

城市红树林生态系统健康评价与管理对策

——以粤港澳大湾区为例

张月琪,张 志,江鑑倩,沈小雪,李瑞利* (北京大学深圳研究生院,环境与能源学院,广东 深圳 518055)

摘要: 为解明粤港澳大湾区城市红树林生态系统健康状况,基于 PSR(压力-状态-响应)模型和层次分析法,构建了城市红树林生态系统健康评价指标体系,对大湾区的香港米埔、深圳福田、广州南沙和珠海淇澳岛 4 个典型城市红树林进行生态系统健康评价,识别健康问题并提出管理对策。结果表明:红树林生态系统健康指数(EHI)为淇澳岛(3.05,健康)>米埔(3.03,健康)>南沙(2.54,亚健康)>福田(2.13,亚健康)。就压力指标而言,米埔和福田红树林的自然压力源为病虫害和生物入侵,人为压力源为人口、经济相关指标及城镇生活污水排放,福田还受到工业废水排放的压力。就状态指标而言,红树林受海水营养盐污染严重,南沙和淇澳岛红树林存在严重的有机污染和重金属污染;红树植物多样性(除南沙红树林外)和大型底栖动物生物多样性偏低,但鸟类生物多样性处于较高水平。就响应指标而言,福田和南沙红树林由于面积小而生态服务功能偏低,南沙红树林的管理水平不足。粤港澳大湾区城市红树林存在的主要健康问题包括生态失衡导致的病虫害与生物入侵、受纳外源污染导致的环境污染、栖息地破坏导致的生物多样性下降的共性问题及自身特征与管护水平差异导致的其它个性问题。针对上述健康问题,建议:以缓解生态失衡为目标高效监测并推广基于自然法则的生态恢复,以源头控制为根本整体改善环境质量,以保护生物多样性为重点提高红树林生态系统稳定性,因地制宜充分发挥城市红树林经济-社会-生态效益。

关键词: 粤港澳大湾区; 城市红树林; 生态系统健康评价; 健康问题; 管理对策

中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2022)05-2352-18

Ecosystem health assessment and management strategies of urban mangrove: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. ZHANG Yue-qi, ZHANG Zhi, JIANG Bi-qian, SHEN Xiao-xue, LI Rui-li* (School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China). *China Environmental Science*, 2022,42(5): 2352~2369

Abstract: To clarify the ecosystem health status of urban mangroves in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA), an indicator system for ecosystem health assessment of urban mangroves was developed based on PSR (Press-State-Response) model and analytic hierarchy process in this study. The indicator system was conducted on four typical urban mangroves in GBA: Mai Po in Hong Kong, Futian in Shenzhen, Nansha in Guangzhou, and Qi'ao island in Zhuhai. The health problems were identified and management strategies were put forward. The results showed that: The ecosystem health index (EHI) of mangroves were Qi'ao island (3.05, health)>Mai Po (3.03, health)>Nansha (2.54, sub-health)>Futian (2.13, sub-health). As for the press indicators, the natural pressure sources for mangroves in Mai Po and Futian were pests harm and biological invasion, while the artificial pressure came from the increasing population, the rapidly developed economy, and municipal wastewater discharge. In addition, the mangroves in Futian were suffering from the discharge of industrial waste. In terms of the state indicators, four urban mangroves were all suffering from seawater eutrophication. Organic and heavy metals seriously polluted the mangroves in Nansha and Qi'ao Island. The biodiversity of mangrove plants (except for Nansha) and macrobenthos was low, but birds' biodiversity was relatively high. For the response indicators, the mangroves in Futian and Nansha hold low ecological service functions due to their small areas, and the management level of mangroves in Nansha was insufficient. The leading health problems of urban mangroves in GBA include two aspects: firstly, common issues, including pests harm and biological invasion caused by ecological imbalance, environmental pollution caused by external pollution, decrease in biodiversity caused by habitat destruction. Secondly, personality issues, including the differences in the characteristics and management levels of mangroves. Considering the health problems mentioned above, suggestions are proposed: effectively monitor and promote ecological restoration based on natural laws to alleviate ecological imbalance, take source control as the foundation and improve environmental quality as a whole, focus on the protection of biodiversity and improve the stability of mangrove ecosystem, in accordance with local conditions and give full play to the economic, social and ecological benefits of urban mangrove.

Key words: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; urban mangrove; ecosystem health assessment; health problem; management strategies

收稿日期: 2021-09-30

基金项目: 广东省海洋经济发展专项资金资助项目([2020]059);深圳市自然科学基金资助项目(JCYJ20200109140605948)

* 责任作者, 研究员, lirui.li@pkusz.edu.cn

红树林是分布在热带和亚热带海岸滩涂潮间带的常绿灌木本群落,具有防风消浪、净化海水、维持生物多样性、储碳以调节气候等功能^[1-3].据统计,全球红树林面积正以年均 0.76%的速度减少,红树林生态系统成为全球最受威胁、消失最快的生态系统之一^[3-4].中国红树林也一度因为剧烈的人类活动而急剧衰退,本世纪初我国政府开始意识到红树林资源保护的重要性,在一系列的政策引导下我国红树林面积得到了一定的恢复^[5].但当前我国正处于城市化快速推进阶段,红树林资源的保护与恢复很大程度上受到城市化的影响^[6-8],人类活动如砍伐、土地不合理利用、污水排放及化学品污染^[9-10]等均威胁着红树林生态系统健康.

生态系统健康指生态系统在外界压力的干扰下,能表现出强烈的抗干扰和自我恢复能力,以维持生态系统结构与功能的正常发挥^[11].PSR 模型旨在综合经济、社会、生态等方面的要素,解析自然、人类活动所施加的压力对生态系统状态的影响,以及政府、管理部门应对生态系统变化的行为响应,是目前资源环境领域应用最广、适用性最强的评价模型之一^[12-13].王树功^[14]、乐通潮^[15]、胡涛^[16]、雷金睿^[17]和 Wang^[18]等已运用 PSR 模型和层次分析法等建立了红树林生态系统健康评价指标体系,对淇澳岛、漳江口、福田、东寨港和湛江等地红树林进行了生态系统健康评价.但这些红树林生态系统健康评价指标体系多关注生态系统结构、物理化学因素的影响,尚未将多维度的城市化影响因素考虑在内.

粤港澳大湾区是世界四大湾区(另有纽约湾区、旧金山湾区和东京湾区)中面积最广、人口最多的湾区,快速城市化进程与生态保护之间的矛盾愈发剧烈^[19-20].鉴于此,本研究充分考虑了粤港澳大湾区快速城市化过程对红树林生态系统的影响,构建了经济-社会-生态复合影响的大湾区红树林生态系统健康评价指标体系,对城市红树林生态系统健康现状进行评估,识别存在的健康问题并提出相应的管理对策.相关研究结果可为城市红树林可持续发展及保育管理工作提供科学依据;随城市化和人类活动加剧,也对其他红树林分布区未来将面临和解决的城市化问题等提供先验指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取了粤港澳大湾区深受城市化影响的典型红树林湿地——香港米埔、深圳福田、广州南沙和珠海淇澳岛红树林作为研究对象(表 1).其中,香港米埔红树林位于深圳湾东南部,于 1995 年被列为拉姆萨尔国际重要湿地,为许多珍稀鸟类如黑脸琵鹭、红隼和白鹳等提供觅食和栖息地^[21];深圳福田红树林位于深圳湾东北岸,地处城市腹地,是我国面积最小的国家级自然保护区^[21];广州南沙红树林主要分布于万顷沙镇和南沙街道^[22],其中唯一天然成片分布的红树林位于坦头村,现存面积约 3hm²^[23];珠海淇澳岛红树林位于淇澳岛西北部,是我国最早实现人工造林恢复且连片面积最大的红树林^[24].

表 1 四地城市红树林基本情况
Table 1 Introduction of four urban mangroves

名称	城市	经纬度	红树林面积(hm ²)	最大潮位(cm)	优势树种	保护区级别
米埔红树林	香港	113°59'~114°03' E, 22°29'~22°31' N	536 ^[25]	237	秋茄、白骨壤、桐花树 ^[21]	国际级
福田红树林	深圳	113°58'~114°05' E, 22°30'~22°34' N	140 ^[25]	237	秋茄、白骨壤、桐花树 ^[21]	国家级
南沙红树林	广州	113°28'~113°39' E, 22°36'~22°50' N	83 ^[22]	234	无瓣海桑、桐花树、秋茄 ^[22]	无
淇澳岛红树林	珠海	113°36'~113°39' E, 22°23'~22°27' N	700 ^[26]	248	无瓣海桑 ^[27]	省级

注:最大潮位数据来源于全球潮汐预报服务平台.

1.2 研究方法

1.2.1 指标体系构建 城市红树林生态系统属于经济-社会-生态复合系统.为了更科学、全面地评价

城市化影响下红树林生态系统健康状况,本研究基于 PSR 模型和层次分析法构建城市红树林生态系统健康评价指标体系.

(1)指标筛选原则

遵循以下原则选取指标:①代表性:考虑城市化影响下,红树林受到的自然、人为干扰,从而提取共性指标,并确保指标能敏感反映红树林生态系统健康状况;②系统性:所选取的指标具有科学依据,概念标准、明确,尽量多方位地反映城市红树林的生态系统特征^[28];③可操作性:确保指标的实用性和可获得性,且方便统计比较.

(2)指标权重计算与检验

依据层次分析法,邀请 18 位红树林领域的专家对同一层次指标进行两两比较,按照 1~9 比例标度法(表 2)进行重要性评估,构造判断矩阵,以确定各项指标权重^[15].

$$CR=\frac{CI}{RI}$$
(1)

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$$
(2)

$$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^n\frac{(BW)_i}{nW_i}$$
(3)

式中:CR 为随机一致性比率,CR<0.1 时通过一致性检验;CI、RI 分别为一致性指标和随机一致性指标; $\lambda_{\max}$ 为矩阵最大特征向量; n 为判断矩阵阶数; B 为判断矩阵; W 为权重.本研究中 CR 值范围介于 [0,0.1),判断矩阵均通过一致性检验.

1.2.2 评价方法与评价标准 通过计算生态系统健康指数(EHI)量化评估城市红树林生态系统健康

现况,计算公式如下:

$$EHI=\sum_{i=1}^nS_i\times W_i$$
(4)

式中: S_i 为各指标数据的赋值分数; W_i 为各指标归一化权重; n 为指标个数.

表 2 1~9 比例标度法
Table 2 1~9proportion criteria

重要性赋值	重要性定义
$a_{ij}=1$	第 i 指标与第 j 指标同等重要
$a_{ij}=3$	第 i 指标比第 j 指标稍微重要
$a_{ij}=5$	第 i 指标比第 j 指标明显重要
$a_{ij}=7$	第 i 指标比第 j 指标强烈重要
$a_{ij}=9$	第 i 指标比第 j 指标极端重要
$a_{ij}=2、4、6、8$	介于以上二者间的过渡态

红树林生态系统压力(PHI)、状态(SHI)和响应指数(RHI)分别用以下公式计算:

$$PHI=(\sum_{i=1}^nS_i\times W_i)/W_p$$
(5)

$$SHI=(\sum_{i=1}^nS_i\times W_i)/W_s$$
(6)

$$RHI=(\sum_{i=1}^nS_i\times W_i)/W_r$$
(7)

式中: W_p 、 W_s 和 W_r 分别是压力、状态和响应指标的权重.

本研究基于生态系统健康定义并结合城市红树林生态系统健康现状,将城市红树林生态系统健康评价等级划为五个等级(表 3).

表 3 城市红树林生态系统健康评价等级
Table 3 The grade of ecosystem health assessment in urban mangroves

分值	健康等级	健康状况
(4,5]	极健康	红树林生态系统处于极健康状态,受干扰及环境污染少,林内物种很丰富,生态服务功能很高,并得到全面有效的管理,生态系统结构稳定,活力极强
(3,4]	健康	红树林生态系统处于健康状态,受干扰及环境污染较少,林内物种丰富,生态服务功能高,并得到较全面有效的管理,生态系统结构尚为稳定,活力较强
(2,3]	亚健康	红树林生态系统处于亚健康状态,已受到一定程度的干扰及环境污染,林内物种多样性、生态服务功能受到影响,管理水平有待提高,生态系统结构稳定性不足,活力退化
(1,2]	不健康	红树林生态系统处于不健康状态,受干扰及环境污染等外界压力强烈,林内物种多样性、生态服务功能下降,管理水平亟需提高,生态系统结构破碎化,生态功能未能正常发挥
(0,1]	病态	红树林生态系统处于病态,受干扰及环境污染等外界压力巨大,林内物种多样性、生态服务功能显著下降,管理水平明显不足,生态系统结构严重破坏,生态功能严重退化

2 结果与讨论

2.1 城市红树林生态系统健康评价指标体系

基于红树林湿地的自然属性,并考虑粤港澳大

湾区高度城市化水平对红树林生态系统的影响,构建了城市红树林生态系统健康评价指标体系(表 4).指标体系涵盖了 4 个层次:目标层、标准层、要素层和指标层.从压力、状态和响应三个标准层出发,压

力层具体化为要素层中的自然因素干扰 A1 和人为因素干扰 A2;状态层具体化为要素层中的生境污染指标 A3 和生态指标 A4;响应层具体化为要素层中的生态服务功能 A5 和保护区管理水平 A6.进一步地,对要素层进行细化,共筛选出 24 个评价指标.与其他同类研究^[14-16,29]所构建的指标体系不同,本研究所构建的指标体系侧重于反映城市化指标(B3~B8, B9~B12)的影响.城市红树林生态系统健康评价指标体系的指标赋值依据和赋值结果见表 5 和表 6 所示.

表 4 城市红树林生态系统健康评价指标体系与权重
Table 4 Index system and weight of ecosystem health assessment in urban mangroves

目标层	标准层	要素层	指标层	归一化权重
粤港澳大湾区 城市红树林 生态系统 健康评价	压力(1/3)	自然因素干扰 A1 (0.5)	病虫害危害程度 B1(0.5)	0.0825
			生物入侵程度 B2(0.5)	0.0825
			人口密度 B3(0.1149)	0.0190
			地区生产总值 B4(0.1226)	0.0202
		人为因素干扰 A2 (0.5)	第三产业总值比重 B5(0.0996)	0.0164
			城镇生活污水排放量 B6(0.1762)	0.0291
			工业废水排放量 B7(0.3218)	0.0531
			土地利用强度 B8(0.1648)	0.0272
	状态(1/3)	生境污染指标 A3 (0.75)	水体富营养化程度 B9(0.25)	0.0625
			水体重金属污染程度 B10(0.25)	0.0625
			沉积物重金属污染程度 B11(0.25)	0.0625
			沉积物有机污染程度 B12(0.25)	0.0625
		生态指标 A4 (0.25)	红树林面积年变化率 B13(0.25)	0.0206
			红树植物生物多样性 B14(0.25)	0.0206
			大型底栖动物生物多样性 B15(0.25)	0.0206
			鸟类生物多样性 B16(0.25)	0.0206
	响应(1/3)	生态服务功能 A5 (0.8333)	防风消浪护堤能力 B17(0.2744)	0.0755
			净化污染物能力 B18(0.4573)	0.1258
			科研教育价值 B19(0.1463)	0.0402
			休憩旅游价值 B20(0.1220)	0.0335
		保护区管理水平 A6 (0.1667)	保护区等级 B21(0.25)	0.0138
			现行政法规及其执行力度 B22(0.25)	0.0138
			社区参与度 B23(0.25)	0.0138
			有效财政支出 B24(0.25)	0.0138

注:城市红树林生态系统健康评价指标权重根据专家评估确定;回收有效问卷18份.

表 5 城市红树林生态系统健康评价指标赋值依据
Table 5 Assignment basis of ecosystem health assessment indicators in urban mangroves

目标层	标准层	要素层	指标层	赋值依据
粤港澳大湾区 城市红树林 生态系统 健康评价	压力	自然因素 干扰 A1	病虫害危害程度 B1	根据是否存在病虫害问题、是否显著危害红树健康、是否采取有效管控措施方面判断.不存在病虫害问题,赋值 5;是/无显著危害/是,赋值 4;是/无显著危害/否,赋值 3;是/显著危害/是,赋值 2;是/显著危害/否,赋值 1
			生物入侵程度 B2	根据是否存在生物入侵问题、是否显著危害红树健康、是否采取有效管控措施方面判断.不存在生物入侵问题,赋值 5;是/无显著危害/是,赋值 4;是/无显著危害/否,赋值 3;是/显著危害/是,赋值 2;是/显著危害/否,赋值 1
		人为因素 干扰 A2	人口密度 B3	人口密度范围为[0,1000),赋值 5;[1000,2000),赋值 4;[2000,3000),赋值 3; [3000,4000),赋值 2;[4000,+∞),赋值 1.单位:人/km ²
			地区生产总值 B4	地区生产总值范围为[0,5000),赋值 5;[5000, 10000),赋值 4;[10000,15000),赋值 3; [15000,20000),赋值 2;[20000,+∞),赋值 1.单位:亿元
	响应	生态服务功能 A5	第三产业总值比重 B5	第三产业总值比重范围为[0,50%),赋值 5;[50%,60%),赋值 4;[60%,70%),赋值 3; [70%,80%),赋值 2;[80%,100%),赋值 1
			城镇生活污水排放量 B6	城镇生活污水排放量范围为[0,20000],赋值 5;[20000, 60000],赋值 4;[60000, 100000],赋值 3;[100000, 140000],赋值 2;[140000,+∞),赋值 1.单位:万 t

续表 5

目标层	标准层	要素层	指标层	赋值依据
状态	A3	生境污染指标	工业废水排放量 B7	工业废水排放量范围为[0,8000],赋值 5;[8000,16000],赋值 4;[16000,24000],赋值 3;[24000,32000],赋值 2;[32000,+∞),赋值 1.单位:万吨
			土地利用强度 B8	由红树林与城市中心区距离确定.[45km,+∞),赋值 5;[30km,45km),赋值 4;[15km,30km),赋值 3;[5km,15km),赋值 2;[0,5km),赋值 1
			水体富营养化程度 B9	根据富营养化指数 $E^{①}$ 判断.[0,1],无富营养化,赋值 5;[1,3],轻度,赋值 3;(3,9),中度,赋值 2;(9,+∞),重度,赋值 1
			水体重金属污染程度 B10	根据潜在生态危害指数 $RI^{②}$ (Hakanson 指数法)判断重金属综合污染程度 ^[30] .(0,150),轻微生态风险,赋值 4;[150,300],中等,赋值 3;[300,600],高,赋值 2;[600,+∞),很高,赋值 1
			沉积物重金属污染程度 B11	由生态风险系数 $EI^{③}$ (Hakanson 指数法)判断 ^[31] .经过文献调研,城市红树林沉积物重金属以 Cd 的生态风险最高,因此以 Cd 的 EI 作为衡量标准.[0,40],轻微生态风险,赋值 4;(40,80),中等,赋值 3;(80,160),高,赋值 2;(160,+∞),很高,赋值 1
			沉积物有机污染程度 B12	由生态风险指数 $RQ^{④}$ 判断 ^[32] .城市红树林沉积物中含有高水平的多溴联苯醚(PBDEs),以占比最高的同系物 BDE-209 的 RQ 作为衡量标准.[0.01,0.1],轻微生态风险,赋值 4;[0.1,1),中等,赋值 3;[1,+∞),高,赋值 1
		生态指标	红树林面积年变化率 B13	由红树林面积的年均变化率表示 ^⑤ .[10%,+∞),赋值 5;[5%,10%],赋值 4;[0%,5%],赋值 3;[-5%,0%),赋值 2;[-10%,-5%),赋值 1
			红树植物生物多样性 B14	我国红树植物多样性指数 $H_1^{⑥}$ 范围为 0.20~2.74 ^[33-36] ,以此划分等级.[2.4,+∞),赋值 5;[1.8,2.4],赋值 4;[1.2,1.8),赋值 3;[0.6,1.2),赋值 2;[0,0.6),赋值 1
			大型底栖动物生物多样性 B15	我国红树林大型底栖动物生物多样性指数 $H_2^{⑥}$ 范围为 0.62~3.41 ^[37-41] ,以此划分等级.[3,3.5],赋值 5;[2.5,3),赋值 4;[2,2.5),赋值 3;[1.5,2),赋值 2;[0,1.5),赋值 1
			鸟类生物多样性 B16	我国红树林鸟类生物多样性指数 $H_3^{⑥}$ 介于 1.61~3.75 ^[42] 之间,以此划分等级.[3.5,4),赋值 5;[3,3.5),赋值 4;[2.5,3),赋值 3;[2,2.5),赋值 2;[1.5,2),赋值 1
		生态服务功能	防风消浪护堤能力 B17	公式: $V_1 = P \times A$.其中为红树林湿地防风消浪护堤价值(元/a); P 为单位面积红树林湿地的防风消浪护堤价值[元/ $hm^2 \cdot a$],基于 Costanza ^[43] 的研究结果,红树林防风消浪护堤价值为 1839 美元/($hm^2 \cdot a$),即人民币 12045 元/($hm^2 \cdot a$)(人民币汇率按 6.55 计算); A 为红树林湿地面积.[1000,+∞),赋值 5;[600,1000),赋值 4;[300,600),赋值 3;[100,300),赋值 2;(0,100),赋值 1.单位:万元
			净化污染物能力 B18	经过专家评估,红树林降解 SO_2 的价值占总污染物降解价值的 60%,红树林对 SO_2 的吸收值为 150kg/($hm^2 \cdot a$),净化 1t SO_2 的投资成本为 600 元 ^[44] .公式: $V_2 = (A \times 0.15 \times 600)/60\%$,为红树林湿地净化污染物价值(元/a); A 为红树林湿地面积.[15,+∞),赋值 5;[10,15),赋值 4;[5,10),赋值 3;[1,5),赋值 2;(0,1),赋值 1.单位:万元
			科研教育价值 B19	公式: $V_3 = E \times A$.其中为红树林湿地科研教育价值(元/a); E 为单位面积红树林湿地的科研教育价值[元/ $hm^2 \cdot a$],取值为我国与国际湿地的单位面积科研教育价值的平均值 3076 元/ $hm^2 \cdot a$; A 为红树林湿地面积 ^[45] .[300,+∞),赋值 5;[150,300),赋值 4;[50,150),赋值 3;[20,50),赋值 2;(0,20),赋值 1.单位:万元
			休憩旅游价值 B20	公式: $V_4 = T \times A$.其中为红树林湿地休憩旅游价值(元/a); T 为单位面积红树林湿地的休憩旅游价值[元/ $hm^2 \cdot a$],取值为红树林所在城市的单位面积旅游收入的 10%; A 为红树林湿地面积 ^[45] .[6000,+∞),赋值 5;[3000,6000),赋值 4;[1000,3000),赋值 3;[500,1000),赋值 2;(0,500),赋值 1.单位:万元
			保护区等级 B21	国际重要湿地,赋值 5;国家级自然保护区,赋值 4;省级自然保护区,赋值 3;市、县级自然保护区,赋值 2;未建立保护区,赋值 1
响应	A6	保护区管理水平	现行政策法规及其执行力度 B22	已颁布红树林湿地相关管理规定且执行力度较强,赋值为 5;已颁布红树林湿地相关管理规定但执行力度较弱,赋值为 3;未颁布红树林湿地相关管理规定,赋值为 1
			社区参与度 B23	有举办志愿者环保活动且与科研高校合作,赋值 5;有举办志愿者环保活动或与科研高校合作,赋值 3;未举办志愿者环保活动且与科研高校无合作,赋值 1
			有效财政支出 B24	由红树林湿地所在市政府相关财政支出决定.[30,+∞),赋值 5;[20,30),赋值 4;[10,20),赋值 3;[5,10),赋值 2;(0,5),赋值 1.单位:亿元

注:① $E = (\text{COD} \times \text{DIN} \times \text{DIP} \times 10^3) / 4500$,其中COD指化学需氧量,DIN为溶解性无机氮,DIP为溶解性无机磷,单位mg/L;② $RI = \sum_{i=1}^n T_i \times C_{\text{real}}^i / C_n^i$,其中 T_i^i 为毒性系数, i 为某一重金属元素, C_{real}^i 为重金属的实测浓度, C_n^i 为该重金属的评价标准(本研究采用国家海水二类标准);③ $EI = T_i \times C_{\text{real}} / C_n$,其中为Cd的毒性系数,为红树林沉积物中Cd的实测含量,为未受污染的广东省土壤Cd背景值;④ $RQ = C_i / C_e$,其中为红树林沉积物中BDE-209质量分数(折算为1%有机碳),为加拿大联邦沉积物质量标准值,BDE-209标准值为19ng/g;⑤采用2000~2018年米埔、福田、淇澳岛红树林及2008~2014年南沙红树林面积的年均变化率;⑥红树植物、大型底栖动物及鸟类生物多样性通过计算Shannon-Wiener多样性指数判断,计算公式 $H = -\sum_{i=1}^S P_i (\ln P_i)$,其中 P_i 为第 i 个物种占总数的比例, S 为物种总数.

表 6 城市红树林生态系统健康评价指标赋值结果

Table 6 Assignment results of ecosystem health assessment indicators in urban mangroves

评价指标	香港 米埔	深圳 福田	广州 南沙	珠海 淇澳岛	数据来源
病虫害发生面积占比 B1	3	2	5	5	文献调研 ^[46-47] 文献调研 ^[48] 、专家评估
生物入侵程度 B2	2	2	2	2	文献调研 ^[22,24,49]
人口密度 B3	1	1	3	4	文献调研 ^[50]
地区生产总值 B4	1	1	1	5	同上
第三产业总值比重 B5	1	3	2	4	同上
城镇生活污水排放量 B6	3	2	1	4	文献调研 ^[51-54]
工业废水排放量 B7	5	1	4	5	同上
土地利用强度 B8	3	1	5	2	地图测距
水体富营养化程度 B9	1	1	1	1	文献调研 ^[47,55-56]
水体重金属污染程度 B10	3	2	4	1	文献调研 ^[57-58]
沉积物重金属污染程度 B11	3	3	1	1	文献调研 ^[31,57]
沉积物有机污染程度 B12	3	3	1	3	文献调研 ^[32,59-61]
红树林面积年变化率 B13	3	4	5	5	文献调研 ^[25,62]
红树植物生物多样性 B14	2	2	5	2	文献调研 ^[63] 文献调研 ^[21,27,64]
大型底栖动物生物多样性 B15	2	2	1	2	文献调研 ^[65-68]
鸟类生物多样性 B16	5	4	5	4	文献调研 ^[42,69-70]
防风消浪护堤能力 B17	4	2	2	4	同 B13
净化污染物能力 B18	3	2	2	3	同 B13
科研教育价值 B19	4	2	2	4	同 B13
休憩旅游价值 B20	5	1	1	3	同 B13 文献调研 ^[50]
保护区等级 B21	5	4	1	3	文献调研 ^[25]
现行政策法规及其执行力度 B22	5	5	3	5	文献调研 ^[16,22,48,71-75]
社区参与度 B23	5	5	5	5	文献调研 ^[76-78]
有效财政支出 B24	3	4	5	2	文献调研 ^[50,79]

注:由于各红树林分布区的水文条件、地理环境各不相同,城镇生活污水排放量B6及工业废水排放量B7均基于红树林所在城市的全域数据。

2.2 粤港澳大湾区城市红树林生态系统健康现状

粤港澳大湾区四地城市红树林生态系统健康指数(EHI)的排序为淇澳岛(3.05)>米埔(3.03)>南沙(2.54)>福田(2.13),淇澳岛和米埔红树林生态系统现状为健康,南沙和福田红树林生态系统现状为亚健康(表 7)。其中,福田红树林受到的外界压力最严重,淇澳岛红树林生态系统状态为不健康,其余三地红树林生态系统状态为亚健康,南沙红树林响应指数最低(表 7)。具体如下:

2.2.1 香港米埔红树林 米埔红树林生态系统健康指数为 3.03,处于健康状态(表 3),总体表明其受干扰及环境污染较少,林内物种丰富,生态服务价值高,并得到较全面有效的管理,生态系统结构尚为稳定,活力较强。其中,压力、状态和响应指数分别为 2.71(亚健康)、2.62(亚健康)和 3.77(健康),说明该红树林生态系统受到了一定的外界压力,主要压力源为生物入侵程度(B2)、人口密度(B3)、地区生产总

值(B4)和第三产业总值比重(B5);水体富营养化程度(B9)、红树植物生物多样性(B14)和大型底栖动物生物多样性(B15)为低赋值状态指标;响应指数健康。

薇甘菊是米埔红树林的主要外来入侵植物,威胁着本土红树植物的生存,目前以人工清除为主^[80]。米埔红树林北部毗邻深圳河,南部毗邻香港内陆的元朗河,两条河流均携带大量生活污水汇入深圳湾^[81],导致该区近岸海域氮磷营养盐严重超标,达不到海洋功能区划要求的海水水质标准^[55]。米埔红树林的红树植物和大型底栖动物生物多样性较低。米埔红树林的响应指数最高,主要得益于以下三个方面:①米埔红树林的保护工作开展时间早。香港政府于 1950 年将米埔红树林划为发展“限制地区”^[82],很大程度上减少了人类活动对保护区自然生态的干扰,极大地保留了生境原有的生态特征,使米埔红树林生态环境处于自然更新的状态^[21]。②米埔红树林的保护管理工作与国际接轨,管理体系完

善.米埔湿地是拉姆萨尔国际重要湿地,自 1984 年起交由香港渔农署和世界自然基金会共同管理,相较于其它三地红树林,米埔红树林已形成一套科学完善的管理体系^[83].③米埔红树林始终秉承着“适度开发,保护为主”的管理理念.目前米埔仍保有较大面积的红树林,自然资源丰富,在保护红树林资源的基础上重点开展科考教育活动,适当发展生态旅游^[82],生态服务功能良好.当地政府和民众有很高的环境保护意识,人为响应积极.总之,米埔红树林整体处于健康状态,保护区生态发展模式值得我国其它红树林保护区借鉴;但由于长期受深圳湾污染的影响,仍存在健康隐患.

表 7 四地城市红树林生态系统健康评价结果
Table 7 Results of ecosystem health assessment in four urban mangroves

研究对象	压力指数	状态指数	响应指数	生态系统健康指数
香港米埔红树林	2.71	2.62	3.77	3.03
深圳福田红树林	1.67	2.43	2.29	2.13
广州南沙红树林	3.20	2.30	2.13	2.54
珠海淇澳岛红树林	3.77	1.93	3.44	3.05

2.2.2 深圳福田红树林 福田红树林生态系统健康指数为 2.13,处于亚健康状态(表 3),表明已受到一定程度的干扰及环境污染,林内物种多样性、生态服务价值受到影响,管理水平有待提高,生态系统结构较不稳定,活力退化.其中,压力、状态和响应指数分别为 1.67(不健康)、2.43(亚健康)和 2.29(亚健康),指标体系中所有压力层指标均不乐观,表征其受到的外界压力强烈;低赋值状态指标为水体富营养化程度(B9)、水体重金属污染程度(B10)、红树植物生物多样性(B14)和大型底栖动物生物多样性(B15);响应指数方面由于红树林面积小导致生态服务功能偏低,但是保护区管理水平高.

福田红树林是我国唯一位于城市中心区的国家级自然保护区,与市中心的距离仅 2.2km,长期以来承受着城市化和人类活动的负面影响^[84],由此引发一系列的生态问题:福田红树林每年均受到八点广翅蜡蝉、海榄雌瘤斑螟等多种病虫害,受害红树范围广且危害严重^[85-86].自 1998 年深圳填海工程启动后,环境变迁使薇甘菊成为福田红树林内危害最严重的入侵生物之一^[49],另外五爪金龙、白花鬼针草等

也是主要入侵生物^[86].保护区外围为滨海大道,在红树林段平均每天有 10 万余车辆来往行驶,机动车尾气污染及噪声污染势必影响红树林环境质量^[87].深圳作为经济特区,城市的快速扩张吸引大量的人口和企业涌入,深圳河、凤塘河及新洲河等深圳内陆河集纳了大量的生活污水和工业废水汇入深圳湾^[86,88].因此,福田红树林的城镇生活污水排放量(B6)和工业废水排放量(B7)赋值均偏低,尤其是后者为四地红树林中的最低值.深圳湾近岸海域长期处于富营养化状态,福田红树林水体营养盐含量在大部分季节和区域均为劣 V 类^[89].保护区内海水普遍受到重金属/类金属污染,其中以 Hg、As 和 Cd 的生态风险最高,主要来自保护区附近的汽车维修厂、电子产品加工厂及合金制造厂等^[30].与米埔类似,福田红树林的红树植物和大型底栖动物生物多样性偏低.福田红树林保护区管理局有明确的职能配置,设置了科研、保护区和公园等多个科室,管理机构较为全面,各项法规的执法力度也行之有效^[16].为了更好地维护保护区的生境健康,福田红树林与米埔红树林一样采取封闭管理模式,但与后者相比,福田红树林自然保护区对市民的开放程度不够,游览活动也主要以观鸟为主,游览项目单一,教育和宣传工作尚有不足^[48].福田红树林应借鉴米埔红树林的发展模式,加强教育宣传和生态旅游开发力度.总之,虽然福田红树林的人为响应积极,但由于环境压力过大,状态不容乐观,其生态系统健康现状评分最低.

2.2.3 广州南沙红树林 南沙红树林生态系统的健康指数为 2.54,处于亚健康状态(表 3),说明其已受到一定程度的干扰及环境污染,林内物种多样性、生态服务价值受到影响,管理水平有待提高,生态系统结构较不稳定,活力退化.其中,压力、状态和响应指数分别为 3.20(健康)、2.30(亚健康)和 2.13(亚健康),主要压力源为生物入侵程度(B2)、地区生产总值(B4)、第三产业总值比重(B5)和城镇生活污水排放量(B6);低赋值状态指标包括水体富营养化程度(B9)、沉积物重金属污染程度(B11)、沉积物有机污染程度(B12)和大型底栖动物生物多样性(B15);响应指数在四地红树林中最低.

南沙红树林的主要分布区域如南沙湿地公园、大角山海滨公园及坦头村等局部地段薇甘菊入侵严重^[22].广州市作为广东省省会,经济发达且人口规

模大,《广州市生态环境统计公报(2019年)》显示广州市城镇生活污水排放量高达14.9亿t,为四地红树林中最高。根据《2018年广州市海洋公报》,南沙红树林附近海域呈重度富营养化状态,并且自2018年以来南沙区蕉门水道出现持续的总磷超标^[90]。南沙区作为广州市“南拓”开发区,引入了大量重点工程的建设,例如南沙港区中部和北部修建的龙穴造船厂以及南部沿岸建立的深水码头等^[91],又因为其靠近狮子洋还可能受到东莞市工业废水排放的影响^[31],使南沙红树林沉积物中有毒金属含量普遍偏高,其中以Cd的生态风险最大^[92]。珠江三角洲是重要的电子产品、纺织品及建筑材料生产地,其中位于广州北部的清远市是大湾区著名的电子垃圾回收基地^[93],大气、水体中携带的PBDEs在红树林中沉降下来^[94-95],因此南沙红树林沉积物有机污染风险在四地红树林中最高。南沙红树林的大型底栖动物生物多样性为四地红树林中最低。目前南沙红树林面积仅存83hm²^[22],能提供的生态服务功能有限。南沙红树林多呈零散分布,缺乏统一化管理,加之堤防工程、港口码头建设和大量采沙等不合理开发活动,红树林面积缩减,南沙红树林生境趋于恶化^[96]。总之,南沙红树林的生境污染严重,加之保护管理工作尚未引起当地政府和民众的足够重视,其生态系统健康状况堪忧。

2.2.4 珠海淇澳岛红树林 淇澳岛红树林生态系统的健康指数为3.05,处于健康状态(表3),表征其受干扰及环境污染较少,林内物种较丰富,生态服务价值较高,并得到较全面有效的管理,生态系统结构尚为稳定,活力较强。其中,压力、状态和响应指数分别为3.77(健康)、1.93(不健康)和3.44(健康),体现外界压力的主要指标为生物入侵程度(B2);水体富营养化程度(B9)、水体重金属污染程度(B10)、沉积物重金属污染程度(B11)、红树植物生物多样性(B14)和大型底栖动物生物多样性(B15)是低赋值的状态指标;响应指数健康。

与福田红树林不同,淇澳岛红树林地处海岛而远离市中心,因此受外界压力相对较小,这与Wang等^[18]研究结果一致。互花米草是淇澳岛红树林内威胁最大的入侵物种,曾一度占据了红树林外围的大片滩涂,使红树林难以向外扩散,甚至退化^[24]。《2016年珠海市海洋公报》中显示淇澳岛附近海域呈重度

富营养化状态。淇澳岛红树林受到岛上处理的或未经处理的生活污水排放影响^[97],加之对岸珠海市区生活污水的排放,海水营养盐含量很高。淇澳岛红树林位于珠江口西部,由于地转偏向力的作用,珠江径流入海后会向西边运输,因此珠江上游携带的陆源污染物在流经淇澳岛红树林后被截留^[31,58],导致淇澳岛红树林生境重金属污染严重。淇澳岛红树林同样存在红树植物和大型底栖动物生物多样性偏低的情况。淇澳岛红树林的管理体系较为健全,且在保护红树林的举措方面有突出的成效:①成功控制互花米草入侵。早期互花米草大肆入侵时,Chen等^[98]根据互花米草的喜阳特性,主张引种生长迅速且冠层浓密的海桑(在2008年冻害后大量死亡)和无瓣海桑,成功遏制了互花米草的蔓延,使淇澳岛红树林面积从1999年仅存的32.2hm²恢复至如今的700hm²^[26]。②林分结构优化。在淇澳岛红树林开展的无瓣海桑与乡土红树大面积种植实验^[99]表明,耐阴红树木榄与无瓣海桑混交有良好的成效,此举克服了无瓣海桑单一物种造林的不足。因此淇澳岛红树林在抑制互花米草入侵及人工造林方面的经验可供其它地区红树林学习参考。总之,当地对淇澳岛红树林的保护工作有不错的成效,但是由于其状态指数仍处于不健康状态,因此对红树林的保护工作不能懈怠,仍需提高保护和管理水平。

2.3 粤港澳大湾区城市红树林存在的健康问题

基于城市红树林生态系统健康评价结果,可以发现受到粤港澳大湾区高强度城市化和人类活动的影响,该区城市红树林面临着生态退化、环境污染等一系列问题,主要包括生态失衡导致的病虫害与生物入侵、受纳外源污染导致的环境污染、栖息地破坏导致的生物多样性下降共性问题及自身特征与管护水平差异导致的其它个性问题。

2.3.1 城市红树林生态失衡导致的病虫害与生物入侵问题 人类活动如城市扩张、海堤修建等阻断了陆海生态系统的连通性^[100],而陆鸟以食虫为主,阻断后导致此环节的生态功能失衡。同时,红树林生态系统在人类活动的干扰下抗入侵能力下降,在贸易全球化的背景下,更是加快了生物入侵的速度^[101-102]。全球红树林的虫害爆发问题在近20年才出现,指示红树林生境的恶化,导致林内植被趋于单一、天敌昆虫及陆鸟数量减少^[103]。其中福田红树林

的病虫害问题最为严重,一度影响红树植物白骨壤种群更新^[104]。四地城市红树林主要的生物入侵物种为薇甘菊和互花米草,其中薇甘菊入侵在米埔和福田红树林中最为严峻,其次是南沙红树林。薇甘菊为攀援藤本植物,能攀爬至本土红树植物上方,令其不能进行光合作用而枯萎;互花米草是淇澳岛红树林内危害最大的入侵物种,其生长速度快、侵占能力强,严重威胁本土红树植物的生存空间^[105]。

2.3.2 城市红树林受纳外源污染导致的环境污染问题 城市的大量人口聚集和临海产业布局势必增加海岸带生态系统的污染负荷,加之红树林沉积物富含有机碳且多为黏土质地,使其成为多种外源污染物的优先汇聚地^[32]。当前四地城市红树林均存在不同程度的复合污染问题:①四地城市红树林周边海域均为重度富营养化状态,归因于大量生活污水的排放。其中位于深圳湾两岸的米埔和福田红树林的海水富营养化程度更高,这是由于深圳湾的半封闭式结构使海湾内水体交换能力不足,污染物更容易聚集^[106]。②四地城市红树林的水体和沉积物重金属污染严重,多处于中等及以上生态风险。深圳市有着相对高的工业产业比重,深圳河流域内分布有密集的电子、通信和金属制造业^[107],河水携带大量重金属汇入深圳湾,造成福田和米埔红树林生境的重金属污染;南沙和淇澳岛红树林的重金属污染具有很高的生态风险,除了南沙红树林的海水重金属污染呈轻微生态风险,可能归因于珠江流速快,起到稀释污染物的作用^[106]。南沙红树林生境的重金属污染源于本地及外地(如东莞),而淇澳岛红树林生境的重金属污染主要源于珠江上游城市的外源输入。③受珠江三角洲蓬勃发展的建筑业和电子产业影响^[108],四地城市红树林的沉积物有机污染为中等生态风险及以上。城市红树林长期以来承受着重金属和有机污染物排放的负面影响,不仅削弱红树植物的光合作用、蒸腾作用等生理生化过程,还能在红树林食物网中富集从而放大“三致”效应^[109-110]。更重要的是,红树林可能由重金属和有机污染物的“汇”转变为“源”^[111]。

2.3.3 城市红树林栖息地破坏导致的生物多样性下降问题 人类活动如土地占用、污染排放导致的生物栖息地破坏及破碎化,是造成全球生物多样性下降的重要原因^[112-115]。粤港澳大湾区城市红树林

同样存在栖息地减少和破碎化问题^[7],面临着生物多样性下降的困境:①除南沙红树林,其它红树林的红树植物生物多样性偏低,说明红树林群落较为单一、结构脆弱,抵抗力稳定性和恢复力稳定性较差。南沙红树林的红树植物生物多样性很高,与东寨港^[35]相当,且显著高于同纬度地区的红树林。这得益于 1998 年以来南沙湿地公园大力引种木榄等红树植物,提高了当地红树植物生物多样性^[64]。②与城市化程度相对更低的海南^[39]、广西北部湾^[37,116]红树林相比,粤港澳大湾区城市红树林的大型底栖动物生物多样性均偏低,不仅与其红树植被类型简单有关,还指示生境污染问题^[117-118]。大量研究证明,四地城市红树林沉积物中普遍存在重金属^[57,119-120]、有机污染^[32,59-61,121-122]和微塑料污染^[123-124]等问题。③我国红树林湿地处于东亚-澳大利西亚候鸟迁飞路线上^[125],相对于东寨港^[126]、泉州湾河口^[127]和广西山口^[128]红树林,粤港澳大湾区城市红树林鸟类生物多样性处于较高水平,但福田红树林由于地处城市腹地,存在严重的噪声污染、高建筑物阻挡及生境污染等问题,鸟类生物多样性指数相对偏低为 3.02^[42]。整体上看,粤港澳大湾区城市红树林的红树植物和大型底栖动物生物多样性偏低,鸟类生物多样性尚能维持在较高水平,生态系统稳定性不足。若不采取相应对策提高红树植物和大型底栖动物生物多样性,未来鸟类生物多样性可能存在降低的风险。

2.3.4 城市红树林自身特征与管护水平差异导致的其它个性问题 福田和南沙红树林生态系统健康指数为亚健康。福田红树林位于城市腹地,加之面积过小,生境脆弱而对外界干扰的抵抗力差,使其成为四地城市红树林中受外界压力最大的城市红树林,由此引发了一系列生态健康问题。南沙红树林面积小且分布零散,与其它三地城市红树林相比,管理水平明显不足。对南沙区坦头红树林实地考察发现,该区域红树林没有专职人员管理,外来人员可以随意进出红树林。虽然广州市政府已颁布《广州市湿地保护规定》等相关政策指导红树林湿地的保护工作,但南沙红树林至今未建立自然保护区,且红树林周边居民多以务农为主,环保意识薄弱,捕鸟、采沙、砍伐红树等破坏生态的行为仍时有发生^[91],南沙红树林的管理保护与开发利用处于严重失衡状态。

2.4 粤港澳大湾区城市红树林健康提升对策

对红树林生态系统所受外界压力的控制及保护管理对策的有效性决定了红树林生态系统健康的未来走向.针对粤港澳大湾区城市红树林存在的健康问题,从监测评价、修复技术及政策法规方面出发,提出相应的管理对策.

2.4.1 以缓解生态失衡为目标,高效监测并推广基于自然法则的生态恢复 城市红树林的开发利用应始终将环境保护放在首位,使生态系统通过自我调节恢复至生态平衡状态,从根本上缓解病虫害和生物入侵问题,具体对策如下:

在监测评价方面:通过 3S 技术定期监测红树林病虫害的发生地点、面积及危害程度^[129],追溯外来物种的入侵轨迹并评估入侵风险,分析病虫害和外来入侵物种与环境因子之间的关系.利用遥感影像和环境数据建立相应的预测模型^[130],帮助保护区管理人员快速评价决策,及时采取有效的防治对策.

在修复技术方面:与传统海堤相比,生态海堤在发挥护岸作用的同时还具备保护海岸带生态系统结构与功能、提高陆海连通性的作用^[131].范航清等^[132]提出一种集物理防御、生态保护及文化功能为一体的生态海堤发展模式,在改善海岸带生态环境的同时产生经济效益.基于自然法则的生物防治方法,能最大限度地降低环境负担和生物耐药性.高效专一生物农药如苏云金杆菌对海榄雌瘤斑螟的防治率达到 90.6%,在病虫害防治工作中应用广泛^[133-134].利用天敌昆虫和鸟类的食物链作用也是重要的生物防治手段^[135],必要时辅以物理(诱捕灯)、化学(低污染药剂)防治方法.同时,选取高抗性红树植物品种混交,合理配置红树资源,提高红树林整体抵御病虫害的能力^[135].入侵生物防治可采取以生物防治为主的综合防治手段,如小面积的平坦区域可以采用人工去除手段,而大面积的严重入侵区域可以采用物化或生物去除手段,具体可根据入侵物种的光照偏好特性、生态位替代等原理实现入侵生物的有效控制^[136].

在政策法规方面:政府部门及保护区管理局应积极推行并及时更新病虫害和生物入侵防治政策,投入资金以引进先进设备,聘请专业人员指挥防治工作.同时加强林业工作的监管,完善外来入侵物种管理名录^[137],无论是个人还是企业均需严格按照我国林业制度规范进行登记和检疫,防患于未然.

2.4.2 以源头控制为根本,整体改善环境质量 城市红树林生态系统长期承受外源污染的输入,已超出红树林本身的自净能力^[138].为了整体改善环境(包括水体和沉积物)质量,关键在于从源头控制外源污染,具体对策如下:

在监测评价方面:建立海洋生态环境监测系统,通过海洋站、卫星遥感、监测船和浮标组成的多维监测网对海洋环境进行实时监测,针对特殊区域如滨海湿地(红树林)海域进行重点监测.构建海洋环境信息数据库,实现陆海监管部门数据共享^[139],开展全方位的监测评价工作,对污染物进行溯源.

在修复技术方面:目前粤港澳大湾区城市的污水管网缺口仍然较大,应大力提高管网铺设和污水处理厂建设工作^[140],加快推进雨污分流管网工程.大湾区污水排放量巨大,尽管处理尾水达标排放,仍超出红树林湿地的自净能力,因此要严格管控陆源城镇生活污染物及农业面源污染物的排放,落实垃圾分类、水厂污泥资源化和农作物科学施肥.根据海域划分标准和海岸带湿地纳污能力合理规划临海产业布局,高污产业所产生的污水需进行深度处理再排放,同时对偷排和超标排放行为实施生态补偿^[141],最终达到入海污染物总量的控制.海岸带沉积物修复以植物和微生物修复为主,辅以物理修复(覆盖)和环保疏浚等方法,使污染物达到降解、隔离和钝化的效果^[142].

在政策法规方面:目前我国针对海洋环境的整治已推出《海洋环境保护法》、《海洋自然保护区管理办法》等法律法规,可根据海洋环境监测数据及参考国外先进的海洋环境监测和管理办法进行补充与完善.建立跨行政区域的水环境责任体系,统筹大湾区多区域合作治理海洋环境污染^[100].

2.4.3 以保护生物多样性为重点,提高红树林生态系统稳定性 保护生物多样性对于生态系统功能的正常发挥及维持生态系统稳定性具有重要的作用^[114,143].考虑到城市红树林生态系统的相对脆弱性^[144],亟需采取相应措施保护红树林生物多样性,具体对策如下:

在监测评价方面:对于红树植物,可利用无人机高光谱遥感和机器学习算法对红树植物进行种类识别^[145],实现自动化监测;对于大型底栖动物和鸟类,传统方法如形态学鉴定和人工目测等存在效率

低、数据有限和准确性差的缺点.环境 DNA-宏条形码技术是目前监测水环境中大型底栖动物群落最有应用前景的方法,能实现大尺度下物种多样性的高效准确监测^[146].国内外基于“声音景观生态学”开展鸟类生物多样性监测的研究逐渐兴起^[147],增强回归树算法^[148]及基于对象的语谱图分割技术^[149]可实现鸟类声学数据统计建模,探究不同时空尺度的鸟类生物多样性模式.根据实时动态监测的结果,对红树林生物多样性进行同步的全要素综合评价,提取敏感指标,开发红树林生物多样性快速评估方法并实现预测预警功能.

在修复技术方面:在保护现有红树林资源的基础上,统筹人工造林工程,造林以乡土红树秋茄、白骨壤、木榄和桐花树等为主,谨慎引种外来物种;根据不同红树植物的耐盐性和耐淹性,合理分配宜林地;关注林分结构优化问题,避免大规模种植单一红树,对存活率低的地块进行及时补种,努力恢复红树植物生物多样性.目前已有研究表明,红树林大型底栖动物对红树凋落物的摄食具有选择性^[150-151],因此探索不同红树物种对大型底栖动物群落组成与结构的影响机制,筛选出大型底栖动物“偏好”摄取的红树物种,将有利于提高红树林大型底栖动物生物多样性及生物量.改善红树林生境质量,在红树林湿地外围建立乔灌木绿化带,与红树林内部相连形成鸟类生态廊道,同时起到降噪降污的效果.

在政策法规方面:作为世界上最重要的蓝碳生态系统之一,红树林生物多样性直接影响其碳汇能力^[2].许多国家如肯尼亚、越南和印度等正在积极推动蓝碳保护项目的开展,通过个人、非政府组织或公司自愿购买碳排放量和奖励红树种植等政策保护和恢复红树林湿地^[152].目前我国也成功推出了首个蓝碳保护项目“湛江红树林造林项目”,但我国蓝碳项目的开发仍处于起步阶段,政府部门应充分发挥其引导作用并鼓励社会资本投资,助力蓝碳市场的发展^[153].同时,地方政府需有针对性地制定省市级或红树林保护区政策法规,将生物多样性保护纳入发展规划,依法处置滥砍乱伐、养殖占用和建筑开发等违法行为.

2.4.4 因地制宜,充分发挥城市红树林经济-社会-生态效益 福田和南沙红树林的生态服务功能偏低,在提高红树林湿地面积上仍有很大潜力.滩涂造

林曾是湿地恢复的重要手段,但存在成本高、技术难度大和侵占水鸟觅食地等缺点^[154].据统计,1980 年以来广东省占用的红树林林地中有 98%以上用于挖塘养殖,遗留下许多废弃养殖塘^[155],因此退塘还林应是未来我国红树林生态恢复的主要手段^[154, 156].针对南沙红树林部分区域管理水平不足问题,建立自然保护区是行之有效的对策,同时严格落实管理部门责任,保障管护资金,严惩违法破坏红树林生境的行为.

城市红树林在科研教育和生态旅游方面可以借鉴米埔红树林的发展模式,同时结合自身发展定位,充分发挥生态效益.在科研教育方面,针对不同的受众群体制定相应的自然教育模块,通过邀请学生到访参观红树林、推行课题项目研究等途径提高学生的环保意识和参与度;通过将线上信息网站、微信公众号和线下教育宣讲活动、市民开放日相结合,向公众提供多元化的生态教育服务.在生态旅游方面,遵循适度开发的原则,因地制宜结合植物利用、生态养殖等产业,突出地方特色,推进红树林生态成果产业化^[83].

3 结论

3.1 构建了适用于城市红树林生态系统健康状况评估的指标体系和方法,从压力、状态和响应三个层次出发,涵盖自然因素干扰、人为因素干扰、生境污染指标、生态指标、生态服务功能和保护区管理水平 6 个要素层以及具体表征的 24 项指标,可有效反映经济-社会-生态的复合影响.

3.2 淇澳岛(EHI: 3.05)和米埔(EHI: 3.03)红树林生态系统处于健康状态,南沙(EHI: 2.54)和福田(EHI: 2.13)红树林生态系统处于亚健康状态.

3.3 压力指数方面,米埔和福田红树林为亚健康,自然压力源为病虫害和生物入侵,人为压力源为人口、经济相关指标和城镇生活污水排放,福田还存在工业废水排放压力.状态指数方面,城市红树林的海水富营养化严重,南沙和淇澳岛红树林还存在严重的有机和重金属污染问题;红树植物(除南沙红树林)和大型底栖动物生物多样性普遍偏低,但鸟类生物多样性较高.响应指数由红树林的生态服务功能和保护区管理水平共同决定,福田和南沙红树林由于面积小使生态服务功能偏低;南沙红树林的管理水

平不足。

3.4 粤港澳大湾区城市红树林存在生态失衡导致的病虫害与生物入侵、受纳外源污染导致的环境污染、栖息地破坏导致的生物多样性下降的共性问题及自身特征与管护水平差异导致的其它个性问题,建议:以缓解生态失衡为目标,高效监测并推广基于自然法则的生态恢复;以源头控制为根本,整体改善环境质量;以保护生物多样性为重点,提高红树林生态系统稳定性;因地制宜,充分发挥城市红树林经济-社会-生态效益。

参考文献:

- [1] Cannicci S, Lee S Y, Bravo H, et al. A functional analysis reveals extremely low redundancy in global mangrove invertebrate fauna [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021,118(32): e2016913118.
- [2] Rahman M M, Zimmer M, Ahmed I, et al. Co-benefits of protecting mangroves for biodiversity conservation and carbon storage [J]. *Nature Communications*, 2021,12(1):3875.
- [3] Siikamäki J, Sanchirico J N, Jardine S L. Global economic potential for reducing carbon dioxide emissions from mangrove loss [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012,109(36): 14369-14374.
- [4] Friess D A. Mangrove forests [J]. *Current Biology*, 2016,26(16): R746-R748.
- [5] 范航清,王文卿.中国红树林保育的若干重要问题 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2017,56(3):323-330.
Fan H Q, Wang W Q. Some Thematic issues for mangrove conservation in China [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2017,56(3):323-330.
- [6] Song K, Choi Y E, Han H J, et al. Adaptation and transformation planning for resilient social-ecological system in coastal wetland using spatial-temporal simulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,789:148007.
- [7] Wang Y Y, Chao B X, Dong P, et al. Simulating spatial change of mangrove habitat under the impact of coastal land use: Coupling MaxEnt and Dyna-CLUE models [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,788:147914.
- [8] Wu Y, Zhang W W, Yong F, et al. Waterbirds' coastal habitat in danger [J]. *Science*, 2020,369(6506):928-929.
- [9] Sippo J Z, Lovelock C E, Santos I R, et al. Mangrove mortality in a changing climate: An overview [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2018,215:241-249.
- [10] Bayen S. Occurrence, bioavailability and toxic effects of trace metals and organic contaminants in mangrove ecosystems: A review [J]. *Environment International*, 2012,48:84-101.
- [11] 刘焱序,彭建,汪安,等.生态系统健康研究进展 [J]. *生态学报*, 2015,35(18):5920-5930.
Liu Y X, Peng J, Wang A, et al. New research progress and trends in ecosystem health [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(18):5920-5930.
- [12] OECD. OECD core set of indicators for environmental performance reviews [J]. *Environment Monographs*, 1993,83:1.
- [13] 麦少芝,徐颂军,潘颖君.PSR模型在湿地生态系统健康评价中的应用 [J]. *热带地理*, 2005,4:317-321.
Mai S Z, Xu S J, Pan Y J. Application of the PSR model to the evaluation of wetland ecosystem health [J]. *Tropical Geography*, 2005, 4:317-321.
- [14] 王树功,郑耀辉,彭逸生,等.珠江口淇澳岛红树林湿地生态系统健康评价 [J]. *应用生态学报*, 2010,21(2):391-398.
Wang S G, Zheng Y H, Peng Y S, et al. Health assessment of Qi'ao Island mangrove wetland ecosystem in Pearl River Estuary [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010,21(2):391-398.
- [15] 乐通潮.漳江口红树林景观动态、结构特征与健康经营技术研究 [D]. 北京:中国林业科学研究院, 2014.
Le T C. Studies on landscape dynamic, structure feature and healthy management technology in Zhangjiangkou Mangrove forest [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [16] 胡涛.深圳湾红树林健康评价与结构调控后自然恢复状况的研究 [D]. 深圳:深圳大学, 2016.
Hu T. Study on mangrove health evaluation and natural restoration after structural regulation in Shenzhen Bay [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016.
- [17] 雷金睿,陈宗铸,陈毅青,等.海南省湿地生态系统健康评价体系构建与应用 [J]. *湿地科学*, 2020,18(5):555-563.
Lei J R, Chen Z Z, Chen Y Q, et al. Development and application of wetland ecosystem health evaluation system in Hainan province [J]. *Wetland Science*, 2020,18(5):555-563.
- [18] Wang Y T, Wang Y S, Wu M L, et al. Assessing ecological health of mangrove ecosystems along South China Coast by the pressure-state-response (PSR) model [J]. *Ecotoxicology*, 2021,30(4):622-631.
- [19] 于凌云,林绅辉,焦学尧,等.粤港澳大湾区红树林湿地面临的生态问题与保护对策 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019,55(4):782-790.
Yu L Y, Lin S H, Jiao X Y, et al. Ecological problems and protection countermeasures of mangrove wetland in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019,55(4):782-790.
- [20] 刘畅,林绅辉,焦学尧,等.粤港澳大湾区水环境状况分析及治理对策初探 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019,55(6):1085-1096.
Liu C, Lin S H, Jiao X Y, et al. Problems and treatment countermeasures of water environment in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019,55(6):1085-1096.
- [21] 李真,李瑜,咎启杰,等.深圳福田与香港米埔红树林群落分布与景观格局比较 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2017,56(5):12-19.
Li Z, Li Y, Zan Q J, et al. A comparison of mangrove community distribution and landscape pattern between Futian and Maipo Nature Reserve at Shenzhen Bay [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2017,56(5):12-19.
- [22] 李海生,吴灿雄,欧阳美霞,等.广州市南沙区红树林资源现状与保护 [J]. *湿地科学*, 2020,18(2):158-165.
Li H S, Wu C X, Ouyang M X, et al. The current status and conservation of mangrove resources in Nansha District of Guangzhou [J]. *Wetland Science*, 2020,18(2):158-165.
- [23] 李海生,曾婷,吴灿雄,等.广州南沙坦头村红树林资源现状与保护 [J]. *广东第二师范学院学报*, 2018,38(5):67-71.

- Li H S, Zeng T, Wu C X, et al. The current status and conservation of mangrove resources in Tantoucun, Nansha, Guangzhou [J]. Journal of Guangdong University of Education, 2018,38(5):67-71.
- [24] 彭辉武,郑松发,朱宏伟.珠海市淇澳岛红树林恢复的实践 [J]. 湿地科学, 2011,9(1):97-100.
- Peng H W, Zheng S F, Zhu H W. The Practice of Mangrove Restoration in Qi'ao Island, Zhuhai [J]. Wetland Science, 2011,9(1): 97-100.
- [25] 自然资源部国土卫星遥感应用中心《中国红树林资源遥感监测研究(1978-2018 年)》编写组.中国红树林资源遥感监测研究(1978-2018 年) [M]. 北京:地质出版社, 2019.
- Compilation team of *research on remote sensing monitoring of mangrove resources in China (1978-2018)* in Land Satellite Remote Sensing Application Center, MNR. Research on remote sensing monitoring of mangrove resources in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2019.
- [26] 徐耀文,廖宝文,姜仲茂,等.珠海淇澳岛红树林、互花米草沼泽和光滩土壤有机碳含量及其影响因素 [J]. 湿地科学, 2020,18(1):85-90.
- Xu Y W, Liao B W, Jiang Z M, et al. Contents of organic carbon in soils of mangrove forest, *Spartina alterniflora* marsh and bare flat in Qi'ao Island, Zhuhai and their influencing factors [J]. Wetland Science, 2020,18(1):85-90.
- [27] 邱 霓,徐颂军,邱彭华,等.珠海淇澳岛红树林群落分布与景观格局 [J]. 林业科学, 2019,55(1):1-10.
- Qiu N, Xu S J, Qiu P H, et al. Community distribution and landscape pattern of the mangrove on the Qiao Island, Zhuhai [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019,55(1):1-10.
- [28] 钟连秀.漳江口红树林湿地生态系统健康水平综合评价研究 [D]. 福州:福建农林大学, 2020.
- Zhong L X. Comprehensive assessment of health level of mangrove swamp ecosystem in Zhangjiang Estuary [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.
- [29] 陈 凤,苏少川,陈 妍,等.基于 PSR 模型的闽东滨海湿地生态系统健康评价 [J]. 湿地科学与管理, 2020,16(3):25-29.
- Chen F, Su S C, Chen Y, et al. Ecological health assessment of coastal wetlands based on PSR model in eastern Fujian [J]. Wetland Science & Management, 2020,16(3):25-29.
- [30] 许观嫦,徐颂军,宋 焱,等.深圳红树林自然保护区海水重金属质量评价 [J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2015,47(1):101-108.
- Xu G C, Xu S J, Song Y, et al. Evaluation on the seawater's heavy metals in Shenzhen Mangrove Nature Reserve [J]. Journal of South China Normal University(Natural Science Edition), 2015,47(1):101-108.
- [31] 张起源,秦颖君,刘香华,等.广东红树林沉积物有毒金属分布及生态风险评价 [J]. 生态环境学报, 2020,29(1):183-191.
- Zhang Q Y, Qin Y J, Liu X H, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of toxic metals in mangrove sediments in Guangdong [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020,29(1): 183-191.
- [32] Chai M W, Li R L, Shi C, et al. Contamination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in urban mangroves of Southern China [J]. Science of the Total Environment, 2019,646:390-399.
- [33] 刘 静,马克明,曲来叶.广东湛江红树林国家级自然保护区优势乔木群落的物种组成及结构特征 [J]. 生态科学, 2016,35(3):1-7.
- Liu J, Ma K M, Qu L Y. Species composition and community structure of dominant mangrove forests in Zhanjiang Mangrove National Nature Reserve, Guangdong Province [J]. Ecologic Science, 2016,35(3):1-7.
- [34] 廖雨霞,潘良浩,闫 冰,等.广西廉州湾红树林群落分布特征及物种多样性分析 [J]. 广西科学院学报, 2020,36(4):361-370.
- Liao Y X, Pan L H, Yan B, et al. Analysis of distribution characteristics and species diversity of mangrove communities in Lianzhou Bay, Guangxi [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2020,36(4):361-370.
- [35] 李苑菱,陈宗铸,雷金睿,等.海口市东寨港红树林湿地植物多样性研究 [J]. 热带林业, 2019,47(2):48-51.
- Li Y L, Chen Z Z, Lei J R, et al. Study on mangrove wetland plant diversity of Dongzhaigang in Haikou [J]. Tropical Forestry, 2019, 47(2):48-51.
- [36] 潘卫华,陈家金,王 岩.近 20 年福建红树林和互花米草群落时空变化及景观特征 [J]. 生态与农村环境学报, 2020,36(11):1428-1436.
- Pan W H, Chen J J, Wang Y. Analysis of spatio-temporal dynamical change and landscape characteristics of mangroves and *Spartina alterniflora* in Fujian based on satellite imageries from 1999 to 2018 [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020,36(11):1428-1436.
- [37] 刘士龙,秦旭东,王广军,等.2017 年夏季北海市冯家江入海口红树林潮间带大型底栖动物群落结构及多样性 [J]. 湿地科学, 2019,17(3): 352-358.
- Liu S L, Qin X D, Wang G J, et al. Structure and diversity of macrozoobenthic communities in intertidal zone with mangrove forest in Fengjiajiang Estuary, Beihai City in summer in 2017 [J]. Wetland Science, 2019,17(3):352-358.
- [38] 林俊辉,何雪宝,王建军,等.福建洛阳江口红树林湿地大型底栖动物多样性及季节变化 [J]. 生物多样性, 2016,24(7):791-801.
- Lin J H, He X B, Wang J J, et al. Macroinvertebrate diversity and seasonal changes in the mangrove swamp of Luoyangjiang Estuary, Fujian Province [J]. Biodiversity Science, 2016,24(7):791-801.
- [39] 张光星,兰建新,吴 瑞,等.海南省红树林区大型底栖动物多样性的初步研究 [J]. 热带农业科学, 2016,36(11):37-42.
- Zhang G X, Lan J X, Wu R, et al. Preliminary study on macrozoobenthos diversity in mangrove area of Hainan Province [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2016,36(11):37-42.
- [40] 周细平,徐帅良,吴培芳,等.九龙江口海门岛红树林湿地大型底栖动物群落生态研究 [J]. 应用海洋学学报, 2019,38(1):21-29.
- Zhou X P, Xu S L, Wu P F, et al. Community ecology of macrobenthos in the mangrove wetland of Haimen Island, Jiulongjiang Estuary [J]. Journal of Applied Oceanography, 2019,38(1):21-29.
- [41] 蔡立哲,谭凤仪,黄玉山.香港东部红树林区大型底栖动物种类组成与数量分布特点 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1998,37(1):119-125.
- Cai L Z, Tan F Y, Huang Y S. Characteristics of quantitative distribution and species composition of macrozoobenthos in mangrove stands in eastern Hong Kong [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 1998,37(1):119-125.
- [42] 周 琳,吴海轮,徐华林,等.粤港澳大湾区红树林湿地鸟类生态健康评价——以深圳湾为例 [J]. 中国环境科学, 2020,40(6):2604-2614.
- Zhou L, Wu H L, Xu H L, et al. Bird ecological health assessment of mangrove wetland in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: A case study of Shenzhen Bay [J]. China Environmental Science,

- 2020,40(6):2604-2614.
- [43] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997,387(6630): 253-260.
- [44] 韩维栋,高秀梅,卢昌义,等.中国红树林生态系统生态价值评估 [J]. *生态科学*, 2000,19(1):40-46.
- Han W D, Gao X M, Lu C Y, et al. The ecological values of mangrove ecosystems in China [J]. *Ecological Science*, 2000,19(1):40-46.
- [45] 彭在清,孟祥江,吴良忠,等.广西北海市滨海湿地生态系统服务价值评价 [J]. *安徽农业科学*, 2012,40(9):5507-5511.
- Peng Z Q, Meng X J, Wu L Z, et al. Evaluation on service value of coastal wetland ecosystem in Beihai City of Guangxi [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012,40(9):5507-5511.
- [46] 王式帅,王孟琪,王湘媛,等.广东内伶仃-福田国家级自然保护区福田红树林生物多样性与生态环境监测报告(2017年度) [R]. 深圳:中山大学生命科学学院,广东内伶仃-福田国家级自然保护区管理局, 2017.
- Wang S S, Wang M Q, Wang X Y, et al. Biodiversity and ecological environment monitoring report of Guangdong Neilingding-Futian National Nature Reserve (2017 edition) [R]. Shenzhen: School of Life Sciences of Sun Yat-Sen University, Guangdong Neilingding-Futian National Nature Reserve Administration, 2017.
- [47] 2018 年广州市海洋生态环境状况公报 [R]. 广州:广州市生态环境局, 2019.
- Guangzhou marine ecological environment bulletin 2018 edition [R]. Guangzhou: Guangzhou Municipal Ecological Environment Bureau, 2019.
- [48] 何诗雨,胡 涛,徐华林,等.香港米埔自然保护区保护与管理经验及启示 [J]. *湿地科学与管理*, 2016,12(1):26-29.
- He S Y, Hu T, Xu H L, et al. Experiences in conservation and management of Mai Po Nature Reserve of Hong Kong and their implications [J]. *Wetland Science & Management*, 2016,12(1):26-29.
- [49] 毛子龙,赖梅东,赵振业,等.薇甘菊入侵对深圳湾红树林生态系统碳储量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2011,20(12):1813-1818.
- Mao Z L, Lai M D, Zhao Z Y, et al. Effect of invasion plants (*Mikania micrantha* H.B.K.) on carbon stock of mangrove ecosystem in Shenzhen bay [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011,20(12): 1813-1818.
- [50] 宁吉喆,鲜祖德,李晓超,等.2020 中国统计年鉴 [R]. 北京:中国统计出版社, 2021.
- Ning J Z, Xian Z D, Li X C, et al. China statistical yearbook 2020 edition [R]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [51] 可持续发展报告 2019-20 [R]. 香港:渠务署, 2020.
- Sustainability report 2019-20 edition [R]. Hongkong: Drainage Services Department, 2020.
- [52] 王铁海,刘涵心,柴苑苑,等.2019 深圳市水资源公报 [R]. 深圳:深圳市水务局, 2020.
- Wang T H, Liu H X, Chai Y Y, et al. Shenzhen water resources bulletin 2019 edition [R]. Shenzhen: Water Resources of Shenzhen Municipality, 2020.
- [53] 广州市 2019 年生态环境统计公报 [R]. 广州:广州市生态环境局, 2021.
- Guangzhou ecology and environment statistical bulletin 2019 edition [R]. Guangzhou: Guangzhou Municipal Ecological Environment Bureau, 2021.
- [54] 珠海市 2017 年环境统计年报 [R]. 珠海:珠海市生态环境局, 2019.
- Zhuhai environment statistical bulletin 2017 edition [R]. Zhuhai: Zhuhai Municipal Ecological Environment Bureau, 2019.
- [55] 梁志宏,陈秀洪,罗 欢,等.深圳湾水质时空分布特征及污染源解析 [J]. *水资源保护*, 2020,36(4):93-99.
- Liang Z H, Chen X H, Luo H, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of water quality in Shenzhen Bay and pollution source analysis [J]. *Water Resources Protection*, 2020,36(4):93-99.
- [56] 2016 年珠海市海洋环境状况公报 [R]. 珠海:珠海市海洋农业和水务局, 2017.
- Zhuhai marine environment bulletin 2016 Edition [R]. Zhuhai: Marine Agriculture and Water Resources of Zhuhai Municipality, 2017.
- [57] Man Y B, Chow K L, Zhang F, et al. Protecting water birds of wetlands: Using toxicological tests and ecological risk assessment, based on metal/lloid (s) of water, sediment and biota samples [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,778:146317.
- [58] 徐颂军,许观嫦,廖宝文.珠江口红树林湿地海水重金属污染评价及分析 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2016,48(5):44-51.
- Xu S J, Xu G C, Liao B W. Evaluation and analysis on heavy metals' pollution in mangrove wetland's seawater of the Pearl River Estuary [J]. *Journal of South China Normal University(Natural Science Edition)*, 2016,48(5):44-51.
- [59] Wu Q H, Leung J Y S, Tam N F Y, et al. Contamination and distribution of heavy metals, polybrominated diphenyl ethers and alternative halogenated flame retardants in a pristine mangrove [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016,103(1/2):344-348.
- [60] Zhu H W, Wang Y, Wang X W, et al. Distribution and accumulation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in Hong Kong mangrove sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2014,468:130-139.
- [61] Wu Q H, Liu X C, Liang C Z, et al. Historical trends and ecological risks of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and alternative halogenated flame retardants (AHFRs) in a mangrove in South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,599:181-187.
- [62] 王 璉.珠江口近岸土地利用/覆盖变化及其环境生态效应研究 [D]. 广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2018.
- Wang J. Coastal land use/land cover change and the ecological environmental effects in Pearl River Estuary [D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [63] 刘 毅,周见清,黄 秦,等.广州市南沙坦头天然红树林生物多样性研究报告 [R]. 广州:广州市越秀区鸟兽虫木自然保育中心,中国红树林保育联盟, 2016.
- Liu Y, Zhou J Q, Huang Q, et al. Study report on biodiversity of natural mangrove in Tantou, Nansha, Guangzhou [R]. Guangzhou: Bird, Animal, Insect and Wood Nature Conservation Center of Yuexiu District in Guangzhou, China Mangrove Conservation Network, 2016.
- [64] 邱 霓,徐颂军,邱彭华,等.南沙湿地公园红树林物种多样性与空间分布格局 [J]. *生态环境学报*, 2017,26(1):27-35.
- Qiu N, Xu S J, Qiu P H, et al. Species diversity and spatial distribution pattern of mangrove in Nansha Wetland Park, Guangzhou, Guangdong Province, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(1):27-35.
- [65] 颜露露,蔡立哲,陈昕韡,等.广州南沙十四涌潮间带大型底栖动物的功能群 [J]. *生物多样性*, 2016,24(7):802-810.
- Yan L L, Cai L Z, Chen X W, et al. Functional groups of benthic

- macrofauna in the 14th Yong intertidal zone of Nansha, Guangzhou [J]. *Biodiversity Science*, 2016,24(7):802-810.
- [66] 郑梓琼,唐以杰,戚诗婷,等.深圳福田红树林大型底栖动物多样性研究 [J]. *湿地科学与管理*, 2020,16(3):69-73.
- Zheng Z Q, Tang Y J, Qi S T, et al. Diversity of macrobenthos in Futian Mangrove, Shenzhen [J]. *Wetland Science & Management*, 2020,16(3):69-73.
- [67] 蔡立哲,陈昕韡,吴 辰,等.深圳湾潮间带 1995~2010 年大型底栖动物群落的时空变化 [J]. *生物多样性*, 2011,19(6):702-709.
- Cai L Z, Chen X W, Wu C, et al. Temporal and spatial variation of macrofaunal communities in Shenzhen Bay intertidal zone between 1995 and 2010 [J]. *Biodiversity Science*, 2011,19(6):702-709.
- [68] 唐以杰,方展强,何 清,等.无瓣海桑与乡土红树植物混交对林地大型底栖动物的影响 [J]. *生态学报*, 2015,35(22):7355-7366.
- Tang Y J, Fang Z Q, He Q, et al. Effects of mixed plantations of *Sonneratia apetala* and indigenous mangrove species on understory macrofauna [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(22):7355-7366.
- [69] 常 弘,廖宝文,粟 娟,等.广州南沙红树林湿地鸟类群落多样性 (2005~2010) [J]. *应用与环境生物学报*, 2012,18(1):30-34.
- Chang H, Liao B W, Su J, et al. Bird community diversity of Nansha mangrove wetland in Guangzhou, China (2005~2010) [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2012,18(1):30-34.
- [70] 彭逸生,王晓兰,陈桂珠,等.珠海淇澳岛冬季的鸟类群落 [J]. *生态学杂志*, 2008,27(3):391-396.
- Peng Y S, Wang X L, Chen G Z, et al. Avian communities on Qi'ao Island of Zhuhai City in wintertime [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008,27(3):391-396.
- [71] 杨雄邦.淇澳红树林湿地保育的实践与思考 [N]. *珠海特区报*, 2013-12-15(8).
- Yang X B. Practice and thinking of mangrove wetland conservation in Qi'ao [N]. *Zhuhai Special Zone News*, 2013-12-15(8).
- [72] WWF-Hong Kong. Mai Po Nature Reserve management plan: 2019-2024 [EB/OL]. https://wwfhk.awsassets.panda.org/downloads/mpnr_management_plan_updated_version_june2021.pdf.
- [73] 深圳市人民政府.深圳市内伶仃岛—福田国家级自然保护区管理规定 [EB/OL]. http://www.gd.gov.cn/zwgk/wjk/zcfzk/content/post_2935955.html.
- Shenzhen Municipal People's Government. Management regulations of Shenzhen Neilingding Island-Futian National Nature Reserve [EB/OL]. http://www.gd.gov.cn/zwgk/wjk/zcfzk/content/post_2935955.html.
- [74] 广州市生态环境局.广州市湿地保护规定 [EB/OL]. http://sthjj.gz.gov.cn/zwgk/fgybz/gzshbfgyzcwj/content/post_2803051.html.
- Guangzhou Municipal Ecological Environment Bureau. Regulations of Guangzhou Municipality on wetland protection [EB/OL]. http://sthjj.gz.gov.cn/zwgk/fgybz/gzshbfgyzcwj/content/post_2803051.html.
- [75] 珠海市人民政府办公室.珠海市将进一步加强淇澳-担杆岛省级自然保护区管理 [EB/OL]. http://www.zhuhai.gov.cn/gkmlpt/content/2/2481/post_2481397.html#1638.
- Zhuhai Municipal People's Government Office. Zhuhai will further strengthen the management of Qi'ao Dangan Island Provincial Nature Reserve [EB/OL]. http://www.zhuhai.gov.cn/gkmlpt/content/2/2481/post_2481397.html#1638.
- [76] 世界自然基金会.公众参与及教育 [EB/OL]. <https://www.wwf.org.hk/education>.
- WWF. Public participation and education [EB/OL]. <https://www.wwf.org.hk/education>.
- [77] 中国红树林保育联盟.中国红树林保护区通讯 [EB/OL]. <https://jz.docin.com/p-763899363.html>.
- China Mangrove Conservation Network. China mangrove reserve communication [EB/OL]. <https://jz.docin.com/p-763899363.html>.
- [78] 广州市越秀区鸟兽虫木自然保育中心.定向探索神奇红树林 [EB/OL]. https://www.sohu.com/a/156296312_256054.
- Bird, Animal, Insect and Wood Nature Conservation Center of Yuexiu District in Guangzhou. Directional exploration of magical mangroves [EB/OL]. https://www.sohu.com/a/156296312_256054.
- [79] 库务署.政府一般收入帐目 [EB/OL]. https://www.try.gov.hk/sc/pdc_cbac1920_seasub20.pdf.
- The Treasury. General revenue account [EB/OL]. https://www.try.gov.hk/sc/pdc_cbac1920_seasub20.pdf.
- [80] 陈 权,马克明.红树林生物入侵研究概况与趋势 [J]. *植物生态学报*, 2015,39(3):283-299.
- Chen Q, Ma K M. Research overview and trend on biological invasion in mangrove forests [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015,39(3):283-299.
- [81] Li M, Cao H L, Hong Y G, et al. Seasonal dynamics of anammox bacteria in estuarial sediment of the Mai Po Nature Reserve revealed by analyzing the 16S rRNA and hydrazine oxidoreductase (hzo) genes [J]. *Microbes and Environments*, 2011,26(1):15-22.
- [82] 李怡婉.香港米埔自然保护区保护与发展经验借鉴 [C]//中国城市规划学会.城市规划和科学发展——2009 中国城市规划年会论文集.天津:中国城市规划学会, 2009:6.
- Li Y W. Experience of conservation and development of Mai Po Nature Reserve in Hong Kong [C]//Urban Planning Society of China. Urban planning and scientific development—Proceedings of 2009China urban planning annual conference. Tianjin: Urban Planning Society of China, 2009:6.
- [83] 沈小雪,关淳雅,王 茜,等.红树林生态开发现状与对策研究 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(9):4004-4016.
- Shen X X, Guan C Y, Wang Q, et al. Study on the current situation and countermeasures of mangrove ecological exploitation [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(9):4004-4016.
- [84] 雷远达,燕鸿宇,钟彩英,等.沉积物记录揭示的深圳湾红树林生态系统稳态转变 [J]. *生态学报*, 2020,40(23):8539-8548.
- Lei Y D, Yan H Y, Zhong C Y, et al. Regime shift recorded by sediments from the Futian mangrove ecosystem in the Shenzhen Bay [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(23):8539-8548.
- [85] 包 强,陈晓琴,徐华林,等.八点广翅蜡蝉在深圳福田红树林发生规律研究 [J]. *广东农业科学*, 2013,40(12):90-92.
- Bao Q, Chen X Q, Xu H L, et al. Research on the occurrence regularity of *Riccia speculum walker* in Futian mangrove, Shenzhen [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013,40(12):90-92.
- [86] 邱致刚,杨 希,于凌云,等.城市化影响下红树林的生态问题与保护对策:以深圳福田为例 [J]. *湿地科学与管理*, 2019,15(3):31-34.
- Qiu Z G, Yang X, Yu L Y, et al. Ecological problems and conservation strategies for mangrove forest under impacts of urbanization: A case study of Futian, Shenzhen [J]. *Wetland Science & Management*, 2019,15(3):31-34.
- [87] 郭嘉亮,林绅辉,李瑞利,等.深港红树林湿地生态保护比较研究 [C]//中国自然资源学会水资源专业委员会,中国地理学会水文地理专业

- 委员会,中国水利学会水资源专业委员会,等.面向全球变化的水系统创新研究——第十五届中国水论坛论文集.深圳:中国水利水电出版社,2017:9.
- Guo J L, Lin S H, Li R L, et al. Comparative study on ecological protection of mangrove wetland in Shenzhen and Hong Kong [C]//Water Resources Commission, China Society of Natural Resources, Hydrographic Committee of Chinese Geographical Society, Water resources professional committee of China Water Conservancy Society, et al. Research on water system innovation facing global change — Proceedings of the 15th China Water Forum. Shenzhen: China Water Power Press, 2017:9.
- [88] 刘莉娜,陈里娥,韦萍萍,等.深圳福田红树林自然保护区的生态问题及修复对策研究 [J]. 海洋技术, 2013,32(2):125-132.
- Liu L N, Chen L E, Wei P P, et al. Ecological problems and rehabilitation countermeasures of Futian Mangrove Nature Reserve in Shenzhen [J]. Journal of Ocean Technology, 2013,32(2):125-132.
- [89] 焦学尧,李瑞利,沈小雪,等.基于 GIS 的福田红树林水环境健康评价 [J]. 海洋湖沼通报, 2021,43(3):151-158.
- Jiao X Y, Li R L, Shen X X, et al. GIS-based water environmental health assessments of Futian mangrove reserve [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021,43(3):151-158.
- [90] 陈 可,李泰儒,钟转有,等.南沙区蕉门水道总磷污染现状分析及防治措施建议 [J]. 环境科学导刊, 2021,40(3):16-19.
- Chen K, Li T R, Zhong Z Y, et al. Analysis of total phosphorus pollution status and countermeasures of Jiaomen Water Canal in Nansha District [J]. Environmental Science Survey, 2021,40(3):16-19.
- [91] 梁家智.广州城市“南拓”进程中南沙滨海湿地保护问题研究 [D]. 广州:仲恺农业工程学院, 2017.
- Liang J Z. Research on the protection of the Nansha coastal wetlands in the process of South Extension of Guangdong [D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2017.
- [92] Chen Y J, Huang H F, Ding Y, et al. Trace metals in aquatic environments of a mangrove ecosystem in Nansha, Guangzhou, South China: pollution status, sources, and ecological risk assessment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019,191(10):629.
- [93] Wei Y L, Bao L J, Wu C C, et al. Characterization of anthropogenic impacts in a large urban center by examining the spatial distribution of halogenated flame retardants [J]. Environmental Pollution, 2016,215:187-194.
- [94] Zhou H C, Tam N F Y, Cheung S G, et al. Contamination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in watershed sediments and plants adjacent to e-waste sites [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019,379:120788.
- [95] Tian M, Chen S J, Wang J, et al. Plant uptake of atmospheric brominated flame retardants at an e-waste site in Southern China [J]. Environmental Science & Technology, 2012,46(5):2708-2714.
- [96] 刘秋红.广州市红树林资源现状及其保护利用对策 [J]. 福建林业科技, 2005,2:125-128.
- Liu Q H. Status, protection and utilization countermeasures of mangrove forest resource in Guangzhou City [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2005,2:125-128.
- [97] Zhang Z W, Sun Y X, Sun K F, et al. Brominated flame retardants in mangrove sediments of the Pearl River Estuary, South China: Spatial distribution, temporal trend and mass inventory [J]. Chemosphere, 2015,123:26-32.
- [98] Chen H, Liao B W, Liu B E, et al. Eradicating invasive *Spartina alterniflora* with alien *Sonneratia apetala* and its implications for invasion controls [J]. Ecological Engineering, 2014,73:367-372.
- [99] Jiang Z M, Guan W, Xiong Y M, et al. Interactive effects of intertidal elevation and light level on early growth of five mangrove species under *Sonneratia apetala* Buch. Hamplantation canopy: Turning monocultures to mixed forests [J]. Forests, 2019,10(2):83.
- [100] 王金华,黄华梅,贾后磊,等.粤港澳大湾区海岸带生态系统保护和修复策略 [J]. 生态学报, 2020,40(23):8430-8439.
- Wang J H, Huang H M, Jia H L, et al. Discussion on the strategies of coastal ecosystem protection and restoration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23):8430-8439.
- [101] Wyckhuys K A G, Lu Y H, Zhou W W, et al. Ecological pest control fortifies agricultural growth in Asia - Pacific economies [J]. Nature Ecology & Evolution, 2020,4(11):1522-1530.
- [102] 陈宝明,彭少麟,吴秀平,等.近 20 年外来生物入侵危害与风险评估文献计量分析 [J]. 生态学报, 2016,36(20):6677-6685.
- Chen B M, Peng S L, Wu X P, et al. A bibliometric analysis of researches on topics related to the ecological damage caused by and risk assessments of exotic invasive species from 1995 to 2014 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(20):6677-6685.
- [103] 付小勇,秦长生,赵丹阳.中国红树林湿地昆虫群落及害虫研究进展 [J]. 林业与环境科学, 2012,28(4):56-61.
- Fu X Y, Qin C S, Zhao D Y. Research progress in insect community and pests of Chinese mangrove [J]. Forestry and Environmental Science, 2012,28(4):56-61.
- [104] 李志刚,戴建青,叶静文,等.中国红树林生态系统主要害虫种类、防控现状及成灾原因 [J]. 昆虫学报, 2012,55(9):1109-1118.
- Li Z G, Dai J Q, Ye J W, et al. Species, control status and outbreak causes of main pest insects in mangrove ecosystems in China [J]. Acta Entomologica Sinica, 2012,55(9):1109-1118.
- [105] 张留恩,廖宝文.珠海市淇澳岛红树林湿地的研究进展与展望 [J]. 生态科学, 2011,30(1):81-87.
- Zhang L E, Liao B W. Research progress of mangrove wetlands on Qi'ao Island, Zhuhai [J]. Ecologic Science, 2011,30(1):81-87.
- [106] Wu Q H, Leung J Y S, Yuan X, et al. Biological risk, source and pollution history of organochlorine pesticides (OCPs) in the sediment in Nansha mangrove, South China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015,96(1):57-64.
- [107] 张海军,史本宁,焦学尧,等.深圳近海环境重金属空间分布特征与风险评估 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021,57(4):679-690.
- Zhang H J, Shi B N, Jiao X Y, et al. Spatial distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in Shenzhen coastal areas [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021,57(4): 679-690.
- [108] Chai M W, Ding H, Shen X X, et al. Contamination and ecological risk of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in surface sediments of mangrove wetlands: A nationwide study in China [J]. Environmental Pollution, 2019,249:992-1001.
- [109] 丁 欢,柴民伟,公 媛,等.红树林湿地有机污染生态学的研究评述 [J]. 海洋环境科学, 2019,38(1):153-160.
- Ding H, Chai M W, Gong Y, et al. Reviews on organic pollution in mangrove wetlands [J]. Marine Environmental Science, 2019,38(1): 153-160.

- [110] 牛安逸, 高一飞, 徐颂军. 重金属污染对珠江口红树林表层沉积物碳含量的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8549–8558.
- Niu A Y, Gao Y F, Xu S J. Effects of heavy metal pollution on the carbon content of surface sediments of mangroves in the Pearl River Estuary [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8549–8558.
- [111] Sandilyan S, Kathiresan K. Decline of mangroves – A threat of heavy metal poisoning in Asia [J]. Ocean & Coastal Management, 2014, 102: 161–168.
- [112] Tilman D, Fargione J, Wolff B, et al. Forecasting agriculturally driven global environmental change [J]. Science, 2001, 292(5515): 281–284.
- [113] Beyer R M, Manica A. Historical and projected future range sizes of the world's mammals, birds, and amphibians [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 5633.
- [114] Isbell F, Gonzalez A, Loreau M, et al. Linking the influence and dependence of people on biodiversity across scales [J]. Nature, 2017, 546(7656): 65–72.
- [115] Yang F, Liu B, Zhu Y L, et al. Species diversity and food web structure jointly shape natural biological control in agricultural landscapes [J]. Communications Biology, 2021, 4(1): 979.
- [116] 许铭本, 赖俊翔, 张荣灿, 等. 北仑河口北岸潮间带大型底栖动物生态特征及潮间带环境质量评价 [J]. 广东海洋大学学报, 2015, 35(1): 57–61.
- Xu M B, Lai J X, Zhang R C, et al. Ecological characteristics of macrobenthic animals and environmental quality on the north shore intertidal zone of Beilun Estuary [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2015, 35(1): 57–61.
- [117] Chen G G, Wang W Q, Liu Y, et al. Uncovering the relative influences of space and environment in shaping the biogeographic patterns of mangrove mollusk diversity [J]. Ices Journal of Marine Science, 2019, 77(1): 30–39.
- [118] 蔡立哲. 海洋底栖生物生态学和生物多样性研究进展 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2006, S2: 83–89.
- Cai L Z. Progress on Marine Benthic Ecology and Biodiversity [J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2006, S2: 83–89.
- [119] Wu Q H, Tam N F Y, Leung J Y S, et al. Ecological risk and pollution history of heavy metals in Nansha mangrove, South China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 104: 143–151.
- [120] Shi C, Yu L Y, Chai M W, et al. The distribution and risk of mercury in Shenzhen mangroves, representative urban mangroves affected by human activities in China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 151: 110866.
- [121] Wu Q H, Leung J Y S, Tam N F Y, et al. Biological risk and pollution history of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Nansha mangrove, South China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 85(1): 92–98.
- [122] Li F L, Zeng X K, Yang J D, et al. Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments and plants of mangrove swamps in Shenzhen, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 85(2): 590–596.
- [123] Zhou Q, Tu C, Fu C C, et al. Characteristics and distribution of microplastics in the coastal mangrove sediments of China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 134807.
- [124] Li R L, Yu L Y, Chai M W, et al. The distribution, characteristics and ecological risks of microplastics in the mangroves of Southern China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 135025.
- [125] 孙莉莉, 刘云珠, 贾亦飞, 等. 广东内伶仃岛-福田国家级自然保护区鱼塘生态恢复前、后水鸟群落多样性对比 [J]. 湿地科学, 2019, 17(6): 631–636.
- Sun L L, Liu Y Z, Jia Y F, et al. Comparison of diversity of waterbird communities before and after ecological restoration of fishing ponds in Guangdong Neilingding Island-Futian National Nature Reserve [J]. Wetland Science, 2019, 17(6): 631–636.
- [126] 冯尔辉, 陈伟, 廖宝文, 等. 海南东寨港红树林湿地鸟类监测与研究 [J]. 热带生物学报, 2012, 3(1): 73–77.
- Feng E H, Chen W, Liao B W, et al. Monitoring and study of mangrove wetland birds at Dongzhai Harbor, Hainan [J]. Journal of Tropical Biology, 2012, 3(1): 73–77.
- [127] 陈若海, 林伟东, 黄磊, 等. 泉州湾河口红树林湿地鸟类群落多样性分析 [J]. 泉州师范学院学报, 2017, 35(2): 13–20.
- Chen R H, Lin W D, Huang L, et al. A study on the bird communities diversity of the mangrove wetland in the Quanzhou Bay Estuary [J]. Journal of Quanzhou Normal University, 2017, 35(2): 13–20.
- [128] 苏炳欢, 黄琦, 陈其应. 广西山口红树林区鸟类资源现状及多样性研究 [J]. 南方国土资源, 2020, 9: 45–48.
- Su B H, Huang Q, Chen Q Y. Current situation and diversity of bird resources in Shankou mangrove area, Guangxi [J]. Land and Resources of Southern China, 2020, 9: 45–48.
- [129] 苏燕苑. 林业生态环境建设中森林病虫害防治 [J]. 农业与技术, 2020, 40(2): 83–84.
- Su Y Y. Prevention and control of forest diseases and insect pests in the construction of forestry ecological environment [J]. Agriculture and Technology, 2020, 40(2): 83–84.
- [130] 高广磊, 信忠保, 丁国栋, 等. 基于遥感技术的森林健康研究综述 [J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1675–1689.
- Gao G L, Xin Z B, Ding G D, et al. Forest health studies based on remote sensing: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1675–1689.
- [131] 赵鹏, 朱祖浩, 江洪友, 等. 生态海堤的发展历程与展望 [J]. 海洋通报, 2019, 38(5): 481–490.
- Zhao P, Zhu Z H, Jiang H Y, et al. The development and outlooks of the ecological seawall [J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(5): 481–490.
- [132] 范航清, 何斌源, 王欣, 等. 生态海堤理念与实践 [J]. 广西科学, 2017, 24(5): 427–434.
- Fan H Q, He B Y, Wang X, et al. The conception and practices of ecological sea dyke [J]. Guangxi Sciences, 2017, 24(5): 427–434.
- [133] Wilson K, Benton T G, Graham R I, et al. Pest control: Biopesticides' potential [J]. Science, 2013, 342(6160): 799.
- [134] 李罡, 咎启杰, 赵淑玲, 等. 海榄雌瘤斑螟的生物学特性及 Bt 对其幼虫的毒力和防效 [J]. 应用与环境生物学报, 2007, (1): 50–54.
- Li G, Zan Q J, Zhao S L, et al. Biological characters of *Ptyomaxia* sp. and the toxicity and effectiveness of *Bacillus thuringiensis* against its larvae [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2007, (1): 50–54.
- [135] 杨盛昌, 彭建, 薛云红, 等. 中国红树林的害虫种类及其综合防治 [J]. 中国森林病虫, 2020, 39(1): 32–41.
- Yang S C, Peng J, Xue Y H, et al. Species and integrated control of pests in mangrove community in China [J]. Forest Pest and Disease, 2020, 39(1): 32–41.
- [136] Li W, Luo J, Tian X, et al. A new strategy for controlling invasive

- weeds: selecting valuable native plants to defeat them [J]. Scientific Reports, 2015,5(1):11004.
- [137]陈宝雄,孙玉芳,韩智华,等.我国外来入侵生物防控现状、问题和对策 [J]. 生物安全学报, 2020,29(3):157-163.
- Chen B X, Sun Y F, Han Z H, et al. Challenges in preventing and controlling invasive alien species in China [J]. Journal Biosafety, 2020,29(3):157-163.
- [138]Li Y, Zheng L, Zhang Y, et al. Comparative metagenomics study reveals pollution induced changes of microbial genes in mangrove sediments [J]. Scientific Reports, 2019,9(1):5739.
- [139]张 灿,陈 虹,王传珺,等.我国海洋生态环境监测工作的发展及展望 [J]. 环境保护, 2021,49(12):39-42.
- Zhang H, Chen H, Wang C J, et al. The develop and prospect of marine ecological environmental monitoring in China [J]. Environmental Protection, 2021,49(12):39-42.
- [140]胡 平,严淑青,石 萍,等.广东省海洋生态环境现状及保护对策建议 [J]. 海洋开发与管理, 2020,37(6):115-120.
- Hu P, Yan S Q, Shi P, et al. The situation and protection suggestions of marine ecological environment in Guangdong Province [J]. Ocean Development and Management, 2020,37(6):115-120.
- [141]王 枫,陈幸良,周晓光,等.粤港澳大湾区生态系统保护和修复对策探讨 [J]. 林业资源管理, 2021,2:11-16.
- Wang F, Chen X L, Zhou X G, et al. Discussion on the countermeasures for ecosystem conservation and restoration of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Forest Resources Management, 2021,2:11-16.
- [142]范成新,刘 敏,王圣瑞,等.近 20 年来我国沉积物环境与污染控制研究进展与展望 [J]. 地球科学进展, 2021,36(4):346-374.
- Fan C X, Liu M, Wang S R, et al. Research progress and prospect of sediment environment and pollution control in China in recent 20years [J]. Advance in Earth Sciences, 2021,36(4):346-374.
- [143]Lefcheck J S, Byrnes J E K, Isbell F, et al. Biodiversity enhances ecosystem multifunctionality across trophic levels and habitats [J]. Nature Communications, 2015,6(1):6936.
- [144]王友绍.全球气候变化对红树林生态系统的影响、挑战与机遇 [J]. 热带海洋学报, 2021,40(3):1-14.
- Wang Y S. Impacts, challenges and opportunities of global climate change on mangrove ecosystems [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2021,40(3):1-14.
- [145]Cao J J, Leng W C, Liu K, et al. Object-Based mangrove species classification using unmanned aerial vehicle hyperspectral images and digital surface models [J]. Remote Sensing, 2018,10(1):89.
- [146]王 萌,金小伟,林晓龙,等.基于环境 DNA-宏条形码技术的底栖动物监测及水质评价研究进展 [J]. 生态学报, 2021,41(18):1-14.
- Wang M, Jin X W, Lin X L, et al. Advances in the macrozoobenthos biodiversity monitoring and ecosystem assessment using environmental DNA metabarcoding [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(18):1-14.
- [147]Chronister L M, Rhinehart T A, Place A, et al. An annotated set of audio recordings of Eastern North American birds containing frequency, time, and species information [J]. Ecology, 2021,102(6):e3329.
- [148]Holgate B, Maggini R, Fuller S. Mapping ecoacoustic hot spots and moments of biodiversity to inform conservation and urban planning [J]. Ecological Indicators, 2021,126:107627.
- [149]蒋锦刚,邵小云,万海波,等.基于语谱图特征信息分割提取的声景观中鸟类生物多样性分析 [J]. 生态学报, 2016,36(23):7713-7723.
- Jiang J G, Shao X Y, Wan H B, et al. Bird diversity research using audio record files and the spectrogram segmentation method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(23):7713-7723.
- [150]Lee S Y, Kwok P W. The importance of mangrove species association to the population biology of the sesarime crabs *Parasesarma affinis* and *Perisesarma bidens* [J]. Wetlands Ecology and Management, 2002, 10(3):215-226.
- [151]陈顺洋,陈光程,陈 彬,等.红树林湿地相手蟹科动物摄食生态研究进展 [J]. 生态学报, 2014,34(19):5349-5359.
- Chen S Y, Chen G C, Chen B, et al. Feeding ecology of sesarimid crabs in mangroves [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(19):5349-5359.
- [152]Wylie L, Sutton-Grier A E, Moore A. Keys to successful blue carbon projects: Lessons learned from global case studies [J]. Marine Policy, 2016,65:76-84.
- [153]陈光程,王 静,许方宏,等.滨海蓝碳碳汇项目开发现状及推动我国蓝碳碳汇项目开发的建议 [J]. 应用海洋学学报:1-8[2021-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1319.P.20210813.1655.002.html>.
- Chen G C, Wang J, Xu F H, et al. Progress of coastal wetland blue carbon projects in carbon market and advice on facilitating the development of blue carbon projects in China [J]. Journal of Applied Oceanography:1-8[2021-09-28].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1319.P.20210813.1655.002.html>.
- [154]王文卿,张 林,张雅棉,等.红树林退塘还林研究进展 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021,60(2):348-354.
- Wang W Q, Zhang L, Zhang Y M, et al. Research progress of pond-to-mangrove restoration [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021,60(2):348-354.
- [155]林中大,刘惠民.广东红树林资源及其保护管理的对策 [J]. 中南林业调查规划, 2003,2:35-38.
- Lin Z D, Liu H M. Protection and management countermeasures for mangrove resource in Guangdong Province [J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2003,2:35-38.
- [156]彭逸生,周炎武,陈桂珠.红树林湿地恢复研究进展 [J]. 生态学报, 2008,28(2):786-797.
- Peng Y S, Zhou Y W, Chen G Z. The restoration of mangrove wetland: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(2):786-797.

作者简介: 张月琪(1997-),女,广东广州人,北京大学深圳研究生院硕士研究生,主要研究方向为环境生态学。