

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.008

滏阳河大型底栖动物群落特征及影响因素分析

栾清华¹, 连秋岩¹, 王东², 刘颖², 曾庆慧³

(1. 河海大学流域水循环与水安全全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 邯郸市水利局河湖长制技术服务中心, 河北 邯郸 056005; 3. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为深入探讨滏阳河东武仕水库下游河段大型底栖动物群落特征, 研究其与环境因子的关联, 并全面评估河流水质状况, 系统分析了滏阳河(邯郸段)汛前、汛期和汛后的大型底栖动物群落组成及结构特征, 同时结合生物指数和综合水质标识指数分析了滏阳河的水质状况, 运用冗余分析法探讨了大型底栖动物与水体理化因子的关系, 确定了影响滏阳河(邯郸段)大型底栖动物群落特征的主要环境因素。结果表明: 汛前大型底栖动物平均丰度(26.3 个/m²) 高于汛期(13.5 个/m²) 和汛后(14.1 个/m²), 汛期河流水量变化对生物群落结构影响较小; 生物指数对滏阳河水水质生物评价分级效果明显, 主城区段水质明显劣于其他河段; 汛前和汛后溶解氧(DO)、pH 对滏阳河大型底栖动物的群落结构和分布有显著影响, 汛期水温和 COD_{Mn} 具有显著影响。

关键词: 群落特征; 大型底栖动物; 水质生物评价; 冗余分析; 滏阳河

中图分类号: X826

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)05-0065-08

Analysis of macrobenthos community characteristics and influencing factors in the Fuyang River

LUAN Qinghua¹, LIAN Qiuyan¹, WANG Dong², LIU Ying², ZENG Qinghui³

(1. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Handan Water Conservancy Bureau River and Lake Chief Technical Service Center, Handan 056005, China;
3. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: To deeply explore the characteristics of macrobenthos community in the lower reaches of the Dongwushi Reservoir of the Fuyang River, study the relationship between macrobenthos community and environmental factors, and comprehensively evaluate the water quality of the river, the composition and structural characteristics of macrobenthos community in the Fuyang River (Handan section) before flood season, during flood season, and after flood season were studied. Combined with the biological index (BI) and comprehensive water quality index, the water quality of the Fuyang River was analyzed, and the relationship between macrobenthos and physical and chemical factors of the water body was discussed by redundancy analysis; the main environmental factors affecting the characteristics of the macrobenthos community in the Fuyang River (Handan section) were determined. The results show that the average abundance of macrobenthos (26.3 ind./m²) before flood season is higher than that during flood season (13.5 ind./m²) and after flood season (14.1 ind./m²), and the change in the river's water quantity during flood season has little influence on the structure of the biological community. Through comparative analysis, biotic index has an obvious effect on the biological evaluation and classification of water quality in the Fuyang River, and the water quality in the main city section is obviously worse than that in other sections. Before and after the flood season, dissolved oxygen (DO) and pH have significant effects on the community structure and distribution of macrobenthos in the Fuyang River, and water temperature and COD_{Mn} have significant effects during the flood season.

Key words: community characteristic; macrobenthos; biological evaluation of water quality; redundancy analysis; the Fuyang River

基金项目: 国家自然科学基金国家水网重大课题(52394233)

作者简介: 栾清华(1978—), 女, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: carol97011202@163.com

通信作者: 曾庆慧(1990—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事水利水电工程生态环境影响研究。E-mail: qhzeng1990@126.com

引用本文: 栾清华, 连秋岩, 王东, 等. 滏阳河大型底栖动物群落特征及影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 65-72.

LUAN Qinghua, LIAN Qiuyan, WANG Dong, et al. Analysis of macrobenthos community characteristics and influencing factors in the Fuyang River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 65-72.

河流是人类文明的发源地,健康的河流能够保持正常的物质循环和能量流动并使自身结构和功能长期稳定,维系河流资源功能和生态功能相对平衡,即维系水-生物各项功能的互馈平衡^[1]。大型底栖动物是淡水水体的重要组成部分,它们在生态系统的食物网中处于中间环节,在生态系统的物质交换和能量流动中至关重要。作为河流生态系统重要的生物群落,大型底栖动物具有生活周期长、活动范围小等特点^[2],其群落结构的变化演替与水体环境因子密切相关。不同大型底栖动物类群对水体污染的敏感度和耐受性的响应不同,其群落结构、物种丰富度、种群密度等指标均随水体理化性质的不同而变化^[3],间接反映了水环境条件的变化和水体污染程度,对评估河流水环境变化具有一定的指示作用^[4]。

大型底栖动物的丰度与多样性在无污染和未受管制的山区河流中较高^[5]。随着城市化进程的加快,不仅河流的水循环过程、泥沙输移和营养物质的流动机制被改变,河流水文情势和河道形态也发生了显著变化,进而引发水质恶化和生物多样性锐减,加剧了城市河流生态系统的退化^[6-7]。河流流量也是影响底栖动物群落的重要环境因子,在适宜的流量条件下,河道能保持适中的流速,从而维持较高的底栖动物多度和多样性。然而,过大的流量会对河床底质产生强烈扰动,导致大型底栖动物发生灾变漂流^[8-11]。Bunn 等^[12]指出,河流上游水利工程通过改变下游河流水文情势,显著影响了底栖动物的物种多样性。Munn 等^[13]的研究也进一步表明,在水电站的影响下,一些底栖动物由于无法适应高流速水流等环境变化,导致其物种丰度显著减小。

滏阳河(邯郸段)的河流水量具有季节性差异,流经山区、平原,且穿过邯郸主城区,上游建有东武仕水库,故本文选取了滏阳河(邯郸段)作为研究对象,研究汛期、非汛期滏阳河大型底栖动物群落结构及物种空间分布是否产生变化,采用生物多样性指数、生物指数(biotic index, BI)、生物监测工作组(biological monitoring working party, BMWP)指数对滏阳河汛前、汛期、汛后的水质进行综合评价,并利用冗余分析筛选出影响河流大型底栖动物的主要环境因子,以期为滏阳河后续生态治理和科学保护提供支撑和参考。

1 研究区概况

滏阳河属海河流域南系的子牙河系,发源于河北省邯郸市峰峰矿区和村盆地,全长 413 km,在沧州市献县与滹沱河汇流,成为子牙河。滏阳河在河北邯郸市境内长 184 km,处于邯郸腹心地带,且横跨盆地、丘陵和平原 3 种地貌,流经峰峰矿区、磁县、冀南新区、邯山区、丛台区等 9 个县(图 1),于鸡泽县东于口村北入邢台市。东武仕水库位于磁县境内,总库容 1.62 亿 m³,控制流域面积 340 km²,是防洪、供水、发电、养殖综合利用的水库,2020—2022 年东武仕水库月平均出库流量如图 2 所示。

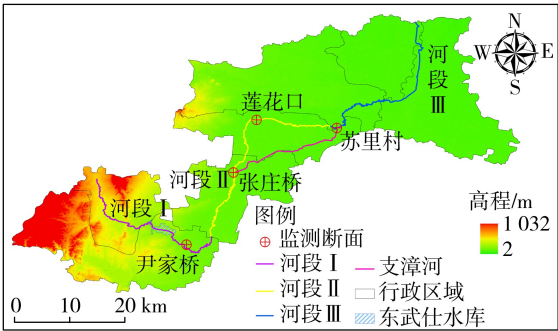


图 1 滏阳河(邯郸段)监测断面布设

Fig.1 Monitoring sections layout along the Fuyang River (Handan section)

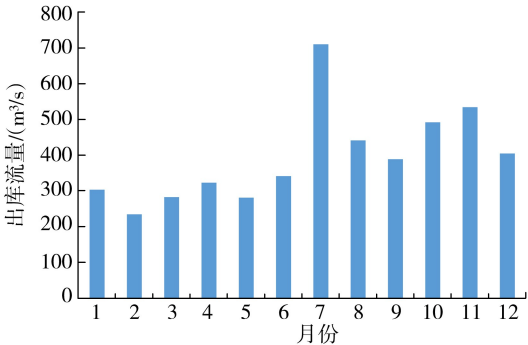


图 2 东武仕水库月平均出库流量(2020—2022 年)

Fig.2 Monthly average outflow of the Dongwushi Reservoir (2020-2022)

2 样品采集与数据分析

2.1 样品采集

2.1.1 监测断面布设

根据滏阳河流经区县情况,重点考虑水库节点、出入邯郸主城区以及水系的控制性,选取了东武仕水库坝下尹家桥、入主城区控制点张庄桥、出主城区控制点苏里村以及水系汇集控制点莲花口共 4 个监测断面对邯郸市境内的滏阳河干流的水体理化因子以及大型底栖动物群落结构进行了分析。根据监测断面的选取,

将滏阳河划分为 3 段:山区河段Ⅰ、城区河段Ⅱ、平原河段Ⅲ(图 1)。

2.1.2 生物样品采集、分类及鉴定

分别于 2020 年、2021 年、2022 年的汛前、汛期、汛后对滏阳河 4 个典型监测断面的大型底栖动物进行采集,为了对涉水区域的生物群落进行准确的定量采样并有效避免在涉水定量采样时可能出现的误差和偏差,采用 D 形网并在每个采样点采集 5 个样框,3 年共采集 36 个样本 180 个样方,采集到样品后,在现场使用 40 目尼龙筛网筛洗,并放置于白色瓷盘中用细吸管、尖嘴镊、解剖针等工具分拣底栖动物标本,置于标本瓶中后带回实验室。为确保采样的准确性,对采集到的样品进行分类和编号,并用 5% 甲醛溶液进行固定保存。为统计各采样点采集的大型底栖动物种类和数量,按照低分类单元进行鉴定^[14],尽量鉴定至最低分类单元。使用解剖镜和显微镜完成鉴定过程,根据各点的采样面积,计算各分类单元的密度。

2.1.3 水质指标采集及检测

为了全面评价滏阳河水体的理化性质,使用便携式多参数水质测量仪(美国哈希 HQ-40d)测定了水温(WT)、pH 和溶解氧(DO)。在实验室内依据标准 HJ 828—2017、HJ 636—2012、GB/T 11893—1987、GB/T 11892—1989、HJ 505—2009、HJ 535—2009 分别对化学需氧量、总氮、总磷、高锰酸盐指数、五日生化需氧量及氨氮进行测定。

2.2 数据分析

采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')进行生物多样性计算;结合 BI、BMWP 指数、生物污染指数(biological pollution index, BPI)和 Goodnight-whitely 修正指数(GBI)衡量调查区域水体的污染程度,并与综合水质标识指数法的评价作比较。 H' 是衡量群落生物多样性水平的指标之一,对群落内物种相对多度的非均衡分布状况较为敏感,强调物种丰富度和稀有种对群落生物多样性的贡献。BI 是根据大型底栖动物耐污能力的不同,通过计算耐污值对水质进行评价。BMWP 指数是一种计算科级分类单元敏感值的快速生物评价单因子指数,利用不同底栖动物对污染不同的敏感性或耐受性,按照各个类群的耐受程度赋分对河流进行生物评价。GBI 通过计算寡毛类的密度来反映水体污染程度。BPI 通过计算寡毛类、蛭类的密度来反映水体污染程度,其中 BPI 小于 0.1 时,水体为清洁状态;0.1~<0.5 时为轻污染;0.5~<1.5 时为 β -中污染;1.5~5.0 时为 α -中污染;大于 5.0 则为重污染^[15-20]。其他指数评价分级标准见表 1。参考文献[21]计算优势度指数($Y>0.02$ 视为优势种)来获取不同采样期不同断面的优势种,优势度指数是表示大型底栖动物群落中某一物种在其中所占优势的程度,反映的是群落中各物种种群数量的变化情况,一般情况下优势度指数越大,说明优势物种的地位越突出,群落内物种数量分布越不均匀^[22]。

在确定选用冗余分析(redundancy analysis, RDA)或典型对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)前,针对大型底栖动物数据先进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)^[23],依据相关原理^[24],如果 DCA 最大梯度长度大于 4.0,选 CCA;如果介于 3.0~4.0 之间,选 RDA 或 CCA 均可,如果小于 3.0,使用 RDA。利用 CCA 或 RDA 排序图绘制物种、环境因子与各河段样点之间的关系,展示物种组成与环境因子的关系。

3 结果与分析

3.1 大型底栖动物群结构特征

3.1.1 物种组成

在邯郸市滏阳河干流的调查中共采集大型底栖动物 60 种,隶属 3 门 8 纲 16 目 35 科。节肢动物门种数最多,共 43 种,涉及 3 纲 8 目 24 科,占采集总种数的 71.67%,且节肢动物门中,昆虫纲数量最多,达 40 种;其次是软体动物门共有 12 种,涉及 3 纲 5 目 8 科;环节动物门共有 5 种,涉及 2 纲 3 目 3 科。汛前大型底栖动物丰度范围为 3.3~586.6 个/m²,平均丰度 26.3 个/m²;汛期大型底栖动物丰度范围为 3.3~153.3 个/m²,平均丰度 13.5 个/m²;汛后大型底栖动物丰度范围为 3.3~195 个/m²,平均丰度 14.1 个/m²。

表 1 分级标准

Table 1 Classification standard				
分级	H'	BI	BMWP 指数	GBI
清洁	>3	<5.5	>100	>0.8
轻污染	2~3	5.5~<6.6	>70~100	>0.6~0.8
中污染	1~<2	6.6~<7.7	>40~70	>0.4~0.6
重污染		7.7~8.8	>10~40	>0.2~0.4
严重污染	<1	>8.8	>0~10	>0.1~0.2

溱阳河大型底栖动物丰度从大到小排序为汛前、汛后、汛期。各监测断面大型底栖动物平均丰度从大到小为张庄桥(86.4个/m²)、莲花口(59.3个/m²)、尹家桥(55.0个/m²)、苏里村(53.7个/m²)。

溱阳河大型底栖动物群落中的物种平均丰度在各监测断面具有明显的差异。由图3可知,溱阳河环节动物门平均丰度在汛前、汛期和汛后各断面变化较大。软体动物门汛期和汛后平均丰度较汛前(14.41个/m²)分别上升了24.5%和41.3%。节肢动物门平均丰度在汛前最高(48.54个/m²),汛期和汛后分别降低了40.6%和62.7%。汛后虽然软体动物门平均丰度有所上升但由于节肢动物门平均丰度的明显降低,导致汛后大型底栖动物平均丰度低于汛前。

汛期和汛后各监测断面大型底栖动物丰度变化较大。汛期张庄桥断面(65.8个/m²)和尹家桥断面(42.6个/m²)较汛前降低了54.4%和55.5%,汛后较汛前分别降低了65.9%和72.1%;苏里村断面大型底栖动物平均丰度在汛期有所降低,但汛后平均丰度增加,且高于汛期;莲花口断面汛期和汛后平均丰度均高于汛前。

3.1.2 优势种组成

由表2可知,汛前4个断面优势种主要为摇蚊类,汛期和汛后优势种出现了梨形环棱螺等物种,此外汛后在2个主城区控制断面还出现了苏氏尾鳃蚓和霍甫水丝蚓等耐污种。在汛前和汛期,节肢动物门都为溱阳河(邯郸段)的主要优势种群,汛后则出现了环节动物和软体动物。综上,溱阳河各监测断面及3次采样期内优势种组成较为单一。

3.1.3 生物多样性分析

由表3可知,汛前除苏里村断面外,其余断面生物多样性均优于汛期和汛后;张庄桥断面生物多样性在汛期和非汛期均高于其余3个断面。

3.2 大型底栖动物群落结构与环境因子之间的关系

3.2.1 水质生物评价

为更好地分析溱阳河水质,结合水质监测数据,根据徐祖信^[25]提出的综合水质标识指数法计算水质等级,与各生物指数计算结果进行对比分析。由表4可知,综合水质标识指数计算结果显示溱阳河整体水质处于Ⅱ~Ⅲ类,河流入城后水质变为Ⅲ类。无论汛前还是汛后,Shannon-Wiener多样性指数结果显示除汛前苏里村、汛后尹家桥和莲花口断面为严重污染外,其余断面为中污染,部分断面与综合水质标识指数结果相差较大;BI结果显示尹家桥断面水质为清洁状态,张庄桥断面水质为轻污染,苏里村断面汛前和汛期为中污染,莲花口断面汛前水质较好,汛期和汛后水质变差,整体来看,BI对溱阳河水质的评价与综合水质标识指数结果较为一致;BPI和GBI分别表明溱阳河水质整体为中污染和清洁状态,未能较好地对溱阳河的水质进行分级;BMWP指数表明溱阳河水质整体处于中污染状态,汛后水质较汛前和汛期变差,与综合水质标识指数结果也相差较大。

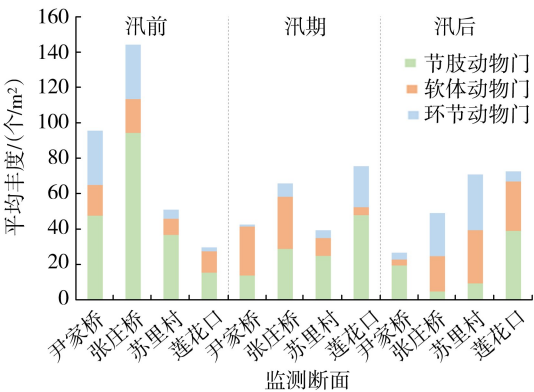


图3 大型底栖动物群落平均丰度及结构变化
 Fig.3 Abundance and structural changes in macrobenthos community

表2 溱阳河各监测断面优势种组成

监测断面	优势种		
	汛前	汛期	汛后
尹家桥	中华齿米虾(0.074)	方格短沟蝾(0.116)	中华齿米虾(0.38)
	六纹尾鳃(0.094)	日本花翅蜉(0.057)	多足摇蚊属(0.106)
	多足摇蚊属(0.142)	拟开氏摇蚊属(0.142)	
张庄桥	黄明摇蚊(0.092)	梨形环棱螺(0.100)	方格短沟蝾(0.264)
	三轮环足摇蚊(0.310)	斑点小划椿(0.102)	梨形环棱螺(0.065)
	刺拟脉锤摇蚊(0.089)		苏氏尾鳃蚓(0.177)
苏里村	斑点小划椿(0.386)	长跗摇蚊属(0.127)	纹沼螺(0.093)
		环足摇蚊属(0.073)	霍甫水丝蚓(0.195)
莲花口	方格短沟蝾(0.065)	中华齿米虾(0.196)	梨形环棱螺(0.147)
	中华齿米虾(0.104)	斑点小划椿(0.127)	斑点小划椿(0.257)
	二叉摇蚊属(0.086)	环足摇蚊属(0.07)	七纹尾鳃(0.076)

注:优势种后括号中数字为优势度。

表3 溱阳河各监测断面 Shannon-Wiener 多样性指数

监测断面	汛前	汛期	汛后
尹家桥	1.481	1.248	0.837
张庄桥	1.581	1.375	1.275
苏里村	0.971	1.287	1.037
莲花口	1.415	1.129	0.738

3.2.2 群落结构与环境因子的关系

由表 5 可知,汛前、汛期及汛后 DCA 最大轴的梯度长度分别为 2.5808、1.068 0 和 3.7616,均小于 4,故选用 RDA 分析探究大型底栖动物和环境因子之间的相互关系。

由图 4 可知,汛前,苏氏尾鳃蚓、摇蚊属、斑点小划椿等与 WT、BOD₅、NH₄⁺-N 呈正相关关系,六纹尾鳃、二叉摇蚊属等则与 pH、DO、COD_{Mn} 等呈负相关关系;汛期摇蚊属、长跗摇蚊属、环足摇蚊属、日本花翅蜉、拟开氏摇蚊属与 COD_{Cr}、WT、TP 等呈正相关关系,而方格短沟蜉、中华齿米虾、斑点小划椿则与 pH、COD_{Mn}、BOD₅ 呈负相关关系;汛后方格短沟蜉、梨形环棱螺等与 pH 和 TP 呈正相关关系,而中华齿米虾、苏氏尾鳃蚓、霍甫水丝蚓、多足摇蚊属等则与 WT、DO 等呈负相关关系。各环境因子与 RDA 轴 1 的相关系数见表 6。整体来看,滏阳河汛前大型底栖动物受 WT、pH 和 DO 影响较大,汛期受 WT 和 COD_{Mn} 影响较大,汛后受 DO 和 pH 影响较大。

表 4 滏阳河水质生物评价结果

Table 4 Biological evaluation results of water quality of the Fuyang River

采样期	监测断面	H	BI	BPI	GBI	BMWP 指数	综合水质标识指数
汛前	尹家桥	1.481	5.386	0.61	0.90	80	Ⅱ
	张庄桥	1.581	6.560	0.85	0.93	66	Ⅱ
	苏里村	0.971	7.048	0.60	0.97	49	Ⅲ
	莲花口	1.415	5.228	0.52	0.95	62	Ⅲ
汛期	尹家桥	1.249	5.406	0.57	0.92	59	Ⅱ
	张庄桥	1.375	6.501	0.55	0.93	56	Ⅱ
	苏里村	1.287	6.953	0.73	0.82	66	Ⅲ
	莲花口	1.130	6.006	0.68	0.93	74	Ⅲ
汛后	尹家桥	0.837	3.952	0.69	0.93	71	Ⅱ
	张庄桥	1.276	5.678	0.53	0.80	97	Ⅱ
	苏里村	1.038	6.455	0.58	0.72	43	Ⅲ
	莲花口	0.739	5.547	0.35	0.95	39	Ⅱ

表 5 DCA 分析结果
Table 5 DCA results

采样期	DCA1		DCA2		DCA3		DCA4	
	特征值	梯度长度	特征值	梯度长度	特征值	梯度长度	特征值	梯度长度
汛前	0.523 4	2.580 8	0.380 2	2.124 7	0.276 40	1.778 77	0.332 98	2.009 58
汛期	1.000 0	1.068 0	0.758 7	3.822 6	0.482 50	1.716 40	0.508 10	1.765 42
汛后	0.585 3	3.761 6	0.424 4	2.491 3	0.306 13	1.906 10	0.432 87	2.291 51

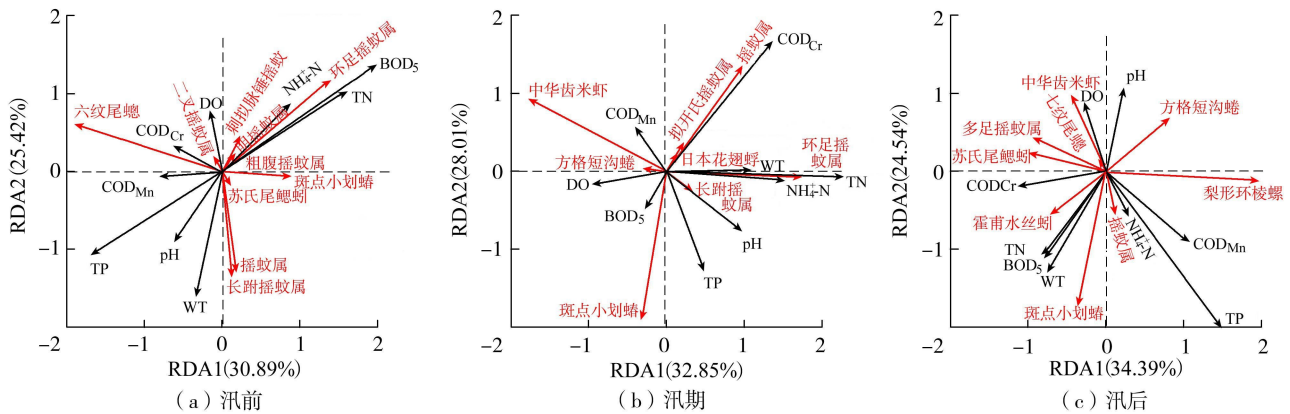


图 4 大型底栖动物与环境因子的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis on macrobenthos and environmental factors

表 6 与群落结构相关的主要环境因子

Table 6 Main environmental factors related to community structure

采样期	正相关环境因子	负相关环境因子
汛前	WT(0.453)、BOD ₅ (0.306)、NH ₄ ⁺ -N(0.083)	pH(-2.691)、DO(-2.934)、COD _{Mn} (-0.732)
汛期	COD _{Cr} (0.563)、TP(3.08)、WT(4.661)	pH(-0.679)、COD _{Mn} (-0.791)、BOD ₅ (-0.358)
汛后	pH(5.260)、TP(3.522)	WT(-0.729)、DO(-0.894)

注:环境因子后括号中的数字为与 RDA 轴 1 的相关系数。

4 讨 论

整体看,滏阳河大型底栖动物的生物多样性有限。滏阳河 2020—2022 年均处于综合治理阶段,对滏阳

河实施了控源截污、节水减排、河道清淤、护坡衬砌等治理工程,河流水质、水量有所提升,但施工对河流大型底栖动物的丰度也造成了一定的扰动,与李相通等^[26]2019 年对濉阳河大型底栖动物的研究相比,生物丰度与多样性指数均有所减小。由于生物生长具有自身的节律并易受到食物、温度、降水、日照和土壤等不同因素的影响,且大型底栖动物是河流生态系统食物链结构的中间环节,分布广、移动能力差、活动范围小、比较脆弱,对水环境变化敏感,形成多样性丰富且较为稳定的群落结构需要较长时间^[27-28]。因此,2020—2022 年濉阳河大型底栖动物的生物多样性有限可能是受综合治理工程的影响,在未来的治理工作中,应优化工程设计,尽量减少对河床和生物栖息环境的扰动,特别是在工程施工期间,尽量避开底栖动物的繁殖季节,减少对其生长和繁殖的影响,同时需加强对河流生态环境的动态监测,确保治理措施与生态保护之间的平衡,促进濉阳河水生态系统的健康发展。施工结束后应采取生态修复措施以恢复和增强生物多样性。

就上下游空间对比而言,张庄桥断面大型底栖动物平均丰度最高,城区段的苏里村断面生物平均丰度低于其余断面(图3)。张庄桥断面采样点位于邯郸市南湖湿地,生境自然程度较高,苏里村断面处于人类活动较为频繁的城区内,城市化使水文水动力、河流底质、岸坡等发生改变,河流生境被改变,导致大型底栖动物丰度较低。濉阳河(邯郸段)底栖动物群落结构及空间分布差异受到环境压力、人类活动等河流生境空间异质性的影响的结果与相关研究结果^[29-30]一致。

年内变化对比而言,4 个监测断面优势种组成在汛前、汛期和汛后 3 个时期变化较为单一。由于东武仕水库的运行调度,使得远离水库泄洪断面以下水流沿河动力变化的时间差异性降低,底质环境差异小,导致适应急流的蜉蝣等物种减少,摇蚊科等静水型物种增加,相关研究也印证了水库运行可造成下游河流整体物种多样性的降低和群落结构趋于单一化的结果^[31-34]。因此,应提升水库调度的科学性,定期评估下游的生态状况,以保持下游河流的生态系统稳定性和生物多样性,及时对调度策略进行调整。在调度过程中,需考虑季节性水流变化的需求,保护敏感物种的栖息环境,结合物种的生物繁殖周期,减少对急流物种的不利影响,确保下游生态系统的健康和可持续性。

濉阳河大型底栖动物丰度受降水影响较显著,汛期和汛后的平均丰度较汛前分别下降了 48.7% 和 46.4%。由于汛期频繁降水抬高了河流水位,在一定程度上对大型底栖动物的生境造成扰动,流速增大也使大型底栖动物的群落密度降低,研究表明过大的流量对河床底质产生扰动,底栖动物多样性和多度会受到损害^[35],汛前河流水量较低,流速相对缓慢,更适宜大型底栖无脊椎动物的生长繁殖^[36]。由于汛期河流水量上涨的影响,汛后生态系统的恢复需要一定时间,大型底栖动物群落在此期间可能仍处于低谷期。汛前河流水量较小,可能是大型底栖动物丰度较高的原因。汛期降水在一定程度上导致濉阳河的流量增大,汛后河流水位仍处于较高状态,故而汛期和汛后的生物丰度和多样性也低于汛前。

生物指数对濉阳河水质评价的结果各不相同,主要在于其对大型底栖动物的侧重点有所不同。Shannon-Wiener 多样性指数全面考虑了样本中大型底栖动物的丰度,BPI 考虑了耐污群体蛭类、摇蚊类和颤蚓类的个体数,GBI 仅对大型底栖动物的个别种类进行了分析^[37],因此评价的准确度不高,结合生物多样性指数分析可知,濉阳河大型底栖动物较少,检测出的物种敏感值也较低,故 BMWP 指数对本次濉阳河水质评价的效果并不可观。BI 基于生物群落对污染的耐受性进行评价,作为衡量底栖动物对污染物耐受性和敏感度的综合指标,能够有效反映水质状况,且对濉阳河水质的分级效果显著,与综合水质标识指数对濉阳河水质的评价结果较为一致。在河流流入主城区后,水质变差,下游河段也受到影响,苏里村断面位于邯郸市主城区内,非点源污染易随汛期降水径流过程流入河道,且河流受到沿岸人为活动的影响,故而除尹家桥断面水质较好外,其余断面水质较差,这也与上述讨论中大型底栖动物丰度变化相一致。

环境因子变化对大型底栖动物的影响十分复杂,在不同的研究区域或不同时期的环境因子对大型底栖动物群落有着不完全一致的影响^[38],濉阳河不同采样期对大型底栖动物产生影响的环境因子不同。大型底栖动物如果在水温合适的水体中生存,物种丰富度和密度均会增加^[39],濉阳河汛期和汛后河流平均水温均高于 25℃,导致濉阳河大型底栖动物丰度有所降低。河流水体中 DO 含量的高低直接影响大型底栖动物的生长和繁殖,溶解氧含量过低时会导致大型底栖动物死亡,濉阳河汛期和汛后的 DO 平均含量较汛前有所降低,这也是导致濉阳河汛期和汛后大型底栖动物丰度降低的原因。绝大部分的底栖动物生存的适宜 pH 范围为 6~8 内^[40],在 pH 呈中性和碱性时,氨氮经过一系列微生物催化作用,逐渐转化为亚硝酸盐、硝酸盐等,为微生物创造了有利的环境,进而通过为大型底栖动物提供食物来影响其生产繁殖^[41],濉阳河 pH 范围为

7~8. 93,适宜大部分大型底栖动物生存。汛期时,由于降水量增加,地表径流将大量有机物和污染物带入水体,导致 COD_{Mn} 升高,高浓度的有机物和污染物会消耗水中的 DO 含量,使得水质恶化,对底栖动物的生存造成压力。因此,在滏阳河后续的生态管理中,应加强对水质的监控,特别是在汛期和汛后,采取有效措施降低有机物和污染物的输入,维持 DO 和其他水质指标的稳定,以保障大型底栖动物的生存环境和群落稳定。

5 结 论

a. 共鉴定出 60 种大型底栖动物,其中,节肢动物门 43 种占绝对优势,占比 71. 67%,汛期、汛期和汛后物种丰度变化较大,但其群落结构变化较小,群落结构较为单一,优势种主要为摇蚊类、梨形环棱螺、斑点小划椿等耐污性较高的物种,工程施工后滏阳河生态恢复至原有状态仍需一定时间。

b. 滏阳河在入主城区后水质变差,处于中污染状态,且大型底栖动物的丰度较低,根据 RDA 分析,汛期和汛后水体中 DO、pH 是影响滏阳河大型底栖动物群落结构及分布的重要因素,汛期则受 WT 和 COD_{Mn} 影响较大。

参考文献:

[1] 陈艳萍,蒋倩倩,刘晶婕. 黄河流域“水资源生态保护高质量发展”空间均衡性诊断[J]. 水利经济,2024,42(1):14-20. (CHEN Yanping, JIANG Qianqian, LIU Jingjie. Spatial equilibrium diagnosis of “water resources-ecological protection-high-quality development” in the Yellow River Basin[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(1):14-20. (in Chinese))

[2] 梁舒汀,王菲,吴丹,等. 基于大型底栖动物完整性指数的海河流域典型水库水生态健康评价[J]. 生态环境学报,2023,32(8):1457-1464. (LIANG Shuting, WANG Fei, WU Dan, et al. Ecological health assessment of reservoirs based on macrobenthic index of biotic integrity in Haihe Basin[J]. Ecology and Environmental Sciences,2023,32(8):1457-1464. (in Chinese))

[3] 崔文彦,孟宪智,张世禄,等. 大型底栖动物完整性指数在漳河上游水生态评价中的应用[J]. 生物学杂志,2019,36(5):73-77. (CUI Wenyan, MENG Xianzhi, ZHANG Shilu, et al. Application of benthic index of biotic integrity for aquatic ecological assessment in the upper reaches of Zhanghe River[J]. Journal of Biology,2019,36(5):73-77. (in Chinese))

[4] 渠晓东. 香溪河大型底栖动物时空动态、生物完整性及小水电站的影响研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2006.

[5] GARCÍA-BARRERAS E, MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ V, DE JALÓN D G. Long-term macrobentos responses to environmental flows and water quality improvement along river Jarama[J]. Ecohydrology & Hydrobiology,2023,23(2):304-315.

[6] 华祖林,董越洋,褚克坚. 高度人工化城市河流生态水位和生态流量计算方法[J]. 水资源保护,2021,37(1):140-144. (HUA Zulin, DONG Yueyang, CHU Kejian. Calculation method of ecological water level and discharge in highly artificial urban river[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):140-144. (in Chinese))

[7] 唐杰,陈垚,程麒铭,等. 河道形态改造对城市河流生态水力性能的影响[J]. 水资源保护,2022,38(6):185-193. (TANG Jie, CHEN Yao, CHENG Qiming, et al. Influence of river course form transformation on ecological hydraulic performance of urban rivers[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):185-193. (in Chinese))

[8] BEAUGER A, LAIR N, REVES-MAREHANT 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.

[9] 郑文浩,渠晓东,张远,等. 太子河流域大型底栖动物栖境适宜性[J]. 环境科学研究,2011,24(12):1355-1363. (ZHENG Wenhao, QU Xiaodong, ZHANG Yuan, et al. Habitat suitability of macroinvertebrates in the Taizi River Basin, Northeast China [J]. Research of Environmental Sciences,2011,24(12):1355-1363. (in Chinese))

[10] LOBERA G, MUÑOZ I, LÓPEZ-TARAZÓN J A, et al. Effects of flow regulation on river bed dynamics and invertebrate communities in a Mediterranean river[J]. Hydrobiologia,2017,784(1):283-304.

[11] BILTON D T, FREELAND J R, OKAMURA B. Dispersal in freshwater invertebrates[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics,2001,32:159-181.

[12] BUNN S E, ARTHINGTON A H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity [J]. Environmental Management,2002,30(4):492-507.

[13] MUNN M D, BRUSVEN M A. Benthic macroinvertebrate communities in nonregulated and regulated waters of the Clearwater River, Idaho, U. S. A. [J]. Regulated Rivers: Research & Management,1991,6(1):1-11.

[14] DUDGEON D. Tropical Asian streams: zoobenthos, ecology and conservation[M]. Hong Kong: Hong Kong University Press, 1999.

[15] 秦春燕. 长江三角洲淡水底栖动物耐污值修订和 BI 指数水质评价分级研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 马卓苹,凌耀忠,黄文达. 猫跳河流域底栖动物群落结构与水质生物评价[J]. 人民长江,2022,53(6):99-104. (MA Zhuoluo,LING Yaozhong,HUANG Wenda. Zoobenthos community structure and water quality biological evaluation in Maotiao River Basin[J]. Yangtze River,2022,53(6):99-104. (in Chinese))

[19] 赵永晶,沈建忠,王腾,等. 基于大型底栖动物的乌伦古湖水质生物学评价[J]. 水生态学杂志,2010,31(3):7-11. (ZHAO Yongjing,SHEN Jianzhong,WANG Teng, et al. Biological assessment of water quality of Ulungur lake using benthic macroinvertebrates[J]. Journal of Hydroecology,2010,31(3):7-11. (in Chinese))

[20] 熊莉,许人骥,金小伟,等. 不同底栖动物采样方法在城市河流中的应用:以胥河为例[J]. 环境影响评价,2021,43(6):21-27. (XIONG Li,XU Renji,JIN Xiaowei, et al. Application of different sampling methods of zoobenthos in urban rivers;a case study of Xuhe River[J]. Environmental Impact Assessment,2021,43(6):21-27. (in Chinese))

[21] 陈丽,王东波,君珊. 拉萨河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报,2019,39(3):757-769. (CHEN Li,WANG Dongbo,JUN Shan. Macroinvertebrate community structure and relationships with environmental factors in the Lhasa River[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(3):757-769. (in Chinese))

[22] 李勇. 中东太平洋金枪鱼延绳钓渔获组成及其多样性分析[D]. 上海:上海海洋大学,2011.

[23] FELD C K,HERING D. Community structure or function:effects of environmental stress on benthic macroinvertebrates at different spatial scales[J]. Freshwater Biology,2007,52(7):1380-1399.

[24] 王昱,王旭,冯起,等. 黄河甘肃段底栖动物群落结构及水质评价[J]. 中国沙漠,2023,43(4):146-156. (WANG Yu,WANG Xu,FENG Qi, et al. Macroinvertebrate community structure and water quality evaluation in Gansu section of Yellow River Basin[J]. Journal of Desert Research,2023,43(4):146-156. (in Chinese))

[25] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2005,33(4):482-488. (XU Zuxin. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2005,33(4):482-488. (in Chinese))

[26] 李相通,宋弘东,朱长军,等. 浚阳河生态补水后底栖动物群落结构分析[J]. 华北自然资源,2021(3):102-105. (LI Xiangtong, SONG Hongdong, ZHU Changjun, et al. Analysis of macroinvertebrate community structure in Fuyang River after ecological water replenishment[J]. Huabei Natural Resources, 2021(3): 102-105. (in Chinese))

[27] 张晗旭,李馨宇,崔保山,等. 黄河三角洲湿地生态修复工程对底栖动物的影响效果研究[J]. 环境工程,2023,41(1):222-231. (ZHANG Hanxu,LI Xinyu,CUI Baoshan, et al. Effect of wetland ecological restoration project on macroinvertebrate community in the Yellow River Delta[J]. Environmental Engineering,2023,41(1):222-231. (in Chinese))

[28] 张建华,殷鹏,张雷,等. 底泥疏浚对太湖内源及底栖生物恢复的影响[J]. 环境科学,2023,44(2):828-838. (ZHANG Jianhua,YIN Peng,ZHANG Lei, et al. Effects of sediment dredging on the reduction in sediment internal loading of Lake Taihu and the self-recovery ability of benthic organism[J]. Environmental Science,2023,44(2):828-838. (in Chinese))

[29] 贺玉晓,李珂,任玉芬,等. 春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因子分析[J]. 环境科学,2020,41(6):2951-2962. (HE Yuxiao,LI Ke,REN Yufen, et al. Characteristics of macroinvertebrate community structure and their relationships with environmental factors in rivers of Beijing in spring[J]. Environmental Science,2020,41(6):2951-2962. (in Chinese))

[30] FEISAL N A S,KAMALUDIN N H,SANI M F A, et al. Anthropogenic disturbance of aquatic biodiversity and water quality of an urban river in Penang,Malaysia[J]. Water Science and Engineering,2023,16(3):234-242.

[31] TAGLIAFERRO M,MISERENDINO M L,LIBEROFF A, et al. Dams in the last large free-flowing rivers of Patagonia,the Santa Cruz River,environmental features,and macroinvertebrate community[J]. Limnologia,2013,43(6):500-509.

[32] 李晋鹏,彭明春,董世魁,等. 澜沧江小湾水坝运行前后大型底栖动物群落及水质评价[J]. 环境科学研究,2018,31(11):1900-1908. (LI Jinpeng,PENG Mingchun,DONG Shikui, et al. Assessment of benthic macroinvertebrate assemblages and water quality in Xiaowan Reservoir before and after dam operation,Lancang River[J]. Research of Environmental Sciences,2018,31(11):1900-1908. (in Chinese))

[33] 王昱,李宝龙,冯起,等. 筑坝截流对黑河上中游大型底栖动物群落结构及物种多样性的影响[J]. 生态与农村环境学报,2020,36(10):1309-1317. (WANG Yu,LI Baolong,FENG Qi, et al. Effects of dam construction on macrozoobenthos community structure and species diversity in the upper and middle reaches of Heihe river[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020,36(10):1309-1317. (in Chinese))

[34] 左其亭,刘静,窦明. 闸坝调控对河流水生态环境影响特征分析[J]. 水科学进展,2016,27(3):439-447. (ZUO Qiting,LIU Jing,DOU Ming. Analysis of the impact of dam operations on the river water ecological environment[J]. Advances in Water Science,2016,27(3):439-447. (in Chinese))

Hanlin,ZHOU Shiming,LI Daokui,et al. Research on axial compensation ability of U-shaped bellows under internal pressure[J]. Structure & Environment engineering,2024,51(3):12-17. (in Chinese))

[13] BARDI F C, TANG Huang, KULKARNI M, et al. Structural analysis of cryogenic flexible hose [C]//ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York: ASME, 2011: 593-606.

[14] YAN Jun, YING Xipeng, CAO Huixin, et al. Mechanism of mechanical analysis on torsional buckling of U-shaped bellows in FLNG cryogenic hoses[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(10): 1405.

[15] COX P J. Preparing the way for future offshore LNG marine terminals [C]//Offshore Technology Conference 2008. Houston: Society of Petroleum Engineer, 2008: 618-628.

[16] 万宏强,汪亮. 低温环境下波纹管的轴向刚度计算[J]. 机械强度, 2009, 31(5): 787-790. (WAN Hongqiang, WANG Liang. Finite element calculation to bellows' axial stiffness on cryogenic environment[J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(5): 787-790. (in Chinese))

[17] 杨亮,刘淼儿,范嘉堃,等. LNG 耐超低温柔性管道研究进展综述:工业应用与结构设计分析[J]. 力学学报, 2022, 54(10): 2904-2921. (YANG Liang, LIU Miaoer, FAN Jiakun, et al. Summary of development of LNG cryogenic flexible hose: industrial application and structural analysis[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(10): 2904-2921. (in Chinese))

[18] 范嘉堃,杨亮,李方遒,等. LNG 低温柔性管道内衬金属波纹管的选型设计[J]. 船舶力学, 2023, 27(1): 121-133. (FAN Jiakun, YANG Liang, LI Fangqiu, et al. Conceptual selection design of metal bellows in LNG cryogenic hose[J]. Journal of Ship Mechanics, 2023, 27(1): 121-133. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-20 编辑:熊水斌)

+++++
(上接第 72 页)

[35] 王领贺,王松毅,冉艳,等. 生态流量泄放对小水电坝下河段底栖动物群落的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(15): 6457-6472. (WANG Linghe, WANG Songyi, RAN Yan, et al. Effects of ecological flow releases on benthic macroinvertebrate community in reaches downstream of small hydropower plants [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 44(15): 6457-6472. (in Chinese))

[36] 池仕运,王瑞,魏秘,等. 金沙江上中段大型底栖无脊椎动物群落结构特征和多样性分析[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8723-8738. (CHI Shiyun, WANG Rui, WEI Mi, et al. Community structure and diversity of macroinvertebrates in the upper and middle reaches of Jinsha River based on the monitoring data from 2010—2019[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8723-8738. (in Chinese))

[37] 曹然,黎征武,毛建忠,等. 北江大型底栖无脊椎动物群落结构及水质的生物评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 80-87. (CAO Ran, LI Zhengwu, MAO Jianzhong, et al. Benthic macroinvertebrate community structure and bioassessment of water quality of Beijiang River[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 80-87. (in Chinese))

[38] 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 Yanni, TIAN Yilin, LIU Yuwei, 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. (in Chinese))

[39] 刘鹏,商书芹,谭璐. 济南地区丰水期、枯水期底栖动物群落多样性及其与环境因子的关系[J]. 水产科技情报, 2018, 45(5): 263-266. (LIU Peng, SHANG Shuqin, TAN Lu. Community diversity of zoobenthos and its relationship with environmental factors in Jinan area during wet season and dry season[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2018, 45(5): 263-266. (in Chinese))

[40] 朱晨曦,莫康乐,唐磊,等. 漓江大型底栖动物功能摄食类群时空分布及生态效应[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 60-69. (ZHU Chenxi, MO Kangle, TANG Lei, et al. Spatial-temporal distribution and ecological effects of macroinvertebrate functional feeding groups in the Lijiang River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 60-69. (in Chinese))

[41] RICOTTA C, CARBONI M, ACOSTA A T R. Let the concept of indicator species be functional! [J]. Journal of Vegetation Science, 2015, 26(5): 839-847.

(收稿日期:2024-08-28 编辑:刘晓艳)