

## 基于底栖生物完整性指数 (B-IBI) 的仁怀市主要河流健康评价

何浩宇<sup>1</sup>, 王芳<sup>2</sup>, 龙茂源<sup>1</sup>, 张书海<sup>1</sup>, 周岳兵<sup>1</sup>, 丁献桃<sup>1</sup>, 甘雷<sup>1</sup>, 王桢璐<sup>1</sup>, 项涛<sup>3</sup>, 居涛<sup>4</sup>, 石磊<sup>5</sup>, 安苗<sup>1</sup>, 董响红<sup>1</sup>

1. 贵州大学 动物科学学院/高原山地动物遗传育种与繁殖教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025
2. 团风县问津中学, 湖北 黄冈 438000
3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008
4. 广西科学院广西海洋科学院, 广西 南宁 530007
5. 云南大学 生态与环境学院/高原湖泊生态与治理研究院, 云南 昆明 650504

**摘要:** 健康稳定的河流生态系统对维持生物多样性和经济社会发展至关重要。然而, 作为中国酱酒核心产区, 仁怀市主要河流的健康状况评价体系却尚未构建。基于此, 于 2023 年对仁怀市境内 9 条河流 28 个采样点的大型底栖无脊椎动物开展了周年季度调查, 并在此基础上创新性地搭建了仁怀市主要河流的底栖生物完整性指数 (Benthic-integrated biotic index, B-IBI) 评价体系。结果发现: 共记录到大型底栖无脊椎动物分类单元 175 个, 隶属于 5 门 10 纲 22 目 75 科, 年均密度和生物量分别为  $1236.50 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $168.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 9 条河流的健康情况中, 1 条为优秀, 1 条为良好, 3 条为中等, 其余 4 条为较差, 无很差; 28 个采样点中, 2 个为优秀, 5 个为良好, 7 个为中等, 7 个为较差, 7 个为很差。综上, 所构建的 B-IBI 评价体系指示仁怀市主要河流的整体健康状况不佳, 建议在未来采取适宜的管理及修复措施以使其恢复至健康状态。

**关键词:** 底栖动物群落; 底栖生物完整性指数; 健康评价; 长江流域; 仁怀市

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



## Assessment of health conditions of main rivers in Renhuai City based on benthic-integrated biotic index (B-IBI)

HE Haoyu<sup>1</sup>, WANG Fang<sup>2</sup>, LONG Maoyuan<sup>1</sup>, ZHANG Shuhai<sup>1</sup>, ZHOU Yuebing<sup>1</sup>, DING Xiantao<sup>1</sup>, GAN Lei<sup>1</sup>, WANG Zhenlu<sup>1</sup>, XIANG Tao<sup>3</sup>, JU Tao<sup>4</sup>, SHI Lei<sup>5</sup>, AN Miao<sup>1</sup>, DONG Xianghong<sup>1</sup>

1. College of Animal Science, Guizhou University/Key Laboratory of Animal Genetics, Breeding and Reproduction in the Plateau Mountainous Region, Ministry of Education, Guiyang 550025, China
2. Middle School of Wenjin in Tuanfeng County, Huanggang 438000, China
3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China
4. Guangxi Academy of Marine Sciences, Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530007, China
5. School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University/Institute for Ecological Research and Pollution Control of Plateau Lakes, Kunming 650504, China

**Abstract:** Healthy and stable river ecosystem is vital to local biodiversity maintenance and socio-economic development. However, as China's core production area of Maotai-flavor Baijiu, Renhuai City has not established the health assessment sys-

收稿日期: 2024-08-06; 修回日期: 2024-10-08

基金项目: 仁怀市林业局项目 [GZBL-CG22-A (2022-152 号)]; 贵州大学博士基金 [贵大人基合字 (2021) 65 号]; 贵州省科学技术基金资助项目 [黔科合基础-ZK (2023) 一般 104 号]

作者简介: 何浩宇 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为底栖动物生态学。E-mail: 15333618388@163.com

通信作者: 董响红 (1990—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为渔业资源与环境。E-mail: xhdong@gzu.edu.cn

tem of its main rivers. Thus, we conducted an annual quarterly survey on the benthic fauna at 28 sampling sites in 9 rivers in Renhuai City in 2023, and developed a benthic-integrated biotic index (B-IBI) health evaluation system for the city's main rivers. The results show that a total of 175 taxonomic units of benthic macroinvertebrates were recorded, belonging to 5 phyla, 10 classes, 22 orders and 75 families. The annual average density and biomass were  $1\ 236.50\ \text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$  and  $168.07\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , respectively. Among the 9 rivers, one was in excellent condition, one in good condition, three in average condition, four in poor condition, and none in very poor condition. Among the 28 sampling sites, two were in excellent condition, five in good condition, seven in average condition, seven in poor condition, and seven in very poor condition. In general, the assessment system of B-IBI in this paper shows that Renhuai City's main rivers are in poor condition, and suitable management and restoration measures should be adopted to make them become healthy again in the future.

**Keywords:** Benthic fauna; Benthic-integrated biotic index; Health assessment; Yangtze River basin; Renhuai City

贵州省仁怀市地处赤水河中上游交汇源区, 市内河流均属于赤水河水系, 其中 87.03 km 的干流为长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区核心区和缓冲区的组成部分, 也是长江上游众多支流中唯一未修建大坝并保持着天然水文节律的重要河流。与其形成鲜明对比的是, 赤水河仁怀段部分支流已修建较多大坝。例如, 五岔河有 49 座拦河水坝, 五马河有 41 座, 九仓河有 29 座, 盐津河有 23 座, 观音寺河有 7 座及桐梓河有 3 座 (仅统计仁怀市境内大坝数量)<sup>[1]</sup>。已有研究显示, 水坝等水利工程对河流的水量、水质以及水生生物造成的影响会以各种方式传递到整个流域<sup>[2]</sup>。赤水河素有“美酒河”之称, 干、流水系优质的水资源为当地酿酒工业提供了坚实的物质基础, 是仁怀市重要的优势产业。鉴于此, 掌握仁怀市河流的水质情况至关重要。然而, 目前关于仁怀市河流的水质监测主要侧重于理化指标<sup>[3-7]</sup>, 只有少数研究进行了生物监测<sup>[7-10]</sup>, 时间 (调查周期较短, 单季度调查) 及空间 (布设于仁怀市内的样点较少) 上的精度明显不足。虽然理化指标能反映水体污染物的即时浓度, 却难以检测出多重污染交织产生的复杂效应<sup>[11]</sup>。与之相对, 生物监测则能体现污染物在时间上的连续积累结果和空间上广阔范围的平均变化<sup>[12]</sup>。因此, 仁怀市河流生物监测方面的相关研究还有待补充。

在众多现行的河流生态系统健康评价体系中, 基于生物检测的方法, 主要包括以下几类: 指示物种法, 生物指数法 [EPT 分类单元数 (E 为蜉蝣目, P 为襉翅目, T 为毛翅目)]、耐污生物指数 (Biotic index, BI) 及科级生物水平指数 (Family biotic index, FBI) 等, 多元参数法 [如预测模型法和生物完整性指数 (Index of biotic integrity, IBI)] 等<sup>[13]</sup>。其中,

Karr<sup>[14]</sup> 于 1981 年创建的基于鱼类的生物完整性评价体系 (Fish-index of biotic integrity, F-IBI) 及其衍生物 (IBI) 备受关注。相比于单一的生物指数方法, IBI 提供了更为综合的评估框架, 从而可从生态系统视角更全面地反映河流健康状况<sup>[15]</sup>。随着时间推移与研究的深入, IBI 已逐渐被扩展应用至其他类群, 如大型底栖无脊椎动物<sup>[16]</sup>、浮游生物<sup>[17]</sup> 及高等维管束植物<sup>[18]</sup> 等。由于大型底栖无脊椎动物的生命周期一般较长、活动范围通常狭窄、分布范围总体较广并具有不同类群对水质的敏感性不同等特点<sup>[19-20]</sup>, 因而具备较好的环境指示作用, 故基于底栖生物完整性指数 (Benthic-integrated biotic index, B-IBI) 的河流健康评价应用较多<sup>[21-23]</sup>。

然而, 在对国内外有关大型底栖无脊椎动物的既有工作进行系统梳理和仔细分析后发现, 尽管通过借助 B-IBI 已在全球尺度上开展了大量富有成效的河流生态系统健康评价<sup>[24-27]</sup>; 但由于时间、空间异质性, 这些结论往往不具有普适性<sup>[24]</sup>, 即在一个时间段或一条河流构建的评估体系未必适用于其他时间或不同河流。因此, 亟需构建适用于仁怀市主要河流的 B-IBI 评价体系<sup>[9]</sup>。

鉴于此, 本研究拟通过周年季度调查, 在摸清中国酱酒核心产区——仁怀市主要河流大型底栖无脊椎动物群落结构的基础上, 应用生物完整性理论, 尝试搭建该市主要河流的 B-IBI 评价体系, 并借助该体系评估其健康状况, 以期为仁怀市主要河流的有效管理提供基础数据与科技支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点选择

以仁怀市境内 9 条河流中的大型底栖无脊椎动物为研究对象。依据相关类群资源调查规范和标准

(HJ 710.8—2014、SL/T 793—2020 以及 HJ 1295—2023), 针对不同河流水体类型或生境特点布设了 28 个采样点, 包括赤水河干流 4 个 ( $M_1$ — $M_4$ ) 与支流 24 个 (九仓河  $B_1$ — $B_4$ 、五马河  $B_5$ — $B_7$ 、盐津河  $B_8$ — $B_{12}$ 、母猪笼河  $B_{13}$ — $B_{14}$ 、金溪河  $B_{15}$ 、五岔河  $B_{16}$ —

$B_{18}$ 、观音寺河  $B_{19}$ — $B_{20}$  及桐梓河  $B_{21}$ — $B_{24}$ , 图 1), 其中  $M_3$  位于贵州省习水县和四川省泸州市古蔺县交接处。并于 2023 年开展 4 个季度的调查 [1 月 (冬)、4 月 (春)、7 月 (夏) 和 10 月 (秋)]。

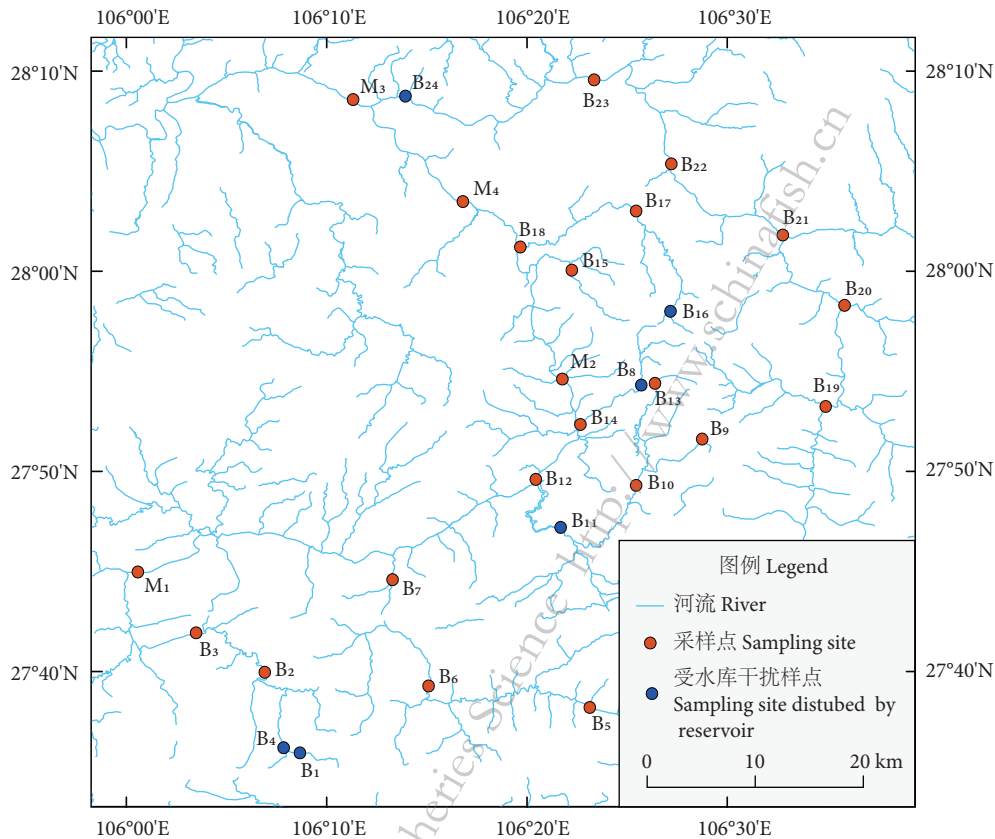


图1 仁怀市采样点分布图

注: 样点字母 M 表示干流, 字母 B 表示支流。

Fig. 1 Distribution map of sampling sites in Renhuai City

Note: The letter M represents the master stream and the letter B represents the branch.

## 1.2 样品采集和处理

基于各样点的生境状况 (底质类型与水深等), 在以石块底质为主、可涉水的河段内, 使用索伯网 (孔径  $420\ \mu\text{m}$ , 面积  $0.09\ \text{m}^2$ ) 进行样品定量采集; 在以淤泥或细沙底质为主、不可涉水的河段内, 则乘船或皮筏艇前往采样点, 使用  $1/32\ \text{m}^2$  的彼得逊采泥器进行样品的定量采集<sup>[28]</sup>。采集的样品先在现场使用 60 目网筛 (孔径  $250\ \mu\text{m}$ ) 进行冲洗, 将获得的干净残余物迅速用塑封袋装好, 而后带回临时驻地并置入白瓷盘中进行分拣, 最后使用 10% ( $\varphi$ ) 的甲醛溶液对分拣出的标本进行固定, 再保存在 50 mL 的标本瓶中。待每个季度的外业全部完成后再带回实验室, 依据大型底栖无脊椎动物的分类专著和文献进行鉴定<sup>[29-33]</sup>。

为了方便后续处理, 将每个采样点 4 个季度的调查数据取平均值, 即将每个采样点作为独立的样本进行候选生物指标计算<sup>[34]</sup>, 仅讨论其空间差异。优势种的判定依据为其相对密度大于 5%。本研究中所有数据均在 Excel 2016 软件中进行预处理, 通过 ArcGIS Pro 3.0.2 软件绘制采样点地图, 数据来源于全国地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/>, 1:25 万全国基础地理数据库, 2019 公众版), 使用 Origin Pro 9.8 软件绘制箱线图, 采用 SPSS 26.0 软件进行相关性分析。

## 1.3 取样点分类

使用 B-IBI 评价体系对河流生态系统健康进行评价的首要任务就是确定参照点与受损点<sup>[35]</sup>。参照点即指未受或受轻微人类干扰且水体质量较高的

样点(仁怀市环境保护检测站);受损点则是指受到重度人类干扰且水体质量较差的样点<sup>[36]</sup>。遵照 Morley 和 Karr<sup>[37]</sup>、Blocksom 等<sup>[38]</sup> 的建议,本研究选择赤水河纳坡渡口(M<sub>1</sub>)、观音寺河大桥(B<sub>19</sub>)以及观音寺河蔡家坝(B<sub>20</sub>)3个样点为参照点,剩余25个自动划归为受损点。

#### 1.4 B-IBI 评价体系构建

##### 1.4.1 创建候选参数清单

根据有关文献与仁怀市河流大型底栖无脊椎动物群落结构特点<sup>[7-9]</sup>,初步选择29个候选参数用于构建仁怀市的B-IBI评价指标体系(表1),包括9个分类单元丰富度参数(群落物种丰富度信息)、11个群落组成参数(群落结构)、2个耐污能力参数(群落耐污或适应能力)、5个功能类群参数(群落功能特征)以及2个生物多样性参数(物种群落层面的多样性水平)。其中,生物指数( $F_{BI}$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )和 Simpson 优势度指数( $D$ )的公式分别为:

$$F_{BI} = \sum_{i=1}^S \frac{n_i t_i}{N} \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

式中: $S$ 为样本中总分类单元数; $N$ 为样本中的总个体数; $n_i$ 为第 $i$ 个分类单元的个体数; $t_i$ 为第 $i$ 个分类单元的耐污值; $P_i$ 为物种 $i$ 在样本中的相对丰度。

##### 1.4.2 核心参数遴选

核心参数经过5个步骤从29个候选参数中遴选(图2),更多细节可参考有关文献<sup>[9,16,39-40]</sup>。

##### 1.4.3 分值计算

为消除核心参数量纲带来的影响,对与环境压力正(负)相关的参数(正向参数,即对干扰的反应为上升的参数;负向参数,即对干扰的反应为下降的参数),分别利用公式(4)和(5)消除量纲:

$$I_s = 10 \times \begin{cases} \frac{I_T - I_0}{I_T - I_E}, & \text{正相关;} \\ \frac{I_0 - I_T}{I_T - I_E}, & \text{负相关。} \end{cases} \quad (4)$$

$$(5)$$

式中: $I_s$ 为核心参数 $I$ 消除量纲后的值; $I_0$ 为核心参数 $I$ 的实测值; $I_T$ 为核心参数 $I$ 的临界值,对于同环境压力正(负)相关核心参数取 $I$ 的95%(5%)

表1 构建底栖生物完整性指数(B-IBI)评价体系候选参数及它们对干扰的反应

Table 1 Candidate parameters for constructing benthic-integrated biotic index (B-IBI) assessment system and their responses to disturbance

属性 Attribute	编号 No.	候选参数 Candidate parameter	对干扰的 反应 Response to disturbance
分类单元丰 富度参数 Categorical richness parameter	C <sub>1</sub>	总分类单元数	下降
	C <sub>2</sub>	蜻蜓目分类单元数	下降
	C <sub>3</sub>	蜉蝣目分类单元数	下降
	C <sub>4</sub>	毛翅目分类单元数	下降
	C <sub>5</sub>	鞘翅目分类单元数	下降
	C <sub>6</sub>	双翅目分类单元数	上升
	C <sub>7</sub>	摇蚊科分类单元数	上升
	C <sub>8</sub>	甲壳和软体动物分类单元	下降
	C <sub>9</sub>	耐污类群分类单元数	上升
群落组成参数 Community composition parameter	C <sub>10</sub>	(蜉蝣目+襀翅目+毛翅目)/%	下降
	C <sub>11</sub>	蜻蜓目/%	下降
	C <sub>12</sub>	蜉蝣目/%	下降
	C <sub>13</sub>	毛翅目/%	下降
	C <sub>14</sub>	鞘翅目/%	下降
	C <sub>15</sub>	双翅目/%	上升
	C <sub>16</sub>	摇蚊科/%	上升
	C <sub>17</sub>	其他双翅目与非昆虫/%	上升
	C <sub>18</sub>	寡毛类/%	上升
耐污能力参数 Pollution tolerance parameter	C <sub>19</sub>	甲壳与软体动物/%	下降
	C <sub>20</sub>	前三位优势种/%	上升
	C <sub>21</sub>	耐污类群/%	上升
	C <sub>22</sub>	BI 指数 ( $F_{BI}$ )	上升
	C <sub>23</sub>	滤食者/%	可变
功能类群参数 Functional group parameter	C <sub>24</sub>	撕食者/%	上升
	C <sub>25</sub>	刮食者/%	可变
	C <sub>26</sub>	收集者/%	可变
	C <sub>27</sub>	捕食者/%	下降
生物多样性 参数 Biodiversity parameter	C <sub>28</sub>	Shannon-Weiner 多样性指数 ( $H'$ )	下降
	C <sub>29</sub>	Simpson 优势度指数 ( $D$ )	下降

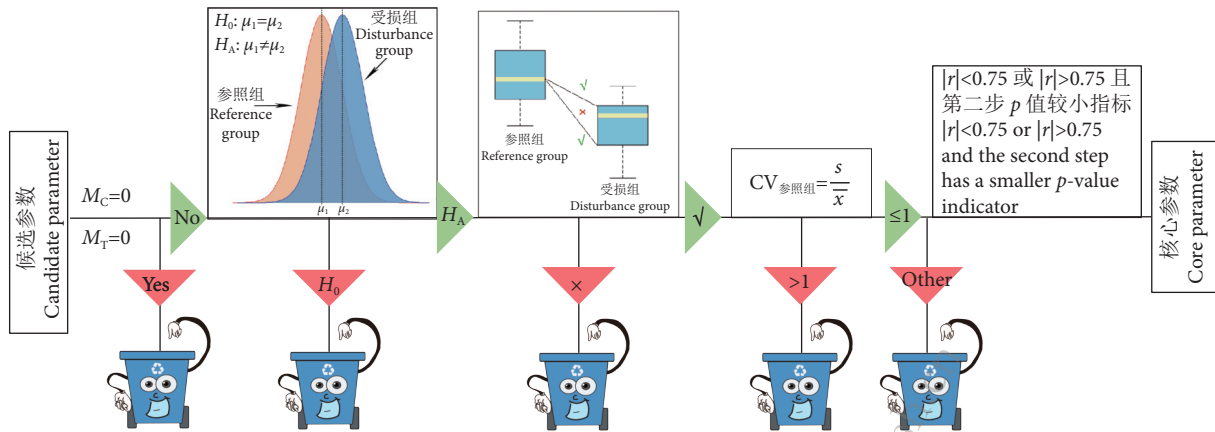


图2 核心参数筛选步骤

注:  $M_C$  和  $M_T$  分别为某一候选指标在参照组和受损组的中位数。

Fig. 2 Selection steps of core parameters

Note:  $M_C$  and  $M_T$  are the median values of one candidate parameter in the control group and disturbance group, respectively.

分位数;  $I_E$  为核心参数  $I$  的期望值, 对于同环境压力正 (负) 相关核心参数取  $I$  的 5% (95%) 分位数; 10 为使  $I_S$  的基本分布范围转换为 0~10 而设置的常数, 若  $I_S > 10$ , 按 10 计, 若  $I_S < 0$ , 则按 0 计。消除量纲后的核心参数分值之和与有关参数数量的比值即为本研究各样点的 B-IBI 得分。

#### 1.4.4 分级评价

B-IBI 评价体系运用参照点位 B-IBI 值的“25% 分位数法”进行等级划分: 大于 25% 分位数的一类代表最优状态, 即优秀; 小于 25% 分位数的分布范围则继续 4 等分, 分别对应不同的状态, 即良好、中等、较差及很差。

## 2 结果

### 2.1 大型底栖无脊椎动物群落结构

#### 2.1.1 物种组成

本研究共记录到大型底栖无脊椎动物分类单元 175 个, 隶属于 5 门 (线形动物门、扁形动物门、环节动物门、节肢动物门及软体动物门) 10 纲 22 目 75 科。其中, 水生昆虫为绝对优势类群, 128 种 (占 73.14%), 包括双翅目 51 种 (占水生昆虫种类数的 39.84%), 蜻蜓目 12 种 (占 9.38%), 蜉蝣目 24 种 (占 18.75%), 襀翅目 4 种 (占 3.13%), 毛翅目 19 种 (占 14.84%), 鞘翅目 9 种 (占 7.03%) 以及鳞翅目、广翅目和半翅目各 3 种 (各占 2.34%); 同时, 鉴定出软体动物门 23 种 (占 13.14%), 环节动物门 17 种 (占 9.71%), 包括寡毛类 11 种、蛭纲 5 种以及沙蚕 1 种。此外, 还有甲壳类 4 种 (占 2.29%) 与其他动物 3 种 (占 1.71%)

(图 3-a)。各河流物种丰富度分别为盐津河 102 种、赤水河 76 种、九仓河 65 种、五马河 52 种、五岔河 51 种、观音寺河 50 种、金溪河 41 种、母猪笼河 33 种以及桐梓河 25 种 (图 3-b)。

#### 2.1.2 密度与生物量

仁怀市主要河流大型底栖无脊椎动物年平均密度和生物量分别为  $1236.50 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$  与  $168.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其中, 密度方面表现为母猪笼河 ( $4696.78 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 九仓河 ( $1406.40 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 盐津河 ( $1405.33 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 五马河 ( $912.04 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 金溪河 ( $812.50 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 赤水河 ( $698.85 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 桐梓河 ( $615.85 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 观音寺河 ( $606.90 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 五岔河 ( $547.44 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$ )。生物量方面则表现为九仓河 ( $901.26 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 五马河 ( $152.39 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 桐梓河 ( $84.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 赤水河 ( $35.91 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 观音寺河 ( $24.28 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 金溪河 ( $22.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 盐津河 ( $11.60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 母猪笼河 ( $9.78 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) > 五岔河 ( $5.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (图 4)。

#### 2.1.3 优势种

赤水河干流、九仓河、五马河以及观音寺河均以软体动物为最大优势种, 盐津河、母猪笼河、五岔河以及桐梓河均以摇蚊科类群为最大优势种, 而金溪河则以蜉蝣科物种为最大优势种 (表 2)。

### 2.2 B-IBI 评价体系

#### 2.2.1 候选参数筛选

经中值筛选 (表 3) 未剔除参数, 而后的差异性检验 (表 3) 则保留了  $C_9$ 、 $C_{12}$ 、 $C_{20}$ 、 $C_{22}$ 、 $C_{28}$  及  $C_{29}$  6 个参数, 箱线图分布范围评估 (图 5) 剔除了  $C_9$ , 随后的变异性检查 (表 3) 则剔除了  $C_{20}$ , 相关性分析 (图 6) 剔除了  $C_{29}$ 。最终,  $C_{12}$ 、 $C_{22}$  及  $C_{28}$  共 3 个参数被确定为本研究 B-IBI 评价体系的核心参数。

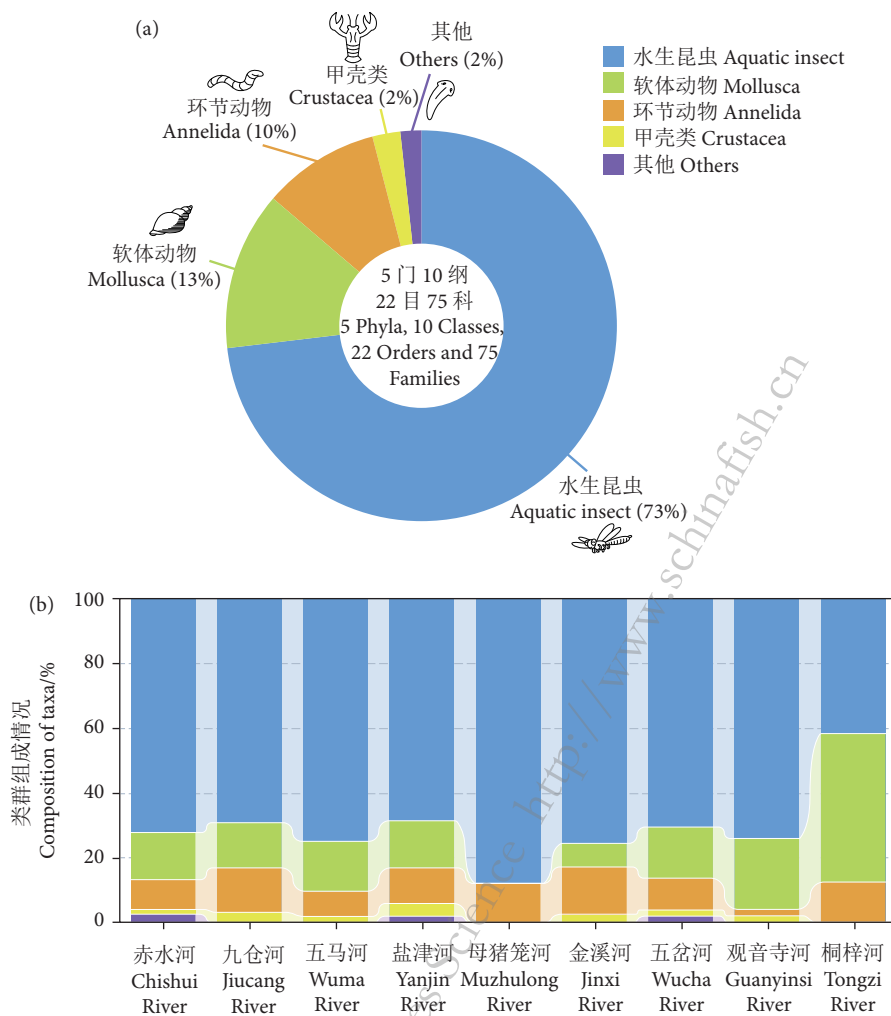


图3 仁怀市主要河流大型底栖无脊椎动物物种组成

Fig. 3 Species composition of benthic macroinvertebrates in main rivers of Renhuai City

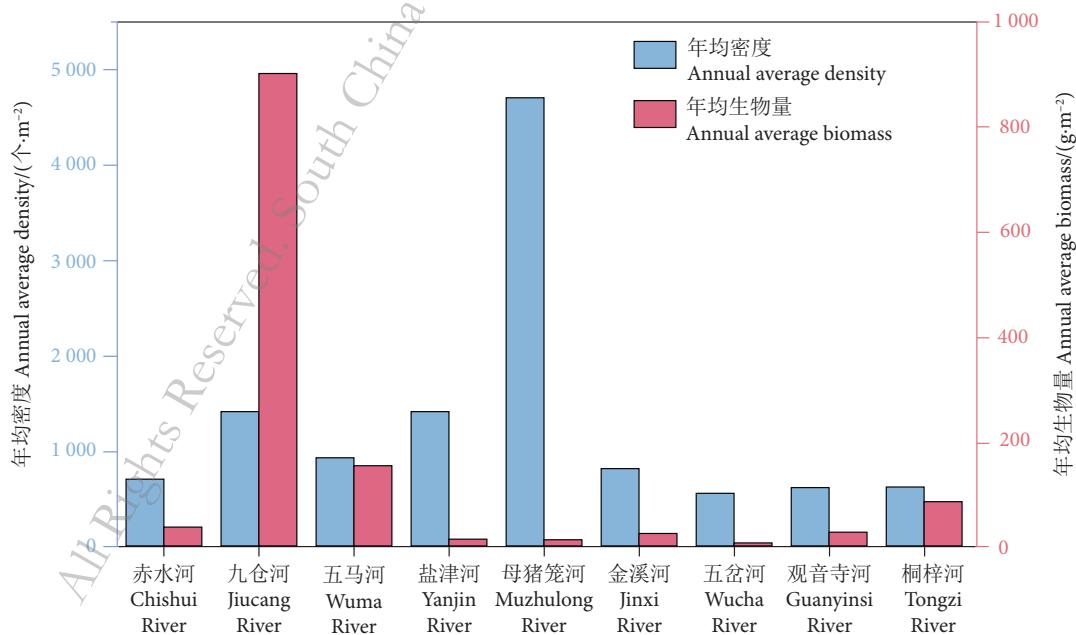


图4 仁怀市各河流大型底栖无脊椎动物年均密度和生物量

Fig. 4 Annual average density and biomass of benthic macroinvertebrates in main rivers of Renhuai City

表2 仁怀市九条河流大型底栖无脊椎动物优势种

Table 2 Dominant species of benthic macroinvertebrates in main rivers of Renhuai City

%

相对密度 ≥ 5% Relative abundance ≥ 5%	赤水河 Chishui River	九仓河 Jiucang River	五马河 Wuma River	盐津河 Yanjin River	母猪笼河 Muzhulong River	金溪河 Jinxi River	五岔河 Wucha River	观音寺河 Guanyinsi River	桐梓河 Tongzi River
摇蚊类 Chironomidae									
摇蚊属 <i>Chironomus</i> sp.	8.20	11.31	—	19.33	8.35	—	6.79	—	8.34
异足摇蚊属 <i>Apedilum</i> sp.	—	—	—	—	42.79	7.01	—	—	24.68
雕翅摇蚊属 <i>Glyptotendipes</i> sp.	—	—	—	—	—	—	40.92	—	12.67
多足摇蚊属 <i>Polypedilum</i> sp.	10.71	—	5.88	7.92	20.40	14.87	—	—	—
环足摇蚊属 <i>Cricotopus</i> sp.	—	—	—	14.71	—	—	11.20	—	—
长跗摇蚊属 <i>Tanytarsus</i> sp.	—	7.26	—	—	—	—	—	—	—
倒毛摇蚊属 <i>Microtendipes</i> sp.	—	—	7.64	—	—	14.87	—	—	—
直突摇蚊属 <i>Orthocladius</i> sp1.	—	—	—	5.05	—	—	—	—	—
齿斑摇蚊属 <i>Stictochironomus</i> sp.	7.01	—	—	—	—	—	—	—	—
特长足摇蚊属 <i>Thienemannimyia</i> sp.	—	—	—	—	—	5.64	—	—	—
其他水生昆虫 Other aquatic insects									
蜉蝣属 <i>Ephemera</i> sp1.	—	—	—	—	—	16.24	—	—	—
柔裳蜉属 <i>Habrophlebiodes</i> sp.	—	—	—	—	—	—	—	9.61	—
扁蜉属 <i>Heptagenia</i> sp.	—	—	—	—	—	—	—	7.09	—
似动蜉属 <i>Cinygmina</i> sp.	5.37	—	—	—	—	—	—	—	—
溪泥甲科幼虫 Elmidae larva	—	—	14.40	—	—	—	—	—	—
径石蛾属 <i>Ecnomus</i> sp.	—	—	—	—	—	—	9.47	—	—
侧枝纹石蛾属 <i>Ceratopsyche</i> sp.	—	—	—	6.27	5.15	6.50	—	—	—
软体动物类 Mollusca									
湖沼股蛤 <i>Limnoperna lacustris</i>	12.02	—	—	—	—	—	—	—	—
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	—	50.65	45.15	—	—	—	—	—	—
刻纹蚬 <i>Corbicula largillierti</i>	8.45	—	—	—	—	—	—	8.47	—
凸旋螺 <i>Gyraulus convexiuseculus</i>	—	—	—	—	—	—	—	10.76	—
铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	24.36
环棱螺属 <i>Bellamya</i> sp.	—	—	—	—	—	—	—	—	10.72
萝卜螺属 <i>Radix</i> sp1.	8.15	—	—	—	—	—	—	—	—
寡毛类 Oligochaeta									
石蛭属 <i>Erpobdella</i> sp.	—	—	—	—	6.68	—	—	—	—

注: 表中所列出的属名均代表该属一种而非多个物种。

Note: All the listed genus in this table represent one species within the genus, not several species.

### 2.2.2 B-IBI 评估体系搭建

经过计算, 得到仁怀市主要河流的 B-IBI 评价标准, 即分值 ≤ 2.11 为很差, 2.11~4.23 为较差, 4.23~6.34 为中等, 6.34~8.45 为良好, >8.45 为优秀 (分值区间为左开右闭)。

### 2.3 仁怀市主要河流健康评价

由 B-IBI 评价体系的评估结果可知 (表 4), 9 条河流中, 有 1 条处于优秀状态, 1 条处于良好

状态, 3 条处于中等状态, 4 条处于较差状态, 无很差状态; 28 个样点中, 有 2 个处于优秀状态, 5 个处于良好状态, 7 个处于中等状态, 7 个处于较差状态, 7 个处于很差状态。

## 3 讨论

### 3.1 大型底栖无脊椎动物群落结构分析

大型底栖无脊椎动物群落结构不仅反映了水体

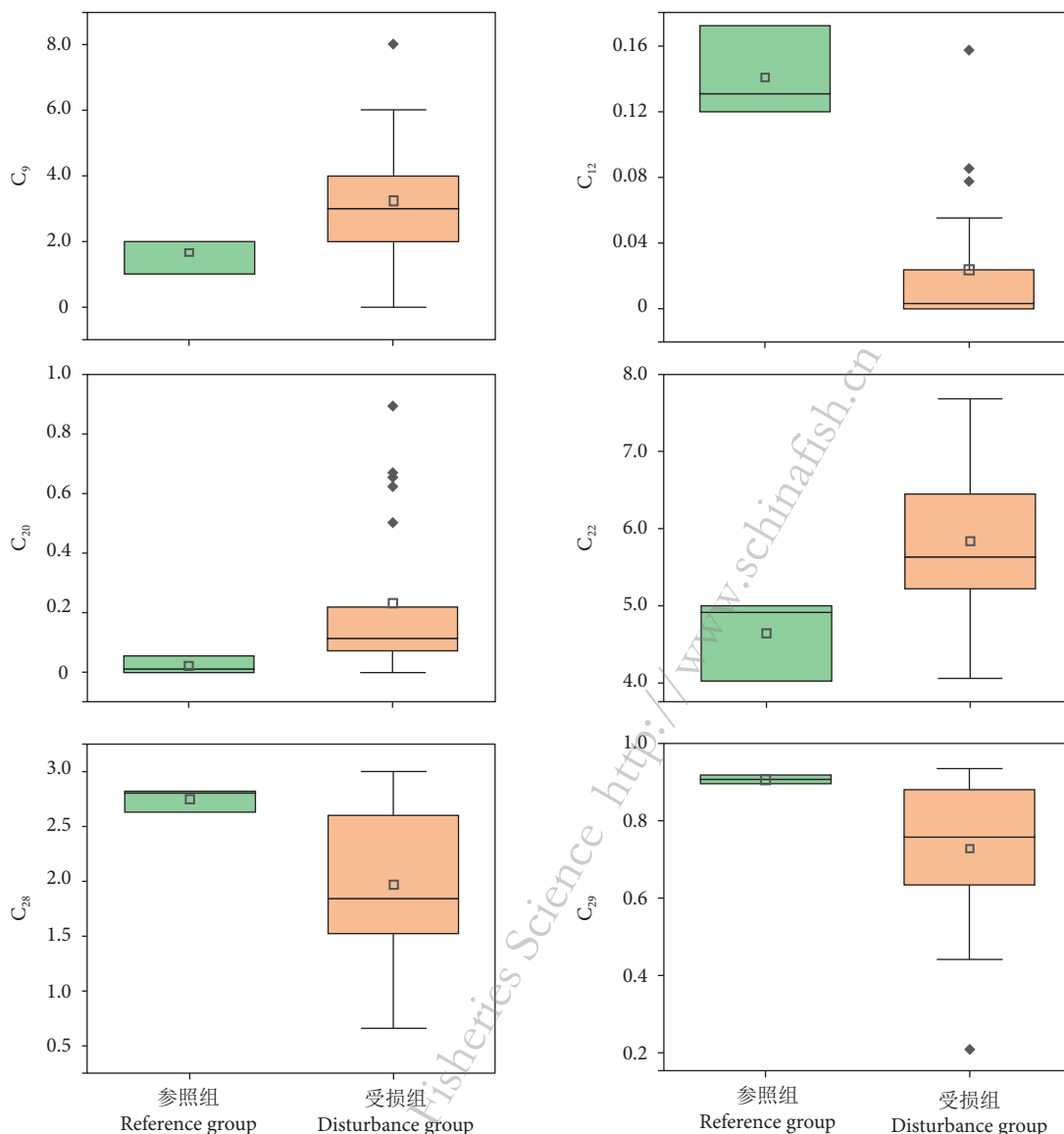


图5 候选参数箱线图

Fig. 5 Box-plots of candidate parameters

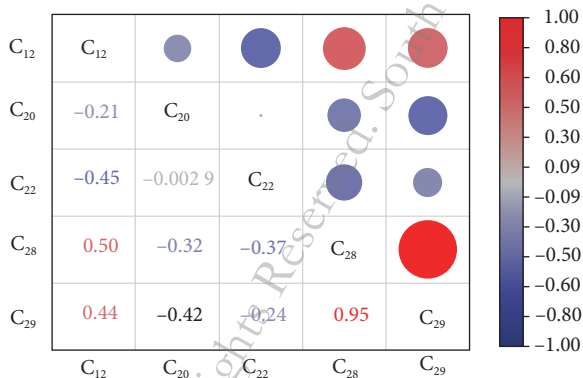


图6 候选参数指标相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients of candidate parameters

的理化特性和生态学过程<sup>[41]</sup>, 还可为水域生态系统的健康评价提供一定参考<sup>[42]</sup>。调查期间, 共采集到大型底栖无脊椎动物 175 种。其中, 水生昆虫

占比最高 (128 种, 占比 73.14%), 软体动物次之 (23 种, 占比 15.43%), 其他类群最小 (铁线虫、涡虫和水蛭共 3 种, 占比 1.71%); 县 (市) 内优势种多为摇蚊类幼虫与软体动物 (偏耐污种类)。所得结果同近年来仁怀市大型底栖无脊椎动物群落结构的研究结果大体相同, 即各类群密度组成相似, 优势种多由早年调查的清洁种转变成耐污类群 (寡毛类和摇蚊类)<sup>[7-9]</sup>, 说明过往仁怀市河流虽大型底栖无脊椎动物丰富度较高, 但随着人类活动影响加剧, 如今该地区大型底栖无脊椎动物的物种丰富度呈现出逐渐降低的趋势<sup>[10]</sup>。这类物种组成趋向简单化、耐污种类密度增加且逐步成为优势类群的现象, 反映了河流生态系统对人类活动及环境压力的生物学响应<sup>[43-44]</sup>。



表3 候选参数在参照点与受损点的中值、 $p$  值以及参照点中的变异系数

Table 3 Medians,  $p$ -values of candidate parameters in reference group and disturbance group and their variation coefficients in reference group

编号 Code	参照点中值 Medians in reference group	受损点中值 Medians in disturbance group	$p$ 值 $p$ -values	变异系数 Coefficient of variation
C <sub>1</sub>	30	24	0.433 00	NA
C <sub>2</sub>	2	0	0.135 50	NA
C <sub>3</sub>	7	3	0.076 28	NA
C <sub>4</sub>	3	1	0.458 67	NA
C <sub>5</sub>	2	1	0.531 06	NA
C <sub>6</sub>	9	10	0.879 88	NA
C <sub>7</sub>	7	6	0.663 85	NA
C <sub>8</sub>	5	5	0.392 86	NA
C <sub>9</sub>	2	3	0.012 14	NA
C <sub>10</sub>	34.780%	6.170%	0.072 33	NA
C <sub>11</sub>	16.310%	1.710%	0.136 36	NA
C <sub>12</sub>	13.060%	0.340%	0.006 65	0.197 50
C <sub>13</sub>	5.980%	1.430%	0.684 24	NA
C <sub>14</sub>	0.420%	0.000%	0.700 59	NA
C <sub>15</sub>	24.370%	13.800%	0.519 41	NA
C <sub>16</sub>	10.870%	9.660%	0.195 26	NA
C <sub>17</sub>	39.080%	24.390%	0.968 78	NA
C <sub>18</sub>	0.540%	2.560%	0.665 66	NA
C <sub>19</sub>	18.490%	9.880%	0.923 30	NA
C <sub>20</sub>	1.010%	11.260%	0.041 00	1.347 10
C <sub>21</sub>	9.660%	10.170%	0.258 44	NA
C <sub>22</sub>	4.908 80	5.619 30	0.036 10	0.116 80
C <sub>23</sub>	12.500%	8.810%	0.212 56	NA
C <sub>24</sub>	10.330%	6.600%	0.972 32	NA
C <sub>25</sub>	4.200%	3.450%	0.590 13	NA
C <sub>26</sub>	50.420%	56.620%	0.935 05	NA
C <sub>27</sub>	8.820%	6.790%	0.728 26	NA
C <sub>28</sub>	2.810 00	1.846 00	0.000 03	0.038 40
C <sub>29</sub>	0.906 10	0.756 80	0.000 05	0.011 80

注: NA. 表示该参数已在前述步骤被剔除。

Note: NA. This parameter has been removed of the previous step.

### 3.2 基于 B-IBI 的仁怀市主要河流健康评价

B-IBI 是目前应用最为广泛的水生生态系统健康评价体系之一<sup>[16,34,45]</sup>, 可以综合评估多种类型的

表4 基于 B-IBI 评价体系的仁怀市主要河流健康评价结果  
Table 4 Health assessment results on Renhuai's main rivers based on B-IBI assessment system

河流 River	编号 No.	得分 Score	评价结果 Assessment result	河流评价 结果 River assessment result
赤水河 Chishui River	M <sub>1</sub>	8.24	良好	良好
	M <sub>2</sub>	8.28	良好	
	M <sub>3</sub>	4.84	中等	
	M <sub>4</sub>	5.02	中等	
九仓河 Jiucang River	B <sub>1</sub>	1.44	很差	较差
	B <sub>2</sub>	1.71	很差	
	B <sub>3</sub>	1.96	很差	
	B <sub>4</sub>	4.09	较差	
五马河 Wuma River	B <sub>5</sub>	4.17	较差	较差
	B <sub>6</sub>	3.50	较差	
	B <sub>7</sub>	4.43	中等	
	B <sub>8</sub>	4.70	中等	
盐津河 Yanjin River	B <sub>9</sub>	7.39	良好	中等
	B <sub>10</sub>	6.71	良好	
	B <sub>11</sub>	1.92	很差	
	B <sub>12</sub>	7.60	良好	
母猪笼河 Muzhulong River	B <sub>13</sub>	1.85	很差	较差
	B <sub>14</sub>	3.64	较差	
金溪河 Jinxi River	B <sub>15</sub>	5.74	中等	中等
五岔河 Wucha River	B <sub>16</sub>	1.38	很差	中等
	B <sub>17</sub>	5.88	中等	
	B <sub>18</sub>	5.81	中等	
观音寺河 Guanyinsi River	B <sub>19</sub>	8.67	优秀	优秀
	B <sub>20</sub>	9.80	优秀	
桐梓河 Tongzi River	B <sub>21</sub>	2.17	较差	较差
	B <sub>22</sub>	1.66	很差	
	B <sub>23</sub>	2.42	较差	
	B <sub>24</sub>	4.05	较差	

注: 评价结果为样点得分相加后取均值所得。

Note: The evaluation result is the average value obtained by adding the scores of the sampling points.

人为干扰对水质的影响<sup>[13]</sup>。本研究对 5 大类 29 个生物参数进行筛选后, 最终选取蜉蝣目个体数百分比 (C<sub>12</sub>)、BI 指数 (C<sub>22</sub>) 以及 Shannon-Weiner 多样

性指数 ( $C_{28}$ ) 3 个核心参数搭建仁怀市的 B-IBI 评价体系。基于这一体系发现: 观音寺河的健康评价为优秀, 这可能是由于观音寺河远离酿酒核心产区且河流级别较低 (为赤水河二级支流, 其余支流均为一级支流), 虽建有水坝但规模较小, 仅受到轻微的人为干扰; 同时, 赤水河仁怀段健康评价为良好, 可能因为干流流程长, 流量大且尚未进行水电开发, 河流自净能力较强, 而九仓河、五马河及母猪笼河均需流经城镇, 河流水质受到污水排放、固体废物丢弃以及人为造成的河岸与河道结构改变的影响, 导致整体健康状况较差; 桐梓河属于赤水河较大的一条支流, 虽在仁怀市境内仅有 3 座水坝, 但该河整体修建了 40 余座梯级电站<sup>[46]</sup>, 严重改变了水文节律, 导致水污染加剧, 且喜流水环境的水生昆虫减少或消失, 因此其评价等级为较差。总体而言, 仁怀市主要河流的健康状况参差不齐, 整体健康状况不佳。这一结果同已有研究基本一致<sup>[3-6,8,47]</sup>, 主要表现为市内河流健康水平随沿岸人类活动程度增强而降低, 部分河段呈现富营养化加重及生态风险升高的趋势。此外评价结果还显示, 所有参照点的评估结果均处于优秀或良好等级, 同群落结构数据一样, 进一步从侧面证实了本研究结果的可靠性。这或许是因为本研究参考了 Morley 和 Karr<sup>[37]</sup>、Blocksom 等<sup>[38]</sup> 提供的标准来选取参考点; 还综合了 4 个季度的大型底栖无脊椎动物样本数据, 通过取平均值的方式<sup>[34,45]</sup>, 有效消除了生物指标潜在的季节性差异, 确保了评价结果在县(市)内河流尺度上的全面性与客观性。然而, 尽管本研究创新性地构建了仁怀市主要河流 B-IBI 评价体系, 且较为有效地评估了其当下的健康状况, 但依旧有完善空间。例如, 参照点标准对于不同水体的适用性有所不同, 将水库样点纳入评价体系, 可能因为标准选取过高而导致其评价结果不佳。因此, 未来研究应构建以仁怀市水库为主体的 B-IBI 评价体系, 以便针对性地对该市水库生态系统健康展开评价。

### 3.3 保护对策

基于仁怀市大型底栖无脊椎动物群落结构的春季特征<sup>[8]</sup> 和本研究构建的 B-IBI 评价体系的评估结果, 发现该市主要河流的整体健康状况堪忧。因此, 考虑到仁怀市酿酒轻工业发达、人类活动频繁, 赤水河及其所属支流水资源开发强度较大, 今

后应加大河流生态修复的力度, 努力实现河流生态系统的健康和可持续发展。为完成这一目标, 结合仁怀市社会现状与国际上有关研究的最新成果, 提出以下保护对策:

1) 加大控污力度, 例如持续加强对白酒产业的综合治理, 提高污水收集与处理率, 严格控制入河排污总量, 阻止生活污水和工业污水偷排入河。

2) 合理开发利用河岸带, 对部分开发河段应进行修复使之恢复至自然状态。同时, 在河岸带加大植树造林力度, 坚持退耕还林工程, 努力阻止陆源农田污染进入仁怀河流, 减少陆源污染的输入。

3) 完善水利工程的生态调度, 保证河流的最小生态流量需求; 同时, 不再新建并科学拆除部分大坝水闸, 使河流恢复自然节律。这些举措有助于提升河流的自净能力, 并为喜流水性的大型底栖无脊椎动物营造更多适宜的栖息地。

4) 加强宣传, 提高大众的环境保护意识, 从而有助于生活垃圾等的合理处置, 以及相关生态修复措施的实施。

### 参考文献:

- [1] 王玲林, 董响红, 何浩宇, 等. 贵州省仁怀市鱼类物种组成及其多样性[J]. 山地农业生物学报, 2024, 43(1): 45-54.
- [2] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4): 443-452.
- [3] 仁怀市环境保护监测站. 仁怀市城区饮用水源地水质分析报告[EB/OL]. [2024-06-08]. <https://www.taodocs.com/p-78514115.html>.
- [4] 国家环境保护部. 环境影响评价报告公示: 仁怀市娃哈哈纯净水建设环境影响报告表[EB/OL]. [2024-06-10]. <https://www.doc88.com/p-0981392587109.html>.
- [5] 刘亚曦, 张孝延, 于晨. 赤水河流域内贵州仁怀典型站点的水化学特征研究[J]. 科学技术创新, 2023(18): 35-38.
- [6] 季益虎, 方宏萍, 沈兴鹏, 等. 赤水河茅台段水环境趋势分析[J]. 贵州化工, 2012, 37(5): 37-38, 41.
- [7] 狄斐, 韩东晖, 赵文博, 等. 赤水河(仁怀段)底栖动物群落特征及驱动因素分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(12): 3988-3995.
- [8] 何浩宇, 龙茂源, 张书海, 等. 仁怀市主要河流春季大型底栖动物群落结构及其水质评价[J]. 山地农业生物学报, 2024, 43(1): 28-38.
- [9] 王军, 黄真理, 李海英, 等. 基于大型无脊椎动物完整性的赤水河健康评价体系构建[J]. 中国环境监测, 2018, 34(6): 62-72.
- [10] 张多鹏, 刘洋, 李正飞, 等. 长江上游支流赤水河流域底栖动物物种多样性与保护对策[J]. 生物多样性, 2023, 31(8): 60-72.
- [11] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价[M]. 北京:

- 清华大学出版社, 2010: 15.
- [12] 日本生态学会环境问题专门委员会. 环境和指示生物 (水域分册) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987: 1-3.
- [13] 王备新. 大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003: 10-14.
- [14] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [15] KANE D D, GORDON S I, MUNAWAR M, et al. The planktonic index of biotic integrity (P-IBI) : an approach for assessing lake ecosystem health[J]. *Ecol Indic*, 2009, 9(6): 1234-1247.
- [16] 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.
- [17] 文威, 李双双, 冯桃辉, 等. 基于浮游生物完整性的汉江中下游生态健康评价[J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(4): 85-91.
- [18] KARR J R. Ecological integrity and ecological health are not the same[J]. *Eng Within Ecol Constr*, 1996, 97: 109.
- [19] 霍堂斌, 刘曼红, 姜作发, 等. 松花江干流大型底栖动物群落结构与水质生物评价[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 247-254.
- [20] SMITH M J, KAY W R, EDWARD D H D, et al. AusRivAS: using macroinvertebrates to assess ecological condition of rivers in Western Australia[J]. *Freshw Biol*, 1999, 41(2): 269-282.
- [21] 胡芳, 刘聚涛, 温春云, 等. 抚河流域底栖动物群落结构及基于完整性指数的健康评价[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(1): 30-39.
- [22] 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, 27(6): 919-927.
- [23] 汪双. 应用底栖动物完整性指数 (B-IBI) 评价黑河健康状况[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022: 22-33.
- [24] 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.
- [25] 侯湘然, 潘保柱, 侯易明, 等. 无定河流域不同水土流失区底栖动物生物完整性指数构建与健康评价[J]. *湖泊科学*, 2024, 36(1): 274-285.
- [26] 冯治远, 侯易明, 阴琨, 等. 基于底栖动物生物完整性指数的黄河干流生态健康评价[J]. *湖泊科学*, 2024, 36(2): 512-529.
- [27] 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.
- [28] 李正飞. 河流大型无脊椎动物群落聚合和维持机制研究: 以汉江流域为例[D]. 武汉: 中国科学院大学 (中国科学院水生生物研究所), 2019: 34-35.
- [29] 仇伟光, 王俊才, 张峥, 等. 辽河流域底栖动物监测图鉴[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014: 1-213.
- [30] 刘月英. 中国经济动物志: 淡水软体动物[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-130.
- [31] 周长发, 归鸿, 周开亚. 中国蜉蝣目稚虫科检索表 (昆虫纲)[J]. *南京师大学报 (自然科学版)*, 2003, 26(2): 65-68.
- [32] 王俊才, 王新华. 中国北方摇蚊幼虫[M]. 北京: 中国言实出版社, 2011: 1-291.
- [33] RICHOUX P, BOURNAUD M, USSEGLIO-POLLATERA P, et al. 淡水无脊椎动物系统分类、生物及生态学[M]. 刘威, 王旭涛, 黄少峰, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 2015: 1-418.
- [34] 熊春晖, 张瑞雷, 徐玉萍, 等. 应用底栖动物完整性指数评价上海市河流健康[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(6): 1067-1078.
- [35] 王振钟, 李艳华, 庞家平, 等. 底栖生物完整性指数在清水河流域健康评价中的应用[J]. *中国水运 (下半月)*, 2013, 13(7): 131-133.
- [36] STEEDMAN R J. Ecosystem health as a management goal[J]. *J N Am Benthol Soc*, 1994, 13(4): 605-610.
- [37] MORLEY S A, KARR J R. Assessing and restoring the health of urban streams in the Puget Sound Basin[J]. *Conserv Biol*, 2002, 16(6): 1498-1509.
- [38] 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]. *Environ Monit Assess*, 2002, 77: 311-333.
- [39] 石磊, 朱浩, 叶少文, 等. 鲌鳊淀鱼类群落特征与生物完整性评价[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(8): 2646-2656.
- [40] ASTIN L A E. Data synthesis and bioindicator development for nontidal streams in the interstate Potomac River basin, USA[J]. *Ecol Indic*, 2006, 6(4): 664-685.
- [41] AAZAMI J, MORADPOUR H, ZAMANI A, et al. Ecological quality assessment of Kor River in Fars Province using macroinvertebrates indices[J]. *Int J Environ Sci Technol*, 2019, 16: 6935-6944.
- [42] 陆秋霖, 朱铁, 李富强, 等. 基于 B-IBI 指数的秦皇岛市水体健康评价[J]. *河北环境工程学院学报*, 2024, 34(2): 80-86.
- [43] WALSH C J, ROY A H, FEMINELLA J W, et al. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure[J]. *Freshw Sci*, 2005, 24(3): 706-723.
- [44] WANG B X, LIU D X, LIU S R, et al. Impacts of urbanization on stream habitats and macroinvertebrate communities in the tributaries of Qiantang River, China[J]. *Hydrobiologia*, 2012, 680: 39-51.
- [45] 刘帅磊, 王赛, 崔永德, 等. 亚热带城市河流底栖动物完整性评价: 以流溪河为例[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 342-357.
- [46] 夏治俊. 赤水河流域鱼类多样性格局及集合群落研究[D]. 武汉: 中国科学院大学 (水生生物研究所), 2021: 43-44.
- [47] 周启维, 李倩, 秦春荣, 等. 仁怀市景观格局与景观生态风险特征评价[J]. *山地农业生物学报*, 2023, 42(6): 32-40.