

台湾海峡西岸红树林的气候变化综合风险评估

李翠华, 丁如一, 莫伦东, 颜秀花, 蔡榕硕*

(自然资源部第三海洋研究所, 海洋可持续发展研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要: [目的] 全球气候变化背景下, 红树林面临海平面上升(SLR)和强热带气旋(TC)威胁增多, 本研究旨在评估未来台湾海峡西岸 3 个自然保护区红树林(简称台湾海峡西岸红树林)的气候变化综合风险水平, 并提出红树林的气候韧性适应策略措施。[方法] 基于联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)气候变化综合风险理论, 构建研究区域的红树林气候风险评估指标体系, 包括致灾因子综合危害性、红树林的暴露度和脆弱性以及综合风险的计算方法。[结果] 1) 3 种排放情景下(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5), 缓发 SLR 叠加突发 TC 引起的致灾因子危害性随时间增加, 并随温室气体排放浓度的增大而增大, 未来台湾海峡西岸红树林的危害性以 SLR 为主。2) 红树林暴露度和脆弱性从大到小依次为漳江口红树林国家级自然保护区、龙海九龙江口红树林省级自然保护区、泉州湾河口湿地省级自然保护区。3) 红树林的综合风险随时间和温室气体排放浓度的增大而增大; 在 RCP8.5 情景下, 到 2100 年, 超过 97.60% 的台湾海峡西岸红树林将处于高、很高的风险之中, 风险从大到小依次为龙海九龙江口红树林自然保护区、泉州湾河口湿地省级自然保护区、漳江口红树林国家级自然保护区。[结论] 综上, 到 21 世纪末, 台湾海峡西岸红树林面临较高的气候变化综合风险, 据此提出需采取补种本地红树植物物种、退塘还林、增加入海河流输沙量和构筑生物护岸的保护与修复措施, 为该区域及中国红树林的气候风险管理提供科学参考。

关键词: 红树林; 海平面上升; 热带气旋; 风险评估; 适应策略

中图分类号: P76

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)03-0367-16

Comprehensive risk assessment of climate change for mangroves on the west coast of the Taiwan Strait

LI Cuihua, DING Ruyi, MO Lunjian, YAN Xiuhua, CAI Rongshuo*

(Research Center for Marine Sustainability Development, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China)

Abstract: [Objective] Given the increasing threat of sea level rise (SLR) and severe tropical cyclones (TC) to mangroves in the context of climate change, the future changes in the hazard of SLR and TC on the west coast of the Taiwan Strait and their potential impacts on mangroves, as well as the protection and nurturing plans for adapting to climate change, are highly pressing concerns. This study aims to evaluate the comprehensive climate change risk level of SLR and TC threats to mangroves in three provincial-level or higher nature reserves on the west coast of the Taiwan Strait in the future under low, medium, and very high greenhouse gas (GHG) emission scenarios (RCP2.6, 4.5, 8.5, referred to as RCPs) by 2030, 2050, and 2100, and to propose climate resilience adaptation strategies and measures for mangroves. [Methods] Based on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) comprehensive risk theory of climate change, a mangrove climate risk assessment index system area was constructed for the study, including the calculation methods for the comprehensive hazard of slow-onset SLR and sudden-onset TC, the exposure and vulnerability of

收稿日期: 2024-07-15 录用日期: 2025-01-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0604902); 福建省自然科学基金(2022J01497)

* 通信作者: rscail@163.com

引文格式: 李翠华, 丁如一, 莫伦东, 等. 台湾海峡西岸红树林的气候变化综合风险评估[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(3): 367-382.

Citation: LI C H, DING R Y, MO L J, et al. Comprehensive risk assessment of climate change for mangroves on the west coast of the Taiwan Strait[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 367-382. (in Chinese)



mangroves, and overall risk. Supplementary survey data, remote sensing images, and model simulations were used, with tools such as ArcGIS, Google Earth Engine, and Matlab employed. [Results] 1) Under the RCPs scenario, the hazard caused by slow-onset SLR combined with sudden-onset TC increases with time and GHG emission concentration. The rate of increase in the hazard of SLR is significantly higher than that of TC, and SLR is projected to be the dominant threat to mangrove areas along the west coast of the Taiwan Strait in the future. 2) The exposure and vulnerability of mangroves on the west coast of the Taiwan Strait, in descending order, are as follows: the Mangrove National Nature Reserve at the Estuary of the Zhangjiang, the Mangrove Provincial Nature Reserve at the Estuary of the Jiulongjiang, and the Provincial Nature Reserve of Wetlands at the Estuary of Quanzhou Bay. Mangroves with high exposure and vulnerability are distributed along the Zhangjiang and in the intertidal zone between the northern and middle ports of the Jiulongjiang. 3) The comprehensive risk for mangroves in the three nature reserves increases with time and GHG emission concentration. Under the RCP 8.5 scenario, by 2100, over 97.60% of mangrove forests are projected to be at high or very high risk. The comprehensive risks, in descending order, are the Mangrove Provincial Nature Reserve at the Estuary of the Jiulongjiang, the Provincial Nature Reserve of Wetlands at the Estuary of Quanzhou Bay, and the Mangrove National Nature Reserve at the Estuary of the Zhangjiang. When only considering the impact of SLR, the mangroves in the Mangrove National Nature Reserve at the Estuary of Zhangjiang have the highest submersion risk, with approximately 34.96% of mangroves may be submerged by 2100 (RCP8.5). [Conclusion] In summary, by the end of this century, the mangroves on the west coast of the Taiwan Strait will face a high comprehensive risk of climate change. Based on the ecological restoration concept of "natural solutions" and "natural restoration as the mainstay and supplemented artificial intervention", for mangroves with high comprehensive risk levels, the following measures are recommended to improve their adaption to climate change: reforesting native species in damaged or seaward areas, returning ponds to forest on the landside of mangroves, constructing biological shore lines to promote silt accumulation, and enhancing river sediment discharge to increase sand capture and siltation in mangrove wetlands, etc. This study provides scientific references for climate risk management in the region and for mangrove conservation in China.

Keywords: mangrove; sea level rise; tropical cyclone; risk assessment; adaptation strategy

红树林是自然生长在热带和亚热带潮间带,受海水周期性浸淹,以红树植物群落为主体的常绿乔木或灌木组成的湿地木本植物群落^[1],在防风消浪、促淤造陆、净化海水、维持生物多样性和固碳储碳等方面发挥重要作用^[2-4]. 中国红树林自然分布于南北回归线之间的海南、广西、广东、福建、台湾、香港和澳门^[5-6]. 根据第3次全国国土调查,广东、广西和海南的红树林占全国红树林总面积的94%(未统计港澳台地区). 台湾海峡西岸的福建省是中国红树林自然分布最北的省份,从最南端的诏安县至最北端的福鼎市河口海湾都有广泛的红树林生长^[7]. 近30年福建省红树林呈现先减少后增加的趋势,由1990年的379.2 hm²减少至2000年的302.0 hm²,2000年后逐渐增加,到2010年增加至569.4 hm²,到2019年增加至832.8 hm²^[8]. 历史上,人为活动的直接破坏导致红树林生态系统呈现衰退趋势,但2000年后,随着人们对红树林不可取代的生态、经济和社会效益的深入认识,红树林的恢复与保护得到重视,人类活动对红树林的直接影响逐渐减少,但红树林生态系统受到海平面上升(SLR)等气候变化的影响日益突出^[9].

气候变暖背景下,全球和中国沿海海平面均呈持续上升的趋势. 1993—2023年,中国沿海海平面上升速率为4.0 mm/a,高于同时段全球3.4 mm/a的平均

水平,且预计未来30年还将上升70~176 mm^[10]. 21世纪以来,影响中国的超强台风发生频次显著增加,2000—2019年登陆中国的(超)强台风数目为40,是1980—1999年的两倍以上^[11]. 不同温室气体排放情景下(如低、中等和很高排放情景下,RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5,简称RCPs),未来登陆中国热带气旋(TC)的强度和数量均有不同程度的增加,尤其是台风及以上级别TC的总数增加明显^[12-13]. 1980—2020年登陆中国沿海的TC复合危害性总体呈增加的趋势,并有两个热点区:一个位于台湾海峡及其周边地区,且危害中心偏于海峡西岸;另一个位于海南岛和南海北部,特别是近几十年来台湾海峡及其周边的复合危害性以每年5%的速度增加^[14]. 海平面的快速上升和TC复合危害性的增加都可能对台湾海峡西岸的红树林产生深远影响.

首先,红树林分布在平均潮位线与平均大潮高潮位线之间,对SLR极其敏感^[15]. 如果SLR速率达6.1 mm/a时,红树林很可能难以适应SLR的影响和风险^[16]. 但不同的区域响应特征有所区别,例如:在加勒比地区,SLR速率超过5 mm/a红树林就难以生存^[17];而在孟加拉国沿海,SLR速率达到1.5 cm/a时大多数红树林才会消失^[18]. 印度尼西亚的SLR速率比沉积速率高出4倍,红树林向陆退缩是不可避免

的^[19]. 中国 80% 红树林向陆一侧存在海堤^[20], 红树林难以通过向陆地一侧迁移的方式应对 SLR^[21]. 其次, (超) 强台风则易使红树林枝干折断, 甚至连根拔起. 在过去 50 年里, 受 TC 破坏的红树林植被死亡率高达 30%~60%, 如 2013 年超强台风“海燕”对菲律宾红树林的严重损毁作用, 2014 年“威马逊”台风对海南省海口东寨港红树林的破坏等^[22-26]. 因此, 在气候持续变暖下, 未来台湾海峡西岸 SLR 和 TC 危害性的变化、可能对红树林产生的影响与风险, 以及适应气候变化的保护与养育规划, 均是值得高度关注的科学问题.

为此, 基于联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 气候变化综合风险理论框架^[27-28], 本研究构建了台湾海峡西岸红树林气候变化综合风险评估指标体系, 利用现场采样、遥感观测和模式模拟等数据, 分析台湾海峡西岸 3 个省级以上保护区内红树林 (简称台湾海峡西岸红树林) 气候致灾因子危害性、暴露度和脆弱性的变化特征, 评估不同 RCPs 情景下未来台

湾海峡西岸红树林的气候变化综合风险水平, 并提出相应的适应性策略措施, 以期对当前红树林采取有针对性的保护与修复措施, 为台湾海峡西岸和中国红树林生态系统的气候变化灾害风险管理提供科学参考.

1 数据与研究方法

1.1 研究区概况

台湾海峡西岸的福建省是中国红树林自然分布最北的省份, 也是中国人工营造红树林历史最悠久的省份. 第 3 次全国国土调查数据显示, 2022 年福建省红树林地 1 310 hm², 占全省湿地的 0.7%. 福建省目前已建立保护对象包含红树林的省级以上自然保护区 3 个, 分别为漳江口红树林国家级自然保护区 (简称漳江口保护区)、龙海九龙江口红树林省级自然保护区 (简称九龙江口保护区) 和泉州湾河口湿地省级自然保护区 (简称泉州湾保护区) (图 1).

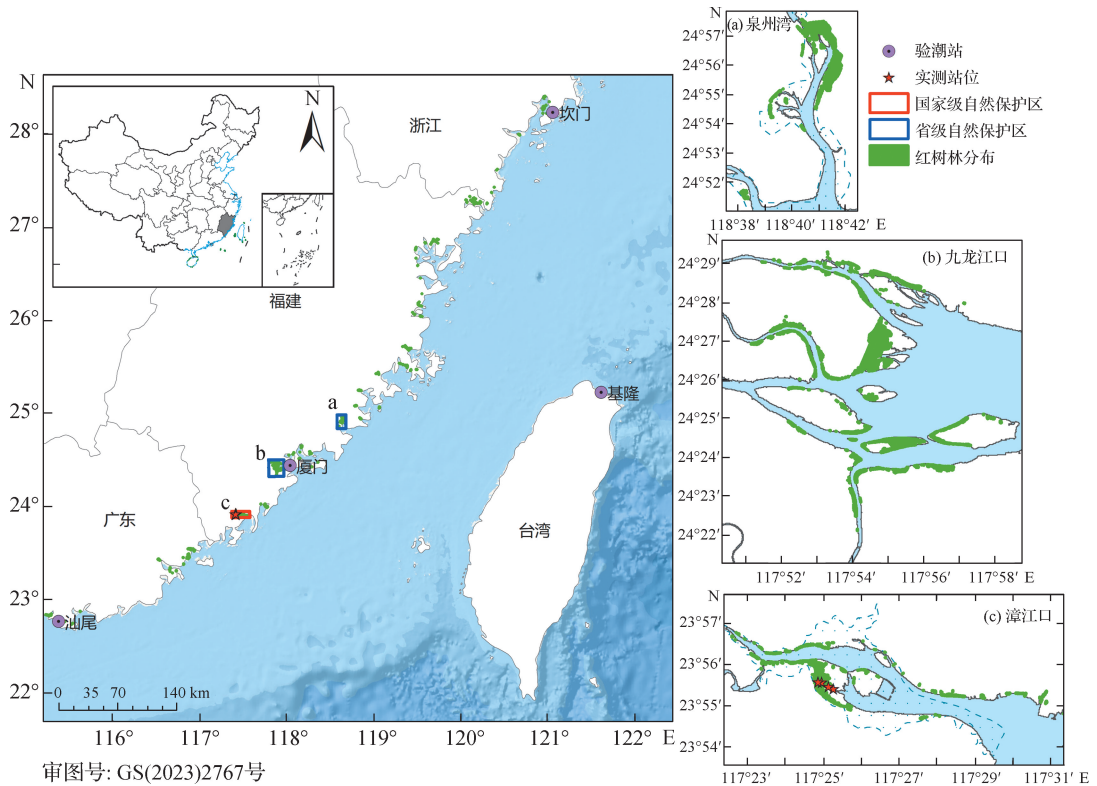


图 1 台湾海峡西岸红树林省级和国家自然保护区位置及红树林分布

Fig. 1 Location and distribution of mangroves in provincial and national nature reserves on the west coast of the Taiwan Strait

漳江口保护区位于东山湾西北部云霄县的漳江入海口, 是以保护红树植物、湿地水鸟、东南沿海优良经济水产种质资源为主要对象的湿地类型保护区, 总面积 2 360 hm², 有中国北回归线以北种类最多、生长

最好的红树林天然群落. 保护区于 1992 年成立, 并于 2003 年 6 月晋级为国家级自然保护区, 也是当前福建省唯一的红树林国家级自然保护区, 2008 年 2 月被列入《国际重要湿地名录》. 九龙江口保护区位于福建省

龙海市九龙江入海口,是以红树林生态系统、濒危野生动植物物种和湿地鸟类等为保护对象的海洋与海岸生态系统类型(湿地类型)自然保护区,总面积为 420.2 hm². 1988 年经省政府批准建立龙海县红树林保护区,2001 年晋级为省级自然保护区. 泉州湾保护区位于福建省泉州市境内,主要保护对象为河口湿地生态系统、红树林及中华白海豚(*Sousa chinensis*)、黄嘴白鹭(*Egretta eulophotes*)等珍稀野生动物. 2001 年经省政府批准成立省级自然保护区,面积 7 039 hm². 经过 2007 年、2009 年和 2018 年 3 次调整,保护区面积为 7 065.31 hm².

台湾海峡西岸的福建省沿海海平面也呈现持续上升趋势. 1993—2012 年 SLR 速率为 3~4 mm/a^[29],到 2023 年,海平面较 1993—2011 年高 33 cm,预计未来 30 年海平面将继续上升 75~180 mm^[10]. 1949—2021 年登陆台湾海峡西岸的 TC 数量呈上升趋势,73 年间每年平均约增加 0.27 个,登陆 TC 达到台风强度的数量最多^[30]. 台湾海峡东临台湾,登陆台湾海峡西岸的 TC 多为二次登陆,第一登陆地点在台湾.

1.2 数据来源

1.2.1 海平面与 TC 数据

1) 海平面:历史海平面数据来源于《2023 年中国海平面公报》及验潮站观测数据^[10,31],未来海平面数据选取第 5 次国际耦合模式比较计划(CMIP5)的模式结果,主要为 CMCC-CM、CNRM-CM5、MIROC-ESM 等 29 种模式在不同 RCPs 情景下,2030—2100 年沿海地区的海平面高度模拟试验数据,并采用多年加权平均获得未来 SLR 预估^[31].

2) TC:历史观测数据来源于中国气象局 TC 最佳路径数据集,空间范围为 5°~45° N,100°~190° E,涵盖时间段为 1986—1995 年^[32]. 未来 TC 数据是基于全球气候模式 HadGEM2-ES 的数据,采用区域气候模式(RegCM4)模拟获取的 RCPs 情景下未来登陆中国的 TC 模拟数据资料^[12,33],包括风场、海平面气压等,空间分辨率为 0.25°×0.25°,时间分辨率为 6 h,空间范围为 5°~45° N,100°~140° E.

1.2.2 红树林数据

1) 沉积速率:收集了漳江口和九龙江口保护区红树林湿地沉积速率历史数据^[34-35];2021 年 3 月 4—6 日在漳江口保护区红树林湿地开展的沉积速率现场采样补充调查与分析数据,采样点见图 1 中“实测站位”.

2) 分布数据:2018 年的红树林空间分布卫星遥感数据集^[36],分辨率为 2 m,该数据利用高分 1 号和

资源 3 号卫星数据,采用基于面向对象的提取方法(OBIA)、解释器编辑和实地调查相结合的方法提取红树林分布. 利用实地调查的 223 个广东、广西、海南和福建省的红树林验证点以及地图中获取的 2 077 个台湾省红树林验证点,采用混淆矩阵进行准确性评估,结果显示该数据集总体精度为 99.3%,κ 系数达 0.985,表明红树林数据集的准确性很高^[36].

3) 高程数据:数字高程模型数据 SRTM DEM v3(航天飞机雷达地形探测任务,SRTM),空间分辨率 30 m(美国国家航空航天局,NASA;美国国防部国家测绘局,NIMA),网址 <https://earthdata.nasa.gov/>.

4) 卫星遥感数据:采用陆地卫星多光谱遥感数据(Landsat8 OLD),空间分辨率 30 m(美国地质勘探局,USGS),网址 <https://earthexplorer.usgs.gov/>. 基于谷歌地球引擎(GEE)云计算平台,选取 2018 年 1 月 1 日—2019 年 1 月 1 日的少云影像作为数据集,并利用“QA_PIXEL”波段对数据集内影像进行去云处理.

1.3 研究方法

1.3.1 红树林气候变化综合风险评估指标体系构建

基于 IPCC 气候变化综合风险的核心概念^[27-28],风险即为承灾体(红树林)处于危险中且结果的发生和程度不确定的情况下可能出现的不良后果,也可理解为损失的可能性. 本研究中红树林的气候变化综合风险主要来自于气候变化致灾因子(简称致灾因子)的危害性、红树林的暴露度和脆弱性之间的相互作用,如图 2 所示.

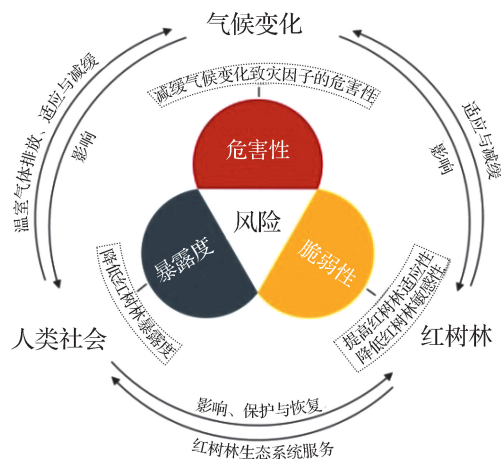


图 2 红树林气候变化综合风险概念图^[27-28]

Fig. 2 Concept map showing the scheme of comprehensive risk to mangroves associated with climate change^[27-28]

致灾因子是指各种可能不利于承灾体(红树林)生存发展的气候变化影响因子,其危害性表现为致灾

因子出现的强度、频率、范围(如 SLR 和 TC 的发生). 鉴于极端高低温或干旱等因素对台湾海峡西岸红树林的影响不明显^[37-39], 而 SLR 是红树林生态系统的主要威胁之一, 预计全球 25% 的红树林面积将在未来 50 年内被淹没, 且中国南海和海南岛将受到特别严重的影响^[9, 11, 40]. 强 TC(如台风和强台风)频率和强度增加, 将对海岸线上的红树林有直接破坏作用, 如超强台风“海燕”、台风“Sodal”对菲律宾和密克罗尼西亚联邦等地红树林造成的严重损毁^[20, 22, 41]. 因此, 本研究着重考虑缓发性 SLR 和突发性 TC 作为影响台湾海峡西岸红树林的主要致灾因子.

暴露度为致灾因子(SLR 和 TC)的影响范围与

承灾体(红树林)在空间分布上的交集^[42]. 脆弱性为承灾体受不利影响的倾向, 包括对致灾因子危害的敏感性, 以及应对风险和适应变化的能力. 基于上述定义, 本研究选取红树林距海域水体(平均海平面与陆地的交界线)的距离、红树林高程低的生境作为暴露度的评价指标, 林带宽度、斑块密度、边界密度、树高、归一化植被指数(NDVI)作为敏感性指标, 高程、海堤和红树林湿地沉积速率作为适应性指标. 其中, 海堤的存在阻止红树林为适应 SLR 而向陆地方向后撤的自然发展, 因而是一个影响红树林的负向指标. 红树林气候变化综合风险评估指标体系见表 1.

表 1 红树林气候变化综合风险评估指标体系^[16, 21, 23, 27-28, 43-53]

Tab. 1 Scheme for comprehensive risk assessment to mangroves under climate change^[16, 21, 23, 27-28, 43-53]

致灾因子危害性	暴露度	脆弱性		影响与风险
		敏感性	适应性	
1. SLR(缓发性): 1) 中国 SLR 速率高于全球平均 2) SLR 速率为 9~12 mm/a, 红树林可能无法适应 ^[44] 3) SLR 速率大于 6.1 mm/a 时, 很可能超过红树林的生存阈值 ^[16] 2. TC(突发性) ^[45] : 当风速大于 7 级(13.9 m/s) 时, 对红树林产生一定的影响或损毁作用	1. 红树林距海域水体的距离, 即红树林和平均海平面与陆地的交界线的距离 2. 红树林高程低的生境(简称低地生境): 红树林湿地中, 0.1 m 等高线向陆一侧, 高程低于 0.1 m 的红树林湿地易受台风-风暴潮的影响 ^[23]	1. 林带宽度 ^[46] : 带宽越窄, 红树林对海平面上升及台风越敏感 2. 斑块密度 ^[47] : 林区越破碎, 斑块密度越大, 其生境越脆弱, 对 SLR 越敏感 3. 边界密度 ^[48] : 周长除以面积, 值越大敏感性越高 4. 树高: 按群落类型的平均高度统计, 株高越高, 越容易受到台风的影响 5. NDVI ^[49-50] (林冠层盖度): 反映林分密度, 红树林越稀疏, 越敏感	1. 高程 ^[51-52] : 泥面高程越高, 受 SLR 的影响越小; 沉积作用反映在高程中, 沉积速率越大, 对 SLR 的适应性越强(注: 潮滩坡度越小, 适应性越低) 2. 海堤 ^[21, 53] : 后方陆域海堤阻碍其对 SLR 的适应 3. 红树林湿地沉积速率大于或小于 SLR 速率 ^[16]	1. SLR 影响: 1) SLR 速率大于沉积速率, 影响红树林生长, 生境损失(面积减少) 2) SLR 将导致海岸侵蚀加剧, 林区破碎化程度加剧; 生物资源减少; 多样性下降; 储碳(碳汇)减少 3) 海堤阻碍红树林向陆后退或扩展的自适应 2. SLR 风险: 本研究主要考虑 SLR 造成的红树林生境永久损失, 即红树林因 SLR 而永久消失的生境(面积损失) 3. 台风影响: 强台风可对红树林造成严重的损伤 4. 台风风险: 台风对红树林结构的损毁, 导致红树林的服务功能减少或丧失

注: 主要致灾因子危害性受 SLR 和强 TC 的影响; 南海 SLR 速率高于全球平均; 大部分红树林后方建有海堤或养殖池, 红树林适应致灾因子危害性的能力较弱; 部分生境受损且有破碎化现象.

1.3.2 评价指标因子计算方法及评价等级划分

致灾因子危害性、暴露度、脆弱性和风险评估方法如表 2 所示, 具体参考文献^[54].

由于中国沿海地区 SLR 为缓发性大概率事件, 而影响台湾海峡西岸红树林生境的强 TC 为突发性小概率事件, 且强 TC 有北移的现象^[10, 31, 55]. 已有研究显示, 2000—2016 年间, 自然原因导致全球约 38% 的红

树林损失, 其中海岸侵蚀为 27%, 极端天气事件为 11%^[56]. 由此可见, SLR 对红树林的危害性要高于强 TC. 结合专家判断及层次分析法, 确定了 SLR 指标 H_s 和 TC 指标 H_t 的权重分别为 $a_1 = 0.71$ 和 $a_2 = 0.29$. 再结合主观的层次分析法和客观的熵值法^[57], 分析并确定暴露度和脆弱性各指标的权重. 为了评估综合风险水平, 本研究采用谱聚类法将红树林气候变

表 2 中国红树林气候变化综合风险评估指标计算方法

Tab. 2 Calculation method for comprehensive risk assessment indicators of mangrove climate change in China

评估指标	计算式	各指标计算方法及含义
致灾因子危害性指数 H	$H = H_s \times a_1 + H_t \times a_2$ $H_t = \sum_{i=1}^m \left[\sum_j^n v_i^3 / (s_i \times r_j) \right]$	H_s : SLR 值为标准化(归一化)后的无量纲指标值; H_t : TC 致灾强度指数标准值; a_1 和 a_2 : 每项评估指标的权重, $a_1 = 0.71, a_2 = 0.29$; v_i : 在不同情景不同年代中, 第 i 场 TC 中心的平均最大风速; s_i : 第 i 场 TC 的平均移动速度; r_j : 红树林和 TC 路径之间的距离等级; n : TC 路径缓冲区等级; m : 10 年间的台风个数
暴露度指标 E	$E = 1/L \times b_1 + G_0 \times b_2$	L : 红树林距海域水体(岸线)距离; G_0 : 红树林湿地泥面高程低于海平面的红树林高程; b_1 和 b_2 : 权重, $b_1 = 0.7, b_2 = 0.3$
脆弱性指数 V	$V = S - A$ $S = W \times c_1 + D_p \times c_2 + D_e \times c_3 + h \times c_4 + I_{NDVI} \times c_5$ $A = G \times c_6 - v_a \times c_7$ $D_p = N/A; D_e = S_i / A_i$	S : 敏感性指标; A : 适应性指标; W : 林带宽度; D_p : 斑块密度; D_e : 边界密度; h : 树高; I_{NDVI} : NDVI; N : 区域内斑块数量; A_{sum} : 区域内斑块总面积; S_i : 第 i 个红树林斑块的周长; A_i : 第 i 个红树林斑块的面积; G : 对高程数据的异常值进行矫正后的红树林泥面高程值; v_a : 沉积速率; $c_1 \sim c_7$: 每项评估指标的权重, $c_1 = 0.1514, c_2 = 0.1161, c_3 = 0.1220, c_4 = 0.0991, c_5 = 0.1041, c_6 = 0.2165, c_7 = 0.1908$
综合风险指数 R	$R = f(H, E, V)$	风险由致灾因子危害性、暴露度和脆弱性的相互作用产生; R 的评价由 H, E, V 三者取等权重叠加而得

化综合风险水平划分为很低、低、中等、高、很高 5 个等级, 风险水平指标值分别对应于 $[0, 0.08], (0.08, 0.16], (0.16, 0.27], (0.27, 0.42], (0.42, 1.00]$.

2 分析与讨论

2.1 RCPs 情景下气候致灾因子综合危害性

2.1.1 RCPs 情景下单致灾因子危害性

基于不同 RCPs 情景下厦门验潮站的 CMIP5 模式模拟结果^[28], 在 RCPs 情景下, 台湾海峡西岸厦门地区的相对海平面将有明显上升, 如表 3 所示. 在 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下, 相较于 2000 年, 2100 年台湾海峡西岸红树林分布区平均海平面分别

上升 51 cm(可能范围 32~73 cm)、61 cm(可能范围 40~85 cm)和 83 cm(可能范围 57~112 cm), 平均上升速率分别为 5.29、6.71、9.43 mm/a. 在 RCP8.5 情景下, 平均上升速率明显高于 RCP4.5 和 RCP2.6 情景, 这主要是由于升温使得海水热膨胀和南极冰盖融化加快. 总体来看, SLR 速率将随时间推移和 GHG 排放浓度的增加而加快. 表 4 为不同 RCPs 情景下未来台湾海峡西岸红树林分布区的 SLR 和 TC 致灾强度指数统计值, 可见 RCPs 情景下, 未来 SLR 致灾指数也随时间增大, 在 2050 年后 SLR 危害性指数由大到小依次为 RCP8.5、RCP4.5、RCP2.6 情景. RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下, 未来 SLR 危害性呈显著增强趋势, 70 年间每年平均增长率分别为 34.3%、42.6% 和 62.9%.

表 3 不同 RCPs 情景下厦门地区沿海 SLR 预测值^[29]

Tab. 3 Estimated coastal SLR values in Xiamen area under different RCPs scenarios^[29]

年份	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	平均	17%~83% (可能)	5%~95% (很可能)	平均	17%~83% (可能)	5%~95% (很可能)	平均	17%~83% (可能)	5%~95% (很可能)
2030 年	14	9~18	6~21	14	9~18	6~21	14	9~19	6~22
2050 年	25	16~34	10~40	26	18~35	13~41	29	20~39	14~46
2100 年	51	32~73	19~92	61	40~85	26~105	83	57~112	41~137

表 4 不同 RCPs 情景下未来 SLR 和 TC 致灾强度指数统计值

Tab. 4 Statistic values of SLR and TC hazard strength index under different RCPs scenarios in the future

致灾强度指数	RCPs 情景	2030 年			2050 年			2100 年		
		最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值
H_s	RCP2.6	0	0.02	0.05	0.13	0.16	0.20	0.45	0.50	0.58
	RCP4.5	0	0.02	0.05	0.15	0.17	0.23	0.58	0.62	0.72
	RCP8.5	0	0.02	0.05	0.19	0.22	0.27	0.85	0.90	1.00
H_t	RCP2.6	0	0.01	0.02	0.04	0.07	0.10	0.11	0.14	0.16
	RCP4.5	0.11	0.20	0.28	0.14	0.23	0.29	0.15	0.32	0.42
	RCP8.5	0.40	0.78	1.00	0.62	0.72	0.83	0.24	0.41	0.65

图 3 为不同 RCPs 情景下,未来登陆台湾海峡西岸的 TC 路径与致灾强度指数(H_t)分布图.由图 3 和表 4 可知:RCP2.6 情景下, H_t 随时间增加而增大,虽然登陆台湾海峡西岸红树林生境附近的 TC 随时间增加而数量有所减少,但是 H_t 仍因 TC 强度增强而增大.RCP4.5 情景下, H_t 总体高于 RCP2.6 情景下,其中到 2050 年和 2100 年,兴化湾以南红树林生境 H_t 明显增大;RCP8.5 情景下, H_t 总体高于 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下.RCP8.5 情景下,登陆 TC 路径北移

现象最明显,到 2030 年,福建省中南部 H_t 最高;到 2050 年,福建省南部 H_t 有所减少,福建省北部 H_t 明显增大,到 2100 年福建省 H_t 进一步降低,但福建省北部的 H_t 还维持在较高水平.与 Tan 等^[14] 的研究结果一致,在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,未来 TC 的危害性仍以每年 18.6% 和 0.9% 的速率继续增加;而由于受到强 TC 路径北移的影响,RCP8.5 情景下,未来 TC 对红树林的危害性有下降的趋势,下降速率为每年 0.7%.

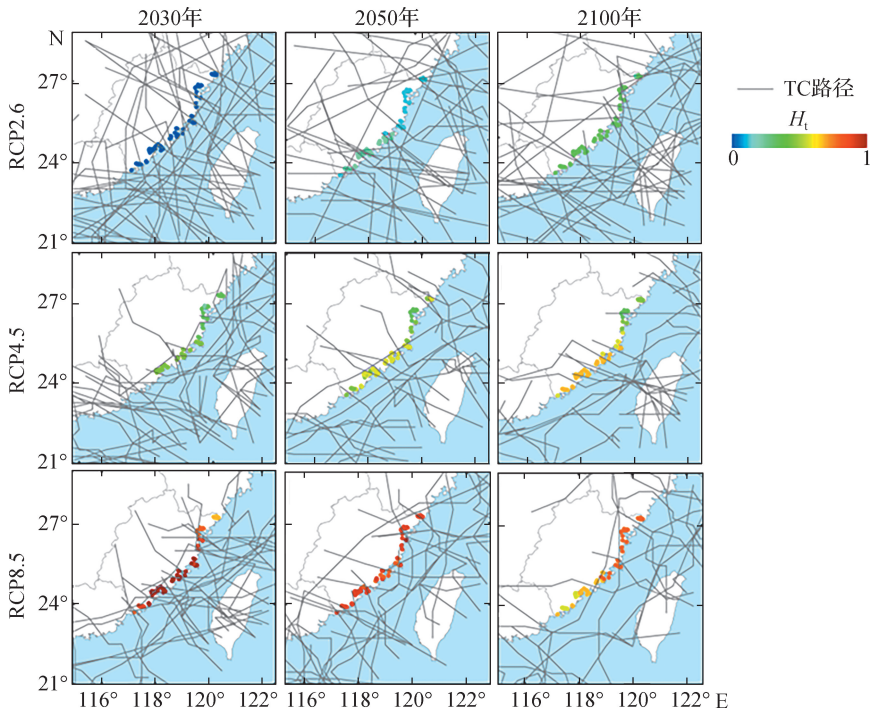


图 3 不同 RCPs 情景下未来 TC 路径与致灾强度指数分布

Fig. 3 Distribution of TC tracks and hazard strength index under different RCPs scenarios in the future

综上所述,RCPs 情景下未来 SLR 的危害性呈持续上升的趋势,且随温室气体排放浓度的增加而加快;RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,TC 的危害性虽也呈

上升趋势,但在 RCP8.5 情景下到 2100 年有所下降.值得注意的是,SLR 的危害性增加速度明显高于 TC,这使得未来台湾海峡西岸红树林的气候致灾因子的

危害性以 SLR 为主。由于本研究可获取的海峡西岸潮位站历史共享观测数据(至 1997 年)至今仍未更新,有关未来 TC 变化的预估采用的是 CMIP5 的全球模式降尺度结果,因此,今后如能获得及时更新的潮位观测数据以及第 6 或第 7 次国际耦合模式比较计划的最新模式结果,未来 SLR 和 TC 变化及其危害性的预估效果也将得到进一步提高。

2.1.2 RCPs 情景下气候致灾因子综合危害性

RCPs 情景下,2030 年、2050 年和 2100 年台湾海峡西岸 3 个省级保护区(以下简称保护区)内红树林的致灾因子危害性指数 H 分布如图 4 所示。RCP2.6 情景下:到 2030 年,红树林的 H 均小于 0.10,危害性小;到 2050 年,保护区内红树林区域的 H 显著上升, H 平均值为 0.16;到 2100 年, H 进一步显著上升,平均值为 0.50,九龙江口北部红树林区域的 H 低于平均值,其余区域 H 均大于平均值。RCP4.5 情景下:到 2030 年,3 个保护区红树林的综合危害性均较小, H 平均值小于 0.10;到 2050 年, H 显著上升,平均值为 0.24,区域分布变化不明显;到 2100 年, H 进一步显著上升,特别是泉州湾和九龙江口区域,最大值达

0.72,整个区域的平均值为 0.71。RCP8.5 情景下:到 2030 年,整个红树林区域 H 的平均值为 0.33,危害性从大到小依次是泉州湾、九龙江口、漳江口保护区;到 2050 年,漳江口保护区 H 上升最显著,平均值升为 0.48,高于其他两个保护区,整个台湾海峡西岸红树林保护区 H 的平均值为 0.46;到 2100 年, H 进一步显著上升,3 个保护区 H 范围为 0.9~1.0,平均值为 0.93,此时泉州湾的危害性最大。

综上所述,不同 RCPs 情景下,台湾海峡西岸红树林保护区致灾因子的综合危害性随时间的推移和全球温室气体浓度上升而增大。台湾海峡西岸红树林保护区的气候变化致灾因子危害性的变化基本一致,泉州湾红树林区域的危害性略高。如前所述,未来观测和模式数据得到改善后,气候变化致灾因子综合危害性评估效果还可进一步提高。

2.2 红树林暴露度评估

图 5 为台湾海峡西岸 3 个自然保护区内红树林的暴露度分布情况。由图 5(a)可见,泉州湾保护区内红树林的暴露度指数 E 均较低,平均值为 0.35,这是由于保护区内红树林泥面高程相对较高,而越靠近水域

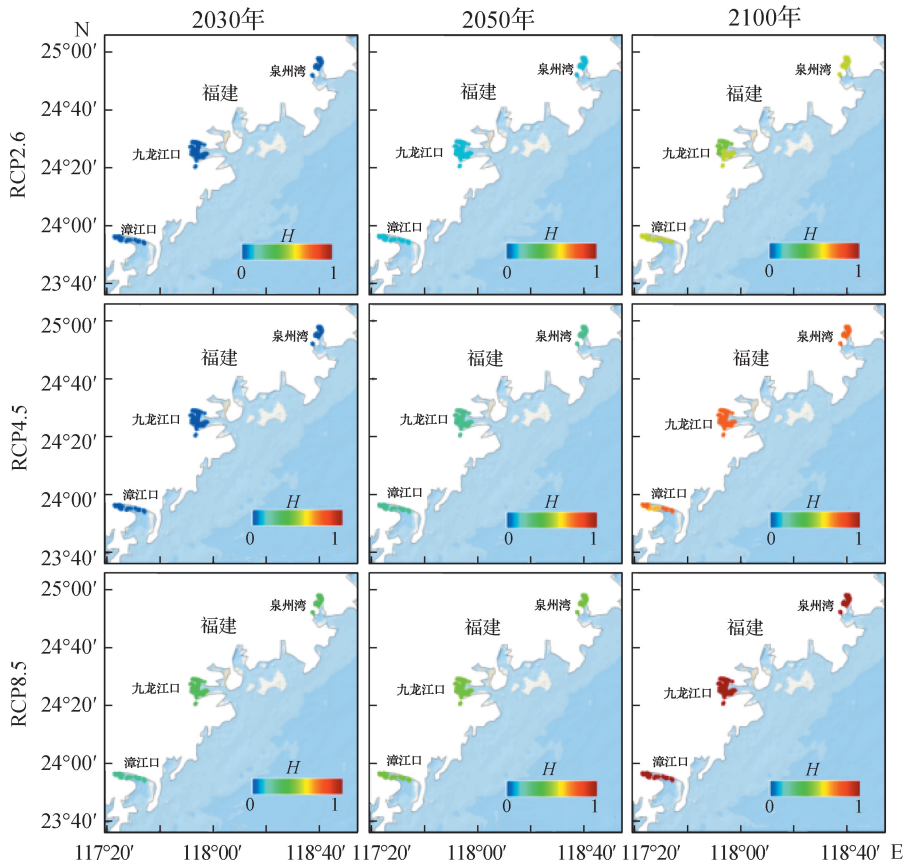


图 4 不同 RCPs 情景下未来台湾海峡西岸红树林的致灾因子综合危害性分布

Fig. 4 Distribution of combined climatic hazards threatening mangroves on the west coast of the Taiwan Strait under different RCPs scenarios

的红树林,其暴露度越高,暴露度最高的红树林分布在图 5(a)西南部晋江入海口.由图 5(b)可见,九龙江口保护区内也是靠近水域的红树林暴露度较高,该保护区内红树林 E 平均值为 0.50,高于泉州湾保护区,其中暴露度较高的红树林分布在九龙江北港和中港之间的潮间带以及河流沿岸.由图 5(c)可见,漳江口保护区内暴露度较高的红树林主要分布在漳江沿岸, E 平均值为 0.53,高于泉州湾和九龙江口保护区,主要是由于该区域的红树林泥面高程普遍较低,更容易暴露在 SLR 和 TC 引发风暴潮导致的海水永久或超常时间淹没的影响下.

综上所述,台湾海峡西岸红树林保护区 E 平均值为 0.45,其中漳江口、九龙江口保护区的 E 在平均值以上,泉州湾的在平均值以下,漳江口红树林的 E 最大.红树林的暴露度主要受红树林距海域水体的距离和高程的影响,而泥面高程低于平均海平面的红树林更易受台风-风暴潮的影响.由于本研究采用的 SRTM 高程数据的垂向分辨率为 1 m,因此,今后若通过 RTK(real-time kinematic)与无人机结合开展红树林湿地滩涂高程的实地测量,获得更精确的红树林湿地地形高程数据,则红树林暴露度的准确性可进一步提高.

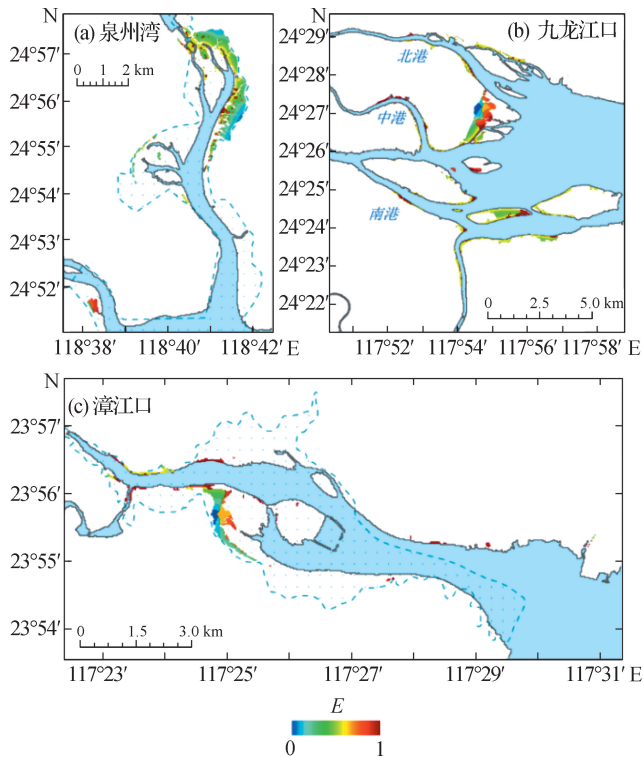


图 5 台湾海峡西岸红树林暴露度分布

Fig. 5 Distribution of mangrove exposure degrees on the west coast of the Taiwan Strait

2.3 红树林脆弱性评估

图 6 为台湾海峡西岸 3 个保护区内红树林的脆弱性分布.保护区内红树林脆弱性指数 V 平均值为 0.44,其中脆弱性最高的红树林片区为图 6(c)所示的漳江口保护区,该保护区内红树林 V 平均值为 0.76,且均高于 0.62.红树林脆弱性较高的原因主要在于该地区泥面高程较低,红树林敏感性较高;脆弱性高的红树林主要分布在漳江沿岸.其次是图 6(b)所示的九龙江口保护区, V 平均值为 0.50,红树林脆弱性低主要是由于保护区内红树林泥面高程相对较高,保护区内脆弱性最高的红树林分布在图 6(b)中九龙江口北港、中港和南港沿岸.脆弱性最低的是图 6(a)所示的泉州湾保护区, V 平均值仅为 0.26,主要是由于泉州湾保护区内红树林的泥面高程较高,树高较低,平均沉积速率也较高,红树林敏感性较低,适应性较强.

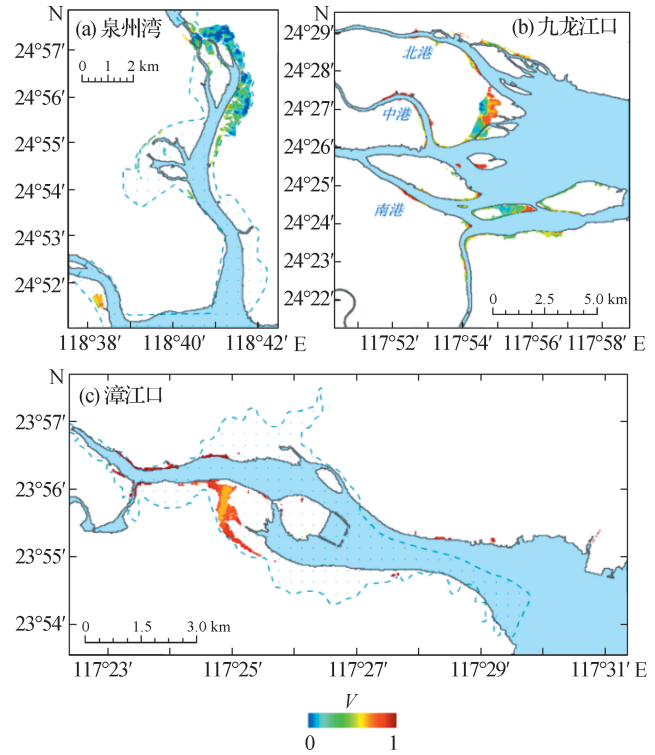


图 6 台湾海峡西岸红树林脆弱性分布
Fig. 6 Distribution of mangrove vulnerability on the west coast of the Taiwan Strait

由上述分析可见,红树林脆弱性的评价因子较多,受红树林湿地泥面高程的影响较大,如泥面高程越高,红树林对 SLR 的适应性越强.同样地,若今后红树林湿地高程数据的精确度可得到进一步的提高,则可减少脆弱性评估的不确定性.另外,由于中国包括台湾海峡西岸红树林向陆地一侧的生境大部分为人

工固化的海堤和道路,阻碍了红树林向陆地一侧自然迁移以适应 SLR 的影响,向陆一侧固化的堤岸对红树林的负面作用基本相同,所以本研究简化了此项因子,未进行量化分析.此外,今后在有条件时可考虑对红树林向陆一侧的堤岸进行更深入的现场调查,在脆弱性评估中考虑向陆一侧堤岸的结构及功能等因素并作量化,将进一步提高红树林的脆弱性评估效果.

2.4 红树林气候变化综合风险评估及适应策略分析

2.4.1 红树林气候变化综合风险评估

图 7 为不同 RCPs 情景下,到 2100 年台湾海峡西岸 3 个省级以上保护区的红树林综合风险水平分布.到 21 世纪末,台湾海峡西岸红树林综合风险由高到低依次是 RCP8.5、RCP4.5 和 RCP2.6. RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,综合风险水平为高以上的红树林主要集中在泉州湾保护区内晋江入海口以及九龙江口保护区内北港与中港之间的潮间带区域;RCP8.5 情景下,台湾海峡西岸红树林几乎全部处于高以上的综合风险.

表 5 为不同 RCPs 情景下,到 2030 年、2050 年和 2100 年,台湾海峡西岸红树林综合风险水平占比情况. RCP2.6 情景下:到 2030 年,红树林综合风险水平均很低,主要归因于致灾因子综合危害性低.到 2050 年,台湾海峡西岸红树林综合风险水平上升,漳江口保护区内 53.13% 的红树林综合风险水平上升为低;九龙江口保护区内 64.94% 和 3.19% 的红树林综合风

险水平分别为低和中等;泉州湾保护区内 55.98% 和 1.07% 的红树林风险分别处于低和中等水平.九龙江口保护区内红树林综合风险水平较高主要归因于其有较高的暴露度、脆弱性.到 2100 年,红树林综合风险水平显著上升,综合风险水平为中等及以上的红树林占保护区红树林总面积的 93.58%,综合风险水平为高及以上的红树林占比为 27.77%,其中九龙江口保护区以及泉州湾保护区内晋江入海口的红树林综合风险最高,主要归因于红树林的暴露度较高.

RCP4.5 情景下:到 2030 年,红树林综合风险水平全部为低及以下,漳江口、九龙江口和泉州湾保护区风险水平为低的红树林占比分别为 20.56%, 20.13% 和 13.57%,泉州湾保护区内红树林的低暴露度、低脆弱性导致其综合风险最低.到 2050 年,红树林综合风险水平略有上升,其中台湾海峡西岸 71.20%, 25.03%, 0.10% 的红树林综合风险水平上升为低、中、高,泉州湾保护区内红树林的综合风险最高,32.65% 的红树林将处于中等及以上风险中,主要是由气候致灾因子综合危害性略高于其他 2 个保护区导致的.到 2100 年,台湾海峡西岸红树林综合风险水平显著上升,综合风险水平为高及以上的红树林占比达 69.19%.九龙江口保护区内红树林的风险最高,综合风险水平为高以上的红树林占比达 75.52%;其次是泉州湾保护区,综合风险水平为高及以上的红树林占比为 63.54%;漳江口保护区内红树林风险最低,综合风险水平为高及以上的红树林占比仅为 59.78%.

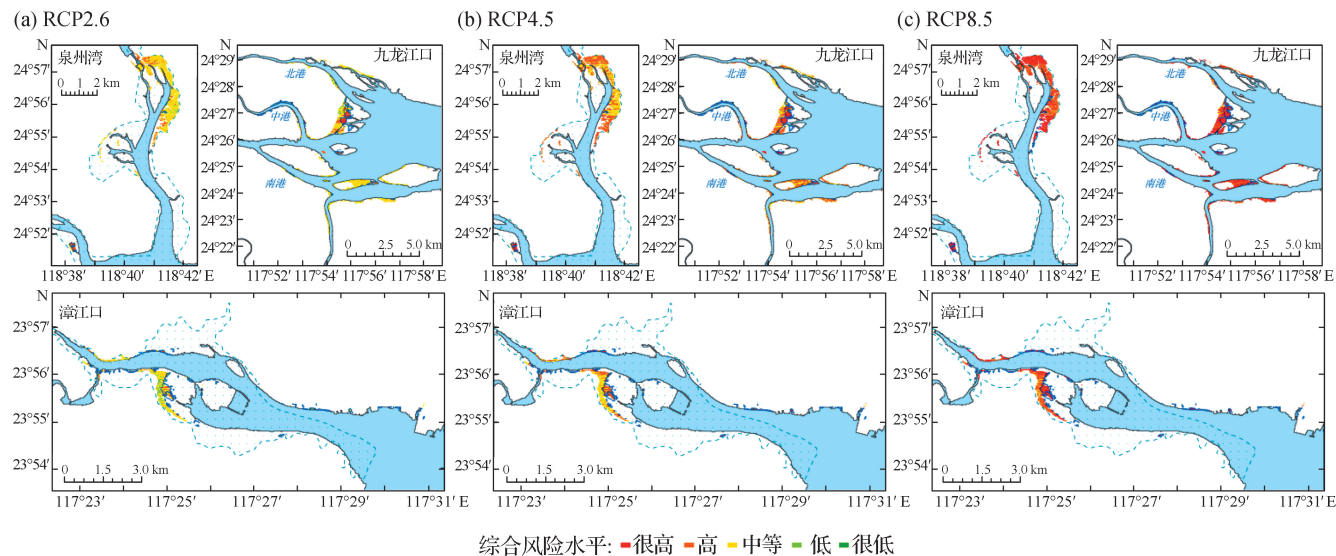


图 7 不同 RCPs 情景下到 2100 年台湾海峡西岸红树林综合风险水平分布

Fig. 7 Comprehensive risk level distribution of mangroves on the west coast of the Taiwan Strait by 2100 under different RCPs scenarios

RCP8.5 情景下:到 2030 年,保护区红树林的综合风险水平较低,几乎都处于中等及以下,其中泉州湾保护区内 0.68% 的红树林综合风险水平达到高.到 2050 年,台湾海峡西岸红树林综合风险水平显著上升,综合风险水平为中等及以上的占比为 80.30%,其中 12.56% 综合风险水平为高;综合风险水平较高的红树林分布在泉州湾保护区晋江入海口及九龙江口保护区北港与中港之间的潮间带区域.到 2100 年,全部红树林均处于中等及以上综合风险中,综合风险水平为高、很高的红树林占比为 97.60%,3 个保护区红树林的综合风险水平从高到低依次为九龙江口、泉州

湾、漳江口保护区.

综上,RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,到 2030 年和 2050 年,台湾海峡西岸红树林综合风险水平均较低,74.87% 及以上的红树林综合风险水平等级为低及以下.RCP8.5 情景下,到 2030 年,29.77% 的红树林综合风险水平上升为中等;到 2050 年,67.72% 的红树林综合风险为中等,12.56% 的红树林综合风险为高.RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,到 2100 年综合风险水平为高及以上的红树林占比分别为 27.77%、69.19% 和 97.60%,可见台湾海峡西岸红树林综合风险随时间推移和温室气体排放浓度增大而增大.

表 5 不同 RCPs 情景下 2030 年、2050 年和 2100 年台湾海峡西岸红树林综合风险水平占比

Tab. 5 Ratio of comprehensive risk levels of mangroves on the west coast of the Taiwan Strait by 2030, 2050 and 2100 under different RCPs scenarios %

保护区	风险水平	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
		2030 年	2050 年	2100 年	2030 年	2050 年	2100 年	2030 年	2050 年	2100 年
漳江口	很低	100	46.77	0	79.44	9.17	0	3.63	0	0
	低	0	53.13	13.91	20.56	71.88	0.91	69.56	32.76	0
	中等	0	0.10	58.17	0	18.95	39.31	26.81	55.85	5.65
	高	0	0	27.82	0	0	45.77	0	11.39	45.36
	很高	0	0	0.10	0	0	14.01	0	0	48.99
九龙江口	很低	100	31.87	0	79.87	4.21	0	3.38	0	0
	低	0	64.94	6.47	20.13	74.70	0.57	69.07	18.66	0
	中等	0	3.19	62.41	0	21.07	23.91	27.36	65.32	2.46
	高	0	0	26.70	0	0.02	58.11	0.19	15.99	33.10
	很高	0	0	4.42	0	0	17.41	0	0.03	64.44
泉州湾	很低	100	42.95	0	86.43	1.16	0	0.74	0	0
	低	0	55.98	3.94	13.57	66.19	0.26	64.55	16.94	0
	中等	0	1.07	72.92	0	32.39	36.20	34.03	74.82	1.29
	高	0	0	22.46	0	0.26	57.01	0.68	8.24	45.70
	很高	0	0	0.68	0	0	6.53	0	0	53.01
台湾海峡西岸	很低	100	37.77	0	82.26	3.67	0	2.43	0	0
	低	0	60.20	6.42	17.74	71.20	0.49	67.45	19.70	0
	中等	0	2.03	65.81	0	25.03	30.32	29.77	67.72	2.40
	高	0	0	25.26	0	0.10	56.23	0.35	12.56	39.25
	很高	0	0	2.51	0	0	12.96	0	0.02	58.35

鉴于 SLR 对台湾海峡西岸红树林的影响占主导地位^[58],未来 SLR 危害性还将继续快速增加,而受到强 TC 路径北移^[12]的影响,RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,TC 的危害性虽也呈上升趋势,但速度明显低于 SLR 危害性的增加速度,且 RCP8.5 情景下 TC

的危害性呈下降趋势.由此可见,未来台湾海峡西岸红树林的危害性因素仍以 SLR 为主.为此本研究进一步评估了台湾海峡西岸红树林在 SLR 影响下的淹没风险,如表 6 所示;如果仅考虑 SLR 的影响,那么在 RCPs 情景下,漳江口保护区内红树林淹没风险最

高,到 2100 年 SLR 可能导致漳江口保护区 34.26% (RCP2.6)、34.48%(RCP4.5)和 34.96%(RCP8.5)的红树林被淹没,被淹没的红树林主要分布在漳江沿岸和保护区中部靠海潮滩;其次是九龙江口保护区, RCP8.5 情景下,到 2100 年将 有 26.93% 的红树林被淹没,被淹没的红树林主要分布在九龙江中港和保护区中部靠海潮滩. 泉州湾保护区内红树林淹没风险较低,仅保护区西南部晋江入海口红树林有被淹没的风险,东北部红树林高程较高因此淹没风险水平很低.

表 6 不同 RCPs 情景下到 2100 年台湾海峡西岸红树林受 SLR 影响的淹没面积百分比

Tab. 6 Percentage of mangrove area submerged by SLR under different RCPs scenarios by 2100 along the west coast of the Taiwan Strait %

保护区	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
泉州湾	2.78	2.92	5.25
九龙江口	24.68	25.35	26.93
漳江口	34.26	34.48	34.96

2.4.2 适应性策略措施分析

根据台湾海峡西岸红树林的综合风险评估可知,红树林的气候变化致灾因子综合危害性和综合风险随着时间推移和全球温室气体浓度上升而增加.到 21

世纪末,在 RCP2.6 情景下,约 27.77% 的红树林处于高及很高综合风险水平;在 RCP8.5 情景下,处于高及很高综合风险水平的红树林急剧增加,占比预计达 97.60%. 因此,降低温室气体排放可减缓 SLR 和强 TC 等气候变化致灾因子的危害性. 根据红树林暴露度和脆弱性的分析结果,暴露度、脆弱性较高的红树林主要位于漳江口保护区内,这主要归因于该区域的红树林泥面高程普遍较低;而分布于九龙江北港和中港之间的潮滩及沿岸的红树林次之. 因此,可考虑通过降低暴露度和提高适应性来降低红树林的气候风险水平.

基于上述台湾海峡西岸保护区红树林气候变化综合风险的评估结果以及“自然恢复为主,人工干预为辅”的生态理念与原则,针对台湾海峡西岸红树林,本研究进一步分析并提出红树林的风险管理保护与修复并行的方法,发展有韧性的红树林适应气候变化策略(图 8). 具体适应措施如下:1) 对泉州湾红树林保护区向海一侧的红树林,可考虑采取生物护岸形式,或引入本地滩涂草本植物以促进湿地补沙促淤. 泉州湾保护区西南角的晋江入海口处红树林后方为道路,前方有大片裸地,而东北部红树林后方多为城镇和道路以及少量鱼塘,红树林前方有大量裸地,因此对于泉州湾保护区前方的裸地可通过补种红树林来提高适应性、降低脆弱性. 2) 九龙江口保护区除九龙江北港、中港、南港外,还有一条河从南部注入九龙江口,红树林后方几乎均为带堤坝的鱼塘,红树林前

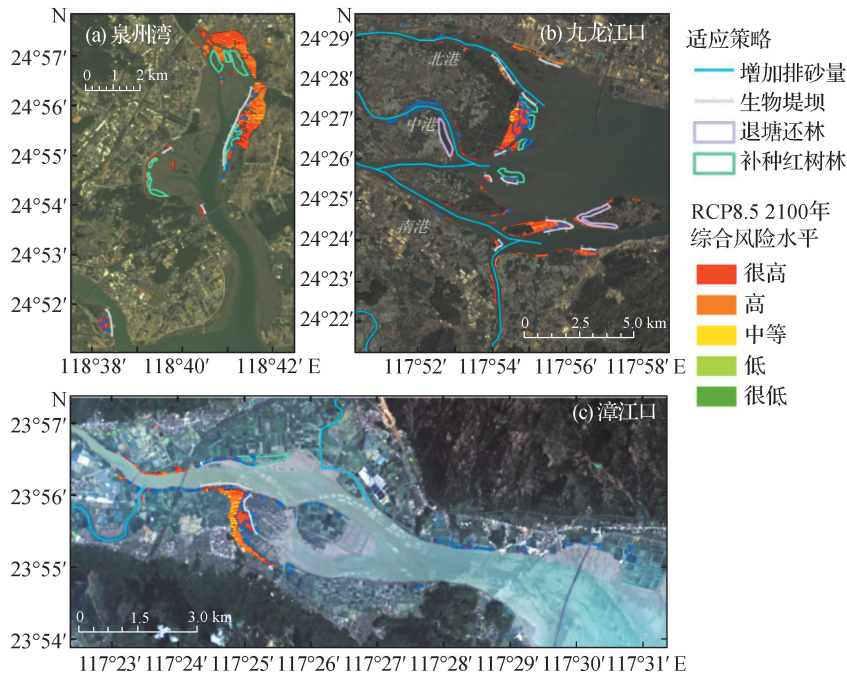


图 8 台湾海峡西岸红树林的气候变化适应策略

Fig. 8 Strategies for mangroves on the west coast of the Taiwan Strait to adapt to climate change

方有大量光滩. 九龙江口保护区内红树林向陆一侧开展“退塘还林”, 向海一侧补种本地红树物种, 提高其密度并增强抗台风的韧性, 降低红树林的脆弱性, 并可通过调控增加河流的输沙量, 改善红树林湿地岸滩的补沙促淤功能, 营造红树林自然恢复环境, 增强红树林应对气候变化的适应性. 3) 漳江口保护区红树林后方分布有大量带堤坝的鱼塘, 前方有大片光滩, 保护区内红树林湿地地表沉积速率较慢^[34], 且由于分布在漳江两岸的红树林风险较高, 因此可在其靠海侧构筑生物堤坝, 提高沉积速率, 增强其应对海平面上升的能力. 值得注意的是, 补种红树林要选择本地物种, 避免外来物种入侵^[59]. 沿海地区 SLR 呈现加速上升的态势^[10,60], 而位于潮滩的红树林幼苗极易受到海平面变化的影响^[61], 因此红树林的保护养育规划需具有前瞻性, 如补种养护区域充分考虑未来 30~50 年 SLR 的影响.

SLR 是迫使红树林向陆迁移的主要驱动力, 而红树林自身的补沙促淤能力则可以抬高地表高程, 从而减缓 SLR 的影响. 因此, 红树林湿地高程变化速率的测定显得较为重要. 在滨海湿地沉积物测定中, 通常应用²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 同位素测年法和地表高程-水平标志层监测. Parkinson 等^[62]研究表明, 同位素测年法适用于百年尺度内沉积速率的测定, 而地表高程-水平标志层监测获得短时间内沉积速率的年际变化, 未考虑土壤的机械压实和土壤有机质的分解, 存在高估地表沉积速率的可能性. 如傅海峰^[21]利用地表高程-水平标志层监测在海南省东寨港南部的三江红树林和漳江口红树林的平均地表沉积速率分别为 (18.9 ± 3.6) mm/a、34.9 mm/a, 远高于利用²¹⁰Pb 测年法测得的三江和漳江口红树林沉积速率 1.5~10.9 mm/a^[63,9]和 4.2 mm/a^[63]. 为了准确反映台湾海峡西岸红树林湿地的补沙促淤能力, 本研究对漳江口红树林湿地的沉积速率开展了补充调查, 采用²¹⁰Pb 测年法计算得到沉积速率为 4.7 mm/a, 与孙江^[63]的结果较一致. 需要指出的是, 尽管红树林湿地表面高程变化速率由于测量方法的不同可能产生一定的差异和不确定性, 但测量结果还与调查断面的选取有很大的关系. 对处于总体向陆后撤的红树林而言, 受局部水力条件和泥沙冲淤的差异影响, 仍可能出现局部红树林沉积速率明显较高, 反而出现向海扩展的现象^[9].

此外, 漳江口保护区分布着红树林和互花米草 (*Spartina alterniflora*) 等滨海湿地植物, 是我国典型的红树林-盐沼交错区. 2011—2019 年, 漳江口保护区

互花米草保持较高的速率扩张, 2020 年互花米草扩张进入稳定期^[64-65]. 漳江口保护区内红树林主要分布在中潮带, 且红树植物平均株高略高于同潮区互花米草的平均株高, 因此在没有人为干扰的情况下, 对于密集的红树林区而言, 互花米草的竞争优势较弱, 难以形成遮荫效应并向红树林区扩张, 而更倾向于向光滩扩张. 但在红树林生长区及红树林幼苗较多的区域, 互花米草则存在较强的竞争优势, 通过抑制红树林幼苗生长来限制红树林的扩张. 2015 年漳江口保护区管理部门开展了有效管护, 包括互花米草的清除和人工种植等, 红树林面积快速增长, 增长范围主要分布在扩散红树林和互花米草混生区域.

由于红树林湿地沉积速率的调查经常受到测量断面代表性的限制, 本研究结合历史资料和有限采样测量分析结果可能还难以全面准确反映研究区域的地表高程变化速率, 并且主要以 2018 年的红树林遥感观测和 CMIP5 等模式数据为出发点, 其中 SLR 对红树林的潜在影响, 重点评估 21 世纪中后期 SLR 加速和 TC 变化对连片红树林湿地的综合影响和风险, 对于海峡西岸漳江口等局部红树林扩散和互花米草混生区域未予以充分关注, 包括未来上游水土流失的可能治理及其对下游入海口潮滩的影响等因素, 因而仍有一定的局限性和不确定性. 今后还需通过不断积累各种调查研究结果, 进一步深化和完善相关研究, 以期能更客观地反映 SLR 和 TC 对研究区域红树林的总体和局部的影响情况.

3 结 论

本研究基于 IPCC 气候变化综合风险核心概念, 构建了台湾海峡西岸红树林气候变化综合风险评估指标体系. 选取台湾海峡西岸 3 个红树林保护区内的红树林为主要研究对象, 使用现场调查资料、遥感影像和模式模拟等数据, 分析和评估了不同 RCPs 情景下, 未来台湾海峡西岸保护区内红树林应对气候变化的综合风险水平分布特征, 并提出了发展具有恢复力的红树林适应气候变化策略. 主要结论如下:

1) RCPs 情景下, 缓发的 SLR 叠加突发的 TC 引起的致灾因子危害性随时间和温室气体排放浓度的增大而增大, 且未来台湾海峡西岸的红树林主要受到 SLR 的影响.

2) 保护区内红树林暴露度指数平均值为 0.45, 暴露度从大到小依次为漳江口、九龙江口、泉州湾保

护区,暴露度指数分别为 0.53,0.50,0.35。暴露度较高的红树林分布在漳江沿岸以及九龙江北港和中港之间的潮间带,归因于这些红树林区域泥面高程较低或红树林靠近水域。

3) 保护区红树林脆弱性指数平均值为 0.44,脆弱性由大到小依次为漳江口、九龙江口、泉州湾保护区,脆弱性指数分别为 0.76,0.50,0.26。漳江口保护区内脆弱性高的红树林分布在漳江沿岸,该区域泥面高程较低,导致其具有高脆弱性;九龙江保护区内脆弱性较高的红树林分布在九龙江口北港、中港和南港沿岸。

4) 保护区内红树林的综合风险均随时间和温室气体排放浓度的增大而增大。RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,到 2030 年和 2050 年,74.87% 及以上的红树林综合风险水平都处于低及以下等级;而在 RCP8.5 情景下,到 2100 年,97.60% 的红树林综合风险水平等级为高及很高,风险从大到小依次为九龙江口、泉州湾、漳江口保护区。仅考虑 SLR 的危害性,漳江口保护区的红树林淹没风险最高,其次是九龙江口保护区,泉州湾保护区红树林淹没风险最低,仅保护区西南部晋江口红树林可能被淹没。

5) 为了降低台湾海峡西岸红树林气候变化影响的风险,基于“自然恢复为主,适当人工干预为辅”的生态修复理念,对于综合风险水平较高的红树林,可通过补种本地红树植物物种、退塘还林、在红树林靠海侧构造生物护岸、调控河流泥沙入海量等有针对性的保护与修复措施,增强红树林的气候恢复力,提高其应对气候变化的能力。

参考文献:

- [1] 张乔民,张叶春,隋淑珍.我国红树林防浪护岸效益研究进展评述[C]//第九届全国海岸工程学术讨论会论文集.北京:海洋出版社,1999:308-312.
- [2] 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.
- [3] BOUILLON S,BORGES A V,CASTAÑEDA-MOYA E, et al. Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates [J]. *Global Biogeochemical Cycles*,2008,22(2):GB2013.
- [4] 徐慧鹏,刘涛,张建兵.红树林碳埋藏过程对海平面上升、气候变化和人类活动的响应[J].广西科学,2020,27(1):84-90.
- [5] 林鹏,傅勤.中国红树林环境生态及经济利用[M].北京:高等教育出版社,1995:1-95.
- [6] 王文卿,王瑁.中国红树林[M].北京:科学出版社,2007:

67.

- [7] 黄文丹,陈文惠,郑祥民,等.福建省红树林分布时空变化与驱动因素分析[J].环境科学与技术,2010,33(12):164-170.
- [8] 王浩,任广波,吴培强,等.1990—2019 年中国红树林变迁遥感监测与景观格局变化分析[J].海洋技术学报,2020,39(5):1-12.
- [9] CAI R S,DING R Y,YAN X H, et al. Adaptive response of Dongzhaigang mangrove in China to future sea level rise[J]. *Scientific Reports*,2022,12(1):11495.
- [10] 自然资源部.2023 年中国海平面公报[EB/OL]. [2024-07-15]. https://gi.mnr.gov.cn/202404/t20240429_2844012.html.
- [11] 蔡榕硕,刘克修,谭红建.气候变化对中国海洋和海岸带的影响、风险与适应对策[J].中国人口·资源与环境,2020,30(9):1-8.
- [12] 聂心宇,谭红建,蔡榕硕,等.利用区域气候模式预估未来登陆中国热带气旋活动[J].气候变化研究进展,2023,19(1):23-37.
- [13] GETTELMAN A,BRESCH D N,CHEN C C, et al. Projections of future tropical cyclone damage with a high-resolution global climate model [J]. *Climatic Change*,2018,146(3):575-585.
- [14] TAN H J,CAI R S,GUO Z Y. Increasing compound hazard of landfalling tropical cyclones in China during 1980—2020 [J]. *International Journal of Climatology*,2023,43(16):7870-7882.
- [15] GABLER C A,OSLAND M J,GRACE J B, et al. Macroclimatic change expected to transform coastal wetland ecosystems this century [J]. *Nature Climate Change*,2017,7(2):142-147.
- [16] SAINTILAN N,KHAN N S,ASHE E, et al. Thresholds of mangrove survival under rapid sea level rise [J]. *Science*,2020,368(6495):1118-1121.
- [17] MCKEE K L,CAHOON D R,FELLER I C. Caribbean mangroves adjust to rising sea level through biotic controls on change in soil elevation [J]. *Global Ecology and Biogeography*,2007,16(5):545-556.
- [18] ISLAM S N,REINSTÄDTLER S,GNAUCK A. Vulnerability of mangrove forests and wetland ecosystems in the Sundarbans Natural World Heritage Site (Bangladesh) [M]// *Threats to mangrove forests*. [S. l.]: Springer,2018:223-243.
- [19] VAN BIJSTERVELDT C E J,HERMAN P M J,VAN WESENBEECK B K, et al. Subsidence reveals potential impacts of future sea level rise on inhabited mangrove coasts [J]. *Nature Sustainability*,2023,6(12):1565-1577.

- [20] 国家林业和草原局. 全国红树林资源调查报告[R]. 北京:国家林业和草原局,2002:1-218.
- [21] 傅海峰. 中国红树林地表高程变化以及海平面上升对红树林的影响[D]. 厦门:厦门大学,2019:79.
- [22] SMITH T J III, ROBBLEE M B, WANLESS H R, et al. Mangroves, hurricanes, and lightning strikes [J]. *BioScience*, 1994, 44(4): 256-262.
- [23] VILLAMAYOR B M R, ROLLON R N, SAMSON M S, et al. Impact of Haiyan on Philippine mangroves: implications to the fate of the widespread monospecific *Rhizophora* plantations against strong typhoons [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 132: 1-14.
- [24] LAGOMASINO D, FATOYINBO T, CASTAÑEDA-MOYA E, et al. Storm surge and ponding explain mangrove dieback in Southwest Florida following Hurricane Irma [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4003.
- [25] MALABRIGO J P, UMALI A G, REPLAN E. Damage assessment and recovery monitoring of the mangrove forests in Caluit Island affected by typhoon Yolanda (Haiyan) [J]. *Journal of Environmental Science and Management*, 2016, 2016(2): 39-46.
- [26] 颜秀花, 蔡榕硕, 郭海峡, 等. 气候变化背景下海南东寨港红树林生态系统的脆弱性评估[J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(3): 338-349.
- [27] IPCC. Summary for policymakers. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability [EB/OL]. [2024-07-05]. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.
- [28] IPCC. Summary for policymakers. Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability [EB/OL]. [2024-07-15]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
- [29] 袁方超, 张文舟, 杨金湘, 等. 福建近海海平面变化研究 [J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(1): 20-32.
- [30] 孟凡昌, 李本霞, 王娟娟. 1949—2021年登陆我国热带气旋历史规律研究[J]. *海洋预报*, 2024, 41(3): 80-89.
- [31] KOPP R E, HORTON R M, LITTLE C M, et al. Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide gauge sites [J]. *Earth's Future*, 2014, 2(8): 383-406.
- [32] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287-301.
- [33] WU J, GAO X J, ZHU Y M, et al. Projection of the future changes in tropical cyclone activity affecting East Asia over the western North Pacific based on multi-RegCM4 simulations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39(2): 284-303.
- [34] 李健成, 吴伊婧, 江彬彬, 等. 不同植被类型对福建三沙湾潮滩有机碳埋藏的影响 [J]. *海洋科学*, 2021, 45(6): 13-21.
- [35] CHEN Y N, LI Y, THOMPSON C, et al. Differential sediment trapping abilities of mangrove and saltmarsh vegetation in a subtropical estuary [J]. *Geomorphology*, 2018, 318: 270-282.
- [36] ZHANG T, HU S S, HE Y, et al. A fine-scale mangrove map of China derived from 2-meter resolution satellite observations and field data [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(2): 92.
- [37] MAFI-GHOLAMI D, JAAFARI A, ZENNER E K, et al. Spatial modeling of exposure of mangrove ecosystems to multiple environmental hazards [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140167.
- [38] 卢昌义, 林鹏, 叶勇, 等. 全球气候变化对红树林生态系统的影响与研究对策 [J]. *地球科学进展*, 1995, 10(4): 341-347.
- [39] 牟爱友, 刘 Jian, 杨建青, 等. 我国最北缘秋茄红树林引种试验调查 [J]. *防护林科技*, 2005(S1): 6-8.
- [40] ICUN. Red list of mangrove ecosystems [EB/OL]. [2024-07-15]. <https://www.iucn.org/resources/conservation-tool/iucn-red-list-ecosystems/red-list-mangrove-ecosystems>.
- [41] CARLOS C, DELFINO R J, JUANICO D E, et al. Vegetation resistance and regeneration potential of *Rhizophora*, *Sonneratia* and *Avicennia* in the typhoon Haiyan-affected mangroves in the Philippines: implications on rehabilitation practices [J]. *Climate, Disaster and Development Journal*, 2016, 1(1): 1-8.
- [42] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告: 精华版 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [43] 蔡榕硕, 谭建红, 郭海峡, 等. 气候变化与中国近海初级生产: 影响、适应和脆弱性 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [44] GILMAN E L, ELLISON J, DUKE N C, et al. Threats to mangroves from climate change and adaptation options: a review [J]. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 237-250.
- [45] 邱治军, 王旭, 杨怀, 等. 热带风暴对海南东寨港红树林林分结构的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(21): 11286-11288, 11339.
- [46] 陈玉军, 郑德璋, 廖宝文, 等. 台风对红树林损害及预防的研究 [J]. *林业科学研究*, 2000, 13(5): 524-529.
- [47] 丁立仲, 徐高福, 卢剑波, 等. 景观破碎化及其对生物多样性的影响 [J]. *江苏林业科技*, 2005, 32(4): 45-49, 57.
- [48] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 海南岛景观空间结构分析 [J]. *生态学报*, 2001, 21(1): 20-27.
- [49] AMAD F S, MOHD YUNUS M Z, ABD WAHAB A K, et al. Mapping the mangrove vulnerability index using

- geographical information system [J]. International Journal of Innovative Computing, 2021, 11(1): 69-81.
- [50] 邱明红, 王荣丽, 丁冬静, 等. 台风“威马逊”对东寨港红树林灾害程度影响因子分析[J]. 生态科学, 2016, 35(2): 118-122.
- [51] LOVELOCK C E, CAHOON D R, FRIESS D A, et al. The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise[J]. Nature, 2015, 526(7574): 559-563.
- [52] ELLISON J C, ZOUH I. Vulnerability to climate change of mangroves: assessment from Cameroon, Central Africa[J]. Biology, 2012, 1(3): 617-638.
- [53] 丁平兴. 气候变化影响下我国典型海岸带演变趋势与脆弱性评估[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [54] DING R Y, CAI R S, YAN X H, et al. Comprehensive risk assessment of sea level rise and tropical cyclones in Dongzhaigang mangroves, China[J]. Chinese Geographical Science, 2024, 34(4): 631-646.
- [55] CAI R, HAN Z X, YANG Z F. Impacts and risks of changing ocean on marine ecosystems and dependent communities and related responses [J]. Climate Change Research, 2020, 16(2): 182-193.
- [56] GOLDBERG L, LAGOMASINO D, THOMAS N, et al. Global declines in human-driven mangrove loss [J]. Global Change Biology, 2020, 26(10): 5844-5855.
- [57] 王靖, 张金锁. 综合评价中确定权重向量的几种方法比较[J]. 河北工业大学学报, 2001, 30(2): 52-57.
- [58] GOLDBERG L, LAGOMASINO D, THOMAS N, et al. Global declines in human-driven mangrove loss [J]. Global Change Biology, 2020, 26(10): 5844-5855.
- [59] 邝超娟, 宁家莉, 杨琼, 等. 钦州市红树林保护面临的问题及其对策[J]. 南方农业, 2023, 17(11): 47-50.
- [60] OPPENHEIMER M, GLAVOVIC B, HINKEL J, et al. Sea level rise and implications for low lying islands, coasts and communities; an IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate[EB/OL]. [2024-07-15]. <https://www.ipcc.ch/srocc/home>.
- [61] 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.
- [62] PARKINSON R W, CRAFT C, DELAUNE R D, et al. Marsh vulnerability to sea-level rise[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(11): 756-756.
- [63] 孙江. 东寨港红树林有机碳来源、埋藏及福清宁德核电站邻近海域的环境效应[D]. 汕头: 汕头大学, 2022.
- [64] 黄央央, 杨毕铖, 戴桂香. 互花米草入侵对漳江口红树林保护区的影响研究[J]. 海洋开发与管理, 2023, 40(2): 115-124.
- [65] 黄敏敏, 张宜辉, 周泽友, 等. 2013—2022年福建漳江口红树林互花米草分布无人机遥感数据集[J]. 中国科学数据, 2023, 8(4): 152-161.

(责任编辑: 徐婷婷)