.86 |

表 5 沅江流域优势种群

Tab. 5 Dominance population in Yuanjiang River Basin

| 物种 species | 优势度指数 advantage index | | | | | |
|--|-----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| | 冬季 winter | | | 夏季 summer | | |
| | 沅江 Yuanjiang River | 澧水 Wushui River | 酉水 Youshui River | 沅江 Yuanjiang River | 澧水 Wushui River | 酉水 Youshui River |
| 霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> | | 0.032 | 0.047 | | 0.067 | |
| 环棱螺 <i>Bellamya</i> sp. | | 0.052 | 0.182 | | 0.099 | 0.244 |
| 短沟蜷 <i>Simulcospira</i> sp. | | 0.080 | 0.045 | | 0.038 | 0.053 |
| 萝卜螺 <i>Radix</i> sp. | | 0.103 | | | | |
| 椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i> | 0.056 | | | | | |
| 河蚬 <i>Corbicula fluminea</i> | 0.054 | 0.029 | | | | |
| 淡水壳菜 <i>Limnoperna fortunei</i> | 0.074 | | | 0.096 | 0.032 | |
| 沼虾 <i>Macrobrachium</i> sp. | | | 0.052 | 0.054 | | 0.043 |
| 米虾 <i>Caridina</i> sp. | | 0.033 | | 0.133 | 0.211 | 0.098 |
| 四节蜉 <i>Baetis</i> sp. | | | | | 0.074 | 0.043 |
| 二叉摇蚊 <i>Dicrotendipes</i> sp. | 0.022 | | | | | |
| 环足摇蚊 <i>Cricotopus</i> sp. | 0.248 | 0.041 | 0.076 | | | |
| 优势种合计 total number of dominance population | 5 | 7 | 5 | 3 | 6 | 5 |

的 1 个样点作为参考点。所选 3 个参考样点河水清澈、水质状况常年维持 II 类,河岸带水生植物丰富度高、无点源污染、附近居民少、人为活动干扰较小。结合调查过程中对生境质量的定性评价,认为符合参考样点选择条件。

2.4.2 指标筛选

(1) 候选指标

候选指标包括 5 个类型共 22 个指标,具体指标及对环境压力的响应详见表 6。

(2) 分布范围分析

根据 22 个指标原始数据,2024 年冬季 M7、M8、M9、M13、M19 和 M20 这 6 项指标 60% 以上数据点为 0,不具备分析判别能力,故排除这 6 项指标。2024 年夏季 M8、M9、M19 和 M20 这 4 项指标 60% 以上数据点为 0,不具备分析判别能力,故排除这 4 项指标。

(3) 判别能力分析

将参考点和受损点各候选指标箱体的 IQ(25% 分位数至 75% 分位数之间)作比较,箱体完全不重叠,或有部分重叠但各自中位数均在对方箱体范围之外的指标,视为有较强的判别能力^[25],保留样品用于后续进一步分析。冬、夏季候选指标分布箱体图分别见图 1、图 2。

经判别能力分析表明,冬季采样监测有 6 个指标满足判别能力筛选条件,保留 M10、M11、M12、M14、M15 和 M22。夏季采样监测有 6 个指标满足判别能力筛选条件,保留 M1、M5、M6、M7、M13 和 M17。

(4) 冗余度分析

冗余度分析是测试各指标反映的信息是否独立。采用皮尔逊相关分析法,以相关系数 $|r| > 0.75$ ^[26,27] 表示 2 个指标高度相关。对高度相关的指标,综合考虑其分布范围、表达信息量、是否与多个指标高度相关、是否存在异常点等情况,保留其中

表 6 B-IBI 指标体系中的候选指标

Tab. 6 Candidate indexes of B-IBI index system

| 指标类别 index category | 指标序号 index number | 指标名称 index name | 对环境压力响应 response to environmental pressure |
|--|----------------------|--|---|
| 多样性 diversity | M1 | Shannon-Wiener 多样性指数 | 下降 |
| | M2 | Simpson 多样性指数 | 下降 |
| | M3 | Margalef 丰富度指数 | 下降 |
| | M4 | Pielou 均匀度指数 | 下降 |
| 丰富性 richness | M5 | 总分类单元数 | 下降 |
| | M6 | 蜉蝣目 Ephemeroptera、毛翅目 Trichoptera 和 襉翅目 Plecoptera 分类单元数 | 下降 |
| | M7 | 蜉蝣目 Ephemeroptera 分类单元数 | 下降 |
| | M8 | 襉翅目 Plecoptera 分类单元数 | 下降 |
| | M9 | 毛翅目分类单元数 | 下降 |
| 群落结构组成 community structure composition | M10 | 蜉蝣目、毛翅目和 襉翅目个体数百分比 | 下降 |
| | M11 | 蜉蝣目个体数百分比 | 下降 |
| | M12 | 摇蚊(Chironomidae)类个体数百分比 | 上升 |
| 耐污能力 stain resistance | M13 | 敏感类群分类单元数 | 下降 |
| | M14 | 耐污类群个体数百分比 | 上升 |
| | M15 | Hilsenhoff 生物指数 | 上升 |
| | M16 | 优势类群个体数百分比 | 上升 |
| | M17 | 大型无脊椎动物敏感类群评价指数(BMWP)指数 | 下降 |
| | M18 | 科级耐污指数(FBI 指数) | 上升 |
| 功能摄食类群与生活 functional feeding groups and life forms | M19 | 黏附者分类单元数 | 下降 |
| | M20 | 黏附者个体数百分比 | 下降 |
| | M21 | 滤食者个体数百分比 | 上升 |
| | M22 | 刮食者个体数百分比 | 下降 |

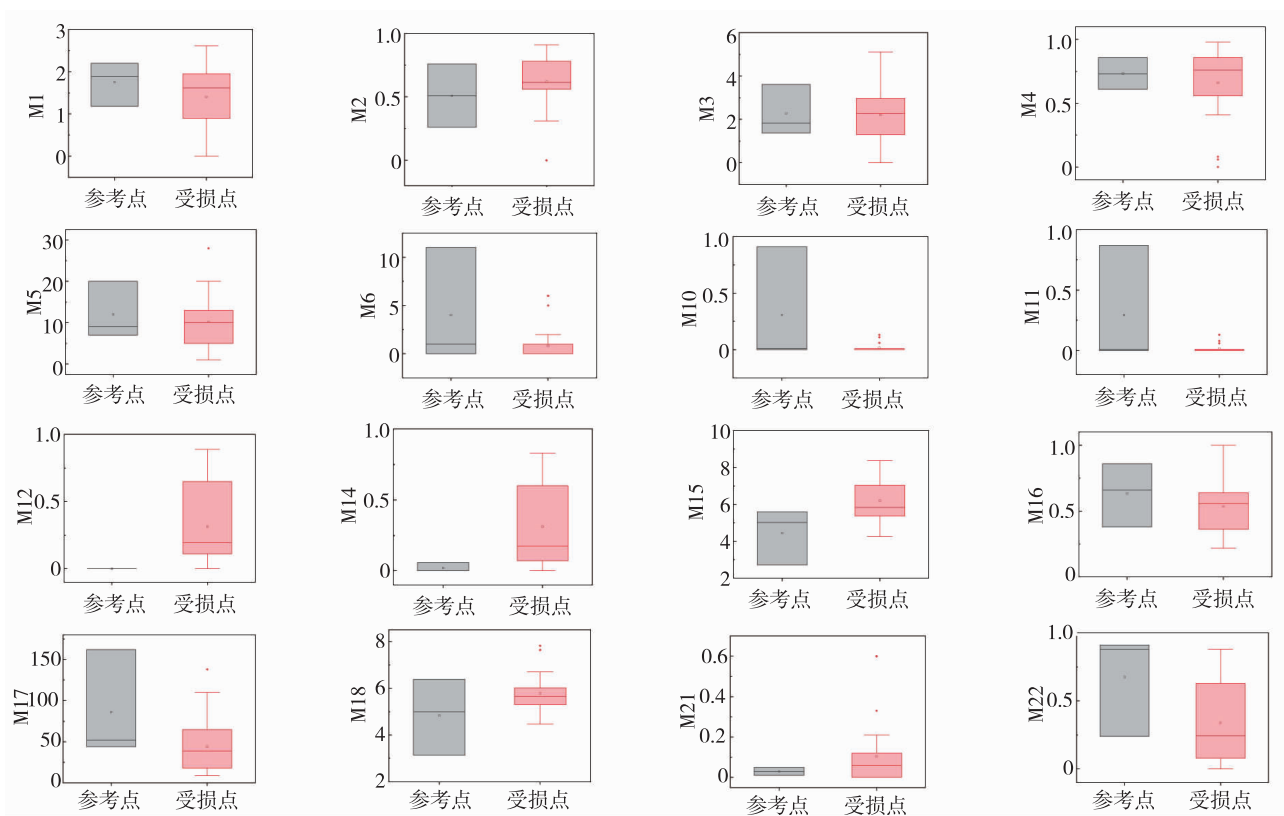


图 1 沅江流域冬季候选指标分布箱体图

Fig. 1 Distribution box of winter candidate indexes of Yuanjiang River Basin

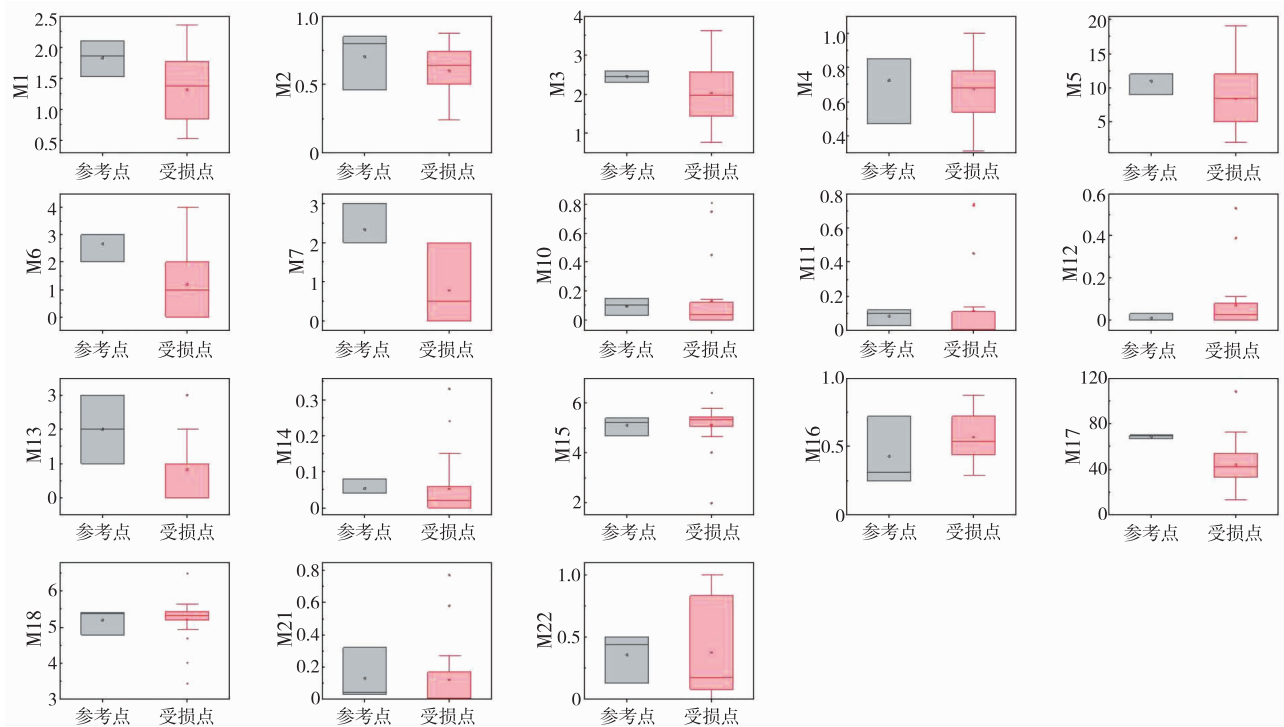


图 2 沅江流域夏季候选指标分布箱体图

Fig. 2 Distribution box of summer candidate indexes of Yuanjiang River Basin

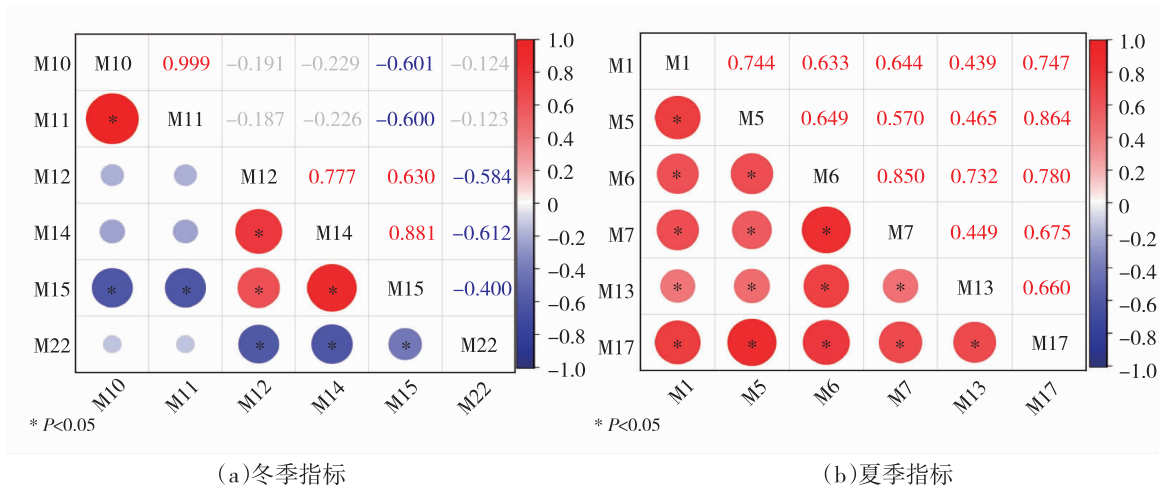


图 3 B-IBI 候选指标相关性图

Fig. 3 Correlation of B-IBI candidate indexes

一个代表性较高的指标。冬季和夏季指标双变量的相关性如图 3 所示。

冬季指标中, M11 与 M10 高度相关, M10 表示蜉蝣目、毛翅目和襁翅目个体数占总个体数的百分比, 而 M11 仅表示蜉蝣目个体数占总个体数的百分比, 显然 M10 所表达的信息量更全面, 故删除 M11; M14 与 M15 高度相关, 都是反映群落耐污能力的指标。但 M14(耐污类群个体数百分比) 计算的是耐污值 ≥ 7 的物种个体数占所有物种个体数的比例, 而 M15 考虑的是所有物种的综合耐污能力, M15 (Hilsenhoff 生物指数) 给每个分类单元(通常是科或属)赋予一个特定的、连续的耐污值(0~10), 并在计算中反映了群落结构权重, 由于其连续性和加权特性, M15 反映的信息更为丰富, 且能更平滑、更线性地响应水体污染程度的连续变化, 故删除 M14, 保留 M15。经冗余度分析, 冬季保留指标 M10、M12、M15、M22。

夏季指标中, M5 与 M7 均高度相关, M5 表示总分类单元数, M7 表示蜉蝣目分类单元数, M5 无论是数据分布范围还是信息量都大于 M7, 故删除 M7, 保留 M5; M17 与 M5、M6 均高度相关, 且 M17

存在异常值, 故删除 M17。经冗余度分析, 夏季保留指标 M1、M5、M6、M13。

(5) 变异度分析

对剩余指标在参考点中的分布情况做进一步检验, 保留变异度较小的指标作为构建 B-IBI 评价体系的核心指标(表 7)。结果表明, 只有冬季的 M10 指标变异系数大于 1, 故排除 M10。冬季保留核心指标 M12(摇蚊类个体数百分比)、M15(Hilsenhoff 生物指数)、M22(刮食者个体数百分比), 夏季保留核心指标 M1(Shannon-Wiener 多样性指数)、M5(总分类单元数)、M6(蜉蝣目、毛翅目和襁翅目分类单元数)、M13(敏感类群分类单元数)。

2.4.3 评价结果

采用比值法统一各核心指标量纲。对于外界压力响应下降或减少的指标, 以所有样点由低到高排序的 95% 分位数作为最佳期望值, B-IBI 分值等于指标实际值除以最佳期望值; 对于外界压力响应增加或上升的指标, 应以 5% 分位数作为最佳期望值, B-IBI 分值等于(最大值 - 实际值)/(最大 - 最佳期望值)^[16]。将所有核心指标 B-IBI 值取平均作为该样点的 B-IBI 值(表 8)。

表 7 B-IBI 候选指标变异度
Tab. 7 Variability of B-IBI candidate indexes

| 指标 index | 冬季 winter | | | | 夏季 summer | | | |
|----------------------------|-----------|------|------|------|-----------|-------|------|------|
| | M10 | M12 | M15 | M22 | M1 | M5 | M6 | M13 |
| 平均值 average | 0.31 | 0.00 | 4.44 | 0.68 | 1.71 | 11.00 | 2.67 | 2.00 |
| 标准差 standard deviation | 0.52 | 0.00 | 1.51 | 0.38 | 0.48 | 1.73 | 0.58 | 1.00 |
| 变异系数 variation coefficient | 1.70 | 0.00 | 0.34 | 0.56 | 0.28 | 0.16 | 0.22 | 0.50 |

表 8 指标 B-IBI 的计算公式
Tab. 8 Calculate formula of B-IBI index

| 季节 season | 核心指标 core index | 计算公式 calculate formula |
|-----------|--------------------------|---------------------------------------|
| 冬季 winter | M12(摇蚊类个体数百分比) | $(0.89 - \text{实际值}) / (0.89 - 0.00)$ |
| | M15(Hilsenhoff 生物指数) | $(8.37 - \text{实际值}) / (8.37 - 4.42)$ |
| | M22(刮食者个体数百分比) | 实际值 / 0.88 |
| 夏季 summer | M1(Shannon-Wiener 多样性指数) | 实际值 / 2.2 |
| | M5(总分类单元数) | 实际值 / 14.6 |
| | M6(蜉蝣目、毛翅目和襁翅目分类单元数) | 实际值 / 3.0 |
| | M13(敏感类群分类单元数) | 实际值 / 3.0 |

沅江流域 3 条河流各监测样点 B-IBI 计算结果见表 9。全年 B-IBI 为 2 次采样中所有冬、夏季采样点的均值。澧水 B-IBI 在冬、夏季及全年水平均居 3 条河流最高,其次为酉水,最低为沅江干流。流

域整体 B-IBI 指数冬季为 0.575, 夏季为 0.555, 冬季比夏季略高。

表 9 沅江流域 B-IBI 评价结果

Tab. 9 B-IBI evaluation results of Yuanjiang River Basin

| 河 river | 点位 site | 冬季 winter | 夏季 summer | 全年 annual |
|--------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 沅江 Yuanjiang River | YJ1 | 0.550 | 0.445 | 0.497 |
| | YJ2 | 0.704 | 0.200 | 0.452 |
| | YJ3 | 0.732 | 0.432 | 0.582 |
| | YJ4 | 0.292 | 0.538 | 0.415 |
| | YJ5 | 0.216 | 0.719 | 0.467 |
| | YJ6 | 0.482 | 0.150 | 0.316 |
| | YJ7 | 0.548 | 0.279 | 0.414 |
| | YJ8 | 0.730 | 0.748 | 0.739 |
| | YJ9 | 0.172 | 0.697 | 0.434 |
| | 平均 average | 0.492 | 0.468 | 0.480 |
| 澧水 Wushui River | WS1 | 0.899 | 0.674 | 0.787 |
| | WS2 | 0.962 | 0.925 | 0.944 |
| | WS3 | 0.170 | 0.852 | 0.511 |
| | WS4 | 0.220 | 0.786 | 0.503 |
| | WS5 | 0.562 | 1.215 | 0.889 |
| | WS6 | 0.796 | 0.607 | 0.702 |
| | WS7 | 0.794 | 0.670 | 0.732 |
| | 平均 average | 0.629 | 0.819 | 0.724 |
| 酉水 Youshui River | YS1 | 0.900 | 0.820 | 0.860 |
| | YS2 | 0.921 | 0.126 | 0.524 |
| | YS3 | 0.373 | 0.325 | 0.349 |
| | YS4 | 0.592 | 0.251 | 0.422 |
| | YS5 | 0.878 | 0.438 | 0.658 |
| | YS6 | 0.714 | 0.468 | 0.591 |
| | YS7 | 0.805 | 0.790 | 0.798 |
| | YS8 | 0.163 | 0.576 | 0.369 |
| | YS9 | 0.193 | 0.151 | 0.172 |
| 平均 average | 0.615 | 0.438 | 0.527 | |

对冬季、夏季分别作参考点于受损点箱图(图 4), 可以看出冬季箱体彼此互不重叠, 夏季箱体略有重复但各自中位数位于对方箱体范围之外, 均具有较好的区分能力和判别能力, 沅江流域冬、夏季 B-IBI 评价指标体系均具有适用性。

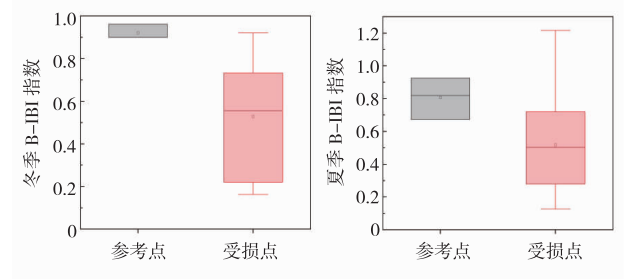


图 4 沅江流域样点 B-IBI 分布图

Fig. 4 Distribution of B-IBI values at sampling points in Yuanjiang River Basin

依据指数值将河流划分为 5 个健康等级, 以大于参照点由低到高排序 75%分位数作为“优秀”的标准, 将 75%分位数以下范围四等分, 分别划分为良好、中等、较差、极差 4 个等级^[28]。冬季参照点的 75 分位数值为 0.931, 夏季参照点的 75 分位数值为 0.873。B-IBI 指数评价标准及监测样点健康等级详见表 10。

沅江流域冬季良好及以上样点占 48%, 中等及以上样点占 68%; 夏季良好及以上样点占 44%, 中等及以上样点占 68%, 总体健康状况良好。沅江干流冬、夏两季良好及以上样点仅占 33.3%, 极差样点均占 22.2%; 澧水冬季良好及以上样点占 57.2%, 夏季良好及以上样点占 85.7%, 冬季极差样点占 14.3%, 夏季无极差样点; 酉水冬季良好及以上样点占 55.5%, 夏季良好及以上样点占 44.0%, 冬季、夏

表 10 沅江流域生物完整性划分标准及健康状况表

Tab. 10 Biological integrity classification standards and health status of Yuanjiang River Basin

| 等级 level | 冬季 winter | | | | | 夏季 summer | | | | |
|-------------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| | 优秀 | 良好 | 中等 | 较差 | 极差 | 优秀 | 良好 | 中等 | 较差 | 极差 |
| B-IBI 范围 B-IBI range | ≥ 0.931 | < 0.931 且 ≥ 0.698 | < 0.698 且 ≥ 0.466 | < 0.466 且 ≥ 0.233 | < 0.233 | ≥ 0.873 | < 0.873 且 ≥ 0.655 | < 0.655 且 ≥ 0.437 | < 0.437 且 ≥ 0.218 | < 0.218 |
| 沅江 Yuanjiang River | 0.0% | 33.3% | 33.3% | 11.1% | 22.2% | 0.0% | 33.3% | 22.2% | 22.2% | 22.2% |
| 澧水 Wushui River | 14.3% | 42.9% | 14.3% | 14.3% | 14.3% | 28.6% | 57.1% | 14.3% | 0.0% | 0.0% |
| 酉水 Youshui River | 11.1% | 44.4% | 11.1% | 11.1% | 22.2% | 0.0% | 22.2% | 33.3% | 22.2% | 22.2% |
| 总计 total | 8.0% | 40.0% | 20.0% | 12.0% | 20.0% | 8.0% | 36.0% | 24.0% | 16.0% | 16.0% |

季极差样点均占 22.2%。从样点健康等级可知,澧水作为沅江在湖南省境内的上游支流,生态环境在 3 条河流中最好,其次为下游支流酉水,最差为沅江干流。

3 讨论

3.1 指标体系的合理性

对于底栖动物生物完整性评价,不同季节应该统一建立指标体系还是分季节建立指标体系,目前尚无定论。多数学者如张方辉等^[29]、王旭等^[30]、杨晨钧等^[31]等对多个季节建立同一套指标体系进行评价,一定程度上降低了季节差异对指标筛选的影响,操作更加简单明确,普适性更强。张宇航^[32]、姚琦等^[33]、傅海霞等^[34]等分季节建立了指标体系,充分考虑了河流不同季节的温度、湿度、水量、流速、植被特征等差异,及这些因素对底栖动物群落特征的影响,对于季节性差异明显的河流更为适用。本研究考虑沅江流域属亚热带季风气候,降水与季风关系密切。冬季气候较干燥寒冷而少雨水,夏季湿热高温而多雨。2 月平均气温 5~6 °C,8 月平均气温 28~29 °C。根据《湖南省重点河湖生态流量保障实施

方案》(2022 年),本次研究对象涉及的水文站点共 7 个,2024 年 2 月与 8 月各水文站平均流量见表 11 (湖南省水文水资源勘测中心统计数据)。湖南省境内沅江干流共涉及生态流量保障控制断面 5 处流域径流主要由降水形成,径流的时空变化规律与降水规律高度一致^[35]。不同物种对季节敏感度不一致,如摇蚊科、蜉蝣目、毛翅目和摇蚊幼虫等对季节敏感,而一些寡毛类动物相对稳定。适宜分季节建立指标体系,分别对冬、夏两季候选指标进行筛选,结果表明,冬季筛选出的核心指标为摇蚊类个体数百分比、Hilsenhoff 生物指数、刮食者个体数百分比,夏季筛选出的核心指标为 Shannon-Wiener 多样性指数、总分类单元数、蜉蝣目毛翅目和襁翅目分类单元数、敏感类群分类单元数,指标完全不重合,说明不同季节区分参考点与受损点的指标完全不同,分季节评价在一定程度上使得结果更为精准和更符合实际,进一步验证了沅江流域分季节建立指标体系的合理性与科学性。

3.2 沅江流域生物完整性

从冬、夏两季沅江流域的生物量和生物密度来看,冬季均高于夏季,主要原因在于:(1)多数底栖

表 11 沅江流域水文站 2024 年平均流量

Tab. 10 Average flow rate of hydrological stations in the Yuanjiang River basin

| 序号 No. | 水文站名称 station name | 所属河流 river belonging to | 2 月平均流量 / (m ³ /s) average flow in February | 8 月平均流量 / (m ³ /s) average flow in August |
|-----------|-----------------------|----------------------------|---|---|
| 1 | 安江 | 沅江干流 | 144 | 292 |
| 2 | 浦市(二) | 沅江干流 | 308 | 907 |
| 3 | 五强溪(二) | 沅江干流 | 321 | 1 320 |
| 4 | 桃源 | 沅江干流 | 383 | 1 470 |
| 5 | 芷江 | 澧水 | 46 | 92 |
| 6 | 石堤(二) | 酉水 | 28 | 352 |
| 7 | 高砌头 | 酉水 | 53 | 679 |

动物适应缓流或静水环境,夏季受季节性洪水影响,普遍水位较高,水流速快,导致沉积物被冲刷、底质松散,破坏底栖动物固着或穴居的生境。加之洪水期浊度升高,光照减弱,沉水植物和藻类光合作用受限,导致溶解氧含量降低,不利于底栖动物的生存繁衍,冬季则正好相反;(2)部分底栖动物(如摇蚊、某些蜉蝣)在冬季以卵或幼虫形式在沉积物中休眠,导致单位面积内个体数量显著增加;(3)落叶和凋落物在秋季大量进入水体形成沉积物,沉积物中含有大量有机质,待到冬季能够为腐食性底栖动物(如水丝蚓、螺类)提供大量食物来源,可能导致此类底栖动物在一定时间段内数量增长。其他河流研究中也类似结论^[36,37]。

综合考虑 3 条河流平均 B-IBI 指数和样点健康状态等级分布,底栖动物生物完整性表现最优秀的是灞水,其次是酉水,最后是沅江干流。其原因主要是沅江干流建设有托口、五强溪,酉水建设有凤滩等大型调节性水库,例如沅江 YJ3 样点位于铜湾电站上游,YJ6 样点位于五强溪电站上游。河流的水流动力条件以及生态系统经长期的自然演变和自我调整,在没有人类活动影响下,一般处于较健康的自然状态。而水库蓄水发电在一定程度上破坏了河流水体连续性^[38,39],带来流速和泥沙输移规律的变化,影响底栖动物繁殖周期。水库蓄水后水深增加,导致上下层水体温差增大,也可能对原有生态系统造成一定程度扰动,导致底栖动物生境发生恶化^[40],加上一系列护岸硬化工程的实施,对底栖动物生境空间造成一定的破坏^[41],故底栖动物完整性降低。而灞水沅江上游一级支流,流经地绝大部分为中、低山丘陵区,无大型调节性水库,人口密度较小,工业发展相对滞后,对环境扰动也相对较小,生境保护良好,底栖动物丰富性、多样性及完整性也较好。

3.3 结论

研究通过对湖南省沅江流域干流及 2 条一级支流进行冬、夏季 2 次底栖动物监测采样,发现沅江流域冬季的生物量和生物密度均高于夏季。并分季节建立了 B-IBI 指标评价体系,结果表明沅江流域整体健康状态居全省前列,且支流优于干流,上游支流优于下游支流。最后分析验证了分季节建立指标体系的必要性与合理性及不同时空条件下影响健康状态的主要因素。综上所述,研究对季节性

明显河流的生物完整性研究提供了理论参考,为湖南省水生生物及生态环境保护提供了基础性研究资料。

参考文献

- [1] 曹家乐,张亚辉,张瑾,等.国内外水生态健康评价研究进展[J].环境工程技术学报,2022,12(5):1402-1410.
- [2] 吕阳奇,刘财鑫,顾天宇,等.沅江源头区龙泉溪底栖大型无脊椎动物多样性和群落特征[J].中国环境监测,2023,39(6):142-156.
- [3] HILSENHOFF W L. An improved biotic index of organic stream pollution[J]. Great Lakes Entomologist, 1987, 20(1): 31-40.
- [4] HILSENHOFF W L. Rapid field assessment of organic pollution with a family-level biotic index [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1988, 7(1): 65-68.
- [5] HELLAWELL J M. Biological surveillance of rivers: a biological monitoring handbook [M]. Stevenage, UK: Water Research Centre, 1978.
- [6] ARMITAG P D, MOSS D, WRIGHT J F, et al. The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of unpolluted running-water sites[J]. Water Research, 1983, 17(3): 333-347.
- [7] VANDOLAH R F, HYLAND J L, HOLLAND A F. A benthic index of biological integrity for assessing habitat quality in estuaries of the southeastern USA [J]. Marine Environmental Research, 1999, 48(4-5): 269-283.
- [8] DANIELS R A, RIVA-MURRAY K, HALLIWELL D B, et al. An index of biological integrity for northern Mid-Atlantic Slope drainages[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2002, 131(6): 1044-1060.
- [9] MASESE F O, RABURU P O, MUCHIRI M. A preliminary benthic macroinvertebrate index of biotic integrity (B-IBI) for monitoring the Moiben River, Lake Victoria[J]. African Journal of Aquatic Science, 2009, 34(1): 1-14.
- [10] 王丑明,张屹,田琪,等.1988—2016 年洞庭湖大型底栖动物群落变化及驱动因素分析[J].湖泊科学,2021,33(1):218-231.
- [11] 张宇航,颜旭,姜兵琦,等.应用底栖动物完整性指数评价北京市河流水生态环境质量[J].湖泊科学,2023,35(6):2010-2021.
- [12] 宋聃,都雪,王乐,等.应用大型底栖动物完整性指数评价呼兰河的生态健康状况[J].水产学杂志,2023,36(5):100-111.
- [13] 陶艳茹,董稳静,罗明科,等.太湖底栖动物时空分布

- 特征及基于底栖动物完整性指数的水生态健康评价[J].环境科学研究,2024,37(4):752-763.
- [14] 赵丽子,彭增辉,纪炜之,等.基于大型底栖动物的长株潭都市圈典型河流生态健康评价[J].生命科学研究,2025,29(3):255-264.
- [15] HJ 710.8-2014 生物多样性观测技术导则 淡水底栖大型无脊椎动物[S].北京:生态环境部,2014.
- [16] SL/T 793-2020 河湖健康评估技术导则[S].北京:水利部,2020.
- [17] 周凤霞.生物监测(第3版)[M].北京:化学工业出版社,2021.
- [18] 张曙光.多泥沙河流水体污染调查技术指南[M].郑州:黄河水利出版社,2004.
- [19] HJ 1295-2023 水生态监测技术指南 河流水生生物监测与评价(试行)[S].北京:生态环境部,2023.
- [20] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER B, et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers[M]. Washington DC, USA: USEPA, 1999.
- [21] 殷旭旺,李庆南,朱美桦,等.渭河丰、枯水期底栖动物群落特征及综合健康评价[J].生态学报,2015,35(14):4784-4796.
- [22] 韦建福,敬凯,王延辉,等.南溪河大型底栖无脊椎动物群落结构及其季节变化[J].水生态学杂志,2022,43(4):30-38.
- [23] 欧阳美凤,谢意南,王丑明,等.洞庭湖水生生物群落结构时空变化及其生物完整性评价[J].环境生态学,2025,7(2):103-109,182.
- [24] 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.
- [25] 乔祺,石林,李代军,等.大型底栖无脊椎动物生物完整性在涟水干流健康评价中的应用[J].水利科技与经济,2022,28(11):68-74.
- [26] 王秀云,韩政,谭梦,等.基于大型底栖无脊椎动物生物完整性指数的苏州市水体生态健康评价[J].上海海洋大学学报,2023,32(4):763-772.
- [27] 潘聪,任朝宇,刘玉,等.基于鱼类生物完整性指数的海河水生态系统健康评价[J].天津农林科技,2025(4):5-13.
- [28] 李鑫雨,闫龙,胡鹏,等.基于底栖动物完整性评价的赤水河生物基准分析[J].水资源保护,2025,41(2):242-252.
- [29] 张方辉,黄河清,李雪飞,等.基于底栖动物完整性指数(B-IBI)的水生态健康评价——以梁滩河和濑溪河为例[J].环境影响评价,2019,41(6):79-85.
- [30] 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.
- [31] 杨晨钧,刘凌,邹怡倩,等.江苏省境内河流大型底栖动物生物完整性分布特征[J].人民长江,2024,55(9):108-116.
- [32] 张宇航.基于功能性状的山区河流大型底栖动物群落生态水文响应机制研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2024.
- [33] 姚琦,黎明杰,麻林,等.基于大型底栖动物完整性指数与综合生物指数的水生态评价[J].中国环境科学,2024,44(3):1476-1486.
- [34] 傅海霞,张玉洲,黄书雅,等.徽水河底栖动物群落结构季节动态及构建机制[J].长江流域资源与环境,2024,33(6):1239-1249.
- [35] 钱萍,胡钢,赵健.基于高质量发展理念的沅江流域城乡供水及灌溉规划研究[J].水资源开发与管理,2022,8(2):12-15.
- [36] 卓丰金,杨中文,高鑫,等.湟水河流域大型底栖动物功能摄食类群时空分布特征及生态系统属性评价[J].生态毒理学报,2025,20(1):123-139.
- [37] 陈怡,王斌,徐泽琪,等.秋季丰水期山区河道时段性连通堰坝对底栖动物群落结构的影响[J].水电能源科学,2024,42(9):43-47.
- [38] THOMSON J R, HART D D, CHARLES D F, et al. Effects of removal of a small dam on downstream macroinvertebrate and algal assemblages in a Pennsylvania stream [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2005, 24(1): 192-207.
- [39] 许栋,张博曦,及春宁,等.梯级水库对南渡江干流底栖动物丰枯水期沿程变化的影响[J].水资源保护,2019,35(2):60-66,84.
- [40] 文威,李双双,冯桃辉,等.水位抬升对丹江口水库底栖动物群落的影响研究[J].人民长江,2023,54(8):85-92.
- [41] 白海锋.渭河流域水生生物群落时空分布特征、驱动机制及水生态系统健康评价[D].西安:西北大学,2022.