

基于底栖动物完整性评价的赤水河生物基准分析

李鑫雨¹, 闫 龙¹, 胡 鹏¹, 商崇菊², 胡龔航³, 苏文杭⁴, 徐 志⁵

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 贵州省水利科学研究院防灾与节水研究所, 贵州 贵阳 550002; 3. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;
4. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082; 5. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:对赤水河干流 26 个采样点进行生态环境评价, 确定了上游 7 个参照点、中下游 4 个参照点; 通过参数值分布范围、判别能力和冗余度分析, 对 22 个候选参数进行筛选, 采用比值法计算各参数得分得到所有采样点底栖动物完整性指数, 并根据底栖动物完整性指数分别拟定赤水河不同时期(枯水期、丰水期和平水期)、不同河段(上游、中下游)的生物基准值。结果表明:枯水期核心参数包括总分类单元数、EPT 分类单元数、捕食者个体相对丰度和 Pielou 均匀度指数, 丰水期核心参数包括总分类单元数、EPT 分类单元数、Hilsenhoff 生物指数和 Marglef 丰富度指数, 平水期核心参数包括总分类单元数、EPT 分类单元数、EPT 个体百分比、Hilsenhoff 生物指数和捕食者个体相对丰度;赤水河枯水期上游和中下游生物基准值分别为 6.86 和 5.04, 丰水期分别为 6.45 和 4.43, 平水期分别为 6.65 和 6.25。

关键词:底栖动物;生物完整性;生物基准;赤水河

中图分类号:TV214 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2025)02-0242-11

Analysis of biological benchmarks for the Chishui River based on benthic integrity assessment//LI Xinyu¹, YAN Long¹, HU Peng¹, SHANG Chongju², HU Yanhang³, SU Wenhang⁴, XU Zhi⁵(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Institute of Disaster Prevention and Water Conservation, Guizhou Institute of Water Conservancy Science, Guiyang 550002, China; 3. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China; 5. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China)

Abstract: Environmental assessment was conducted at 26 sampling points along the main stream of the Chishui River, and 7 reference points were determined in the upper reaches and 4 in the middle and lower reaches. Through analysis of the distribution range of parameter values, discriminant ability analysis and redundancy analysis, 22 candidate indicators were screened. The ratio method was employed to calculate the scores of each parameter and the benthic macroinvertebrate integrity index (B-IBI) of all sampling points. Based on the B-IBI, the biological benchmark values of the Chishui River in different periods (dry season, wet season, and normal season) and different reaches (upper reaches, middle and lower reaches) were respectively formulated. The results showed that the core parameters in the dry season included the total number of taxonomic units, the number of EPT (Ephemeroptera, Plecoptera, and Trichoptera) taxonomic units, the relative abundance of predator individuals and the Pielou evenness index. The core parameters in the wet season included the total number of taxonomic units, the number of EPT taxonomic units, the Hilsenhoff biotic index, and the Margalef richness index. The core parameters in the normal water season included the total number of taxonomic units, the number of EPT taxonomic units, the percentage of EPT individuals, the Hilsenhoff biotic index, and the relative abundance of predator individuals. The biological benchmark values of the upper reaches and the middle and lower reaches of the Chishui River in the dry season were 6.86 and 5.04 respectively, those in the wet season were 6.45 and 4.43 respectively, and those in the normal season were 6.65 and 6.25 respectively.

Key words: benthic; biological integrity; biological benchmarks; the Chishui River

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202003,2022YFC3205000);国家自然科学基金项目(52122902,U2240202,52394233);中国长江电力股份有限公司项目(Z542402001)

作者简介:李鑫雨(1996—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:3248201718@qq.com

通信作者:闫龙(1987—),男,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:yanlong@iwhr.com

近年来,长江水环境质量明显提高,但是水生态系统失衡、水生生物多样性减少等已成为长江经济带高质量发展的突出问题^[1]。河流健康评价作为评估河流健康状态、科学分析河湖问题、强化落实河湖长制的重要手段,逐渐受到河湖管理者和相关学者的重视并被不断完善^[2-3],从最初单一的水质评价,发展到河流的生态流量保障考核^[4-5],再到现在的水质、水量、水生态综合考核评价^[6]。水利部和生态环境部先后出台了 SL/T 793—2020《河湖健康评估技术导则》和 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)》,规范了评价指标体系构建、评价指标筛选、健康等级划分等流程,但针对评价指标生物基准值的定量分析方面仍存在较大不足。

生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI)最早由 Karr^[7]于 1981 年提出,以鱼类为研究对象,建立了鱼类生物完整性指数(fish index of biotic integrity, F-IBI)。Kerans 等^[8]于 1994 年提出了底栖动物完整性指数(benthic index of biotic integrity, B-IBI),用以评价美国田纳西河流域的河流生态健康。随后,在美国环保署的倡导和推广下,IBI 扩展到对藻类、浮游植物、浮游动物、水生植物等^[9-11]类群的研究。与以往河流健康评价方法相比,IBI 综合了多类型生物指标评价河流生态环境状况,兼顾生物自身的生理特征和功能属性,如群落结构、食性、敏感度、耐污性及多样性等,突破了单一生物指标的局限性,具有全面性、敏感性和准确性等优点,成为当前河流生态环境质量评价的有效工具^[12-13]。

底栖动物作为河流生态系统的重要组成部分,其群落结构和功能特性能够反映河流水文、物理、化学以及生物等因子的多重胁迫影响,是河流水生态健康评价的主要指示物种^[14-15]。赤水河是长江流域未建坝的重要一级支流,仍保持着河流的自然流动,水体受污染程度较低,生态系统近乎天然状态^[16-17],开展生物基准值的研究既有利于准确评价赤水河河流健康状况,也可为其他受人类活动影响强烈的河流提供参照值。流域上下游天然本底条件的不同使得流域上游至下游物种数大都呈现递减的趋势^[18],因此选取同一个生物基准值对下游评价偏不利。基于此,本文以底栖动物生物完整性为评价指标,开展赤水河全流域水生生物监测,识别参照点和受损点,筛选并推荐计算底栖动物生物完整性的指标,针对上下游的不同情况,分别拟定可供参考的生物基准值。

1 研究区概况

赤水河流域位于云贵川三省交界,地跨 13 个县

(市)级行政区,流域面积 2 万 km²,其中云南、贵州、四川境内流域面积分别为 0.2 万、1.2 万、0.6 万 km²。流域地处中亚热带季风气候区,年平均气温 12.7~18.1℃,多年平均降水量为 1 020.6 mm。赤水河干流全长 436.5 km,总落差 1 475 m,平均比降 0.338‰,发源于云南省镇雄县赤水源镇银厂村,由西向东流至仁怀市茅台镇转向西北流向,在合江县城东汇入长江。

赤水河赤水源镇—茅台镇为上游河段,长度为 224.7 km,平均比降为 0.567‰,属云贵高原地貌,岩溶、洼地、落水洞、暗河发育,河段谷深坡陡,滩多水急;茅台镇—赤水市为中游河段,长度为 157.8 km,平均比降为 0.116‰,河谷深切,属云贵高原与四川盆地接壤的过渡地带,沿河有台地分布,农耕较为发达,险滩较多;赤水市—合江县为下游河段,长度为 54 km,平均比降为 0.033‰,属四川盆地边缘,河谷开阔,水流平缓,两岸多为丘陵台地及河谷坝子,沿河集镇与良田较多。

2 材料与方法

2.1 采样点布设及现场环境调查

于 2023 年 3 月(枯水期)、7 月(丰水期)和 11 月(平水期)对赤水河干流底栖动物进行调查。赤水河流域采样点位分布见图 1,其中上游 13 个点(CS1~CS13),中游 8 个点(CS14~CS21),下游 5 个点(CS22~CS26)。由于丰水期点位 CS14 单日流量涨幅过大,采样点未能采集到底栖动物。

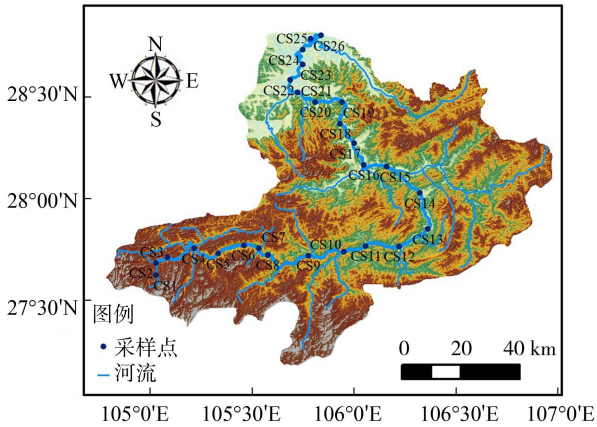


图 1 赤水河流域采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in the Chishui River Basin

2.2 样品采集与测定

在现场采用多参数水质分析仪测定水温(T)、pH 值、溶解氧(DO)、电导率(EC)和叶绿素(Chl-a),并用采水器采集 500 mL 的水放入塑料瓶冷藏,带回实验室测定氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总氮(TN)和总磷(TP)。

使用采样面积为 0.25 m²、孔径为 40 目的索伯网采集底栖动物,每个采样点根据不同生境条件重复采集 4 次,于白瓷盘内进行挑选,放入 100 mL 样品瓶内,并加入浓度为 37% 的甲醛溶液进行保存。将样品带回实验室,在显微镜和解剖镜下鉴定样品种类后计数,并通过万分之一电子天平称重,最后将单位换算成丰度和生物量。

2.3 数据处理

2.3.1 群落结构

a. 优势度。基于各采样点底栖动物丰度数据计算各物种的优势度 Y :

$$Y = f_i N / n_i \tag{1}$$

式中: f_i 为第 i 种物种在所有监测河段出现的频率; n_i 为第 i 种物种的丰度; N 为总丰度。

b. 非度量多维尺度排序 (non-metric multi-dimensional scaling, NMDS)。基于各采样点底栖动物丰度数据,通过 Bray-Curtis 相异度的 NMDS 分析赤水河不同季节、不同河段底栖动物群落结构特征。NMDS 是距离值秩次(数据排名)信息的评估,图形上样本信息仅反映样本间数据秩次信息的远近,而不反映真实的数值差异,横纵坐标轴并无权重意义。

NMDS 分析结果的可靠程度用压力值来衡量,通常认为压力值为 0~0.05 时,排序结果很可靠;压力值为 >0.05 ~ 0.1 时,排序结果较为可靠;压力值为 >0.1~0.2 时,排序结果具有一定的解释意义;压力值大于 0.2 时,排序结果不可靠,需要考虑是否增加排序轴的数量^[19]。该分析通过编程软件 R4.3.3 版本、R 编程语言的集成开发环境 R Studio 及相关工具包完成。

2.3.2 生态环境评价

为全面评价河流生态环境状况,根据张远等^[20]建立的生态环境评价体系选取底质、生态环境复杂度、流速 v 和水深 D 结合特性、河岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度和河岸土地利用类型等 10 个关键指标,对赤水河 26 个采样点进行生态环境评分,每个指标 10 分,将总得分在 75 分以上的采样点定义为参照点^[21],参照点受到的人为干扰较少、具备较好的生态环境状况。

2.3.3 构建 B-IBI 候选参数清单

结合赤水河流域状况,从群落丰富度、群落结构组成、耐污能力、营养结构和物种多样性等 5 个方面

表 1 候选参数及其对外界压力的响应关系

Table 1 Relationship between candidate indicators and their response to external pressure

类别	候选参数编号	候选参数	计算方法	对外界压力响应
群落丰富度	M1	总分类单元数	底栖动物的所有分类总数	下降
	M2	EPT 分类单元数	蜉蝣目、毛翅目和襁翅目分类单元数	下降
	M3	蜉蝣目分类单元数	底栖动物类群中蜉蝣目的种类数	下降
	M4	襁翅目分类单元数	底栖动物类群中襁翅目的种类数	下降
	M5	毛翅目分类单元数	底栖动物类群中毛翅目的种类数	下降
群落结构组成	M6	EPT 个体数百分比	三目个体数与采样点底栖动物群落总个体数的比值	下降
	M7	蜉蝣目个体数百分比	蜉蝣目个体数与采样点底栖动物群落总个体数的比值	下降
	M8	摇蚊类个体数百分比	摇蚊科个体数与采样点底栖动物群落总个体数的比值	上升
耐污能力	M9	敏感类群分类单元数	分类单元(种)耐污值小于或等于 4 的为敏感类群	下降
	M10	耐污类群个体数百分比	分类单元(种)耐污值大于或等于 6 的为敏感类群	上升
	M11	Hilsenhoff 生物指数	采样点底栖动物所有分类单元耐污值与对应数量乘积之和与该采样点所有底栖生物总数的比值	上升
	M12	优势类群个体数百分比	优势类群的个体数与总个体数的比值	上升
	M13	BMWP 指数	底栖动物所有科的敏感值之和	下降
	M14	FBI 指数	采样点底栖动物所有分类单元科的耐污值与对应数量乘积之和与该采样点所有底栖生物总数的比值	上升
营养结构	M15	捕食者个体相对丰度	捕食者个体数与采样点底栖动物群落总个体数的比值	下降
	M16	滤食者个体相对丰度	滤食者个体数与采样点底栖动物群落总个体数的比值	上升
	M17	收集者个体相对丰度	收集者个体数与采样点底栖动物群落总个体数的比值	上升
	M18	刮食者个体相对丰度	刮食者个体数与采样点底栖动物群落总个体数的比值	下降
	M19	撕食者个体相对丰度	撕食者个体数与采样点底栖动物群落总个体数的比值	下降
物种多样性	M20	香农-维纳多样性指数	$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$	下降
	M21	Pielou 均匀度指数	$J' = H' / \ln S$	下降
	M22	Marglef 丰富度指数	$D_m = (S-1) / \ln N$	下降

注: p_i 为第 i 个物种个体数与采样点底栖动物群落总个体数的比值; S 为该采样点所有底栖生物物种数; N 为该采样点底栖动物总个体数。EPT 指蜉蝣目(Ephemeroptera)、襁翅目(Plecoptera)、毛翅目(Trichoptera);BMWP(biological monitoring working party scove)指数为生物监测工作组记分;FBI(family biotic index)指数为科级生物指数。

选取 22 个参数(表 1)作为赤水河流域底栖动物完整性指数的候选参数,以尽可能全面反应底栖动物对环境变化的响应关系。

2.3.4 筛选核心参数

通过参数值分布范围、判别能力和冗余度的分析,对候选参数进行筛选。

a. 参数值分布范围。选择候选生物参数,进一步分析采样点参数分布范围,剔除以下两类参数:①分布范围较小、对环境压力的响应区间较小、敏感度不足的参数;②在参照点中,参数自身变化较高。

b. 判别能力。采用箱线图法,比较参照点位和受损点位的四分位距(25%~75%分位数箱体)及中位数重叠情况,并根据重叠情况赋予不同的分值,用 I_Q 表示: $I_Q=3$ 表示参照点和受损点四分位距没有重叠; $I_Q=2$ 代表参照点和受损点四分位距部分重叠,但各自中位数都在对方四分位距之外; $I_Q=1$ 表示仅有 1 个中位数在对方四分位距之外; $I_Q=0$ 表示各自的中位数都在对方四分位距内。当 $I_Q \geq 2$ 时,认为参数具有环境压力判别能力。

c. 冗余度。对符合要求的参数进行正态检验,若这些参数都符合正态分布,则采用皮尔逊相关性分析法;若这些参数不都呈正态分布,则采用 Spearman 相关性分析法,保留相关系数 $|r| < 0.75$ 的参数。

2.3.5 构建底栖动物生物完整性指数

筛选核心参数后,需将参数量纲统一,通常采用三分法^[22]、四分法^[23]和比值法^[24]。王备新^[25]比较了这 3 种方法,发现三者之间高度线性相关,且比值法优于三分法和四分法。因此采用比值法统一核心参数的量纲。与环境压力负相关的核心参数(反向参数)和与环境压力正相关的核心参数(正向参数)统一量纲后的值分别为

$$I_s = \begin{cases} a(I_0 - I_T)/(I_E - I_T) & \text{反向参数} \\ a(I_T - I_0)/(I_T - I_E) & \text{正向参数} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_s 为核心参数统一量纲后的值; I_0 为核心参数的实测值; I_T 为核心参数的临界值,反向参数取所有点位的 5%分位数,正向参数取所有点位的 95%分位数; I_E 为核心参数的期望值,反向参数取所有点位的 95%分位数,正向参数取所有点位的 5%分位数; a 为转换系数,本文取 $a=10$ 。若 $I_s > 10$,按 10 计,若 $I_s < 0$,按 0 计。

3 结果与分析

3.1 底栖动物群落结构

3.1.1 物种组成

本次调查共采集鉴定出 153 种底栖动物,隶属

于 5 门 8 纲 21 目 79 科,以节肢动物门昆虫纲为主,共 120 种,占总物种数的 78.4%,其中蜉蝣目(26 种)、双翅目(25 种)、蜻蜓目(23 种)和毛翅目(22 种)为该流域绝对优势类群,占总物种数的 62.3%。枯水期共采集底栖动物 62 种,其中上、中、下游分别采集 52、29、19 种;各采样点丰度为 38~918 个/m²,平均值为 166.9 个/m²,上、中、下游各采样点平均丰度分别为 224、126、86 个/m²。丰水期共采集底栖动物 46 种,其中上、中、下游分别采集 41、23、20 种;各采样点丰度为 7~117 个/m²,平均值为 57.75 个/m²,上、中、下游各采样点平均丰度分别为 59、61、37 个/m²。平水期共采集底栖动物 115 种,其中上、中、下游分别采集 98、89、48 种;各采样点丰度为 18~557 个/m²,平均值为 184.31 个/m²,上、中、下游各采样点平均丰度分别为 176、254、100 个/m²。从空间来看,底栖动物总物种数与丰度分布趋势基本一致,均为从上游到下游呈逐渐递减的趋势,且中游没有采集到线形动物门,下游没有采集到线形动物门和扁形动物门。从时间上来看,平水期底栖动物丰度最大、物种最为丰富,枯水期次之,丰水期最少;平水期底栖动物物种数远高于枯水期和丰水期,枯水期底栖动物丰度与平水期接近,远高于丰水期;线形动物门和扁形动物门仅在枯水期被采集到。赤水河底栖动物物种和丰度分布见图 2。

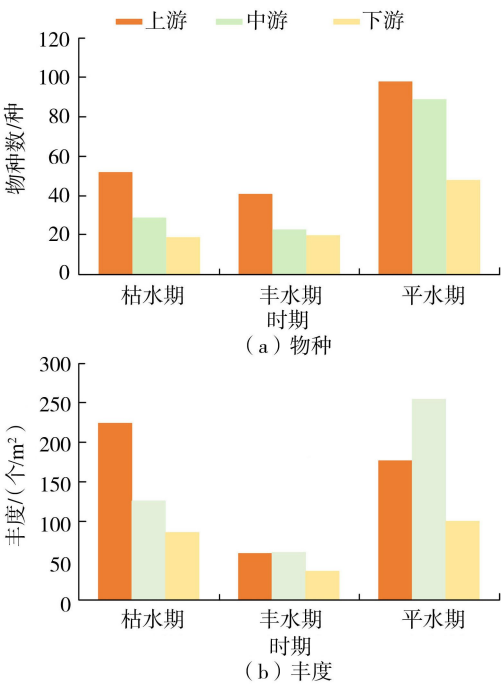


图 2 赤水河底栖动物物种和丰度分布
Fig. 2 Distribution of benthic species and density in the Chishui River

3.1.2 优势物种

将 $Y \geq 0.02$ 的物种定义为流域的优势物种,

$Y \geq 0.1$ 的物种定义为流域的绝对优势物种,见表 2。赤水河流域枯水期、丰水期和平水期优势物种均以 EPT 类蜉蝣目为主,纹石蛾属 1 为 3 个时期的共同优势物种,这些底栖动物类群对水体污染程度较为敏感^[17],表明赤水河水体清洁。相较于枯水期和平水期,丰水期的优势物种中 EPT 类占比较少,且绝对优势物种为较耐污的米虾属,表明赤水河流域丰水期水体受到一定程度的污染。

表 2 赤水河底栖优势物种

Table 2 Benthic dominant species in the Chishui River					
枯水期		丰水期		平水期	
物种	优势度	物种	优势度	物种	优势度
扁蜉属	0.17	米虾属	0.18	纹石蛾属 1	0.12
四节蜉属	0.14	纹石蛾属 1	0.10	四节蜉属	0.05
小蜉属	0.03	似动蜉属	0.04	二翅蜉属	0.05
细裳蜉科	0.03	方格短沟蜉	0.03	似动蜉属	0.05
纹石蛾属 1	0.02	蜉蝣属	0.03	扁蜉属	0.04
		二翅蜉属	0.03	纹石蛾属 2	0.03
				河蚬	0.03
				细蜉属	0.02

3.1.3 时空差异

对赤水河底栖动物丰度数据进行 NMDS 分析,排序结果见图 3。根据结果,压力值均小于 0.2,表明该排序符合要求。由图 3(a)~(c)可见,中游与下游底栖动物群落结构较为相似,河流本底条件均以淤泥及大块基石为主,且下游河段较短;由图 3(d)可以见,赤水河底栖动物群落结构季节性差异明显。因此,本文将中游和下游合并,分不同季节、不同河段分析赤水河流域底栖动物现状并拟定

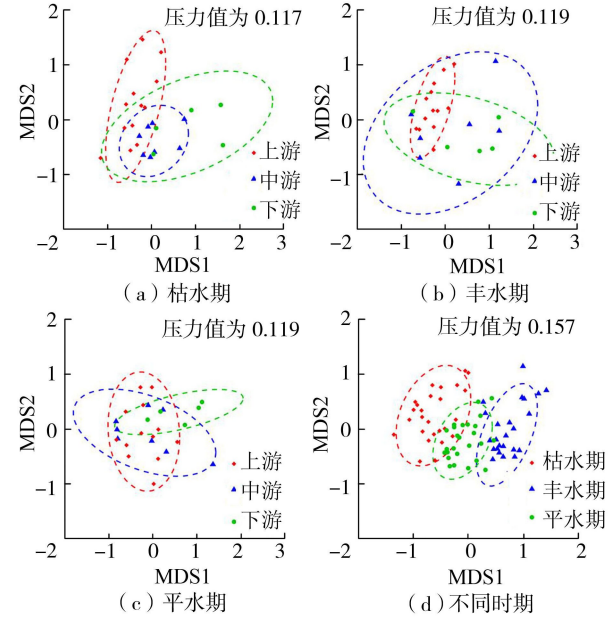


图 3 赤水河底栖动物群落 NMDS 图

Fig. 3 NMDS map of benthic communities in the Chishui River

生物基准值。

3.2 生态环境评价

通过生态环境评价,将河流生态环境综合指数 (river habitat integrity index, RHI) 在 75 分以上的采样点定义为参照点,其余点位定义为受损点。上游共筛选出 7 个参照点,中下游共筛选出 4 个参照点。由图 4 可以看出,从上游到下游 RHI 呈递减趋势,且与底栖动物物种数的趋势相似。

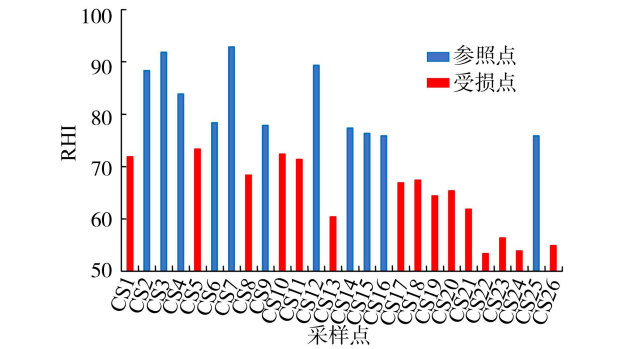


图 4 赤水河各采样点 RHI 值

Fig. 4 RHI for each sampling site on the Chishui River

3.3 B-IBI 核心参数体系

由于枯水期参数 M4、M5、M19,丰水期参数 M4、M5、M19 及平水期参数 M4、M17 有超过半数的采样点数值相同或趋势不明显,表明该参数对环境变化的响应不敏感,因此剔除。

根据生物判别能力分析,枯水期参数 M1、M2、M3、M9、M13、M15、M20、M21、M22,丰水期参数 M1、M2、M3、M9、M11、M13、M22 以及平水期参数 M1、M2、M3、M5、M6、M9、M10、M11、M13、M14、M15 的参数箱线图 $I_0 \geq 2$ (见图 5~7),予以保留,其余参数均被剔除。

分别对枯水期保留的 9 个参数、丰水期 7 个参数及平水期 11 个参数进行正态检验,结果表明枯、丰、平水期参数不都呈正态分布,因此均采用 Spearman 相关性分析法,结果见图 8,保留 $|r| < 0.75$ 的参数。

枯水期参数 M1、M2、M3、M9 和 M13 两两之间高度相关,而 M1 携带更多信息,且能反映底栖动物群落结构稳定性,故保留 M1;M15 与其他参数没有较强的相关性,故保留 M15;M20、M21 和 M22 相互之间具有较强的相关性,且均反映底栖动物群落的物种多样性,而 M21 与其他参数都没有较强的相关性,故保留 M21;又考虑到 M2 对水体污染程度较为敏感,常被用于水质生物评价,故保留。因此,枯水期选取 4 个参数 M1、M2、M15 和 M21 用于构建 B-IBI。

丰水期参数 M1、M2 与 M9 相互之间具有较强的相关性,且与 M2 相关性较弱的 M11 和 M22 分别

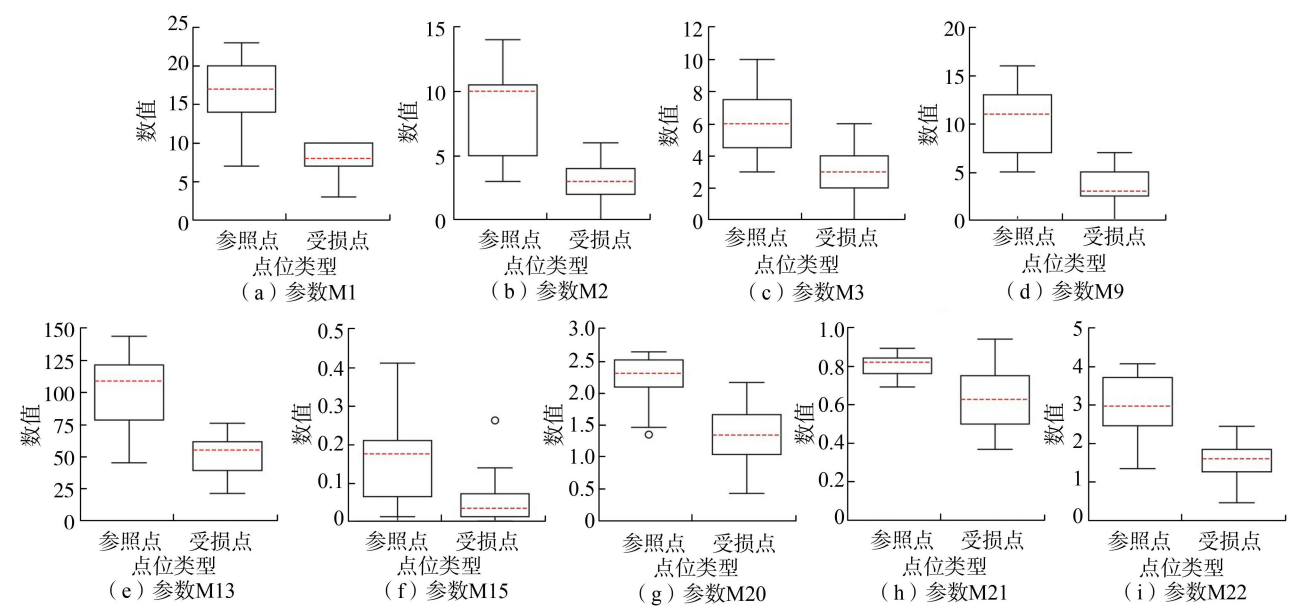


图 5 枯水期参数箱线图
Fig. 5 Parameter boxplot in dry season

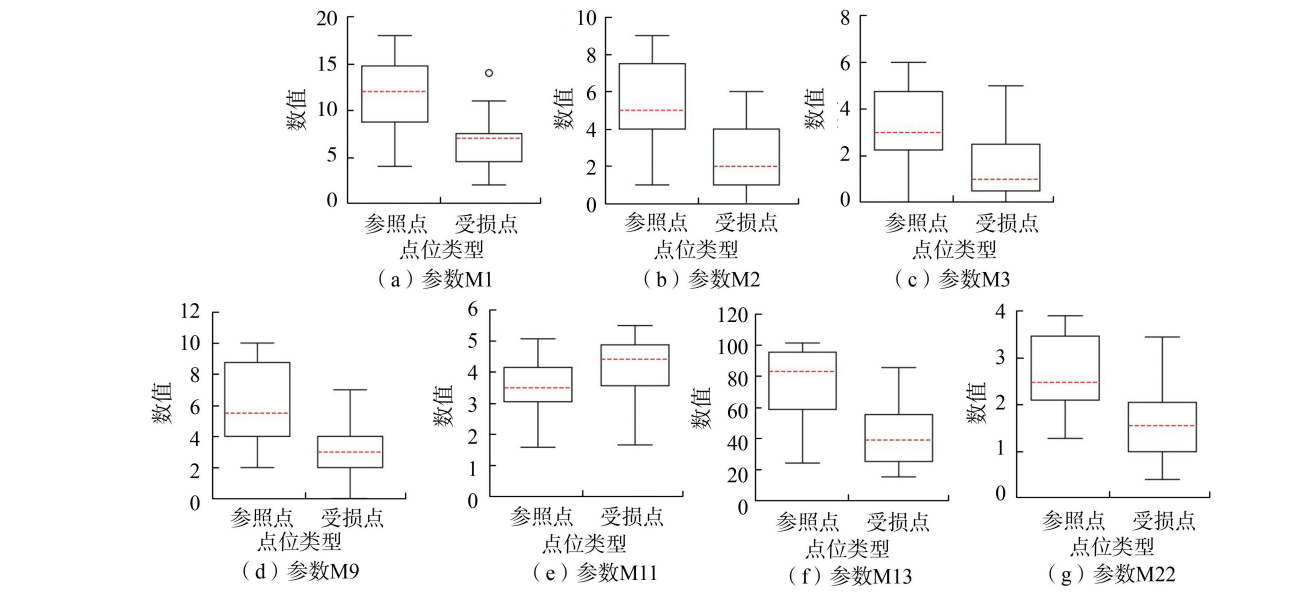


图 6 丰水期参数箱线图
Fig. 6 Parameter boxplot in wet season

反应底栖动物群落耐污能力和物种多样性,因此保留 M2;而 M3 和 M13 与 M2 都有较强的相关性,故都剔除;M11 与其他参数均没有强相关,故保留;又考虑到 M1 常被用于水生生态健康评价,故一起保留。因此,丰水期选取 4 个参数 M1、M2、M11 和 M22 用于构建 B-IBI。

平水期参数 M2 与 M3、M5、M9、M13 有较强的相关性,仅保留 M2;M6 与 M14 具有较强的相关性,且 M6 与其他参数都没有较强的相关性,故保留 M6;M10 与 M11 相关性较强,且均反映底栖动物群落耐污能力,保留任意一个即可,保留 M11;M15 与其他参数相关性较弱,故保留,同时保留 M1。因此,平水期选取 5 个参数 M1、M2、M6、M11 和 M15 用于

构建 B-IBI。

采用比值法,统一核心参数量纲(表 3)后的核

表 3 B-IBI 核心参数体系各参数的 5%分位数和 95%分位数

Table 3 5% quartile and 95% quartile for each parameter of B-IBI core parameter system								
参数	枯水期		丰水期		平水期		参数	5%分位数
	5%分位数	95%分位数	参数	5%分位数	95%分位数	参数		95%分位数
M1	5.00	21.00	M1	2.4	15.00	M1	16.25	44.00
M2	1.00	11.00	M2	0	8.00	M2	7.00	23.00
M15	0	0.34	M11	1.74	5.29	M6	0.23	0.88
M21	0.38	0.89	M22	0.50	3.64	M11	2.42	5.07
						M15	0.01	0.25

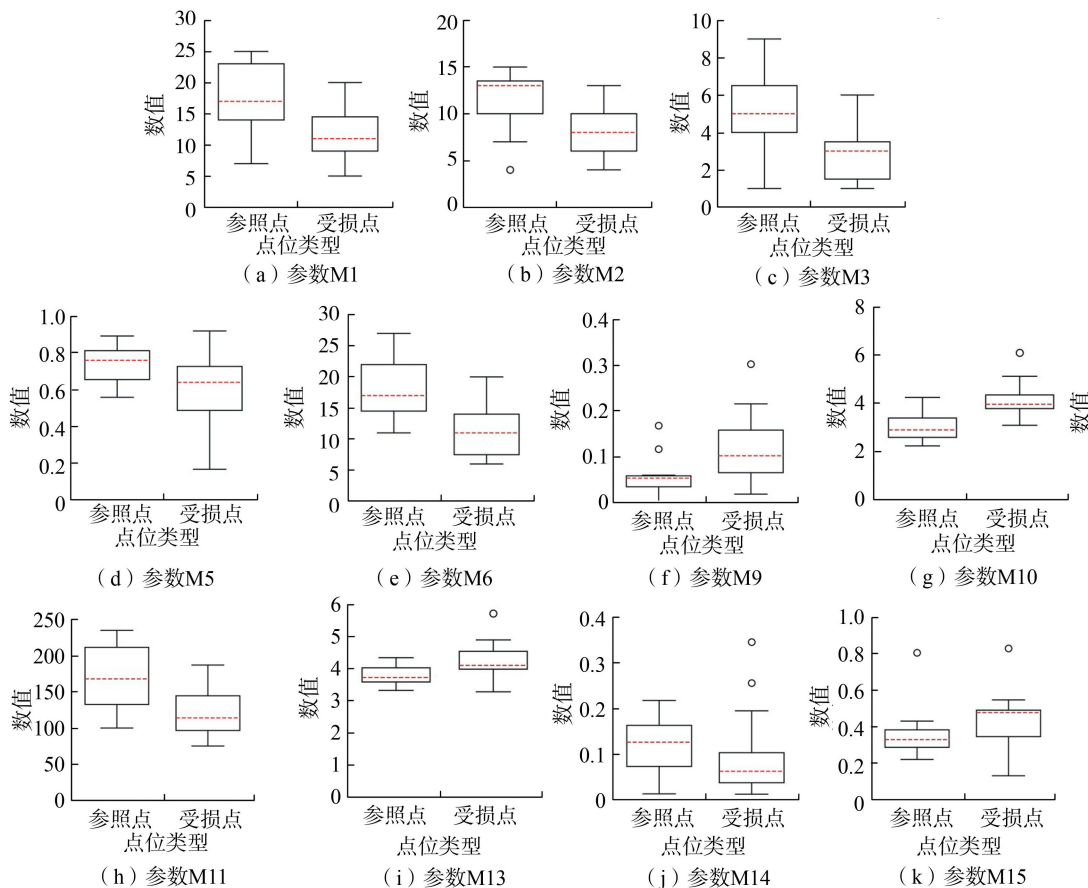


图 7 平水期参数箱线图
Fig. 7 Parameter boxplot in normal season

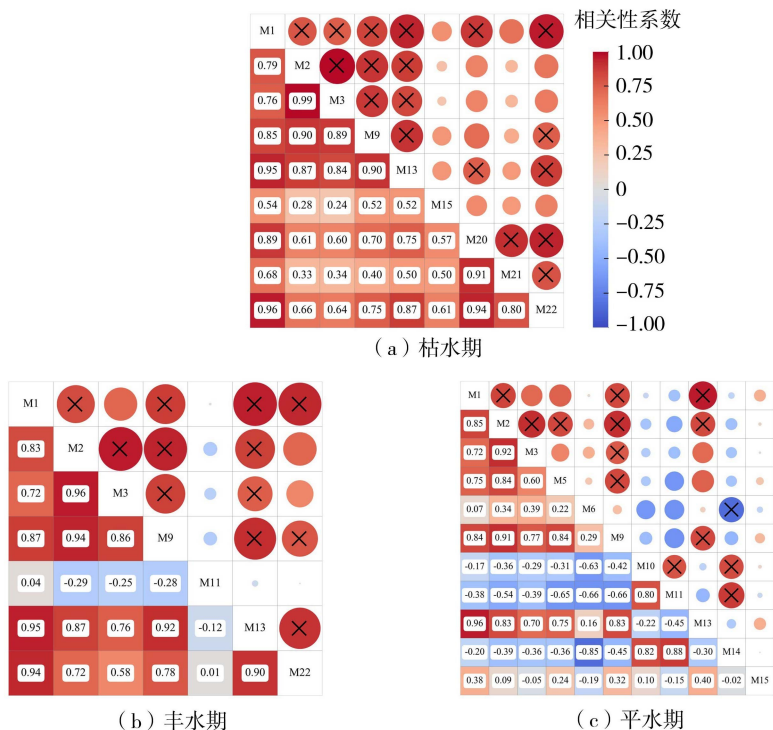


图 8 参数相关性分析
Fig. 8 Correlation analysis of parameters

心参数分值之和与核心参数数量的比值即为 B-IBI 值。枯、丰和平水期各采样点 B-IBI 值见图 9。

3.4 B-IBI 基准的拟定

由图 9 可见,赤水河流域枯水期各采样点 B-IBI

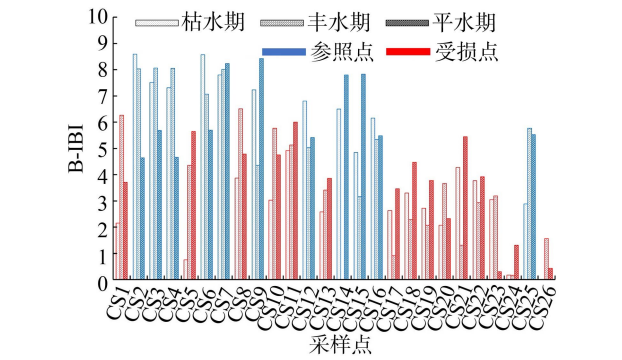


图9 赤水河各采样点 B-IBI 分布

Fig.9 Distribution of B-IBI at each sampling point of the Chishui River

值为 0.004~8.590。丰水期为 0.16~8.06，平水期为 0.31~8.43。B-IBI 值最大的采样点枯水期为 CS2,丰水期为 CS3,平水期为 CS9,均为上游参照点,所在河段流经村庄,人口较少,受到人类活动的干扰较小,底质类型均为卵石底质,且水生植物较多,河流生态环境状况较为复杂。B-IBI 值最小的采样点枯水期在 CS26,丰水期在 CS24,平水期在 CS23,均为中下游受损点。

生物基准的建立需要充分考虑人类社会经济与自然环境的平衡发展。依据生态环境部于 2023 年发布的《水生态监测技术指南 河流水生生物监测与评价(试行)》、T/CSES 13—2020《水生态学基准制定技术指南》及相关资料^[26-27],采用所有采样点 B-IBI 值的 95%分位数法拟定基准,以 95%分位数为最佳值,对低于该值的分布范围 5 等分,将靠近 95%分位数的等分值拟定为基准。由于上游与中下游本底条件差距较大,因此上游与中下游分别拟定生物基准值,见表 4。

表4 赤水河 B-IBI 生物基准值

Table 4 B-IBI biological benchmarks for the Chishui River

时期	生物基准值		核心参数
	上游	中下游	
枯水期	6.86	5.04	M1、M2、M15 和 M21
丰水期	6.45	4.43	M1、M2、M11 和 M22
平水期	6.65	6.25	M1、M2、M6、M11 和 M15

3.5 水生态健康评价

将生物基准值以上的点位认定为优秀,小于生物基准值的点进行四等分,分别为良好、中等、较差、很差。根据确定的健康评价标准,赤水河干流水生态健康评价结果见表 5。赤水河采集的 77 个样本中,20 个为优秀,占 25.97%;16 个为良好,占 20.78%;25 个为中等,占 32.47%;8 个为较差,占 10.39%;8 个为很差,占 10.39%。从整体上看,赤水河上游水生态健康状况优于中下游,评价等级为

优秀的点位为 14 个,占 35.9%,中等及以上的占 89.74%;下游水生态健康评价点位数量最多的等级为一般,有 14 个,占 36.84%,评价等级为中等以上的点位占 68.42%。平水期评价等级为中等以上的点位有 22 个,占 84.62%,平水期河流整体水生态健康状况优于枯水期和丰水期。

表5 赤水河流域水生态健康评价结果

Table 5 Evaluation results of water ecological health in the Chishui River Basin

上游				中下游			
采样点	枯水期	丰水期	平水期	采样点	枯水期	丰水期	平水期
CS1	较差	良好	中等	CS14	优秀		优秀
CS2	优秀	优秀	中等	CS15	良好	中等	优秀
CS3	优秀	优秀	良好	CS16	优秀	优秀	良好
CS4	优秀	优秀	中等	CS17	中等	很差	中等
CS5	很差	中等	良好	CS18	中等	中等	中等
CS6	优秀	优秀	良好	CS19	中等	较差	中等
CS7	优秀	优秀	优秀	CS20	较差	良好	较差
CS8	中等	优秀	中等	CS21	良好	较差	良好
CS9	优秀	中等	优秀	CS22	中等	中等	中等
CS10	较差	良好	中等	CS23	中等	中等	很差
CS11	中等	良好	良好	CS24	很差	很差	很差
CS12	良好	良好	良好	CS25	中等	优秀	良好
CS13	较差	中等	中等	CS26	很差	较差	很差

4 讨论

4.1 B-IBI 拟定底栖生物基准的合理性

以往对水生态基准的研究有很大的局限性。一方面,倾向于根据病理学指标拟定水质基准,如重金属等污染物浓度和毒性水平。李会仙等^[28]、杨晓玲等^[29]分别以锰和铜为研究对象,利用水体硬度、pH 值和溶解有机碳进行物种敏感度分布分析,分别获得了锰和铜的水质基准。刘萌硕等^[30]采用毒性百分数排序法和物种敏感度分布法推导诺氟沙星的短期和长期水质基准值。这些基准主要关注污染物浓度和毒性水平,虽然能够反映水体污染状况,但忽略了水生生物群落在生态系统健康中所起的关键作用,无法全面反映水生态系统的复杂性和河流整体的健康状态^[31]。Karr 等^[32]指出,水质指标无法反映河流生态系统的整体健康状况,仅依赖水质指标的评估方法可能导致对生态系统健康的片面认识,因此需要引入更全面的生物指标。另一方面,以往的基准拟定较少关注不同时期和上下游本底条件的差异。蔡文倩等^[26]将不同时期的多次采样结果合并,再通过 B-IBI 拟定了渤海湾天津段的生物基准,忽视了水生态系统在不同季节和不同环境条件下的动态变化。同时,上下游区域的水流速度、水温、营养物质浓度等生态本底条件可能存在显著差异,而这些差异对水生生物的分布和多样性有着重要影

响,忽视这些差异可能导致对整个流域的健康状况描述不准确^[33]。基于此,本文采用了更全面的样本数据,涵盖了不同的空间维度和季节性变化,拟定了更具针对性的指标体系和生物基准。

4.2 监测断面的推荐

底栖动物的群落结构与河流水动力条件、底质条件及河道断面形态密切相关。本文丰水期优势物种方格短沟蜷和似动蜉属在低流速(0~0.3 m/s)的条件下丰度最大;蜉蛄属、二翅蜉属和米虾属均在低水深(0~0.2 m)、低流速(0~0.3 m/s)的条件下丰度最大;纹石蛾属 1 在中流速(0.3~0.6 m/s)的条件下丰度最大。平水期二翅蜉属和细蜉属在低流速(0~0.3 m/s)的条件下丰度最大;纹石蛾属 1 和纹石蛾属 2 均在低水深(0~0.2 m)的条件下丰度最大;四节蜉属、扁蜉属、似动蜉属均在低水深(0~0.2 m)、低流速(0~0.3 m/s)的条件下丰度最大;河蚬在低水深(0~0.2 m)、高流速(0.6~1.3 m/s)的条件下丰度最大。不同时期同一物种的适宜水深、流速几乎没有变化,且不同物种对水动力条件的响应关系不同,这与过往研究结论一致。例如 Beauger 等^[34]认为流速影响了水体中 DO 含量,进一步影响了底栖动物的分布;Zhou 等^[35]研究了兰木错曲流量与水深、流速的对应关系,并认为不同底栖动物类群对流量的适宜度不同。

由图 9 可以看出部分采样点不同时期的 B-IBI 值差距较大,如 CS9、CS17 等,或采样点不同时期 B-IBI 值相近,但不同采样点之间 B-IBI 值有较大差异,如 CS7 与 CS19 等。分析其原因,除不同时期水动力条件发生变化外,也可能与底质条件与河道断面类型的改变有关。CS9 虽然不同时期均为边滩型断面,但丰水期底质以沙砾为主,枯水期与平水期为卵石底质(图 10(a))。CS17 丰水期底质以大块岩石及淤泥为主,且水深陡增;枯水期与平水期为卵石底质,且河道为边滩型断面(图 10(b))。CS7 在不同时期的底质均为卵石底质,且边滩坡度变幅小(图 10(c))。CS19 为深潭型河道,无边滩,为岩石及淤泥底质(图 10(d))。陈含墨等^[36]分析了河流底质与河道形态对底栖动物群落的影响,表明底质为卵石、河道断面类型为浅滩时,底栖动物物种数最高,与分析结果一致。基于此,本文推荐一种常规监测断面样式,其断面形态及底质状况见图 10(c)。样品采集时尽可能寻找水动力条件更为复杂的形态。该断面类型不同时期的采样结果相对稳定,底栖动物物种相对丰富。

5 结 论

a. 共采集鉴定出 153 种底栖动物,隶属于 5 门

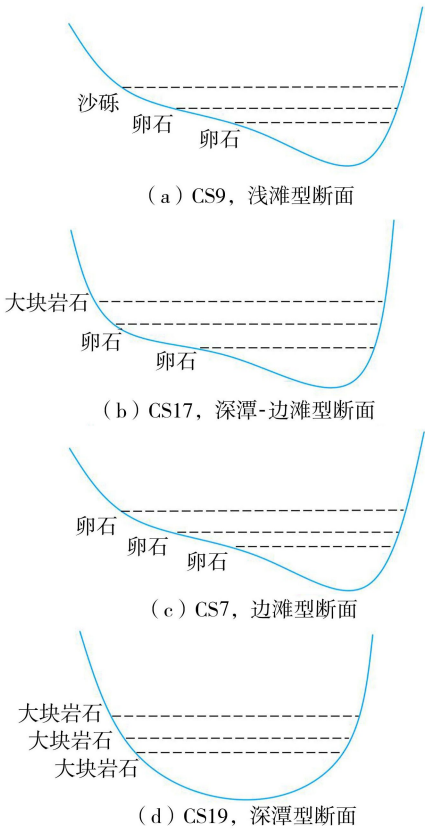


图 10 赤水河 4 种断面类型

Fig. 10 Four cross-section types of the Chishui River

8 纲 21 目 79 科,其中,枯水期共采集 62 种,丰水期 46 种,平水期 115 种。从空间来看,底栖动物总物种数与丰度分布趋势基本一致,均为从上游到下游呈逐渐递减的趋势。从时间上看,平水期底栖动物丰度最大、物种最为丰富,枯水期次之,丰水期最少。

b. 通过对候选参数进行参数值分布范围、判别能力和冗余度分析,确定了赤水河 B-IBI 核心参数:枯水期选取总分类单元数、EPT 分类单元数、捕食者个体相对丰度和 Pielou 均匀度指数 4 个参数用于构建 B-IBI;丰水期选取总分类单元数、EPT 分类单元数、Hilsenhoff 生物指数和 Marglef 丰富度指数 4 个参数用于构建 B-IBI;平水期选取总分类单元数、EPT 分类单元数、EPT 个体数百分比、Hilsenhoff 生物指数和捕食者个体相对丰度 5 个参数用于构建 B-IBI。

c. 制定了赤水河流域底栖动物完整性评价的生物基准值。赤水河枯水期上、中下游生物基准值分别为 6.86、5.04;丰水期上、中下游分别为 6.45、4.43;平水期上、中下游分别为 6.65、6.25。

参考文献:

[1] YU Fandong, LIU Fei, XIA Zhijun, et al. Classification and assessment methods for mountain channel habitats in the Chishui River Basin, China[J]. Water, 2022, 14(4):

- [2] 张祖鹏,张泽贤,刘思远,等. 太湖流域河流健康评价指标体系研究及应用[J]. 人民长江,2023,54(11):8-15. (ZHANG Zupeng, ZHANG Zexian, LIU Siyuan, et al. Study and application of river health evaluation index system in Taihu Lake Basin[J]. Yangtze River,2023,54(11):8-15. (in Chinese))
- [3] 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 Juliang, LI Man, ZHOU Rongxing, et al. Application of subtraction set pair potential method in river ecological health evaluation and diagno[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 198-204. (in Chinese))
- [4] 黄冬菁,李一平,崔广柏,等. 基于水文-水力-生境分析的河道基本生态流量计算方法[J]. 水资源保护,2024,40(1):142-148. (HUANG Dongjing, LI Yiping, CUI Guangbo, et al. Calculation method of basic instream ecological flow based on hydrological-hydraulic-habitat analysis [J]. Water Resources Protection,2024,40(1):142-148. (in Chinese))
- [5] 李铠峰,赵超,李文戔,等. 气候变化及人类活动影响下永安溪河流水文健康响应[J]. 河海大学学报(自然科学版):2025,53(1):25-30. (LI Kaifeng,ZHAO Chao, LI Wenyu, et al. The hydrological health respond of climate change and human activities impact of the Yong' an River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(1):25-30. (in Chinese))
- [6] 王亚宁,徐明,许静波,等. 里下河腹部地区典型湖泊浮游动物演替特征及水质评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):49-57. (WANG Yaning, XU Ming, XU Jingbo, et al. Zooplankton succession characteristics and water quality evaluation of typical lakes in the hinterland of Lixia River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences) ,2022,50(5):49-57. (in Chinese))
- [7] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. Fisheries,1981,6(6):21-27.
- [8] 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.
- [9] ZHU Han, ZHANG Yuzhou, PENG Yongchao, et al. Assessing the ecological health of the Qingyi River Basin using multi-community indices of biotic integrity [J]. Ecological Indicators,2023,156:111160.
- [10] CUI Zhen, FAN Wenting, CHEN Cheng, et al. Ecosystem health evaluation of urban rivers based on multitrophic aquatic organisms [J]. Journal of Environmental Management,2024,349:119476.
- [11] 王雪,黄锦平,苏玉萍,等. 基于浮游植物生物完整性指数的福建省水库健康状态评价[J]. 水利水电科技进
- 展,2024,44(2):54-60. (WANG Xue, HUANG Jinping, SU Yuping, et al. Health status assessment of reservoirs in Fujian Province based on phytoplankton biotic integrity index[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(2):54-60. (in Chinese))
- [12] 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 Yanchu, WANG Fei, WU Dan, 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. (in Chinese))
- [13] 易雨君,丁航,叶敬吁. 基于生态完整性的水生态健康评价发展及应用研究综述[J/OL]. 水资源保护. [2024-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20240520.1712.015.html>. (YI Yujun, DING Hang, YE Jingxu, et al. A review of the development and application of water ecological health assessment based on ecological integrity[J/OL]. Water Resources Protection. [2024-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20240520.1712.015.html>. (in Chinese))
- [14] 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 Yuhang, QU Xiaodong, WANG Shaoming, 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. (in Chinese))
- [15] 张丰博,胡鹏,闫龙,等. 南水北调西线工程上线水源区大型底栖动物群落结构及环境驱动因子[J]. 水资源保护,2024,40(1):135-141. (ZHANG Fengbo, HU Peng, YAN Long, et al. Structure of benthic macroinvertebrate assemblages and environmental driving factors in water source area of upper line of South-to-North Water Diversion Project (west route) [J]. Water Resources Protection,2024,40(1):135-141. (in Chinese))
- [16] 闵文武,黄福江,王伟. 赤水河流域水环境现状及水质评价[J]. 江西农业学报,2021,33(8):87-91. (MIN Wenwu, HUANG Fujiang, WANG Wei. Situation of water environment and evaluation of water quality in Chishui River Basin [J]. Acta Agriculturae Jiangxi,2021,33(8):87-91. (in Chinese))
- [17] 贾婉琳,吴赛男,陈昂. 基于 InVEST 模型的赤水河流域生态系统服务功能评估研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2020,18(4):313-320. (JA Wanlin, WU Sainan, CHEN Ang. Research on evaluation of ecosystem services in Chishui River Basin based on InVEST[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18 (4): 313-320. (in Chinese))
- [18] JIANG Xiaoming, XIONG Jing, QIU Jianwen, et al.

- Structure of macroinvertebrate communities in relation to environmental variables in a subtropical Asian river system [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2010, 95(1): 42-57.
- [19] KRUSKAL J B. Nonmetric multidimensional scaling: a numerical method [J]. *Psychometrika*, 1964, 29(2): 115-129.
- [20] 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. (ZHANG Yuan, XU Chengbin, MA Xiping, et al. Biotic integrity index and criteria of benthic organisms in Liao River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007(6): 919-927. (in Chinese))
- [21] 郑丙辉,张远,李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J]. *环境科学学报*, 2007(6): 928-936. (ZHENG Binghui, ZHANG Yuan, LI Yingbo. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007(6): 928-936. (in Chinese))
- [22] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER B D, et al. Rapid bioassessment protocols for use in wadeable streams and rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish [R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 1999.
- [23] BLOCKSON K A, KURTENBACH J P, KLEMM D J. 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.
- [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(6): 1481-1490. (WANG Beixin, YANG Lianfang, HU Benjin, 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(6): 1481-1490. (in Chinese))
- [25] 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.
- [26] 蔡文倩,朱延忠,林岍璇,等. 底栖生物完整性指数的构建及生物基准的确定[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(9): 2791-2799. (CAI Wenqian, ZHU Yanzhong, LIN Kuixuan, et al. Development on the benthic index of biological integrity and determination for the biocriteria [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(9): 2791-2799. (in Chinese))
- [27] GILBSON G R, BOWMAN M L, GERRITSEN J, et al. Estuarine and coastal marine waters: bioassessment and biocriteria technical guidance [R]. Washington D. C.: Office of Water, United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [28] 李会仙,张瑞卿,郭广慧,等. 中国淡水环境锰的水质基准及其生态风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2023, 18(5): 195-206. (LI Huixian, ZHANG Ruiqin, GUO Guanghui, et al. Water quality criteria and ecological risk assessment of manganese in fresh water environment in China [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2023, 18(5): 195-206. (in Chinese))
- [29] 杨晓玲,王梦晓,李晓娟,等. 机器学习-多元线性回归预测铜的水生态基准[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(7): 3976-3985. (YANG Xiaoling, WANG Mengxiao, LI Xiaojuan, et al. Predicting the water ecological criteria of copper using machine learning and multiple linear regression approaches[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(7): 3976-3985. (in Chinese))
- [30] 刘萌硕,刘欣然,董素涵,等. 我国诺氟沙星的水生生物基准及典型水体中的生态风险[J]. *生态毒理学报*, 2023, 18(2): 462-472. (LIU Mengshuo, LIU Xinran, DONG Suhan, et al. Aquatic biological benchmarks and ecological risk assessment of norfloxacin in China [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2023, 18(2): 462-472. (in Chinese))
- [31] ARMAN N Z, SALMIATI S, MOHD I M, et al. Development of macroinvertebrate-based multimetric index and establishment of biocriteria for river health assessment in Malaysia [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 449-458.
- [32] KARR J R, CHU E W. Restoring life in running waters: better biological monitoring [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1999, 14(6): 247-248.
- [33] FRIBERG N, BONADA N, BRADLEY D C, et al. Biomonitoring of human impacts in freshwater ecosystems: the good, the bad and the ugly [J]. *Advances in Ecological Research*, 2011, 44: 1-68.
- [34] BEAUGER A, LAIR N, REYES-MARCHANT P, et al. The distribution of macroinvertebrate assemblages in a reach of the River Allier (France), in relation to riverbed characteristics [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 571(1): 63-76.
- [35] ZHOU Xiongdong, XU Mengzhen, LEI Fakai, et al. Responses of macroinvertebrate assemblages to flow in the Qinghai-Tibet Plateau: establishment and application of a multi-metric habitat suitability model [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(5): e2021WR030909.
- [36] 陈含墨,渠晓东,王芳. 河流水力条件对大型底栖动物分布影响研究进展[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(5): 758-765. (CHEN Hanmo, QU Xiaodong, WANG Fang. Research progress of river dynamic influences on the distribution of macroinvertebrates [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(5): 758-765. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-06-11 编辑: 胡新宇)