王 杰,郭一丁,孙福红,等.汉江中下游大型底栖无脊椎动物生物完整性评估 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6275-6284.
Wang J, Guo Y D, Sun F H, et al. Assessment of biological integrity of benthic macroinvertebrates in the middle and lower reaches of the Hanjiang River [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6275-6284.

汉江中下游大型底栖无脊椎动物生物完整性评估

王 杰[1,2],郭一丁[2],孙福红[2*],赵茜宇[2],黄楠楠[2],王子腾[2],曾洋波[2],吴丰昌[2] (1.郑州大学,生态与环境学院,河南 郑州 450001；2.中国环境科学研究院,环境基准标准与风险管控全国重点实验室,北京 100012)

摘要：基于 2023 年汉江中下游枯水期(4 月)和丰水期(8 月)的水生态调查数据,从群落组成、生物多样性、耐污能力、功能性状等多个方面计算了 54 个候选指标.与传统生物完整性指数法不同,本研究未设置参考点,经过统计分析(零值分布)、相关性分析(敏感性分析、冗余性分析)筛选核心指标,极大地简化了筛选流程,并采用大型底栖无脊椎动物生物完整性指数(B-IBI)与参考指标的相关性分析验证 B-IBI.研究结果表明,汉江中下游地区丰水期大型底栖无脊椎动物生物多样性高于枯水期,生物完整性整体状况“一般”.枯水期“一般”的点位占比最高,为 53.8%；丰水期“良好”的点位占比最高,为 53.8%.B-IBI 与环境因子间的回归分析表明 pH 值、总磷(TP)、水温(WT)显著地影响了大型底栖无脊椎动物生物完整性.本研究系统地评估了汉江中下游地区大型底栖无脊椎动物生物完整性状况并分析关键环境因子,研究结果可为汉江流域水生态保护与修复提供数据基础.

关键词：汉江；大型底栖无脊椎动物；生物完整性；相关性分析；回归分析
中图分类号：X824 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6275-10

Assessment of biological integrity of benthic macroinvertebrates in the middle and lower reaches of the Hanjiang River.

WANG Jie[1,2], GUO Yi-ding[2], SUN Fu-hong[2*], ZHAO Qian-yu[2], HUANG Nan-nan[2], WANG Zi-teng[2], ZENG Yang-bo[2], WU Feng-chang[2] (1.School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China；2.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：6275~6284

Abstract：The Hanjiang River, the largest tributary of the Yangtze River, is crucial for sustaining socio-economic production and human livelihoods in its basin due to its sound aquatic ecological conditions. This study analyzed aquatic ecological survey data from the middle-lower reaches of the Hanjiang River during the dry season (April) and wet season (August) of 2023. Fifty-four candidate metrics were calculated across multiple dimensions, including community composition, biodiversity, pollution tolerance, and functional traits. Unlike traditional biotic integrity index methods, this study did not establish reference sites. Core metrics were screened through statistical analyses (zero-value distribution) and correlation analyses (sensitivity and redundancy analyses), significantly simplifying the screening process. The Index of Biotic Integrity of Benthic Macroinvertebrate (B-IBI) was validated via correlation analysis with reference metrics. Results indicated higher macroinvertebrate biodiversity during the wet season compared to the dry season, with an overall "fair" biotic integrity status. In the dry season, 53.8% of sampling sites were classified as "fair", while 53.8% achieved "good" status during the wet season. Regression analysis identified pH, total phosphorus (TP), and water temperature (WT) as significant factors influencing B-IBI. This systematic assessment provides foundational data for ecological conservation and restoration in the Hanjiang River Basin.

Key words：Hanjiang River；benthic macroinvertebrates；biological integrity；correlation analysis；regression analysis

生物完整性指数(IBI)是一种整合群落结构、生物多样性、功能性状等多类别反映水生态健康状况的综合指数,相较于水质评价和单一生物指标更加可靠[1].传统生物完整性指数法的步骤通常包括参考点的确定、候选指标的筛选和指标计算及评价等级制定[2-3].参考点指水生态系统没有或极少受到人类活动干扰而处于自然状态的情况.目前主要通过生境质量评价或水质评价来确定参考点[4-5],或者结合水质生物评价进一步确定[6-8].最近有研究通过因子分析和候选指标对压力梯度的线性响应实现水生态健康状况的评价[9-10].

收稿日期：2025-03-24
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFC3201001)
* 责任作者, 研究员, sunfhiae@126.com

随着经济和人口的快速增长,汉江中下游地区面临着水质污染、生物多样性下降、水华频发等诸多生态问题.汉江的早期水生态研究集中于水质水文水利条件的变化[11-12].近年来,随着水生生物在水生态健康状况中的重要程度加深,有学者对汉江中下游地区的水生生物群落结构和生物完整性开展研究.其中,部分学者对汉江水生生物的群落分布和结构进行研究并初步开展水质生物评价[13-14].此外,有学者通过收集生物指标并加以筛选出少量核心指标实现汉江水生生物的完整评价[15-17].然而由于汉江中下游地区受人类活动干扰较强导致上述生物完整性评价研究中设置的参考点太少,这会影响评价结果的准确性.

本研究选择大型底栖无脊椎动物作为研究对象,不设置参考点,以统计分析和相关性分析实现指标的快速筛选,并构建一种涵盖群落结构、生物多样性、耐污能力和功能性状的生物完整性指数.为了弥补没有参考点的不足,采用评价结果与参考指标间的相关性分析来验证结果.旨在开发一种客观高效的水生生物完整性评价方法.

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

汉江是长江最大的支流,全长1577km,流域面积约 $15.9\times10^4km^2$.汉江流域以丹江口和钟祥为界分为上、中、下游三个地区,其中中下游河段长约652km,流域面积约 $6.38\times10^4km^2$.汉江中下游地区属于亚热带季风气候区,多年平均降水量为 700~1200mm,主要集中在5~10月[15].本研究在汉江中下游地区设置14个采样点位(图1),在2023年4月(枯水期)和8月(丰水期)进行水生态调查.

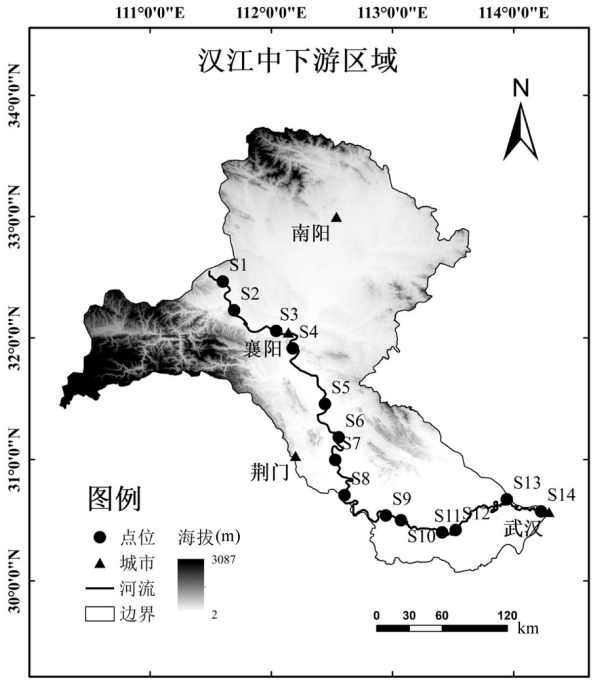


图1 采样点位分布

Fig.1 Distribution of sampling points

1.2 数据获取与分析

在河流浅滩或水深小于1m的浅岸带使用索伯网(面积 $0.09m^2$)采集底栖动物[13],采集时扰动网口前底质,采集4个样方,共 $0.36m^2$.在现场使用40目筛网、白瓷盘、镊子进行挑拣,并使用含有75%乙醇溶液的聚乙烯小瓶保存底栖动物.在实验室内通过显微镜和专业书籍将底栖动物鉴定到尽可能低的分类单元[8],物种名录见表1.

pH值、水温(WT)和溶解氧(DO)等使用便携式水质参数仪(HORIBA, U-S2)现场测定.根据《水和废水监测分析方法》(第四版)[18]中的水质检测方法,在实验室测定高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总磷(TP)、总氮(TN)和氨氮(NH_3-N).

表1 大型底栖无脊椎动物名录

Table 1 List of benthic macroinvertebrates

门	纲	目	科	属	中文名	拉丁名
环节动物门	寡毛纲	颤蚓目	颤蚓科	*Tubificidae*	尾鳃蚓属	*Branchiura* sp.
	蛭纲	吻蛭目	舌蛭科	*Glossiphoniidae*	舌蛭属	*Glossiphonia* sp.
		咽蛭目	沙蛭科	*Salifidae*	苇氏巴蛭	*Barbronia weberi*
			石蛭科	*Erpodellidae*	石蛭属	*Erpobdella* sp.
节肢动物门	昆虫纲	半翅目	划蝽科	*Corixidae*	横纹划蝽	*Sigara substriata*
					小划蝽属	*Micronecta* sp.
		蜉蝣目	扁蜉科	*Heptageniidae*	雅丝扁蜘蜉	*Ecdyonurus yoshidae*
			四节蜉科	*Baetidae*	四节蜉属	*Baetis* sp.

续表 1

门	纲	目	科	属	中文名	拉丁名
		毛翅目	纹石蛾科	*Hydropsychidae*	纹石蛾属	*Hydopsyche* sp.
		蜻蜓目	大伪蜻科	*Macromiidae*	丽大伪蜻属	*Epophthalmia* sp.
			扇螈科	*Platycnemididae*	狭扇螈属	*Copera* sp.
		双翅目	摇蚊科	*Chironomidae*	德永雕翅摇蚊	*Glyptotendipes tokunagai*
					雕翅摇蚊属	*Glyptotendipes* sp.
					多足摇蚊属	*Polypedilum* sp.
					凤城肛齿摇蚊	*Neozavrelia fengchengensis*
					寡角摇蚊属	*Diamesa* sp.
					流长跗摇蚊属	*Rheotanytarsus* sp.
					毛尾罗摇蚊	*Robackia pilicauda*
					拟枝角摇蚊属	*Paracladopelma* sp.
					特突摇蚊属	*Thienemannimyia* sp.
					梯形多足摇蚊	*Polypedilum scalaenum*
					小摇蚊属	*Microchironomus* sp.
					隐摇蚊属	*Cryptochironomus* sp.
	甲壳纲	端足目	钩虾科	*Gammaridae*	钩虾	*Gammaridea*
					原钩虾属	*Anisogammarus* sp.
		十足目	匙指虾科	*Atyidae*	米虾属	*Caridina* sp.
					中华齿米虾	*Caridina denticulata sinensis*
			相手蟹科	*Sesarmidae*	相手蟹科	*Sesarmidae* spp.
			长臂虾科	*Palaemonidae*	日本沼虾	*Macrobrachium nipponense*
					秀丽白虾	*Exopalaemon modestus*
					中华小长臂虾	*Palaemonetes sinensis*
		鱼虱目	鱼虱科	*Caligidae*	鱼虱属	*caligus* sp.
软体动物门	瓣鳃纲	蚌目	蚌科	*Unionidae*	蚶形无齿蚌	*Anodonta arcaeformis*
					具角无齿蚌	*Anodonta angula*
					圆顶珠蚌	*Unio douglasiae*
		帘蛤目	蚬科	*Corbiculidae*	河蚬	*Corbicula fluminea*
		贻贝目	贻贝科	*Mytilidae*	湖沼股蛤	*Limnopema lacustris*
		基眼目	扁卷螺科	*Planorbidae*	圆扁螺属	*Hippeuyis* sp.
			椎实螺科	*Lymnaeidae*	卵萝卜螺	*Radix ovata*
					萝卜螺属	*Radix* sp.
		中腹足目	豆螺科	*Bithyniidae*	豆螺属	*Bithynia* sp.
			短沟蜷科	*Semisulcospiridae*	短沟蜷属	*Semisulcospira* sp.
					方格短沟蜷	*Semisulcospira cancellata*
					格氏短沟蜷	*Semisulcospira gredleri*
			田螺科	*Viviparidae*	方形环棱螺	*Bellamya quadrata*
					环棱螺属	*Bellamya* sp.
					梨形环棱螺	*Bellamya purificata*
					铜锈环棱螺	*Bellamya aeruginosa*

采用欧洲航天局(ESA)基于哨兵 2 号(Sentinel-2)影像的 10m 精度土地利用栅格数据,利用 ArcGIS 10.2 中的掩膜工具提取每个点位周围 10km 半径缓冲区的土地利用格局,并统计农田、建筑、水域、森林和草地面积占比[10].

采样点位分布图在 ArcGIS 10.2 中绘制; 相关表格在 Excel 2019 中制作;候选指标的统计分析、相关性分析和回归分析通过 Origin 2025 完成,并完成相关插图绘制;方差膨胀因子分析 VIF 在 R4.4.1 中进行.

2　生物完整性评价体系构建

2.1　确定候选指标

本研究从群落组成、生物多样性、耐污能力和功能性状等多个方面确定了 54 个候选指标[19-20](表 2),具体为分类丰富度(BM1-BM13)、分类组成(BM14-BM24)、分类多样性(BM25-BM28)、功能多样性(BM29-BM33)、污染耐受性(BM34-BM43)、其他类别(BM44-BM54).

表 2 B-IBI 候选指标集及零值分布分析

Table 2 B-IBI candidate index set and distribution range test

编号	候选指标	枯水期 Q1	丰水期 Q1	编号	候选指标	枯水期 Q1	丰水期 Q1
BM1	底栖动物物种数	2.00	4.00	BM28	Margalef 丰富度指数	0.15	0.34
BM2	节肢动物门物种数	0.00	2.00	BM29	功能丰富度 Fric	0.35	0.52
BM3	软体动物门物种数	1.00	2.00	BM30	功能均匀度 Feve	0.24	0.42
BM4	环节动物门物种数	0.00	0.00	BM31	功能分散度 Fdiv	0.67	0.56
BM5	EPT 物种数	0.00	0.00	BM32	功能离散度 Fdis	0.40	1.16
BM6	底栖动物密度	6.00	63.89	BM33	RaoQ	0.74	1.60
BM7	瓣鳃纲密度	0.00	2.78	BM34	敏感种物种数	0.00	0.00
BM8	腹足纲密度	0.00	5.56	BM35	耐污种物种数	1.00	2.00
BM9	昆虫纲密度	0.00	0.00	BM36	%敏感种密度	0.00	0.00
BM10	甲壳纲密度	0.00	5.56	BM37	%耐污种密度	0.04	0.49
BM11	蛭纲密度	0.00	0.00	BM38	耐污种/敏感种物种数	1.00	1.77
BM12	寡毛纲密度	0.00	0.00	BM39	BMWP 指数	12.00	26.00
BM13	底栖动物生物量	1.22	11.20	BM40	ASPT 指数	5.33	4.62
BM14	%节肢动物门物种数	0.00	0.33	BM41	BPI 值	0.20	0.09
BM15	%软体动物门物种数	0.50	0.40	BM42	FBI 值	5.00	6.06
BM16	%环节动物门物种数	0.00	0.00	BM43	BI 值	4.71	6.01
BM17	%EPT 物种数	0.00	0.00	BM44	%滤食者密度	0.00	0.08
BM18	%瓣鳃纲密度	0.00	0.08	BM45	%捕食者密度	0.00	0.04
BM19	%腹足纲密度	0.00	0.08	BM46	%刮食者密度	0.00	0.08
BM20	%双翅目密度	0.00	0.00	BM47	%撕食者密度	0.00	0.00
BM21	%EPT 密度	0.00	0.00	BM48	%集食者密度	0.00	0.00
BM22	%甲壳纲密度	0.00	0.01	BM49	%掘穴者密度	0.00	0.00
BM23	%蛭纲密度	0.00	0.00	BM50	%攀爬者密度	0.00	0.02
BM24	%寡毛纲密度	0.00	0.00	BM51	%匍匐者密度	0.00	0.00
BM25	Shannon 多样性指数	0.32	1.11	BM52	%附着者密度	0.06	0.13
BM26	Pielou 均匀度指数	0.27	0.75	BM53	%游泳者密度	0.00	0.00
BM27	Simpson 优势度指数	0.36	0.19	BM54	%滑行者密度	0.00	0.00

注:Q1为第一个四分位数.

2.2 筛选核心指标

由于汉江中下游地区存在较强的人类活动,没有理想的参考点,因此本研究未设置参考点,仅通过统计分析(零值分布)和相关性分析(敏感性分析、冗余性分析)完成指标的快速筛选.具体步骤如下:

2.2.1 零值分布 零值个数较多或具有缺失值表明有效信息缺失,不适合作为核心指标.统计候选指标的零值个数占比,大于 25%,则予以去除.

2.2.2 敏感性分析 核心指标不仅可以反映生物群落的不同层面,也可以反映环境条件的变化.在传统生物完整性指数法中,判别能力分析(箱线图)代表了指标在参考点和受损点间的变化,也反映了指标对参考点和受损点环境条件差异的响应.水生生物群落与环境条件间的关系非常复杂,为了避免高度复杂化带来的不确定性,本研究选择候选指标与环境因子间的线性关系代表候选指标对环境条件的响应,保留与环境因子显著相关(P<0.05)的候选指标进入下一步筛选.

2.2.3 冗余性分析 为了保证核心指标的独立性,本研究以$|r|$>0.60 作为冗余阈值,并依据 3 个原则进行筛选:①保留与较多指标冗余的指标,可以代表更多的指标;②保留独特或包含信息较多的指标,如生物多样性指数、污染指数,可以从更多层面反映水生态健康状况;③保留 3~6 个指标,指标过少无法体现 IBI 的优势,过多会加强指标中和而降低评价结果的准确性.

2.3 结果计算及验证

参考《水生态监测技术指南 河流水生生物监测与评价》(HJ 1295-2023)[21],使用比值法统一核心指标量纲.随干扰增加而增大的指标为正向指标,计算如式(1)所示;随干扰增加而减小的指标为负向指标,计算公式如式(2)所示.

$$\text{Score}_{\text{正向}} = 100 \times (X_{95} - X) \div (X_{95} - X_5) \quad (1)$$

$$\text{Score}_{\text{负向}} = 100 \times (X - X_5) \div (X_{95} - X_5) \quad (2)$$

式中:X_{95} 是指标的 95%分位数;X_5 是指标的 5%分位数.

B-IBI 结果是所有核心指标得分的平均值,在0~100 之间.将[0, 100]等分为 5 个区间并从高到低赋予“健康”、“良好”、“一般”、“较差”、“很差”的等级.

由于没有参考点,需要通过参考指标验证B-IBI结果合理性.参考指标是一些常用来评价水生态健康状况的指数[22-24],例如生物多样性指数、生物污染指数.本研究选择 BM1、BM25、BM26、BM27、BM28、BM37、BM39、BM43 共 8 个指标作为参考指标,前 5 个指标反映了群落结构和多样性,后 3 个指标反映了生物群落的耐污能力.这 8 个指标可以在一定程度上反映水生态健康状况,但与 B-IBI 相比缺乏综合性,因此可以将它们视为参考指标而不是直接用于评价.

3　结果与讨论

3.1　底栖动物群落的分布特征

枯水期发现了 3 门 5 纲 11 目 14 科 16 种底栖动物,S11 物种最多,为 5 科 6 种,均为软体动物; 丰水期发现了 3 门 6 纲 16 目 23 科 35 种底栖动物,S3 物种最多,为 12 科 14 种,包括 6 科 8 种节肢动物、5 科 5 种软体动物和 1 科 1 种环节动物.两季各有 1 个点位没有发现底栖动物,分别是枯水期 S6 和丰水期 S7,枯水期S7 只有湖沼股蛤 *Limnoperna fortunei*,丰水期S6 有两科物种(图 2).枯水期物种数呈现下降-上升-下降的趋势,Shannon 多样性指数为 0~1.58,均值为 0.69;丰水期物种数整体呈现下降-上升的趋势,Shannon 多样性指数为 0.10~1.99,均值为 1.35.

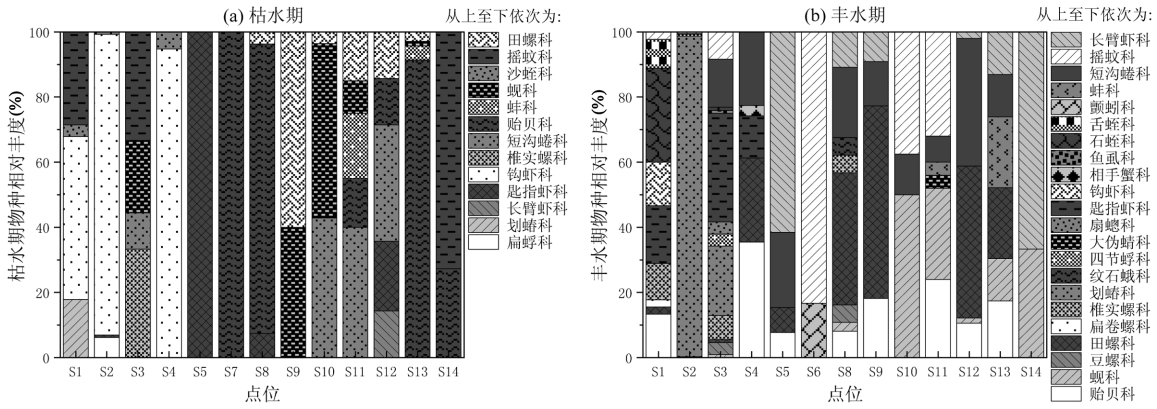


图 2　汉江中下游地区大型底栖无脊椎动物分布情况

Fig.2　Distribution of benthic macroinvertebrates in the middle and lower reaches of the Hanjiang River

表 3　生物多样性指数与环境因子间的相关系数

Table 3　Correlation coefficients between biodiversity indices and environmental factors

环境因子	物种丰富度		Shannon	
	Pearson's *r*	Pearson's *P*	Pearson's *r*	Pearson's *P*
COD_{Mn}	0.454	*P*<0.05	0.434	*P*<0.05
TP	−0.158		−0.311	
TN	−0.393	*P*<0.05	−0.408	*P*<0.05
NH_3-N	0.184		0.005	
pH 值	−0.139		0.056	
WT	0.326		0.414	*P*<0.05
DO	−0.557	*P*<0.01	−0.466	*P*<0.05

从时间上看,丰水期的生物多样性高于枯水期,这与许多流域的研究结果相似[25-26].例如,渭河全流域范围内,丰水期底栖动物的物种数量、生物量和香农多样性指数都显著高于枯水期;巩乃斯河丰水期大型底栖动物的物种丰富度、生物密度、多样性指数大于枯水期.表 3 结果显示,汉江中下游地区大型底栖无脊椎动物生物多样性与 COD_{Mn}、WT 呈正相关,与 TN 和 DO 呈负相关,表明丰水期较高的有机物浓度和水温可能促进了底栖动物生长.TN 浓度均值为 1.45mg/L,可能影响底栖动物生存.枯水期 DO 浓度均大于 10mg/L,生物多样性与 DO 的负相关关系可能是由其他因素引起的.此外,有研究表明,物种丰富度随着物种迁移率的增加而增加[27],丰水期较高的流速可以促进物种扩散即增加物种迁移率可能增加了生物多样性.从空间上看,中游后段和下游前段的生物多样性最低,可能是因为该区域农田占比较高(均值为 0.69,其他区域均值为 0.41),农业面源污染可能较为严重.唐肖阳等[28]的研究表明农田面积

大、畜禽养殖业发达、农村人口多的地市等标污染负荷较大,等标污染高负荷区集中在汉江中游.

3.2 汉江干流 B-IBI 评价结果

3.2.1 核心指标的确定 零值分布分析:54 个候选指标统计分析结果显示(表 4),部分指标的第一个四分位数 Q1 等于 0,即零值占比超过 25%,BM29、BM30、BM31 存在缺失值,这些指标包含有效信息较少,予以去除.

敏感性分析:部分指标与环境因子间具有显著的相关关系(P<0.05,图 3(a)和图 3(b)),予以保留.

表 4 B-IBI 核心指标

Table 4 Core indicators of B-IBI

季节	编号	核心指标	响应趋势	计算公式
枯水期	BM1	底栖动物物种数	下降	100×(X-1)/(5.4-1)
	BM33	RaoQ	下降	100×(X-0)/(7.0-0)
	BM43	BI 值	上升	100×(7.2-X)/(7.2-2.7)
	BM52	%附着者密度	下降	100×(X-0)/0.97-0)
丰水期	BM18	%瓣鳃纲密度	下降	100×(X-0)/(0.54-0)
	BM26	Pielou 均匀度指数	下降	100×(X-0.40)/(0.93-0.40)
	BM42	FBI 值	上升	100×(8.2-X)/(8.2-5.7)
	BM46	%刮食者密度	下降	100×(X-0)/(0.78-0)

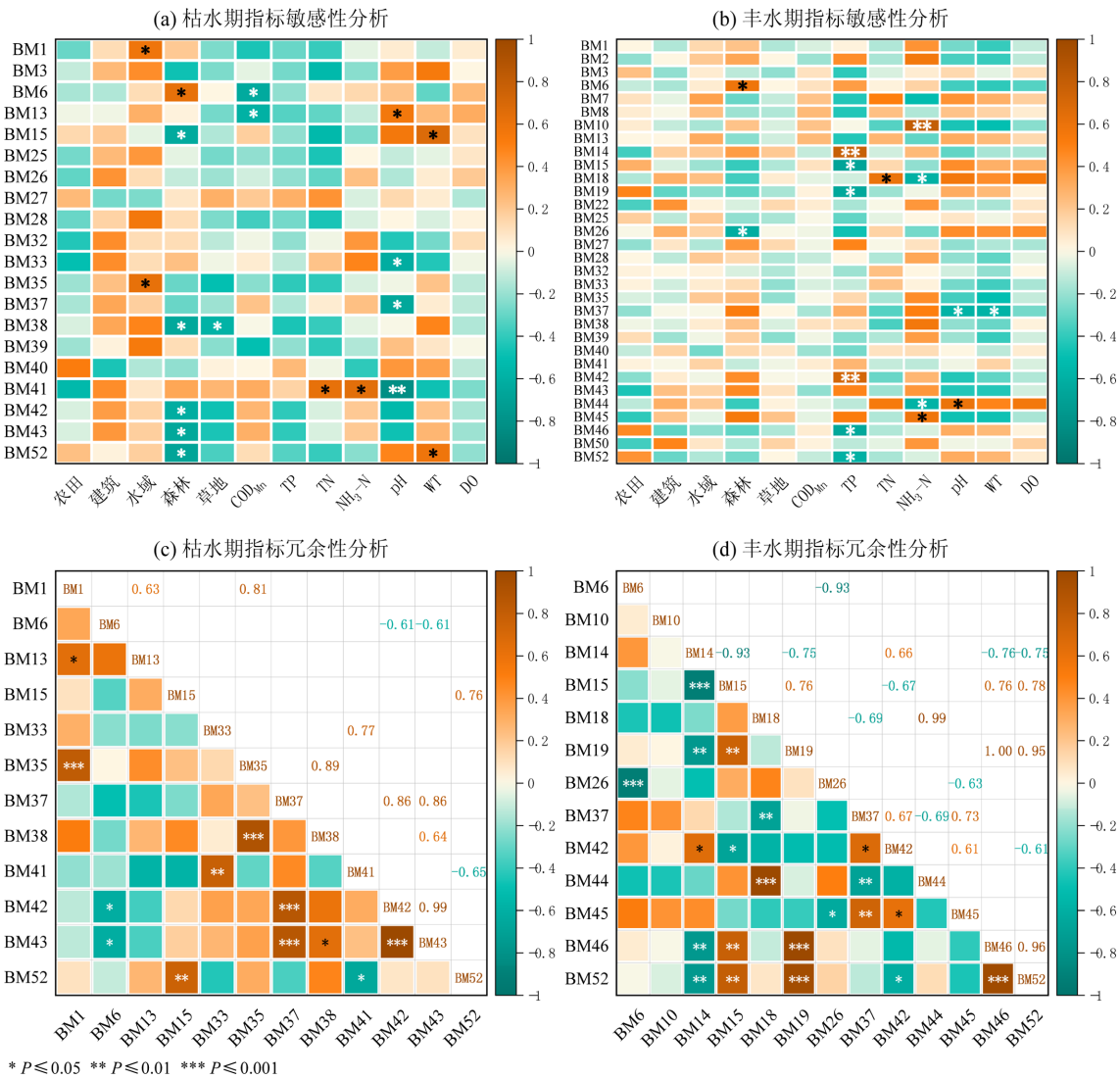


图 3 候选指标的敏感性分析和冗余性分析

Fig.3 Sensitivity and redundancy analyses of candidate indicators

冗余性分析:依据 3 个筛选原则,枯水期的 BM43 和丰水期的 BM42 与较多指标冗余(图 3(c)和图 3(d)),且均可以反映水体受污染状况,故保留.最终枯水期保留 BM1 底栖动物物种数、BM33RaoQ、BM43BI 值、BM52%附着者密度,丰水期保留 BM18%瓣鳃纲密度、BM26Pielou 均匀度指数、BM42FBI 值、BM46%刮食者密度,均能从群落组成、生物多样性、污染耐受性和功能性状反映水生态健康状况(表 4).枯水期 4 个指标的 VIF 值分别是 1.3、1.7、1.3 和 1.5,丰水期 4 个指标的 VIF 值分别是 2.3、1.5、3.5 和 2.2,证明保留指标间相互独立.

3.2.2　B-IBI 评价结果验证与分析　根据式(1)和式(2)统一核心指标量纲,并计算 B-IBI.8 个参考指标与 B-IBI 的关系如图 4(a)所示,其中 B-IBI 与 BM1 底栖动物物种数、BM25 Shannon 多样性指数、BM26 Pielou 均匀度指数、BM28 Margalef 丰富度指数、BM39 BMWP 指数呈正相关,与 BM27 Simpson 优势度指数、BM37%耐污种密度、BM43BI 值呈负相关,符合期望.在水生态健康状况评价中,BM1、BM25、BM26、BM28、BM39 越高,BM43 越低,表明生态越好[29-31].BM27 与 BM26 均代表群落均匀性,但含义相反.BM37 %耐污种密度与 BM43BI 值直观反映群落受污染状况[24].

两季 B-IBI 评价结果如图 4(b)所示,枯水期 B-IBI 为 0~61.04,均值为 42.34,“良好”、“一般”、“较差”、“很差”的点位分别占比 7.7%、53.8%、30.8%、7.7%.丰水期 B-IBI 为 0.08~78.03,均值为 53.40,“良好”、“一般”、“较差”、“很差”的点位分别占比 53.8%、23.1%、15.4%、7.7%.汉江中下游地区大型底栖无脊椎动物生物完整性整体为“一般”,与李柏山[32]和朱惇等[33]的研究一致.

从时间上看,丰水期底栖动物完整性高于枯水期,可能是由于丰水期底栖动物的生物多样性更高,有利于水生态系统稳定.除了 S1、S3、S11、S12,其余点位的 B-IBI 有明显的季节差异.虽然丰水期 S1、S3、S11 具有更高的生物多样性,但耐污种占比更高,表明单一生物指标不能有效判断水生态状况.两季 S12 具有相似的物种组成,包括贻贝科、短沟蜷科、长臂虾科、田螺科,但丰水期底栖动物的密度和生物量更高.枯水期 B-IBI 在 S5 最低,在 S11 最高,是由于 S5 只有 1 种底栖动物,S11 的生物多样性最高,表明其相对于其他点位的生态状况更好.丰水期 B-IBI 在 S2 最低,在 S4 最高,是由于 S2 的划蝽科占有绝对优势(图 2(b)),为耐污物种[32],S4 群落的耐污指数最小,表明其相对于其他点位的生态状况更好.

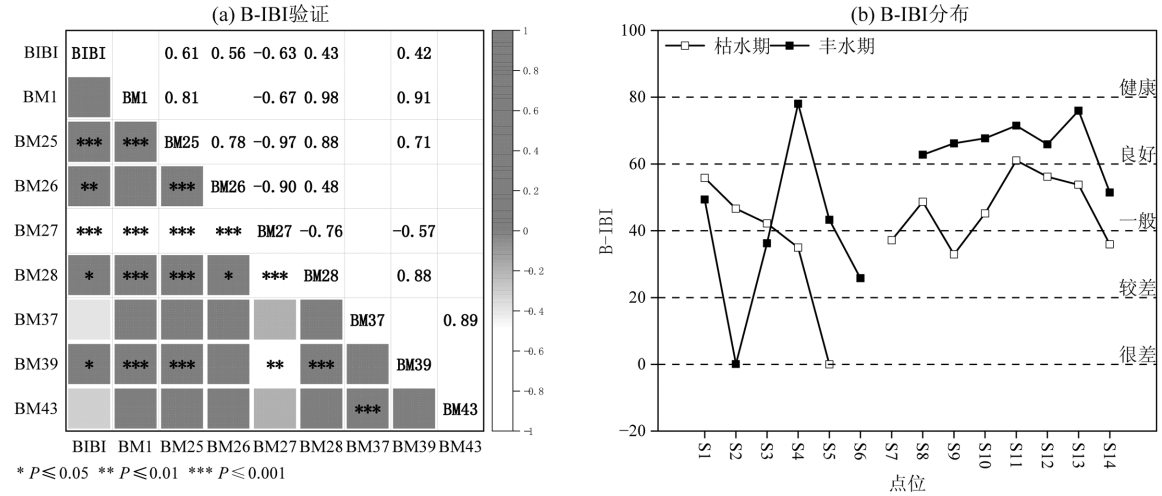


图 4　B-IBI 验证与空间分布

Fig.4　Validation and spatial distribution of B-IBI

从空间上看,虽然两季 B-IBI 有着显著差异,但从 S4 开始有着相似的下降-上升趋势.在 Zhang 等[15]的汉江中下游浮游生物完整性研究中,两季 P-IBI 在中游局部点位有较大差异,在下游地区差异不大,呈现上升趋势,与本研究相似.枯水期 B-IBI 呈现先下降后上升的趋势,与生物多样性的趋势一致; 丰水期整体

呈现上升的趋势,但在 S2 和 S4 处变化很大.在常诗麒等[17]的汉江中下游底栖动物完整性研究中,枯水期 B-IBI 在中游显著高于下游,而丰水期没有显著差异,并在中游存在明显波动,与本研究有着较大差异.

3.3 B-IBI 与环境因子的关系

识别影响生物完整性的关键环境因子对流域修复与管理至关重要[8].本研究通过 B-IBI 与环境因子的线性与非线性回归分析可以更加准确地识别关键环境因子.在线性回归分析中,B-IBI 与 TP(P=0.040)、pH(P=0.009)、WT(P=0.043)显著相关(表 3).B-IBI 随 TP 的增加而下降,随 pH 和 WT 的增加而增加(图 5a).在非线性回归中,B-IBI 与 TP(P=0.028)、pH(P=0.036)显著相关(表 5).与水质指标相比,5 个土地利用指标和 B-IBI 的相关关系均较差,可能有以下原因.在黄河流域,B-IBI 与农田及城镇用地呈显著负相关[8],与本研究不同.原因在于黄河流域土地利用格局存在显著的空间差异,而在本研究中,汉江中下游地区以农田和建筑为主,占比为 0.61~0.95,平均值为 0.81.有研究表明,不同半径的土地利用对底栖动物群落的影响有较大差异,洞庭湖和太湖的生态状况分别与距离湖岸 2~5km 和 0.05~2.5km 范围内的人类用地建设密切相关[35].

水质指标中,COD_{Mn}、TN、TP、NH_3-N 可以反映水体的富营养状态,与 B-IBI 的关系有着显著差异.有研究表明,水体富营养化会影响底栖动物群落的分类组成和功能组成[36-37],进而影响生物完整性.在沁河地区,B-IBI 与 NH_3-N、TN 呈显著负相关[38].本研究中,B-IBI 随 COD_{Mn} 浓度的增加,随 TP 和 NH_3-N 浓度的增加而减少,一定程度上可以反应水质状况,与 TP 间的显著负相关表明 B-IBI 很好地表征磷污染的影响.

其他 3 个水质指标中,DO 与 B-IBI 的相关关系很弱,但从图 5(b)中可以看出,低浓度的 DO 对 B-IBI 影响较大.低浓度的 DO 会降低生物多样性[39],还会增加沉积物中硫化物的含量, 从而增大了对大型底栖动物的潜在毒性[40].有研究表明,弱碱性水体环境有利于底栖动物繁殖,在 pH<5 时,底栖无脊椎动物的生物量明显减小,繁殖能力也显著减弱[41-42].在一定范围内,水温的升高可以提高底栖动物的代谢速率和活动能力,促进其生长和繁殖,从而增加底栖动物的种类和数量,使得 B-IBI 值增加[26].

表 5 B-IBI 与环境因子间的回归分析结果统计

Table 5 The results of regression analysis between B-IBI and environmental factors were statistically analyzed

环境	线性		三次多项式	
	Adj.R^2	P 值	Adj.R^2	P 值
农田	−0.041	0.926	−0.080	0.766
建筑	−0.031	0.629	0.016	0.355
水域	−0.008	0.377	0.101	0.153
森林	0.022	0.222	0.048	0.263
草地	−0.038	0.769	0.003	0.400
COD_{Mn}	0.004	0.303	−0.018	0.479
TP	0.130	0.040	0.241	0.028
TN	−0.038	0.774	−0.085	0.790
NH_3-N	0.013	0.259	−0.047	0.605
pH	0.221	0.009	0.222	0.036
WT	0.125	0.043	0.155	0.084
DO	−0.005	0.360	0.028	0.319

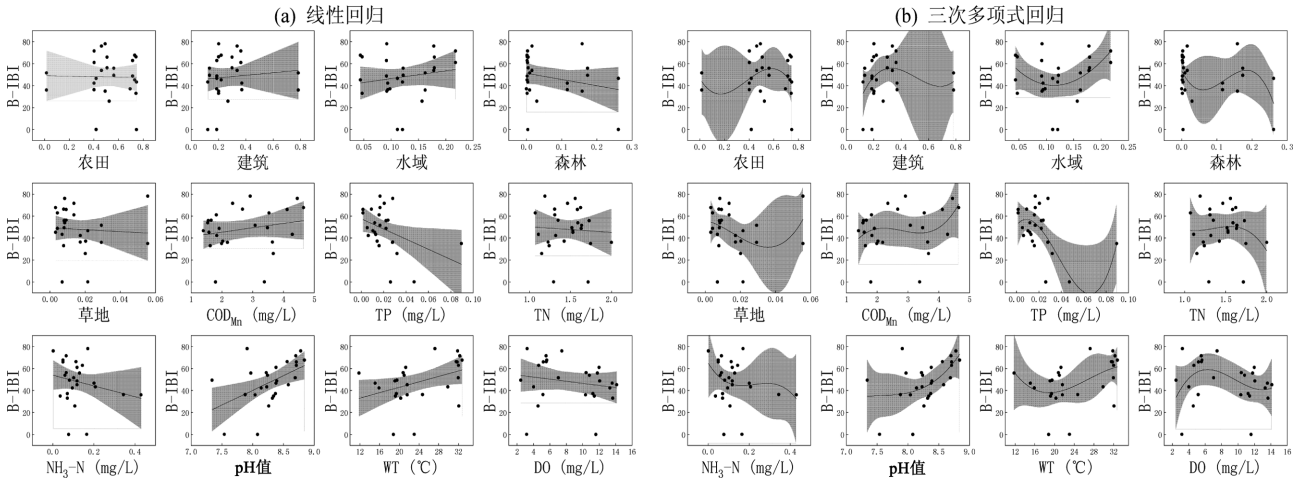


图 5 B-IBI 与环境因子的回归分析

Fig.5 Regression analysis of B-IBI and environmental factors

4　结论

4.1　汉江中下游地区丰水期大型底栖无脊椎动物生物多样性高于枯水期,中游后段和下游前段的生物多样性最低.

4.2　汉江中下游地区大型底栖无脊椎动物生物完整性整体状况“一般”.枯水期 B-IBI 在 0~61.04 之间,均值为 42.34,“良好”、“一般”、“较差”、“很差”的点位分别占比 7.7%、53.8%、30.8%、7.7%.丰水期 B-IBI 在 0.08~78.03 之间,均值为 53.40,“良好”、“一般”、“较差”、“很差”的点位分别占比 53.8%、23.1%、15.4%、7.7%.枯水期 B-IBI 呈现先下降后上升的趋势,与生物多样性的趋势一致; 丰水期整体呈现上升繼趋势,但在中游局部点位波动明显.

4.3　回归分析表明,土地利用格局对汉江中下游大型底栖无脊椎动物生物完整性无显著影响,水质指标 pH 值、TP、WT 显著影响了汉江中下游地区的大型底栖无脊椎动物生物完整性.

参考文献:

[1] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981,6(6):21-27.

[2] 王为木,蔡旺炜.生物完整性指数及其在水生态健康评价中的应用进展 [J]. 生态与农村环境学报, 2016,32(4):517-524.
Wang W M, Cai W W. Index of biotic integrity and its application to aquatic ecological health assessment [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016,32(4):517-524.

[3] 陈　凯,陈求稳,于海燕,等.应用生物完整性指数评价我国河流的生态健康 [J]. 中国环境科学, 2018,38(4):1589-1600.
Chen K, Chen Q W, Yu H Y, et al. Methods and prospects of index of biological integrity used for China river ecological health assessment [J]. China Environmental Science, 2018,38(4):1589-1600.

[4] Zhu H, Zhang Y, Peng Y, et al. Assessing the ecological health of the Qingyi River Basin using multi-community indices of biotic integrity [J]. Ecological Indicators, 2023,156:111160.

[5] 郑　彪,高　欣,李　嬰,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 macroinvertebrates Biological integrity index [J]. Acta Ecologia Sinica, 2025,45(4):1723-1735.

[6] Li Z, Ma C, Sun Y, et al. Ecological health evaluation of rivers based on phytoplankton biological integrity index and water quality index on the impact of anthropogenic pollution: A case of Ashi River Basin [J]. Frontiers in Microbiology, 2022,13:942205.

[7] 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.

[8] 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.
Feng Z Y, Hou Y M, Yin K, et al. Ecological health assessment of the Yellow River Mainstem based on Benthic Macroinveciartebrate index of biological integrity [J]. Journal of Lake Sciences, 2024,36(2):512-529.

[9] 胡　俊,沈　强,陈明秀,等.基于因子分析的南湾水库水源地浮游植物生物完整性评价 [J]. 生态学报, 2019,39(10):3759-3769.
Hu J, Shen Q, Chen M X, et al. Phytoplankton index of biotic integrity based on factor analysis for water source assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(10):3759-3769.

[10] Guo Y D, Sun F H, Wang J, et al. Application of synchronous evaluation-diagnosis model with quantitative stressor-response analysis (SED-QSR) to urban lake ecological status: A proposed multiple-level system [J]. Environmental Science & Technology, 2024,58(36):16028-16039.

[11] 张九红,敖良桂.汉江中下游水质现状及污染趋势分析 [J]. 水资源保护, 2004,(3):46-48.
Zhang J H, Ao L G. Current situation of water quality of the middle and lower Hanjiang River and trend of its pollution [J]. Water Resources Protection, 2004,(3):46-48.

[12] 胡安焱,张自英,王菊翠.水利工程对汉江中下游水文生态的影响 [J]. 水资源保护, 2010,26(2):5-9.
Hu A Y, Zhang Z Y, Wang J C. Impact of hydraulic engineering on hydro-ecology in middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. Water Resources Protection, 2010,26(2):5-9.

[13] 池仕运,陈　胜,汪红军,等.汉江中下游底栖动物群落结构特征研究 [J]. 水生态学杂志, 2014,35(5):82-90.
Chi S Y, Chen S, Wang H J, et al. Zoobenthos communities in the middle and lower reaches of the Hanjiang River [J]. Journal of Hydroecology, 2014,35(5):82-90.

[14] 杜红春,王晓宁,吴　虎,等.汉江中下游浮游植物群落结构、功能群特征及水质评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2021,30(8):1839-1847.
Du H C, Wang X N, Wu H, et al. Community structure and functional groups of phytoplankton and water quality evaluation in the middle and lower Hanjiang River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(8):1839-1847.

[15] Zhang Y Y, Ban X, Li E H, et al. Evaluating ecological health in the middle-lower reaches of the Hanjiang River with cascade reservoirs using the Planktonic index of biotic integrity (P-IBI) [J]. Ecological Indicators, 2020,114:106282.

[16] 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.
Wen W, Li S S, Feng T H, et al. Ecological health assessment of the middle and lower Hanjiang River based on plankton integrity [J]. Journal of Hydroecology, 2023,44(4):85-91.

[17] 常诗麒,丁　森,于明乔,等.汉江中下游大型底栖动物群落特征及生物完整性评价 [J]. 生态毒理学报, 2025,20(2):249-260.
Chang S Q, Ding S, Yu M Q, et al. Community structure of benthic macroinvertebrates and biological integrity assessment in the middle-lower Hanjiang River [J]. Asian journal of ecotoxicology, 2025,20(2):249-260.

[18] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法(第四版) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002:88.
Environmental Protection Administration, The Water and Wastewater Monitoring Analysis Method Editorial Board. Water and wastewater monitoring analysis method [M]. 4th Ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:88.

[19] Masese F, Wanderi E, Nyakeya K, et al. Bioassessment of multiple stressors in Afrotropical rivers: Evaluating the performance of a

macroinvertebrate-based index of biotic integrity, diversity, and regional biotic indices [J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11:1015623.

[20] You Q, Yang W, Jian M, et al. A comparison of metric scoring and health status classification methods to evaluate benthic macroinvertebrate-based index of biotic integrity performance in Poyang Lake wetland [J]. Science of The Total Environment, 2021, 761:144112.

[21] 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].
HJ 1295-2023 Technical guidelines for water ecological monitoring-aquatic organism monitoring and evaluation of rivers(on trial) [S].

[22] 侯易明,潘保柱,蒋小明,等.汉江上游干流和秦岭南麓典型支流的底栖动物群落特征及水质生物评价 [J]. 湖泊科学, 2020,32(4):1140-1153.
Hou Y M, Pan B Z, Jiang X M, et al. Benthic macroinvertebrate community characteristics and bioassessment of water quality in the mainstem of upper Hanjiang River and its typical tributaries in the southern slope of the Qinling Mountains [J]. Journal of Lake Sciences, 2020,32(4):1140-1153.

[23] 杨海强,潘保柱,朱朋辉,等.渭河干流和秦岭北麓典型支流底栖动物群落结构及水质生物评价 [J]. 湖泊科学, 2020,32(6):1793-1805.
Yang H Q, Pan B Z, Zhu P H, et al. Structure of macroinvertebrate communities and bioassessment of water quality in the Weihe River mainstream and its typical tributaries from the northern Qinling Mountains [J]. Journal of Lake Sciences, 2020,32(6):1793-1805.

[24] 张汲伟.水体底栖动物 BI 指数和 BMWP 指数水质评价等级构建及河流营养盐阈值研究 [D]. 南京:南京农业大学, 2020.
Zhang J W. The establishment of water quality classifications of macroinvertebrate biotic index(BI) and biological monitoring working party(BMWP) and the nutrient threshold for riverine macroinvertebrate assemblages [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.

[25] 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.
Yin X W, Li Q N, Zhu M H, et al. Community structure and biological integrity of macroinvertebrates in the wet and dry seasons of Wei River basin, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(14):4784-4796.

[26] 王燕妮,田伊林,刘雨薇,等.新疆巩乃斯河枯、丰水期大型底栖动物群落结构与环境因子的关系 [J]. 生态科学, 2022,41(5):208-218.
Wang Y N, Tian Y L, Liu Y W, et al. The relationship between macrobenthic community structure and environmental factors during dry and wet seasons in the Gongnaisi River, Xinjiang [J]. Ecological Science, 2022,41(5):208–218.

[27] Toussaint E, Condamine F, Oliver H, et al. Unveiling the transition from niche to dispersal assembly in ecology [J]. Nature, 2023,618 (7965):537-542.

[28] 唐肖阳,唐德善,鲁佳慧,等.汉江流域农业面源污染的源解析 [J]. 农业环境科学学报, 2018,37(10):2242-2251.
Tang X Y, Tang D S, Lu J H, et al. Source apportionment of agricultural nonpoint source pollution in the Hanjiang River Basin [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018,37(10):2242-2251.

[29] Zhang H, Zhu C X, Mo K L, et al. Dam cascade alters taxonomic composition of benthic macroinvertebrate community in upper Yangtze River [J]. River Research and Applications, 2021,37(8):1070-1079.

[30] Hu X H, Zuo D P, Xu Z X, et al. Response of macroinvertebrate community to water quality factors and aquatic ecosystem health assessment in a typical river in Beijing, China [J]. Environmental research, 2022,212:113474.

[31] He K J, Tang H, He Y, et al. Applicability of macrobenthos indexes in health assessment upstream of a large river: A case study in the Babian River of the Red River Basin, China [J]. Ecological Informatics, 2023,74:101958.

[32] 李柏山.水资源开发利用对汉江流域水生态环境影响及生态系统健康评价研究 [D]. 武汉:武汉大学, 2013.
Li B S. Study of influence on water ecoenvironment and ecosystem health assessment for water resources development and utilization in Hanjiang river basin [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.

[33] 朱 悖,贾海燕,周 琴.汉江中下游河流健康综合评价研究 [J]. 水生态学杂志, 2019,40(1):1-8.
Zhu D, Jia H Y, Zhou Q, et al. Comprehensive Health Evaluation of the Middle and Lower Hanjiang River [J]. Journal of Hydroecology, 2019,40(1):1-8.

[34] 姜永伟,王业耀,袁俊斌,等.辽宁省大型底栖无脊椎动物耐污值修订研究 [J]. 中国环境监测, 2024,40(5):154-164.
Jiang Y W, Wang Y Y, Yuan J B, et al. Study on the revised tolerance values of benthic macroinvertebrate Taxa in Liaoning Province [J]. Environmental Monitoring in China, 2024,40(5):154- 164.

[35] Xie H Y, Ma Y, Jin X W, et al. Land use and river-lake connectivity: Biodiversity determinants of lake ecosystems [J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2024,21:100434

[36] Ji L ,Wang Q ,Cui S , et al. Different responses of taxonomic and functional trait structure of benthic macroinvertebrate assemblages to eutrophication in a large Chinese freshwater lake [J]. Environmental science and pollution research international, 2024,31(6):9732-9744.

[37] Dong R, Peng K, Zhang Q J, et al. Spatial and temporal variation in lake macroinvertebrate communities is decreased by eutrophication [J]. Environmental Research, 2024,243:117872.

[38] Li Y L, Li X, Liu Q W, et al. Community characteristics of macroinvertebrates and ecosystem health assessment in Qin River, a main tributary of the Yellow River in China [J]. Environmental science and pollution research international, 2023,30(19):56410-56424.

[39] 杨陆飞,陈琳琳,李晓静,等.烟台牟平海洋牧场季节性低氧对大型底栖动物群落的生态效应 [J]. 生物多样性, 2019,27(2):200-210.
Yang L F, Chen L L, Li X J, et al. Effect of seasonal hypoxia on macrobenthic communities in the Muping Marine Ranch, Yantai, China [J]. Biodiversity Science, 2019,27(2):200-210.

[40] 陈 静,申恒伦,朱天顺,等.高邮湖大型底栖动物群落结构及影响因素 [J]. 生态学报, 2021,41(16):6486-6493.
Chen J, Shen H L, Zhu T S, et al. Macroinvertebrate community structure and its relationships with environmental factors in the Gaoyou Lake, eastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(16): 6486-6493.

[41] 任海庆,袁兴中,刘 红,等.环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响 [J]. 生态学报, 2015,35(10):3148-3156.
Ren H Q, Yuan X Z, Liu H, et al. The effects of environment factors on community structure of benthic invertebrate in rivers [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(10):3148-3156.

[42] 李正飞,蒋小明,王 军,等.雅鲁藏布江中下游底栖动物物种多样性及其影响因素 [J]. 生物多样性, 2022,30(6):123-135.
Li Z F, Jiang X M, Wang J, et al. Species diversity and driving factors of benthic macroinvertebrate assemblages in the middle and lower reaches of the Yarlung Zangbo River [J]. Biodiversity Science, 2022, 30(6):123-135.

作者简介: 王 杰(1998-),男,河南信阳人,硕士,主要从事水生态系统完整性研究.发表论文 1 篇.wjie2024@126.com.