

· 调查与评价 ·

入太湖河道大型底栖动物群落结构及水质生物学评价

吴昱甫¹, 何勇², 邵勇², 吴攀^{1*}, 陆彦¹

(1. 南京水利科学研究所, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 江苏省太湖治理工程建设管理局, 江苏 无锡 214100)

摘要: 于2020年9月在太滬运河、漕桥河、徐家大塘和竺山湾布设14个监测点位, 调查入太湖河道底栖动物群落结构, 并采用Goodnight修正指数(GBI)、生物学污染指数(BPI)和多样性指数(H)进行水质生物学评价。结果表明, 研究区域共检出底栖动物6纲18种, 霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)和中国长足摇蚊(*Tanypus chinensis*)为优势种, 生物多样性由高到低为竺山湾($H=1.20$) > 徐家大塘($H=1.09$) > 太滬运河($H=0.67$) > 漕桥河($H=0.33$)。典范对应分析显示, 总氮、正磷酸盐等因子与寡毛类生物量呈正相关, 叶绿素a、 I_{Mn} 与摇蚊幼虫生物量呈正相关。生物学评价表明, 太滬运河处于中-重度污染状态, 漕桥河、徐家大塘和竺山湾处于中度污染状态。

关键词: 底栖动物; 群落结构; 水质; 生物学评价; 入太湖河道

中图分类号: X826; X835

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2023)01-0026-06

Macroinvertebrate Community Structure and Water Quality Biological Evaluation in Rivers Entering Taihu Lake

WU Yu-fu¹, HE Yong², SHAO Yong², WU Pan^{1*}, LU Yan¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering Science, Nanjing Hydraulic

Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China; 2. Jiangsu Province Taihu Treatment Project

Construction Administration, Wuxi, Jiangsu 214100, China)

Abstract: In September 2020, 14 monitoring sites were set up in the Taige Canal, Caoqiao River, Xujiadatang and Zhushan Bay to investigate the community structure of benthos in the rivers entering Taihu Lake, and Goodnight Correction Index (GBI), Biological Pollution Index (BPI) and Diversity Index (H) were used for water quality biological evaluation. The results showed that 18 species of benthos in 6 classes were detected in the study area. *Limnodrilus hoffmeisteri* and *Tanypus chinensis* were dominate. The ordering of biodiversity was Zhushan Bay ($H=1.20$) > Xujiadatang ($H=1.09$) > Taige Canal ($H=0.67$) > Caoqiao River ($H=0.33$). Canonical correspondence analysis showed that total nitrogen and orthophosphate were positively correlated with Oligochaetes biomass, while Chlorophyll a and I_{Mn} were positively correlated with Chironomid larvae biomass. Biological evaluation showed that the Taige Canal was medium-heavy polluted, and Caoqiao River, Xujiadatang and Zhushan Bay were moderately polluted.

Key words: Benthos; Community structure; Water quality; Biological evaluation; River entering Taihu Lake

在河流生态系统水生无脊椎动物中的大型底栖动物个体一般 $\geq 500 \mu\text{m}$ ^[1], 其运动性低, 生活周期长, 不同种类对有机物耐受性不同, 群落结构易受外界干扰影响^[2]。底栖动物的群落提供了一个可靠的有机物富集标准^[3-4]。对大型底栖动物物种分布和群落结构进行研究分析, 可用于评估区域

收稿日期: 2021-12-23; 修订日期: 2022-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51809178); 江苏省自然科学基金面上基金资助项目(BK20191130); 江苏省水利科技基金资助项目(2020003, 2022041)

作者简介: 吴昱甫(1995—), 男, 云南昆明人, 在读博士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

* 通信作者: 吴攀 E-mail: pwu@nhri.cn

水生态系统健康状况^[5]。由于水污染治理的相对滞后,太湖及其河网水环境问题日益凸显。为了提高太湖水环境容量,新孟河延伸拓浚工程将引长江水经过太滬运河和漕桥河等河道进入太湖。引水后相关河道的本底污染物将对引水及太湖西北部湖湾水质产生较大影响^[6]。因此,有必要对引水入湖河流开展水生态和水环境现状调查评估。以往研究主要针对河道的经济发展、土地利用及水环境现状等开展综合评估^[7],如对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP等指标的连续监测水质评估^[8]、利用数值模拟研究水体迁移规律^[9]等,而以敏感性底栖动物等为指标对入太湖河道进行水质生物学评价则较少。今对太滬运河、漕桥河两条入湖河流及沿线湖荡(湾)开展水文、水质、底栖动物等综合调查,分析不同类型水体底栖动物群落结构及其影响因子,评估其水体生态健康状况,以期对太湖水域污染治理和水生态保护提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区域与点位分布

以太滬运河、漕桥河、徐家大塘及太湖竺山湾等水域为研究区域(见图1)。选择新孟河工程主要引水入太湖河道太滬运河和漕桥河为研究对象。太滬运河为区域性骨干航道,全长22.4 km,自滬湖向东南穿过江苏省常州市武进区,下游进入宜兴市^[10]。漕桥河为重要跨县级河道,全长21.5 km,期间流经浅水湖荡徐家大塘^[11]。太滬运河与漕桥河于百渚口交汇,并流入太湖竺山湾。

于2020年9月21日—24日开展野外综合调查,参考《水文调查规范》(SL 196—2015)和《湖泊调查技术规程》等要求,在太滬运河等距离布设监测点位5个(1#—4#和9#)、漕桥河等距离布设点位4个(5#—8#)、竺山湾内布设点位2个(10#—11#)、徐家大塘加密布设点位3个(12#—14#),共布设14个监测点位,见图1。

1.2 样品采集与测定

(1)现场水文水质测定。用FP211型直读式流速仪监测流速等指标,用YSI EX02型多参数水质分析仪测定水温(T)、pH值、氧化还原电位(ORP)、盐度(Sal)、总固体溶解量(TDS)、底层溶解氧(DO)、浊度(Turbidity)等指标。每个点位采样3次,河流点位分别于河道横断面的左、中、右位置各采集1次。

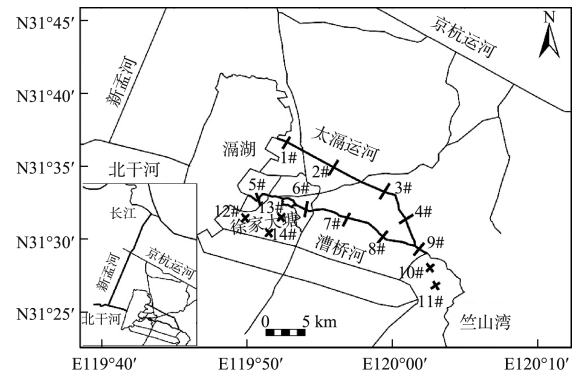


图1 研究区域与监测点位分布

Fig. 1 Study area and distribution of sampling site

(2)底栖动物样品采集与测定。使用ZYC-200B型开口面积 0.1 m^2 的抓斗式底泥采样器采集水底表层样品,每个河流点位采样3次,分别于河道横断面的左、中、右位置各采集1次,每个湖泊点位采集2次。采集的泥样先用60目筛网反复筛洗,过筛后的样品保存在体积分数为5%的甲醛溶液中,带回实验室后在PXS-1040型解剖镜下挑拣,用体视显微镜和生物显微镜进行种类鉴定和计数,生物量用FA2204B型万分之一电子天平称重。

(3)水样采集与测定。用CS-100型有机玻璃采水器采集水样,各点位至少采集500 mL,水样冷藏保存并迅速带回实验室,使用SanCompact型水质微量流动注射分析仪测定氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$),参考《水和废水监测分析方法》(第四版)测定叶绿素a(Chl-a)、高锰酸盐指数(I_{Mn})、总氮(TN)、总磷(TP)和正磷酸盐(PO_4^{3-})。

1.3 研究方法

1.3.1 物种多样性分析

研究区域底栖动物物种多样性采用Margalef丰富度指数(D)、Shannon-Wiener多样性指数(H)、Pielou均匀度指数(J)和优势度指数(Y)进行分析,计算公式为:

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$J = (- \sum P_i \ln P_i) / \ln S \quad (3)$$

$$Y = P_i \times f_i \quad (4)$$

式中: N 为总个体数; P_i 为第 i 种个体数占总个体数的比例; S 为出现在调查点的物种总数; f_i 为该物种出现的点位数占总点位数的百分比。当 $Y > 0.02$ 时,该物种为优势种。

1.3.2 生物学评价

水质生物学评价采用 Goodnight 修正指数 (GBI) 和生物学污染指数 (BPI) 配合 Shannon-Wiener 多样性指数进行分析^[12]。其中, GBI 与 BPI 指数计算公式为:

$$GBI = (N - N_0) / N \quad (5)$$

式中: N 为样品中底栖动物个体总数; N_0 为样品中寡毛类个体总数。

$$BPI = \lg(N_1 + 2) / [\lg(N_2 + 2) + \lg(N_3 + 2)] \quad (6)$$

式中: N_1 为寡毛类、蛭类和摇蚊幼虫个体数; N_2 为多毛类、甲壳类、除摇蚊幼虫以外的其他水生昆虫个体数; N_3 为软体动物个体数。各生物指数与水质等级标准见表 1。

表 1 各生物指数与水质等级标准

Table 1 Biological index and water quality grade standard

水质等级	GBI	BPI	H
清洁	>0.8	<0.1	>3
轻度污染	0.6~0.8	0.1~0.5	2~3
中度污染	0.2~0.6	0.5~5	1~2
重度污染	0~0.2	>5	0~1

1.3.3 数据处理

利用 SPSS 25.0 软件对采样数据进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 用方差齐性 (LSD) 和方差不齐 (Games-Howell) 方法进行多重比较, 分析研究区域不同点位环境因子的差异性。

利用 Canoco 5 软件对研究区域的环境因子与底栖动物群落结构进行典范对应分析 (CCA)。在排序分析时先将环境因子数据与物种密度数

据作 $\lg(x+1)$ 转换, 再将转换后的数据作冗余分析 (RDA), 并用前选 (forward selection) 和 Monte carlo 转置法确定对底栖动物类群分布具有重要且独立作用的最少环境变量组合, 将该变量组合用于最终的 RDA。采用 Canoco 5 进行排序分析和作图。

2 结果与讨论

2.1 研究区域水环境特征

表 2 为研究区域各水质参数监测值统计。由表 2 可知, 太滬运河的 TN 和 TP 平均值分别为 2.88 mg/L 和 0.212 mg/L, 漕桥河分别为 2.37 mg/L 和 0.157 mg/L, 竺山湾分别为 3.30 mg/L 和 0.073 mg/L, 徐家大塘分别为 1.06 mg/L 和 0.110 mg/L。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 判定, 太滬运河水质为 V 类, 漕桥河为 III 类, 徐家大塘总体为 IV 类, 竺山湾总体为 IV 类。不同河湖之间的 ORP、TN、TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 PO_4^{3-} 等环境因子存在显著差异 ($P < 0.01$)。受研究区域周边农田排水和居民生活废水影响, 各监测点位的 TN 值较高。竺山湾接受太滬运河和漕桥河汇水, 其 ORP、TN 值高于两河, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 值高于两河之和, TP、 PO_4^{3-} 值远低于两河。

2.2 底栖动物分布及群落结构

研究区域共检测出底栖动物 6 纲 18 种 (见表 3)。其中, 昆虫纲最多 (10 种), 其次为寡毛纲 (4 种), 多毛纲、双壳纲、瓣鳃纲、腹足纲各 1 种。由于双壳纲与瓣鳃纲仅出现在交汇河流中, 故未在表 3 中列出。太滬运河出现的底栖动物物种数最多 (8 种); 漕桥河、竺山湾和徐家大塘各出现 6 种。

表 2 研究区域各水质参数监测值统计

Table 2 Statistics of monitoring values of water quality parameters in the study area

水质参数	太滬运河	漕桥河	徐家大塘	竺山湾
pH 值	7.94 ± 0.39	7.86 ± 0.29	8.03 ± 0.06	7.70 ± 0.08
ORP U/mV	350 ± 23	357 ± 13	355 ± 25	444 ± 19
Sal/10 ⁻⁶	0.13 ± 0.10	0.17 ± 0.02	0.15 ± 0.01	0.21 ± 0.01
TDS ρ/(g · L ⁻¹)	0.18 ± 0.13	0.20 ± 0.01	0.20 ± 0.01	0.30 ± 0.01
DO ρ/(mg · L ⁻¹)	6.65 ± 0.92	6.16 ± 0.81	7.83 ± 0.92	6.26 ± 0.52
TN ρ/(mg · L ⁻¹)	2.88 ± 0.58	2.37 ± 0.54	1.06 ± 0.25	3.30 ± 0.16
TP ρ/(mg · L ⁻¹)	0.212 ± 0.03	0.157 ± 0.04	0.110 ± 0.04	0.073 ± 0.02
$\text{NH}_3 - \text{N}$ ρ/(mg · L ⁻¹)	0.092 ± 0.09	0.104 ± 0.06	0.195 ± 0.05	0.211 ± 0.09
PO_4^{3-} ρ/(mg · L ⁻¹)	0.124 ± 0.03	0.119 ± 0.02	0.034 ± 0.01	0.022 ± 0.005
I_{Mn} ρ/(mg · L ⁻¹)	3.70 ± 0.33	3.98 ± 0.48	4.19 ± 0.35	3.67 ± 0.16
Chl-a ρ/(μg · L ⁻¹)	4.84 ± 2.61	8.67 ± 5.75	13.8 ± 5.39	9.56 ± 2.65

表 3 研究区域底栖动物物种组成
Table 3 Species composition of benthos in the study area

底栖动物种类		太滬运河		漕桥河		徐家大塘		竺山湾	
纲	种	密度/ (个·m ⁻²)	生物量/ (g·m ⁻²)	密度/ (个·m ⁻²)	生物量/ (g·m ⁻²)	密度/ (个·m ⁻²)	生物量/ (g·m ⁻²)	密度/ (个·m ⁻²)	生物量/ (g·m ⁻²)
寡毛纲 (Oligochaeta)	霍甫水丝蚓	13	0.001	5	<0.001	83	0.162	100	0.304
	克拉泊水丝蚓	20	0.003						
	巨毛水丝蚓	15	0.003					13	0.024
	苏氏尾鳃蚓					8	0.058	70	2.091
多毛纲 (Polychaeta)	寡鳃齿吻沙蚕	5	0.004						
腹足纲 (Gastropoda)	铜锈环棱螺	5	1.208	5	1.832			8	16.643
昆虫纲 (Insecta)	多距石蛾科 1 种	5	0.002	5	0.002				
	黄色羽摇蚊					5	0.081		
	隐摇蚊属 1 种							30	0.010
	二叉摇蚊属 1 种	5	<0.001						
	德永雕翅摇蚊	10	0.004	25	0.019				
	多巴小摇蚊					13	0.011		
	多足摇蚊属 1 种			5	<0.001				
	红裸须摇蚊			5	0.019				
	中国长足摇蚊					102	0.228	255	0.189
	春蜓科 1 种					5	0.039		

中国长足摇蚊 (*Tanytus chinensis*) 密度最大且大量分布在徐家大塘 (102 个/m²)、竺山湾 (255 个/m²) 等静水区域,在太滬运河和漕桥河中密度较小。霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 在所有区域均有出现,在徐家大塘和竺山湾中密度分别达到 83 个/m² 和 100 个/m²。腹足纲中的铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa*) 仅在徐家大塘未被发现,多毛纲仅在太滬运河被检测到。

经过对研究区底栖动物优势种及其优势度指数 (*Y*) 的计算发现,不同水体的优势物种组成存在差异。霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 在太滬运河、徐家大塘和竺山湾中优势度较高,*Y* 值分别为 0.139、0.410、0.336。中国长足摇蚊 (*Tanytus chinensis*) 在徐家大塘与竺山湾中优势度均较高,*Y* 值分别为 0.500、0.210。漕桥河中优势物种为德永雕翅摇蚊 (*Glyptotendipes tokunagai*)。其他物种 *Y* 值均 < 0.1。

2.3 生物多样性

图 2 为研究区域各监测点位底栖动物生物多样性指数。由图 2 可见,*H* 值由高到低为竺山湾 (1.20) > 徐家大塘 (1.09) > 太滬运河 (0.67) > 漕桥河 (0.33)。*D* 值与 *J* 值在不同点位的变化与 *H* 值类似,太滬运河的 *J* 值较高,接近于徐家大塘与竺山湾,说明太滬运河的生物多样性虽然较低,但是物种密度相对均匀。

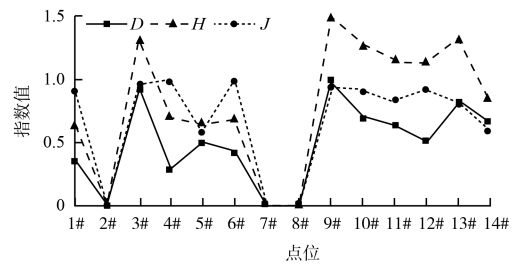


图 2 研究区域各监测点位底栖动物生物多样性指数
Fig. 2 Biodiversity index of benthos at each monitoring site in the study area

2.4 底栖动物群落影响因素分析

图 3 (a) (b) 分别为研究区域底栖动物群落与环境因子 CCA 排序。由图 3 可见,底栖动物群落分布主要受 pH 值、TN、PO₄³⁻、I_{Mn}、浊度、Chl-a 等因素的影响。其中,霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 分布主要受 TN、TP 和 PO₄³⁻ 等因素影响,中国长足摇蚊 (*Tanytus chinensis*) 主要受 pH 值、I_{Mn} 和 Chl-a 等因素影响。太滬运河与漕桥河中影响底栖动物群落分布的主要因素为 pH 值、I_{Mn} 和 Chl-a,而徐家大塘和竺山湾中主要因素为 TN、TP 和 PO₄³⁻ 等。

在研究区域中 pH 值对底栖动物群落结构的影响最强,酸性水体对大多数底栖动物生存不利。TN、PO₄³⁻ 和 I_{Mn} 等反映营养状态的因子对底栖动

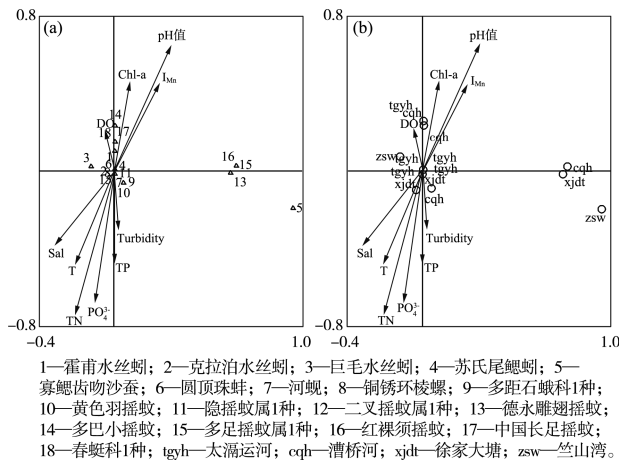


图 3 研究区域底栖动物群落与环境因子 CCA 排序

Fig. 3 Ordering of benthic communities and environmental factor CCA in the study area

物群落结构的影响较大。吴召仕等^[13]调查太湖梅梁湾时发现,寡毛类和摇蚊幼虫的数量与营养状态呈正相关。此次研究也表明,水体营养程度越高,寡毛类和摇蚊幼虫的优势度越高。霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)会摄取水体中的氮、磷等营养物质并排泄有机质^[14]。营养状态较高的水体中浮游植物生物量一般较高,而以绿藻为主要食物来源的中国长足摇蚊(*Tanytus chinensis*)就会大量繁殖^[15]。漕桥河大部分为自然河道,植被相对丰富且浮游植物含量较多,Chl-a 含量接近太滬运河的两倍,故太滬运河中优势物种为水丝蚓,漕桥河中优势物种多为摇蚊类。移动能力低的软体动物对高营养盐含量水体耐受性较差^[16],研究区域较少发现软体动物的情况与之相符。浊度与底栖动物种群数量呈明显负相关,主要是由于浊度越高,作为底栖动物主要食物来源的藻类生物量越低。

另外,对底栖动物群落影响较大的因子其解释率都较低,如 pH 值解释率为 9.4%,这说明还有其他环境因素影响底栖动物群落结构。太滬运河与漕桥河流速较低,有利于营养物沉积;河道周边硬质护岸限制了挺水植物和沉水植物的生长,直接影响与水生植物密切相关的部分底栖动物;研究区域周边多居民区、工厂和农田,太滬运河中往来船只密度较高,频繁的人类活动导致河道营养盐和底质扰动增强,也会对底栖动物造成一定的影响。

2.5 水质生物学评价

图 4(a)(b)(c)分别为研究区域各监测点位的水质生物学评价结果。由图 4 可见,研究区域各

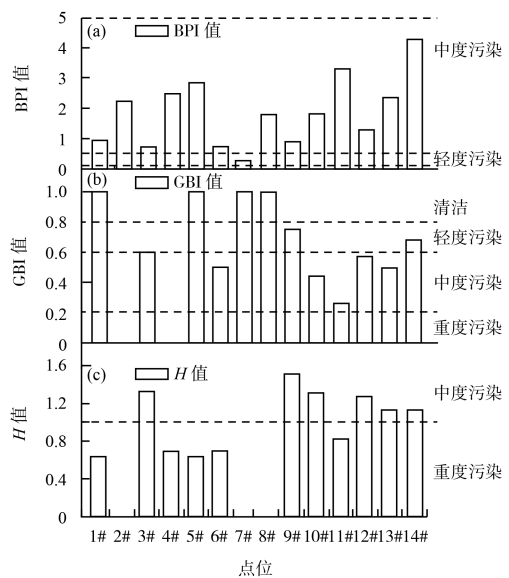


图 4 研究区域各监测点位水质生物学评价结果

Fig. 4 Biological evaluation of water quality at each monitoring site in the study area

监测点位的 BPI 值在 0.26 ~ 4.31 之间,除了 7# 点位处于轻度污染外,其余点位均处于中度污染。GBI 值在 0 ~ 1 之间,其中点位 1#、5#、7#、8# 的 GBI 值为 1,处于清洁状态;点位 9#、14# GBI 值为 0.75、0.68,处于轻度污染;其余点位 GBI 指数值为 0.26 ~ 0.60,处于中度污染。 H 值在 0 ~ 1.60 之间,除了 3#、9#、12#、13#、14# 和 10# 点位处于中度污染状态外,其余点位均为重度污染。

3 种评价指数的侧重点不同造成评价结果存在差异。 H 指数是基于研究区域种群数量与结构的分析,重点在于该区域的底栖动物多元性与平衡性^[17];BPI 指数以耐污种类与不耐污种类进行比较分析,关注研究区域的污染水平^[18];GBI 指数关注群落结构中非寡毛类所占百分比。此次调查区域底栖动物群落结构影响因素复杂多样,以单个指标评价水质状况存在缺陷,必须多指标综合判断。

太滬运河 2# 和 4# 点位的 GBI 指数和 H 指数都为重度污染状态,表明两个点位的底栖动物几乎全为寡毛类,2# 点位周边有大量居民区,4# 点位周边分布有大量工厂,长期的生活、生产废水排入对底栖动物多样性造成负面影响,因而太滬运河点位评价结果多处于中-重度污染状态。漕桥河(5#—8# 点位)虽然 H 指数评价都为重度污染,但 GBI 指数显示 5# 点位、7# 和 8# 点位处于清洁状态,说明漕桥河的底栖动物群落结构组成单一且寡毛类较少;

BPI 指数评价虽然除 7# 点位外其余点位均处于中度污染状态,但数值较低,表明耐污种与不耐污种分布相对均匀。漕桥河周边农田较多,中下游河道经过徐家大塘湿地的净化,污染物浓度相对较低。综合分析漕桥河处于中度污染状态。在徐家大塘(12#—14# 点位)和竺山湾(10#—11# 点位)的监测点位中除了 14# 点位 GBI 指数评价为轻度污染、11# 点位 H 指数评价为重度污染外,其余点位均评价为中度污染。这两处水域共同点为敞水区,水生植物较多,人类活动影响均较弱, TN、TP 和 PO_4^{3-} 等水环境因子在底栖生物群落结构的影响因素中占比较高,故 3 个指数的评价结果较一致。

此次调查研究的入太湖河道下游及竺山湾区域,吴召仕等^[13]在 2010 年的调查表明,整体处于中度污染状态;许浩等^[19]在 2014 年对太湖的调查表明,太湖处于富营养状态;陈桥等^[20]2017 年对太湖流域江苏片区调查中发现,竺山湾及上游湖荡的优势物种为寡毛类和摇蚊类。而在太湖西北部区域中,邵勇等^[21]对漏湖入湖河流的水质评价中发现,河流中下游及入湖口处于中-重度污染状态。此次评价研究结果与周边河湖以往水质评价结果相一致,能够较好地反映研究区域水质状况。

3 结论

(1) 对太湖西北部主要入湖河道及湖湾的调查分析表明, TN 质量浓度为 1.06 mg/L ~ 3.30 mg/L、TP 质量浓度为 0.073 mg/L ~ 0.212 mg/L,太漕运河水质为 V 类水,漕桥河为 III 类,徐家大塘为 IV 类,竺山湾总体为 IV 类。

(2) 入湖河道共检测出底栖动物 6 纲 18 种,优势物种为霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 和中国长足摇蚊 (*Tanytus chinensis*)。物种多样性指数依次为竺山湾 > 徐家大塘 > 太漕运河 > 漕桥河。

(3) 水质生物学评价表明,太漕运河处于中-重度污染状态,漕桥河、徐家大塘和竺山湾处于中度污染状态。多指标的评价结果与周边河湖以往水质评价结果一致性较好,能够较好地反映研究区域水质状况。

[参考文献]

[1] 张海燕,沈丽娟,周崑,等. 基于底栖动物完整性指数的常州武南区域水生态健康评价[J]. 环境监测管理与技术,2021,33(4):35-39.

[2] 李娣,李旭文,姜晟,等. 京杭运河江苏段底栖动物群落结构调查[J]. 环境监测管理与技术,2021,33(1):23-27.

[3] WANG X Z, TAN X. Macroinvertebrate community in relation to water quality and riparian land use in a subtropical mountain stream, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24: 14682-14689.

[4] MACEDO D R, HUGHES R M, FERREIRA W R, et al. Development of a benthic macroinvertebrate multimetric index (MMI) for neotropical savanna headwater streams [J]. Ecological Indicators, 2016, 64: 132-141.

[5] 吴东浩,刘伟,赵煜,等. 秦淮河上游水体大型底栖无脊椎动物群落结构及水质生物评价[J]. 环境监测管理与技术, 2010, 22(5): 19-22.

[6] 桂青. 新孟河延伸拓浚工程对长江水环境影响研究[J]. 人民长江, 2016, 47(19): 20-25.

[7] 陈忠. 漕桥河水环境现状分析与治理对策[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.

[8] 陆隽,孔繁璠,张鸽,等. 2009—2018 年江苏省太湖西岸主要入湖河道水质变化趋势[J]. 江苏水利, 2020(3): 5-9.

[9] 韩景. 太湖竺山湖湖流和水体迁移规律研究[J]. 水利规划与设计, 2020(7): 59-64.

[10] 李伟迪. 太漕运河流域农田土壤重金属污染及健康风险评价研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.

[11] 赵婷婷,李秋艳,陆丽巧,等. 漕桥河小流域平原河网地区水环境污染分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S2): 170-175.

[12] 陆晓哈,曹宸,李叙勇. 付疇河流域中下游大型底栖动物群落结构与水质生物学评价[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 3201-3214.

[13] 吴召仕,蔡永久,陈宇炜,等. 太湖流域主要河流大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 湖泊科学, 2011, 23(5): 686-694.

[14] 邵明昊,左胜鹏,洪文秀. 霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 环境监测与生态修复效应研究进展[J]. 环境科学导刊, 2020, 39(2): 1-9.

[15] 崔福义,安东,孙兴滨,等. 水体中摇蚊幼虫的孳生规律及其控制途径[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(7): 1-4.

[16] 李寅安,马泽民,雷澄,等. 自然放养下铜锈环棱螺、河蚬、三角帆蚌对水质影响研究[J]. 环境生态学, 2020, 2(7): 71-76.

[17] 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.

[18] 魏云慧,肖红,包军,等. 大庆市红旗水库的底栖动物与水质评价[J]. 黑龙江环境通报, 2006, 30(4): 70-72.

[19] 许浩,蔡永久,汤祥明,等. 太湖大型底栖动物群落结构与水环境生物评价[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 840-852.

[20] 陈桥,张翔,沈丽娟,等. 太湖流域江苏片区底栖大型无脊椎动物群落结构及物种多样性[J]. 湖泊科学, 2017, 29(6): 1398-1411.

[21] 邵勇,王洪杨,徐蛟,等. 漏湖入湖河流春季大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1617-1628.