

赣江尾间工程运行前后底栖动物群落结构演变特征

胡小飞^{1,2}, 吴挺峰³, 燕文明³, 张奇³, 刘玉栋⁴, 周亚东³, 李皋翔³, 龚志军¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所; 2. 中国科学院大学; 3. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 4. 江西省南昌市水文局)

摘要:为评估赣江尾间工程对赣江水生态系统的影响,对工程运行前后赣江尾间段干流及其下游四支叉河(主支、北支、中支、南支)底栖动物开展了为期 2 年的监测,共记录底栖动物 3 门 23 属 32 种,并基于底栖动物完整性指数对监测结果进行了评价。结果表明:赣江尾间段动物群落以滤食性和耐污性软体动物为优势类群;空间分布上,主支及其坝前缓流区群落结构稳定、多样性较高,中支、北支、南支群落相对简单,生物完整性偏低;工程运行后,主支底栖动物的生物完整性最优,表现出较强的抗干扰能力,干流及北支、南支各监测点的底栖动物完整性指数也达到“无干扰”或“轻度干扰”状态,中支底栖动物群落变化较大,水生态系统受到重度干扰。

关键词:底栖动物;群落结构;完整性指数;赣江尾间工程

Evolution characteristics of benthic macroinvertebrate community structure before and after operation of tail reach project of the Ganjiang River//Hu Xiaofei^{1,2}, Wu Tingfeng³, Yan Wenming³, Zhang Qi³, Liu Yudong⁴, Zhou Yadong³, Li Gaoxiang³, Gong Zhijun¹(1. *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences*; 3. *State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University*; 4. *Nanchang Municipal Hydrology Bureau of Jiangxi Province*)

Abstract: To evaluate the disturbance caused by the tail reach project of the Ganjiang River on the river's aquatic ecosystem, a two-year monitoring program was conducted on benthic macroinvertebrates within the main stem and its four downstream branches (the Main, North, Middle, and South branches). A total of 32 species belonging to 23 genera across 3 phyla were recorded. The ecological status was assessed using the benthic index of biotic integrity (B-IBI). The results indicated that the benthic community in the tail reach of the Ganjiang River was dominated by filter-feeding and pollution-tolerant mollusks. In terms of spatial distribution, the Main Branch and the slow-flowing areas upstream of the dam exhibited stable community structures and higher biodiversity. Conversely, the community compositions of the Middle, North, and South branches were relatively simple, characterized by lower biotic integrity. After the operation of the project, the Main Branch maintained the highest biotic integrity, demonstrating robust resistance to disturbance. Monitoring sites in the main stem, as well as the North and South branches, reached undisturbed or slightly disturbed status according to the B-IBI. However, the Middle Branch experienced significant shifts in community structure, indicating that its aquatic ecosystem was heavily disturbed by the project.

Key words: benthic macroinvertebrates; community structure; index of biotic integrity; tail reach project of the Ganjiang River

河流生态系统作为地球上最重要的淡水生态系统之一,在维持生物多样性、提供生态服务和支持人类社会等方面发挥着不可替代的作用^[1]。健康的河流生态系统不仅有助于保障水资源供给,还在气候调节、水质净化及生物栖息地维持等方面发挥着关键作用^[2]。然而,受全球气候变化与人类活动影响,河流生态系统正面临着前所未有的压力,表

现为水文情势改变、水质恶化和生物多样性下降等^[3-4]。随着流域开发强度持续增加,水利工程在改善防洪、供水与航运条件的同时,也改变了水动力格局与水文连通性,从而引起河流生态系统的深层次响应^[5]。

近年来,随着我国大中型流域水利工程相继投入运行,其对水生态系统的影响已成为生态水文学

基金项目:国家自然科学基金项目(41971047,42001028,42220104010);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240201015-2013)
作者简介:胡小飞(1997—),男,硕士研究生,主要从事河流水动力及水生态研究。E-mail:xfhu@niglas.ac.cn
通信作者:吴挺峰(1981—),男,研究员,博士,主要从事湖库水动力学研究。E-mail:tfwu@niglas.ac.cn

研究的热点^[6-9]。然而,目前针对工程运行前后水生生态系统响应机制的研究多侧重于响应迅速的浮游生物,从底栖生物视角揭示水生生态系统结构与功能变化的研究相对不足^[10-11]。底栖动物作为淡水生态系统的重要生物类群,在物质循环和能量传递过程中发挥着关键作用^[12-14]。不同类群的底栖动物对溶解氧、营养盐、底质结构及污染物具有差异化的生态耐受性,其群落组成和分布格局能够直观反映水体环境状况及其变化趋势^[15-16]。相较于生命周期较短、响应迅速的浮游生物,底栖动物因生活史较长、迁移能力有限,在环境变化下往往无法主动回避不利条件,而是被动承受环境胁迫^[17-18]。因此,其群落结构能够在较长时间尺度上整合并记录水体受扰与恢复的过程,成为反映生态系统长期变化的重要指示生物。基于这一特性,底栖动物被广泛应用于河流生态健康评估与人类活动影响监测^[19-23]。

赣江尾间区域位于南昌市境内,承担着流域来水调蓄、污染削减与生态连通的重要功能,其水生态环境质量与物种多样性受多种因素的影响,包括水量分配不均、污染物排放、农业径流、采砂、工业废水以及过度开发等^[24-27]。尾间工程的建设在改善城市水资源调控能力的同时,也显著改变了下游的水动力条件和沉积环境,可能导致底栖动物栖息地的重构及群落结构的演变。由于该区域同时受工程调控与人类活动双重影响,其生态系统变化特征复杂^[28-30],亟须基于长期监测数据开展系统的生态效应研究。

因此,本文以赣江尾间为研究对象,基于赣江尾间工程运行前后底栖动物监测数据,系统分析群落组成、结构特征及功能的时空演变规律,并以底栖动物为核心构建底栖动物完整性指数(benthic index of biotic integrity, B-IBI),从生物学视角评估工程运行对尾间水生生态系统的影响,以期揭示工程扰动下底栖动物群落演替的生态机制,阐明其生态指示意义,为赣江流域以及类似河流尾间地区的生态系统评估与管理提供参考。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

赣江是江西省第一大河流,也是鄱阳湖流域五大水系之首、长江八大支流之一。赣江发源于石城县洋地乡石寮崇(赣源崇),在流经丰城和南昌后,进入其尾间段。赣江干流在八一桥下游的扬子洲处分为东、西两河。西河在樵舍镇分为主支和北支,主支是赣江进入鄱阳湖和长江的主要通道,经昌邑后在吴城注入鄱阳湖,北支经蒋埠后在下堡村分为官

港河和沙汊河,分别在朱港和成新注入鄱阳湖。东河在礁头处分为中支和南支,中支经南新后在朱港注入鄱阳湖,南支经滁槎后在三江口处注入鄱阳湖。赣江尾间水系图见图1。

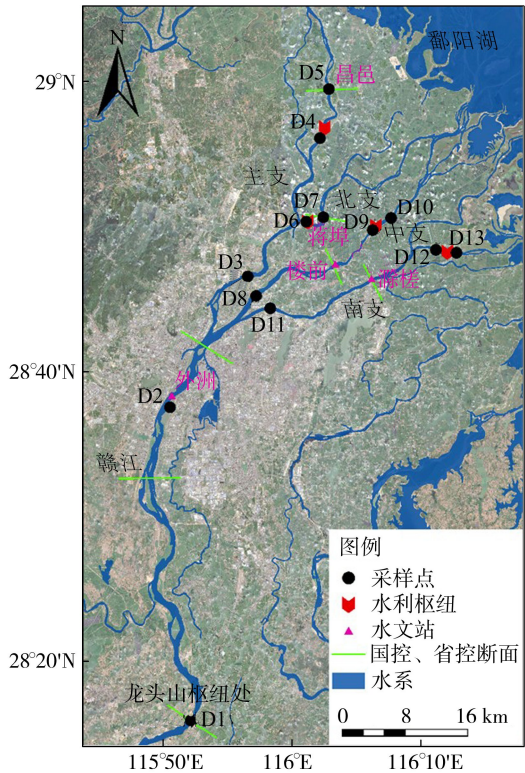


图1 赣江尾间段水系及采样点分布

赣江尾间段属于亚热带季风气候,气候温和,雨量丰沛,年平均气温 17.0~17.7℃。冬季多偏北风,夏季多偏南风,年平均风速为 2.3 m/s,多年平均降水量为 1 600 mm。降水量年内分配极不均匀,主要集中在 4—6 月,约占全年降水量的 50%。外洲水文站是赣江下游尾间段的控制站,位于南昌市桃花乡外洲村上游。根据 1957—2022 年赣江外洲水文站实测数据,赣江尾间段流域表现出明显的季节性水文特征。汛期一般在 3—9 月,主汛期 4—7 月,洪峰多出现在 6 月。枯期在 10 月至次年 2 月,年最低水位一般出现在 1 月和 12 月。

近年来,随着人口增长、城市化进程加快以及水资源开发利用程度的提高,赣江流域面临着供水和航运保障能力不足、水质污染和水体富营养化等问题^[31]。为抬高枯水期水位,优化水资源配置,提升河湖水域岸线景观品质,并改善航运及水资源利用条件,赣江尾间枢纽工程于 2024 年 9 月建成并投入运行。工程通过抬高并维持赣江南昌段枯水期水位至 15.5 m,提高了赣江南昌段供水和航运安全保障,大幅提升了枯水期水资源承载能力,改善了低枯流量时段以滕王阁为核心的水文化和水景观,但是也对其原有生态系统产生了扰动,亟须加以研究。

1.2 数据来源

根据赣江尾间段的地形地貌、水文特征和人类活动,在赣江尾间段的上游干流和下游四支汉河共布设 13 个底栖动物采样点(图 1 中的 D1~D13)。其中,D1 和 D2 位于尾间段干流,D3、D4、D5 分别位于主支上、中、下游,D6 和 D7 位于北支,D8~D10 位于中支,D11~D13 位于南支。

分别于 2024 年 8 月(丰水期)、2024 年 10 月(枯水期)、2025 年 3 月(平水期)、2025 年 8 月(丰水期)和 2025 年 10 月(枯水期)对底栖动物进行采集和分析。螺、蚌等较大型底栖动物用带网夹泥器采集;水生昆虫、水栖寡毛类和小型软体动物用改良彼得森采泥器采集。采集的泥样先用 40 目分样筛反复筛洗,带回实验室后在解剖镜下进一步分检,用显微镜进行观察鉴定与计数。

2 研究方法

为准确评估物种组成、空间分布及环境稳定性,可采用优势度、香农-维纳多样性指数和 Pielou 均匀度指数等从不同维度反映群落的复杂程度与稳定性。

底栖动物完整性指数通常基于群落丰富度(如总分类单元数)、多样性指数(如香农-维纳多样性指数)和功能特征(如丰度、生物量)等指标构建^[32-34]。根据赣江尾间段底栖动物群落的结构特征,本文共筛选出 15 项候选生物指标,包括香农-维纳多样性指数(x_1)、Margelef 丰富度指数(x_2)、Pielou 均匀度指数(x_3)、总分类单元数(x_4)、甲壳动物和软体动物分类单元数(x_5)、摇蚊分类单元数(x_6)、摇蚊百分比(x_7)、颤蚓百分比(x_8)、甲壳动物和软体动物百分比(x_9)、优势分类单元个体数百分比(x_{10})、耐污类群分类单元百分比(x_{11})、捕食者个体相对丰度(x_{12})、滤食者个体相对丰度(x_{13})、刮食者个体相对丰度(x_{14})、收集者个体相对丰度(x_{15}),并对各指标进行描述性统计分析。

参照点的确定依据以下流程:①利用主成分分析与偏相关分析,从所有采样点的水环境理化因子中筛选出独立且关键的环境驱动变量;②对筛选出的环境因子进行聚类分析;③结合聚类结果与生境特征,选取受干扰程度最低、生态状态最优的采样点作为参照点^[35-36]。最终确定 D2、D3、D7、D12 为参照点,其他采样点为受损点。

经过初步选取候选生物指标,测定或计算候选生物指标参数并分析其分布范围、判别能力及相关性等步骤^[37],筛选出生物学意义明确且对干扰反应敏感的参数。候选生物指标的判别能力采用参照点

与受损点间的箱体重叠指数(interquartile overlap, IQ)评估。当 IQ 不低于 2 时,认为该指标具有良好的判别能力^[38]。为避免指标间的重复信息,将通过判别能力分析的候选生物指标进行 Pearson 相关性分析,当任意 2 个生物指标的相关性系数绝对值 $|r|$ 大于 0.75 时,视为高度相关,需剔除其中一个^[35],由此确定构建赣江尾间段底栖动物完整性指数的核心生物指标。

采用比值法^[39]对赣江下游采样点进行底栖动物完整性指数的计算及确定健康等级分界点,对于受损点数值大于参照点的生物指标,采取 5% 分位数法;对于受损点数值小于参照点的生物指标,采取 95% 分位数法,计算方式如下:

$$I_m = \sum_i \frac{M_i - x_{im}}{M_i - P_{5i}} + \sum_j \frac{x_{jm}}{P_{95j}} \quad (1)$$

式中: I_m 为采样点 m 的底栖动物完整性指数; x_i 为受损点数值大于参照点的生物指标; M_i 为指标 x_i 所有采样点的最大值; x_{im} 为采样点 m 对应的指标 x_i 的值; P_{5i} 为指标 x_i 的 5% 分位数; x_j 为受损点数值小于参照点的生物指标; x_{jm} 为采样点 m 对应的指标 x_j 的值; P_{95j} 指标 x_j 的 95% 分位数。

根据比值法计算结果,以参照点 25% 分位数为健康评价的标准,对小于 25% 分位数的分布范围进行三等分^[20,35],即无干扰(指数超过 25% 分位数)、轻度干扰、中度干扰、重度干扰。

本文所涉及的所有数据基本统计指标(包括最小值、最大值、均值、标准差、25% 分位数、中位数和 75% 分位数)均通过 SPSS Statistics 27 软件进行计算与分析。相关性分析采用 Pearson 相关系数,并通过 SPSS Statistics 27 进行相关性检验,以确定变量之间的线性关系。所有数据的可视化分析使用 Origin 2022 软件完成,以保证图表的精确性和可读性。

3 结果与分析

3.1 底栖动物群落分布特征

赣江尾间段共鉴定底栖动物 3 门 23 属 32 种(表 1),其中软体动物门 18 种,节肢动物门 8 种,环节动物门 6 种。总体来看,软体动物门占据明显优势,其种类数和个体数量均显著高于其他门类。主要优势类群为螺类。节肢动物门以摇蚊科幼虫为主,环节动物门则以水丝蚓科和尾鳃蚓科为主。整体上,赣江尾间底栖动物群落组成相对简单,以大型耐污性软体动物为主导,反映典型的河口型水域生态特征^[40]。

表 1 赣江尾间段底栖动物名录

门类	属或种	拉丁文名称
软体动物门	角形环梭螺	<i>Bellamya angularis</i>
	梨形环梭螺	<i>Bellamya purificata</i>
	双旋环梭螺	<i>Bellamya dispiralis</i>
	铜锈环梭螺	<i>Bellamya aeruginosa</i>
	椭圆萝卜螺	<i>Radix swinhoei</i>
	坚环梭螺	<i>Bellamya lapillorum</i>
	大沼螺	<i>Parafossarulus eximius</i>
	耳河螺	<i>Rivularia auriculata</i>
	中国淡水蚌	<i>Novaculina chinensis</i>
	河蚬	<i>Corbicula fluminea</i>
	河螺	<i>Rivularia</i> sp.
	中华圆田螺	<i>Cipangopaludina cathayensis</i>
	福寿螺	<i>Pomacea canaliculata</i>
	鱼尾楔蚌	<i>Cuneopsis pisciculus</i>
	环梭螺	<i>Bellamya</i> sp.
	纹沼螺	<i>Parafossarulus striatulus</i>
	方格短沟蜷	<i>Semisulcospira cancellata</i>
	淡水壳菜	<i>Limnoperna fortunei</i>
节肢动物门	秀丽白虾	<i>Exopalaemon modestus</i>
	长足摇蚊	<i>Tanypus</i> sp.
	多足摇蚊	<i>Polypedilum</i> sp.
	隐摇蚊	<i>Cryptochironomus</i> sp.
	沼虾	<i>Macrobrachium</i> sp.
	摇蚊	<i>Chironomus</i> sp.
	前突摇蚊	<i>Procladius</i> sp.
	小摇蚊	<i>Microchironomus</i> sp.
环节动物门	苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i>
	尾鳃蚓	<i>Branchiura</i> sp.
	巨毛水丝蚓	<i>Limnodrilus grandisetosus</i>
	霍甫水丝蚓	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>
	齿吻沙蚕	<i>Nephtys</i> sp.
	拟扁蛭	<i>Hemiclepsis</i> sp.

3.2 工程运行前后底栖动物群落演变特征

2024 年 8 月(丰水期)赣江尾间底栖动物总数量为 1401.5 个/L(表 2),以软体动物门为主(740 个/L),节肢动物门次之(413.5 个/L),环节动物门较少(248 个/L)。工程运行初期(2024 年 10 月,枯水期),随着流量和流速的降低,底栖动物群落结构出现初步响应。此时总数量略有增加,但香农-维纳多样性指数下降至 0.70。软体动物门数量下降至 420 个/L,而节肢动物门显著增加至 954 个/L,环节动物门数量保持在 248 个/L。水文条件的改变在短期内为摇蚊等节肢动物提供了适宜的生境条件,导致其种群数量迅速增加,群落优势度

表 2 赣江尾间段底栖动物群落分布及香农-维纳多样性指数

时间	数量/(个/L)				香农-维纳多样性指数
	软体动物门	节肢动物门	环节动物门	底栖动物	
2024 年 8 月	740.0	413.5	248.0	1401.5	0.86
2024 年 10 月	420.0	954.0	248.0	1622.0	0.70
2025 年 3 月	225.0	1.0	1.5	227.5	0.42
2025 年 8 月	359.0	113.5	0	472.5	0.54
2025 年 10 月	227.5	93.7	0	321.1	0.49

集中,进而引起整体多样性下降。

工程稳定运行后,底栖动物数量显著减少。2025 年 8 月(丰水期)和 10 月(枯水期)底栖动物总数量仅为 2024 年同期的 33.7%(472.5 个/L)和 19.8%(321.5 个/L)。群落结构由软体动物门单一主导,节肢动物门显著减少,环节动物门完全消失,物种丰富度和多样性均显著降低。

空间分布上,工程运行前后底栖动物群落呈现显著差异(图 2)。相较于工程运行前(2024 年 8 月)及运行初期(2024 年 10 月),2025 年同水期赣江尾间除主支外的北支、中支和南支底栖动物数量均有所减少。主支断面中,D3 点位变化较小,而 D4 点位底栖动物数量显著增多(8 月为 2024 年同期的 3.8 倍,10 月为 2024 年同期的 60 倍)。D4 位于主支枢纽坝上游回水区,受闸坝拦蓄作用形成缓流与细粒泥沙沉积环境,食物资源相对丰富,适宜软体动物栖息与繁殖。因此,在工程运行后的多个时期(2025 年 8 月与 10 月),该断面表现出较高的个体密度与生物量水平。

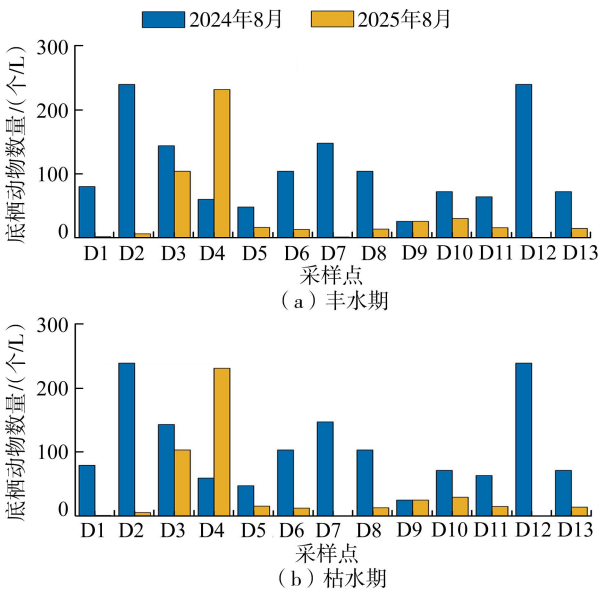


图 2 不同水期各采样点底栖动物数量

3.3 工程运行前后底栖动物完整性对比

3.3.1 赣江尾间段底栖动物完整性指数构建

为了构建底栖动物完整性指数,以评估工程前后水生态系统的变化,需要预先确定适应赣江尾间段的生物指标体系。本文基于工程运行前(2024 年 8 月)及运行初期(2024 年 10 月)的底栖动物监测数据的统计分析,量化其最小值、最大值、均值、标准差、25%分位数、中位数及 75%分位数等分布特征。候选生物指标判别能力结果(图 3)表明: x_1 、 x_2 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_{13} 共 6 项指标的 IQ 不低于 2,具备较强的判别能力。相关性分析结果(图 4)表明, x_1 、 x_2 和 x_4 间

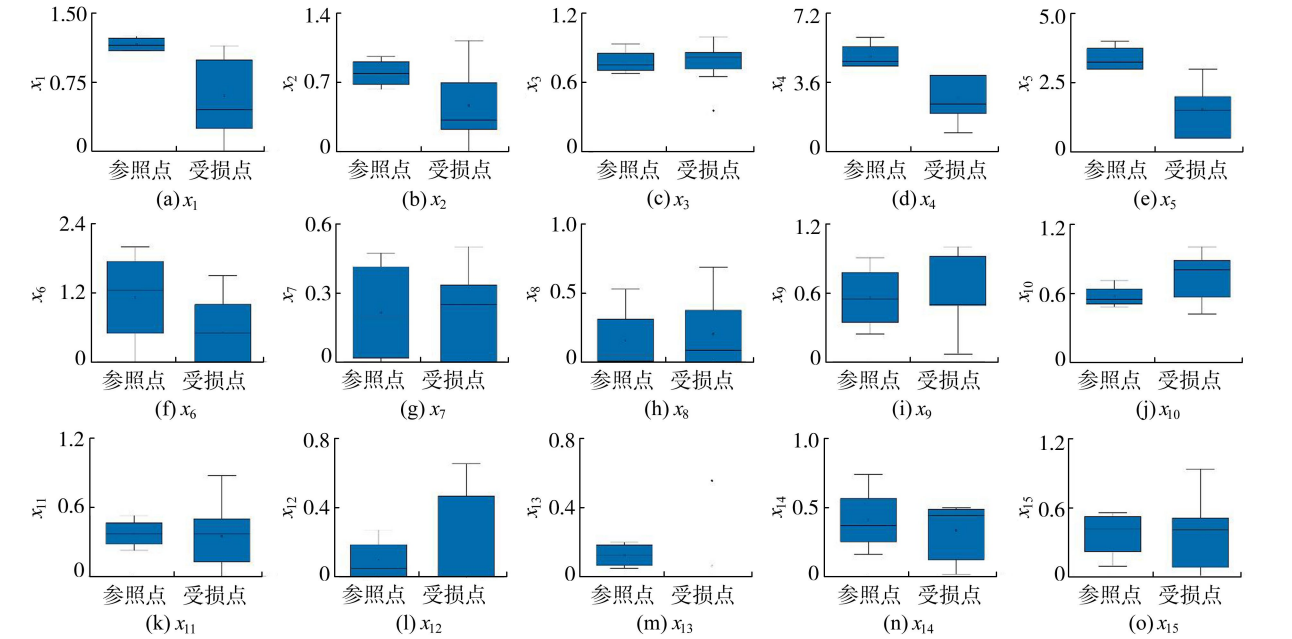


图3 参照点和受损点候选生物指标判别能力

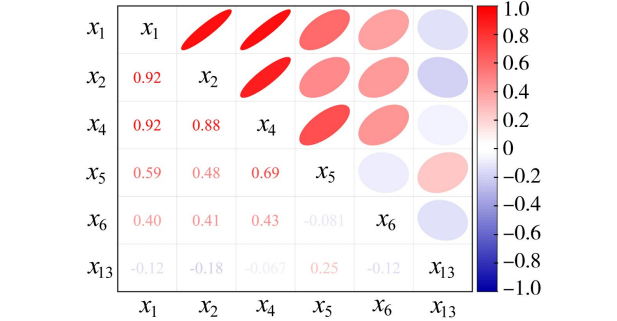


图4 候选生物指标的相关性分析

的相关系数 $|r|>0.75$,据此,剔除 x_2 和 x_4 ,保留其余指标。最终确定 x_1 、 x_5 、 x_6 及 x_{13} 为构成赣江尾间段底栖动物完整性指数的核心指标。

据以上所确定的评价指标,采用比值法对核心生物指标进行归一化处理(式(1))。由于 x_1 、 x_5 、 x_6 和 x_{13} 在受损点的数值均低于参照点(图3),因此均采用95%分位数法进行标准化计算(计算参数见表3)。基于各采样点计算结果,以工程运行前(2024年8月)及运行初期(2024年10月)底栖动物完整性指数(I_B)的25%分位数(1.09)作为运行后不同阶段(2025年3月、8月和10月)评价的标准。当 $I_B \geq 1.09$ 时,判定该采样点为无干扰,低于该值的采取三分法划分干扰等级:当 $0 < I_B \leq 0.36$ 时,判定为重度干扰;当 $0.36 < I_B \leq 0.73$ 时,判定为中度干扰;当 $0.73 < I_B < 1.09$ 时,判定为轻度干扰。

表3 采样点核心生物指标计算参数

分位数	x_1	x_5	x_6	x_{13}
5%分位数	0.15	0.5	0	0
95%分位数	1.23	3.7	1.7	0.34
最大值	1.25	4.0	2.0	0.56

3.3.2 工程运行后赣江尾间段水生态评价

基于构建的底栖动物完整性指数评价结果(图5),赣江尾间段在工程运行后呈现显著的时空异质性,其分布格局与枢纽调控下的水文动力条件变化密切相关。工程运行后,尾间生态系统经历了明显的扰动和再平衡过程。与运行前(2024年8月)及运行初期(2024年10月)相比,在自然水文情势与工程调度的共同作用下,2025年8月大部分采样点的底栖动物完整性指数达到“无干扰”或“轻度干扰”状态;2025年10月,多数采样点仍维持较高的完整性,表明工程运行后赣江尾间生态系统在自然和人为双重调控的水文体制下逐步建立新的动态平衡。

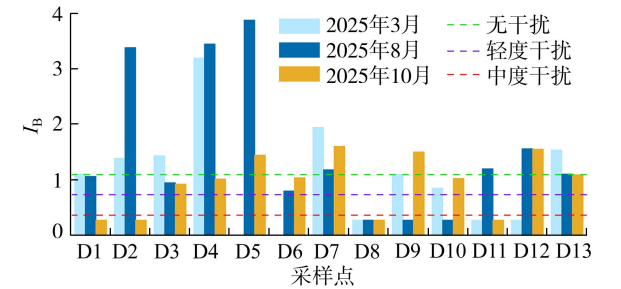


图5 工程运行后赣江尾间段水生态健康评价结果

空间分布特征显示,水利枢纽工程显著改善并稳定了主干河道的生物完整性。其中主支断面(D3、D4、D5)在多数时期表现为“无干扰”或“轻度干扰”状态,尤其在2025年8月,D4(主支枢纽坝上)与D5(主支下游)点位的底栖动物完整性指数分别达到3.45和3.88。这主要归因于枢纽运行后主支获得了相对稳定且充足的流量,坝前形成的缓

流区促进了泥沙沉积和底质稳定,为滤食性软体动物等底栖动物群落提供了适宜的生存环境,从而显著提升了系统的生物完整性。

相较之下,干流(D1、D2)、北支(D6、D7)及南支(D11~D13)的完整性虽存在一定季节性波动,但整体仍维持在“轻度干扰”或“无干扰”水平。这些区域受季节性径流与枢纽调控共同影响,水文节律发生变化,但生态系统仍具备较强的自然恢复弹性。中支断面(D8~D10)则干扰较为明显,3次监测中均有点位处于“重度干扰”状态,表明该支流生态系统对工程调控的敏感性较高。

总体而言,赣江尾间水利枢纽运行后,不同支流水力与底质生境均发生了不同程度的变化。在气候变化及水利工程双重胁迫下,未来尾间区域水资源管理和水环境保护应统筹各支流生态需水过程要求,优化水利调度方式,以促进尾间段乃至下游入湖河口区水生生态系统向更稳定、更健康的方向演进。

4 结 论

a. 赣江尾间段共检测出底栖动物 3 门 23 属 32 种,以软体动物门为优势类群,数量和生物量均明显高于节肢动物门与环节动物门。群落以滤食性、耐污性软体动物为主导。空间上,主支及其坝前缓流区底质稳定,群落结构稳定且多样性较高;中支、北支、南支及裸露或硬化底质区域底栖动物数量下降,多样性偏低,生物完整性较弱。

b. 香农-维纳多样性指数、甲壳动物和软体动物分类单元数、摇蚊分类单元数及滤食者个体相对丰度是构成赣江尾间段底栖动物完整性指数的核心指标。

c. 工程运行后赣江尾间段水生态状况呈现显著的时空差异。整体上,生态系统在运行后逐步建立新的动态平衡,2025 年各时期大部分点位处于“无干扰”或“轻度干扰”水平。空间上,主支断面生物完整性最高,坝上与下游区域生境条件显著改善;干流及北、南支总体处于“轻度干扰”或“无干扰”状态,具有一定的恢复能力;中支断面干扰较为严重,部分点位处于“重度干扰”状态。

参考文献:

[1] 孙然好,魏琳沅,张海萍,等. 河流生态系统健康研究现状与展望:基于文献计量研究[J]. 生态学报,2020,40(10): 3526-3536. (Sun Ranhao, Wei Linyuan, Zhang Haiping, et al. Research status and prospects of river ecosystem health: a bibliometric analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (10): 3526-3536. (in

Chinese))
[2] 易雨君,丁航,叶敬吁. 基于生态完整性的水生态健康评价研究综述[J]. 水资源保护,2024,40(5):1-10. (Yi Yujun,Ding Hang,Ye Jingxu. Review of water ecological health assessment based on ecological integrity[J]. Water Resources Protection,2024,40(5):1-10. (in Chinese))
[3] Cui Tong,Tian Fuqiang,Yang Tao,et al. Development of a comprehensive framework for assessing the impacts of climate change and dam construction on flow regimes[J]. Journal of Hydrology,2020,590:125358,doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125358.
[4] Jiang Shanhu,Zhou Le,Ren Liliang,et al. Development of a comprehensive framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on river hydrological health variation [J]. Journal of Hydrology,2021,600:126566,doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126566.
[5] 潘玉波,段丽群. 水利工程建设对流域生态系统影响的量化评估与缓解设计[J]. 中国水运,2025(18):104-106. (Pan Yubo,Duan Liquan. Quantitative assessment and mitigation design of the impact of water conservancy project construction on watershed ecosystem [J]. China Water Transport,2025(18):104-106. (in Chinese))
[6] 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))
[7] 陈雪,徐富刚,李琴,等. 基于水情变化的河流生态流量阈值及多时间尺度保障率计算[J]. 水资源保护,2024,40(4):128-136. (Chen Xue,Xu Fugang,Li Qin, et al. River ecological flow threshold and multi-time scale guarantee rate calculation based on hydrological regime changes[J]. Water Resources Protection,2024,40(4):128-136. (in Chinese))
[8] Li Yanlin,Yang Jiaojiao,Wang Yuchun,et al. Sediment eDNA reveals damming triggered changes in algal and fish communities at the Three Gorges Reservoir in China[J]. Environmental Research,2025,276:121474,doi:10.1016/j.envres.2025.121474.
[9] Hao Haoran,Dong Ningpeng,Yang Mingxiang,et al. The changing hydrology of an irrigated and dammed Yangtze River:streamflow,extremes,and lake hydrodynamics[J]. Water Resources Research,2024,60(10):e2024WR037841,doi:10.1029/2024WR037841.
[10] 吴利,唐会元,龚云,等. 三峡水库正常运行下库区干流浮游动物群落特征研究[J]. 水生态学杂志,2021,42(1):58-65. (Wu Li,Tang Huiyuan,Gong Yun, et al. Temporal-spatial distribution of zooplankton community in

- the main stem of Three Gorges Reservoir under normal operation[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(1): 58-65. (in Chinese))
- [11] 唐炳然,何艺欣,杨国峰,等. 三峡库区调控下泄水期支流浮游植物生长限制因子解析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(3): 138-151. (Tang Bingran, He Yixin, Yang Guofeng, et al. Identification of phytoplankton growth limiting factors during flood seasons in tributary of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2023, 45(3): 138-151. (in Chinese))
- [12] 黄彬彬,李光锦,丰茂成,等. 赣江干流底栖动物群落结构与环境因素的关系[J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2022, 20(2): 120-128. (Huang Binbin, Li Guangjin, Feng Maocheng, et al. Characteristics of benthos community structure and its relationship with environmental factors within the mainstream of Ganjiang River[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2022, 20(2): 120-128. (in Chinese))
- [13] 张敏,蔡庆华,渠晓东,等. 三峡成库后香溪河库湾底栖动物群落演变及库湾纵向分区格局动态[J]. *生态学报*, 2017, 37(13): 4483-4494. (Zhang Min, Cai Qinghua, Qu Xiaodong, et al. Macroinvertebrate succession and longitudinal zonation dynamics in Xiangxi Bay, after impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4483-4494. (in Chinese))
- [14] 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子分析[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. (in Chinese))
- [15] 费娇娇,温舒珂,董芮,等. 近 40 年巢湖底栖动物演变特征及驱动因素[J]. *湖泊科学*, 2025, 37(4): 1381-1395. (Fei Jiaojiao, Wen Shuke, Dong Rui, et al. Macrozoobenthic community succession and its drivers in Lake Chaohu over the past 40 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(4): 1381-1395. (in Chinese))
- [16] Chauvel N, Raoux A, Weill P, et al. Sediment grain size and benthic community structure in the eastern English Channel: species-dependent responses and environmental influence [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 200: 116042, doi:10.1016/j.marpolbul.2024.116042.
- [17] 张敏,邵美玲,蔡庆华,等. 丹江口水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(2): 281-290. (Zhang Min, Shao Meiling, Cai Qinghua, et al. Macroinvertebrate community structure and the biological assessment to the water quality of the Danjiangkou Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(2): 281-290. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 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. (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, 27(6): 919-927. (in Chinese))
- [20] 慕林青,张海萍,赵树旗,等. 永定河底栖动物生物完整性指数构建与健康评价[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(4): 697-707. (Mu Linqing, Zhang Haiping, Zhao Shuqi, et al. River health assessment of Yongding River based on benthic integrated biotic index [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(4): 697-707. (in Chinese))
- [21] 游清徽,刘玲玲,方娜,等. 基于大型底栖无脊椎动物完整性指数的鄱阳湖湿地生态健康评价[J]. *生态学报*, 2019, 39(18): 6631-6641. (You Qinghui, Liu Lingling, Fang Na, et al. Assessing ecological health of Poyang Lake wetland, using benthic macroinvertebrate-based index of biotic integrity (B-IBI) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(18): 6631-6641. (in Chinese))
- [22] 杨青瑞,陈求稳. 漓江大型底栖无脊椎动物及其与水环境的关系[J]. *水利水电科技进展*, 2010, 30(6): 8-10. (Yang Qingrui, Chen Qiwen. Relationship between macroinvertebrates and aquatic environment in Lijiang River [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2010, 30(6): 8-10. (in Chinese))
- [23] 徐宗学,武玮,殷旭旺. 渭河流域水生态系统群落结构特征及其健康评价[J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(1): 23-30. (Xu Zongxue, Wu Wei, Yin Xuwang. Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihe Basin, China [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(1): 23-30. (in Chinese))
- [24] 郭强,叶许春,刘佳,等. 土地利用变化对流域水文过程时空分异的影响:以赣江流域为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(12): 2747-2759. (Guo Qiang, Ye Xuchun, Liu Jia, et al. Impact of land use change on spatio-temporal differentiation of watershed hydrological processes: a case study of Ganjiang River Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(12): 2747-2759. (in Chinese))
- [25] 胡强,王姣,刘颖,等. 水库建设对赣江流域水沙情势的

- 影响[J]. 人民长江,2021,52(4):1-5. (Hu Qiang, Wang Jiao, Liu Ying, et al. Effect of reservoir construction on runoff and sediment characteristics in Ganjiang River[J]. Yangtze River,2021,52(4):1-5. (in Chinese))
- [26] 王克军,陈锐琪,毛劲乔,等. 基于生境模拟法的赣江尾闾四大家鱼产卵生境模拟[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6):120-125. (Wang Kejun, Chen Ruiqi, Mao Jingqiao, et al. Simulation of spawning habitat for four major Chinese carps in lower reaches of the Ganjiang River based on habitat simulation method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(6):120-125. (in Chinese))
- [27] 陈珺,嵇敏,林江,等. 赣江尾闾河段水沙特性及河床演变[J]. 水利水电科技进展,2012,32(3):1-5. (Chen Jun, Ji Min, Lin Jiang, et al. Runoff-sediment characteristics and riverbed evolution of Ganjiang River sink[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(3):1-5. (in Chinese))
- [28] 仝路路,郭传波,王瑞,等. 多重人类活动干扰下赣江流域水环境和鱼类资源的研究现状分析[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(12):2879-2892. (Tong Lulu, Guo Chuanbo, Wang Rui, et al. Research status of water environment and fish resources under multiple human disturbances in the Ganjiang River Basin; a review[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(12):2879-2892. (in Chinese))
- [29] 乔时雨,李国芳,李国文,等. 变化环境下赣江流域水文情势演变及归因分析[J]. 人民长江,2024,55(5):99-106. (Qiao Shiyu, Li Guofang, Li Guowen, et al. Analysis of hydrologic regime evolution and attribution in Ganjiang River Basin under changing environment [J]. Yangtze River,2024,55(5):99-106. (in Chinese))
- [30] 胡芳,刘聚涛,冯倩,等. 河道采砂对赣江中下游水生态环境的影响研究[J]. 人民长江,2019,50(11):69-74. (Hu Fang, Liu Jutao, Feng Qian, et al. Impact of sand mining on aquatic ecological environment of middle and lower reaches of Ganjiang River[J]. Yangtze River,2019,50(11):69-74. (in Chinese))
- [31] 王鹏,齐述华,陈波. 赣江流域土地利用方式对河流水质的影响[J]. 生态学报,2015,35(13):4326-4337. (Wang Peng, Qi Shuhua, Chen Bo. Influence of land use on river water quality in the Ganjiang basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13):4326-4337. (in Chinese))
- [32] 王业耀,阴琨,杨琦,等. 河流水生态环境质量评价方法研究与应用进展[J]. 中国环境监测,2014,30(4):1-9. (Wang Yeyao, Yin Kun, Yang Qi, et al. Research and application progress of assessment for river water ecosystem quality [J]. Environmental Monitoring in China,2014,30(4):1-9. (in Chinese))
- [33] 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]. 水生生态学杂志,2023,44(4):85-91. (Wen Wei, Li Shuangshuang, Feng Taohui, 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. (in Chinese))
- [34] 周莹,渠晓东,赵瑞,等. 河流健康评价中不同标准化方法的应用与比较[J]. 环境科学研究,2013,26(4):410-417. (Zhou Ying, Qu Xiaodong, Zhao Rui, et al. Standardized methods for selecting reference and impaired sites to evaluate river health[J]. Research of Environmental Sciences,2013,26(4):410-417. (in Chinese))
- [35] 陈宇飞,严航,夏霆,等. 基于浮游动物生物完整性指数的太湖流域生态系统评价[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2022,44(3):335-343. (Chen Yufei, Yan Hang, Xia Ting, et al. Ecosystem assessment of Taihu Lake Basin based on zooplankton index of biological integrity [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition),2022,44(3):335-343. (in Chinese))
- [36] 王瑜,李黎,林岚璇,等. 松花江流域大型底栖动物生物完整性指数构建及其适用性[J]. 中国环境监测,2019,35(4):20-30. (Wang Yu, Li Li, Lin Kuixuan, et al. Development and applicability analysis of benthic-macroinvertebrate index of biotic integrity in the Songhua River Basin [J]. Environmental Monitoring in China, 2019,35(4):20-30. (in Chinese))
- [37] 周彦锋,王东伟,何利聪,等. 基于浮游植物生物完整性指数的淮中游水生态健康评价[J]. 湿地科学,2024,22(4):477-486. (Zhou Yanfeng, Wang Dongwei, He Licong, et al. Assessment of water ecological health in the middle reaches of Huaihe River based on phytoplankton biological integrity index [J]. Wetland Science, 2024, 22(4):477-486. (in Chinese))
- [38] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, et al. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates [J]. Journal of the North American Benthological Society,1996,15(2):185-211.
- [39] 宋蒙蒙,田爽,卢奥然,等. 渭河河流生态系统完整性评价体系的构建[J]. 大连海洋大学学报,2020,35(2):288-295. (Song Mengmeng, Tian Shuang, Lu Aoran, et al. Establishment of evaluation system of an ecosystem integrity in Weihe River [J]. Journal of Dalian Ocean University,2020,35(2):288-295. (in Chinese))
- [40] 张嵩,张崇良,徐宾铎,等. 基于大型底栖动物群落特征的黄河口及邻近水域健康度评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2017,47(5):65-71. (Zhang Song, Zhang Chongliang, Xu Binduo, et al. Ecological status assessment based on macrobenthic community characteristics in Yellow River estuary and its adjacent waters[J]. Periodical of Ocean University of China,2017,47(5):65-71. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-30 编辑:俞云利)