DOI: 10.20103/j.stxb.202207272152

龚海峰,白雪原,陈朋龙,梁迪文,杨慧珠,罗隽,华雷.基于水生动物评价持续高余氯尾水排放对湿地水体的影响.生态学报,2023,43(20):8516-8531.

Gong H F, Bai X Y, Chen P L, Liang D W, Yang H Z, Luo J, Hua L.Evaluation of impact of continuous discharge of high residual chlorine tailwater on wetland water ecosystem based on aquatic animals.Acta Ecologica Sinica,2023,43(20):8516-8531.

# 基于水生动物评价持续高余氯尾水排放对湿地水体的影响

龚海峰,白雪原,陈朋龙,梁迪文,杨慧珠,罗 隽,华 雷*

国家环境保护城市生态环境模拟与保护重点实验室, 生态环境部华南环境科学研究所,广州 510655

**摘要**:尾水补充河涌既能在一定程度上解决废水带来的污染问题,也能缓解城市缺水、水动力不足的情况,具有显著的社会效应、生态效应和经济效应。新冠疫情爆发以来,各污水处理厂尾水中含氯消毒剂投加量显著增加,含有过量余氯的尾水排入河涌可能对水生生物存在潜在的影响。海珠湿地属于三角洲城市湖泊与河流湿地,与 40 条河涌交织联通,是广州市规模最大、保存最完整的湿地生态系统。选择海珠湿地典型河涌进行了长时间的跟踪观测,在尾水暂停排放期(2021 年 8 月 5 日至 10 日),尾水排放 1 个月(2021 年 9 月 10 日至 13 日)及 3 个月(2021 年 11 月 15 日至 18 日)后分别测定了尾水主要流经河涌的水体理化指标、鱼类和底栖动物物种数量和密度,同时选择与尾水不直接连通的水体作为参考点。通过相对重要性指数、物种数量和密度以及冗余分析等研究尾水排放前后鱼类和底栖动物的群落结构特征,使用鱼类和底栖动物生物完整性指数综合评价尾水排放前后受纳水体水生态健康状况。研究表明:1、尾水排放后,排放口附近水体余氯、总氮以及盐度显著上升;2、随着尾水的持续排放,适应性强的耐污鱼类成为优势种,鱼类群落结构朝着耐污类群方向发展,而底栖动物中耐污优势类群寡毛纲颤蚓科和多毛纲疣吻沙蚕物种数量有所降低,其密度则呈大幅下降趋势,尤其是在尾水排放口附近水体;3、通过鱼类生物完整性指数评价受纳水体水环境健康质量,尾水排放前后评价结果无显著差别,主要为亚健康和一般,而通过底栖动物生物完整性指数评价则发现在排放口附近评价结果由排水前的亚健康为主变为持续排水后的亚健康和一般为主,其它点位在尾水排放前后则无明显差别,主要以健康为主;4、随着尾水的持续排放,底栖动物受到余氯的影响越来越明显,鱼类则没有受到明显影响。总体而言,高余氯尾水持续排放明显改变了水质并影响了水生动物的生存,后续还需进一步探讨尾水排放对其它水生生物的影响及具体的影响机制。对尾水排放前后鱼类和底栖动物群落结构特征及生物完整性做了详细探讨,为水环境健康评价以及尾水的合理利用提供理论和数据支持。

**关键词**:尾水;鱼类;底栖动物;水生态健康

# Evaluation of impact of continuous discharge of high residual chlorine tailwater on wetland water ecosystem based on aquatic animals

GONG Haifeng, BAI Xueyuan, CHEN Penglong, LIANG Diwen, YANG Huizhu, LUO Jun, HUA Lei*

*State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ecological Environment Simulation and Protection, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment of China, Guangzhou* 510655, *China*

**Abstract**: Tailwater replenishment of urban river can not only solve the pollution problem caused by waste water to a certain extent, but also alleviate the shortage of water and hydrodynamic power in cities, which has significantly social, ecological and economic effects. Since the outbreak of COVID-19, the dosage of chlorine-containing disinfectant in tailwater has increased significantly, and the excessively residual chlorine had a potential impact on aquatic organisms. Haizhu Wetland

**收稿日期**:2022-07-27; **采用日期**:2022-12-02

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hualei@ scies.org

belongs to the urban lake and river wetland of the delta, which contains 40 rivers and is the largest and best-preserved wetland ecosystem in Guangzhou. In this study, we selected typical streams in the Haizhu wetland for a long period of tracking observation. The physical and chemical index, the number and density of fish and benthic animals in the streams were measured during three periods: the suspension of tailwater discharge period (5—10, Aug, 2021), one month (10—13, Sep, 2021), and three months (15—18, Nov, 2021) after the tailwater was discharged, respectively. The stream that was not directly connected with the tailwater was selected as the reference point. Index of biologic integrity, redundancy analysis and other methods were used to explore the impact of continuous discharge of high residual chlorine tailwater on aquatic animals, and to evaluate the water ecological health status. The results showed that: (1) after the discharge of tailwater, the residual chlorine, total nitrogen and salinity in the water near the discharge outlet increased significantly. (2) With the continuous discharge of tailwater, adaptable and pollution-tolerant fish became the dominant species, while the number of dominant pollution-tolerant species in benthic animals decreased, and their density decreased significantly, especially in the streams near the discharge outlet. (3) According to the fish biologic integrity index, the water environmental quality were mainly sub-healthy and general in health, and had no significant difference among the measured sites. While by the benthic biologic integrity index, the water environmental quality near the discharge outlet changed from sub-health before discharge to sub-health and general in health after continuous discharge. There was no significant difference at other sites before and after tailwater discharge, mainly for health. (4) With the continuous discharge of tailwater, the effect of residual chlorine on benthic animals was more and more significant, but the effect on fish did not change obviously. In general, the continuous discharge of tailwater with high residual chlorine significantly changed the water quality and affected the survival of aquatic animals. Further studies are needed to explore the impact of tailwater discharge on other aquatic organisms and the specific influencing mechanism. In this study, the characteristics of community structure and biological integrity of fish and benthic animals before and after discharge of tailwater were discussed in detail. The study provided the theoretical and data support for water environmental health assessment and rational utilization of tailwater.

**Key Words**: tailwater; fish; benthic animals; water ecological health

随着生态研究工作的深入,对生态环境的评价已经不局限于物理化学指标和对生物个体与种群的跟踪监测,而是扩展为对整个生态系统健康状态的生态评估[1]。自 Karr[2] 首次提出生物完整性指数并应用于水生态健康评价实践已有 40 余年,目前该方法已广泛用于河流生态系统健康状况的评价。从原生动物和藻类到河岸鸟类和木本植物,有许多潜在的指标组合可用于评估生态系统健康状态,鱼类和底栖动物是对生态系统评估的常用组合[3—4]。鱼类对化学污染比其它种群更加敏感,并且鱼类处于食物链的顶级,可综合反映其它生物的变化,所以营养顶级的鱼类可以反映整个水体生态环境状况[5]。底栖动物生命周期长,行动缓慢,分布广泛,形体易鉴别,作为水生态系统的重要组分,其优势种类、种群结构、生物量等参数可以反应环境因子的长期变化[6]。

由于鱼类和底栖动物的敏感性和生存环境不同,基于鱼类和底栖动物组合的评估往往会产生一些不同的结果[7—8]。例如,根据底栖动物生物完整性指数(B-IBI)评分估计,在美国西部干旱地区和西部山区健康状态的河段分别占 22%和 51%[9]。使用鱼类生物完整性(F-IBI)评分估计,只有 19%的西部干旱地区河段和 26%的西部山区河段是健康状况。同样,在西部干旱地区,含氯化物浓度高的水域的鱼类生物完整性得分较低,而过高的总氮是该区域底栖动物生物完整性得分较低的主要因素[7]。因此,通过底栖动物和鱼类的综合评价,可以对生物状况以及与这些不良状况联系最密切的环境因子变化情况进行更全面的评估。

城市尾水目前主要用以河湖补水、环卫绿化的生态环境用水以及少量为工业、建筑业的生产用水,取得了一些经济效益并缓解水资源紧缺压力[10—12]。新冠疫情爆发以来,我国各污水处理厂的出水余氯含量有明显

提升[13]。消毒剂的过量使用会造成消毒后剩余消毒剂(即余氯)进入环境水体甚至水源地。余氯具有高反应活性,其会与受纳水体中的有机物和无机物发生化学反应,生成具有潜在毒性的副产物[14]。水体中余氯浓度过高也会产生毒性效应,阻碍鱼鳃与水中溶解氧的交换,如金鱼接触氯 96 h 的半致死浓度为 0.014—0.029 mg/L,水生无脊椎动物 96 h 的半致死浓度为 0.01 mg/L[15]。

基于此,本研究在海珠湿地受污水处理厂尾水补水影响水域开展研究。沿补水口选择 9 个样点,在补水前后分别测定水体理化指标,以及鱼类和底栖动物等水生动物群落变化,利用 IBI 指数以多个生物参数来综合反映水体的生物学状况,探讨疫情防控期间污水处理厂含氯消毒剂过量使用对水生动物造成的影响,为尾水的合理利用及海珠湿地水环境健康评价提供理论和数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况及样点布设

海珠湿地属于三角洲城市湖泊与河流湿地,与 40 条河涌交织联通,湿地面积 750.9 $hm^2$,是广州市规模最大、保存最完整的湿地生态系统。本研究点位布设如图 1 所示,尾水排放口有两个,分别位于二围涌和西江涌,采样点分布于尾水主要流经的西江涌(S1、S2)、二围涌(S3)、南丫围涌(S4)以及土华涌(S5、S6)。S7 点位于补水口附近的珠江边上。S8 和 S9 分别位于石榴岗河与塘涌,这两个点位与排放口距离较远且未与尾水受纳水体直接连通,可作为评价尾水排放对受纳水体影响的参照点。

尾水于 2021 年 8 月 13 日恢复排放,本研究在 2021 年 8 月 5 日至 10 日(尾水暂停排放)、9 月 10 日至 13 日(尾水排放 1 个月)、11 月 15 日至 18(尾水排放 3 个月)共 3 次对海珠湿地 9 个点位进行了水体理化指标、底栖动物和鱼类资源的调查。

**图 1 海珠湿地采样点布设**

**Fig.1 Sampling station in Haizhu wetland**

S1:西江涌;S2:三期补水口;S3:西江涌(一、二期补水口附近);S4:南丫围涌;S5:土华涌与西头涌交界;S6:土华涌;S7:珠江补水口;S8:石榴岗河;S9:塘涌

### 1.2 样品采集与处理

#### 1.2.1 鱼类采样与鉴定

鱼类样品采用流刺网和地笼结合进行采集。地笼法主要针对底层鱼类的采集,使用时尾部绑上沉重的东西如旧砖块,头部扎上结实的绳子,抛入水中后把绳子绑在岸边的固定物上,24 小时后提起地笼并收集鱼类

样品。在采样区域内不同生境设置 3—5 片刺网,使用 1.2 m 高,25 m 长流刺网采集,孔径包括 2 cm、3 cm、4 cm不同规格,挂网时间约为 1—1.5 小时,对水体中上层鱼类进行采集。鱼类样品采集后立即进行现场鉴定工作并称重,测量体长等参数。难以鉴定的物种冷冻运送回实验室后进一步完成鉴定。

**1.2.2**　底栖动物采样与鉴定

(1) 底栖动物定性调查方法

使用三角拖网放置于河底,在船上来回拖网 10 m,使样品随着搅动和流水一起进入网内。采集到的样品经过 40 目筛网过滤,除去石块、树枝等杂质,将动物活体用镊子挑出,固定保存。

(2) 底栖动物定量调查方法

使用彼得逊采泥器进行底泥采集,每次采集面积 0.05 $m^2$,每站采集 2—3 次有效样品。泥样采集出水面后置于盆中,经过 40 目封样筛除去污泥后,将筛上的底栖动物用镊子逐一挑出,将筛内剩余物装入封口袋中带回实验室继续将底栖动物挑出,已挑出的底栖动物装入含有 5%福尔马林溶液广口瓶中保存,记录采样面积并贴好标签。

底栖动物计数方法:统计各个分类单元的个体数量,根据采泥器开口面积推算出单位面积底栖动物的数量,换算为个/$m^2$。用滤纸吸去采集到的底栖动物表面固定液,置于电子天平称重,将结果折算成单位面积底栖动物生物量 g/$m^2$。

**1.2.3**　水体理化指标测定

各采样点同步采集水样放置于冰盒冷藏带回实验室内参照《水和废水监测分析方法(第四版)》对生化需氧量(BOD)、高锰酸盐指数($COD_{Mn}$)、总氮、氨氮、总磷、叶绿素 a、余氯及其衍生物等指标进行检测。水体流速、pH、溶氧量、透明度等指标现场测量,水体流速采用精度为 0.01 cm/s 的小型自容式电磁流速仪测定,透明度使用塞氏盘法测定,pH 和溶氧量使用多功能水质检测仪测定,精度分别为 0.01 和 0.01 mg/L。

**1.3**　数据处理

**1.3.1**　相对重要性指数(IRI)

$$IRI = (N\% + W\%) \times F\% \quad (1)$$

式中,IRI 为相对重要性指数,$N\%$为某一种类的数量占总数量的百分比,$W\%$为某一种类的质量占总质量的百分比,$F\%$为某一种类出现的断面占调查总断面的百分比。本文采用王雪辉等[16]的划分方法,将 IRI 值大于 1000 的种定为优势种;100—1000 的种为重要种;10—100 的种为常见种;小于 10 的种为少见种。

**1.3.2**　生态位宽度

生态位宽度采用 Shannon 指数[17],计算公式如下:

$$B_i = -\sum_{j=1}^{R} P_{ij} \ln P_{ij} \quad (2)$$

式中,$P_{ij}$为种 $i$ 在 $j$ 个站位中的个体数占站位总个体数的比例;$R$ 为总站位数;$B_i$为生态位宽度,取值范围为 $[0,R]$,$B_i$值越大,生态位宽度就越大。

**1.3.3**　冗余分析

运用 R 语言分别对鱼类和底栖动物与环境因子之间的关系进行分析及排序图绘制。先对鱼类和底栖动物数据进行去趋势对应分析(DCA),根据每个轴的梯度长度(LGA)选择适宜的排序方法。当 LGA<3 时,选择冗余分析(RDA);当 LGA>4 时,则可运用典范对应分析(CCA);当 3<LGA<4 时,2 种分析均可。本研究 DCA 分析结果显示,鱼类和底栖动物的 LGA 均小于 3,故本文采用线性模型的冗余分析。

**1.3.4**　生物完整性评价

由于海珠湿地为城市湿地,难以找到不受人类活动干扰的水体,本研究根据海珠湿地实际情况,选取受尾水排放干扰小的 S8 和 S9 为参照点,其余采样点位作为受尾水干扰点。生物完整性指数(IBI)的构建参考鱼类生物完整性指数(F-IBI)[18—19]和底栖动物生物完整性指数(B-IBI)[20—22]相关研究文献,并在结合水生动物

调查数据的基础上,选用不同类型的生物指标,以反映环境变化对生物个体、种群、群落结构的影响。依次对候选指标进行指标分布范围检验、生物指标判别能力分析以及相关性分析,逐步筛选出符合要求的候选指标。本研究最终选取的生物参数见表 1。

**表 1 本研究构成生物完整性指数指标体系的生物参数**

**Table 1 The biological parameters that constitute the IBI index system are presented in this study**

| 物种 Species | 指标类型 The type of attribute | 指标 Indicators | 干扰反应 Response to disturbance |
|---|---|---|---|
| 鱼类 Fish | 物种种类组成与丰富度 | 鱼类物种数 | 减小 |
| | | 鱼类个体数 | 减小 |
| | | 底层鱼类物种数百分比 | 增大 |
| | 分类学多样性 | Simpson 指数 | 减小 |
| 底栖动物 Benthic animals | 物种种类组成与丰富度 | 总生物量 | 减小 |
| | 耐受性 | 耐污类群分类单元数 | 减小 |
| | 分类学多样性 | 物种平均得分指数(ASPT) | 减小 |

采用比值法对选用参数进行计分以统一评价量纲,规定经计算后分值的分布范围为 0—1,若小于 0,则记为 0,若大于 1,则均记为 1。对统一量纲的参数使用熵值法将各指标分值加权相加得到各采样点的 IBI 值,以参照点 IBI 值分布的 25%分位值作为评价海珠湿地生物完整性的评价标准,IBI 值大于 25%分位值的采样点受到尾水的干扰很小,是健康的;小于 25%分位值的分布范围,进行 3 等分,分别代表亚健康、一般和较差 3 个等级。

## 2 结果

### 2.1 水体理化指标及水体营养状态指数

如图 2 所示,随着尾水的持续排放,受纳水体中余氯、溶氧量和 pH 明显增加,在尾水持续排放 1 个月后最高;总氮、盐度和透明度随尾水持续排放呈显著上升趋势;氨氮、总磷和营养状态指数在尾水排放后明显降低,高锰酸盐指数则没有明显变化。

### 2.2 鱼类调查结果

#### 2.2.1 鱼类群落结构特征

如表 2 和表 3 所示,尾水暂停排放期间采集鱼类 26 种,隶属于 5 目 9 科,优势种为尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*),重要种为鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鲫(*Carassius auratus*)、鲤(*Cyprinus carpio*)、鲮(*Cirrhinus molitorella*)、鳙(*Aristichys nobilis*)、翘嘴鲌(*Culter alburnus*)、麦瑞加拉鲮(*Cirrhinus mrigala*)、三角鲂(*Megalobrama terminalis*)、赤眼鳟(*Squaliobarbus curriculas*)和齐氏罗非鱼(*Coptodon zillii*);尾水排放 1 个月后采集鱼类 24 种,隶属于 4 目 8 科,优势种为鲫、麦瑞加拉鲮、尼罗罗非鱼和齐氏罗非鱼,重要种为鲢、鲤、鳙、三角鲂、赤眼鳟和豹纹翼甲鲶(*Pterygoplichthys pardalis*);尾水排放 3 个月后采集鱼类 21 种,隶属于 4 目 7 科,优势种为鲫和豹纹翼甲鲶,重要种为鲢、麦瑞加拉鲮、三角鲂、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)、尼罗罗非鱼、齐氏罗非鱼和须鲫(*Carassiodes acuminatus*)。三次采样共同种有 12 种,无共同优势种,共同重要种仅为鲢和三角鲂,主要为杂食性和肉食性鱼类。

从鱼类物种数量来看(图 3),排水口附近 S1、S2 和 S3 点鱼类数量有上升趋势,S5、S6 和 S8 点则呈现下降趋势,S4、S7 和 S9 点鱼类物种数量先上升后下。从鱼类尾数来看(图 3),S8 与 S9 点鱼类数量随时间呈逐渐下降趋势,S3 至 S7 点鱼类数量在尾水排放 1 个月时最多,S1 和 S2 点在尾水持续排放后鱼类尾数先降低而后显著上升,尤其是尾水排放 3 个月后,排放口 S2 点鱼类数量明显上升,由 13 尾上升至 50 尾,主要增加的鱼类为豹纹翼甲鲶(36 尾)和尼罗罗非鱼(7 尾)。

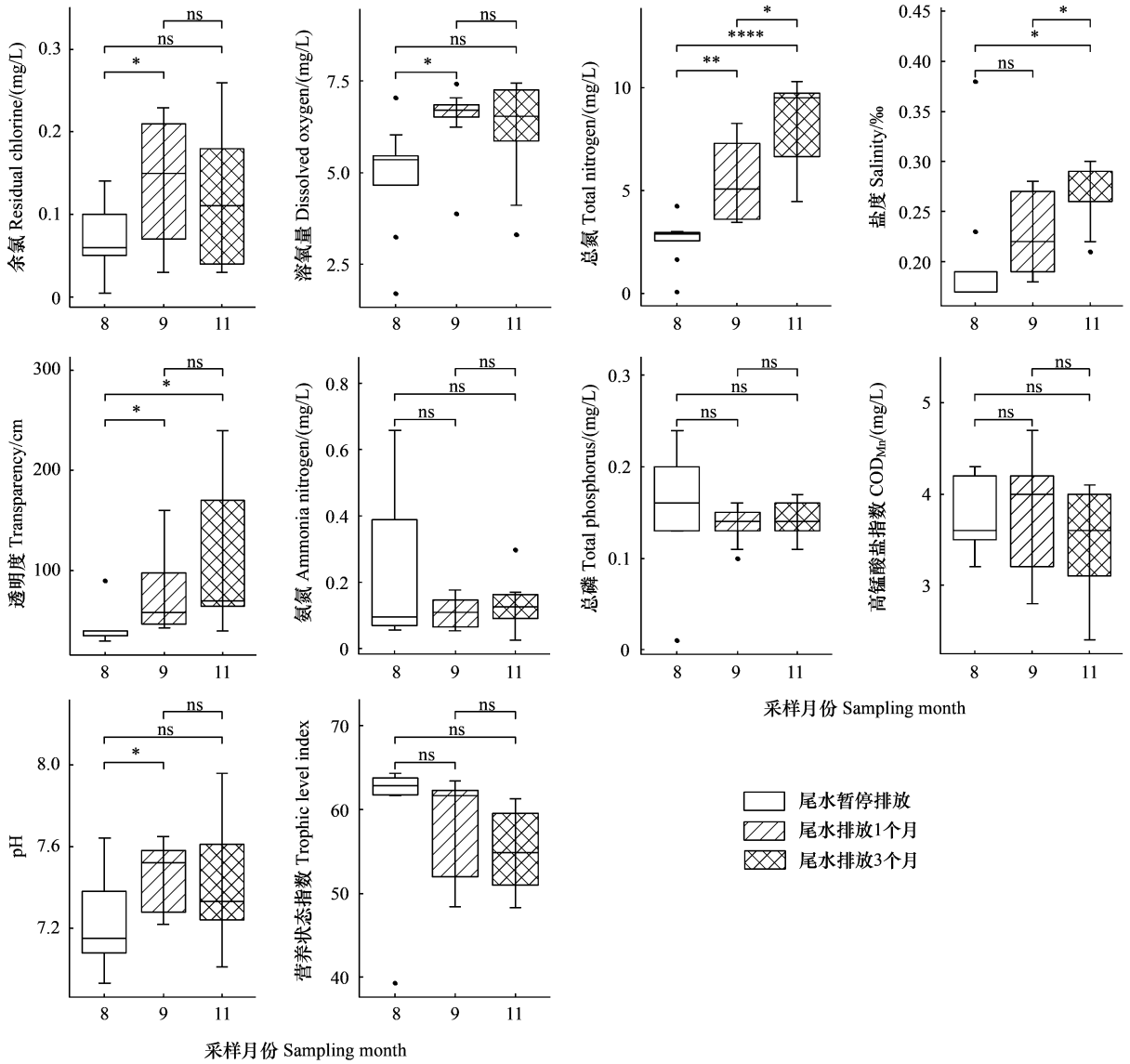


**图 2　三次采样水体理化指标**

**Fig.2　Physical and chemical indexes of water during three sampling periods**

no significance(ns):表示无显著性差异;*:表示存在显著性差异,*号越多差异越显著

**表 2　海珠湿地鱼类种类和数量/尾**

**Table 2　Species and numbers of fish in Haizhu wetland**

| 目<br>Orders | 科<br>Familys | 种名<br>Species | 尾水暂停排放<br>Suspension of tailwater discharge | 尾水排放 1 个月<br>Tailwater discharge for 1 month | 尾水排放 3 个月<br>Tailwater discharge for 3 months |
|---|---|---|---|---|---|
| 鲤形目 | 鲤科 | 鲢 *Hypophthalmichthys molitrix* | 2 | 2 | 2 |
| Cypriniformes | Cyprinidae | 鲫 *Carassius auratus* | 3 | 49 | 10 |
| | | 鲤 *Cyprinus carpio* | 7 | 3 | 1 |
| | | 鲮 *Cirrhinus molitorella* | 5 | 5 | 0 |
| | | 鳙 *Aristichys nobilis* | 2 | 2 | 0 |
| | | 南方拟鲿 *Pseudohemiculter dispar* | 1 | 0 | 0 |
| | | 翘嘴鲌 *Culter alburnus* | 7 | 2 | 0 |
| | | 麦瑞加拉鲮 *Cirrhinus mrigala* | 16 | 15 | 8 |
| | | 露斯塔野鲮 *Labeo rohita* | 1 | 1 | 1 |

续表

| 目 Orders | 科 Familys | 种名 Species | 尾水暂停排放 Suspension of tailwater discharge | 尾水排放 1 个月 Tailwater discharge for 1 month | 尾水排放 3 个月 Tailwater discharge for 3 months |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 金鱼 *Carassius auratus* var. | 0 | 1 | 0 |
| | | 三角鲂 *Megalobrama terminalis* | 8 | 15 | 7 |
| | | 赤眼鳟 *Squaliobarbus curriculas* | 19 | 8 | 1 |
| | | 短头亮鲃 *Luciobarbus brachycephalus* | 1 | 0 | 0 |
| | | 条纹小鲃 *Puntius semifsaciolatus* | 1 | 0 | 0 |
| | | 镜鲤 *Cyprinus carpio var. specularis* | 0 | 0 | 1 |
| | | 鱎 *Hemiculter leucisculu* | 0 | 0 | 3 |
| | | 海南鲌 *Culter recurviceps* | 2 | 0 | 0 |
| | | 草鱼 *Ctenopharyngodon idella* | 0 | 0 | 3 |
| | 鳅科 Cobitidae | 泥鳅 *Misgurnus anguillicaudatus* | + | + | + |
| 鲈形目 | 丽鱼科 | 厚唇双冠丽鱼 *Amphilophus labiatus* | 0 | 1 | 0 |
| Perciformes | Cichlidae | 尼罗罗非鱼 *Oreochromis niloticus* | 24 | 18 | 15 |
| | | 齐氏罗非鱼 *Coptodon zillii* | 8 | 25 | 4 |
| | | 加利略帚齿非鲫 *Sarotherodon galilaeus* | 5 | 2 | 0 |
| | | 珍珠德州丽鱼 *Herichthys carpintis* | 1 | 0 | 0 |
| | 鰕虎鱼科 | 舌鰕虎鱼 *Glossogobius giuris* | 2 | 1 | 1 |
| | Gobiidae | 弹涂鱼 *Periophthalmus cantonensis* | 0 | + | + |
| | | 双带缟鰕虎 *Tridentiger bifasciatus* | 0 | 0 | + |
| | | 斑纹舌鰕虎 *Glossogobius olivaceus* | + | + | 0 |
| | 攀鲈科 Anabantidae | 攀鲈 *Anabas testudinrus* | 1 | 0 | 2 |
| | 塘鳢科 Eleotridae | 尖头塘鳢 *Eleotris oxycephala* | 2 | 0 | 0 |
| 鲱形目 | 鳀科 Engraulidae | 七丝鲚 *Coilia grayi* | 4 | 1 | 2 |
| Clupeiformes | | 须鲫 *Carassiodes acuminatus* | 0 | 0 | 3 |
| | 鲱科 Clupeidae | 花鳓 *Clupanodon thrissa* | 0 | 4 | 1 |
| 鲶形目 Siluriformes | 甲鲶科 Loricariidae | 豹纹翼甲鲶 *Pterygoplichthys pardalis* | 3 | 4 | 39 |
| 鲻形目 Mugiliformes | 鲻科 Mugilidae | 大鳞龟鲛 *Chelon macrolepis* | 3 | 2 | 0 |

“+”代表发现该物种,该物种由地笼捕获,仅做定性数据

**表 3 鱼类优势种和重要种相对重要性指数值**

**Table 3 The relative importance index of dominant and important fish species**

| 种名 Species | 尾水暂停排放 Suspension of tailwater discharge | 尾水排放 1 个月 Tailwater discharge for 1 month | 尾水排放 3 个月 Tailwater discharge for 3 months |
|---|---|---|---|
| 鲢 *Hypophthalmichthys molitrix* | 142.4 | 133.3 | 243.8 |
| 鲫 *Carassius auratus* | 229.1 | 3676.4 | 1042.6 |
| 鲤 *Cyprinus carpio* | 829.8 | 197.3 | |
| 鲛 *Cirrhinus molitorella* | 208.2 | | |
| 鳙 *Hypophthalmichthys nobilis* | 164.6 | 155.1 | |
| 翘嘴鲌 *Culter alburnus* | 201.8 | | |
| 麦瑞加拉鲛 *Cirrhinus mrigala* | 951.0 | 1403.7 | 617.2 |
| 三角鲂 *Megalobrama terminalis* | 203.1 | 231.0 | 252.1 |
| 赤眼鳟 *Squaliobarbus curriculas* | 687.2 | 191.0 | |
| 草鱼 *Ctenopharyngodon idella* | | | 556.1 |
| 尼罗罗非鱼 *Oreochromis niloticus* | 2430.0 | 1720.6 | 964.1 |
| 齐氏罗非鱼 *Tilapia zillii* | 234.4 | 1081.1 | 118.5 |
| 须鲫 *Carassiodes acuminatus* | | | 252.5 |
| 豹纹翼甲鲶 *Pterygoplichthys pardalis* | | 453.9 | 2548.6 |

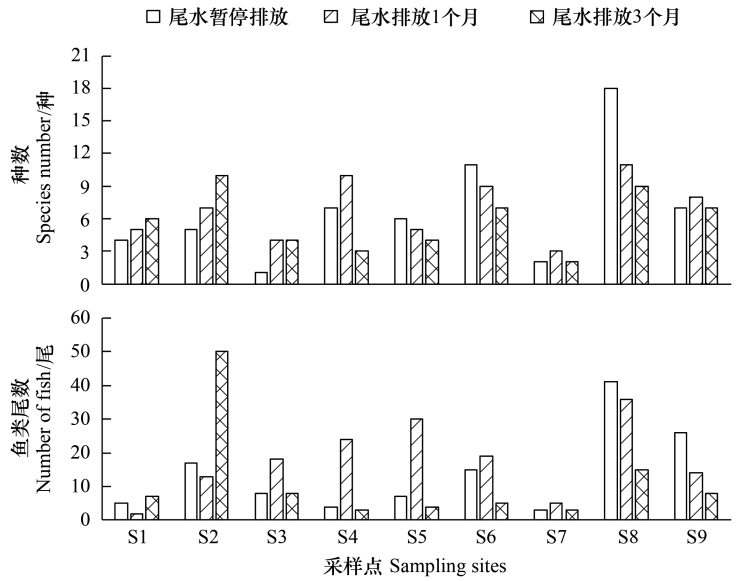


**图 3　三次采样各采样点鱼类物种数量及尾数**

**Fig.3　Number and density of fish species at each sampling site during three sampling periods**

三次采样期间共同种生态位宽度如图 4 所示。尾水暂停排放期间鱼类生态位宽度变化范围为 0.19—1.24,其中生态位最宽的是尼罗罗非鱼(1.24),最小的是豹纹翼甲鲶(0.19);尾水排放 1 个月后鱼类生态位宽度变化范围为 0.10—1.73,鲫(1.73)的生态位宽度最大,七丝鲚(*Coilia grayi*)(0.10)的生态位宽度最小。尾水排放 3 个月后鱼类生态位宽度变化范围为 0.08—1.61,生态位宽度最大的是鲫(1.61),生态位宽度最小的是露斯塔野鲮(*Labeo rohita*)(0.08)。总体上,尾水排放 1 个月后(均值为 0.78)与尾水排放 3 个月后(均值为 0.64)的鱼类生态位宽度均高于尾水暂停排放期间(均值为 0.62)。鲫(2 号)和豹纹翼甲鲶(12 号)在尾水排放后生态位宽度显著上升,鲤(3 号)的生态位宽度在排水后显著降低。

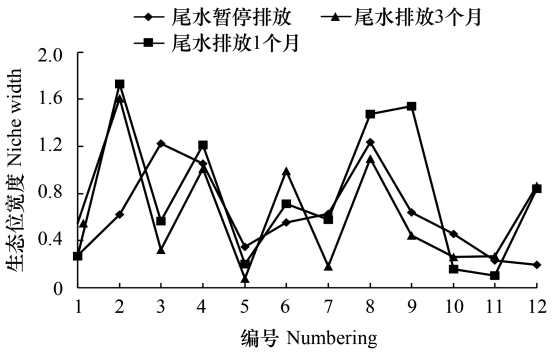


**图 4　三次采样共同种生态位宽度比较**

**Fig.4　Comparison of niche widths of common species**

编号分别代表:1.鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*),2.鲫(*Carassius auratus*),3.鲤(*Cyprinus carpio*),4.麦瑞加拉鲮(*Cirrhinus mrigala*),5.露斯塔野鲮(*Labeo rohita*),6.三角鲂(*Megalobrama terminalis*),7.赤眼鳟(*Squaliobarbus curriculas*),8.尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*),9.齐氏罗非鱼(*Coptodon zillii*),10.舌鳎虎鱼(*Glossogobius giuris*),11.七丝鲚(*Coilia grayi*),12.豹纹翼甲鲶(*Pterygoplichthys pardalis*)

**2.2.2**　鱼类群落与环境因子的关系

鱼类 RDA 分析结果如图 5 所示,对环境变化总解释率为 66.66%。其中,第一轴(横轴)解释率最高(49.08%),第二轴(竖轴)为 17.58%。第一轴与 $COD_{Mn}$ 和生物毒性显著相关(分别为 0.612 和-0.571),从左到右表示 $COD_{Mn}$ 逐渐升高,从右到左则表示生物毒性逐渐上升;第二轴与流速和溶氧量呈显著负相关(分别为-0.574 和-0.459),从上至下溶氧量和流速逐渐升高。冗余分析表明对海珠湿地鱼类群落结构变化的主要显著解释因子为 $COD_{Mn}$、生物毒性、流速、溶氧量。RDA 分析显示,总体上随着尾水的持续排放不同时期采样点存在沿着第一轴从右至左的变化趋势,生物毒性、余氯、透明度、总氮和溶氧量存在明显升高趋势。

**2.2.3**　F-IBI 指标体系的评价

F-IBI 指数对尾水持续排放影响的评价结果如表 4 所示。参考点 S8 和 S9 中健康等级占 83%,亚健康等

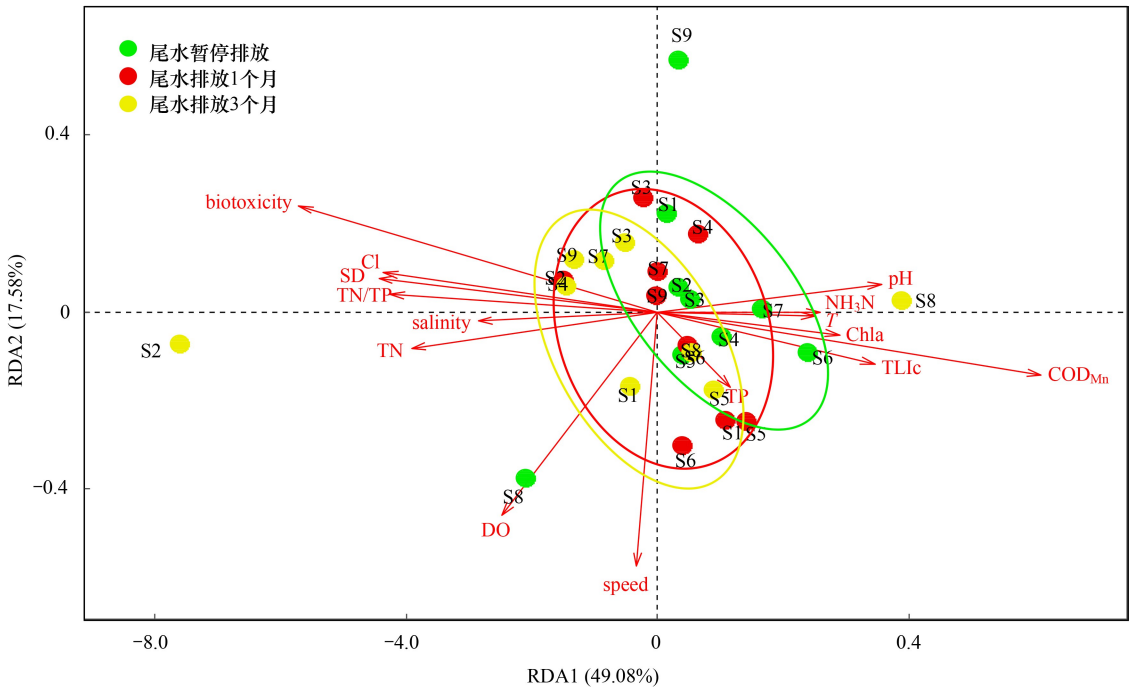


**图 5 鱼类与环境因子冗余分析**

**Fig.5 Redundancy analysis of fish and environmental factors**

speed:流速;T:水温;salinity:盐度;SD:透明度;DO:溶氧量;TN:总氮;TP:总磷;$NH_3N$:氨氮;$COD_{Mn}$:高锰酸盐指数;Chla:叶绿素 a;Cl:余氯;biotoxicity:生物毒性;TN/TP:氮磷比;TLIc:综合营养状态指数

级占 17%。受损点 S1—S7 中健康等级占 19%,亚健康等级占 28%,一般等级占 53%。S6、S8 和 S9 点评价结果最好,健康状况多为健康等级,S2 和 S5 点评价结果次之,健康状况多为亚健康,S1、S3、S4 和 S7 点评价结果较差,健康状况多为一般等级。

**表 4 海珠湿地各取样点 F-IBI 指数评价结果**

**Table 4 F-IBI results for each sampling sites in Haizhu wetland**

| 站点 Sampling sites | 尾水暂停排放 Suspension of tailwater discharge | | 尾水排放 1 个月 Tailwater discharge for 1 month | | 尾水排放 3 个月 Tailwater discharge for 3 month | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | F-IBI 分值 F-IBI score | 健康等级 Health level | F-IBI 分值 F-IBI score | 健康等级 Health level | F-IBI 分值 F-IBI score | 健康等级 Health level |
| S1 | 30.01 | 一般 | 30.61 | 一般 | 34.76 | 一般 |
| S2 | 52.59 | 亚健康 | 49.02 | 亚健康 | 77.66 | 健康 |
| S3 | 29.33 | 一般 | 47.14 | 亚健康 | 28.24 | 一般 |
| S4 | 34.71 | 一般 | 63.39 | 健康 | 28.74 | 一般 |
| S5 | 43.45 | 亚健康 | 52.31 | 亚健康 | 24.12 | 一般 |
| S6 | 62.52 | 健康 | 59.25 | 健康 | 36.83 | 亚健康 |
| S7 | 25.6 | 一般 | 21.83 | 一般 | 35.59 | 一般 |
| S8 | 89.4 | 健康 | 81.37 | 健康 | 62.37 | 健康 |
| S9 | 60.28 | 健康 | 54.86 | 健康 | 48.83 | 亚健康 |

F-IBI:鱼类生物完整性指数 Fish biologic integrity index;S1:西江涌;S2:三期补水口;S3:西江涌(一、二期补水口附近);S4:南丫围涌;S5:土华涌与西头涌交界;S6:土华涌;S7:珠江补水口;S8:石榴岗河;S9:塘涌

## 2.3 底栖动物调查结果

### 2.3.1 底栖动物群落结构特征

如图 6 和表 5 所示,尾水暂停排放期间共采集并鉴定出底栖动物 35 种,隶属于 4 门 7 纲 17 科,优势种为

寡毛纲中华颤蚓(*Tubifex sinicus*)和霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、多毛纲疣吻沙蚕(*Tylorrhynchus* sp.),重要种为寡毛纲苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)和软甲纲钩虾(*Gammarus* sp.);尾水排放 1 个月后共采集并鉴定出底栖动物 18 种,隶属于 3 门 7 纲 11 科,优势种为寡毛纲霍甫水丝蚓、多毛纲疣吻沙蚕和摇蚊科长足摇蚊幼虫(*Tanypus* sp.),重要种为软甲纲钩虾和多毛纲齿吻沙蚕(*Nephtys* sp.);尾水排放 3 个月后共采集并鉴定出 16 种,隶属于 3 门 6 纲 9 科,优势中为寡毛纲苏氏尾鳃蚓和多毛纲疣吻沙蚕,重要种为软甲纲钩虾、腹足纲结节螺(*Stenomelania tortuosa*)和摇蚊科粗腹摇蚊幼虫(*Petopia* sp.)。尾水暂停排放和尾水排放 1 个月后采集到的底栖动物多为耐污品种,尾水排放 3 个月后采集到的耐污类底栖动物有所减少。三次采样共同种有 7 种,其中共同优势种为多毛纲疣吻沙蚕,共同重要种为软甲纲钩虾和寡毛纲霍甫水丝蚓。

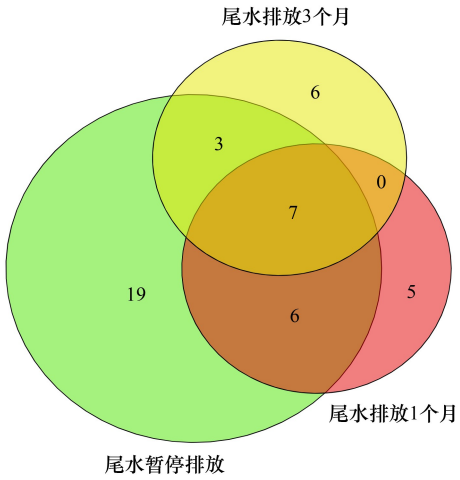


**图 6　三次采样底栖动物物种变化 Venn 图**

**Fig. 6　Venn diagram of benthic species changes during three sampling periods**

**表 5　底栖动物优势种和重要种相对重要性指数值**

**Table 5　The relative importance index of dominant and important benthic species**

| 种名 Species | 尾水暂停排放 Suspension of tailwater discharge | 尾水排放 1 个月 Tailwater discharge for 1 month | 尾水排放 3 个月 Tailwater discharge for 3 months |
|---|---|---|---|
| 粗腹摇蚊幼虫 *Petopia* sp. | 25.27428 | | 148.622 |
| 长足摇蚊幼虫 *Tanypus* sp. | 44.16894 | 1064.089 | |
| 钩虾 *Gammarus* sp. | 729.7743 | 268.7205 | 284.994 |
| 苏氏尾鳃蚓 *Branchiura sowerbyi* | 185.35 | | 2126.622 |
| 中华颤蚓 *Tubifex sinicus* | 1815.693 | 83.36622 | |
| 霍甫水丝蚓 *Limnodrilus hoffmeisteri* | 1058.967 | 1255.957 | 79.29642 |
| 疣吻沙蚕 *Tylorrhynchus* sp. | 2557.981 | 3144.928 | 1840.316 |
| 齿吻沙蚕 *Nephtys* sp. | 42.39351 | 160.0008 | |
| 结节螺 *Stenomelania tortuosa* | | | 283.4856 |

如图 7 所示,总体上底栖生物物种数量随时间呈下降趋势。其中,补水口附近点位 S2 和 S3 以及珠江边上点位 S7 的底栖生物物种数最少,均在 5 种以下,S1 和 S5 点底栖动物物种数量先降低后升高,S4、S6、S8 和 S9 点随时间呈下降趋势。S1、S4、S6 和 S7 点底栖动物密度在尾水持续排放后显著降低,尤其是 S1 点。排放口附近 S2 和 S3 点及较远的 S8 点底栖动物密度本底值较低,其中 S3 点位最低。S9 点底栖动物密度先上升后显著降低,在尾水排放 1 个月后主要增加的物种为摇蚊科长足摇蚊幼虫(67 个/$m^2$)和软甲纲钩虾(53 个/$m^2$)。

三次采样各纲底栖动物物种数量及密度变化如图 8 所示,昆虫纲、腹足纲和寡毛纲在尾水暂停排放期间物种数量最多,随着尾水的持续排放,物种数量先降低而后回升。双壳纲物种数量变化趋势则与之相反,表现为先增加后减小。随着尾水持续排放多毛纲在物种数量上没有变化,其密度则逐渐降低。此外寡毛纲密度在尾水排放 1 个月后显著降低而后轻微上升,腹足纲和双壳纲密度较低,且无明显变化,昆虫纲密度则表现为先增加后减小的趋势。

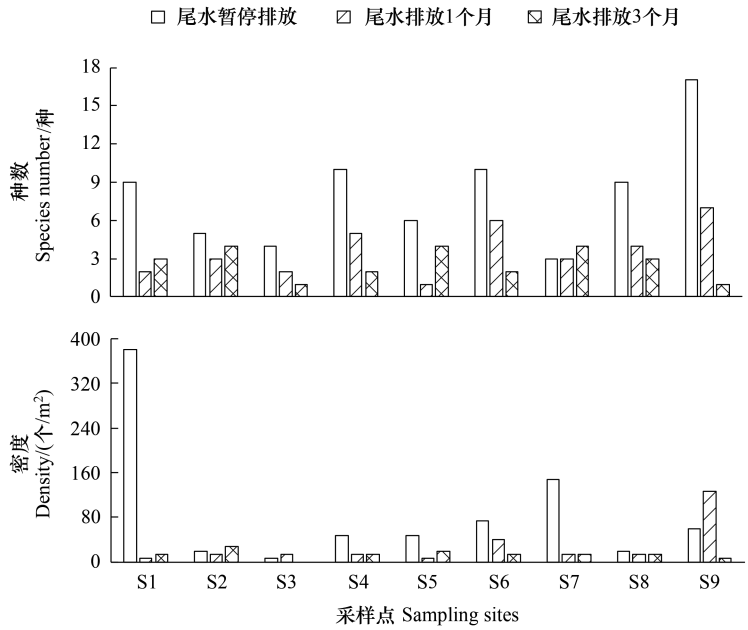


**图 7 三次采样各采样点底栖动物种类数量及密度**

**Fig.7 Number and density of benthic species at each sampling site during three sampling periods**

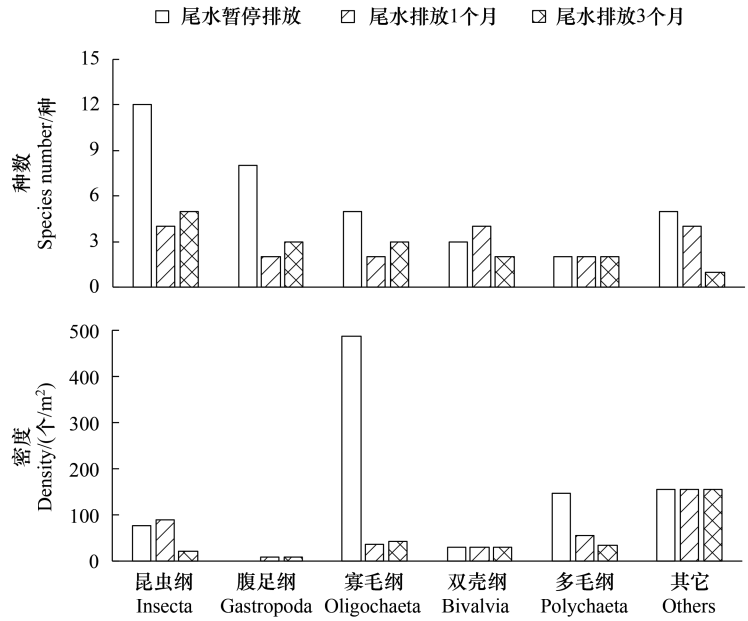


**图 8 三次采样各纲底栖动物种类数量及密度**

**Fig.8 Number and density of various classes of benthic species during three sampling periods**

### 2.3.2 底栖动物群落与环境因子的关系

底栖动物 RDA 分析结果如图 9 所示,对环境变化总解释率为 93.32%。其中,第一轴解释率最高(82.82%),第二轴为 10.5%。第一轴与 pH(0.454)、总磷(-0.557)和氨氮(-0.443)显著相关,从左到右 pH 逐渐升高,从右到左总磷和氨氮逐渐升高;第二轴与溶氧量(-0.719)显著相关,其次是 pH(-0.363),从上至下溶氧量和 pH 逐渐升高。冗余分析表明对海珠湿地底栖动物群落结构变化的主要显著解释因子为 pH、总磷、氨氮、溶氧量。RDA 分析显示,与尾水暂停排放相比,尾水排放 1 个月和尾水排放 3 个月后的底栖动物群落

结构有着沿第一轴正方向斜向下分化的趋势,其中尾水排放 1 个月后群落结构的分化更明显,其分化方向上溶氧量、pH、氮磷比、总氮和盐度增加。

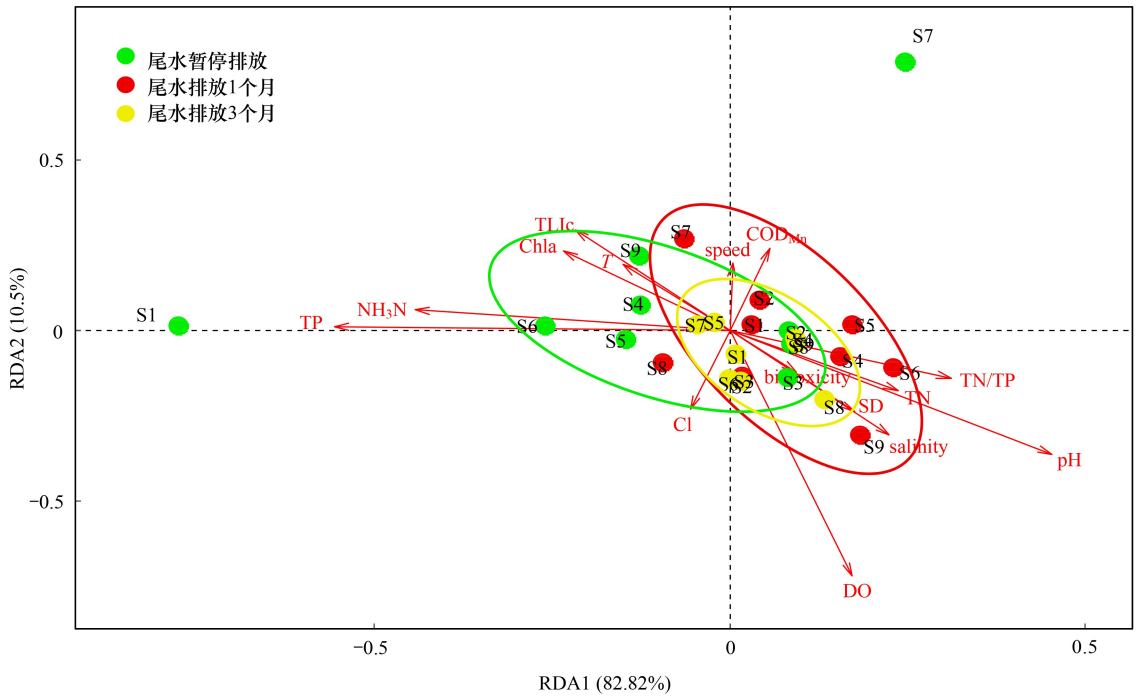


**图 9　底栖动物与环境因子冗余分析**

**Fig.9　Redundancy analysis of benthic animals and environmental factors**

### 2.3.3　B-IBI 指标体系的评价

B-IBI 指数对尾水排放影响的评价结果如表 6 所示。参考点 S8 和 S9 中健康等级占 83%,亚健康等级占 17%。受损点 S1—S7 中健康等级占 52%,亚健康等级占 28%,一般等级占 10%,较差等级占 10%。S4、S6—S9 点评价结果最好,健康状况多为健康等级,S2 点评价结果次之,S1、S3 和 S5 点评价结果较差,健康状况存在一般或较差等级。

**表 6　海珠湿地各取样点 B-IBI 指数评价结果**

**Table 6　B-IBI results for each sampling sites in Haizhu wetland**

| 站点 Sampling sites | 尾水暂停排放 Suspension of tailwater discharge | | 尾水排放 1 个月 Tailwater discharge for 1 month | | 尾水排放 3 个月 Tailwater discharge for 3 month | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | B-IBI 分值 B-IBI score | 健康等级 Health level | B-IBI 分值 B-IBI score | 健康等级 Health level | B-IBI 分值 B-IBI score | 健康等级 Health level |
| S1 | 80.93 | 健康 | 17.07 | 一般 | 26.61 | 亚健康 |
| S2 | 28.82 | 亚健康 | 22.61 | 亚健康 | 26.56 | 亚健康 |
| S3 | 31.16 | 亚健康 | 17.17 | 一般 | 8.39 | 较差 |
| S4 | 44.91 | 健康 | 32.72 | 健康 | 29.76 | 亚健康 |
| S5 | 34.55 | 健康 | 8.78 | 较差 | 38.61 | 健康 |
| S6 | 65.66 | 健康 | 41.27 | 健康 | 42.08 | 健康 |
| S7 | 59.61 | 健康 | 40.14 | 健康 | 31.58 | 健康 |
| S8 | 48.88 | 健康 | 33.88 | 健康 | 29.03 | 亚健康 |
| S9 | 75.41 | 健康 | 50.36 | 健康 | 31.40 | 健康 |

B-IBI:底栖动物生物完整性指数 Benthic biologic integrity index

### 2.4 鱼类和底栖动物综合评价结果

利用鱼类生物完整性指数和底栖动物完整性指数 2 个指标赋分结果,通过熵值法计算综合得分,评价结果如表 7 所示。参考点 S8 和 S9 中健康等级占 83%,亚健康等级占 17%。受损点 S1—S7 中健康等级占 24%,亚健康等级占 43%,一般等级占 33%。根据综合评价结果,S1、S3、S4 和 S5 点受尾水持续排放影响较大,在尾水排放 3 个月后健康等级为一般,排水口附近 S2 点评价结果较好,主要为亚健康,该结果与鱼类得分较高有关。

**表 7 鱼类和底栖动物综合评价结果**

**Table 7 Results of comprehensive evaluation of fish and benthic animals**

| 站点 Sampling sites | | F-IBI 分值 F-IBI score | B-IBI 分值 B-IBI score | 综合得分 Synthesis score | 健康等级 Health level |
|---|---|---|---|---|---|
| 尾水暂停排放 Suspension of tailwater discharge | S1 | 30.01 | 80.93 | 52.40 | 健康 |
| | S2 | 52.59 | 28.82 | 42.14 | 亚健康 |
| | S3 | 29.33 | 31.16 | 30.14 | 一般 |
| | S4 | 34.71 | 44.91 | 39.20 | 亚健康 |
| | S5 | 43.45 | 34.55 | 39.54 | 亚健康 |
| | S6 | 62.52 | 65.66 | 63.90 | 健康 |
| | S7 | 25.60 | 59.61 | 40.55 | 亚健康 |
| | S8 | 89.40 | 48.88 | 71.58 | 健康 |
| | S9 | 60.28 | 75.41 | 66.93 | 健康 |
| 尾水排放 1 个月 Tailwater discharge for 1 month | S1 | 30.61 | 17.07 | 24.66 | 一般 |
| | S2 | 49.02 | 22.61 | 37.41 | 亚健康 |
| | S3 | 47.14 | 17.17 | 33.96 | 亚健康 |
| | S4 | 63.39 | 32.72 | 49.90 | 健康 |
| | S5 | 52.31 | 8.78 | 33.17 | 亚健康 |
| | S6 | 59.25 | 41.27 | 51.34 | 健康 |
| | S7 | 21.83 | 40.14 | 29.88 | 一般 |
| | S8 | 81.37 | 33.88 | 60.48 | 健康 |
| | S9 | 54.86 | 50.36 | 52.88 | 健康 |
| 尾水排放 3 个月 Tailwater discharge for 3 month | S1 | 34.76 | 26.61 | 31.17 | 一般 |
| | S2 | 77.66 | 26.56 | 55.19 | 健康 |
| | S3 | 28.24 | 8.39 | 19.51 | 一般 |
| | S4 | 28.74 | 29.76 | 29.19 | 一般 |
| | S5 | 24.12 | 38.61 | 30.49 | 一般 |
| | S6 | 36.83 | 42.08 | 39.14 | 亚健康 |
| | S7 | 35.59 | 31.58 | 33.83 | 亚健康 |
| | S8 | 62.37 | 29.03 | 47.71 | 健康 |
| | S9 | 48.83 | 31.40 | 41.16 | 亚健康 |

生物完整性指数与余氯和盐度的相关性如图 10 所示,尾水暂停排放期间,F-IBI 分值和 B-IBI 分值与余氯无明显相关性,随着尾水的持续排放,F-IBI 分值与余氯呈负相关,并且相关程度先增加后减小,B-IBI 分值

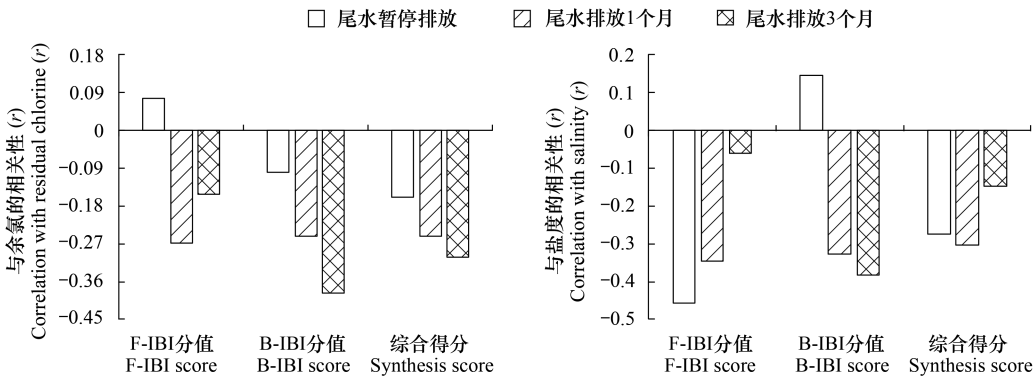


**图 10 生物完整性指数与余氯和盐度的相关性**

**Fig.10 Correlation of biointegrity index with residual chlorine and salinity**

F-IBI:鱼类生物完整性指数 Fish biologic integrity index;B-IBI:底栖动物生物完整性指数 Benthic biologic integrity index

与余氯的负相关性则逐渐增大。在尾水排放后,综合得分与余氯的相关程度逐渐上升,但低于 B-IBI 分值。F-IBI 分值与盐度的相关程度随尾水持续排放变小,B-IBI 分值与盐度的相关性随着尾水持续排放由正转负并且相关程度显著增大,综合得分与盐度的相关程度先增加后减小。

## 3　讨论

### 3.1　持续尾水排放对鱼类的影响

不同鱼类物种对于环境适应性不一样,因此其物种组成、优势种变化可以作为水生态健康的评价依据[23]。有研究表明富营养化水体中,耐污型鱼类往往会成为优势类群,如鲫、麦瑞加拉鲮、尼罗罗非鱼、齐氏罗非鱼和豹纹翼甲鲶等,而寡营养类水质清澈的水体往往以鲤科赤眼鳟、三角鲂、鳜虎鱼科等敏感类群占优势[19]。本研究鱼类优势种主要是鲫、麦瑞加拉鲮、尼罗罗非鱼和豹纹翼甲鲶,为三次采样共同种且均为耐污鱼类,随尾水持续排放耐污型优势种数量先增加而后降低。优势种鲫与豹纹翼甲鲶的生态位宽度随着尾水持续排放显著上升,它们占据资源的能力比较强,在种群竞争中处于强者地位,会挤占敏感鱼类的生存空间,导致敏感类群减少[24]。本研究发现尾水的持续排放对鱼类的群落结构产生了影响,向着耐污类群方向发展,该变化在排放口附近 S1 和 S2 点较为明显,随着尾水的持续排放,耐污鱼类物种数量显著增多。

在大量高透明度尾水的持续冲刷稀释下,河涌水体的透明度显著升高(水体透明度由 42 cm 升高至 110 cm),水体流动性增强,水体复氧速率得到提升,溶氧量明显增加,有利于鱼类觅食,尤其是肉食性耗氧高的种类喜生活在高溶氧区域[23, 25]。本研究水体生物毒性主要来自尾水中高浓度的余氯,随着尾水的持续排放,排放口附近(S1—S3)的生物毒性将不断增加。鱼类对余氯的耐受性较高,有研究表明 0.04—0.08 mg/L 的余氯可以引发鲤科鱼类对氯的适应能力[15, 26—27],因此适应性强的耐污鱼类随着尾水持续排放成为优势种。

### 3.2　持续尾水排放对底栖动物的影响

三次采样共鉴定出底栖动物 46 种,主要为节肢动物和软体动物,这与广州南沙湿地[28]的调查结果类似。群落优势种的组成与分布可体现底栖动物对样地的适应性[29],在富营养化或受污染水体中,耐污型底栖动物往往会成为优势类群,如:寡毛纲颤蚓科、昆虫纲摇蚊科等;在寡营养类水质清澈的水体往往以敏感类群占优势,如:腹足纲田螺科方形环棱螺、梨形环棱螺、蚬科河蚬、甲壳纲钩虾、昆虫纲春蜓科等[30]。本研究发现尾水暂停排放期间海珠湿地内河涌以耐污型底栖动物为主,如寡毛纲中华颤蚓、霍甫水丝蚓以及多毛纲疣吻沙蚕。随着尾水的持续排放,优势种仍为耐污能力强的寡毛纲霍甫水丝蚓和苏氏尾鳃蚓、多毛纲疣吻沙蚕以及昆虫纲摇蚊科长足摇蚊幼虫,这些优势类群的物种数量较尾水暂停排放时期有所降低,其密度则呈大幅下降趋势,尤其是寡毛纲和多毛纲底栖动物。底栖动物群落的结构也会随季节而变化,摇蚊一般是幼虫在水体中过冬,翌年逐步羽化离开水体[31—32],本研究尾水排放 1 个月时(9 月)昆虫纲摇蚊科密度最大,与 9 月、10 月为摇蚊幼虫的生长高峰期[33]表现一致。

研究表明随着盐度的增加,底栖动物丰富度趋于下降[34—35],本研究发现水体盐度升高主要由余氯和总氮浓度增加引起(两者与盐度存在显著的相关性,Pearson 相关系数分别为 0.812 和 0.914),水体盐度的增加将抑制底栖动物群落的发展。排放口附近底层耐污鱼类数量的增加也可能对底栖动物造成生存压力[36]。因此,底栖动物群落结构的改变可能是尾水持续排放和季节变化共同作用的结果。

### 3.3　持续尾水排放的水生动物综合评价

本研究对海珠湿地水生态健康评价中采用了生物完整性指数(IBI),在 IBI 评价体系中参考点的选择是指数计算中至关重要的一步,其直接影响最终生物完整性指数的核心参数和评价结果[37]。但由于自然地理状况和环境因素的不同,不同地区的参照系统标准的指标和值是有差异的[38]。鉴于未受干扰的河流在全球范围内很少见,IBI 指数参考点的建立通常必须依赖于当地受干扰最小的地点[39—40]。因此本研究根据评价目标及海珠湿地实际水文情况,选择离尾水排放口较远且不直接与尾水受纳水体连通的 S8 和 S9 点作为受尾水干扰最小的点。尾水暂停排放期间,海珠湿地底栖动物生物完整性指数的评价结果主要为健康和亚健康,要

优于珠江水系干流东江[41]以及流经城市的东江二级支流龙岗河[42]的评价结果;鱼类生物完整性指数的评价结果主要为亚健康和一般,与东江鱼类的评价结果[19]较为一致。尾水排放后,参考点(S8 和 S9)鱼类生物完整性和底栖动物生物完整性评价结果均以健康为主;排水口附近 S1、S2 和 S3 点的这两类生物完整性评价结果较为一致,主要为亚健康和一般;但是在离排水口较远的 S4、S5 和 S6 点的鱼类生物完整性评价结果主要为亚健康和一般,而在这三个点位底栖动物生物完整性评价结果主要为健康和亚健康。

生物完整性指数与余氯和盐度的相关性分析发现随着尾水的持续排放,底栖动物受余氯和盐度的影响逐渐加强,而余氯和盐度对鱼类的影响不明显。造成 B-IBI 分值、F-IBI 分值与余氯的相关性差异原因主要有两个方面:一是余氯的生物毒性直接作用于水生动物,鱼类对余氯耐受性高于底栖动物,相较之下底栖动物受余氯影响更大[15, 27];二是受纳水体中余氯浓度与水体盐度高度相关($r = 0.812$, $P < 0.01$),余氯浓度大幅上升也会增加水体中可溶性物质的含量,增加水体盐度,而盐度较高会导致无脊椎动物物种多样性及其丰富性降低,间接影响了底栖动物的生存,与无脊椎动物不同,水生脊椎动物如鱼类对盐度的耐受性更强[34—35, 43]。尾水补水可有效改善河涌的浊度和富营养化状况,有效提高部分区域的水体流速,增强水体复氧速率。同时尾水的持续排放也使得受纳水体中余氯浓度显著提升,余氯的存在可能会对水生生物存在潜在的影响。本研究仅使用了鱼类和底栖动物对尾水持续排放的影响进行了评估,若要进行更全面的生态健康状况评价,还需拓展评价对象,如浮游植物、浮游动物以及大型水生植物等,并进行更长时间和更大范围的跟踪调查。

## 4 结论

通过对高余氯尾水排放前后湿地水体水质和水生动物的跟踪调查发现,尾水持续排放显著增加了排水口附近水体的余氯、总氮以及盐度。同时,高余氯尾水对鱼类和底栖动物的群落结构产生了不同的影响:其中,鱼类中敏感类群减少,对氯耐受性强的耐污鱼类显著增加,排放口附近水体鱼类数量有所上升;尾水排放前后底栖动物皆以耐污种为优势种,在尾水排放后底栖动物物种数量有所降低,耐污优势种密度显著降低。底栖动物和鱼类生物完整性评价结果表明底栖动物和鱼类对余氯浓度和水体盐度变化的响应有较大差别,随着尾水的持续排放,底栖动物受余氯和盐度的影响越来越显著,鱼类受到的影响则较小。综合评价结果表明水生动物受余氯浓度升高的影响更大,高余氯尾水持续排放影响了水生动物的生存,后续还需延长调查的时间范围并进一步探讨尾水排放对其它水生生物的影响及具体的影响机制。

**参考文献(References):**


[1] 何建波, 李欲如, 毛江枫, 王震, 张宇心, 李婕妤, 张杭君. 河流生态系统健康评价方法研究进展. 环境科技, 2018, 31(6): 71-75.

[2] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.

[3] Feio M J, Hughes R M, Callisto M, Nichols S J, Odume O N, Quintella B R, Kuemmerlen M, Aguiar F C, Almeida S F P, Alonso-Eguíalis P, Arimoro F O, Dyer F J, Harding J S, Jang S, Kaufmann P R, Lee S, Li J H, Macedo D R, Mendes A, Mercado-Silva N, Monk W, Nakamura K, Ndiritu G G, Ogden R, Peat M, Reynoldson T B, Rios-Touma B, Segurado P, Yates A G. The biological assessment and rehabilitation of the world's rivers: an overview. Water, 2021, 13(3): 371.

[4] Ruaro R, Gubiani É A, Hughes R M, Mormul R P. Global trends and challenges in multimetric indices of biological condition. Ecological Indicators, 2020, 110: 105862.

[5] Oberdorff T, Pont D, Hugueny B, Porcher J P. Development and validation of a fish-based index for the assessment of 'river health' in France. Freshwater Biology, 2002, 47(9): 1720-1734.

[6] 霍堂斌, 刘曼红, 姜作发, 李喆, 马波, 于洪贤. 松花江干流大型底栖动物群落结构与水质生物评价. 应用生态学报, 2012, 23(1): 247-254.

[7] Herlihy A T, Sifneos J C, Hughes R M, Peck D V, Mitchell R M. The relation of lotic fish and benthic macroinvertebrate condition indices to environmental factors across the conterminous USA. Ecological Indicators, 2020, 112: 105958.

[8] Mulvey M, Leferink R K, Borisenko A. Willamette Basin Rivers and streams assessment. Hillsboro, OR: Oregon Department of Environmental Quality, 2009

[9] USEPA. National Rivers and Streams Assessment 2013—2014: A Collaborative Survey. Office of Water and Office of Research and Development Washington, DC, USA. 2020.

[10] 叶得万. 城市再生水利用途径和选择分析. 农村经济与科技, 2021, 32(4): 10-11.

[11] 何凡. 杭州城市污水处理厂尾水再生利用的探讨. 浙江科技学院学报, 2012, 24(4): 316-322.
[12] 王雷, 江小平. 中国城市再生水利用及价格政策研究. 给水排水, 2021, 57(7): 48-53, 59.
[13] 熊红松, 万年红, 张彬. 新冠肺炎疫情下污水处理厂运行探讨. 给水排水, 2020, 56(4): 40-43.
[14] 楚文海, 沈杰, 栾鑫淼, 肖融, 徐祖信. 疫情防控期间污水处理厂强化消毒下的水环境次生风险实证研究. 给水排水, 2020, 56(6): 1-5, 14.
[15] 曾江宁, 陈全震, 郑平, 高爱根, 廖一波, 杨关铭. 余氯对水生生物的影响. 生态学报, 2005, 25(10): 2717-2724.
[16] 王雪辉, 杜飞雁, 邱永松, 李纯厚, 孙典荣, 贾晓平. 1980—2007 年大亚湾鱼类物种多样性、区系特征和数量变化. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2403-2410.
[17] Shannon C E. A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
[18] 黄亮亮, 吴志强, 蒋科, 佐藤辰郎, 鹿野雄一, 李建华. 东苕溪鱼类生物完整性评价河流健康体系的构建与应用. 中国环境科学, 2013, 33(7): 1280-1289.
[19] 张豫, 蔡德所, 陆永求, 曹宇, 张金团, 赵芳旭, 丛沛桐. 基于鱼类完整性指数的东江干流惠州段生态系统的健康评价. 贵州农业科学, 2014, 42(12): 183-190.
[20] 渠晓东, 刘志刚, 张远. 标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数. 生态学报, 2012, 32(15): 4661-4672.
[21] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 单林娜. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康. 生态学报, 2005, 25(6): 1481-1490.
[22] 吴俊燕, 赵永晶, 王洪铸, 崔永德. 基于底栖动物生物完整性的武汉市湖泊生态系统健康评价. 水生态学杂志, 2021, 42(5): 52-61.
[23] 张翔, 沈伟, 周国栋. 2018—2020 年太湖鱼类群落结构及其环境因子典范对应分析. 生态与农村环境学报, 2021, 37(5): 674-680.
[24] 胡成业, 水玉跃, 田阔, 李良, 覃胡林, 张春草, 冀萌萌, 水柏年. 浙江七星列岛海洋特别保护区主要鱼类功能群划分及生态位分析. 生物多样性, 2016, 24(2): 175-184.
[25] 胡翠林, 张洪亮, 张亚洲, 潘国良, 徐开达, 毕远新, 梁君, 王好学, 周永东. 带鱼保护区春秋季鱼类群落特征及与环境因子的关系. 水产学报, 2018, 42(5): 694-703.
[26] Lotts J W Jr, Stewart A J. Minnows can acclimate to total residual chlorine. Environmental Toxicology and Chemistry, 1995, 14(8): 1365-1374.
[27] 江志兵, 廖一波, 高爱根, 陈全震, 曾江宁. 余氯对鱼类毒性影响的研究进展. 海洋学研究, 2009, 27(4): 86-94.
[28] 戚诗婷, 唐以杰, 郑梓琼, 汪琦, 张心怡, 陈静芳, 叶浩生, 陈姿旭. 广州南沙湿地大型底栖动物优势种生态位分析. 湿地科学与管理, 2021, 17(3): 13-17.
[29] 葛宝明, 郑祥, 程宏毅, 鲍毅新, 陈良. 灵昆岛围垦滩涂潮沟大型底栖动物群落和物种生态位分析. 水生生物学报, 2007, 31(5): 675-681.
[30] 李中宇, 金小伟, 刘继凤, 王业耀. 应用底栖动物为指示生物的松花江干流水生态预警研究. 生态毒理学报, 2017, 12(5): 161-169.
[31] 李永刚, 胡庆杰, 曲疆奇, 宗海明, 王健, 张清靖. 北京密云水库底栖动物群落结构及其时空变化. 水生态学杂志, 2018, 39(5): 31-38.
[32] 黄业辉, 范存祥, 吴中奎, 邱小常, 朱明明, 荣玉琴, 林志斌, 赵建刚, 张修峰. 广州市海珠湿地大型底栖动物群落物种组成和分布初探. 湿地科学, 2020, 18(2): 200-206.
[33] 李明. 摇蚊幼虫人工培育试验. 中国水产, 2008(2): 73-74.
[34] 吕巍巍. 围垦及盐度淡化对长江口潮间带大型底栖动物影响的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
[35] 张敬怀. 珠江口及邻近海域大型底栖动物多样性随盐度、水深的变化趋势. 生物多样性, 2014, 22(3): 302-310.
[36] 梅雪英, Vladimir Razlutskij, Lars G.Rudstam, Erik Jeppesen, 唐雅丽, 张修峰, 刘正文. 杂食性鱼类对浅水水体底栖-浮游生境耦合作用的影响: 微综述. 湖泊科学, 2021, 33(3): 667-674.
[37] Stoddard J L, Larsen D P, Hawkins C P, Johnson R K, Norris R H. Setting expectations for the ecological condition of streams: the concept of reference condition. Ecological Applications, 2006, 16(4): 1267-1276.
[38] 蔡琨, 秦春燕, 李继影, 张咏, 牛志春, 李旭文. 基于浮游植物生物完整性指数的湖泊生态系统评价——以 2012 年冬季太湖为例. 生态学报, 2016, 36(5): 1431-1441.
[39] Bozzetti M, Schulz U H. An index of biotic integrity based on fish assemblages for subtropical streams in southern Brazil.Hydrobiologia, 2004, 529(1/2/3): 133-144.
[40] Wu W, Xu Z X, Yin X W, Zuo D P. Assessment of ecosystem health based on fish assemblages in the Wei River Basin, China.Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(6): 3701-3716.
[41] 盛萧, 黄小追, 徐海升, 邓培雁, 王旭涛. B-IBI 在东江河流健康评估中的应用研究. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2016, 48(2): 52-60.
[42] 渠晓东, 陈军, 陈皓阳, 张敏, 彭文启, 朱磊, 雷璇. 大型底栖动物快速生物评价指数在城市河流生态评估中的应用. 水生态学杂志, 2021, 42(3): 14-22.
[43] Bal A, Panda F, Pati S G, Das K, Agrawal P K, Paital B. Modulation of physiological oxidative stress and antioxidant status by abiotic factors especially salinity in aquatic organisms. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2021, 241: 108971.