

基于自然的粤港澳大湾区潮间带湿地生境动态恢复策略

Nature-based Strategy of Habitat Dynamic Restoration of Intertidal Wetland in the Greater Bay Area

许哲瑶
XU Zhe-yao

摘要: 潮间带湿地有极其重要的生态服务功能,但随着全球极端气候的频繁发生和人工干预加剧,潮间带湿地面临着退化甚至消失的威胁。聚焦潮间带湿地再自然化生境恢复策略,尝试从时间维度、潮汐动力空间梯度、雨洪淹没和潮汐消落的动态变化中,分析潮间带湿地生境的动态特征及其景观影响因子。以粤港澳大湾区潮间带湿地为例,立足景观生态学,以基于自然的解决方案为构建原则,提出3种潮间带湿地再自然化的生境动态修复策略:保护和修复潮间带湿地的完整性,恢复潮间带湿地的景观风貌和恢复关键性生物生境。

关键词: 潮间带湿地; 生境恢复; 基于自然; 粤港澳大湾区

中图分类号: TU986

文献标志码: A

文章编号: 1671-2641(2023)02-0002-05

收稿日期: 2022-12-30

修回日期: 2023-01-30

Abstract: Intertidal wetlands have extremely important ecological service functions, but with the frequent occurrence of global extreme climate and intensified artificial intervention, they are facing the threat of degradation or even disappearance. Focusing on the strategy of re-naturalization of intertidal wetland habitat restoration, this paper attempts to analyze the dynamic characteristics of intertidal wetland habitat and its landscape impact factors from the dynamic changes of time dimension, tidal dynamic spatial gradient, rain flood flooding, and tidal ebb and flow. Taking the intertidal wetlands in the Greater Bay Area of Guangdong, Hong Kong, and Macao as an example, based on landscape ecology and the construction principle of natural solutions, three dynamic habitat restoration strategies for the re-naturalization of intertidal wetlands are proposed: protecting and restoring the integrity of intertidal wetlands, restoring the landscape style of intertidal wetlands, and restoring habitats of key living things.

Key words: Intertidal wetland; Habitat restoration; Nature-based; The Greater Bay Area of Guangdong, Hong Kong, and Macao

潮间带湿地是连接陆地、海洋和河流的生态系统,其发挥着重要的生态系统服务功能,能调节气候,净化水质,减缓含碳温室气体排放,抵御台风等自然灾害,同时又具有极高的生产力,养育着丰富的鱼类和底栖动物资源,维护河口生态和改善城市环境,是全球“蓝色碳汇”的主要贡献者^[1]。然而在过去几十年间,随着气候变化以及人们土地利用方式的改变,潮间带湿地在全球范围内大规模退化,面积锐减^[2]。全球有13 700 km²的潮汐湿地丧失^[3],过去30年我国潮间带湿地面积减少了37.62%^[4]。同时,破坏潮间带的养殖活动及堤岸工程直接干扰了水鸟觅食地,对水鸟生态的影响较大^[5]。因此,修复潮间带湿地生境对于区域生态安全、生物多样性的维持具有重要的意义。

本文首先对国内外潮间带湿地

生境恢复的相关研究进行综述梳理,从景观生态学的角度归纳潮间带湿地的恢复策略及其发展趋势。然后分析粤港澳大湾区潮间带湿地的特征和目前面临的挑战,聚焦潮间带湿地再自然化生境恢复策略,尝试从时间维度、潮汐动力空间梯度的动态变化中分析潮间带湿地生境的动态变化特征,以及植被、地形、土壤等景观因子在动态变化过程中的作用和影响机制。最后从维护区域生态安全格局的视角,提出基于自然的粤港澳大湾区潮间带湿地生境动态修复策略,以期对潮间带湿地保护和修复实践提供新思路。

1 国内外潮间带湿地生境恢复研究

从景观生态学的角度,国内外潮间带湿地的生境恢复策略主要包括4

个方面。1) 恢复植被的多样性:通过增加湿地景观覆盖度的多样性^[6],根据不同水鸟的生态习性,为不同食性的鸟类提供全生活周期的食源,营建近自然的植物群落,形成安全隐蔽的栖息环境,为鸟类提供多层次的生境选择,从而维护湿地鸟类多样性^[7]。2) 栖息地修复:一方面通过底泥疏浚、湿地植被修复进行,如红树林修复、微小湿地营造和湿地景观营造^[8-9];另一方面加强关键性生物栖息地的连续性,如鱼类洄游路线上栖息地的连续性,形成“点-线-面”的栖息地保护体系^[10]。3) 增加潮间带异质性:一是增加湿地底泥基质、植物群落,丰富湿地类型和生物多样性,具体如在海堤迎水坡处抛填溪坑石,并种植抗风树种^[11],从而提升河流的自然性和潮间带湿地生境多样性。二是通过生态系统整体设计,修

复河流生态系统,包括恢复营造生物生境,提升城市河流生物多样性;恢复河流自然景观,建立河流生命景观体系;实施滨水小微湿地建设,激活都市人居滨水界面^[12]。4)恢复湿地内部连通性:拆除人工堤坝、涵洞、堤道,重建桥梁等过水设施,提高潮间带各类湿地之间及与外部水域的生境连接度,恢复原有水动力和沉积过程,改善潮间带湿地的地形地貌及生态环境。如美国华盛顿湾拆除涵洞及部分堤道改建为桥,恢复原有潮水通道及进潮量,提高湾内盐沼湿地、泻湖与外部水域的生境连接度^[10]。上述策略可以作为通用生态修复方法,恢复潮间带湿地生境及其生态系统自我修复能力,从而恢复潮间带湿地的生态功能。

此外,在修复过程中需考虑潮汐的动态变化对不同潮间带湿地生境不同的影响机制。如底栖动物群落,其沿河口到湾内呈连续的梯度变化,但是潮汐对其影响并不明显,水体盐度和植被类型是主要影响因素,如红树林对林底的底栖动物种类组成和丰度有一定的影响^[13-14]。又如潮间带湿地为鱼类提供了丰富的食物,包括底栖生物、甲壳类动物等,是鱼类重要的育幼场,春、夏和秋季各个潮序的鱼类丰度一般均大于冬季,潮汐水文因子对鱼类的多样性呈显著相关^[15-16]。国内外的相关研究表明,交叉学科的技术综合应用是发展趋势,如将生物资源修复与植被修复技术相结合,恢复退化的盐沼湿地。

2 粤港澳大湾区潮间带湿地概况

粤港澳大湾区是我国海岸带高强度开发区域,面临着生态环境质量不高、生态系统受损严重的压力^[17]。潮间带湿地系统连接海岸带生态系统和陆地生态系统,其保护修复是绿色湾区发展的必然需求。潮汐淹没是潮间带湿地发挥作用的主要驱动力^[18]。粤港澳大湾区的潮间带湿地与感潮河涌相连,属于三角

洲低积平面的河口湿地,潮间带湿地组成处于动态变化之中。由于潮汐变化,感潮河涌携带的泥沙在河口到海口不断淤积、抬升形成滩涂。潮间带湿地包括了从海域到陆地的多种过渡带湿地类型^[19](表1),多样性程度较高。

表1 潮间带湿地类型

序号	大类	类型
1	滨海湿地	海岸性咸水湖、潮间盐水沼泽、红树林沼泽
2	河流湿地	永久性河流
3	沼泽湿地	季节性咸水沼泽
4	人工湿地	水产养殖场、人工湖

注:1999年国家林业和草原局为了进行全国湿地资源调查,参照《湿地公约》的分类将中国的湿地划分为近海与海岸湿地、河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地、人工湿地等5大类28种类型。笔者根据潮间带湿地的定义整理

2.1 面临的挑战

首先,热带气旋(台风)是影响粤港澳大湾区潮间带湿地生境的最重要自然灾害。粤港澳大湾区台风一般发生在7—9月,该时段年平均受台风影响2.85~5次,数量占全年总数的75%以上,台风最大风力在9级以上,并带来暴雨,破坏力极大。粤港澳大湾区地处亚热带海洋性季风气候,降水量年际变化较大,汛期(雨季)4—9月降水量占年总量的80%以上,尤以5、6月降水量最为集中,平均降水量1550 mm^[20],占年降雨量84%;其他时间的降水量占年总量不足20%。台风和特大暴雨往往同时而至,且连续多天,台风风暴潮也带来了高潮位,对湿地生境、城市安全带来冲击。其次,人工干预导致潮间带湿地退化。从珠海横琴到广州南沙,海岸滩地大片被长期围垦,改造为水产养殖基塘或三角洲低积平原,随着时间的推移,水域面积不断减少。另外,在近年全球气候变化与海平面上升的大背景下,潮位的变化越来越大,导致候鸟生境减少。根据相关规范要求,2002年十八涌东外江200年一遇设计洪潮水

位为2.83 m,20年一遇现状洪潮水位为2.38 m^[21]。然而,极端风暴潮频发且实测最高潮位接连突破历史极值,流域水沙情势发生较大变化,2022年珠江河口200年一遇设计潮位比原成果抬高0.17~0.74 m^[22]。珠江三角洲潮间带湿地属于东亚-澳大利西亚迁飞区,目前整个迁飞区大部分种类的水鸟数量正急剧下降。

2.2 潮间带湿地特征

珠江三角洲河口属弱潮型河口,潮间带湿地潮水位特征依据地区主要潮位观测站——广州南沙站、中山横门站、珠海大横琴站等的数据可知,潮汐属不规则半日混合潮,潮差较小,落潮潮差大于涨潮潮差。月内有朔、望大潮和上、下弦小潮,约15d为一个周期,一年中冬潮低于夏潮。一天内出现高潮和低潮各2次,涨落潮特征为涨潮历时短,落潮历时长,4—10月更为明显。汛期涨潮历时一般为5h左右,落潮历时一般在7h以上,枯水期涨潮历时一般为5小时以上,落潮历时一般在6h以上^[23]。从内陆往出海口方向,随着纬度的降低,越靠近出海口,潮差变化幅度越大,但是平均潮差却变小,红树林为主的生态防护林带退化程度越高。

大型海藻资源与生长状况也是潮间带湿地生态环境质量与健康程度的重要生态预警信号之一^[24]。粤港澳大湾区处于热带和亚热带交汇处,平均气温较高,潮间带高潮带受太阳光照射时间长,温度高,不适宜大型海藻的生长^[25]。由于全球气候变暖,广州2009—2019年的年平均气温上升趋势明显,速度达到了每10年升温0.14℃。随着气温升高,大湾区大型海藻的生物多样性有降低趋势。相关研究选择深圳市大亚湾大坑、杨梅坑、高山咀、外伶仃岛、东澳岛、桂山岛、下川岛、上川岛8个代表性位点进行调查,得到大型海藻在粤港澳大湾区潮间带呈现由北向南递减,具有显著的垂直分布特征,年平均生物量总体上呈现低潮带>中潮带>高潮带的特

征^[26]。珠江和陆源污染影响大型海藻生长,使其物种丰富度指数低^[27],具有生物多样性的介异性质,即较少的海藻种类占据了大半的生物量。因此,大型海藻的栖息地亟待加强保护。

崔新月等^[28]对珠海、中山、广州、东莞虎门、东莞长安、深圳、大鹏湾和大亚湾8个潮间带不同环境介质(表水、孔隙水、悬浮物和沉积物)的镉等重金属含量及形态的空间分布特征进行研究,发现重金属含量均超过环境安全阈值,总含量分布受城市经济发展特色影响,而形态分配则与环境因子密切相关:狮子洋两岸及伶仃洋上游的东莞和中山等地以电子行业聚集的工业经济和水产养殖业为主,人为带来的污染较为严重;而珠海和大亚湾等地周边以旅游业为主,其潮间带多被人为沙化,因而不同潮间带沉积物的理化性质差异显著。

潮间带湿地随着潮汐动力的不同作用,形成不同的水文和空间结构特征:越往内陆方向,潮间带湿地破碎化程度越高,各种镶嵌交错的复合类型越多,湿地土壤污染程度越高,潮间带湿地内部连通性越差,湿地自然景观风貌受损程度加剧。如广州海珠湿地为城市内湖湿地、河涌湿地和涌沟-半自然果林镶嵌交错的复合湿地,最高潮位2.53 m,最低潮位-2.20 m,平均潮差1.39 m^[29],处于潮汐动力作用的末端。而珠海横琴湿地位于珠江出海口西侧,南濒南海,为河口滨海湿地,湿地类型包括咸水沼泽、滩涂和红树林带等,最高潮位4.19 m,最低潮位0.92 m,平均潮差0.86~0.9 m。海珠湿地与横琴湿地相比,物质循环较为缓慢,水环境压力大。

3 基于自然的潮间带湿地生境动态修复策略

3.1 构建原则

基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)全球标准提出

了8项基本准则^[30],准则体现了系统性、综合性、动态性、权衡性的特征。开展基于自然的潮间带湿地生境修复主要遵从以下原则:

1) 完整性原则:强调系统性和整体性,保护和提升生态系统和食物链的完整性,包括在景观尺度上、时间尺度上的生物多样性和不同湿地类型的分布格局,以及生态系统的连通性——避免生物多样性的丧失和生态系统的简化以维持景观的稳定与弹性。

2) 高效性原则:潮间带湿地面临的挑战和问题复合、多样,首先明确最紧迫的问题,制定具体的、可预见的策略措施;其次,选取最优的修复位置、排序与修复措施组合,从面控制到点,从而最大限度地提高生态修复的产出效益,促进资金的高效利用。

3) 适应性原则:潮间带湿地生态系统的动态性与不确定性,要求策略可进行动态的适应性管理,以随着时间推移而减少其不确定性。以其初始规划和评估为基础,可相应开展长期监测,并适时进行阶段性评估,不断反馈和调整完善规划实施策略。

4) 问题导向原则:应坚持问题导向,在对潮间带湿地及其所在流域气候、水文和生态环境现状摸底的基础上,识别胁迫因子,进而制定生态修复策略。

3.2 修复策略

依据粤港澳大湾区的潮间带湿地潮水位动态变化特征和区域实际,按问题导向原则,构建以下3种潮间带湿地再自然化的生境动态修复策略,以期为气候变化下基于自然的潮间带湿地保护和修复实践提供新思路。

3.2.1 保护和修复潮间带湿地的完整性

该策略基于完整性原则,整合了恢复植被多样性和湿地内部连通性2种通用的生态修复策略。首先把完整的潮间带湿地系统纳入红线范围,包括连接相通的各类潮间带湿地类型(包括滨海湿地、河流湿地、

沼泽湿地和人工湿地等),控制人为活动对动植物生境的影响。尤其注意恢复区面积不能划得过小,例如红树林和光滩应该纳入恢复区,从而促进潮间带湿地在河口净化能力和滩涂生态生境功能的发挥。其次,结合河道“基于自然”的治理和修复,恢复潮间带湿地内外水系的连通性,形成健康稳定的水网系统,提升水环境质量。最后,通过恢复动植物生境,使潮间带湿地生态功能和生态系统的食物链日渐完整,从而逐步提高潮间带湿地系统的连通性和生物多样性。

3.2.2 恢复潮间带湿地的景观风貌

该策略是在一般的恢复植被多样性策略基础上,从景观风貌、生态功能提升的角度,根据高效性和适应性原则,提出了根据潮汐动力的不同,因地制宜地营建功能型植物群落,是对策略的本土化提升运用。潮间带湿地植被具有典型的景观风貌,落羽杉*Taxodium distichum*、水松*Glyptostrobus pensilis*等与潮间带湿地植被景观风貌不协调的种类不宜选用。景观风貌的恢复宜结合复合功能型防护林带建设同步实施,可最大限度地提高生态修复产出的生态效益和成本效益。随潮汐动力进水河道位置的不同来选择适宜的植物种类和种植方式(表2):在高潮滩和中潮滩的泥质立地造林,应适当保留泥滩,形成红树林、泥滩和水道潮沟交差分布的生态格局,种植红树和半红树,形成红树林为主的混交生态恢复-防风复合林;对低于平均海平面的潮滩,则宜采用条带状填挖的方式抬高潮滩泥质后再造林,如此形成的泥滩为大型底栖动物和两栖动物留出了栖息地,也是候鸟重要的觅食地。又如木麻黄*Casuarina equisetifolia*与大叶相思*Acacia auriculiformis*,或木麻黄与丛生竹(青皮竹*Bambusa textilis*、淡竹*Phyllostachys glauca*)形成水土涵养-防风复合林,保护饮用水源,还能对湿地内的鸟类栖息地起到防风保温的作用。

3.2.3 恢复关键性生物生境

该策略是在栖息地修复、增加潮间带异质性策略的基础上，根据完整性和适应性的原则，进一步融合了水文生态学、土壤学、景观生态学等交叉学科相关理论，从系统性和时间维度，恢复潮间带湿地系统中各类生物栖息地的自然生态过程。充分考虑关键性生物的生活史及其栖息地特征的耦合反馈关系，尤其是生境恢复区、保护区与海域、感潮河涌的水文联系，通过地形、植被、土壤等景观因子的自然化生境营造，从而恢复潮间带湿地生境的自然生态过程，包括水

文过程，达到控制城市面源污染和改善水环境的目标。关键性湿地生物包括水鸟、鱼类和底栖动物等，结合历史资料和现场调研，研判确定关键性生物的种类及其生境特征（表3）。

如广州南沙咸淡水混合，所以鱼类很多，常见鱼类包括鳊 *Parabramis pekinensis*、鲫、罗非鱼 *Oreochromis spp.*、鲤、草鱼等。根据鱼类生活史特征和趋流性，恢复鱼类洄游通道。因此，根据不同水深沿河岸营建鱼巢通道，以满足不同鱼类的需求。待鱼类生境逐步恢复后，逐年增加其他淡水鱼种类，提高水生动物的多样

性。潮间带湿地作为珠江三角洲沿海水鸟生态廊道的重要组成部分，需满足沿海咸水、咸淡水水鸟栖息需求，主要分布的水鸟包括鹭类、雁鸭类和鹤鹑类三大类，其次还有粤港澳大湾区常见留鸟红耳鹎、白头鹎、暗绿绣眼鸟等。南沙地区的底栖动物优势种包括太平大眼蟹、疣吻沙蚕、上野螺赢蜚 *Corophium sp.*、寡毛类的沼蚓 *Limnodriloides sp.*，以及在底表栖息的底栖动物如短拟沼螺和光滑狭口螺等^[35]。由于夏季光照强度大，疣吻沙蚕往往向具有良好遮荫效果的红树林迁移，生活在海桑林和茳芏下。然而由于土壤流失，部分红树的根在退潮时悬垂在空中。因此，需要有驳岸固土设施，把非自然驳岸进行生态化改造；其次要满足海桑林和茳芏对土壤的要求。两栖、底栖动物和鱼类对土壤的理化指标要求较高，因此可针对性地提出栖息地恢复目标导向下耕植土的利用策略，恢复目标栖息地。

通过分析关键性生物的生活史及其栖息地特征，可得出拟恢复栖

表2 不同潮间带混交生态恢复-防风复合林植物种类选择

河道位置	适宜的植物种类
大潮高潮位附近的海滩	海芒果 <i>Cerbera manghas</i> 、银叶树 <i>Heritiera littoralis</i> 、黄槿 <i>Hibiscus tiliaceus</i> 、桐棉 <i>Thespesia populnea</i> 、水黄皮 <i>Pongamia pinnata</i> 、露兜树 <i>Pandanus tectorius</i> 、木榄 <i>Bruguiera gymnorhiza</i> 等
中潮高潮位附近的海滩	海莲 <i>Bruguiera sexangula</i> 、木榄、对叶榄李 <i>Laguncularia racemosa</i> 、秋茄树 <i>Kandelia obovata</i> 、蜡烛果 <i>Aegiceras corniculatum</i> 、海榄雌 <i>Avicennia marina</i> 、海桑 <i>Sonneratia caseolaris</i> 、无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>
小潮高潮位或接近海平面附近的海滩	秋茄树、蜡烛果、海榄雌、海桑、无瓣海桑

表3 关键生物生活史特征与植物种类、土壤指标的对应关系

关键生物生活史特征	影响关键生物栖息地的土壤理化指标	拟恢复关键生物	生境植物种类选择
底栖动物：生活周期较长，需要相对较固定的栖息地	高盐；强酸性；硫含量高；有机质含量高；颗粒组成较细	太平大眼蟹 <i>Macrophthalmus pacificus</i> 、疣吻沙蚕 <i>Tylorrhynchus heterochaetus</i> 、短拟沼螺 <i>Assiminea brevicula</i> 、光滑狭口螺 <i>Stenothyra glabra</i> 、静水椎实螺 <i>Lymnaea stagnalis</i>	红树林（无瓣海桑、蜡烛果、老鼠簕 <i>Acanthus ilicifolius</i> 、水黄皮群落、黄槿、秋茄树、木榄、银叶树、海芒果等 ^[31] ）、海桑林、茳芏 <i>Cyperus malaccensis</i>
鸟类：沿海咸水、咸淡水水鸟栖息	酸性或中性；湿润、肥沃、非盐碱、不板结、疏松透气、排水好	白鹭 <i>Egretta garzetta</i> 、苍鹭 <i>Ardea cinerea</i> 、矶鹬 <i>Actitis hypoleucos</i> 、红耳鹎 <i>Pycnonotus jocosus</i> 、白头鹎 <i>Pycnonotus sinensis</i> 、暗绿绣眼鸟 <i>Zosterops japonicus</i> 、大山雀 <i>Parus major</i> 、乌鸫 <i>Turdus merula</i> ^[32] 等	樟 <i>Cinnamomum camphora</i> 、阴香 <i>Cinnamomum burmanni</i> 、蒲桃 <i>Syzygium jambos</i> 、洋蒲桃 <i>Syzygium samarangense</i> 、铁冬青 <i>Ilex rotunda</i> 、美丽异木棉 <i>Ceiba speciosa</i> 、粉叶决明 <i>Senna sulfurea</i> ^[33]
鱼类：鲫 <i>Carassius auratus</i> 、草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i> 、鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> 、梭鱼 <i>Chelon haematocheilus</i> 的喜爱流速上限为 0.6 m/s，鲤 <i>Cyprinus carpio</i> 的喜爱流速上限为 0.8 m/s，草鱼洄游适宜流速范围为 0.40~1.00 m/s，最适温度 20~28℃	无污染；淤泥深厚、肥沃；最适宜 pH=5.5~7.5，pH=9 的强碱性水、盐度达到 4.5% 的咸淡水也可以生长	鲫、草鱼、鲤	轮叶黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i> 、苦草 <i>Vallisneria natans</i> 、金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i> 、光叶子菜 <i>Potamogeton lucens</i> 、萍蓬草 <i>Nuphar pumila</i> 、穗花狐尾藻 <i>Myriophyllum spicatum</i> ^[34]

息地的土壤理化指标,作为栖息地土壤改良的标准,然后结合勘探和取样监测,对现状耕植土的理化指标进行评估。土壤作为动物栖息地的重要组成部分,需要结合时间与空间的生态动态演变过程,来分析关键性生物栖息地的土壤理化指标的变化规律。底栖植物的重要栖息地人工红树林,随着植被的恢复,其土壤的机械组成和化学性质会发生改变,如土壤黏粒的比重增加,pH值下降,质地均一化,盐分含量增加,有效磷、速效钾的含量明显上升,速效氮由于植物吸收而下降^[6]。

4 结论与展望

滨海潮间带湿地作为陆地生态系统和海洋生态系统的过渡地带,为物质循环和能量交换提供了重要场所,是自然界最宝贵的资源。潮间带湿地的生态健康是可持续绿色发展的重要前提。本文通过借鉴国内外潮间带湿地的生境修复案例,结合河流动力学和景观生态学,以粤港澳大湾区为例,提出了3种潮间带湿地再自然化的生境动态修复策略:保护和修复潮间带湿地的完整性,恢复潮间带湿地的景观风貌和恢复关键性生物生境。这些策略是对通用生境修复策略的优化、整合以及提升,以期为气候变化下基于自然的潮间带湿地保护和修复实践提供新方法。研究过程中还发现,潮间带湿地除了受与其连通的感潮河涌潮汐动力影响以外,越往出海口方向,越容易受到海平面上升的影响。这一发现与 Hughes Michael G.等^[37]的研究结果相同,尤其是红树林和盐沼等潮间带湿地类型的分布与海平面上升具有较强的相关性。接下来研究将进一步使用随机森林分类模型预测当前粤港澳大湾区潮间带湿地的分布和演替,以期指导规划潜在的湿地迁移途径和潮间带湿地恢复实践。

参考文献:

[1] 仲启铨,王开运,周凯,等.潮间带湿地碳循环及其环境控制机制研究进展[J].生态环境学报,2015,24(1):174-182.

[2] 智超,吴文挺,苏华.潮汐和植被物候影响下的潮间带湿地遥感提取[J].遥感学报,2022,26(2):373-385.

[3] MURRAY N J, PHINN S R, DEWITT M, et al. The global distribution and trajectory of tidal flats[J]. Nature, 2019(565):222-225.

[4] SONG S, WU Z, WANG Y, et al. Mapping the Rapid Decline of the Intertidal Wetlands of China Over the Past Half Century Based on Remote Sensing[J]. Frontiers in Earth Science, 2020(8):16.

[5] 李载鸣,郭世杰,陈嘉芬.台湾西南滨海地区土地利用变迁对生态环境之影响[C]//内蒙古农业大学,北京中国科学院地理科学与资源研究所,台湾中国文化大学地理学系,等.海峡两岸环境与资源学术研讨会论文集.内蒙古:内蒙古人民出版社,2008:177-183.

[6] 任武阳,王成,刘红玉,等.基于鸟类生境需求的植被景观覆盖度多样性——以江苏盐城滨海湿地为例[J].生态学杂志,2019,38(12):3870-3877.

[7] 孙吟诗.福建晋江河口湿地恢复过程中土壤碳分布特征及环境意义[D].泉州:华侨大学,2017.

[8] 杨璋璋.基于生态修复的湿地景观营造模式——以海口迈雅河区域生态修复项目为例[J].现代园艺,2022,45(10):53-55.

[9] MARCUS L. Restoring Tidal Wetlands at Sonoma Baylands, San Francisco Bay, California[J]. Ecological Engineering, 2000,15(3/4):373-383.

[10] 孟海星.崇西湿地潮沟鱼类生态特征与河口鱼类生境恢复技术研究[D].上海:华东师范大学,2012.

[11] 严飞,董学刚.长江口炮台湾湿地公园生态景观型海堤设计[J].人民长江,2012,43(S1):7-10.

[12] 吴淑邦,蔡永富,钱军,等.海口市五源河河流湿地修复效果分析[J].热带林业,2019,47(4):55-58.

[13] 厉红梅,李适宇,蔡立哲.深圳湾潮间带底栖动物群落与环境因子的关系[J].中山大学学报(自然科学版),2003(5):93-96.

[14] 何斌源,赖廷和,王欣,等.肇庆先康州湾滨海湿地潮间带大型底栖动物群落次级生产力[J].生态学杂志,2013,32(8):2104-2112.

[15] 张衡.长江河口湿地鱼类群落的生态学特征[D].上海:华东师范大学,2007.

[16] 许宇田.长江口南汇东滩潮间带盐沼湿地鱼类物种多样性及其营养结构[D].上海:华东师范大学,2019.

[17] 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.

[18] KUMBIER K, ROGERS K, HUGHES M G, et al. An Eco-Morphodynamic Modelling Approach to Estuarine Hydrodynamics & Wetlands in Response to Sea-Level Rise[J]. Frontiers in Marine Science, 2022(9):10.

[19] 国家林业和草原局国家公园管理局湿地管理司.《湿地公约》中英文文本[EB/OL].[2022-12-30].<http://www.forestry.gov.cn/sdzg/4706/20210412/104558999922367.html>.

[20] 广东省气象局,香港天文台,澳门地球物理暨

气象局.粤港澳大湾区气候监测公报(2021)[Z].2022.

[21] 广东省水利厅.西、北江下游及其三角洲网河河道设计洪水水面线(试行)[Z].2002.

[22] 陈文龙,袁菲,张印,等.粤港澳大湾区防洪(潮)对策研究[J].中国防汛抗旱,2022,32(7):1-4.

[23] 季缘.广州海珠国家湿地公园二期水鸟栖息地改造设计研究[D].广州:华南理工大学,2020:62.

[24] 李学峰,岳奇,胡恒,等.围填海活动的海洋环境与生物资源影响及对策建议[J].海洋开发与管理,2023,40(2):105-114.

[25] WEI ZL, MO JH, HUANG RP, et al. Physiological Performance of Three Calcifying Green Macroalgae *Halimeda* Species in Response to Altered Seawater Temperatures[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020(2):89-100.

[26] 柳林青,刘之威,何泉,等.粤港澳大湾区潮间带大型海藻多样性与生物量分布格局[J/OL].生态学杂志;1-10[2022-12-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20220617.1205.002.html>.

[27] 党二莎,唐俊逸,周连宁,等.珠江口近岸海域水质状况评价及富营养化分析[J].大连海洋大学学报,2019,34(4):580-587.

[28] 崔新月,莫武秋,廖建波.粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素[J].环境科学,2022,43(3):1375-1383.

[29] 杨聪辉,王宝华.网河区河涌群闸联控调水补水研究[J].广东水利水电,2010(11):12-14,17.

[30] What are Nature-Based Solutions(NBS)?[EB/OL].[2022-12-30].<https://www.nature-basedsolutions.com>.

[31] 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.

[32] 洗雨铨,徐彬瑜,翁殊斐,等.广州城市园林绿地食源树种应用及其生态景观营造[J].中南林业科技大学学报,2020,40(2):142-147.

[33] 孙延军,林石狮,蒋永萍,等.华南地区公园绿地鸟栖植物初步调查研究[C]//中国风景园林学会.中国风景园林学会2017年会论文集.北京:中国建筑工业出版社,2017:350-355.

[34] 孙健,贺锋,吴振斌,等.影响草鱼摄食水生植物因素的研究进展[J].水产学杂志,2019,32(3):53-57.

[35] 黄睿婧,蔡立哲,叶洁琼,等.广州南沙十四涌潮间带三种生境的大型底栖动物群落比较[J].生态学杂志,2010,29(6):1187-1192.

[36] 张晓君,管伟,朱宁华,等.广州南沙人工林海桑属群落及土壤的动态变化[J].中南林业科技大学学报,2014,34(9):103-106,116.

[37] HUGHES M G, GLASBY T M, HANSLAW D J, et al. Random Forest Classification Method for Predicting Intertidal Wetland Migration Under Sea Level Rise[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022:12.

作者简介:

许哲理/1987年生/女/广东广州人/硕士/广州园林建筑规划设计研究总院有限公司(广州510440)/风景园林设计高级工程师/专业方向为城乡人居环境规划与设计、生态规划、乡村景观