

DOI: 10.5846/stxb202001140116

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

Lu X H, Cao C, Li X Y. Macrobenthos community structure and water quality assessment in the middle and lower reaches of Futuan River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3201-3214.

付疃河流域中下游大型底栖动物群落结构与水质生物学评价

陆晓晗^{1,2}, 曹宸^{1,2}, 李叙勇^{1,2,*}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 2018 年 12 月—2019 年 10 月对山东省日照市付疃河流域中下游大型底栖动物及相应水环境因子进行分季节的监测, 并对底栖动物群落组成、多样性特征及与水质因子的相关性进行分析。结果表明, 调查共采集底栖动物 42 种 (环节动物 14 种、节肢动物 20 种、软体动物 8 种), 广泛分布物种为霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*)、水丝蚓属 (*Limnodrilus* sp.) 及摇蚊属 (*Chironomus* sp.); 底栖动物总密度呈春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季; CCA (Canonical Correspondence Analysis) 分析表明环节动物与 COD、TP 有显著正相关性, 各门类与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 相关性差异较大; 底栖动物多样性分布特征与河流水源结构有关。采用生物多样性指标、指示物种水质生物学指标进行水质评价, Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数评级偏差, Pielou 指数评级偏优, 而指示物种水质生物学评价 (Goodnight-Whitley 指数、相对重要性指数及 Wright 指数) 基本一致, 整体平均处于中污染, 评价过程仍须考虑河流及物种客观属性特征, 得到更具适用性的评价管理方法。

关键词: 大型底栖动物; 生物多样性; 水质生物学评价; 付疃河

Macrobenthos community structure and water quality assessment in the middle and lower reaches of Futuan River Basin

LU Xiaohan^{1,2}, CAO Chen^{1,2}, LI Xuyong^{1,2,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: This study investigates macrobenthos and corresponding water environmental factors seasonally in middle and lower reaches of Futuan River in Rizhao City, Shandong Province from December 2018 to October 2019, to analyze the composition and biodiversity characteristics of benthic communities and the correlation with water quality factors. The results show that 42 species of benthic animals (14 species of link animals, 20 species of arthropods, and 8 species of molluscs) are identified. The widely distributed species are *Limnodrilus hoffmeisteri*, *Limnodrilus* sp. and *Chironomus* sp. The relationship between total density of benthic animals is spring > winter > autumn > summer. Canonical Correspondence Analysis (CCA) shows a significantly positive correlation between link animals and COD and TP, as well as different correlations between each category and $\text{NH}_3\text{-N}$. Biodiversity distribution of benthic animals is related to the structure of river water sources. Water quality is evaluated using biodiversity indicators and water quality biological indicators of indicator species. The results show that Shannon-Wiener index and Margalef index are worse and Pielou index is better, while water

基金项目: 北方海岸带小流域水污染防控与生态功能综合提升技术 (2017YFC0505803-04); 京津冀城市群地区生态安全关键技术综合示范区建设 (2016YFC0503007); 国家自然科学基金青年基金 (41401590)

收稿日期: 2020-01-14; 网络出版日期: 2021-02-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xyli@rcees.ac.cn

quality biological indicators (Goodnight-Whitley index, Bio-pollution index and Wright index) are almost the same with the level of moderately pollution. The evaluation process should consider the objective attributes of rivers and species to obtain a more applicable evaluation management method.

Key Words: macrobenthos; biodiversity; water quality biological assessment; Futuan River

大型底栖动物是河流生态系统的重要组成部分,其生命周期较长、分布范围较广、行动较为迟缓,且对河流生态环境变化极为敏感,因此常被用作河流生态系统健康与完整性评价的重要指示生物^[1-3]。目前,针对底栖动物群落结构与河流生态质量关系已经开展大量研究。1995年, Claude 和 Olivier 利用底栖动物分类与 RIVAUD 指数结合的方法对瑞士西部 29 条河流的生物质量进行评价^[4]; 2009 年, Purcell 和 Bressler 等人开发一种基于底栖动物的多指标城市化生物指标来衡量城市化对河流生态系统的影响并通过美国三个气候区的数据验证其实用意义^[5]。近年来,国内河流生态研究在底栖动物方面也取得较大进展。2007 年,张远等人构建底栖动物生物完整性评估指数(B-IBI)对辽河流域河流健康进行评价研究^[6]; 2011 年,吴召仕等人调查分析太湖流域主要河流底栖动物群落结构及其与环境因子之间的关系,评价各水系的水质状况,其中,相对重要性指数及 Wright 指数的评价结果与水质化学指标具有很好的一致性^[7]; 2017 年,盛萧等人采用多种不同的底栖动物生物评价指数对东江流域进行河流生态健康评价,并研究其适用性,其中, Goodnight-Whitley 指数对磷污染显著的水体有较好的指示作用,且其受水体中寡毛类物种的数量限制明显^[8]。

付疃河发源于山东省日照市五莲县韩家窝洛大马鞍山,经东港区,自西向东南方向汇入黄海,其流域面积 1040 km²。该流域属暖温带湿润大陆性气候,年均温 16.2℃,年均降水 923.5 mm,且年际波动较为明显,其降水最大值年份是最小值的 2.7 倍;因毗邻大海,其年内降水存在显著差异,汛期(6—9 月)降水量占比超过 70%^[9],其中流域中下游辖区为东港区,年均温 12.6℃,年均降水 916.0 mm。作为日照市东港区主要水源,其水资源受日照水库、马陵水库等大中型水利工程管控,流域上游自然径流基本汇入库区存蓄,致使流域下游水资源季节性匮乏,以农业发展的农村区域段河流以降水补给与间歇性库区排水补给为主,而位于工商业发展的城镇区域段河流则以再生水补给与降水补给为主。伴随工农业开发与人为水资源管控强度逐年提升,付疃河流域中下游面临着农业面源污染、城镇再生水点源二次污染与河段流通性减弱的生态风险,河流水生生物多样性锐减,河流生态系统水环境质量呈现下降趋势。

本文选取河流底栖动物为指示水生生物,对付疃河流域中下游进行水质、水生态调查研究,对共计 16 个样点进行河流底栖动物及水环境因子的采样,基于不同水源结构子流域划分,开展河流水生态系统健康评价,以为付疃河流域中下游河道治理及生态管理工作提供科学依据。本次研究的主要目标:(1)对付疃河流域中下游不同分区、不同季节的底栖动物群落分布特征进行定性描述及定量分析;(2)对不同水源结构特征分区的底栖动物生物多样性及其与水环境因子相关性进行分析;(3)运用不同水质生物学方法对研究区域进行水生态评价并探讨其适用性。

1 材料与方法

1.1 样点布设

考虑付疃河流域中下游土地利用类型、河流水源结构特征与降水季节性分布差异,2018 年 9—10 月在研究区域内共考察布设 16 处监测点位,其中付疃河干流(日照水库下游至河口)布设 3 处为 G1—G3,付疃河支流(南湖河 N1—N4、固河内香店河与后楼河 H1—H5、沙墩河 S1—S4)布设 13 处,具体位置见图 1。2018 年 12 月、2019 年 3 月、7 月及 10 月在各点位开展底栖动物样品采集与水环境理化指标监测,每季内集中 2 天完成采样。

1.2 底栖动物样品采集与鉴定

借助 D 型网(直边长 30 cm,孔径 250 μm),在各采样点采集底泥两份,均匀混合,取其中一半,经过 40 目网筛过筛冲洗,将网内残余采集物装入聚乙烯封口袋,恒温冷藏至实验室,进行人工挑拣,装入 50 mL 的塑料

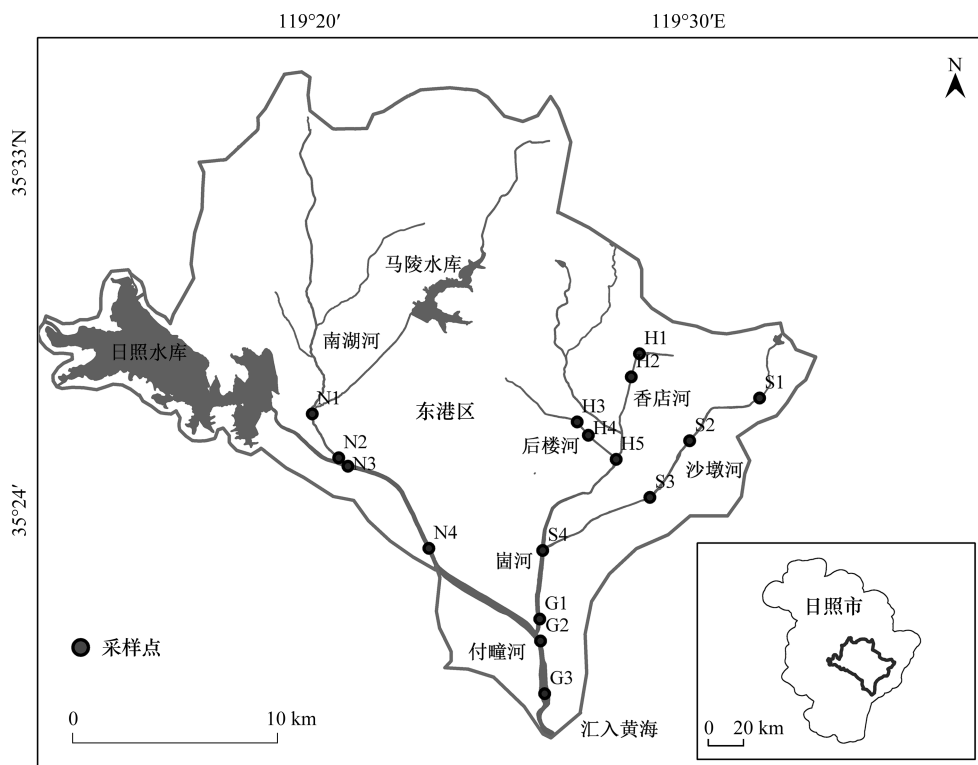


图1 付疃河流域中下游采样点分布图

Fig.1 Sampling sites in the middle and lower reaches of Futuan River Basin

N1—N4:南湖河4处样点;H1—H5:后楼河与香店河5处样点;S1—S4:沙墩河4处样点;G1—G3:付疃河干流近河口3处样点

瓶中,并加入福尔马林溶液保存。置于六孔盘中,在显微镜和解剖镜下进行鉴定,尽可能鉴定到种,并计数和称重。称量时,先用吸水纸吸去样本表面水分,直到吸水纸表面无水痕迹为止,用电子天平定量称重,精确到0.0001 g,并将每个样品的个体数量和生物量换算至每 m^2 的单位含量。软体动物、寡毛类、水生昆虫等底栖动物物种鉴定参照有关资料^[10-12]。

1.3 水环境理化参数测定

采用多参数水质分析仪现场测定采样点水体水温(T)与pH值,以500 mL塑料瓶恒温冷藏水质样品至实验室,并测定水质样品化学需氧量(COD;GB11914-89)、总氮(TN;GB11894-89)、总磷(TP;GB11893-89)及氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$;HJ535—2009)。

1.4 数据分析

采用典范相关分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)对底栖动物群落结构与水环境理化因子进行相关性的分析。CCA分析又称为多元直接梯度分析,多用于分析物种与环境因子之间的关系,基于单峰模型,将对应分析与多元回归分析相结合,且每一步的计算所得的样方排序坐标值都会与环境因子进行线性回归^[13-14]。CCA排序将通过Canoco 5.0软件进行制图分析。

采用物种数量、优势种、生物多样性指数以及重要指示物种作为底栖动物的评价参数,对研究区底栖动物的分布情况以及群落结构特征进行评价。

1.4.1 多样性分析

物种数量包括底栖动物的物种密度及生物量,优势种采用计算优势种优势度(Y)进行筛选,生物多样性指数包括Shannon-Wiener多样性指数(H)、Simpson多样性指数(D)、Margalef丰富度指数(R)以及Pielou均匀度指数(J)^[15-17]:

$$Y = P_i \times f_i \quad (1)$$

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

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

$$R = (S - 1) / \ln S \quad (4)$$

$$J = H / H_{\max} \quad (5)$$

式中, P_i 为第 i 类底栖动物的个体数目 n_i 占底栖动物个体总数目 N 的比例, 即 $P_i = n_i / N$; f_i 为第 i 种在各个采样点出现的频率, $Y \geq 0.02$ 时, 表示该物种为优势种; S 为采样点的物种总数; H_{\max} 为 Shannon-Wiener 多样性指数的最大值, 即 $H_{\max} = \ln S$ 。

1.4.2 指示物种生物学分析

研究区底栖动物群落中的优势种可作为重要指示物种, 其耐污值可用于判断水体的受污染程度。耐污值区间范围为 $[0, 10]$, < 3 为敏感类群, $[3, 7]$ 为中间类群, > 7 为耐污类群^[18]。其中, 寡毛类是一类典型的耐污物种, 能够较好地衡量水环境质量, 与其相关的水质生物学指数有 Goodnight-Whitley 指数 (I_{CW})、相对重要性指数 (BPI) 及 Wright 指数^[19-21]:

$$I_{CW} = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (6)$$

$$BPI = \frac{\lg(N_1 + 2)}{\lg(N_2 + 2) + \lg(N_3 + 2)} \quad (7)$$

$$\text{Wright 指数} = \text{每 m}^2 \text{ 的颤蚓科数量} \quad (8)$$

式中, n 为寡毛类个体数, N 为底栖动物个体总数目, N_1 为寡毛类、蛭类和摇蚊幼虫的个体数, N_2 为多毛类、甲壳类、除摇蚊幼虫以外其他水生昆虫个体数, N_3 为软体动物个体数。

1.4.3 综合分析

生物多样性及指示物种生物学各个指标对于水环境质量的评价标准见表 1。

表 1 多样性、生物学指数-水环境质量评价标准

Table 1 Standards of diversity and biological indexes-water environment quality assessment

评价等级 Assessment level	Shannon- Wiener 指数 Shannon- Wiener index	Margalef 指数 Margalef index	Pielou 指数 Pielou index	Goodnight- Whitley 指数 Goodnight- Whitley index	相对重要 性指数 Bio-pollution index	Wright 指数 Wright index
清洁 Clean	>3	>6.0	>0.8	<30%	<0.1	<100
轻污染 Light pollution		3.0—6.0	0.5—0.8	30%—60%	0.1—0.5	100—999
β -中污染 β -medium pollution	2.0—3.0	2.0—3.0	0.3—0.5	60%—80%	0.5—1.5	1000—5000
α -中污染 α -medium pollution	1.0—2.0	1.0—2.0	0.1—0.3		1.5—5.0	
重污染 Heavy pollution	0—1.0	0—1.0	<0.1	>80%	>5.0	>5000

2 结果分析

2.1 底栖动物群落组成及分布

调查期间在付疃河流域中下游干、支流 16 个点位发现大型底栖动物 42 种, 隶属于 3 门 6 纲 19 科。其中, 环节动物分属 3 纲 5 科 14 种, 占 33.3%; 节肢动物分属 2 纲 7 科 20 种, 占 47.6%; 软体动物种类相对较少, 分属 2 纲 7 科 8 种, 占总数的 19.0%。各采样点的底栖动物种类组成及分布情况见附表 1。

分别对各点位的底栖动物种群进行优势度计算, 其优势种群分布情况见表 2。霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*)、水丝蚓属 (*Limnodrilus* sp.) 及摇蚊属 (*Chironomus* sp.) 在所有点位出现的频率高于 50%, 为付疃

表 2 付疃河流域中下游各季节优势种分布
Table 2 Distribution of dominant species in different seasons in the middle and lower reaches of Futuan River Basin

点位 Site	春季 Spring			夏季 Summer			秋季 Autumn			冬季 Winter		
	优势种 1	优势种 2	优势种 3	优势种 1	优势种 2	优势种 3	优势种 1	优势种 2	优势种 3	优势种 1	优势种 2	优势种 3
N1	仙女虫属	直突摇蚊属	—	—	—	—	摇蚊属	大蚊属	—	大蚊属	—	—
N2	直突摇蚊属	多足摇蚊属	摇蚊属	—	—	—	—	—	—	霍甫水丝蚓	淡水单孔蚓	摇蚊属
N3	—	—	—	环棱螺属	苏氏尾鳃蚓	—	—	—	—	霍甫水丝蚓	淡水单孔蚓	苏氏尾鳃蚓
N4	长臂虾科	—	—	环棱螺属	霍甫水丝蚓	萝卜螺属	霍甫水丝蚓	水丝蚓属	—	河蚬	—	—
H1	—	—	—	环棱螺属	仙女虫属	纹沼螺	霍甫水丝蚓	纹沼螺	环棱螺属	霍甫水丝蚓	水丝蚓属	苏氏尾鳃蚓
H2	苏氏尾鳃蚓	扁卷螺	水蝇	环棱螺属	摇蚊属	—	淡水单孔蚓	—	—	雕翅摇蚊属	粗腹摇蚊	—
H3	摇蚊属	粗腹摇蚊	直突摇蚊属	霍甫水丝蚓	水丝蚓属	环棱螺属	霍甫水丝蚓	红裸须摇蚊	—	—	—	—
H4	粗腹摇蚊	红裸须摇蚊	—	尖膀胱螺	—	—	—	—	—	—	—	—
H5	—	—	—	环棱螺属	—	—	水丝蚓属	—	—	—	—	—
S1	霍甫水丝蚓	摇蚊属	苏氏尾鳃蚓	水丝蚓属	霍甫水丝蚓	多毛管水蚓	水丝蚓属	摇蚊属	雕翅摇蚊属	霍甫水丝蚓	水丝蚓属	苏氏尾鳃蚓
S2	直突摇蚊属	红裸须摇蚊	水丝蚓属	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S3	—	—	—	霍甫水丝蚓	水丝蚓属	—	水丝蚓属	摇蚊属	—	霍甫水丝蚓	水丝蚓属	摇蚊属
S4	红裸须摇蚊	仙女虫属	克拉泊水丝蚓	霍甫水丝蚓	多毛管水蚓	正颤蚓	霍甫水丝蚓	水丝蚓属	淡水单孔蚓	—	—	—
G1	霍甫水丝蚓	摇蚊属	淡水单孔蚓	水丝蚓属	多毛管水蚓	尖膀胱螺	霍甫水丝蚓	水丝蚓属	摇蚊属	霍甫水丝蚓	苏氏尾鳃蚓	摇蚊属
G2	白线蚓属	—	—	大蚊属	—	—	水丝蚓属	—	—	—	—	—
G3	竹蛭科	—	—	竹蛭科	水丝蚓属	—	多足摇蚊属	竹蛭科	溪蟹科	—	—	—

优势种 1、优势种 2、优势种 3 依据优势度 $Y(\geq 0.02)$ 数值由大到小对应排列; N1-N4: 南湖河 4 处样点; H1-H5: 后楼河与香店河 5 处样点; S1-S4: 沙墩河 4 处样点; G1-G3: 付疃河干流近河口 3 处样点

河流域中下游的广泛分布物种。不同季节各区域的优势种差异较大,春季 N、H、S 区的优势种大多为摇蚊科,主要有摇蚊属 (*Chironomus* sp.)、直突摇蚊属 (*Orthocladius* sp.)、粗腹摇蚊 (*Tanypus* sp.)、红裸须摇蚊 (*Prosilocerus akamusi*) 等, G 区以颤蚓科较为优势;夏季 N、H 区以田螺科的环棱螺属 (*Bellamya* sp.) 为最优势种, S 区以颤蚓科的霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 为最优势种, G 区各点位的优势种分布差异相对较大;秋季各点位均以颤蚓科和摇蚊科为主,其中霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 及水丝蚓属 (*Limnodrilus* sp.) 占优势程度最大;冬季各点位均以颤蚓科为主,霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 占优势程度最大,摇蚊科优势度较秋季相对降低,由于水温较低,较多点位未发现底栖动物。G3 点由于处在河口地区,受海水涨落影响,出现竹蛭科、溪蟹科的特征优势种。

2.2 底栖动物群落密度及生物量

从付瞳河流域中下游各分区不同季节的底栖动物总密度来看(图 2),整体存在春季>冬季>秋季>夏季的变化关系。对于不同分区不同季节分布,底栖动物总密度在春季的 S 区为最高值,超过 8000 个体/m²,远高于其他分区;最低值出现在夏季的 N 区,略高于 100 个体/m²。同时, S 区密度在各季节均为最大,而 N 区在各季节均为最小。

底栖动物总生物量(图 2)在整体上没有明显的季节性变化关系,最高值出现在秋季的 H 区,超过 100 g/m²,远高于其他分区各季节的生物量;最低值出现在夏季的 G 区,生物量低于 0.2 g/m²。此外, N 区在夏季总生物量最高,且相对其他三个分区差距较为明显, S、G 区均在春季出现最大生物量。

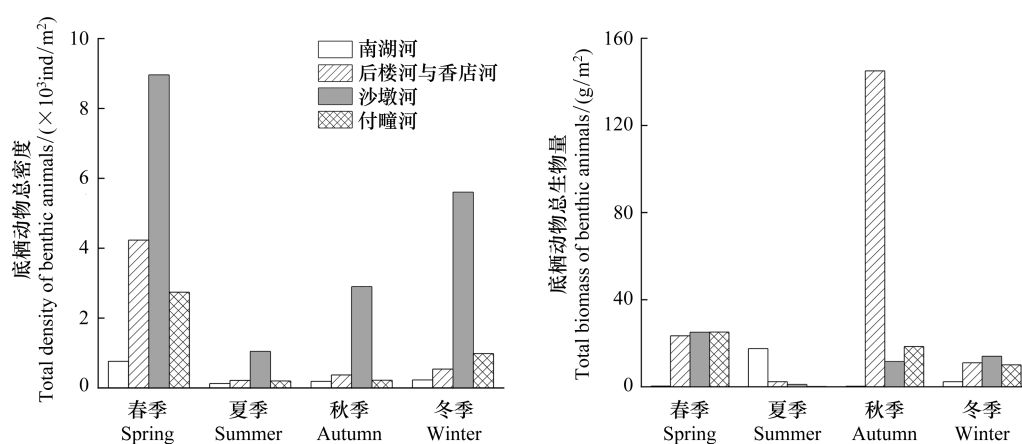


图 2 付瞳河流域中下游各季节底栖动物总密度及生物量

Fig.2 Total density and biomass of benthic animals in different seasons in the middle and lower reaches of Futuan River Basin

2.3 底栖动物与水环境因子相关性分析

2.3.1 水环境因子特征分析

依据日照市政府发文《日照市水污染防治控制单元达标方案》(2017 年印发), N 区预计执行地表水Ⅲ类标准,而 H、S 及 G 区预计执行地表水Ⅴ类水标准。对照付瞳河流域中下游各分区不同季节的水质监测均值(表 3), COD 均值介于 15—40 mg/L,其中 N 区在春季对应浓度标准略超Ⅳ类标准,其余季节介于Ⅱ—Ⅲ类标准范围, H、S 及 G 区对应基本满足Ⅳ类标准,符合规划预期; TN、TP 与 NH₃-N 均值整体不乐观,其中 N、H、S 及 G 区 TN 全年均超过标准值,冬季尤为严重; TP 均值呈现季节性峰值波动, H、S 区自春至冬逐季升高,而 N、G 区在夏季出现峰值; N 区 NH₃-N 季节性平稳,均达Ⅲ类标准, H、S 及 G 区在秋冬季 NH₃-N 常超Ⅴ类标准。

2.3.2 底栖动物与水环境因子相关性分析

对付瞳河流域中下游各分区的底栖动物与水环境因子进行 CCA 分析(图 3)。N 区水环境因子对各门类

底栖动物分布的解释程度达到 40.9%,底栖动物的总生物量与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈正相关关系;H 区水环境因子可解释各门类底栖动物分布情况的 73.1%,总体分布情况相关性不大,与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 有较弱的负相关性,但其中节肢动物与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在一定的正相关性,环节动物则与 TP 存在较为显著的正相关关系;S 区两者的相关程度较弱,水环境因子仅能解释底栖动物分布的 14.5%,其中软体动物与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、节肢动物与 COD 分别存在较弱的正相关性与负相关性;G 区的水环境因子对底栖动物的分布情况可以解释 38.5%,软体动物与 TP 有一定的正相关性,而环节动物与 COD 也有正相关关系的体现,环节动物同时还与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在一定的负相关关系。

表 3 付疃河流域中下游各分区水质监测均值及标准差

Table 3 Mean values and standard deviations of water quality monitoring in each area in the middle and lower reaches of Futuan River Basin

分区 Area	季节 Season	化学需氧量 COD/(mg/L)	总氮 TN/(mg/L)	总磷 TP/(mg/L)	氨氮 NH ₃ -N/(mg/L)
南湖河	春季	30.93±4.24	10.06±1.07	0.11±0.03	0.27±0.08
	夏季	22.65±4.36	2.06±0.42	0.45±0.08	0.93±0.39
	秋季	19.43±2.46	2.80±0.32	0.19±0.25	0.57±0.25
	冬季	16.78±3.50	12.24±2.49	0.21±0.14	0.64±0.16
后楼河	春季	24.75±4.57	6.16±2.42	0.10±0.04	1.17±1.25
	夏季	26.20±12.72	3.51±1.00	0.33±0.04	1.52±1.18
	秋季	21.67±1.55	7.53±1.13	0.57±0.37	5.69±0.37
	冬季	26.50±3.37	12.06±2.75	0.70±0.88	1.17±0.61
沙墩河	春季	29.60±5.66	7.58±3.23	0.12±0.04	1.67±1.54
	夏季	27.58±11.90	4.53±1.71	0.34±0.09	1.74±1.80
	秋季	26.35±3.60	9.80±2.13	1.04±0.64	7.24±2.22
	冬季	40.63±11.80	22.48±5.49	1.53±0.80	10.09±6.83
付疃河	春季	25.57±5.02	8.76±3.55	0.13±0.04	2.91±2.78
	夏季	17.66±9.53	2.05±0.59	0.43±0.13	0.78±0.42
	秋季	15.29±9.79	4.75±0.20	0.22±0.03	2.30±0.97
	冬季	27.57±13.63	15.34±8.67	0.28±0.08	2.07±1.08

COD:化学需氧量,Chemical oxygen demand;TN:总氮,Total nitrogen;TP:总磷,Total phosphorus;NH₃-N:氨氮,Ammonium

2.4 底栖动物生物多样性分析及水质生物学评价

2.4.1 生物多样性季节性分析

根据生物多样性指数计算结果(图 4)可知,Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Margalef 丰富度指数及 Pielou 均匀度指数整体在各个分区呈现较为一致的季节性变化趋势,然而 Pielou 指数变化幅度相对其他多样性指数较弱,较难反映各区间差异性。

考虑季节性差异,春季 H、S 区较其他季节的多样性程度较高,G 区相对较低;夏季 N、S 两区多样性程度相对较高,其中, Margalef 指数所显示 S 区结果存在差异性;秋季 S 区多样性程度最高, Pielou 指数所得结果则表明四个分区多样性程度相近;冬季 S、G 两区多样性程度较高,而 H 区相对较低。S 区在全年均体现出较高的底栖动物多样性程度。

2.4.2 水质生物学评价

(1) 基于生物多样性指数的水质评价

根据 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数及 Pielou 指数对水环境质量的评价标准(表 1),对各分区不同季节水质污染程度进行评级(表 4)。4 区间水质评级季节性差异不明显,其中 S 区相较其他 3 区水质情况较好,基本符合地表 V 类水环境标准规划,H、G 区在夏秋两季的水环境质量较差,暂时难以满足规划需求,而 N 区对应Ⅲ类水环境标准规划,但其水质污染程度远劣于预设标准。

考虑不同多样性指数间差异,水质评级优劣存在明显差异性,呈现 Pielou 指数>Margalef 指数>Shannon-Wiener 指数关系,即 Pielou 指数整体评价结果远优于现状水质情况,评价结果难以采信,而 Margalef 指数与 Shannon-Wiener 指数评价结果较为一致。综合考虑,基于生物多样性指数评价,付疃河流域中下游处于 α -中污染至重污染。

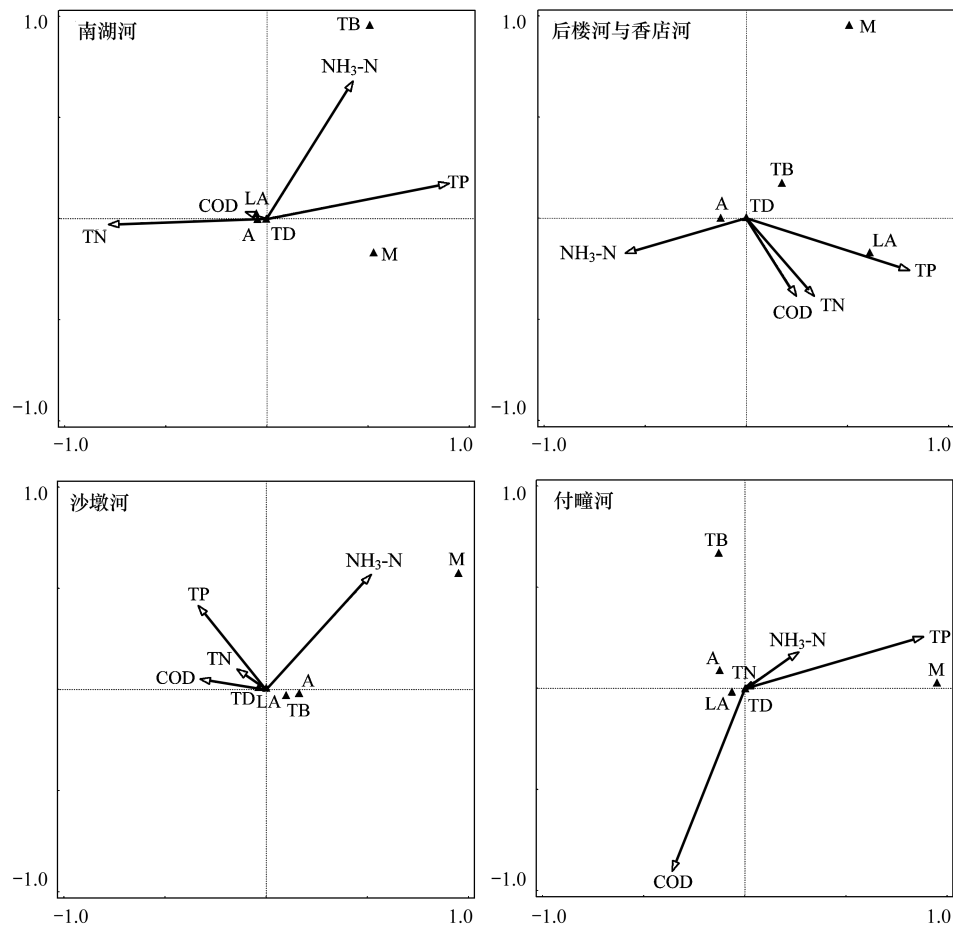


图 3 付疃河流域中下游各分区底栖动物与水环境因子 CCA 排序图

Fig.3 CCA plots of benthic animals and water environmental factors in each area in the middle and lower reaches of Futuan River Basin
COD: 化学需氧量, Chemical oxygen demand; TN: 总氮, Total nitrogen; TP: 总磷, Total phosphorus; NH₃-N: 氨氮, Ammonium; TD: 底栖动物总密度, Total density; TB: 底栖动物总生物量, Total biomass; LA: 环节动物, Annelida; M: 软体动物, Mollusca; A: 节肢动物, Arthropod

表 4 付疃河流域中下游生物多样性指数水质等级评价

Table 4 Assessment of water quality level in terms of biodiversity indexes in the middle and lower reaches of Futuan River Basin

评价指标 Assessment indicators		Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Margalef 指数 Margalef index	Pielou 指数 Pielou index
南湖河	春季	重污染	α-中污染	轻污染
	夏季	重污染	α-中污染	清洁
	秋季	重污染	重污染	清洁
	冬季	重污染	α-中污染	清洁
后楼河	春季	α-中污染	α-中污染	轻污染
	夏季	重污染	α-中污染	清洁
	秋季	重污染	重污染	清洁
	冬季	重污染	重污染	轻污染
沙墩河	春季	α-中污染	α-中污染	清洁
	夏季	α-中污染	重污染	清洁
	秋季	α-中污染	α-中污染	清洁
	冬季	α-中污染	α-中污染	轻污染
付疃河	春季	重污染	重污染	清洁
	夏季	重污染	α-中污染	轻污染
	秋季	重污染	重污染	清洁
	冬季	α-中污染	α-中污染	清洁

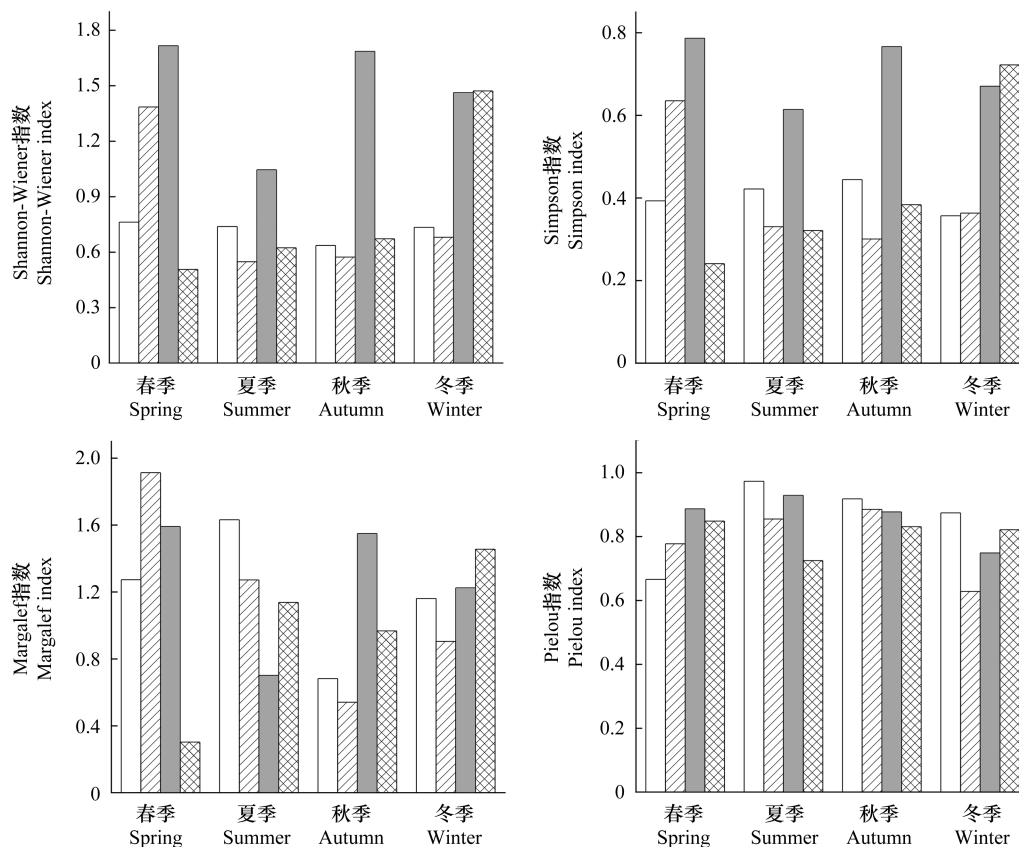


图4 付瞳河流域中下游底栖动物生物多样性的季节变化

Fig.4 Seasonal distribution of benthic biodiversity indexes in the middle and lower reaches of Futuan River Basin

(2) 基于底栖动物指示物种的水质评价

参考典型底栖动物耐污值分布情况^[22-25],选取寡毛纲颤蚓科耐污值为10,其中霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)为9.4、苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)为8.5,腹足纲田螺科为5,其中环棱螺属(*Bellamya* sp.)为6,水生昆虫中摇蚊属(*Chironomus* sp.)为5.7,直突摇蚊属(*Orthocladius* sp.)为4。根据各分区优势种分布情况(表2)可知,春夏季N、H区底栖动物群落以摇蚊科及田螺科为主,其水质条件较差;而S区底栖动物群落以颤蚓科为主,对应耐污值较高,其水质条件差;秋冬季全区均以颤蚓科为主,对应付瞳河流域中下游水环境质量状况最为恶劣。

通过计算 Goodnight-Whitley 指数、相对重要性指数及 Wright 指数并结合其对水环境质量评价标准(表1),各分区评级结果见表5。三种水质生物学指数评价结果在不同季节、不同分区上基本呈现一致的特征规律。春季S区水环境污染程度最为严重,且明显劣于其他三个分区;夏季H、S两区均能显示出较严重的水质污染情况,其中 I_{CW} 与BPI、Wright指数所得结果有所差异,前者S区水质评价达到清洁水平;秋季S区水质污染程度相对严重,中下游地区整体水环境呈现轻至中度污染,分区差异性不大;冬季S、G区的水质污染程度较为严重。全年N区水环境质量最高,基本保持轻污染水平,春、夏季提升至清洁水平。

3 讨论

3.1 底栖动物群落分布特征分析

付瞳河流域中下游共计发现大型底栖动物42种,环节动物与节肢动物为其中的主要门类,占总种类数80.9%。霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)与摇蚊属(*Chironomus* sp.)为出现频率较高的优势物种,均为耐污物种^[26-27],因此付瞳河流域中下游地区整体河流水环境呈现一定程度的富营养化现象。

表 5 付疃河流域中下游指示物种生物学指数水质等级评价

Table 5 Assessment of water quality level in terms of indicator species biological indexes in the middle and lower reaches of Futuan River Basin

评价指标 Assessment indicators		Goodnight-Whitley 指数 Goodnight-Whitley index		相对重要性指数 Bio-pollution index		Wright 指数 Wright index	
春季 Spring	南湖河	25.8%	清洁	1.52	α -中污染	246.03	轻污染
	后楼河	12.2%	清洁	1.98	α -中污染	137.57	轻污染
	沙墩河	60.5%	中污染	3.19	α -中污染	7047.62	重污染
	付疃河	27.5%	清洁	1.56	α -中污染	2137.57	中污染
夏季 Summer	南湖河	24.1%	清洁	0.49	轻污染	31.75	清洁
	后楼河	97.3%	重污染	0.66	β -中污染	146.03	轻污染
	沙墩河	24.2%	清洁	2.13	α -中污染	1037.04	中污染
	付疃河	25.9%	清洁	0.55	β -中污染	74.07	清洁
秋季 Autumn	南湖河	50.0%	轻污染	1.13	β -中污染	142.86	轻污染
	后楼河	60.8%	中污染	1.19	β -中污染	95.24	清洁
	沙墩河	65.5%	中污染	2.74	α -中污染	2190.48	中污染
	付疃河	62.5%	中污染	1.03	β -中污染	169.31	轻污染
冬季 Winter	南湖河	35.5%	轻污染	0.84	β -中污染	134.92	轻污染
	后楼河	46.6%	轻污染	1.17	β -中污染	285.71	轻污染
	沙墩河	88.9%	重污染	3.54	α -中污染	5111.11	重污染
	付疃河	87.1%	重污染	2.52	α -中污染	857.14	轻污染

从不同区域的优势种差异来看,环棱螺属(*Bellamya* sp.)在夏季 N、H 两区替代颤蚓科及摇蚊科,成为最大的优势种群,主要由于夏季水温较高,且 N 区地处农村区域,存在季节性河流捕鱼活动,鲫鱼、鲤鱼等成年底栖性鱼类数量,客观促进环棱螺属(*Bellamya* sp.)群体快速繁殖与生长^[28];相对 H 区位于城镇地区,为满足沿河娱乐景观与防洪需求,河流水位人工调控频繁(0.1—1 m),鱼类稳态生存环境已被破坏,环棱螺属(*Bellamya* sp.)基本位于河流生态系统生物链顶层,在夏季适宜水温大量繁殖与滋生。故 N、H 两区在夏季出现相同优势种替代现象。

同时,S 区全年底栖动物总密度均远远高于其他三个分区,主要原因为 S 区是城镇中心地区,人类活动频繁复杂,河流分布多处再生水处理厂,以再生水为水源补给方式导致河流 TN、TP 浓度常年超标,恶劣的水生态环境利于如霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)等底栖动物耐污种生长^[29-30]。

底栖动物总密度及总生物量存在时间性变化差异,总密度的季节变化趋势为春季>冬季>秋季>夏季,而总生物量上不存在明显趋势,究其原因为软体动物个体生物量较节肢动物、环节动物差异明显,一般为 40—150 倍,对总生物量占比有极大影响。夏、秋季底栖动物中以田螺科为主的软体动物较多,但其种群个体相对较少,同时由于冬季存在河流封冻,河流流速较低(<0.1 m/s),寡毛类底栖动物不易受河流径流侵蚀河床而产生迁移^[31],且河流鱼类活动受水温较低(0—4℃)影响,对寡毛类底栖动物摄食活动较夏、秋季弱化,其种群密度保持较高水平,加之春季伴随气温回暖,以摇蚊科为主的水生昆虫大量孵化滋生^[32],如:直突摇蚊属(*Orthocladius* sp.)、红裸须摇蚊(*Prosilocerus akamusi*),导致种群密度逐级放大,这可能引起夏、秋季底栖动物总密度低于春、冬季的现象。

3.2 底栖动物与水环境因子相关性分析

底栖动物的群落分布特征与河流水环境因子存在密切关系。N 区执行地表水Ⅲ类标准,H、S 及 G 区执行 V 类水标准,实际监测表明付疃河流域中下游各个分区全年 TN 超标较为严重,而 NH₃-N 超标现象则出现在 H、S、G 区的部分季节,这种差异可能是由不同分区的水源结构特征导致,其中 N 区以自然径流为主,农业化肥污染以面源污染方式进入水体,使水中氮元素含量增加^[33];同时,N 区农村生活污水、畜禽废水等点源输入致使河流 COD、TP 浓度全年偏高,且伴随夏季用水高峰,其对应营养元素浓度达到峰值^[34]。而 H、S、G 区主要以再生水为重要补给源,虽再生水厂处理工艺已达一级 A 标准,且河流沿程人工湿地逐级构建与完善,

但常年累月高浓度营养盐(TN、TP 与 $\text{NH}_3\text{-N}$)排放水体,已突破河流湿地自净与水生植被吸附能力,加重藻类春夏季滋生蔓延,为耐污性底栖动物给予足量食物来源,为其繁殖增生提供支持^[35-36]。

结合不同分区底栖动物与水环境因子的相关性分析,可推断出不同门类物种在分区内所占优势程度的不同也可导致相关性结果间的差异。颤蚓科为代表的环节动物在水体以有机质为摄入主食,考虑有机质浓度与 COD、TP 存在正相关性,故其与 COD、TP 体现出一定的正相关性,而节肢动物与软体动物与所选 4 个水环境因子的相关性相对较弱,主要是由于其优势程度较环节动物更小,相较而言难以体现较明显的相关性。同时,不同门类物种及总量与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均有差异较大的相关性结果,可能是由于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的有毒有害物质成分对环节动物影响较大,不利于其生长^[37],故在以环节动物为主的分区(H 区)内总量与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 可呈现出负相关性,而在以软体动物为主的分区(N 区)内则呈现出正相关性。除上述所选的营养盐指标外,底栖动物的分布还可能与物理指标如水深、流速、电导率及底质类型等有关^[38-40],在后续研究需考虑物理因子对其影响的定量分析,以加强研究结果对于水生态管理的完整性。

3.3 水质生物学评价

针对付疃河流域中下游地区水质状况,本次研究选取了生物多样性指标(Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数及 Pielou 均匀度指数)与重要指示物种相关水质生物学指标(Goodnight-Whitley 指数、相对重要性指数及 Wright 指数)进行等级评价。

付疃河流域中下游四个分区的底栖动物生物多样性存在一定差异,主要由不同水源结构及底质类型特征导致。N 区河流处于自然径流状态,河床底质保持泥砂质,河流连通性及水文状况年内基本一致^[41],故 N 区底栖动物多样性在季节性上呈现相似分布;G 区为干流下游至河口地区,接纳各处支流汇入,因毗邻入海口,受海洋潮汐、上游来水以及季节性降水波动多重影响,其底栖动物的季节性变化更具复杂性和独特性^[42];H、S 两区水源结构基本一致,但 S 区比 H 区生物多样性较高,可能是由于两区河床底质存在差异,其中 S 区以卵石、人工投石与灰砂质残渣为主,H 区以灰砂质残渣底质为主,底栖动物可能更适宜于更复杂多样的水生环境^[43]。

从底栖动物的水质生物学评价结果来看,付疃河流域中下游大致处于中污染的水平,还无法很好地满足水生生物生存环境需求以及人类社会景观服务等更深层次的需求。根据不同水源结构分区的水生态状况分析来看,针对农村地区和城镇地区,需完善实时监测系统,分别对其分散式农业生产活动及工业、生活污水直排现象进行管控,并加强人工湿地建设,做好尾水处理工作。针对河口地区,加强对于河口湿地公园的建设,充分利用海水潮汐影响,维护河口生态系统的稳定性。

生物多样性指标评价结果显示,Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数评级偏差,而 Pielou 指数评级偏优,其结果差异主要由计算方式的不同导致,多样性指数未考虑各物种在水体之中的差异性,季节性水量变化带来的大量底栖动物物种密度变化也会造成污染指数的突然上升,但并非真正的水质下降现象,因此多样性指数所得结果在付疃河流域往往会趋向严重,而 Pielou 均匀度指数则消除了物种数量突增、突降的情况,结果会偏优;而对于基于底栖动物指示物种的水质评价(Goodnight-Whitley 指数、相对重要性指数及 Wright 指数)基本一致,主要是由于付疃河流域中下游水体中寡毛类、摇蚊类物种优势度较高,能够较大程度地反映水环境状况,3 种指示物种法均从这个角度来量化水体受污染程度,因此适用性也较高,若考虑采用单一评价方式,均不能客观反映水源结构多变的河流水质评价^[44]。因此,在考虑构建以底栖动物为代表的河流水生态评价体系时,建议融入水源结构与河床底质差异的定量分析,以弱化生物评价指标评价方式间客观差异,以期得到更全面准确的水生态评价结果,从而为河流的生态管理提供更有力的理论依据支持。

4 结论

(1)付疃河流域中下游共鉴定出底栖动物 42 种,总密度季节性变化趋势为春季>冬季>秋季>夏季,各点位群落特征存在差异,出现水丝蚓属(*Limnodrilus* sp.)、摇蚊属(*Chironomus* sp.)及环棱螺属(*Bellamya* sp.)等

典型耐污种。

(2) 付疃河流域中下游底栖动物分布特征与河流水源结构及水环境因子有关,其中环节动物与 COD、TP 有显著正相关性,各门类与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 相关性差异较大,除所选 4 个营养盐指标外,还需结合物理指标进一步解释两者相关性。

(3) 生物多样性指标中 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数评级偏差, Pielou 指数评级偏优,指示物种水质生物学评价(Goodnight-Whitley 指数、相对重要性指数及 Wright 指数)在付疃河流域中下游得到的结果相对一致,基本呈中污染的平均状态。水质生物学评价仍需与河流物理指标的定量评价相结合。

参考文献(References):

- [1] 邵美玲, 韩新芹, 谢志才, 贾兴焕, 刘瑞秋, 蔡庆华. 香溪河流域梯级水库底栖动物群落比较. 生态学报, 2007, 27(12): 4963-4971.
- [2] 苏华武, 江晶, 温芳妮, 李晓宇, 闫云君. 湖北清江流域叹气沟河底栖动物群落结构与水质生物学评价. 湖泊科学, 2008, 20(4): 520-528.
- [3] 尤平, 任辉. 底栖动物及其在水质评价和监测上的应用. 淮北煤师院学报, 2001, 22(4): 44-48.
- [4] Lang C, Reymond O. An improved index of environmental quality for Swiss rivers based on benthic invertebrates. Aquatic Sciences, 1995, 57(2): 172-180.
- [5] Purcell A H, Bressler D W, Paul M J, Barbour M T, Rankin E T, Carter J L, Resh V H. Assessment tools for urban catchments: developing biological indicators based on benthic macroinvertebrates. Journal of the American Water Resources Association, 2009, 45(2): 306-319.
- [6] 张远, 徐成斌, 马溪平, 张铮, 王俊臣. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准. 环境科学学报, 2007, 27(6): 919-927.
- [7] 吴召仕, 蔡永久, 陈宇炜, 邵晓阳, 高俊峰. 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. 湖泊科学, 2011, 23(5): 686-694.
- [8] 盛萧, 毛建忠, 曹然, 黎征武, 王旭涛, 邓培雁. 基于 5 种大型底栖动物评价指数的河流生态健康评价. 水资源保护, 2017, 33(1): 75-82.
- [9] 郭建和, 安丰敬, 秦兰香, 申延鹏, 张平, 李永强. 傅疃河流域综合治理与湿地恢复保护研究. 湿地科学与管理, 2016, 12(3): 32-34.
- [10] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微生物与底栖动物图谱(第二版). 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [11] 冷宇, 张洪亮, 王振钟. 黄渤海常见底栖动物图谱. 北京: 海洋出版社, 2017.
- [12] 王俊才, 王新华. 中国北方摇蚊幼虫. 北京: 中国言实出版社, 2011.
- [13] Hardoon D R, Szedmak S, Shawe-Taylor J. Canonical correlation analysis: an overview with application to learning methods. Neural Computation, 2004, 16(12): 2639-2664.
- [14] Lai P L, Fyfe C. Kernel and nonlinear canonical correlation analysis. International Journal of Neural Systems, 2000, 10(5): 365-377.
- [15] 龚志军, 谢平, 唐汇涓, 王士达. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响. 水生生物学报, 2001, 25(3): 210-216.
- [16] 马徐发, 熊邦喜, 王明学, 王银东, 王卫民, 刘小玲, 徐木生, 张林林, 胡秋生, 王喜波. 湖北道观河水库大型底栖动物的群落结构及物种多样性. 湖泊科学, 2004, 16(1): 50-56.
- [17] 韩洁, 张志南, 于子山. 渤海中、南部大型底栖动物物种多样性的研究. 生物多样性, 2003, 11(1): 20-27.
- [18] 邢树威, 王俊才, 丁振军, 姜永伟. 辽宁省大型底栖无脊椎动物耐污值及水质评价. 环境保护科学, 2013, 39(3): 29-33.
- [19] 张敏, 邵美玲, 蔡庆华, 徐耀阳, 王岚, 孔令惠. 丹江口水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价. 湖泊科学, 2010, 22(2): 281-290.
- [20] 刘继民, 冯照军. 京杭大运河徐州段水质底栖动物多样性及 BPI 评价. 河南科学, 2008, 26(9): 1062-1065.
- [21] 马陶武, 黄清辉, 王海, 王子健, 王春霞, 黄圣彪. 太湖水质评价中底栖动物综合生物指数的筛选及生物基准的确立. 生态学报, 2008, 28(3): 1192-1200.
- [22] Bressler D W, Stribling J B, Paul M J, Hicks M B. Stressor tolerance values for benthic macroinvertebrates in Mississippi. Hydrobiologia, 2006, 573(1): 155-172.
- [23] 赵瑞, 高欣, 丁森, 张远, 渠晓东, 刘思思. 辽河流域大型底栖动物耐污值. 生态学报, 2015, 35(14): 4797-4809.
- [24] 王备新, 杨莲芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值. 生态学报, 2004, 24(12): 2768-2775.
- [25] 王建国, 黄恢柏, 杨明旭, 唐振华, 赵凤霞. 庐山地区底栖大型无脊椎动物耐污值与水质生物学评价. 应用与环境生物学报, 2003, 9(3): 279-284.
- [26] 王丑明, 谢志才, 宋立荣, 肖邦定, 李根保, 李林. 滇池大型无脊椎动物的群落演变与成因分析. 动物学研究, 2011, 32(2): 212-221.
- [27] 刘国才, 赖伟, 殷浩文, 顾福康. 上海苏州河大型底栖动物的研究. 中国环境科学, 2001, 21(2): 112-114.

- [28] 王桂苹, 李雪林, 皮杰, 李德亮, 张婷, 肖调义. 大通湖环棱螺的次级生产力. 水生生物学报, 2014, 38(5): 987-992.
- [29] 李艳利, 李艳粉, 徐宗学. 影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析. 环境科学, 2015, 36(1): 94-106.
- [30] 蔡佳亮, 苏玉, 文航, 王东伟, 黄艺. 滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落特征及其与水环境因子的关系. 环境科学, 2011, 32(4): 982-989.
- [31] 谢志才, 王骥, 梁彦龄. 长江流域若干水体寡毛类区系组成及相似性分析. 水生生物学报, 2000, 24(5): 451-457.
- [32] 杨莲芳, 李佑文, 戚道光, 孙长海, 田立新. 九华河水生昆虫群落结构和水质生物评价. 生态学报, 1992, 12(1): 8-15.
- [33] 程波, 张泽, 陈凌, 袁志华, 孙晓蓉. 太湖水体富营养化与流域农业面源污染的控制. 农业环境科学学报, 2005, 24(S1): 118-124.
- [34] 熊汉锋, 万细华. 农业面源氮磷污染对湖泊水体富营养化的影响. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 25-27.
- [35] 吴东浩, 于海燕, 吴海燕, 周斌, 王备新. 基于大型底栖无脊椎动物确定河流营养盐浓度阈值——以西苕溪上游流域为例. 应用生态学报, 2010, 21(2): 483-488.
- [36] 吕光俊, 熊邦喜, 刘敏, 杨学芬, 覃亮, 陈朋, 徐微, 刘俊利. 不同营养类型水库大型底栖动物的群落结构特征及其水质评价. 生态学报, 2009, 29(10): 5339-5349.
- [37] 吴东浩, 张勇, 于海燕, 杨莲芳, 王备新. 影响浙江西苕溪底栖动物分布的关键环境变量指示种的筛选. 湖泊科学, 2010, 22(5): 693-699.
- [38] 陆强, 陈慧丽, 邵晓阳, 王莹莹, 陶敏, 何京, 唐龙. 杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系. 生态学报, 2013, 33(9): 2803-2815.
- [39] 殷旭旺, 徐宗学, 高欣, 白海锋, 武玮, 宋进喜. 渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2013, 24(1): 218-226.
- [40] 高欣, 牛翠娟, 胡忠军. 太湖流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3329-3336.
- [41] 陈含墨, 渠晓东, 王芳. 河流水动力条件对大型底栖动物分布影响研究进展. 环境科学研究, 2019, 32(5): 758-765.
- [42] 安传光, 赵云龙, 林凌, 李嘉尧, 崔丽丽, 马春艳. 崇明岛潮间带夏季大型底栖动物多样性. 生态学报, 2008, 28(2): 577-586.
- [43] 段学花, 王兆印, 程东升. 典型河床底质组成中底栖动物群落及多样性. 生态学报, 2007, 27(4): 1664-1672.
- [44] 戴纪翠, 倪晋仁. 底栖动物在水生生态系统健康评价中的作用分析. 生态环境, 2008, 17(5): 2107-2111.

附录 付幢河流域中下游底栖动物种类组成分布

Appendix Species number of benthic animals in the middle and lower reaches of Futuan River Basin

门	种	N1	N2	N3	N4	H1	H2	H3	H4	H5	S1	S2	S3	S4	G1	G2	G3
环节动物门 Annelida	尾盘虫属 <i>Dero</i> sp.										+			+			
	豹行仙女虫 <i>Nais pardalis</i>	+	+											+	+		
	仙女虫属 1 种 <i>Nais</i> sp.													+	+		
	水丝蚓属 <i>Limnodrilus</i> sp.		+	+	+			+		+	+		+	+	+	+	+
	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>													+			
	巨毛水丝蚓 <i>Limnodrilus grandisetosus</i>													+			
	克拉泊水丝蚓 <i>Limnodrilus clapparedianus</i>													+			
	正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i>													+			
	多毛管水蚓 <i>Aulodrilus pluriset</i>	+	+	+			+							+	+		
	淡水单孔蚓 <i>Monopylephorus limosus</i>			+										+	+		
	苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>			+			+							+	+		
	白线蚓属 1 种 <i>Fridericia</i> sp.	+												+	+		
	石蛭科 1 种 <i>Herpodeidae</i> sp.										+					+	
软体动物门 Mollusca	舌蛭属 <i>Glossiphonia</i> sp.																
	环棱螺属 <i>Belamya</i> sp.		+	+	+		+	+		+					+		
	纹沼螺 <i>Parafossarilus striatulus</i>			+	+			+									
	长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>			+	+			+									
	扁卷螺 <i>Hippaeutis</i> sp.						+										
	萝卜螺属 1 种 <i>Radix</i> sp.				+			+							+		
	尖膀胱螺 <i>Physa acuta</i>														+		
	河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>				+									+			
	竹蛭科 <i>Solenidae</i>																+
	长臂虾科 1 种 <i>Palaemonidae</i>				+												
	沼虾属 <i>Macrobrachium</i> sp.										+				+		
	华溪蟹属 <i>Sinopotamon</i>		+														+
	摇蚊属 <i>Chironomus</i> sp.	+					+	+					+		+		
节肢动物门 Arthropoda	雕翅摇蚊属 <i>Glyptotendipes</i> sp.	+					+	+					+				
	前突摇蚊 <i>Procladius</i> sp.			+										+			
	粗腹摇蚊 <i>Tanytus</i> sp.						+										
	直突摇蚊属 1 种 <i>Orthocladius</i> sp.	+	+					+							+		
	红裸须摇蚊 <i>Prosilacerus akamusi</i>							+									
	二叉摇蚊属 1 种 <i>Dicortendipes</i> sp.							+									
	双突摇蚊属 1 种 <i>Diplocladius</i> sp.							+									
	多足摇蚊属 1 种 <i>Polypedium</i> sp.							+									
	摇蚊属 <i>Chironomidae</i> pupa		+					+									+
	长跗摇蚊 <i>Tanytarsus</i> sp.		+														
	长足摇蚊 <i>Tanytus</i> sp.																
	大蚊属 <i>Tipula</i> sp.	+	+				+									+	
	水蝇 <i>Ephydra</i>																
	螺科 <i>Ceratopogonidae</i>		+														
	龙虱科幼虫 <i>Dytiscidae</i>		+														
	蜻蜓属 1 种 <i>Libellula</i> sp.							+									

“+”代表在该采样点出现; N1—N4: 南湖河 4 处样点; H1—H5: 后楼河与香店河 5 处样点; S1—S4: 沙墩河 4 处样点; G1—G3: 付幢河干流近河口 3 处样点