

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.020

梯形透空丁坝局部冲淤演变对底栖动物群落的影响

常留红^{1,2}, 章富君^{1,2}, 王瀚锐³, 袁卓^{1,2}, 李晨玉^{1,2}, 邓涯⁴

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 长沙理工大学洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114; 3. 南京水利科学研究院生态环境研究所, 江苏南京 210029; 4. 南京水利科学研究院港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要:依托长江南京以下12.5 m深水航道中梯形透空丁坝示范应用工程, 建立泥沙运动数值模型, 结合现场监测数据, 分析了梯形透空丁坝周围底栖动物群落组成和栖息密度, 采用香农-维纳指数、辛普森多样性指数和Pielou均匀度指数分析底栖动物物种多样性, 揭示梯形透空丁坝局部冲淤演变对底栖动物群落的影响机制。结果表明: 床面泥沙在梯形透空丁坝坝前淤积, 以中值粒径0~0.25 mm的沙质底质为主, 有利于双壳类、寡毛类等底栖动物的穴居; 坝内空腔和坝后床面相对稳定, 以中值粒径0~0.1 mm的浮泥底质为主, 为摇蚊类、寡毛类等底栖动物营造了适宜的索饵场和缓流生境; 梯形透空丁坝局部底栖动物群落组成相对稳定且多样, 梯形透空丁坝能为不同的底栖动物提供栖息场所, 并为鱼类等水生生物提供丰富的饵料和适宜的栖息场所。

关键词:梯形透空丁坝; 冲淤演变; 河床底质; 底栖动物群落

中图分类号:TV863; TV865 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0170-08

Impact of local erosion and sedimentation evolution of trapezoidal hollow spur dike on benthic animal communities//CHANG Lihong^{1,2}, ZHANG Fujun^{1,2}, WANG Hanrui³, YUAN Zhuo^{1,2}, LI Chenyu^{1,2}, DENG Ya⁴
(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Center for Eco-Environmental Research, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering Ministry of Communications, PRC, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the demonstration application project of trapezoidal hollow spur dike in a 12.5 m deep water channel below Nanjing on the Yangtze River, a numerical model of sediment movement was established. Combined with on-site monitoring data, the composition and habitat density of benthic animal communities around the trapezoidal hollow spur dike was analyzed. The Shannon-Wiener index, Simpson index, and Pielou evenness index were used to analyze the diversity of benthic animal species, and reveal the impact mechanism of local erosion and sedimentation evolution of the trapezoidal hollow spur dike on benthic animal communities. The results show that sediment on the bed surface accumulates in front of the trapezoidal hollow spur dike, with a median particle size of 0~0.25 mm, which is beneficial to burrowing of benthic animals such as bivalves and oligotriches; the cavity inside the dam and the bed surface behind the dam are relatively stable, mainly composed of floating mud with a median particle size of 0~0.1 mm, creating suitable feeding grounds and slow flow habitats for benthic animals such as chironomids and oligochaetas. According to the analysis of biodiversity index, the composition of local benthic animal communities around the trapezoidal hollow spur dike is relatively stable and diverse, and the trapezoidal hollow spur dike can provide habitats for different benthic animals and also provide rich bait and suitable habitats for aquatic organisms such as fish.

Key words: trapezoidal hollow spur dike; erosion and sedimentation evolution; bed material; benthic animal communities

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200401); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30703)

作者简介:常留红(1979—), 女, 副教授, 博士, 主要从事水工结构、水动力特性及水生态修复研究。E-mail: claire886@163.com

通信作者:王瀚锐(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事水工结构、水动力特性及水生态修复研究。E-mail: hanruiwang@aliyun.com

底栖动物在维持河湖生物多样性与生态系统健康中起着重要作用,其自身活动能力较弱且活动范围较小,对环境变化敏感,主要栖息在河流、湖泊等水体底部^[1]。近年来,透空型丁坝在绿色航道建设中示范应用,改变了局部冲淤特性,为底栖动物营造了适宜的栖息地,但其对底栖动物群落的影响机制尚不明晰,限制了此类丁坝的大规模推广,使其成为国内外学者关注的科学问题。部分学者聚焦底栖生物的生境,研究了影响底栖动物生境的物理因素。刘睿等^[2-3]调研表明流速是影响底栖动物多样性的主要因素;Amsler等^[4]通过现场实验得出,床面沙纹、沙波、沙丘等形貌形成的微小生境中,水流条件不同导致底栖动物分布呈现出较大差异;Friedrichs等^[5]通过高分辨率流动测量和可视化试验研究了涡量等近床流态对底栖动物摄食、呼吸、产卵的影响;池仕运等^[6]认为筑坝等人为活动导致水流速度和底质粒径变化,在不同程度上影响底栖动物分布和物种多样性。梯级水库的建设减小了库区水流流速,为适应静水环境的底栖动物生存提供了有利条件^[7]。部分学者认为底栖动物的生境及分布特征与底床密切相关,Schäffer等^[8-9]研究认为床面底质粒径、近床紊动强度对底栖动物的空间分布有很大影响,不少学者通过底栖动物研究发现底质类型是影响底栖动物群落组成及分布特征的重要环境因素^[10-12]。

许多学者通过监测底栖动物群落、栖息密度等数据,分析工程施工前后生态学参数变化的统计学规律,研究透空型丁坝对底栖动物栖息地的影响。Pan等^[13]基于监测数据,分析了底栖动物群落结构、栖息密度和生物量等生态学参数变化规律;李莎等^[14]对比透空型丁坝工程区和非工程区底栖动物群落结构,分析透空型丁坝对底栖动物生境的影响;Li等^[15]基于工程施工前后底栖动物群落结构和栖息密度等监测数据,采用香农-维纳指数和辛普森多样性指数等分析底栖动物的多样性。

本文依托长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程,建立泥沙运动数值模型,研究梯形透空丁坝局部冲淤演变及其对底栖动物群落的影响,结合示范工程不同时期的现场监测数据,分析不同时期底栖动物群落组成和栖息密度,揭示梯形透空丁坝局部冲淤演变对底栖动物群落的影响机制。

1 梯形透空丁坝现场监测

梯形透空丁坝应用于世业洲右缘,在 3 个丁坝 (Y1 ~ Y3) 后方设置 A1 ~ A6 采样点,梯形透空丁坝 A3 采样点包括 A3 坝内和 A3 坝后,研究区域及现场监测样点位置如图 1、图 2 所示,分别于 2017 年 3 月、2017 年 12 月、2018 年 5 月和 2018 年 12 月开展

4 次现场监测。由潜水员携带彼得森采泥器下潜采集沉积物,每个样点区域采集 5 个平行样本,用 60 目手抄网冲水洗涤混合沉积物样品,直至剩下腐殖质,多次稀释后从腐殖质中分拣出底栖生物,放入含甲醛的标本瓶中保存,将分拣出的底栖生物置于解剖镜下观察鉴定,计数并换算得出实际底栖生物密度,用天平(精度为 10^{-4} g)称量底栖生物湿重,测定底栖生物生物量。

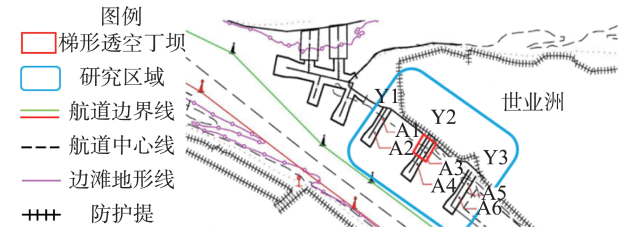


图 1 梯形透空丁坝示范应用坝段

Fig. 1 Application section of trapezoidal hollow spur dike

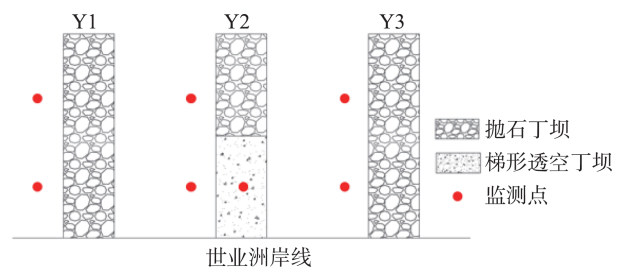


图 2 现场监测样点位置

Fig. 2 Location of on-site monitoring sampling points

物种多样性指数是描述群落结构特征的指标,可用来比较群落的复杂性和演替阶段的多样性。本文采用香农-维纳指数、辛普森多样性指数和 Pielou 均匀度指数评价 4 次监测各监测点和各丁坝周围底栖动物多样性,各指数表达式为

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

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

$$J = H' / \ln S \quad (3)$$

式中: H' 为香农-维纳指数; D 为辛普森多样性指数; J 为 Pielou 均匀度指数; S 为物种总数; P_i 为第 i 种个体占样本总数的比例。

研究采用的数据主要包括径流量、底床级配和现场监测数据,其中,径流量由大通水文站提供,底床级配和现场监测数据来自长江南京以下 12.5 m 深水航道建设指挥部和交通运输部长江航务管理局环境监测中心站。

2 数值模型建立

2.1 控制方程

采用不可压缩气液两相流求解器,控制方程为

连续性方程和不可压缩黏性流体运动的纳维-斯托克斯方程^[16],通过流体体积法和有限差分法实现自由面捕捉和控制方程离散,数值求解采用广义的极小残差算法。

2.2 泥沙运动数值模型

底栖动物的群落结构、多样性和栖息密度等生态学参数与底床密切相关^[17-19]。为研究梯形透空丁坝布置后局部冲淤演变对底栖动物群落的影响,泥沙运动数值模型中主要考虑推移质运动。采用 Meyer-Peter 公式^[20]建立泥沙运动数值模型,该模型的单宽输沙率为

$$\Phi_i = \alpha (\theta_i - \theta'_{cr,i})^{1.5} \quad (4)$$

$$\theta'_{cr,i} = \theta_{cr,i} (\cos\psi \sin\beta + \sqrt{\cos^2\beta \tan^2\varphi_i - \sin^2\varphi_i \sin^2\beta}) / \tan\varphi_i$$

式中: Φ_i 为单宽输沙率; i 表示不同粒径的泥沙种类; α 为无量纲参数,默认值为 8.0; θ_i 为局部希尔兹参数; $\theta_{cr,i}$ 为临界希尔兹数; $\theta'_{cr,i}$ 为倾斜界面处希尔兹数修正值; β 为沉积床面法向相对于重力加速度的角度; φ_i 为泥沙休止角; ψ 为水流方向与倾斜坡之间的夹角。

2.3 模型设置

2.3.1 模型设计

河段宽度约 1156 m,最大水深 21 m,丁坝长度约 600 m,河道宽度和丁坝长度均远大于 5 倍水深,可视作二元流。因此,基于流带法原理^[21],采用局部正态模型设计方法,为减少坝头和坝根的影响,通过梯形透空丁坝轴向中部选取宽度为 20 m 的流带。考虑到梯形透空丁坝布置后对底栖动物的避洪作用,采用河段多年平均洪峰流量 57500 m³/s,研究洪季条件下梯形透空丁坝对底栖动物群落的影响。

梯形透空丁坝原型构件长、高、上底宽、下底宽分别为 5、5、1.7、5 m,开孔方式为错孔,迎水面开 11 孔,背水面开 10 孔,开孔率为 15%。以 1:25 的几何比尺设计正态模型,开孔方式和开孔率与原型一致,满足几何相似、水流运动相似和动力相似,见图 3。据实测资料,仪征水道底床主要由中、细沙组成,还有少量的砾石和黏土,中值粒径 $d_{50p} = 0.18$ mm,底床级配曲线如图 4 所示。采用张瑞瑾公式^[22]计算泥沙起动流速,经过计算与比选,模型泥沙中值粒径 $d_{50m} = 0.68$ mm,含水容重 $\gamma_s = 1.056$ t/m³,粒径比尺 $\lambda_d = 0.26$,满足泥沙起动相似。

2.3.2 边界条件与网格划分

以梯形透空丁坝底部中心为原点建立数值水槽(20 m × 0.8 m × 1.0 m),其中,水流方向为 x 轴正方向,梯形透空丁坝宽度方向为 y 轴方向,竖直向上为 z

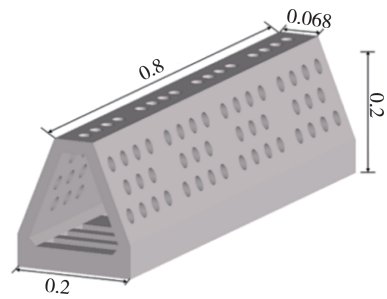


图 3 梯形透空丁坝模型(单位:m)

Fig. 3 Trapezoidal hollow spur dike model(unit:m)

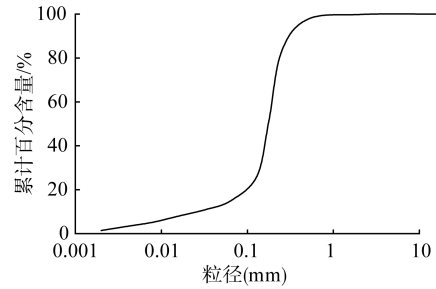
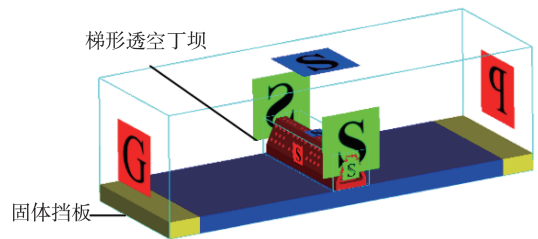


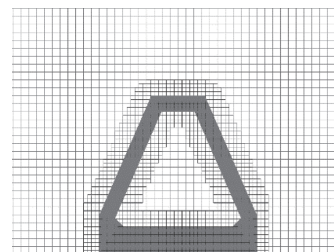
图 4 底床级配曲线

Fig. 4 Bed sediment grading curve

轴正方向。沙床尺寸为 2.0 m × 0.8 m × 0.1 m,梯形透空丁坝搁置在沙床表面,在沙床前后各布置一块尺寸为 0.2 m × 0.8 m × 0.1 m 的固体挡板,防止水流从计算域底部冲刷入流与出流处的沙床。数值水槽的上边界为网格覆盖边界(G),入口流速 0.247 m/s,水深为 0.744 m,下边界为压力出流边界(P),水槽边壁和丁坝表面为对称边界(S),见图 5(a)。采用边长为 1 cm 的笛卡尔网格划分数值计算区域,为保证其附近流场求解的精确性,在梯形透空丁坝表面生成厚度为 5 mm 的边界层网格,如图 5(b)所示。



(a) 计算域与边界条件



(b) 网格划分

图 5 边界条件与网格划分

Fig. 5 Boundary conditions and meshing

常留红等^[16]水槽试验表明,该数值模型能较好地模拟梯形透空丁坝局部三维水流,可用于泥沙冲刷模块计算。本文计算分为两个阶段,第一阶段不启动泥沙冲刷模块,引用文献^[16]的数值模型模拟三维水力特性,待紊流充分发展后,将计算结果作为泥沙运动模型计算域的边界条件;第二阶段运行泥沙运动模块,防止紊流未充分发展对泥沙的扰动,冲淤计算时间为40 min。

3 梯形透空丁坝局部冲淤演变及现场监测数据分析

3.1 梯形透空丁坝局部冲淤演变

3.1.1 近床流速分布

图6为多年平均洪峰流量下梯形透空丁坝在不同时刻 t 的近床流速分布。可见,水流运动至梯形透空丁坝时,近床流速显著改变,梯形透空丁坝周围

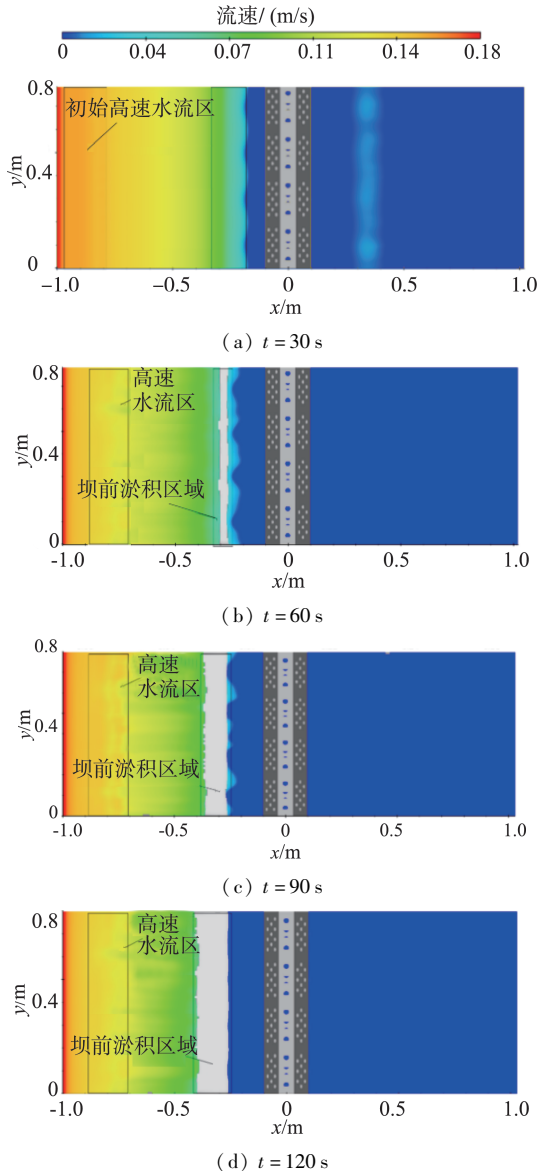


图6 不同时刻近床流速分布

Fig. 6 Distributions of near-bed velocity at different times

近床流速范围跨度较大。由于沙床表面入流条件为充分发展的紊流,最大流速出现在坝前较远处,模型流速值基本约为0.14 m/s,对应原型流速约为0.7 m/s,不利于底栖动物的生存;坝前近床流速变化范围较大,坝内和坝后近床以缓流为主,主要体现为沿水流方向的渐变特征,坝内和坝后模型流速小于0.04 m/s,对应原型流速小于0.2 m/s,为静水型底栖动物提供良好的环境,同时,坝前流速减小区泥沙开始初步淤积。

3.1.2 局部床面形态

河床底质组成与床面形态是影响底栖动物群落的主要原因^[23],其影响着底栖动物的附着、穴居、逃避捕食、产卵等能力^[24]。图7、图8分别为多年平均

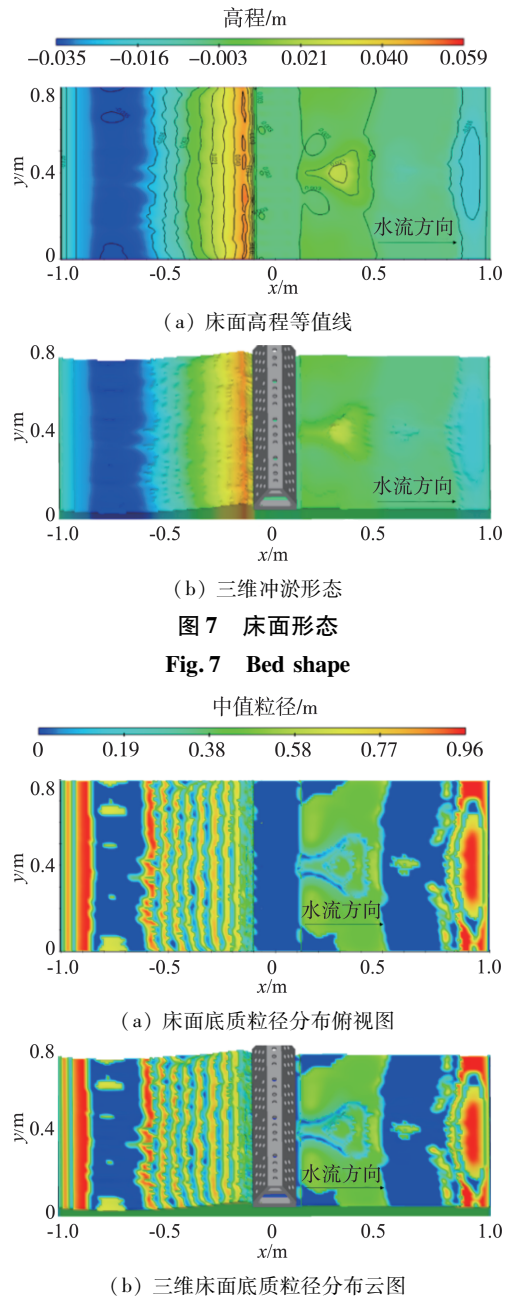


图7 床面形态

Fig. 7 Bed shape

(b) 三维床面底质粒径分布云图

图8 底质模型中值粒径分布

Fig. 8 Median particle size distribution in sediment model

洪峰流量下梯形透空丁坝趋于冲淤平衡的局部床面形态和底质模型中值粒径分布。可见,坝前较远处高流速区域和梯形透空丁坝坝后尾涡区形成了冲刷坑,挟沙水流运动至坝前流速减小,一部分泥沙受梯形透空丁坝的阻碍在坝前淤积,另一部分随水流穿过孔洞在坝内空腔或坝后微淤。坝前淤积区域底质模型中值粒径为 0~0.96 mm,对应原型底质粒径范围为 0~0.25 mm,以沙质底质为主,伴有部分浮泥底质,为寡毛类、双壳类等底栖动物的筑穴行为提供了便利条件^[25];而坝内空腔和坝后床面相对稳定,地形变化较小,水流条件稳定,坝内空腔和坝后的底质模型中值粒径基本为 0~0.38 mm,对应原型底质粒径为 0~0.1 mm,属于浮泥和细沙的混合底质。相关研究表明,沉积物中有机质的含量一般随着沉积物颗粒的细化而增加^[11],粒径较小的沉积物比表面积较大,吸附有机质能力较强,沉积物内的有机质为底栖动物提供丰富的食物来源,适宜寡毛类和摇蚊类等底栖动物的生存,提高了底栖动物的栖息密度,与 4 次底栖动物栖息密度监测结果基本吻合。

3.2 现场监测数据分析

3.2.1 底栖动物群落相对丰度

在对 Y1、Y2、Y3 丁坝周围的 4 次监测中共鉴定出底栖动物 7 纲 16 种,如表 1 所示,包括节肢动物、环节动物、软体动物 3 大门类,其中,昆虫纲 5 种、寡毛纲 4 种、双壳纲 2 种、腹足纲 2 种、软甲亚纲 1 种、多毛纲 1 种、蛭纲 1 种。监测结果表明,抛石丁坝周围底栖动物的群落组成及优势种呈现出季节差异,第 1 次监测结果主要以嫩丝蚓为优势种,第 2 次和

第 4 次监测结果优势种主要为钩虾,第 3 次监测时正处于汛期,导致采集到的底栖动物种类有所变化。梯形透空丁坝周围底栖动物也同样受到季节变化的影响,但由于梯形透空丁坝的减速促淤效果,在坝内和坝后营造了缓流条件,使得梯形透空丁坝坝内和坝后的底栖动物基本以摇蚊科(昆虫纲)与管水蚓(寡毛纲)等适应缓流生境的物种为主,且 4 次监测结果底栖动物群落组成均无明显差异。

图 9 为 4 次监测各丁坝周围底栖动物的香农-维纳指数、辛普森多样性指数和 Pielou 均匀度指数。由图 9 可见,第 1 次监测结果的 Y2 梯形透空丁坝周围底栖动物各指数均低于抛石丁坝,而后 3 次监测结果的 Y2 梯形透空丁坝周围底栖动物的香农-维纳指数和辛普森多样性指数均高于抛石丁坝,且 Pielou 均匀度指数均保持在较高的平均水平。由表 1 可以看出后 3 次监测结果中 Y2 梯形透空丁坝周围底栖动物种类较多,说明随着生境慢慢恢复,梯形透空丁坝局部底栖动物群落组成相对稳定且多样,表明梯形透空丁坝能为不同的底栖动物提供较好的栖息场所,更利于提高工程段底栖动物的相对丰度。

3.2.2 栖息密度

4 次监测各丁坝周围测点底栖动物栖息密度结果见图 10,3 个丁坝周围的底栖动物栖息密度差异显著。第 1 次监测的 Y1 和 Y3 抛石丁坝周围以嫩丝蚓为优势类群,栖息密度分别为 853 和 293 个/m²;Y2 梯形透空丁坝周围以河蚓为优势类群,栖息密度为 288 个/m²。前 2 次监测的 Y2 梯形透空丁坝周围底栖动物的栖息密度低于抛石丁坝,主要原因是前 2

表 1 4 次监测各丁坝周围底栖动物物种相对丰度

Table 1 Relative abundance of benthic animal species around each spur dike infour times monitoring

物种	相对丰度/%															
	Y1 抛石丁坝				Y2 梯形透空丁坝				Y2 抛石丁坝				Y3 抛石丁坝			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
长附摇蚊	9.7				0.9										34.5	
多足摇蚊	1.6		25.0			20.0	28.6	28.6							11.8	
隐摇蚊					2.8											
前突摇蚊															2.7	
长足摇蚊					0.9		14.3									
钩虾	1.9	92.3		84.6	2.8	20.0		14.3	100.0		100.0	0.9	37.5			33.3
河蚓					78.7					50.0					33.3	
水丝蚓	1.9															
嫩丝蚓	77.5													47.3		
沼蛤属	2.8				1.9	20.0		28.6						37.5		
齿吻沙蚕	4.4	7.7	50.0	15.4	12.0		28.6			50.0		2.7			33.3	
短沟蜷螺	0.3													12.5		33.3
管水蚓						30.0	28.6	28.6								
舌蛭														12.5		11.1
湖沼股蛤															33.3	
方格短沟蜷		25.0														

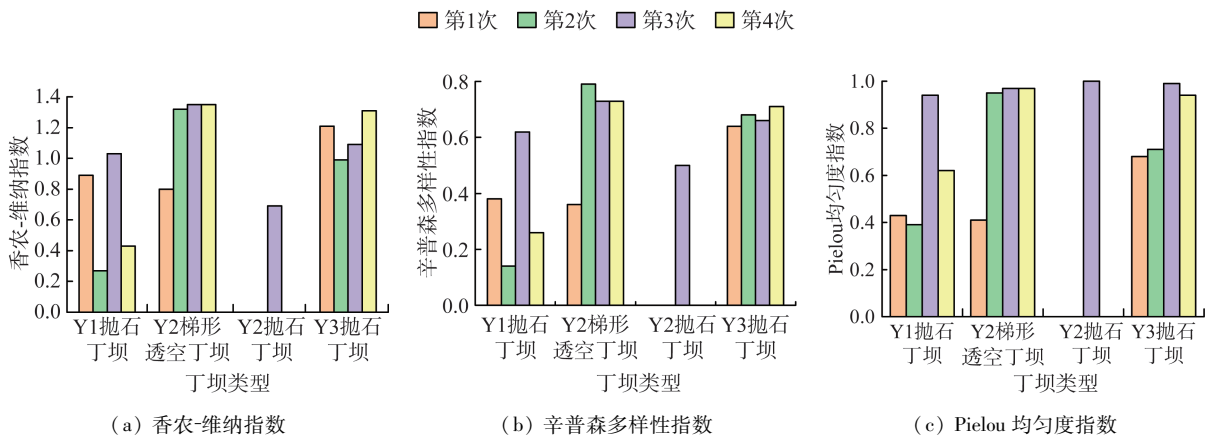


图9 4次监测各丁坝周围香农-维纳指数、辛普森多样性指数和 Pielou 均匀度指数

Fig. 9 Shannon-Wiener index, Simpson index, and Pielou evenness index around each spur dike in four times monitoring

次监测在梯形透空丁坝建成后不久开展,底栖动物的生境恢复尚未稳定,且 Y2 梯形透空丁坝长度仅为抛石丁坝的一半。第3次监测的 Y1、Y2、Y3 抛石丁坝周围底栖动物栖息密度分别为 32、32、24 个/m², Y2 梯形透空丁坝周围为 56 个/m², 3 个抛石丁坝周围底栖动物栖息密度均低于第2次监测结果,而梯形透空丁坝周围底栖动物栖息密度出现增长,且均大于抛石丁坝。在栖息密度上虽未体现出显著差异,但从梯形透空丁坝局部底栖动物多样性指数的角度,梯形透空丁坝周围底栖动物更丰富多样。同时,第3和第4次监测的 Y2 梯形透空丁坝周围底栖动物栖息密度趋于稳定,表明梯形透空丁坝布置后形成的生物环境相对稳定,适合底栖动物的长期生活。

0.1 mm,主要为浮泥和细沙的混合底质,为寡毛纲、摇蚊类等底栖动物的生长、发育、繁殖营造良好的环境。

b. 在时间上,梯形透空丁坝周围底栖动物栖息密度相对稳定,适合底栖动物的长期生活;在空间上,梯形透空丁坝周围底栖动物群落结构组成更多样,能为不同的底栖生物提供适宜的生存环境,有利于提高工程河段底栖动物相对丰度和维持其多样性,为鱼类等食物链顶端生物营造丰富的索饵场和栖息场所。

参考文献:

[1] 方红卫,何国建,黄磊,等.生态河流动力学研究的进展与挑战[J].水利学报,2019,50(1):75-87. (FANG Hongwei, HE Guojian, HUANG Lei, et al. Progresses and challenges in the study of eco-fluvial dynamics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 75-87. (in Chinese))

[2] 刘睿,李若男. 漓江大型底栖动物空间分布及水力驱动因子[J]. 长江科学院院报,2022,39(8):34-40. (LIU Rui, LI Ruonan. Spatial distribution and hydraulic driving factors of macrobenthic communities in Lijiang River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(8): 34-40. (in Chinese))

[3] 马雅雪,姚维林,袁赛波,等. 长江干流宜昌-安庆段大型底栖动物群落结构及环境分析[J]. 水生生物学报, 2019, 43(3): 634-642. (MA Yaxue, YAO Weilin, YUAN Saibo, et al. Community structure and environmental analysis of macrozoobenthos in Yichang-Anqing reaches of the Yangtze mainstem [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(3): 634-642. (in Chinese))

[4] AMSLER M L, BLETTLER M C M, DE DRAGO I E. Influence of hydraulic conditions over dunes on the distribution of the benthic macroinvertebrates in a large sand bed river [J]. Water Resources Research, 2009, 45(6): W06426.

[5] FRIEDRICHS M, GRAF G. Characteristic flow patterns

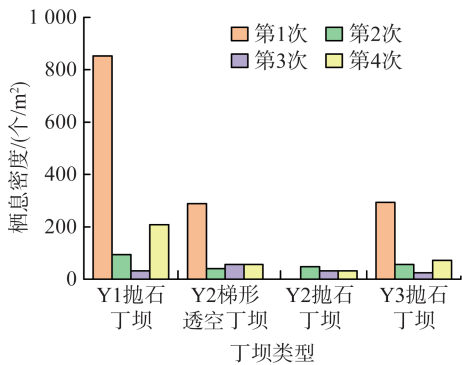


图10 4次监测各丁坝周围测点底栖动物栖息密度

Fig. 10 Habitat density of benthic animals at measuring points around each spur dike in four times monitoring

4 结 论

a. 梯形透空丁坝局部冲淤演变呈现坝前淤积、坝内和坝后微淤,局部冲淤演变形成的微地形提升了床面周围的空间异质性。坝前淤积底质中值粒径为 0~0.25 mm,以沙质底质为主,适合寡毛类、双壳类等穴居动物生存;坝内及坝后底质中值粒径为 0~

- generated by macrozoobenthic structures [J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 75(3/4):348-359.
- [6] 池仕运, 陈胜, 李嗣新, 等. 高坝对乌江下游底栖动物群落结构的影响[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2):469-481. (CHI Shiyun, CHEN Sheng, LI Sixin, et al. Effects of high-head dams on macroinvertebrate communities in the lower reaches of Wujiang River [J]. *Journal of Lake Science*, 2019, 31(2):469-481. (in Chinese))
- [7] 许栋, 张博曦, 及春宁, 等. 梯级水库对南渡江干流底栖动物丰枯水期沿程变化的影响[J]. *水资源保护*, 2019, 35(2):60-66. (XU Dong, ZHANG Boxi, JI Chunling, et al. Streamwise variation of zoobenthos along main stream of Nandujiang River in wet and dry seasons under influence of cascade reservoirs [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(2):60-66. (in Chinese))
- [8] SCHÄFFER M, HELLMANN C, AVLYUSH S, et al. The key role of increased fine sediment loading in shaping macroinvertebrate communities along a multiple stressor gradient in a Eurasian steppe river (Kharaa River, Mongolia) [J]. *International Review of Hydrobiology*, 2020, 105(1/2):5-19.
- [9] SCHULZ U H, DA ROSA M F, KLEIN-STOLZ G F. Drift and emergence patterns of nonbiting midges (Chironomidae, Diptera, Insecta) in a subtropical river [J]. *Ecological Research*, 2019, 34(6):835-841.
- [10] 邹亮华, 邹伟, 张庆吉, 等. 鄱阳湖大型底栖动物时空演变特征及驱动因素[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(6):2881-2892. (ZOU Lianghua, ZOU Wei, ZHANG Qingji, et al. Characteristics and driving factors of spatiotemporal succession of macrozoobenthos in Poyang Lake [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(6):2881-2892. (in Chinese))
- [11] 贾海波, 曹柳燕, 柴小平. 2016-2019年夏季长江口海域大型底栖动物群落结构的变化及其原因分析[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(2):180-186. (JIA Haibo, CAO Liuyan, CHAI Xiaoping. The changes of macrobenthic community structure and cause analysis in the Yangtze Estuary during summer from 2016 to 2019 [J]. *Marine Environmental Science*, 2022, 41(2):180-186. (in Chinese))
- [12] 张续同, 李卫明, 张坤, 等. 长江宜昌段桥边河大型底栖动物功能摄食类群时空分布特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(7):2559-2570. (ZHANG Xutong, LI Weiming, ZHANG Kun, et al. Spatiotemporal distribution of macroinvertebrate functional feeding groups in Qiaobian River, a tributary of Yangtze River in Yichang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7):2559-2570. (in Chinese))
- [13] PAN Baozhu, WANG Zhaoyin, LI Zhiwei, et al. Macroinvertebrate assemblages in relation to environments in the West River, with implications for management of rivers affected by channel regulation projects [J]. *Quaternary International*, 2015, 384:180-185.
- [14] 李莎, 熊飞, 王珂, 等. 长江中游透水框架护岸工程对底栖动物群落结构的影响[J]. *水生态学杂志*, 2015, 36(6):72-79. (LI Sha, XIONG Fei, WANG Ke, et al. Effect of tetrahedron permeable frames on the community structure of benthic macroinvertebrates in the middle Yangtze River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, 36(6):72-79. (in Chinese))
- [15] LI Kun, ZHANG Zhenxing, YANG Haijun, et al. Effects of instream restoration measures on the physical habitats and benthic macroinvertebrates in an agricultural headwater stream [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 122:252-262.
- [16] 常留红, 王瀚锐, 章富君, 等. 梯形透空丁坝局部水动力特性对底栖动物生境演替的影响机制[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1):216-224. (CHANG Liuhong, WANG Hanrui, ZHANG Fujun, et al. Influence mechanism of local hydrodynamic characteristics of trapezoidal hollow spur dike on benthos habitat succession [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1):216-224. (in Chinese))
- [17] SALMASO F, ESPA P, CROSA G, et al. Impacts of fine sediment input on river macroinvertebrates: the role of the abiotic characteristics at mesohabitat scale [J]. *Hydrobiologia*, 2021, 848(18):4189-4209.
- [18] DROVER D R, SCHOENHOLTZ S H, SOUCEK D J, et al. Multiple stressors influence benthic macroinvertebrate communities in central Appalachian coalfield streams [J]. *Hydrobiologia*, 2020, 847(1):191-205.
- [19] 马宝珊, 魏开金, 徐进, 等. 安宁河流域夏季底栖动物多样性及其空间分布格局[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(12):4020-4028. (MA Baoshan, WEI Kaijin, XU Jin, et al. Diversity and spatial distribution pattern of benthic macroinvertebrates in summer in the Anning River Basin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(12):4020-4028. (in Chinese))
- [20] 齐梅兰, 石粕辰. 局部冲刷坑发展过程的泥沙输运特性[J]. *水利学报*, 2018, 49(12):1471-1480. (QI Meilan, SHI Pochen. Study on the mechanism of water-sediment interaction in the scouring process around a pile [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(12):1471-1480. (in Chinese))
- [21] 曹民雄, 李青云, 蔡国正, 等. 长江口岸直水道鳗鱼沙心滩头部守护工程局部冲刷水槽概化试验研究: I. 水槽概化与护滩建筑物模拟设计[J]. *水运工程*, 2011(7):106-112. (CAO Minxiong, LI Qingyun, CAI Guozheng, et al. On local scour deformation flume generalization experiment of Manyusha shoal head protection engineering in straight reach of Yangtze River estuary: I. design of flume generalized and protection engineering building simulation [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2011(7):106-112. (in Chinese))
- [22] 舒安平, 王梦瑶, 秦际平, 等. 渤海湾典型人工鱼礁区域流场分布与海床泥沙起动特征[J]. *水利学报*, 2020, 51

- (10):1223-1233. (SHU Anping, WANG Mengyao, QIN Jiping, et al. The characteristics for flow field distribution and sediment incipient movement around the typical artificial reefs area in Bohai Bay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(10):1223-1233. (in Chinese))
- [23] 赵娜. 河床演变对底栖动物群落的影响研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
- [24] MISHRA A S, NAUTIYAL P. Substratum as determining factor for the distribution of benthic macroinvertebrate fauna in a river ecosystem[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, 2016, 86(3):735-742.
- [25] 李春波, 黄晓荣, 冯广朋, 等. 不同发育阶段中华绒螯蟹对底质的喜好性研究[J]. 水生生物学报, 2022, 46(6):888-895. (LI Chunbo, HUANG Xiaorong, FENG Guangpeng, et al. Preference for substrate in different developmental stages of *eriocheir sinensis* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2022, 46(6):888-895. (in Chinese))

(收稿日期:2022-10-16 编辑:施业)

(上接第 160 页)

- [24] 陈守煜. 可变模糊集合理论与可变模型集[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(18):146-153. (CHEN Shouyu. Theory of variable fuzzy sets and variable model sets[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008, 38(18):146-153. (in Chinese))
- [25] 陈守煜, 李敏. 基于可变模糊集理论的水资源可再生能力评价模型[J]. 水利学报, 2006, 37(4):431-435. (CHEN Shouyu, LI Min. Assessment model of water resources reproducible ability based on variable fuzzy set theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4):431-435. (in Chinese))
- [26] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39(4):401-409. (JIN Juliang, WU Kaiya, WEI Yiming. Connection number based assessment model for watershed water security[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4):401-409. (in Chinese))
- [27] ZHOU Rongxing, JIN Juliang, CUI Yi, et al. Spatial equilibrium evaluation of regional water resources carrying capacity based on dynamic weight method and Dagum Gini coefficient [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 9:790349.
- [28] 门宝辉, 李晨, 尹世洋. 基于减法集对势的大兴区地下水开采强度评价与诊断[J]. 水资源保护, 2022, 38(5):17-25. (MEN Baohui, LI Chen, YIN Shiyang. Research on evaluation and diagnosis of groundwater exploitation intensity in Daxing District based on subtraction set pair potential [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5):17-25. (in Chinese))
- [29] 何刚, 夏业领, 秦勇, 等. 长江经济带水资源承载力评价及时空动态变化[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1):287-292. (HE Gang, XIA Yeling, QIN Yong, et al. Evaluation and spatial-temporal dynamic change of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1):287-292. (in Chinese))
- [30] WU Chengguo, ZHOU Liyang, JIN Juliang, et al. Regional water resource carrying capacity evaluation based on multi-dimensional precondition cloud and risk matrix coupling model [J]. Science of the Total Environment, 2020, 710:136324.
- [31] 鲍珂宇, 何刚, 金兰, 等. 基于突变级数法的安徽省相对资源承载力研究[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(4):39-44. (BAO Keyu, HE Gang, JIN Lan, et al. Research on relative resources carrying capacity of cities in Anhui Province based on catastrophe progression method [J]. Areal Research and Development, 2021, 40(4):39-44. (in Chinese))
- [32] BAI Xia, JIN Juliang, ZHOU Rongxing, et al. Coordination evaluation and obstacle factors recognition analysis of water resource spatial equilibrium system [J]. Environmental Research, 2022, 210:112913.
- [33] 左其亭. 关于最严格水资源管理制度的再思考[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2015, 17(4):60-63. (ZUO Qiting. Rethinking of the strictest water resources management system [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2015, 17(4):60-63. (in Chinese))
- [34] 程翠云, 阎伍玖. 安徽区域水资源可持续利用评价[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5):154-158. (CHENG Cuiyun, YAN Wujiu. Evaluation of regional sustainable utilization of water resources in Anhui Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(5):154-158. (in Chinese))
- [35] 钱筱暄, 孙传辉, 许一, 等. 基于负载指数的皖中皖北地区水资源开发潜力研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(10):49-50. (QIAN Xiaoxuan, SUN Chuanhui, XU Yi, et al. Study on water resources development potential in Central and Northern Anhui based on load index [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(10):49-50. (in Chinese))
- [36] HUANG Qidong, ZHANG Hairong, XU Jiajun, et al. Scalar configuration, power strategies and water governance: insights from the politics of the Yangtze-to-Huai Water Transfer Project [J]. International Journal of Water Resources Development, 2022, 38(4):658-679.

(收稿日期:2022-09-21 编辑:施业)