

生态修复工程前后水生环境变化研究

——以虎门大桥（广州段）北侧红树林海岸带为例

颜港归^{1,2}, 张鹏^{1,2}, 张庆华^{1,2}, 彭卫平^{1,2}

(1. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广州 510060;
2. 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室, 广州 510060)

摘要: 为了研究虎门大桥（广州段）北侧红树林海岸带生态修复工程前后水生环境变化, 文章对研究区内海水水质、沉积物化学特征、浮游动植物种类与细胞密度进行对比分析, 结合 Shannon-Wiener 生物多样性指数, 探寻出研究区生态修复工程前后水生环境变化规律。结果表明: 生态修复工程前, 浮游植物群落以绿藻类为主, 浮游动物群落以轮虫类为主; 生态修复工程后, 浮游植物群落以硅藻类为主, 浮游动物群落以枝角类为主; 生态修复工程后较前, 区内海水与沉积物中锌、铬、铜和铅等重金属浓度明显减少, 浮游植物细胞密度与种群数量均增加, 浮游动物细胞密度增加但种群数量下降。综合研究发现海岸带生态修复工程对水生环境有积极的改善作用。

关键词: 虎门大桥; 红树林海岸带; 生态修复; 水生环境变化

中图分类号: X55

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022080029

The changes of the aquatic environment before and after ecological restoration projects

——Taking mangrove coastal zone (Guangzhou section) on the north side of the Humen Bridge as an example

YAN Gangui^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, ZHANG Qinghua^{1,2}, PENG Weiping^{1,2}

(1. Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Guangzhou, 510060, China; 2. Guangdong Enterprise Key Laboratory for Urban Sensing, Monitoring and Early Warning, Guangzhou 510060, China)

Abstract: To investigate the changes in the aquatic environment before and after the ecological restoration project in the mangrove coastal zone on the northern side of Humen Bridge (Guangzhou section), the seawater quality, sediment chemical characteristics, phytoplankton species and density, and combined with the Shannon-Wiener diversity index was used to explore and investigate the change performance of the aquatic environment before and after the ecological restoration in the study area. The results showed that before the ecological restoration project, the dominant planktonic plant community was composed of green algae, while the zooplankton community was dominated by rotifers. After the ecological restoration project, the phytoplankton community was dominated by diatoms, and the zooplankton community was dominated by cladocerans. Compared to the pre-restoration conditions, the concentrations of heavy metals such as zinc, chromium, copper, and lead in seawater and sediments were significantly decreased after the ecological restoration project. The cell density and population of phytoplankton was increased while the cell density of zooplankton increased with a lower population. Thus, coastal ecological restoration projects have a positive effect on the improvement of the aquatic environment.

Keywords: humen bridge; mangrove coast; ecological restoration; aquatic environment

CLC number: X55

收稿日期: 2022-09-14

录用日期: 2022-09-19

基金项目: 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室基金项目(2020B121202019); 广州市城市规划勘测设计研究院科技基金项目(RDI220200204047)

作者简介: 颜港归(1997—), 男, 硕士、工程师。研究方向: 岩土工程、环境工程。E-mail: 66509245@qq.com

通信作者: 张鹏(1979—), 男, 硕士、高级工程师。研究方向: 岩土工程、环境工程。E-mail: 381133431@qq.com

引用格式: 颜港归, 张鹏, 张庆华, 等. 生态修复工程前后水生环境变化研究——以虎门大桥(广州段)北侧红树林海岸带为例[J]. 环境保护科学, 2023, 49(3): 89-95.

红树林是以红树植物为主体的湿地木本植物群落^[1-2],主要生长于海陆潮间带,在净化海水水质、抵御风浪和维护生物多样性等方面发挥着重要作用^[1-4]。随着沿海城市工业快速发展,大量污水随河流排入海洋,导致红树林海岸带的原生生态系统结构遭受了严重破坏^[5],给海洋生态环境带来了重大威胁,因此重建和恢复已被破坏的红树林生态系统刻不容缓^[5-7]。红树林海岸带生态修复往往伴随着水生环境的改变及海洋生态系统的重建。目前已有众多学者对红树林生态系统修复全过程进行研究,其中谢宗琳^[8]研究红树植物恢复特征及影响因素时发现红树植被高度与土壤黏粒含量呈正相关关系,同时红树林对土壤中重金属有较高的耐受力;徐新良^[9]发现在一定的浓度范围内的污水可以促进红树林茎高的生长;RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ et al^[10]研究发现红树林海岸带生态修复效果主要取决于恢复类型和所用技术,其中以群落为基础的红树林生态恢复是最有效方式;LIANG et al^[11]发现通过红树林海岸带湿地恢复和海岸生态廊道建设等一系列措施,可以一定程度净化海水水质并保持水生动植物种群密度及物种数量的稳定。红树林海岸带生态恢复的关键是红树林植被的恢复^[12],在植被恢复的过程中伴随着生物多样性的恢复^[13],生物多样性可以表明环境因子与物种群落之间关系,也可以呈现群落或者物种丰富度以及分布的格局^[14-18]。

本研究以虎门大桥(广州段)北侧红树林海岸带为研究区,在生态修复工程前后分别进行海水、沉积物及浮游生物样品的采集与测试,通过对区内海水水质、沉积物化学特征、浮游动植物种类与细胞密度的对比分析,探寻出了研究区生态修复前后水生环境变化规律,取得的成果在红树林海岸带生态修复和生物多样性方面具有重要的意义。

1 研究区概况

南沙区地处广州市最南端,西接中山、佛山和顺德,东与东莞隔江相望,南临珠江入海口伶仃洋,属南亚热带海洋季风气候区,具有夏季高温潮湿多雷雨、冬季严寒期短无冰雪等气象特点。

研究区位于广州市南沙区虎门大桥(广州段)北侧,地处珠江入海口,气候受海洋影响,同时受到珠江河道造成的狭管效应^[19]影响,风速明显大于周边地区。研究区地理位置坐标为 113°35'44" ~

113°36'02"E、22°46'49" ~ 22°47'17"N,岸线长度约 955 m,总面积为 44 040 m²,属珠江三角洲冲洪积平原地貌单元,地势呈陆域向海域逐渐降低趋势,周边区域地表水系丰富,交通便利。

2 样品采集与测试分析

虎门大桥(广州段)北侧红树林海岸带生态修复工程开始于 2020 年 10 月,结束于 2020 年 11 月。本生态修复工程以修复红树林为主,主要通过清除海岸线建筑垃圾、种植与恢复本土红树林等一系列措施,旨在全面提升虎门大桥北侧海岸线生态护岸功能,打造现代时尚简约的生态海岸线。

查阅研究区往年气象水文资料发现,6 月与 9 月的气温、降雨和水位等情况基本相同,为了排除季节动态变化、气候环境变化等非生态修复工程因素对研究成果的影响,本研究先后于 2020 年 6 月、2021 年 9 月分别对研究区内海水、沉积物、浮游植物和浮游动物进行定点采样,其中海水、沉积物样品采集点分别位于区内南北两端编号为 A、B,浮游植物、浮游动物样品采集点由北向南分布全区,编号为 1、2、3 和 4,见图 1。



图 1 采样点位

Fig. 1 Schematic diagram

为保证样品测试结果的准确性,本实验均加采了平行样并进行同步测试,共采集海水样品 8 组、沉积物样品 8 组、浮游植物样品 16 组和浮游动物样品 16 组。

海水样品采集步骤:将取样器进行多次润洗后用 pH 计测量并记录 pH,然后用 0.45 μm 微孔过滤水样并分别装入 2 个 50 mL 的聚乙烯瓶中,其中一瓶添加纯硝酸酸化至 pH<2 用于室内阳离子测试分

析,另一瓶直接分装用于室内阴离子分析,最后将样品用封口膜密封并放置在车载冰箱(4℃)^[20]中保存并委托广州某检测技术有限公司进行检测。

沉积物样品采集步骤:用洁净的取样勺取沉积物样品至无菌的离心管并用封口膜密封^[21],委托广州某检测技术有限公司进行检测。

浮游植物样品采集步骤:定量样品在定性采样之前用采水器采集^[22],当分层采样时,将各层所采水样等量混匀后取1000 mL,定性样品应用25号浮游生物网在表层呈“∞”形缓慢拖曳采集并保存,委托广州某检测技术有限公司进行检测。

浮游动物样品采集步骤:枝角类和桡足类定量样品应在定性采样之前用采水器采集,每个采样点应采水样10~50 L,用25号浮游生物网过滤浓缩,定性样品用13号浮游生物网在表层呈“∞”形缓慢

拖曳采集并保存,委托广州某检测技术有限公司进行检测。

3 结果与讨论

3.1 生态修复工程前后水环境变化特征

选用单因子评价法,以《海水水质标准:GB3097—1997》作为评价标准,对海水样品测试结果中主要指标进行水质评价,见表1。生态修复工程建设前,附近水域海水中镉、汞、化学需氧量、硫化物、砷、油类和铬含量达到Ⅰ类标准;铜、锌浓度较高,达到Ⅲ类标准;无机氮、活性磷酸盐浓度高属劣Ⅳ类;其余各项指标均达到Ⅱ类及其以上。生态修复工程建设完成1年后,附近水域水质得到一定程度改善,其中镉、汞、化学需氧量、硫化物、砷、油类和铬含量均达到Ⅰ类标准。

表1 水质评价结果表
Table 1 Water quality assessment results

指标	采样点A(修复前)		采样点B(修复前)		采样点A(修复后)		采样点B(修复后)	
	检测值	结果	检测值	结果	检测值	结果	检测值	结果
pH	7.660	Ⅲ类	7.460	Ⅲ类	7.350	Ⅲ类	7.370	Ⅲ类
无机氮/mg·L ⁻¹	1.870	劣Ⅳ类	1.980	劣Ⅳ类	1.890	劣Ⅳ类	1.890	劣Ⅳ类
镉/μg·L ⁻¹	0.001	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类
汞/mg·L ⁻¹	0.001	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类
化学需氧量/mg·L ⁻¹	1.760	Ⅰ类	2.080	Ⅱ类	1.880	Ⅰ类	1.980	Ⅰ类
磷酸盐/μmol·(dm ³) ⁻¹	1.120	劣Ⅳ类	1.020	劣Ⅳ类	0.130	劣Ⅳ类	0.130	劣Ⅳ类
硫化物/mg·L ⁻¹	0.001	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类
铅/μg·L ⁻¹	2.760	Ⅱ类	3.160	Ⅱ类	0.001	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类
溶解氧/mg·L ⁻¹	5.200	Ⅱ类	5.100	Ⅱ类	7.560	Ⅰ类	7.580	Ⅰ类
砷/μg·L ⁻¹	2.440	Ⅰ类	2.460	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类
油类/mg·L ⁻¹	0.038	Ⅰ类	0.025	Ⅰ类	0.002	Ⅰ类	0.001	Ⅰ类
总铬/μg·L ⁻¹	2.260	Ⅰ类	2.170	Ⅰ类	0.020	Ⅰ类	0.010	Ⅰ类
铜/μg·L ⁻¹	14.600	Ⅲ类	15.100	Ⅲ类	6.100	Ⅱ类	2.100	Ⅰ类
锌/μg·L ⁻¹	46.800	Ⅱ类	53.200	Ⅲ类	5.100	Ⅰ类	0.100	Ⅰ类

对比分析生态修复工程前后海水水质各指标的变化程度,锌、铜和铅等重金属浓度有明显减少。锌在修复前含量为46.8~53.2 μg/L,修复后含量仅为0.01~5.1 μg/L;铜在修复前含量为14.6~15.1 μg/L,修复后含量为2.1~6.1 μg/L;铅在修复前含量为2.76~3.16 μg/L,修复后含量为0.001 μg/L。经研究发现,红树林植被底部根系对铜、锌、镉和

铅等重金属有强吸附能力,可以将溶液中重金属富集在红树林植被根部^[23-24]。

3.2 生态修复工程前后沉积物地化特征对比

选用单因子评价法,以《海洋沉积物质量标准:GB18668—2002》作为评价标准,对沉积物样品测试结果中主要指标进行评价,见表2。

表 2 沉积物评价结果
Table 2 Sediment assessment results

指标	采样点A(修复前)		采样点B(修复前)		采样点A(修复后)		采样点B(修复后)	
	检测值	结果	检测值	结果	检测值	结果	检测值	结果
镉/mg·kg ⁻¹	0.46	I类	0.49	I类	0.21	I类	0.14	I类
汞/mg·kg ⁻¹	0.22	II类	0.26	II类	0.15	I类	0.12	I类
硫化物/mg·kg ⁻¹	80.60	I类	95.65	I类	10.62	I类	5.01	I类
铅/mg·kg ⁻¹	65.95	II类	63.96	II类	9.52	I类	8.79	I类
砷/mg·kg ⁻¹	27.54	II类	30.74	II类	18.33	I类	16.77	I类
铜/mg·kg ⁻¹	23.63	I类	30.65	I类	17.61	I类	16.88	I类
锌/mg·kg ⁻¹	225.15	II类	219.43	II类	70.81	I类	65.33	I类
油类/mg·kg ⁻¹	205.10	I类	203.01	I类	88.72	I类	82.82	I类
有机碳/%	1.57	I类	1.51	I类	0.81	I类	0.53	I类
总铬/mg·kg ⁻¹	106.14	II类	107.37	II类	44.73	I类	33.41	I类

表 2 可知,生态修复工程建设前,各指标均达到 II 类标准及以上,其中镉、硫化物、铜、石油类和有机碳达到 I 类标准;生态修复工程建设完成 1 年后,有机碳、总汞、铜、锌、铅、镉、砷、总铬、石油类和硫化物等 10 项指标均符合 I 类标准。

对比分析生态修复工程前后海洋沉积物中各指标的变化程度,锌、铬和铅等重金属浓度有明显减少。锌在修复前含量为 219.43 ~ 225.15 mg/kg,修复后含量为 70.81 ~ 65.33 mg/kg;铬在修复前含量为 106.14 ~ 107.37 mg/kg,修复后含量为 33.41 ~ 44.73 mg/kg;铅在修复前含量为 65.95 ~ 65.96 mg/kg,修复后含量为 8.79 ~ 9.52 mg/kg。经研究发现,红树林群落土壤一般是处于寡营养环境,含有丰富的有机质,其表面往往带负电荷,因此易吸附土壤中带正电荷的铅、锌和铬等重金属元素;在植物根系吸收养分的过程中,常伴随着吸附土壤中重金属元素且随林龄的增长而增强^[23-25]。

3.3 生态修复工程前后浮游植物变化特征

3.3.1 浮游植物种群类别变化规律 浮游植物种群类别统计结果,见表 3。

表 3 可知,生态修复工程前发现有浮游植物 6 门,93 种(属),绿藻门的种类最多,38 种(属);其次为硅藻门,35 种(属);裸藻门为 8 种(属),蓝藻门为 6 种(属),甲藻门为 5 种(属),隐藻门为 1 种(属)。生态修复工程后发现有浮游植物 6 门,104 种(属),以硅藻门的种类最为丰富,计 61 种(属);其次为绿藻门,计 22 种(属);裸藻门为 12 种

(属);蓝藻门为 4 种,甲藻门为 3 种,黄藻门为 2 种。

表 3 浮游植物种群类别统计结果
Table 3 Statistical results of phytoplankton species

浮游植物 门类	生态修复工程前种类		生态修复工程后种类	
	属/种	占全部种类 比例/%	属/种	占全部种类 比例/%
硅藻	35	37.63	61	58.65
绿藻	38	40.86	22	21.15
甲藻	5	5.38	3	2.88
裸藻	8	8.60	12	11.54
蓝藻	6	6.45	4	3.85
隐藻	1	1.08	0	0.00
黄藻	0	0.00	2	1.93
汇总	93	100.00	104	100.00

浮游植物群落的种类组成以硅藻和绿藻门为主;生态修复工程后较前,硅藻门、裸藻门种类数量及其占比呈明显上升趋势,而绿藻门种类数量及其占比呈下降趋势,充分说明在红树林生态修复过程中,间接引入了大量硅藻门类、裸藻门浮游植物。

为了进一步分析各采样点位浮游植物种类变化规律,本文对 1、2、3 和 4 号 4 个点位浮游植物种类数进行了统计,见图 2。

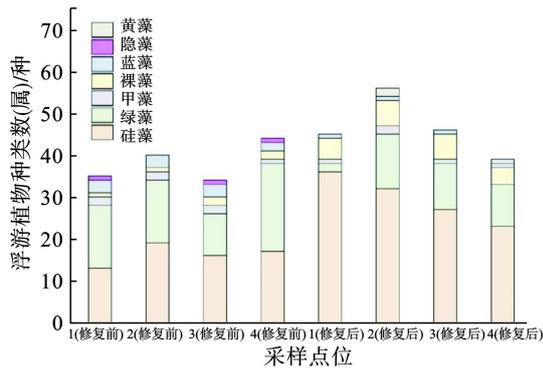


图2 采样点位浮游植物门类统计结果

Fig. 2 Statistical results of phytoplankton classes at sampling points

图2可知,生态修复工程前,1、2、3和4各点位浮游植物种类数分别为35、40、34和44种(属),其中3点位种类数最低,为34种;4点位种类数最高,为44种;生态修复工程后,1、2、3和4各点位浮游植物种类数分别为45、56、46和39种(属),其中4点位种类数最低,为39种;2点位种类数最高,为56种。分析发现,生态修复工程后较修复前,1、2和3号点位浮游植物门类的种类数有明显的增加,其中2号点因位于红树林腹地,其浮游植物门类的种类数增长最多;4号点浮游植物门类的种类数则出现下降,其原因为4号点处曾生长有水草,在红树林生态修复过程中进行了清理工作,导致此处浮游植物门类的种类数出现暂时下降。

3.3.2 浮游植物细胞密度变化规律 浮游植物细胞密度统计结果,见图3。

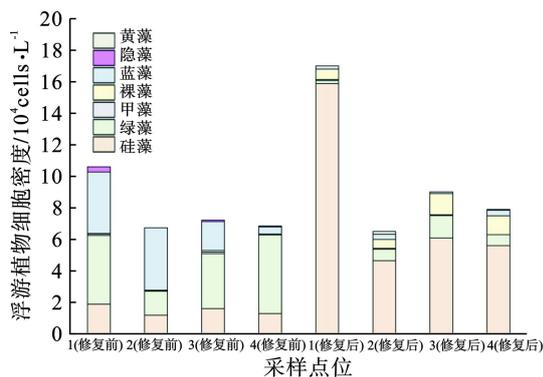


图3 浮游植物细胞密度统计结果

Fig. 3 Statistical results of phytoplankton cell density

生态修复工程前浮游植物细胞密度变化范围为 $6.74 \times 10^4 \sim 1.06 \times 10^5$ cells/L, 均值为 7.87×10^4 cells/L;从浮游植物门类组成上来看,各个采样点密度组成最高的是绿藻门、蓝藻门,其中绿藻门占比最高的是4点位,为73.02%,占比最低的是2点位,

为22.67%;其中蓝藻门占比最高的是2点位,为58.94%,占比最低的是4点位,为6.43%。生态修复工程后浮游植物细胞密度变化范围为 $6.51 \times 10^4 \sim 1.71 \times 10^5$ cells/L, 均值为 1.01×10^5 cells/L;从浮游植物门类组成上来看,各个采样点密度组成最高的是硅藻门。分析发现,生态修复工程后较前,浮游植物细胞密度整体有所增加,其中硅藻门植物细胞丰度值有明显增加,其原因为工程建设对硅藻门浮游植物产生了积极增益。

3.4 生态修复工程前后浮游动物变化特征

3.4.1 浮游动物种群类别变化规律 浮游动物种群类别统计结果,见表4。

表4 浮游动物种群类别统计结果
Table 4 Statistical results of zooplankton population category

浮游动物门类	生态修复工程前种类		生态修复工程后种类	
	属/种	占全部种类比例/%	属/种	占全部种类比例/%
原生动物	10	23.82	9	37.5
轮虫	20	47.62	5	20.84
枝角类	6	14.28	2	8.33
桡足类	6	14.28	8	33.33
汇总	42	100.00	24	100.00

表4可知,生态修复工程后较前,浮游动物的种类总数量呈明显下降趋势,其主要原因为红树林生态修复施工会影响原有的浮游动物生态环境,导致浮游动物种类数量出现暂时性下降。

3.4.2 浮游动物细胞密度变化规律 浮游动物细胞密度统计结果,见图4。生态修复前浮游动物细胞密度变化范围为 $2.94 \sim 8.70$ ind/L, 均值为 5.26 ind/L, 轮虫类为浮游动物细胞密度组成的主要变化指标;生态修复后浮游动物细胞密度变化范围为 $2.94 \sim 15.10$ ind/L, 均值为 8.31 ind/L, 桡足类为浮游动物细胞密度组成的主要变化指标。分析发现,生态修复工程后较修复前,浮游动物细胞密度整体有所增加,其中桡足类动物细胞丰度值有明显增加,其原因为工程建设对桡足类浮游植物产生了积极增益。

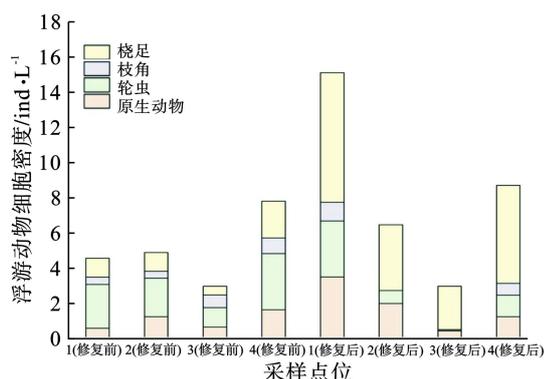


图 4 浮游动物细胞密度统计结果

Fig. 4 Statistical results of zooplankton cell density

3.5 生态修复工程前后生物多样性变化特征

Shannon-Wiener 生物多样性指数可以反映出水生态状况, 见式(1):

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

式中: H' 为种类多样性指数; S 为样品中的种类总数; P_i 为第 i 种的个体数与总体数的比值; 评价标准为 $H' \geq 3$, 水生态状况良好; $3 > H' \geq 2$, 水生态状况较好; $2 > H' \geq 1$, 水生态状况一般; $1 > H'$, 水生态状况较差。

研究区 Shannon-Wiener 生物多样性指数计算结果, 见表 5。

表 5 Shannon-Wiener 生物多样性指数计算结果
Table 5 Shannon-Wiener biodiversity index calculation results

采样 点位	浮游植物 H'		浮游动物 H'	
	修复前	修复后	修复前	修复后
1	2.55	3.59	2.82	2.30
2	2.67	4.73	3.01	0.57
3	2.78	4.63	2.90	1.47
4	2.71	4.08	2.58	1.23

表 5 可知, 修复前浮游植物 Shannon-Wiener 物种多样性指数处于 2.55 ~ 2.78, 其中点位 3 多样性指数最高为 2.78, 点位 1 多样性指数最低为 2.55; 修复前浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数处于 2.58 ~ 3.01, 其中点位 2 多样性指数最高为 3.01, 点位 4 多样性指数最低为 2.58, 各位点多样性指数均 > 2 。修复后浮游植物 Shannon-Wiener 物种多样性指数处于 3.59 ~ 4.73, 其中点位 2 多样性指数最高为 4.73, 点位 1 多样性指数最低为 3.59; 浮游动物 Shannon-Wiener 物种多样性指数处于 0.57 ~ 2.3,

其中点位 1 多样性指数最高为 2.3, 点位 2 多样性指数最低为 0.57。

综合对比修复后与修复前水生态状况发现, 修复后的浮游植物 Shannon-Wiener 物种多样性指数较修复前有明显增加, 充分说明生态修复工程对水生态环境有积极的改善作用; 此外, 浮游动物物种多样性指数出现下降, 其主要原因为工程建设期间对水生态环境质量的影响较大, 目前研究区水生态环境仍处于恢复期, 浮游动物物种多样性需要较长时间来恢复。

4 结论

(1) 对比分析生态修复工程前后海水水质及沉积物各指标的变化程度, 锌、铬、铜和铅等重金属浓度有明显减少, 其余指标变化不明显, 说明红树林植被对铜、锌、镉和铅等重金属有较强的吸附能力, 虎门大桥(广州段)北侧海岸线整治工程建设对所在水域的水质及沉积物质量的提升有一定帮助。由于生态系统的恢复是循序渐进的过程, 水环境提升效果尚未显著呈现, 但可预见在后续的良好维护保养下, 该区域的水环境质量状况可逐步提升。

(2) 研究区内浮游植物群落的种类组成以硅藻和绿藻门为主, 生态修复工程前以绿藻为主, 生态修复工程后以硅藻为主。生态修复工程后较前浮游植物细胞密度及种类数均有所增加, 其原因为生态修复工程对浮游植物群落构成及种类数组成产生了积极增益。

(3) 生态修复工程前研究区内浮游动物群落组成为轮虫-原生动物, 以轮虫类为主; 生态修复工程后浮游动物的群落组成为原生动物-桡足类, 总种类数比工程建设前有所减少, 细胞密度有明显增多, 其主要原因为红树林生态修复施工时会影响原有的浮游动物生态环境导致种类数出现暂时下降, 同时生态修复工程后浮游植物总种类数及细胞密度增加, 而浮游动物的主要食物来源于浮游植物, 因此会导致浮游动物细胞密度增加。

(4) 综合对比修复后与修复前水生态状况发现, 修复后的浮游植物 Shannon-Wiener 物种多样性指数较修复前有明显增加, 充分说明生态修复工程对水生态环境有积极的改善作用; 此外, 浮游动物物种多样性指数出现下降, 其主要原因为工程建设期间对水生态环境质量的影响较大, 目前研究区水

生态环境仍处于恢复期,浮游动物物种多样性需要较长时间来恢复。

参考文献

- [1] HARDIN, DEWI I K, ALZARLIANI W O D, et al. The role of communities in conserving mangrove forests to achieve sustainable development[J]. IOP conference series:earth and environmental science, 2019, 343: 101 – 111.
- [2] 虞丹君, 罗海忠, 徐志进. 不同红树处理海水养殖尾水效果初探[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(7): 271 – 274.
- [3] CHEN Q, LI Y, KELLY D M, et al. Improved modeling of the role of mangroves in storm surge attenuation[J]. Estuarine, coastal and shelf science, 2021, 260: 111 – 121.
- [4] CASTRO E, PINEDO J, MARRUGO J, et al. Retention and vertical distribution of heavy metals in mangrove sediments of the protected area swamp of mallorquin, colombian caribbean[J]. Regional studies in marine science, 2022, 49: 272 – 284.
- [5] 刘海洋. 广东省海堤规划工程环境影响分析及对策[J]. 环境保护科学, 2003, 29(6): 50 – 52.
- [6] FEI L, MIN X, QING L, et al. Ecological restoration zoning for a marine protected area: A case study of haizhouwan national marine park, China[J]. Ocean and coastal management, 2014, 98: 317 – 325.
- [7] LI H, LI L, SU F, et al. Ecological stability evaluation of tidal flat in coastal estuary: A case study of liaohe estuary wetland, China[J]. Ecological indicators, 2021, 130: 212 – 219.
- [8] 谢宗琳. 林窗内红树植物恢复特征及影响因素分析[D]. 海口: 海南师范大学, 2020.
- [9] 徐新良. 中国林地资源时空动态特征及驱动力分析[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(1): 41 – 46.
- [10] RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ J A, MANCERA-PINEDA J E, TAVERA H. Mangrove restoration in Colombia: trends and lessons learned[J]. Forest ecology and management, 2021, 496: 496 – 511.
- [11] LIANG L, HOU J W, QI Y. China's coastal wetlands: Ecological challenges, restoration, and management suggestions[J]. Regional studies in marine science, 2020, 37: 95 – 102.
- [12] 王震. 红树林群落恢复过程中林下更新、土壤与水质变化的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [13] 莫权芳, 钟仕全. 基于 Landsat 数据的铁山港区红树林变迁及其驱动力分析研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(23): 8 – 14.
- [14] 张留恩, 廖宝文, 管伟. 淇澳岛寒害致死海桑林迹地恢复早期植被特征的初步研究[J]. 林业科学研究, 2011, 24(1): 33 – 38.
- [15] RODOLFO G, ENRICO C, ANDREA F, et al. Vegetation cover and biodiversity levels are driven by backfilling material in quarry restoration[J]. Catena, 2020, 195: 505 – 513.
- [16] HUANG C B, ZHOU Z X, PENG C H, et al. How is biodiversity changing in response to ecological restoration in terrestrial ecosystems? A meta-analysis in China[J]. Science of the total environment, 2019, 48: 650 – 661.
- [17] BORIS W, EDWARD B B, NICOLA B, et al. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services[J]. Science, 2006, 314: 787 – 790.
- [18] STEFANIA T. Estimating the benefits of restoration and preservation scenarios of marine biodiversity: An application of the contingent valuation method[J]. Environmental science and policy, 2019, 100: 412 – 419.
- [19] 郭兴亮, 钟玮, 张入财. 地形对台风 Megi(2010) 过岛阶段路径偏折影响的数值研究[J]. 大气科学学报, 2019, 42(4): 481 – 491.
- [20] MAHBOOB S, AHMED Z, FAROOQ K M, et al. Assessment of heavy metals pollution in seawater and sediments in the arabian gulf, near dammam, saudi arabia[J]. Journal of king saud university-science, 2022, 34(1): 272 – 281.
- [21] 尚婷. 南海和北极海域海洋表层沉积物地球化学研究[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- [22] 马心琪. 松花江流域典型跨界断面冰封期的水质特征与浮游生物群落组成[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [23] MENG S, PENG T, PRATUSH A, et al. Interactions between heavy metals and bacteria in mangroves[J]. Marine pollution bulletin, 2021, 172: 132 – 135.
- [24] MANJU M N, RATHEESH KUMAR C S, RESMI P, et al. Trace metal distribution in the sediment cores of mangrove ecosystems along northern Kerala coast, south-west coast of India[J]. Marine pollution bulletin, 2020, 153: 307 – 322.
- [25] 马以超, 任宇霞, 焦茹媛. 河湖生态修复过程中的误区探讨与模式构建[J]. 环境保护科学, 2021, 47(2): 15 – 20.