

DOI: 10.20103/j.stxb.202305261116

董欣怡, 祝明建, 栾博, 管少平, 林丰泽. 海平面上升对粤港澳大湾区沿海生境脆弱性评估. 生态学报, 2024, 44(12): 5116-5127.

Dong X Y, Zhu M J, Luan B, Guan S P, Lin F Z. Vulnerability assessment of coastal habitats in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from sea-level rise. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5116-5127.

海平面上升对粤港澳大湾区沿海生境脆弱性评估

董欣怡¹, 祝明建^{1,*}, 栾博², 管少平¹, 林丰泽¹

¹ 华南理工大学设计学院, 广州 510000

² 北京大学深圳研究院绿色基础设施研究所, 深圳 518000

摘要: 全球气候变暖所导致的海平面上升和快速城镇化将对沿海生境的分布和景观格局造成重大影响。评估海平面上升影响下的滨海湿地的脆弱性是对区域生态环境进行修复治理的重要依据。以粤港澳大湾区为例, 基于 SLAMM 模型和 Fragstas 模型, 针对六种海平面上升和土地利用耦合情景, 对红树林、盐沼和潮滩三类海岸生境在 2100 年的面积变化、分布状况和脆弱程度进行了预测和分析。结果表明: 1) 随着海平面上升, 红树林和潮滩生境遭受严重退化。其中, 红树林高脆弱性区主要分布在西江口、珠江口和黄茅海东岸。潮滩高脆弱性区则平均分布在大湾区沿海地带。相比之下, 盐沼生境受海平面上升的影响较小。2) 与红树林和潮滩相比, 土地利用模式对盐沼生境的影响最为显著。在保护已开发用地的情景下, 珠江口西侧的盐沼面积大幅增加, 脆弱性程度低。在保护所有旱地的情景下, 盐沼生境面积虽然基本维持, 但景观格局破坏严重, 脆弱性程度高。本研究建议针对高脆弱区, 动态调整土地利用策略, 清理沿海湿地向内迁移的空间, 增强沿海生境应对海平面上升的适应性。本研究可为沿海湿地的管理和保护提供科学支持。

关键词: 海平面上升; 沿海生境; 脆弱性评估; SLAMM 模型; 景观生态格局; 粤港澳大湾区

Vulnerability assessment of coastal habitats in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from sea-level rise

DONG Xinyi¹, ZHU Mingjian^{1,*}, LUAN Bo², GUAN Shaoping¹, LIN Fengze¹

¹ College of Design, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China

² Institute of Green Infrastructure, Shenzhen Research Institute, Beijing University, Shenzhen 518000, China

Abstract: The rising sea levels caused by global climate change and rapid urbanization will have a significant impact on the distribution and landscape patterns of coastal habitats. Assessing the vulnerability of coastal wetlands under the influence of sea level rise is an important basis for ecological restoration and management of the regional environment. Taking the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as an example, this study used the SLAMM model and Fragstas model to predict and analyze the changes in area, distribution, and vulnerability of mangroves, salt marshes, and tidal flats under six scenarios of sea level rise and land use coupling by the year 2100. The results showed that: 1) With the rising sea levels, mangroves and tidal flats are experiencing severe degradation. The high vulnerability zones of mangroves are mainly distributed in the estuaries of the Xi Jiang River, Zhu Jiang River, and the east coast of the Huang Mao Sea. The high vulnerability zones of tidal flats are evenly distributed along the coastal areas of the Greater Bay Area. In comparison, salt marsh habitats are less affected by sea level rise. 2) Compared to mangroves and tidal flats, land use patterns have the most significant impact on salt marsh habitats. Under the scenario of protecting the developed land, the salt marsh area in the

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271735); 国家自然科学基金项目(52078004); 国家社会科学基金项目(20BG117); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2021A1515012246)

收稿日期: 2023-05-26; **网络出版日期:** 2024-04-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhujm@scut.edu.cn

western part of the Zhu Jiang River estuary significantly increases with low vulnerability. Under the scenario of protecting all upland areas, although the salt marsh habitat area is maintained, the landscape pattern is severely disrupted, resulting in high vulnerability. The study suggests dynamically adjusting land use strategies for high-vulnerability areas, clearing space for coastal wetlands to migrate inland, and enhancing the adaptability of coastal habitats to sea level rise. The findings can provide scientific support for the management and protection of coastal wetlands.

Key Words: sea level rise; coastal habitats; vulnerability assessments; SLAMM models; landscape ecological patterns; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

沿海湿地生态系统位于水圈、大气圈和生物圈的交汇带,包括滩涂、红树林、盐沼、珊瑚礁、海草床等,具有极高的生态环境价值^[1],能够调节小气候、净化水质、防护海岸、促淤造陆、降解污染物,是植物、鸟类、鱼类、底栖动物的重要栖息地,对于保护生物多样性有重要意义^[2-3]。但同时,沿海湿地也是极其脆弱的生态敏感区,是我国湿地保护的薄弱环节。研究表明,我国沿海湿地遭到极大的破坏,1950年至2014年,共损失沿海湿地 $8.01 \times 10^6 \text{ hm}^2$,总损失率达58%^[4]。其中盐沼和潮滩面积已减少57%,红树林减少73%,珊瑚礁减少80%^[5-9]。尤其是华南地区,近40年总体丧失了约 $3.34 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的沿海湿地,丧失率高达69.15%^[4],红树林生境面积从40000 hm^2 减至15122 hm^2 ^[7],生境生态功能退化,呈现出高脆弱性^[8]。

其原因主要表现在自然和人为两个方面^[2]。气候变化引起的海平面上升是导致沿海湿地大面积丧失和退化的最大因素之一。IPCC第六次评估报告中指出,到2100年,海平面将可能上升28—101 cm。《中国海平面公报》指出,1980—2021年,中国沿海海平面上升速率为3.4 mm/a,高于同期全球水平。这样的上升速度会在直接淹没沿海湿地的同时通过加剧侵蚀海岸、洪水、风暴潮,增加河口、蓄水层和湿地的盐度的方式改变湿地原本的性质,造成沿海生态系统功能和结构的退化和丧失^[10-11]。

此外,人类活动会加剧沿海湿地的退化。有学者预测,到21世纪80年代,海平面上升将减少全球22%的湿地,叠加人为因素,超过70%的湿地消失^[12]。过度的海岸带围垦、养殖及城市化建设等活动,改变了海岸带原有的自然属性,占据了湿地向内陆转移的空间,使其无法发挥本身沉积和潜在扩张的能力以适应气候变化,最终导致该区域湿地被海水淹没,生境面积萎缩,景观格局破碎化^[13]。

为了预测沿海湿地生境的变化情况,海平面上升的湿地影响模型(Sea Level Affecting Marsh Model; SLAMM)、生态系统景观空间模拟(Barataria-Terrebonne Ecosystem Landscape Spatial Simulation; BTELSS)以及ArcGIS水文分析水文模型被开发以模拟海平面上升产生的影响。其中,SLAMM模型是使用最广泛的模型,它是基于GIS技术的网格模型,通过线性关系和决策树表达海岸带地类间的关系,预测不同地物类型之间的转化,实现定量评估海平面上升对海岸带湿地生境分布的面积影响和空间差异,主要包括淹没、侵蚀、冲刷、土壤饱和、淤积五种物理作用以及模拟方法^[14]。

从研究尺度上看,既有国家尺度的海滨湿地格局演变研究,也有省域、流域、重要湿地分布区域尺度和单一湿地在全球尺度下的研究。但是以城市群湿地为单位进行系统预测和分析的研究不多。国内学者采用SLAMM模型评估海平面上升对雷州半岛、广西海岸带红树林的影响^[15-17]。在研究对象上,有关海平面上升对研究区内单一湿地类型影响的研究比较多,对整体湿地生境系统的演变规律探究较少,一定程度上限制了对湿地保护和修复的系统性考虑。在分析方法上,常常将面积作为唯一的评价指征,忽略景观格局的变化与适应性措施相结合。在驱动因素上,大多数研究仅把海平面上升作为单一影响因素,较少有研究考虑海平面上升和土地利用同时作用的情况,忽略了政府未来的土地利用政策对湿地的分布变化的影响。

因此,本研究以粤港澳大湾区为例,基于SLAMM模型,耦合海平面上升和土地利用情景,解决以下问题:1)定量分析未来沿海湿地分布变化;2)构建粤港澳大湾区脆弱性评价体系,并实现海平面上升影响下沿海湿地生境脆弱性定量空间评价;3)比较不同驱动因素组合情景下,粤港澳大湾区沿海生境脆弱性是否存在差异;4)比较不同驱动因素对各沿海生境的影响是否存在差异。研究结果可以为后续沿海湿地生态系统可持

续规划管理提供科学依据和决策支持。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

粤港澳大湾区位于我国华南地区(图1),涵盖广州、深圳、珠海、佛山、东莞、惠州、中山、江门、肇庆6市和香港、澳门2个特别行政区,总面积5.6万km²。人口密集,常住人口约8631万,平均密度为1541人/km²。广东省统计局数据显示,粤港澳大湾区GDP超13万亿元人民币,是中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一。

大湾区主要分布在珠江三角洲冲积平原,三面被低山丘陵包围,南面临海,地处海陆交互作用地带,岸线曲折,峡湾众多,海河交汇地形地貌特殊且受潮汐影响明显。复杂的海岸带环境为沿海生物提供了优越多样的生态条件。红树林、滩涂、珊瑚礁、海草床等湿地资源丰富,共同构成南部沿海生态防护带^[18-19]。

然而,随着高速经济发展和高强度人类活动干扰,大湾区湿地面积急剧减少,生态环境脆弱性显著增加。有研究表明,2006—2016年大湾区范围内不透水面扩张显著,总面积从12127.69 km²增至20188.87 km²,年增长速率为806.12 km²^[20]。区内各类自然资源面积(除港澳地区的地表水、红树林、海岸线、湿地、耕地、林地、园地、草地等)明显减少^[21]。其中深圳海岸带湿地萎缩退化,自然岸线保有率不断下降,人工岸线占比由1988年的37%增长至2018年的57%^[22]。

1.2 生态脆弱性评估

1.2.1 脆弱性评价指标体系

生态脆弱性取决于生态暴露度、生态敏感性和生态适应性^[16]。参照相关研究的评估方式^[23],将生境面积变化(HC)、景观格局指数(LP)和保护比例(PR)作为要素层,公式为:

$$V=HC+LP-PR \quad (1)$$

1.2.2 景观格局指数

基于研究区特点选择合适的景观格局指数能反映研究区内不同生境类型的结构特征及所有湿地整体特征,这有助于对研究区的生态环境进行综合有效的评估和管理^[24-25]。本文使用Fragstas软件,在景观维度上计算研究区面积加权平均形状因子(SA)、破碎度(D)、分离度(S)和斑块类型面积(TA),公式为:

$$LP=SA+D+S-TA \quad (2)$$

1.2.3 定量空间评估

空间量化评价指标是实现脆弱性评价的基础^[16]。本文在Arcgis平台上,创建1233个边长为1km的基本评价单元,覆盖研究区沿海生境分布范围。根据脆弱性指数 V 的计算方法,将指标图层进行等权重加权求和,得到每个评价单元的脆弱性指数,设置符号系统分级色彩,将结果分为低(≤ -10)、中($-10-0$)、高($0-10$)和极高(≥ 10)四类,输出脆弱性评估空间分布图。

1.3 研究情景设置

当前已有研究多仅考虑海平面上升对沿海湿地的影响,对海平面上升和土地利用双重压力影响的研究比较少。因此本文将海平面上升和土地利用作为两类驱动因子,设置研究情景如(表1)。探讨不同情景下湿地脆弱性的变化情况,以制定相应的适应性规划策略来应对未来的挑战。海平面上升情景选择0.5m、1.0m和

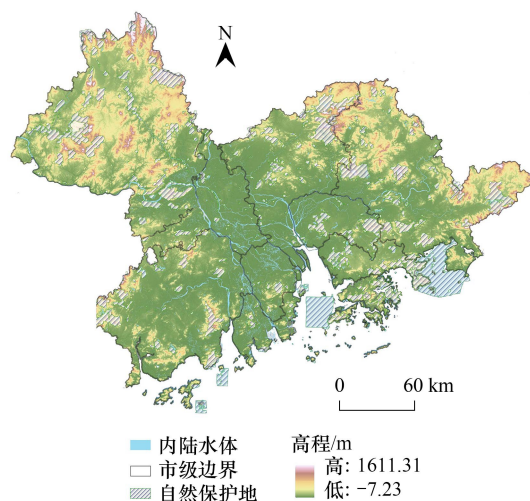


图1 研究区范围

Fig.1 Study area extent

2.0m作为低、中和高三种不同水平海平面上升预景。其中,0.5m 和 1m 在 IPCC 最新对 2100 年海平面上升预测幅度 0.28m—1.01m 之间,2.0m 是 IPCC 预测至 2100 年在南极海平面以下的冰融化的情况下全球海平面最糟糕的情景。土地利用情景选择 SLAMM 中内置的保护已开发用地情景和保护所有旱地情景^[3]。

表 1 2100 年 6 种海平面上升和土地利用耦合情景设置

Table 1 Six captivating scenarios for sea level rise and land use in 2100

情景 Scenario	海平面上升高度/m Sea level rise scenarios	土地利用情景 Land use scenarios
情景一:PDDL-0.5mScenario one:PDDL-0.5m	0.5	保护已开发用地情景(PDDL):默认已开发用地将维持现状,不可转变成其他土地利用类型,未开发用地
情景二:PDDL-1mScenario two:PDDL-1m	1	受海平面上升影响进行土地自然转换。
情景三:PDDL-2mScenario three:PDDL-2m	2	保护所有旱地情景(PADL):保护已开发用地和未开
情景四:PADL-0.5m Scenario four:PADL-0.5m	0.5	发用地,默认两者都不会被转换。
情景五:PADL-1m Scenario five:PADL-1m	1	
情景六:PADL-2m Scenario six:PADL-2m	2	

* PDDL: 保护已开发用地情景 Protected developed dry land; PADL: 保护所有旱地情景 Protected all dry land

1.4 数据制备与处理

1.4.1 土地利用数据处理

SLAMM 模型中划分出约 26 种地物类型,并且每种地物类型都有一定的高程范围,决策树判断海平面上升是否超过地物的高程范围,一旦超过就可能发生地物之间的转换。因此,选择合适的湿地类型分类是保证模型结果真实可靠的基础^[16]。

但由于既有的土地利用数据对于湿地的分类过于笼统,无法满足 SLAMM 模型的要求,因此本研究融合 ESA2020 年发布的土地利用数据和湿地数据^[26]按照 SLAMM 内置的编码进行转换。主要分为潮滩、盐沼、红树林、已开发旱地、未开发旱地、开放水域等(表 2)。

表 2 基于 SLAMM 分类系统的土地利用数据分类

Table 2 Classification of land use data based on SLAMM classification system

土地利用类型 Type of land use	SLAMM 分类 SLAMM classification	SLAMM 编码 SLAMM code	数据来源 Data resource
农田、建设用地 Farmland, construction land	已开发用地	1	ESA2020
林地、灌木、草地、空地 Woodland, shrubs, meadows, clearings	未开发用地	2	ESA2020
沼泽 Swamp	沼泽	3	Zhang 等, 2023
湿地、内陆沼泽 Wetlands, inland swamps	内陆沼泽	5	Zhang 等, 2023;ESA2020
盐沼 Salt marsh	盐沼	7	Zhang 等, 2023
红树林 Mangrove	红树林	9	Zhang 等, 2023
潮滩 Tidal flat	潮滩	11	Zhang 等, 2023
河滩 River beach	河滩	16	Zhang 等, 2023
永久水体 Permanent water	开放水域	19	ESA2020

1.4.2 高程数据和坡度数据处理

高程数据选用欧洲航天局 2021 年发布的哥白尼数字高程模型(Corpernicus Digital Elevation Model),分辨率为 30m,包含地表建筑、基础建设、植被、水体、海岸线、海滨线等地形结构信息。坡度数据,利用 Arcgis 软件工具箱中的地理分析工具获得。并按照 SLAMM 的要求,在保证栅格大小和行列数一致的前提下,使用数据转换工具,将高程数据和坡度数据转换为 ASCII 文件格式。

1.4.3 潮差数据处理

有研究表明,潮差与红树林面积减少率呈负相关关系^[17]。本研究的潮差数据通过网络爬虫的方式获取,

来源于国家海洋科学数据中心 (<http://mds.nmdis.org.cn/pages/home.html>)。通过收集近 3 年粤港澳大湾区沿岸共 27 个潮位站(图 2)每日 4 次潮位值计算各点位年平均最低和最高潮位差,再使用克里金插值法得到潮差表面,如图 3,研究区潮差范围为 1.39—2.05 m。

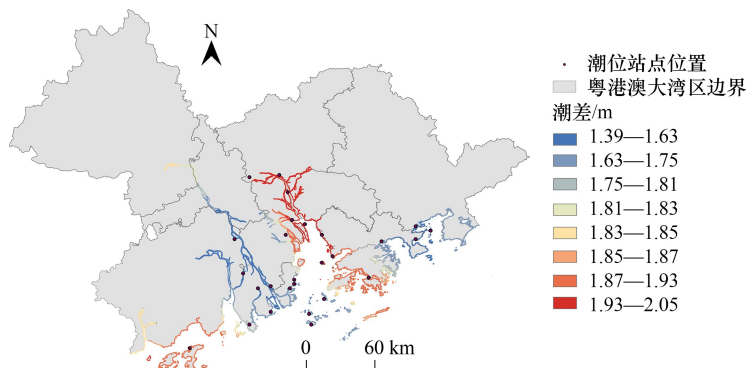


图 2 粤港澳大湾区各潮位站点位置及潮差值

Fig.2 Location of tide stations and Tidal gauge in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

1.4.4 盐度数据处理

盐度数据集来源于黄光玮等人的研究^[27],结合当前盐度值和 SLR0.5m, 1.0m 和 2m 情景下盐度增长率,计算未来盐度值,并使用 Arcgis 中的克里金插值工具生成未来盐度图。在进行空间插值前对分布点数据进行分析,经过异常点剔除后,对数变换数组,在直方图和 qq 图中大致符合正态分布,满足克里金插值法要求,插值结果的拟合效果良好。

1.5 模型校验

为评估 SLAMM 模拟的准确性,在预测前建立校准模型^[28]。采用模型模拟 2020 年沿海生境分布,其结果与实际生境一致性高达 92.78%—95.26%,表明模型对研究区生境预测具有较高的可信度。

2 结果与分析

2.1 沿海生境分布变化

模拟结果(图 3)显示,两种保护情境下,总体上大湾区西部沿海湿地受海平面上升影响大于东部地区,其中,红树林生境面积和潮滩生境面积均呈现退化趋势。盐沼生境面积在不同情景下变化差异明显。在保护已开发用地情景下,盐沼生境面积随海平面上升逐渐增加。在保护所有旱地情景下,盐沼生境面积随海平面上升呈现先减少后增加的动态变化。

当海平面上升 0.5m, 1m, 2m 时,红树林生境由 83.46km²分别减少到 68.85km², 60.25km²和 37.54km²,各情景面积变化率为-18%, -28%, -55%,这表明随着海平面上升程度加快,红树林生境将加速减少。其中生境损失面积最多的区域集中在镇海湾、黄茅海、西江口、珠江口近岸(图 4)。当海平面上升 0.5m 和 1m 时被淹没的红树林主要转化为潮滩和河口开放水域。当海平面上升 2m 时被淹没的红树林全部转化为河口开放水域(图 5)。

在保护已开发用地情景下,潮滩生境由 1013.4km²减少到 841.14km², 775.7km²和 377.7km²,面积变化率分别为-17%, -23%, -63%;在保护所有旱地情景下,潮滩生境面积减少到 841.14km², 769.78km²和 357.05km²分别为-17%, -24%, -65%。统计数据表明,潮滩面积随海平面上升程度加快逐渐减少。其中潮滩生境损失面积最多的区域集中在广海湾,黄茅海,西江口,珠江口(图 4)。由图可知,随着海平面上升,尽管一部分未开发用地、沼泽、内陆沼泽、盐沼、红树林转化为潮滩,但其增加的生境面积远比不上潮滩被转化为河口开放水域减少的面积,这种现象在 SLR2m 时尤其明显。在保护已开发用地情景下,盐沼生境面积由 155.03km²增加至

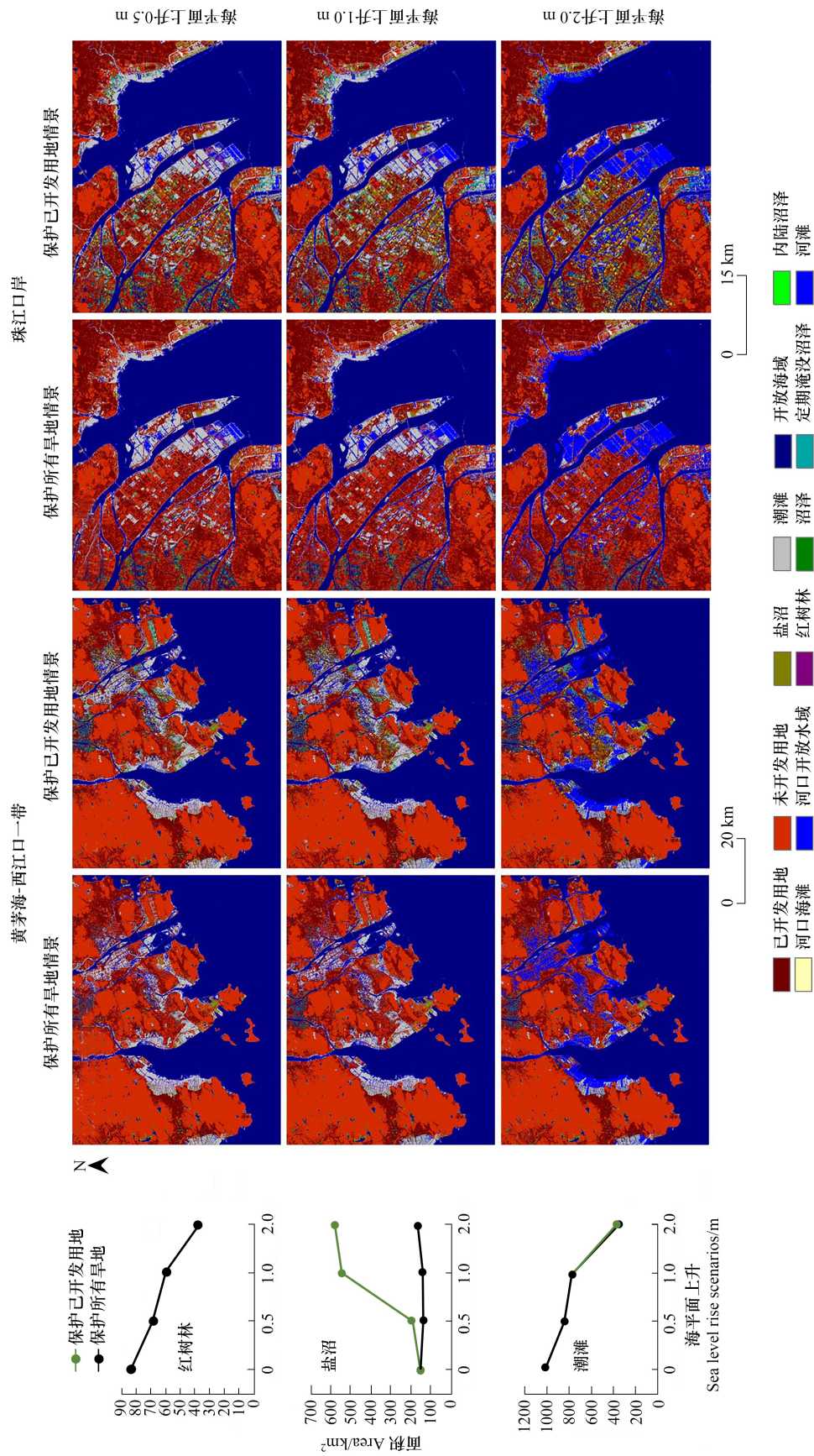


图3 使用SLAMM模型预测的不同情景下未来土地利用及面积统计
Fig. 3 Future land use map and area statistics map under different scenarios predicted by SLAMM model

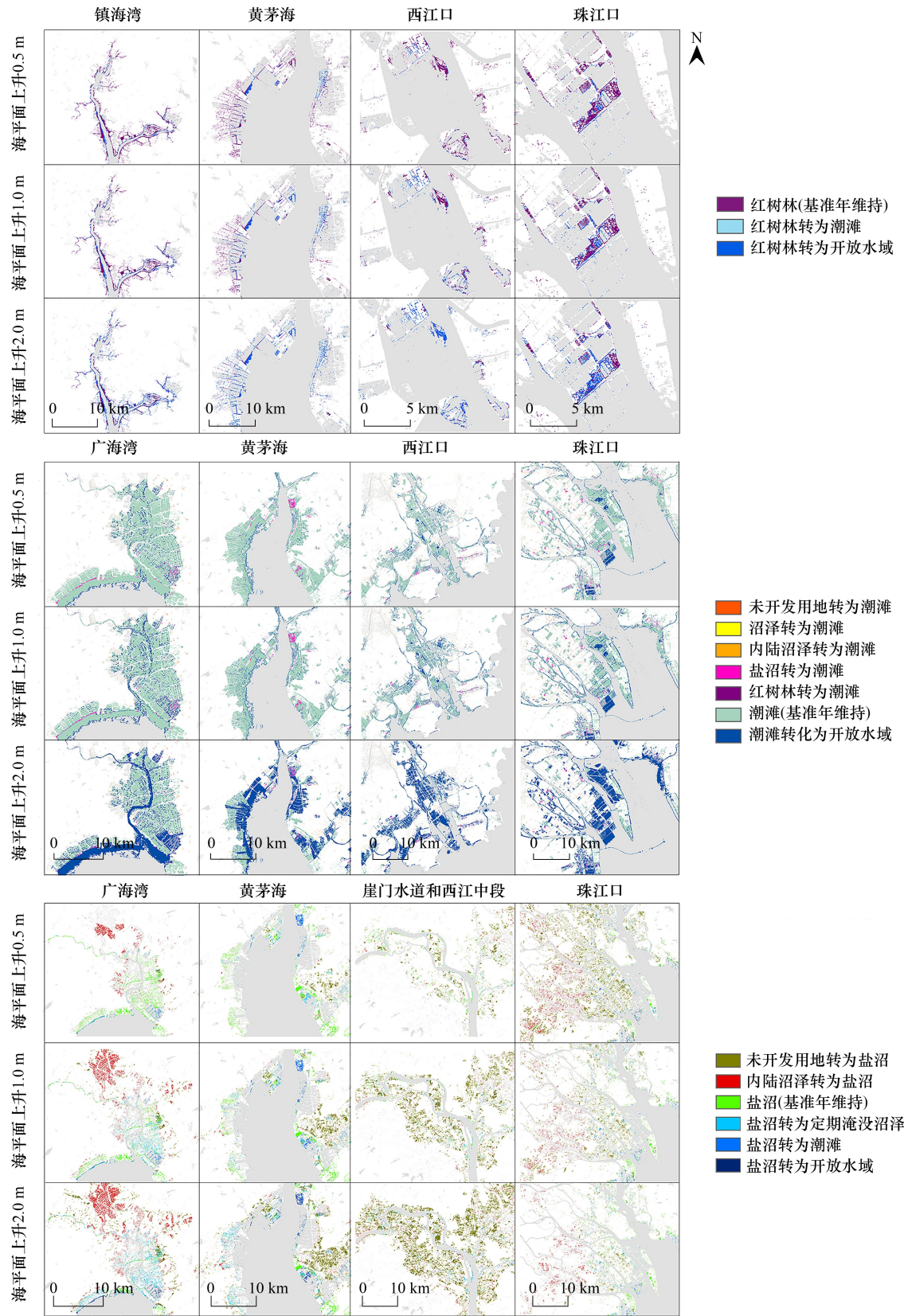


图 4 保护已开发用地情景下不同生境随海平面的变化状况

Fig.4 Changes in different habitats with sea level under the conservation of developed land scenarios

194.68km², 547.79km²和 581.33km², 变化率分别为+26%, +253%, +275%。尽管由于海平面上升向海侧的盐沼可能转化成定期淹没沼泽、潮滩、河口开放水域,但盐沼生境面积可能会逐渐扩张,潜在扩张范围超过 SLR 造成的淹没范围,约 75%的潜在新增盐沼由未开发用地转化而来,约 24%由内陆沼泽转化而来、1%由河口开放水域转化而来,且其生境潜在扩张区域主要集中在岸线向内陆方向和水系向内陆延伸的两岸。如图 5 所示,广海湾沿岸盐沼随海平面上升生境斑块逐渐向北部转移,当海平面上升 2m 时,最远向北延伸 2km。黄茅海沿岸盐沼生境斑块逐渐向东侧转移,并随着海平面上升逐渐占领整个平沙镇和南水镇未开发旱地。衙门水道和西江中段由于地势低平是未来盐沼大面积扩张的区域。珠江口是研究区范围内盐沼生境转移受海平面上升影响最大的地区,在三种海平面上升情景下,生境斑块最远向西北侧延伸的距离分别为 33.6km, 59.5km, 113.4km。在保护所有旱地情景下,生境斑块最远向西北侧延伸的距离分别为 33.6km, 59.5km, 113.4km。

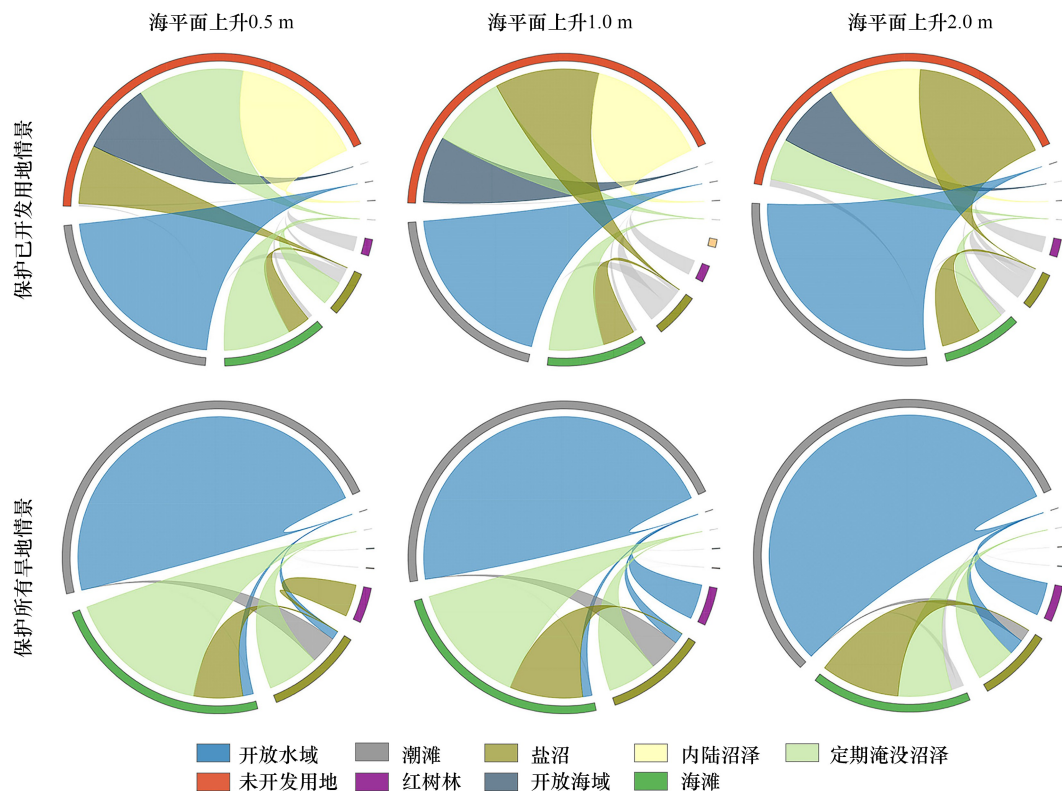


图 5 不同地类之间的转换关系

Fig.5 Conversion relationships between different ground classes

在保护所有旱地情景下盐沼生境在海平面上升 0.5m 和 1m 情景下面积由 155.03 km²减少至 137.3km², 142.41km², 面积变化率分别为-11%, -8%, 在海平面上升 2m 情景下面积增加至 170.21km², 面积变化率为+10%。统计数据表明,当海平面上升 0m—1m 时,盐沼生境面积总量相较于基准年都有不同程度减少,但减少趋势随海平面上升逐步放缓,当海平面上升 2m 时,盐沼生境面积总量大于基准年。

2.2 沿海生境脆弱性预测结果

本文采用分级色彩,将脆弱性评估结果分为低(≤ -10)、中($-10—0$)、高($0—10$)和极高(≥ 10)四个等级并统计各个等级的占比情况(图 6)。

总体上,不同因素对不同沿海生境脆弱性两个组成要素的驱动作用有所区别。生境面积变化在两个驱动因素共同作用下受影响最大,至 2100 年红树林生境面积最多将减少 55%,潮滩生境面积最多将减少 65%,盐沼生境面积最多将减少 11%。不同生境的景观格局受土地利用和海平面上升影响程度不同。其中红树林和

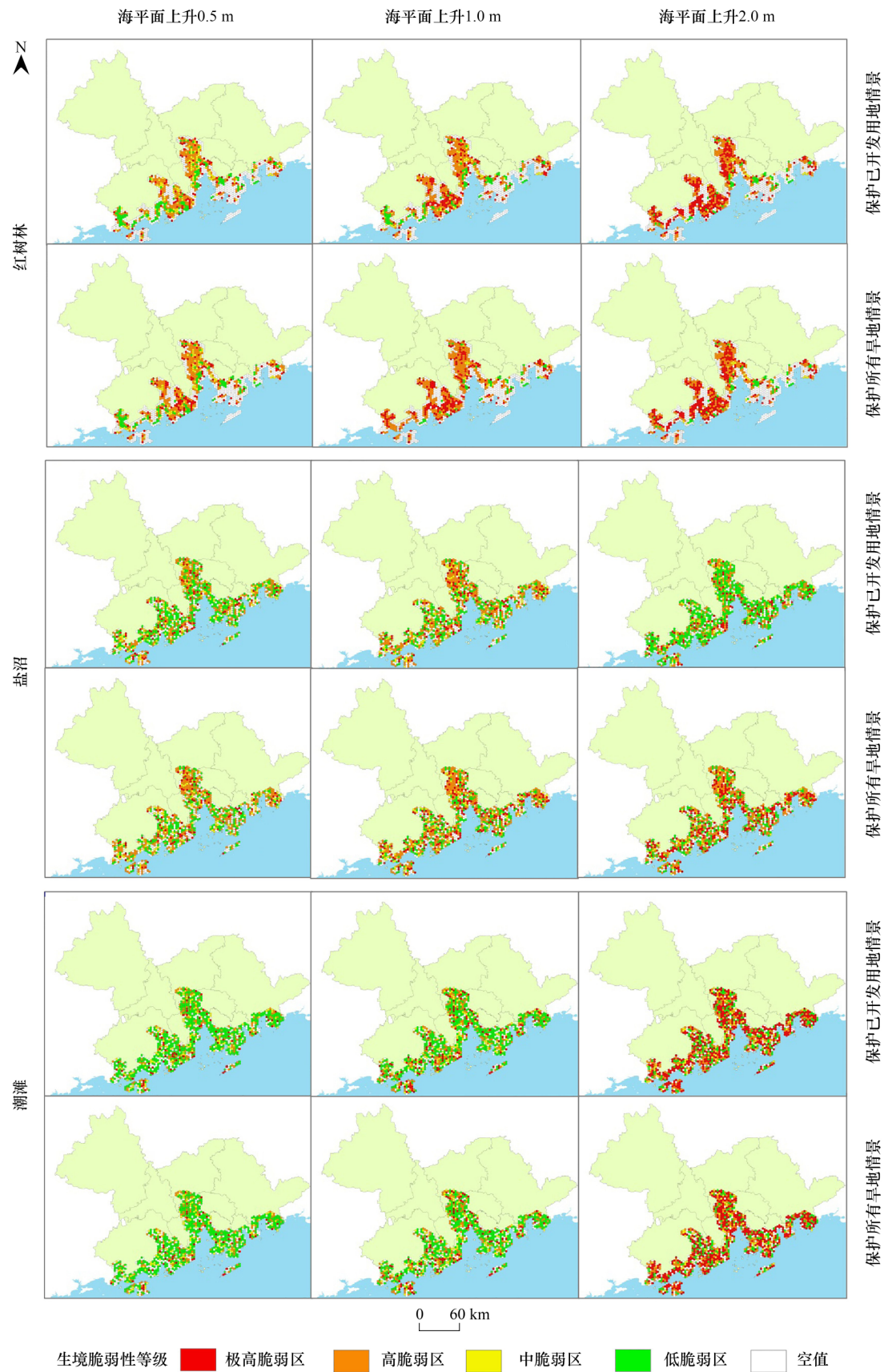


图 6 不同情景下脆弱性分析结果

Fig.6 Vulnerability analysis results under different scenarios

潮滩的生态格局受土地利用的影响不大,但对海平面上升因素很敏感。盐沼的生态格局受土地利用的影响较大,但对海平面上升因素不敏感。

生境脆弱性综合评价结果显示,在 PDDL-0.5m, PDDL-1m 和 PDDL-2m 情景下,有 14.95%, 25.40% 和 45.14% 的红树林网格单元呈现出极高脆弱性,主要分布在西江口与珠江口近岸、黄茅海东岸,极高脆弱性区域随海平面上升逐渐增加。有 22.93%, 15.82% 和 8.85% 的红树林网格单元呈现低脆弱性,集中分布在镇海湾、黄茅海西岸、深圳湾近岸、淇澳岛西岸,低脆弱区随着海平面上升呈减少趋势。

有 7.13%, 14.34% 和 47.14% 的潮滩网格单元呈现出极高脆弱性, 57.95%, 52.10% 和 21.50% 的潮滩网格单元呈现低脆弱性,极高脆弱性区域和低脆弱性区域分布在粤港澳大湾区沿海地带,极高脆弱性区域随海平面上升呈增长趋势,低脆弱性区域随海平面上升呈减少趋势,且都在 SLR1m 至 2m 区间内,变化速率最明显。

有 12.66%, 10.38%, 11.88% 的盐沼网格单元呈现极高脆弱性,平均分布在沿海近岸,低脆弱性区随海平面上升呈增加趋势。在 PADL-0.5m, PADL-1m 和 PADL-2m 情景下,有 20.17%, 32.22% 和 45.14% 的红树林网格单元呈现出极高脆弱性, 18.43%, 7.40% 和 8.85% 的红树林网格单元呈现出低脆弱性, SLR0.5m 时集中分布在镇海湾、黄茅海西岸、深圳湾近岸、淇澳岛西岸, SLR1m 和 SLR2m 时低脆弱性区域分布在深圳湾近岸、淇澳岛西岸以及镇海湾南部局部地区出现。相比 PDDL 情景,极高脆弱性区略有增加,低脆弱性区略有减少。

有 6.30%, 13.28% 和 50.19% 的潮滩网格单元呈现出极高脆弱性, 63.74%, 53.12% 和 19.75% 的潮滩网格单元呈现出低脆弱性。极高脆弱性区域和低脆弱性区域分布位置与 PDDL 情景类似。极高脆弱性区略有增加,低脆弱性区在 SLR0.5m 时减少明显,在 SLR1m 与 SLR2m 时略有减少。14.51%, 28.64% 和 29.23% 的盐沼网格单元呈现极高脆弱性,极高脆弱性区随海平面上升呈增长趋势,相比 PDDL 情景,极高脆弱性区有所增加, 30.81%, 24.22% 和 26.11% 的盐沼网格单元呈现低脆弱性,低脆弱性区随海平面上升逐渐减少,相比 PDDL 情景,低脆弱性区有所减少。

3 讨论

3.1 海平面上升对不同沿海生境的影响

通过使用 SLAMM 模型模拟海平面上升对不同类型的沿海湿地的影响,结果表明,盐沼对于海平面上升体现出较高的适应性,这是因为盐沼植物具有较高的耐盐性和特殊的生理机制,使其能够在高盐环境下生长繁殖。同时,盐沼还能促进泥沙快速沉积和淤积,通过拦截和降低波浪能量来有效抵御海水的侵蚀。盐沼植物具备垂直生长的能力,通过持续生长和积累新的植物体,适应海平面上升的变化。此外,盐沼是一个复杂的生态系统,其中的生物之间存在相互作用和依赖关系,通过自我调节来适应环境变化。

相比之下,红树林和潮滩在面对海平面上升时可能会面临更大的挑战。红树林的生长需要稳定的水位和盐度,而潮滩则需要稳定的潮汐和水位。海平面上升可能会破坏这些稳定性,导致红树林和潮滩的生态系统受到影响。此外,结果表明零散分布的红树林更易受到海平面上升的影响,深圳湾、镇海湾、淇澳岛形成大面积连片集中分布区在应对气候变化及极端事件影响时显现出一定韧性,在 PADL-0.5m, PDDL-0.5m 和 PDDL-1.0m 情景下三地红树林皆呈现低脆弱性。

3.2 不同因素影响下沿海生境的变化

有研究表明,沿海湿地在海平面上升时,能够以增强生态系统持久性的方式积极调整其在潮间带内的位置^[29]。Nguyen 等人以新加坡海岸为例^[3],研究沿海湿地对 SLR 的恢复力时指出沿海湿地能通过自身沉积速率抵御海平面上升的影响。因此,单一的海平面上升因素不足以形成沿海湿地退化的主因。

但当人类活动介入时,这一趋势会发生改变。粤港澳大湾区海岸带开发活跃,伶仃洋沿岸的珠海、中山、深圳、东莞,大亚湾沿岸的惠州以及黄茅海沿岸的江门都有不同程度地开展滩涂围垦、填海造地等活动,改变岸线的自然形态,阻断了沿海生境动态演替的自然断面。本研究结果显示, PADL 情景下沿海生境的面积普遍小于 PDDL 情景下的面积。这表明当未开发用地被作为城市扩张的备用建设用地时,城市化的海岸线占用

了湿地的内陆边界,导致其无法发挥陆向迁移的能力以适应气候变化。

3.3 沿海生境适应性管理策略

陆向迁移被认为是沿海生境应对海平面上升适应性的主要途径,因此及时调整土地利用策略,退还湿地上游已围垦的养殖塘和耕地能够有效保障沿海湿地有充足向陆扩张的空间。针对粤港澳大湾区,基于以上研究结果,本文建议可以将 PADL 情景下极高脆弱性而 PDDL 情景下脆弱性低的区域划为重点保护对象,采取以自然恢复结合人工修复的方式,及时调整当地的土地利用策略,清理沿海湿地向内迁移的空间。此外,在注重面积增加的同时还应注重新增沿海生境出现生境斑块分散、景观格局差等问题。

根据本研究预测结果,随着海平面上升部分生境将迁出保护区。因此,当前静态化的保护区网络在气候变化影响下受到了挑战。未来的保护管理行动中,应对保护区划定进行动态调整,提高沿海生境对气候变化的适应性。

4 结论与展望

4.1 结论

本研究以粤港澳大湾区重要生态系统为研究对象,针对生态系统格局未来演变趋势问题,基于海平面上升影响模型(SLAMM),模拟了保护已开发用地和保护所有旱地情景以及海平面上升 0.5m, 1m 和 2m 情景下大湾区内红树林、潮滩、盐沼生境的演变趋势。并结合景观生态分析模型(Fragstas)计算不同情景下各生境脆弱性指数。主要结论如下:(1)不同生境类型受土地利用和海平面上升影响程度不同。红树林和潮滩受土地利用影响不大,但对海平面上升因素很敏感。盐沼受土地利用的影响较大,但对海平面上升因素不敏感。红树林和潮滩生境面积在不同土地利用情景下随海平面上升均呈现退化趋势,盐沼生境面积在 PDDL 情景下大量增加,在 PADL 情景下,以 1m 为临界值呈现先减少后增加的趋势。(2)不同情景下,沿海生境的脆弱性存在差异,与 PDDL 情景相比,PADL 情景中镇海湾和西江口的红树林生境与珠江口中部、东部盐沼生境脆弱性均有增加。(3)海平面上升将显著影响沿海湿地生境,动态调整土地利用模式和保护策略对降低脆弱性和实现可持续发展有重要意义。

4.2 研究局限与展望

大量基础数据获取、分析和模拟是海平面上升影响下沿海生境脆弱性评估的关键。由于数据缺失,本研究未考虑研究区未来地面沉降,海岸侵蚀,各生境自身淤积能力等因素。今后的研究可以加大应用新技术(遥感技术 RS、无人机技术等),实现大规模采集沿海生态系统自然环境和人类活动等多领域数据,提高气候变化预测模拟可信度。

本研究默认城市土地利用在未来不发生变化,但考虑到人类活动的开展,这种假设并不符合实际情况。因此,今后的研究可以采用未来土地利用模拟模型(Future Land Use Simulation; FLUS)和元胞自动机模型(Cellular Automata; CA)等方法,综合考虑城市发展、人口增长、经济发展和政策调整等因素对土地利用的影响。这样可以将土地利用格局的动态变化纳入到对沿海湿地影响的海平面上升的考虑中。

由于模型本身的限制,本研究对沿海生境的脆弱性评估仍处于假设状态,未考虑环境污染、物种入侵、自然灾害和其他多种自然或人为干扰可能对海岸带系统结构、功能和格局造成的影响。未来的研究应该进一步考虑各类外部环境关系,以降低脆弱性评估结果的不确定性。此外,本文中的脆弱性评价仅考虑自然过程,未来需要在此基础上结合人文因素,建立综合的脆弱性评价体系。这将有助于更全面地分析沿海湿地对海平面上升的脆弱性,并提供更准确的决策支持。

参考文献(References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the worlds ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [2] Guo H, Cai Y, Yang Z, Zhu Z, Ouyang Y. Dynamic simulation of coastal wetlands for Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area based on multi-temporal Landsat images and FLUS model. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107559.

- [3] Nguyen N T H, Friess D A, Todd P A, Mazor T, et al. Maximising resilience to sea-level rise in urban coastal ecosystems through systematic conservation planning. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 221: 104374.
- [4] Sun Z, Sun W, Tong C, Zeng C, Yu X, Mou X. Chinas coastal wetlands: conservation history, implementation efforts, existing issues and strategies for future improvement. *Environment International*, 2015, 79: 25-41.
- [5] Qiu J. Chinese survey reveals widespread coastal pollution. *Nature*, 2012.
- [6] Yang S L, Chen J Y. Coastal salt marshes and mangrove swamps in China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1995, 13(4): 318-324.
- [7] 彭逸生, 周炎武, 陈桂珠. 红树林湿地恢复研究进展. *生态学报*, 2008, 28(2): 786-797.
- [8] 周云轩, 田波, 黄颖, 吴文挺, 戚纤云, 舒敏彦, 胥为, 葛芳, 魏伟, 黄盖先, 张婷. 我国海岸带湿地生态系统退化成因及其对策. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10): 1157-1166.
- [9] Hughes T P, Huang H, Young M A L. The wicked problem of Chinas disappearing coral reefs. *Conservation Biology*, 2013, 27(2): 261-269.
- [10] Titus J G. Effect of climate change on sea level rise and the implications for world agriculture. *HortScience*, 1990, 25(12): 1567-1572.
- [11] Reed D, Wang Y, Meselhe E, White E. Modeling wetland transitions and loss in coastal Louisiana under scenarios of future relative sea-level rise. *Geomorphology*, 2019, 352: 106991.
- [12] Nicholls R J, Hoozemans F M J, Marchand M. Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses. *Global Environmental Change*, 1999, 9: S69-S87.
- [13] Liang S, Hu W, Liu J, Su S, Chen G, Chen S, Xie B, Du J, Liu W, Chen B. Mapping mangrove sustainability in the face of sea level rise and land use: a case study on Leizhou Peninsula, China. *Journal of Environmental Management*, 2023, 325: 116554.
- [14] 王宝强, 苏珊, 彭仲仁, 杨飞. 海平面上升对沿海湿地的影响评估. *同济大学学报: 自然科学版*, 2015, 43(4): 569-575.
- [15] 王金华, 温钊鹏. 粤港澳大湾区河口海岸生态修复策略研究——以东莞市滨海湾新区为例. *海洋开发与管理*, 2020, 37(6): 34-39.
- [16] 李莎莎, 孟宪伟, 葛振鸣, 张利权. 海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价. *生态学报*, 2014, 34(10): 2702-2711.
- [17] 潘嵩, 王慧, 李欢, 李文善, 徐浩, 金波文. 基于 SLAMM 模型的海平面上升对广西沿海红树林影响研究. *海洋通报*, 2020, 39(3): 325-334.
- [18] 贾凯, 陈水森, 蒋卫国. 粤港澳大湾区红树林长时间序列遥感监测. *遥感学报*, 2022, 26(6): 1096-1111.
- [19] 柏叶辉, 李向新, 钟舒怡. 深圳市 1988—2018 年海岸线时空演变分析. *软件*, 2018, 39(10): 133-138.
- [20] 冯珊珊, 樊风雷. 基于不透水面的粤港澳大湾区景观格局时空变化. *应用生态学报*, 2018, 29(9): 2907-2914.
- [21] 赵玉灵. 粤港澳大湾区自然资源遥感调查与保护建议. *国土资源遥感*, 2018, 30(4): 139-147.
- [22] 刘倩楠, 陈劲松, 易琳, 韩鹏鹏, 韩宇, 王月如. 深圳市生态用地变化及其影响分析. *城市观察*, 2017(3): 31-38.
- [23] 叶有华, 林珊玉, 何玉琳, 王丹丹, 陈晓意, 倪广艳. 粤港澳大湾区海岸带生态系统修复框架. *生态学报*, 2021, 41(23): 9186-9195.
- [24] 陈崇贤, 方言, 闫倩倩, 刘京一. 应对海平面上升问题的城市土地利用格局脆弱性多情景模拟评估及应对策略. *中国园林*, 2023, 39(3): 27-33.
- [25] 钱凤魁, 逢然然, 于洋, 徐欢, 韩春兰. 辽宁省不同地貌区耕地景观格局与耕地质量空间关联特征及作用机制. *中国生态农业学报: 中英文*, 2023, 31(1): 113-124.
- [26] Zhang X, Liu L, Zhao T, et al. GWL_FCS30: a global 30 m wetland map with a fine classification system using multi-sourced and time-series remote sensing imagery in 2020. *Earth System Science Data*, 2023, 15(1): 265-293.
- [27] 黄光玮, 匡翠萍, 顾杰, 黄洪城. 海平面上升对珠江口咸潮入侵的影响. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2021, 36(3): 370-379.
- [28] Dang A T N, Reid M, Kumar L. Assessing potential impacts of sea level rise on mangrove ecosystems in the Mekong Delta, Vietnam. *Regional Environmental Change*, 2022, 22(2): 70.
- [29] Kirwan M L, Megonigal J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise. *Nature*, 2013, 504: 53-60.