#### DOI: 10.20103/j.stxb.202301090060

杜建会,陈嘉健,李升发.台风干扰海岸林受损及灾后恢复的影响因素研究进展.生态学报,2024,44(1):1-17. Du J H, Chen J J, Li S F.Factors affecting the damage and recovery of coastal forest after typhoon disturbance: A review.Acta Ecologica Sinica,2024,44 (1):1-17.

## 台风干扰海岸林受损及灾后恢复的影响因素研究进展

杜建会1,\*,陈嘉健1,李升发2,3

1 中山大学地理科学与规划学院,广州 510275

2 广东省科学院广州地理研究所,广东省地理空间信息技术与应用公共实验室,广州 510070

3 广东省遥感与地理信息系统重点实验室,广州 510070

摘要:随着气候变暖,台风登陆的强度及频率均呈增加趋势,其对海岸森林的影响也日益严重,从而危及沿海生态安全。但因台 风登陆的不确定性、海岸森林恢复的滞后性和数据源受限等影响,当前对台风后海岸森林受损及灾后恢复的影响因素研究仍存 在很大的不确定性。台风登陆导致海岸森林枝叶脱落、树干折断和根系裸露等,受树种特征(冠层、树干和根系),林分结构(密 度、组成),立地条件(地形、土壤)和台风特征(强度、频率)等影响,海岸森林在不同研究尺度的受损存在明显的空间异质性,单 一因素难以完全解释台风后海岸森林的受损格局。台风后部分海岸森林因受损严重而死亡,其余仍以种子萌发、幼苗/幼树生 长或萌生更新的方式持续恢复。海岸森林在灾后的恢复周期从几个月到几十年不等,其具体时长与树种更新策略(实生、萌 生),森林类型(人工林、天然林),树木受损程度(轻度、重度)及区域水热条件(水分、热量)等有关。未来仍需借助多源遥感数 据,并结合台风后的固定样方调查、野外采样和室内样品分析,对海岸森林的受损和恢复格局开展多时空尺度研究,阐明不同受 损程度下树木的水分传输和光合产物分配过程及其差异,全面揭示台风干扰对海岸森林的影响机制。 关键词:海岸森林;台风;受损程度;恢复周期;影响因素

### Factors affecting the damage and recovery of coastal forest after typhoon disturbance: A review

DU Jianhui<sup>1,\*</sup>, CHEN Jiajian<sup>1</sup>, LI Shengfa<sup>2,3</sup>

1 School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

2 Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

3 Guangdong Provincial Key Laboratory of Remote Sensing and Geographical Information System, Guangzhou 510070, China

**Abstract**: Typhoon intensity and frequency increase with global climate warming, heavily affect the coastal forest, and pose a high risk on the ecological security in coastal areas. Currently, some uncertainties remain in the study of coastal forest after typhoon disturbance, particularly in the affecting factors attributed to the damage levels and recovery intervals of trees, due to the uncertainty of typhoon landfall, lagging recovery of coastal forest, and shortage of available data sources. The damage levels of coastal forest can be mainly classified as defoliation, tree snapping and uprooting after typhoon disturbance, which usually show high heterogeneities at different spatial scales, and cannot be completely explained by any one of the factors. These factors include the variations of species characteristics (canopy, stem and root), stand structures (density and composition), site conditions (landform and soil), and typhoon characteristics (intensity and frequency). Specifically, tall trees usually indicate high canopy damages, but their widespread roots decrease the uprooting ratio after

收稿日期:2023-01-09; 网络出版日期:2023-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目资助(41101011,41930757)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: dujh1982@ hotmail.com

typhoon disturbance. Sparse or dense stand structures increase tree damages, and a high biodiversity does not always guarantee a low damage level of coastal forest. The damage levels of coastal forest do not show consistent trends with the variations of elevations, aspects and slope angels. Moreover, coarse soil can facilitate the water infiltration, and enhance the growth of deep root, but often has a lower fixation on the trees, vice versa. The increase of typhoon intensity aggravate, but the increase of typhoon frequency can alleviate the damage levels of coastal forest. A few coastal forests will die after typhoon disturbance due to the heavy damage level, while the rest of which can regenerate by seed germination, seedling/sapling growth and sprouting. The recovery intervals usually vary from several months to decades, which are largely dependent on the regeneration strategies (seedling and coppice), forest types (plantation and natural forest), damage levels (slight and heavy), and hydrothermal conditions (water and heat). Specifically, coppice, natural forest, slightly damaged trees grown in the excellent hydrothermal conditions usually have more shorter recovery intervals. Therefore, multiple-source remote sensing datasets, long-term field observations, combined with field monitoring, sampling and sample analysis in laboratories should be used to investigate the damage and restoration patterns of the coastal forest at multiple spatio-temporal scales, and to analyze the water transport and carbohydrates allocation process of trees in different damage levels after typhoon disturbance, which will facilitate the explanation on the affecting mechanism of coastal forest disturbed by typhoon.

Key Words: coastal forest; typhoon; damage levels; recovery intervals; affecting factors

海岸森林作为沿海的重要生态屏障,其不仅能防风固沙、抵御自然灾害,还可涵养水源、保持水土、改善区 域小气候,这对维持沿海生态安全具有非常重要的意义<sup>[1-2]</sup>。但海岸森林处于陆、海、气三者交互作用地带, 同时又非常脆弱。加之其分布区域经济发达、人口密集,使得极端气候事件对沿海的破坏呈放大效应<sup>[3]</sup>。随 着气候变暖,台风(热带气旋在西北太平洋和南中国海的称谓,为表达方便,下文将所有热带气旋均表示为 "台风")登陆的强度和频率均呈增加趋势,且其最大强度位置也渐趋大陆岸线,这会严重威胁沿海生态安 全<sup>[4-5]</sup>。台风登陆常导致海岸森林枝叶脱落、树干折断和根系裸露等,这使得树木光合器官面积减小,水分传 输过程中断<sup>[6]</sup>,从而影响海岸森林的光合产物合成、转化及分配过程<sup>[7]</sup>。此外,台风后林窗的出现使得林下 光热水肥资源发生改变,不同物种的竞争关系随之变化,最终影响到灾后海岸森林的恢复过程<sup>[8]</sup>。

台风对不同树种的损害存在差异,而各个树种在灾后的恢复策略也有不同,从而使得台风干扰下海岸森林的受损/恢复格局存在明显的空间异质性,进而改变海岸森林的树种组成、种群结构及群落动态,最终导致海岸森林生态系统的服务功能存在很大的不确定性<sup>[9-10]</sup>。全川和杨玉盛<sup>[9]</sup>、刘斌等<sup>[5]</sup>从生态系统角度,对台风干扰下海岸森林的受损/恢复等进行综述,这对理解相关的研究进展具有非常重要的意义。然而,台风干扰下海岸森林受损/恢复的影响因素众多<sup>[11]</sup>,且在不同研究尺度存在很大差异,单一因素能在多大程度上解释海岸森林的受损/恢复格局仍不清楚。考虑到台风特别是超强台风从沿海登陆后,其影响范围巨大,本文提及的海岸森林除沿海防护林带外,也包括近岸森林和极少部分遭受台风干扰的内陆森林,后统称为海岸森林。论文综述了台风干扰下海岸森林在不同研究尺度受损/恢复的影响因素,在此基础上提出未来主要的研究方向。这有助于进一步理解气候变暖背景下台风干扰对海岸森林的影响机制,并为海岸森林生态系统的保护、修复及管理提供科学依据。

#### 1 台风登陆对海岸森林的损害及其影响因素

1.1 树种特征

在个体尺度上,海岸森林受损主要与树种有关,冠层迎风面积小且高度矮,树干粗且木材密度高,根系深 特别是主根发达的树种在台风后的受损相对较轻<sup>[12-13]</sup>(图1)。

1.1.1 冠层

叶片形状不同,其冠层表面气流特征有所差异,从而影响台风冲击时枝叶的弯曲和扭转幅度。与阔叶树

种相比,披针形叶和多裂叶的叶面积更小,柔韧性更好,这可减少叶片受力面积、降低冠层拖曳力,从而减轻海岸森林在灾后的受损程度<sup>[14]</sup>。长期受损下,树木倾向于将叶片有限的非结构性碳水化合物转化为结构性碳 水化合物,以减少其撕裂,同时增加叶片和角质层厚度,从而降低叶片的物理损害<sup>[15-16]</sup>。

冠层形状不同,台风冲击时树木的受力面积有所差异,从而改变海岸森林的受损格局<sup>[17]</sup>。体积庞大的冠 层会增大树木迎风面积,从而增加台风后海岸森林折断或倒伏的比例<sup>[18]</sup>。因此,一些木材密度低的树种为减 少受损,其枝叶在台风冲击时会快速脱落,从而改变冠形,降低冠层拖曳力,台风后其树干折断或倒伏的比例 也显著降低<sup>[19]</sup>。

冠层高度越高,树木风压力矩越大,这会增加台风后海岸森林的受损比例<sup>[20-21]</sup>(图1)。Imbert<sup>[22]</sup>研究认 为,当风速达到130 km/h时,高大树木的受损比例显著增加,而低矮树木的受损比例在风速超过180 km/h后 才逐渐增大。随着台风频繁登陆,一些显著高于冠层平均高度的树木逐渐被清除,海岸森林的整体高度呈矮 化趋势。Parker 等<sup>[23]</sup>调查证实,台风"Jova"登陆使墨西哥西海岸森林平均高度从6.8 m 下降到5.9 m,台风 "Patricia"再次登陆使其高度进一步下降至3.5 m。但也有研究表明,当树木达到最大高度后,其剩余碳水化 合物也会分配到胸径,这可减小树木高径比,从而降低海岸森林的受损比例<sup>[21]</sup>。



箭头代表台风干扰

#### 1.1.2 树干

树干径级越大,树木受损越重<sup>[24-25]</sup>。许涵 等<sup>[26]</sup>对台风"Damrey"登陆海南尖峰岭热带山地雨林后的调 查发现,大径级树木在台风后更易倒伏,这使得部分树种重要值降低,变成伴生种或共有优势种。此外,台风 长期干扰下,树木空穴概率随径级增加而增大,这会放大台风后大径级树木的受损风险<sup>[27]</sup>。但树木根系也随 着树干同步生长,这有助于提高大径级树木的抗台风能力<sup>[28]</sup>,且幼树若缺乏遮挡,其受损程度也很高。Li 等<sup>[29]</sup>对台风"Mangkhut"过后广东鼎湖山固定样方调查发现,胸径不到5 cm 和高度低于2 m 的树木在台风中 更易受损。也有研究表明,海岸森林受损随径级并非线性变化,而是在某一径级内受损更大<sup>[30]</sup>。综上所述, 海岸森林受损随树木径级变化并未呈现出一致性,而可能与具体的树种有关。

木材密度越低,树木在台风后越易折断。演替早期的树种对光照需求强烈,其将更多的碳水化合物投资 于枝叶生长,以快速进入林冠层来确保短期的碳获取,树干部分的投资相对较少(图1)。而演替晚期的树种 相对耐荫,其将更多的碳水化合物投资于树干和根系生长,台风登陆后前者相对后者更易遭受台风损害<sup>[31]</sup>。 其次,木材纤维长度越长,抗折断能力越强<sup>[32]</sup>。事实上当台风强度低于某一阈值,不同木材密度的树木受损 差异不大。当台风强度逐渐增加,木材密度才会影响海岸森林的受损格局。但超强台风下海岸森林受损与木 材密度关系不大,其均会遭受无差别损害。Uriarte 等<sup>[19]</sup>研究表明,木材密度高的树种在台风"Hugo"过后未 出现树干折断和掘根现象,但台风"María"登陆后不同木材密度的树木均遭受严重损害,这主要与后者登陆时 的瞬时风速(166 km/h VS 250 km/h)更大有关。

#### 1.1.3 根系

树木根系越深,对土壤固着力越强,台风后其越不容易掘根(图1)。热带亚热带海岸森林根系发达,而寒

温带针叶林根系浅,其抗台风能力较弱<sup>[28]</sup>。Hayashi 等<sup>[33]</sup>基于激光雷达数据,对台风"Songda"登陆日本 Hokkaido 后海岸森林的调查表明,在严重损害的样地,树木冠层高度平均下降(2.7±1.8) m,以根系较浅的日 本落叶松(*Larix kaempferi*)最为明显。

海岸森林为减轻台风后的受损程度,往往通过生长大量侧根或板根来降低其难以扎根的风险<sup>[34]</sup>。如山 脊等台风暴露度高的区域,树木长期因受台风影响,其将更多的资源分配到树干,增加木材密度,同时强化侧 根发育,并使树干弯曲且具有特定冠形。侧根数量越多,径级越大,其风斜率、风倒率和风折率越小。但该补 偿作用较为有限,与侧根或板根相比,主根对台风后树木的抗倒伏能力影响更大<sup>[35]</sup>。

1.2 林分结构

在种群/群落尺度上,海岸森林受损主要与林分结构有关。林分密度过低或过高均会增加台风后海岸森 林受损,而抗风性树种组成增加则会降低这一比例<sup>[36]</sup>(图2)。



图 2 不同林分结构下海岸森林的受损程度 Fig.2 The damage levels of coastal forest with different stand structures 箭头代表台风干扰

#### 1.2.1 密度

种群密度越低,台风后海岸森林越易受损,这在于植株间距越大,台风通过冠层向树木根系传递的能量越 多,从而导致土壤和根系间裂隙变大,进而增加灾后海岸森林的受损比例<sup>[37]</sup>。Suzuki等<sup>[38]</sup>研究发现,随着台 风强度增加,间伐宽度较大(5 m)的日本黑松(*Pinus thunbergii*)林带遭受台风损害的风险也随之增大,而间伐 宽度小(1.2 m)的林带仍处于较低风险。未来海岸森林管理过程中要避免形成大的林隙,并通过控制合适的 林带宽度来降低其对台风干扰的风险<sup>[36]</sup>。

随着种群密度增加,受林缘树木遮挡,聚集生长的海岸森林抗台风能力更强<sup>[39]</sup>。郁闭的冠层在台风冲击 时可相互缓冲,当风速低于某一阈值时,其有助于抵消台风对森林的冲力<sup>[37]</sup>。其次,郁闭的冠层能削弱其顶 部湍流和涡流作用,从而减小冠层表面拖曳力,且相邻树木根系交织,也可减小树干摆动幅度,从而降低台风 后海岸森林的受损比例<sup>[21]</sup>。但也有研究表明,随着种群密度增大,树木将更多的生物量投资于冠层和细根生 长,从而导致风压力矩增加,加上透风系数减小,侧根发育受限,进而增加了台风登陆时海岸森林的受损比 例<sup>[40]</sup>。因此,疏透林带的透光孔隙在纵断面均匀分布,气流可匀速从林冠上层绕过或从林带穿过,其防风效 果明显地优于通风和紧密结构(图 2)。但这一结论可能只适合于单行防护林,Wu 等<sup>[41]</sup>在全球尺度研究发 现,单行林带的透光孔隙度在 20%—40%时,其防风效果最优。而当林带行数增加时,二者关系不大,未来仍 需构建能表征海岸防护林 3D 结构的指数来反映其防风效果。

#### 1.2.2 组成

多树种组成的天然林林冠层交错分布,其横断面起伏有序,形成独特的疏透结构,而单一树种组成的人工 林林冠层结构简单,形成典型的通风结构,因此前者的抗台风能力更强<sup>[42]</sup>。Xiao 等<sup>[43]</sup>基于 MODIS 影像对台 风"Sarika"登陆海南后的研究表明,与高海拔山地次生林受损较轻相比,77%的人工林和果树 NDVI 出现显著 下降。但也有研究发现,生物多样性增加并不能减轻台风后海岸森林的受损程度,而是与其群落中的抗台风 树种占比有关<sup>[21]</sup>。

群落中抗台风树种占比越大,海岸森林在台风后的受损越轻(图 2)。Zhang 等<sup>[31]</sup>研究发现,在台风 "Hugo"登陆前,Bisley 森林实验区的抗台风树种山地棕(*Prestoea montana*)仅占 7%,且大部分树木径级较小, 其更易遭受强风损害或来自倒伏树木的二次伤害,死亡率较高。而台风"María"登陆前,山地棕占比达 21%, 90%的幼树都能受到中到大径级树木遮蔽,从而减少了"María"登陆后树木的死亡率。台风的频繁登陆导致 海岸森林呈同质化现象,其群落组成渐以抗风性强的树种为主<sup>[30]</sup>。因此,未来应减少台风后海岸森林恢复过 程中的人为干扰,以促使其从人工林向近天然林演替,从而增加海岸森林生态系统的稳定性<sup>[8]</sup>。

#### 1.3 立地条件

在景观尺度上,海岸森林受损主要与其立地条件有关<sup>[13]</sup>。地形起伏使得台风能量重新分配,从而导致海岸森林在不同坡向、海拔和坡度的受损存在明显的空间异质性(图3)。此外,厚层、砂质土壤有利于树木根系下扎,从而降低台风后海岸森林的倒伏比例,但土壤水分趋于饱和会降低其对树木根系的固着力,反而会增加海岸森林受损<sup>[39]</sup>。



图 5 不同立地家件下海岸林林的交顶程度 Fig.3 The damage levels of coastal forest with different site conditions 不同箭头粗细代表台风强度大小

#### 1.3.1 地形

(1) 坡向

局部山体遮挡对降低台风后海岸森林的受损非常重要。台风登陆后山地迎风坡或山脊暴露度高,风速更大,海岸森林遭受台风的损害更重,而背风侧因地形遮挡,风速减弱,海岸森林的受损也较轻<sup>[13]</sup>(图 3)。 Zhang 等<sup>[34]</sup>研究证实,尽管台风"María"强度高于"Hugo",但其登陆后海岸森林的死亡率低于后者,主要在于 "María"移动路径刚好被卢基约山脉阻挡,山体背风侧树木受损大幅减少,而"Hugo"登陆时海岸森林大部分 暴露于强风中。

但也有研究表明,树木受损与坡向关系复杂,其随距离台风路径的远近而变化。靠近台风路径的树木受 损与坡向关系较大,而超过一定距离后则影响不大(图3)。这可能在于近台风路径处其强度较大,山地不同 坡向的风速差异显著,而离台风路径超出某一范围后,风速快速下降,坡向对风速的影响减弱<sup>[44]</sup>。 6

(2)海拔

在高大陡峭的山地,高海拔森林受周围山体遮挡较少,台风移动至该处时能量消耗不大,海岸森林的受损 比例因而增加<sup>[45]</sup>(图 3)。Feng 等<sup>[13]</sup>基于遥感影像,对台风"María"过后波多黎各东南海岸的森林研究表明, 树木受损从海拔 0 m 到 1400 m 均有发现,以高海拔、陡坡和迎风坡的树木受损最为严重,只有不到 5%的森林 分布在海拔 800 m 以上,但在台风后其非光合植被指数平均下降 0.43。

在低矮平缓的山地,台风风速随海拔变化不大,其能量受下垫面粗糙度影响,在爬坡过程中快速衰减,海 岸森林的受损程度随之下降,而其高度和生物量则逐渐增加<sup>[17]</sup>(图3)。Zhang 等<sup>[46]</sup>对台风"Saomai"登陆后 海岸森林受损的分析表明,其 NDVI 下降幅度随海拔增加而减小,树木受损主要出现在海拔 100 m 以下。也 有研究表明,低海拔森林受损较重可能与洼地地下水位较高、树木根系分布较浅有关<sup>[30]</sup>。Kupfer 等<sup>[47]</sup>在台 风"Katrina"登陆后,对密西西比南岸的森林调查表明,洼地树木在台风路径 30 km 内均遭受了严重损害,而高 地树木只在台风路径 15 km 内有所损害。

事实上,山体的起伏变化非常复杂,受局部小地形及下垫面粗糙度等影响,台风能量在不同海拔重新分配。随着海拔增加,台风强度并未持续增大或减小,树木的受损程度随海拔变化不一定呈线性变化<sup>[48]</sup>。 Zhang 等<sup>[39]</sup>对台风"Lekima"登陆浙江后的研究发现,当海拔低于1400 m时,森林的受损程度随海拔增加而增加,而超过1400 m后,则表现为相反趋势。

(3) 坡度

山地坡度越陡,土层越薄,树木的根系也越浅(图3)。且与平坦生境相比,陡坡更易出现土壤蠕动或滑坡 现象,从而增大该处树木在台风后的掘根风险<sup>[13]</sup>。Ida 和 Nakagoshi<sup>[49]</sup>对台风"Mireille"登陆日本西南部 Garyu 山地后的调查发现,坡度较陡的生境海岸森林掘根比例更高。但也有研究表明,平缓坡地对台风的能 量消耗不大,海岸森林受损因而更重。高翔等<sup>[12]</sup>对台风"Vera"登陆长白山后的遥感影像分析发现,75.03% 的风灾迹地出现在 15°以下坡度。因此,单一坡度难以完全解释海岸森林在景观尺度上的受损格局,海岸森 林的受损程度随坡度也并非总是呈线性变化,而是与多个地形特征有关<sup>[39]</sup>。

#### 1.3.2 土壤

(1) 土层厚度

土层过薄会抑制树木根系发育,从而增加台风后海岸森林的掘根风险,进而放大其对台风干扰的脆弱 性<sup>[50]</sup>(图3)。高翔等<sup>[12]</sup>对台风后长白山森林的调查发现,常绿针叶林分布区的土层厚度约20—30 cm,其根 系难以下扎,森林受损较重。土层厚度增加后,树木根系在地下自由伸展,这有利于树木充分吸收土壤水分和 养分,从而降低海岸森林的对台风干扰的脆弱性。

(2)土壤质地

砂土颗粒较为松散,其与树木根系间的固着力弱,若树木根系分布过浅,则会增加台风后海岸森林的倒伏风险<sup>[51]</sup>。但砂土排水良好,有利于树木根系下扎,这会增加了土壤与根系间的固着力,从而降低海岸森林的受损程度(图3)。Rutledge等<sup>[25]</sup>研究表明,在排水较差的土壤中,长叶松(*P. palustris*)和湿地松(*P. elliottii*) 对台风干扰的脆弱性指数分别为 0.35 和 0.6,若在排水良好的土壤中,二者对台风干扰的脆弱性指数均下降至 0.1 左右。

(3)土壤水分

根系越粗、下扎越深,其与土壤间的固着力越强。但二者间的裂隙也会随台风对树木地上部分冲击不断 变大,特别是伴随的强降雨以优先流的形式沿着裂隙进入根部,从而加速深层土壤的饱和过程,使得根系层土 壤出现滑动。当根系所受的拉应力超过其抗拉强度,根系就会逐渐撕裂,从而部分抵消根系下扎增强的土壤 固着力<sup>[47]</sup>。因此,当土壤含水量小于其饱和含水量时,海岸森林遭受掘根的风险不大<sup>[52]</sup>(图 3)。Kamimura 等<sup>[37]</sup>基于灌溉后的拉拽实验表明,树木的抗掘根能力并未明显降低,尽管土粒间的固着力下降,但土壤和根 系中的水分增加出现补偿效应,从而抵消了树木的掘根风险。但当其完全饱和后,土壤与根系间的固着力快 速下降,海岸森林遭受掘根的风险也随之增大<sup>[39,50]</sup>。

1.4 台风特征

在区域尺度上,海岸森林受损主要与台风特征有关(图4)。距离台风登陆地点/移动路径/林缘越近,台 风强度越大,海岸森林的受损也越重。但台风的频繁登陆有助于海岸森林形成自适应机制,也可在一定程度 上减轻其受损程度<sup>[46,48,53]</sup>。

1.4.1 强度

首先,低强度台风对海岸森林影响不大,其多引起树木枝叶脱落,而对树干及根系损害不大。但当台风强 度超过某一阈值后,树冠的摆动幅度和频率均显著增加,枝叶间摩擦增多,树干通过大幅摆动、扭转等,将台风 能量从冠层传递到根系,海岸森林受损的比例大幅提高,且这一比例随风速增加呈指数变化<sup>[48,54]</sup>(图4)。台 风强度在其登陆点最大,移入内陆后逐渐减弱,这也与灾后海岸森林的受损格局比较一致<sup>[51,55]</sup>。Stanturf 等<sup>[54]</sup>研究发现,台风"Katrina"在密西西比登陆后,约90%的海岸森林受损出现在近海岸100 km 内,且67%的 受损出现在密西西比。



图 4 不同台风特征下海岸森林的受损程度 Fig.4 The damage levels of coastal forest with different typhoon characteristics 不同箭头粗细代表台风强度大小

其次,台风眼处风速最小,之后离其移动路径距离增加,风速变大,超过一定距离后,风速再次减小,海岸森林受损的范围和比例均呈指数或线性减少(图4)。Hook 等<sup>[56]</sup>对台风"Hugo"登陆南卡罗林纳海岸后的调查表明,台风眼壁处 89%的长叶松(*P. palustris*),91%的火炬松(*P. taeda*)和 86%的洼地硬木林出现了受损,而这一比例在台风眼壁外则分别下降到 17%,52%和 20%。然而,台风移动路径上的地形突变会改变这一规律,Feng 等<sup>[13]</sup>对台风"María"登陆波多黎各后的研究表明,在其路径西侧 40 km 内,海岸森林受损较重,之后随着离其路径距离增加,海岸森林受损程度快速减轻。但在台风移动路径东侧,海岸森林最大受损出现在距其路径 30 km 外的卢基约山地,这可能与该处海拔较高、坡度较陡有关。此外,台风在北半球逆时针旋转前进,其移动路径右侧风速大于左侧,特别是热带台风,其风强在路径右侧比左侧高约 25%,从而使得该侧海岸森林受损更重。

最后,林缘树木对台风暴露度高,其在台风后的受损比例更大,而林内树木受其遮挡,台风后的受损相对 较轻<sup>[38]</sup>(图4)。陈绶柱等<sup>[35]</sup>对台风"Sally"登陆湛江后的木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)林调查发现,位于临 海前缘的第一试验区破坏严重,而在其保护下的第二至第四试验区受损渐轻。但 Rossi等<sup>[57]</sup>基于多源遥感影 像对台风"Felix"过后尼加拉瓜海岸森林的分析表明,近海岸针叶树种受损较轻,而离海岸 40 km 外的阔叶树 种受损严重,这可能与不同树种的抗台风能力有关。

# 8

1.4.2 频率

台风生成于热带洋面,大部分难以抵达温带海岸,从而使得热带亚热带海岸台风登陆频繁。台风长期干 扰下,海岸森林倾向于从基部萌发多个树干,其冠层普遍偏矮,从而可降低台风后海岸森林的受损程度<sup>[58]</sup>(图 4)。但 Abbas 等<sup>[10]</sup>认为,在平坦的低地,单主干生长的树木更高,且会对多主干生长的树木形成遮蔽。当林 冠层完全郁闭后,多主干生长的树木更易遭受病虫害及风力胁迫,其对台风干扰的脆弱性也随之增加。此外, 一些抗风性较弱的树种不断被清除,也可降低台风后海岸森林的受损程度。Gang 等<sup>[59]</sup>研究发现,2005 年台 风"Dennis"登陆墨西哥湾北部海岸后,森林 NDII(归一化红外指数 Normalized Difference Infrared Index)下降 较小,这可能与 2004 年台风"Ivan"过后,抗风性较弱的树种大量死亡,其余受损树木仍在恢复中有关。

与之相反,温带海岸台风登陆频率低,海岸森林在整个生活史中极少遭受台风干扰而中断,其多以单干生长,冠层较高,但这会增加台风后海岸森林的易损性<sup>[40]</sup>(图4)。Korznikov等<sup>[60]</sup>对台风"Dujuan"登陆俄罗斯 库页岛后的影像分析表明,面积超过1hm<sup>2</sup>的林窗占了40%,而小于0.1hm<sup>2</sup>的林窗仅占20%。此外,随着气 候变暖,台风登陆的位置逐渐向温带海岸偏移。与单台风登陆不同,多台风连续登陆使得海岸森林枝叶持续 脱落,从而导致其光合产物合成受限,加上水热条件较差,当树木储存的碳水化合物不断被消耗而难以及时补 给时,这会显著放大海岸森林对后续台风干扰的脆弱性<sup>[23,61]</sup>。特别是台风登陆周期大于10年或更长时,其 对海岸森林的损害可能会改变群落的树种组成,森林群落从先锋树种到顶级树种均会出现,最终使得整个海 岸森林生态系统发生逆行演替<sup>[17]</sup>。但温带海岸的台风移动速度相对热带更快<sup>[62]</sup>,台风的快速移动使得最大 风速集中于其路径一侧,这会减少潜在的海岸森林受损面积,同一台风强度下,海岸森林受损在美国新英格兰 海岸相对于波多黎各海岸更轻<sup>[63]</sup>。西北太平洋上空的东南气流近年来不断增强,登陆我国大陆的台风路径 也逐渐北移。与华南海岸丘陵山地广布不同,华北平原对台风能量的持续削弱有限,这使得台风移动速度更 快,影响范围也会相应增加,从而导致台风干扰下我国海岸森林未来的受损格局更为复杂<sup>[4]</sup>。

#### 2 海岸森林在台风灾后的恢复及其影响因素

#### 2.1 更新策略

从个体尺度来看,台风后海岸森林恢复主要与树种更新策略有关,大部分树种仍可通过实生或萌生来完成自我更新<sup>[1]</sup>(图5,图6)。

#### 2.1.1 实生更新

当干扰强度较低、且种间竞争关系稳定时,树种更倾向于采用实生更新策略<sup>[64]</sup>,这在台风登陆强度和频 率均较低的温带海岸更为常见。Altman 等<sup>[65]</sup>基于树轮分析对朝鲜半岛蒙古栎(Quercus mongolica)的研究表 明,树木的生长释放比例在 1770—1879 年变化不大,但该比例从 1880 到 1979 年显著增加,这主要与该时期 台风强度快速增大有关。但不同树种更新策略各异,从而导致台风后海岸森林的物种组成发生改变。 Yoshida<sup>[66]</sup>研究发现,台风后林窗出现使得喜阳树种的比例大幅增加,而耐荫树种生长则受到明显抑制。随着 林窗面积增大,数量增多,林下树木对光照的竞争减弱,从而有助于多个物种共存,进而提高了台风后海岸森 林的生物多样性和生产力<sup>[1,8]</sup>。

也有研究表明,台风后海岸森林的生物多样性变化不大,但其更新速率显著增加,物种数量呈爆发式增长,以胸径 1—2 cm 的幼树为主,海岸森林的生物量甚至超过了台风前水平<sup>[24]</sup>。因此,台风后海岸森林恢复 初期主要来自于幼苗的快速生长,而中、大径级树木贡献不大<sup>[29]</sup>。但恢复初期幼苗的生长主要集中于一些水 热条件较好的生境,后续随着单位个体对资源的消耗量增大,也会出现自疏现象。Yoshida<sup>[66]</sup>研究表明,台风 后,因树木掘根而出现大量地洞,其土壤水分好于邻近土墩,因此成为幼苗生长的首选,地洞处的幼苗密度在 灾后恢复初期均显著高于土墩。但随着幼苗生长,土壤水分竞争加剧,地洞处的幼苗出现自疏现象,不同生境 的植株密度到第十个生长季后差异不大。

#### 2.1.2 萌生更新

萌生更新具有抗干扰能力强、幼年期生长迅速等特点[4],这对于台风后海岸森林的早期演替具有明显的



图 5 不同林型下海岸森林的恢复过程

Fig.5 The recovery process of coastal forest with different types

箭头代表台风干扰下海岸森林演替的不同阶段



图 6 不同更新策略、损害程度和水热条件下海岸森林的恢复过程

**Fig.6** The recovery processes of coastal forest with different regeneration strategies, damage levels and hydrothermal conditions 箭头代表台风干扰下海岸森林演替的不同阶段

促进作用,以台风登陆强度和频繁更高的热带亚热带海岸最为常见。首先,萌生更新的树种可利用其广泛发育的根系,为树木后续生长提供充足的水分和养分,并借助已有高度,充分利用光照资源,快速形成郁闭层,从而有助于该树种与快速生长的先锋种幼苗竞争资源。Van Bloem 等<sup>[67]</sup>研究表明,台风"Georges"过后加勒比海岸干森林基部萌发了大量新枝,和台风前相比,其萌发速率和树干的萌发比例分别是后者的2倍和5倍。截止2005年,萌发的新枝平均长度达1.6m,超过13%的新枝达到亚冠层高度。然而,萌生更新存在较大的不确定性,残桩高度、萌枝长出位置、根系生物量和长度等内在因素,和干扰方式、强度、资源的可利用性等环境因素均会影响树种在演替后期的竞争力<sup>[64]</sup>。Mascaro 等<sup>[68]</sup>对台风"Joan"登陆尼加拉瓜海岸后的调查发现,受损树木仍以萌生更新的方式继续生长,但其生物量累积速率显著低于"Hugo"早期在同一区域登陆后的森林恢复。

其次,萌生更新可缩短海岸森林的恢复周期。热带亚热带海岸森林遭受台风干扰的频率更高,其光合器 官频繁缺失。因此,树木更倾向于将碳水化合物分配到根系,从而在其枝叶脱落或树干折断后,树木能够从基 部快速萌发新枝,加速海岸森林在灾后的恢复<sup>[61,69]</sup>。此外,台风的频繁干扰使得林窗长期存在,树木对光照 的竞争渐趋减弱,其无需通过快速生长以获取光照,而是选择将更多的碳水化合物进行储存,以用于后续的萌 生更新。小径级树木的萌发能力较弱,而中到大径级的树木萌发比例较高,这可能与径级越大,树木储存的碳 水化合物越多有关。Hirsh 和 Marler 等<sup>[18]</sup>研究表明,台风后苏铁(*Cycas micronesica*)叶片的完全脱落抑制了其 高生长,但苏铁树干储存的淀粉含量较高,其仍可在此萌发大量不定芽,这有利于避开周围其它物种竞争,从 而促进灾后苏铁的快速恢复。

最后,不同树种萌生更新能力差异较大,这会改变海岸森林的树种组成,最终影响海岸森林生态系统的服务功能<sup>[17,20]</sup>。Leitold 等<sup>[70]</sup>基于机载雷达数据的研究表明,台风后有近 45%的树种高度下降超过 1 m,但在后续恢复过程中其生长速率最高。与针叶树种相比,阔叶树种的萌生更新更为普遍<sup>[69]</sup>。Boucher 等<sup>[71]</sup>对台风"Joan"登陆尼加拉瓜东南海岸后的调查发现,大部分阔叶树种在台风后都以萌生更新的方式快速生长,而针叶树种受损后则难以更新,从而使得前者在台风后成为这一地区的建群种。然而,生长速率较快的树种抗旱性大多较差,这也会增加海岸森林生态系统对干旱胁迫的脆弱性<sup>[72]</sup>。

#### 2.2 森林类型

从种群/群落尺度来看,海岸森林在台风后的恢复速率与其类型有关。与人工纯林和混交林相比,天然林 层片结构丰富、生物多样性更高,其在台风灾后的恢复速率也更快<sup>[9,31]</sup>(图 5)。

#### 2.2.1 人工林

纯林物种单一,且种植密度高,冠层郁闭使得林下近乎无其它物种或自身幼苗/幼树生长(图 5)。即便台风后林窗大量出现,水热资源等显著增加,但林下因缺乏种子库、幼苗/幼树,其在台风后的生物量积累仍较慢,海岸森林多以人工补种的方式完成恢复。尽管在原生境人工补种的红树林相对于在新生境的造林碳汇潜力更大<sup>[73]</sup>,但 Fickert<sup>[74]</sup>对台风"Mitch"登陆洪都拉斯 Guanaja 岛 20 年后的调查表明,人工补种的红树林死亡率极高,其在台风后的恢复速率很慢,和自然演替没明显区别,且对后续台风干扰的脆弱性更高。

混交林可充分利用林地空间和环境资源,提高其光能利用率<sup>[75]</sup>(图 5)。Deng 等<sup>[76]</sup>对台风"Mujigae"过 后海岸森林调查发现,与桉树(Eucalyptus spp)纯林相比,其它树种与桉树形成的混交林中桉树保存率更高, 以马占相思(Acacia mangium)和桉树的混交林效果最好。这在于混交林对环境资源的竞争弱于桉树纯林,其 将更多碳水化合物投资于地下部分,以获取充足的水分和养分,从而有利于树木后续生长。混交林的平均树 高矮于桉树纯林,但树干更粗,高径比降低减轻了海岸森林台风后的受损程度,从而有助于其在灾后快速 恢复。

#### 2.2.2 天然林

天然林层片结构丰富,这会加速台风后海岸森林的恢复<sup>[10]</sup>(图 5)。林冠层在台风后受损最重,这使得海岸森林高度整体变矮,林窗增加,林下层的光热水肥资源显著改善,不同树种对资源的竞争减弱,从而有利于 多个物种共存<sup>[8]</sup>。此外,因林冠层遮蔽,林下层幼苗及幼树受损较轻,从而有利于台风后海岸森林恢复。 Primavera 等<sup>[77]</sup>对菲律宾南部 Samar 省严重受损的红树林在台风"Haiyan"登陆 2.5 月和 4.5 月后分别调查表 明,与人工补种单一树种对红树林恢复相比,天然生长的红树林其恢复速率并未显著减缓。相反地,树木可通 过萌发新枝、幼苗/幼树生长等快速恢复,反而降低了后续台风登陆时红树林的脆弱性。

天然林生物多样性更高,林下种子库更为丰富<sup>[21]</sup>(图 5)。台风后林下层的光热水肥资源异质性增加,不同物种的种子、幼苗和幼树均在短期内获得了爆发机会,物种的更新速率与台风前相比更快,从而有助于台风后海岸森林的快速恢复<sup>[13]</sup>。Rezaei和 Ghaffarian<sup>[45]</sup>对台风"Haiyan"登陆后菲律宾海岸森林调查表明,Guiuan和 Tacloban 岛山地森林分别损失了 57%和 46%的生物量,但其在台风登陆 1 年后就恢复到台风前的 80%和 70%,2 年后即达到初始状态。

#### 2.3 损害程度

从景观尺度来看,台风后海岸森林的恢复速率主要与其损害程度有关<sup>[9]</sup>。树木受损越重,海岸森林在灾 后恢复的时间越长<sup>[29]</sup>(图 6)。

#### 2.3.1 轻度受损

海岸森林轻度受损以枝叶脱落为主,台风后其可快速恢复到台风前水平<sup>[10]</sup>。此外,轻度受损下,林窗区的光照强度增加不大,且随着林冠层的快速恢复,林下层的光照强度重新变回台风前水平。且受林下层遮蔽作用,近地表的弱光环境也没明显改善,其并未给林下种子萌发、幼苗和幼树生长提供独特的生态位,海岸森林树种组成在台风前后差异不大<sup>[78]</sup>。Li等<sup>[29]</sup>在台风"Mangkhut"过后,对广东鼎湖山森林的固定样方调查表明,台风后单位面积的树木个体数量显著增加,但物种数没明显变化。Chao等<sup>[79]</sup>对台湾南仁山(1993—2013)的持续观测也发现,台风的频繁干扰使得灾后森林受损较轻,尽管林窗的出现有利于喜阳树种生长,但因以小林窗为主,海岸森林的更新仍以耐荫树种更为常见。

#### 2.3.2 重度受损

海岸森林严重受损使得树木光合器官大幅减少,水分传输效率降低,根系也难以从土壤中获取水分,从而 导致树木光合产物合成不足,其前期储存的碳水化合物仅能满足少数枝条萌发,而难以维持树木后续生长。 海岸森林即便在台风后恢复,其所需时间也显著延长。Delaporte 等<sup>[80]</sup>研究表明,当台风最大持续风速每增加 1 m/s,海岸森林恢复时间将延长 4 d,当最大持续风速超过 75 m/s(270 km/h)后,海岸森林恢复时间将显著 增加。这主要与严重受损下树木碳储存下降有关,其下降幅度与台风强度呈显著正相关<sup>[61]</sup>。Stas 等<sup>[42]</sup>对台 风"Doksuri"登陆越南中部海岸 2 年后的研究表明,轻度受损下,天然林的碳储存每年增加(1.3±1.1) Mg C/ hm<sup>2</sup>,而重度受损下其碳储存每年减少(1.7±1.1) Mg C/hm<sup>2</sup>。

此外,海岸森林严重受损后其所有功能并非同时恢复<sup>[22]</sup>。森林绿度在台风后几周到几个月就已增加,但 其冠层盖度和生产力则恢复缓慢,在没有其他干扰事件或积极的森林管理措施下,海岸森林恢复时间最长可 持续几十年<sup>[23]</sup>。因叶片是植物光合作用的重要器官,树木优先将碳水化合物分配到叶片萌生,而其繁殖过程 则受到抑制。Zimmerman 等<sup>[81]</sup>对台风"Georges"在波多黎各海岸登陆后的调查发现,尽管新叶在台风后 10 个 月内快速生长,但花和果实产量在不断减少。海岸森林物候在台风登陆后 2 年内即恢复正常,在之后的 4 年, 叶片凋落物量已恢复到台风前水平,但是木材生长和繁殖水平在台风登陆 9 年后仍未完全恢复。

随着海岸森林受损程度增加,台风对其物种组成的影响随之增大。轻微受损下,海岸森林物种组成在台风前后差异不大,而重度受损下其物种相似度显著下降。郑志颖<sup>[82]</sup>在台风"Meranti"登陆闽南沿海后,对马尾松(*P. massoniana*)林下物种多样性调查发现,与未受损的马尾松样地相比,轻度、中度和重度受损的马尾松林下草本和灌木种类当年分别增加3种、12种和20种,次年分别增加15种、23种和21种。海岸森林群落的物种组成变化可能会影响其生态功能。日本 Hokkaido 岛南岸的日本落叶松林被台风摧毁后,覆盆子(*Rubu sidaeus*)在2年后变成这一区域的建群种,其占据了60%的地上生物量和50%的叶面积指数,但整个海岸森林生态系统的 GPP 呈下降趋势,其从之前的碳汇变成碳源<sup>[83]</sup>。这与 Quebbeman 等<sup>[84]</sup>在波多黎各海岸森林的观测结果一致,其发现台风"María"登陆7个月后,海岸森林土壤中的 CO<sub>2</sub>通量相对台风前增加18%,CH<sub>4</sub>通量从净消耗变成净排放,N<sub>2</sub>O 通量增加3倍,温室气体在海岸森林受损后短时间内的大量排放可能会加速气候变暖。

#### 2.4 水热条件

从区域尺度来看,台风后海岸森林的恢复程度主要与水热条件有关<sup>[44]</sup>。水热条件越好,海岸森林的恢复 周期越短(图 6)。

#### 2.4.1 水分

低强度台风下,海岸森林受损以枝叶脱落为主,这有助于树木减少灾后短期内的蒸腾耗水,从而有助于其 维持水分平衡。白永会等<sup>[85]</sup>对台风后木麻黄林树干液流测定发现,样木 2(0.30 kg)的日均耗水量显著小于

11

样木 1(8.10 kg)和 3(10.01 kg),这主要与前者枝叶严重脱落有关。随着台风强度增大,树干折断比例也开始 提高,这会导致树木水分传输断面积减小,其水分传输阻力明显增加。Fukuda 等<sup>[86]</sup>对日本北海道鱼鳞云杉 (*Picea jezoensis*)和库页冷杉(*Abies sachalinensis*)的研究表明,遭受台风干扰的树木其正午叶水势和日均叶水 势均显著低于未干扰林地。最后,根系掘起会导致细根大量扯断,树木吸水功能大幅减弱,若台风后土壤水势 持续下降,则会进一步抑制海岸森林恢复。Imbert 和 Portecop<sup>[87]</sup>研究表明,台风"Hugo"登陆后 9 年,受影响 区域的树干密度、基面积和胸围仍未恢复到台风前水平,这主要与台风后连续的 4 年干旱有关。

但台风带来的强降雨也有助于增大海岸森林的根土水势差,这可缓解树木在短期内的干旱胁迫,海岸森 林叶面积在台风路径内相对路径外有明显增加<sup>[88]</sup>(图6)。Parker 等<sup>[23]</sup>对台风"Jova"和"Patricia"登陆墨西哥 西海岸后的研究证实,二者带来的降雨量分别是正常月降雨量的 3.7 倍和 4.2 倍,台风登陆后,热带干森林的 NDVI 相对正常年份出现显著增加,其持续时间分别达 8 个月和 6 个月。但郑怀舟 等<sup>[89]</sup>测定发现,强降雨并 未提高马尾松的可利用水分,其光合作用在台风前后无明显差异,这可能与研究区土壤侵蚀严重,强降雨更多 以径流出现有关。此外,台风后林窗出现使得林下层光照强度增加、地温升高,土壤蒸发加剧,土壤水分的可 利用性也降低。

#### 2.4.2 热量

不同气候带热量差异较大,海岸森林在台风后的恢复能力也有不同。温带海岸水热条件差,台风登陆频率低,海岸森林对台风干扰的脆弱性高,其恢复时间明显延长,且物种组成在台风前后也明显变化<sup>[17]</sup>(图6)。 Wu 等<sup>[90]</sup>采用景观模拟对长白山森林在台风后的恢复研究发现,森林在1810年前遭受台风干扰极少,之后因 不同树种对台风干扰的恢复差异,其早期表现为草本、灌木向岳桦(*Betula ermanii*)林转变,之后又从岳桦林向 鱼鳞云杉演替。随着台风登陆频率增加,部分受损森林在2010年仍未恢复到台风前水平。这与 Guo 等<sup>[91]</sup>对 同一地区研究一致,其认为台风"Vera"登陆后25年,山地森林仍未恢复到台风前水平,低海拔地区因热量充 足,树木恢复主要出现在海拔1400 m 以下,特别是西坡区域。

与温带海岸相比,热带亚热带海岸水热条件良好,大部分海岸森林在台风后 1—2 年内即可恢复<sup>[13,44,55]</sup> (图 6)。Peereman 等<sup>[58]</sup>基于 2001 到 2017 年频繁登陆台湾的台风研究证实,台风对海岸森林的损害仅在季 节尺度上有遗产效应,而在相邻年份不会累加,大部分海岸森林可在灾后一年内恢复,前一个年份台风引起的 海岸森林 NDII 下降并不会影响到后一年相关植被指数波动。此外,因树木受损较轻,热带亚热带海岸森林的 树种组成在台风前后变化不大。Franklin 等<sup>[30]</sup>对台风"Waka"登陆汤加后的研究发现,尽管海岸森林遭受了 台风的正面袭击,但其死亡率、折断和掘根的比例均较低,树木的萌生更新在台风后普遍出现。最终仍会形成 以老龄林为优势种,兼有少量早期演替树种的平衡模式<sup>[90]</sup>。

#### 3 研究展望

已有研究主要基于台风前后的遥感影像解译,或台风登陆后的野外样方调查,对海岸森林在不同研究尺 度受损及灾后恢复的影响因素进行分析(图7),相关研究取得了很大进展。但受台风登陆的不确定性,海岸 森林恢复的滞后性和数据源受限等影响,台风干扰下海岸森林受损及灾后恢复的影响因素依然复杂,目前难 以完全解释台风后海岸森林的受损和恢复格局,无法准确评估台风后不同树种的恢复潜力,这对海岸森林保 护、修复及管理提出巨大的挑战。未来台风登陆的强度和频率均呈增加趋势,目前难以预测气候变暖背景下, 海岸森林的树种组成如何变化,其生态系统服务功能会受到哪些影响,不同区域有何差异,从而导致沿海生态 安全存在很大的不确定性。为此,今后仍需从以下几个方面加强研究:

(1) 从台风后海岸森林的单个站点研究向区域、乃至全球观测网络研究过渡。首先,大部分研究仍集中 在北大西洋海岸,而对台风登陆频率更高的西太平洋和印度洋海岸森林研究较少,这使得在全球尺度上对台 风后海岸森林受损和恢复的空间格局理解不足或存在偏差。其次,多数研究集中于台风高频登陆区,而对其 低频登陆区研究较少。后者在台风后的恢复周期长,且对台风干扰的脆弱性更高,基于灾后海岸森林受损的



图 7 不同研究尺度下台风干扰对海岸森林的影响 Fig.7 Influence of typhoon disturbance on coastal forest at different research scales

快速评估无法准确反映该区域不同树种的抗台风能力。我国正处于西北太平洋一侧,且纬度跨度大,台风从 热带到温带均有登陆,对海岸森林的影响巨大,因此,相关的研究就显得尤为重要。未来需要制定统一观测标 准,加强从区域到全球尺度的合作研究,从而探明台风干扰对海岸森林的影响机制,深入揭示不同空间尺度海 岸森林受损及恢复的主控因素。

(2)加强不同时间尺度下台风对海岸森林影响的综合研究。首先,大部分研究基于单台风干扰下海岸森林的受损进行评估,而对多台风连续干扰下海岸森林的受损机制研究不足,难以反映未来台风登陆频率增加下海岸森林的演替过程,尚不清楚在年际或季节尺度上,台风对不同区域、不同类型海岸森林的影响是否均有遗产效应。其次,多数研究基于台风登陆前后的遥感影像或灾后及时的野外调查对海岸森林受损进行评估,而对台风登陆中海岸森林如何受损仍不清楚,也难以反映海岸森林恢复对台风干扰的滞后效应。未来需要从多学科入手,既要基于台风路径精准预报和应变式传感器等,在瞬时尺度上对台风登陆时单个植株与台风的共振机制进行研究。也要利用台风后的野外固定样方调查和多源遥感数据分析等,在年际尺度上对海岸森林的树种组成、林分结构、景观格局及后续生态系统服务功能变化等进行跟踪研究。同时结合树木年轮取样等, 在百年甚至更长时间尺度上对台风后海岸森林的演替过程进行分析。这有助于理解不同时间尺度下台风对海岸森林的影响过程及其机制,也可为海岸森林的灾后恢复措施制定等提供科学依据。

(3)加强多手段联合下台风对海岸森林影响的集成研究。首先,基于野外固定样方调查,可在个体、种群和群落尺度上对台风后海岸森林的恢复过程进行研究,但受台风登陆的不确定性影响,相关研究大多缺乏台风前的对照样方,从而导致后续的海岸森林灾损评估存在很大的不确定性。其次,基于多源遥感数据分析可在景观尺度上反映台风后海岸森林的恢复过程,但受台风后短时间内高质量影像的可获取性及物候波动、海岸森林的非线性恢复等影响,当前针对海岸森林的恢复监测也存在很大的不确定性。未来仍需在台风后选择典型样地,采用前期高频率后期低频率的模式进行调查,并借助卫星遥感数据、机载雷达数据和无人机拍摄等手段,全面揭示台风后海岸森林在不同时空尺度上的受损及恢复格局。

(4) 从台风后海岸森林的生态过程向生理过程研究过渡。首先,基于遥感影像获取的植被指数仍可反映 台风前后海岸森林的受损及恢复格局,但不同植被指数各有优缺点,其在同一台风事件的变化也不尽相同,且 受数据可获取性影响,其与地面调查结果并不完全一致。其次,受树种特征、林分结构和立地条件等影响,单 纯基于地面调查的生态指标存在很大的空间异质性,难以准确反映不同树种的受损及恢复格局。台风后树木 水分传输过程和光合产物分配将发生改变,从而影响海岸森林的受损及恢复过程。尚不清楚不同受损程度 下,典型树种的水分传输过程和光合产物分配将如何改变,难以准确预测不同树种在灾后的恢复潜力。未来 需要借助野外定位观测、采样和室内样品分析,对台风后海岸森林,特别是极易受损的人工林其各个生理指标 进行持续测定,同时结合日渐丰富的遥感数据,构建更为可靠的植被指数以反映林冠层的生理过程变化,深入 揭示台风干扰对海岸森林的影响机制。

#### 参考文献(References):

- [1] Lin T C, Hamburg S P, Lin K C, Wang L J, Chang C T, Hsia Y J, Vadeboncoeur M A, Mabry McMullen C M, Liu C P. Typhoon disturbance and forest dynamics: lessons from a northwest Pacific subtropical forest. Ecosystems, 2011, 14(1): 127-143.
- [2] De Dominicis M, Wolf J, van Hespen R, Zheng P, Hu Z. Mangrove forests can be an effective coastal defence in the Pearl River Delta, China. Communications Earth & Environment, 2023, 4(1): 13.
- [3] Adger W N, Hughes T P, Folke C, Carpenter S R, Rockström J. Social-ecological resilience to coastal disasters. Science, 2005, 309(5737): 1036-1039.
- [4] Liu L, Wang Y Q, Zhan R F, Xu J, Duan Y H. Increasing destructive potential of landfalling tropical cyclones over China. Journal of Climate, 2020, 33(9): 3731-3743.
- [5] Wang S, Toumi R. Recent migration of tropical cyclones toward coasts. Science, 2021, 371(6528): 514-517.
- [6] 刘斌, 潘澜, 薛立. 台风对森林的影响. 生态学报, 2012, 32(5): 1596-1605.
- [7] 杜建会, 邵佳怡, 李升发, 秦晶. 树木非结构性碳水化合物含量多时空尺度变化特征及其影响因素研究进展. 应用生态学报, 2020, 31 (4): 1378-1388.
- [8] Lin S, Shaner P J L, Lin T C. Characteristics of old-growth and secondary forests in relation to age and typhoon disturbance. Ecosystems, 2018, 21 (8): 1521-1532.
- [9] 仝川,杨玉盛. 飓风和台风对沿海地区森林生态系统的影响. 生态学报, 2007, 27(12): 5337-5344.
- [10] Abbas S, Nichol J E, Fischer G A, Wong M S, Irteza S M. Impact assessment of a super-typhoon on Hong Kong's secondary vegetation and recommendations for restoration of resilience in the forest succession. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 280; 107784.
- [11] Zhang X, Jiao H B, Chen G S, Shen J N, Huang Z H, Luo H Y. Forest damage by super typhoon rammasun and post-disturbance recovery using Landsat imagery and the machine-learning method. Remote Sensing, 2022, 14(15): 3826.
- [12] 高翔,张英洁,许嘉巍,靳英华,郭笑怡,陶岩,胡睿,韩莹莹,白云玉,王慧赟.温带山地森林强风致灾的影响因子分析——以长白山风灾区为例.东北师大学报:自然科学版,2019,51(2):130-139.
- [13] Feng Y L, Negrón-Juárez R I, Chambers J Q. Remote sensing and statistical analysis of the effects of hurricane María on the forests of Puerto Rico. Remote Sensing of Environment, 2020, 247: 111940.
- [14] Wu T G, Zhang P, Zhang L, Wang G G, Yu M K. Morphological response of eight Quercus species to simulated wind load. PLoS One, 2016, 11 (9): e0163613.
- [15] Yang X Q, Zhang P, Wu Q T, Yan H, Yu M K, Wang G, Wu T G. Effects of simulated wind load on leaf photosynthesis and carbohydrate allocation in eight *Quercus* species. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2017, 11(6): 629-634.
- [16] 张鹏, 孙阳, 虞木奎, 吴统贵. 海岸梯度上黑松针叶形态与解剖结构性状的变化规律. 植物研究, 2018, 38(3): 343-348.
- [17] Lin T C, Hogan J A, Chang C T. Tropical cyclone ecology: a scale-link perspective. Trends in Ecology & Evolution, 2020, 35(7): 594-604.
- [18] Hirsh H, Marler T. Damage and recovery of Cycas micronesica after Typhoon Paka. Biotropica, 2002, 34(4): 598-602.
- [19] Uriarte M, Thompson J, Zimmerman J K. Hurricane María tripled stem breaks and doubled tree mortality relative to other major storms. Nature Communications, 2019, 10(1): 1-7.
- [20] Xiong L, Lagomasino D, Charles S P, Castañeda-Moya E, Cook B D, Redwine J, Fatoyinbo L. Quantifying mangrove canopy regrowth and recovery after Hurricane Irma with large-scale repeat airborne lidar in the Florida Everglades. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 114: 103031.
- [21] Sharma A, Ojha S K, Dimov L D, Vogel J G, Nowak J. Long-term effects of catastrophic wind on southern US coastal forests; lessons from a major

hurricane. PLoS One, 2021, 16(1): e0243362.

- [22] Imbert D. Hurricane disturbance and forest dynamics in east Caribbean mangroves. Ecosphere, 2018, 9(7): e02231.
- [23] Parker G, Martínez-Yrízar A, Álvarez-Yépiz J C, Maass M, Araiza S. Effects of hurricane disturbance on a tropical dry forest canopy in western Mexico. Forest Ecology and Management, 2018, 426: 39-52.
- [24] Yap S L, Davies S J, Condit R. Dynamic response of a Philippine dipterocarp forest to typhoon disturbance. Journal of Vegetation Science, 2016, 27(1): 133-143.
- [25] Rutledge B T, Cannon J B, McIntyre R K, Holland A M, Jack S B. Tree, stand, and landscape factors contributing to hurricane damage in a coastal plain forest: post-hurricane assessment in a longleaf pine landscape. Forest Ecology and Management, 2021, 481: 118724.
- [26] 许涵,李意德,骆土寿,林明献,陈德祥,莫锦华,罗文,黄豪.达维台风对海南尖峰岭热带山地雨林群落的影响.植物生态学报,2008, 32(6):1323-1334.
- [27] Takashima A, Nakanishi A, Morishita M, Abe S, Saito K, Kotaka N. Tree-cavity formation in the mature subtropical forests of Yambaru, Okinawa Island. Journal of Forest Research, 2021, 26(6): 410-418.
- [28] 姚丹丹,余黎,雷相东,卢军,符利勇,张晓红,耿少波,赵忠林,张会儒,汪兆阳.台风"布拉万"对东北近天然落叶松云冷杉试验林的 影响. 生态学报, 2015, 35(11): 3674-3683.
- [29] Li Y L, Mwangi B N, Zhou S, Liu S Z, Zhang Q M, Liu J X, Chu G, Tang X L, Zhang D Q, Wei S M, Lie Z, Wu T, Wang C, Yang G F, Meng Z. Effects of typhoon mangkhut on a monsoon evergreen broad-leaved forest community in Dinghushan nature reserve, lower subtropical China. Frontiers in Ecology and Evolution, 2021, 9: 692155.
- [30] Franklin J, Drake D R, McConkey K R, Tonga F, Smith L B. The effects of Cyclone Waka on the structure of lowland tropical rain forest in Vava' u, *Tonga*. Journal of Tropical Ecology, 2004, 20(4): 409-420.
- [31] Zhang J Y, Heartsill Scalley T, Bras R. Forest structure and composition are critical to hurricane mortality. Forests, 2022, 13(2): 202.
- [32] 许秀玉,肖莉,王明怀,张华新.沿海抗台风树种评价体系构建与选择.浙江农林大学学报,2015,32(4):516-522.
- [33] Hayashi M, Saigusa N, Oguma H, Yamagata Y, Gen T K. Quantitative assessment of the impact of typhoon disturbance on a Japanese forest using satellite laser altimetry. Remote Sensing of Environment, 2015, 156: 216-225.
- [34] Gardiner B. Wind damage to forests and trees: a review with an emphasis on planted and managed forests. Journal of Forest Research, 2021, 26 (4): 248-266.
- [35] 陈绶柱, 岑奋, 吴泽鹏. 沿海沙岸防风固沙木麻黄试验示范林抗御台风分析. 广东林业科技, 1999, 15(1): 26-30.
- [36] Morimoto J, Nakagawa K, Takano K T, Aiba M, Oguro M, Furukawa Y, Mishima Y, Ogawa K, Ito R, Takemi T, Nakamura F, Peterson C J. Comparison of vulnerability to catastrophic wind between *Abies* plantation forests and natural mixed forests in northern Japan. Forestry: an International Journal of Forest Research, 2019, 92(4): 436-443.
- [37] Kamimura K, Nanko K, Matsumoto A, Ueno S, Gardiner J, Gardiner B. Tree dynamic response and survival in a category-5 tropical cyclone: the case of super typhoon Trami. Science Advances, 2022, 8(10): eabm7891.
- [38] Suzuki S, Sakamoto T, Noguchi H. Wind damage risk estimation for strip cutting under current and future wind conditions based on moment observations in a coastal forest in Japan. Journal of Forest Research, 2016, 21(5): 223-234.
- [39] Zhang X, Chen G S, Cai L X, Jiao H B, Hua J W, Luo X F, Wei X L. Impact assessments of typhoon lekima on forest damages in subtropical China using machine learning methods and Landsat 8 OLI imagery. Sustainability, 2021, 13(9): 4893.
- [40] Xi W M. Synergistic effects of tropical cyclones on forest ecosystems: a global synthesis. Journal of Forestry Research, 2015, 26(1): 1-21.
- [41] Wu T G, Zhang P, Zhang L, Wang J Y, Yu M K, Zhou X H, Wang G G. Relationships between shelter effects and optical porosity: a metaanalysis for tree windbreaks. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259: 75-81.
- [42] Stas S M, Spracklen B D, Willetts P D, Le T C, Tran H D, Le T T, Ngo D T, Le A V, Le H T, Rutishauser E, Schwendike J, Marsham J H, van Kuijk M, Jew E K K, Phillips O L, Spracklen D V. Implications of tropical cyclones on damage and potential recovery and restoration of logged forests in Vietnam. Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences, 2023, 378(1867): 20210081.
- [43] Xiao F J, Liu Q F. An evaluation of vegetation loss due to the super typhoon Sarika in Hainan Island of China. Natural Hazards, 2023, 115(2): 1677-1695.
- [44] Peereman J, Hogan J A, Lin T C. Assessing typhoon-induced canopy damage using vegetation indices in the Fushan experimental forest, Taiwan. Remote Sensing, 2020, 12(10): 1654.
- [45] Rezaei R, Ghaffarian S. Monitoring forest resilience dynamics from very high-resolution satellite images in case of multi-hazard disaster. Remote Sensing, 2021, 13(20): 4176.
- [46] Zhang X Y, Wang Y, Jiang H, Wang X M. Remote-sensing assessment of forest damage by Typhoon Saomai and its related factors at landscape scale. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(21): 7874-7886.

- [47] Kupfer J A, Myers A T, McLane S E, Melton G N. Patterns of forest damage in a southern Mississippi landscape caused by hurricane katrina. Ecosystems, 2008, 11(1): 45-60.
- [48] Feng Y L, Negrón-Juárez R I, Chambers J Q. Multi-cyclone analysis and machine learning model implications of cyclone effects on forests. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 103: 102528.
- [49] Ida H, Nakagoshi N. A large gap formation in a beech forest on Mt. Garyu in southwestern Japan by typhoon 9119. Journal of Sustainable Forestry, 1997, 6(3/4): 237-250.
- [50] Morimoto J, Aiba M, Furukawa F, Mishima Y, Yoshimura N, Nayak S, Takemi T, Chihiro H, Matsui T, Nakamura F. Risk assessment of forest disturbance by typhoons with heavy precipitation in northern Japan. Forest Ecology and Management, 2021, 479; 118521.
- [51] Nandi G, Neogy S, Roy A K, Datta D. Immediate disturbances induced by tropical cyclone Fani on the coastal forest landscape of eastern India: a geospatial analysis. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2020, 20: 100407.
- [52] Défossez P, Veylon G, Yang M, Bonnefond J M, Garrigou D, Trichet P, Danjon F. Impact of soil water content on the overturning resistance of young *Pinus Pinaster* in sandy soil. Forest Ecology and Management, 2021, 480: 118614.
- [53] Peereman J, Hogan J A, Lin T C. Disturbance frequency, intensity and forest structure modulate cyclone-induced changes in mangrove forest canopy cover. Global Ecology and Biogeography, 2022, 31(1): 37-50.
- [54] Stanturf J A, Goodrick S L, Outcalt K W. Disturbance and coastal forests: a strategic approach to forest management in hurricane impact zones. Forest Ecology and Management, 2007, 250(1/2): 119-135.
- [55] Long J, Giri C, Primavera J, Trivedi M. Damage and recovery assessment of the Philippines' mangroves following Super Typhoon Haiyan. Marine Pollution Bulletin, 2016, 109(2): 734-743.
- [56] Hook D, Buford M, Williams T. Impact of Hurricane Hugo on the South Carolina coastal plain forest. Journal of Coastal Research, 1991, 291-300.
- [57] Rossi E, Rogan J, Schneider L. Mapping forest damage in northern Nicaragua after Hurricane Felix (2007) using MODIS enhanced vegetation index data. GIScience & Remote Sensing, 2013, 50(4): 385-399.
- [58] Peereman J, Aaron Hogan J, Lin T C. Intraseasonal interactive effects of successive typhoons characterize canopy damage of forests in Taiwan: a remote sensing-based assessment. Forest Ecology and Management, 2022, 521: 120430.
- [59] Gang C C, Pan S F, Tian H Q, Wang Z N, Xu R T, Bian Z H, Pan N Q, Yao Y Z, Shi H. Satellite observations of forest resilience to hurricanes along the northern Gulf of Mexico. Forest ecology and management, 2020, 472: 118243.
- [60] Korznikov K, Kislov D, Doležal J, Petrenko T, Altman J. Tropical cyclones moving into boreal forests: relationships between disturbance areas and environmental drivers. Science of the Total Environment, 2022, 844: 156931.
- [61] Fernandes A, Rollinson C, Kearney W S, Dietze M, Fagherazzi S. Declining radial growth response of coastal forests to hurricanes and nor'easters. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(3): 832-849.
- [62] Zhang G, Murakami H, Knutson T R, Mizuta R, Yoshida K. Tropical cyclone motion in a changing climate. Science Advances, 2020, 6(17): eaaz7610.
- [63] Boose E R, Foster D R, Fluet M. Hurricane impacts to tropical and temperate forest landscapes. Ecological Monographs, 1994, 64(4): 369-400.
- [64] 陈沐,曹敏,林露湘.木本植物萌生更新研究进展.生态学杂志,2007,26(7):1114-1118.
- [65] Altman J, Doležal J, Černý T, Song J S. Forest response to increasing typhoon activity on the Korean peninsula: evidence from oak tree-rings. Global Change Biology, 2013, 19(2): 498-504.
- [66] Yoshida T. Regeneration dynamics on treefall mounds and pits for 10 years after a windfall in a natural mixed forest. Forests, 2021, 12(8): 1064.
- [67] Van Bloem S J, Murphy P G, Lugo A E. A link between hurricane-induced tree sprouting, high stem density and short canopy in tropical dry forest. Tree Physiology, 2007, 27(3): 475-480.
- [68] Mascaro J, Perfecto I, Barros O, Boucher D H, de la Cerda I G, Ruiz J, Vandermeer J. Aboveground biomass accumulation in a tropical wet forest in Nicaragua following a catastrophic hurricane disturbance. Biotropica, 2005, 37(4): 600-608.
- [69] Wu L, Kato T, Sato H, Hirano T, Yazaki T. Sensitivity analysis of the typhoon disturbance effect on forest dynamics and carbon balance in the future in a cool-temperate forest in northern Japan by using SEIB-DGVM. Forest Ecology and Management, 2019, 451: 117529.
- [70] Leitold V, Morton D C, Martinuzzi S, Paynter I, Uriarte M, Keller M, Ferraz A, Cook B D, Corp L A, González G. Tracking the rates and mechanisms of canopy damage and recovery following hurricane maria using multitemporal lidar data. Ecosystems, 2022, 25(4): 892-910.
- [71] Boucher D H, Vandermeer J H, Yih K, Zamora N. Contrasting hurricane damage in tropical rain forest and pine forest. Ecology, 1990, 71(5): 2022-2024.
- [72] Smith-Martin C M, Muscarella R, Ankori-Karlinsky R, Delzon S, Farrar S L, Salva-Sauri M, Thompson J, Zimmerman J K, Uriarte M. Hurricanes increase tropical forest vulnerability to drought. New Phytologist, 2022, 235(3): 1005-1017.
- [73] Song S S, Ding Y L, Li W, Meng Y C, Zhou J, Gou R K, Zhang C H, Ye S B, Saintilan N, Krauss K W, Crooks S, Lv S G, Lin G H. Mangrove

reforestation provides greater blue carbon benefit than afforestation for mitigating global climate change. Nature Communications, 2023, 14 (1): 756.

- [74] Fickert T. To plant or not to plant, that is the question: reforestation vs. natural regeneration of hurricane-disturbed mangrove forests in Guanaja (Honduras). Forests, 2020, 11(10):1068.
- [75] Liu C L C, Kuchma O, Krutovsky K V. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. Global Ecology and Conservation, 2018, 15: e00419.
- [76] Deng H Y, Shen L L, Yang J Q, Mo X Y. Stand stability of pure and mixed-*Eucalyptus* forests of different tree species in a typhoon-prone area. Forests, 2021, 12(4): 458.
- [77] Primavera J H, dela Cruz M, Montilijao C, Consunji H, dela Paz M, Rollon R N, Maranan K, Samson M S, Blanco A. Preliminary assessment of post-Haiyan mangrove damage and short-term recovery in Eastern Samar, central Philippines. Marine Pollution Bulletin, 2016, 109(2): 744-750.
- [78] Chao K J, Lin Y C, Song G Z M, Liao C H, Kuo Y L, Hsieh C F, Schupp E W. Understorey light environment impacts on seedling establishment and growth in a typhoon-disturbed tropical forest. Plant Ecology, 2022, 223(8): 1007-1021.
- [79] Chao K J, Hsu T Y, Lu T C, Song G Z M, Chao W C, Wu C F, Sheue C R, Hsieh C F, Schupp E W. Multiple canopy opening effects on recruited saplings in a typhoon-disturbed tropical rainforest, Taiwan. Biotropica, 2023, 55(2): 396-407.
- [80] Delaporte B, Ibanez T, Despinoy M, Mangeas M, Menkes C. Tropical cyclone impact and forest resilience in the southwestern Pacific. Remote Sensing, 2022, 14(5): 1245.
- [81] Zimmerman J K, Wright S J, Calderón O, Pagan M A, Paton S. Flowering and fruiting phenologies of seasonal and aseasonal neotropical forests: the role of annual changes in irradiance. Journal of Tropical Ecology, 2007, 23(2): 231-251.
- [82] 郑志颖. "莫兰蒂"强台风对闽南沿海马尾松林下植物多样性的影响. 防护林科技, 2019(1): 3-6, 91.
- [83] Sato T, Yamazaki H, Yoshida T. Extending effect of a wind disturbance: mortality of Abies sachalinensis following a strong typhoon in a natural mixed forest. Journal of Forest Research, 2017, 22(6): 336-342.
- [84] Quebbeman A W, Menge D N L, Arellano G, Hall J, Wood T E, Zimmerman J K, Uriarte M. A severe hurricane increases carbon dioxide and methane fluxes and triples nitrous oxide emissions in a tropical forest. Ecosystems, 2022, 25(8): 1754-1766.
- [85] 白永会,叶功富,查轩,游水生,尤龙辉,高伟.沿海沙地木麻黄人工林树干液流对台风的响应.亚热带资源与环境学报,2019,14(2): 12-18.
- [86] Fukuda K, Nishiya Y, Nakamura M, Suzuki K. Water relations of Yezo spruce and Todo fir in declined stands of boreal forest in Hokkaido, Japan. Journal of Forest Research, 1997, 2(2): 79-84.
- [87] Imbert D, Portecop J. Hurricane disturbance and forest resilience: assessing structural vs. functional changes in a Caribbean dry forest. Forest Ecology and Management, 2008, 255(8/9): 3494-3501.
- [88] Chen Y Y, Luyssaert S. Precipitation rather than wind drives the response of East Asian forests to tropical cyclones. Biogeosciences Discussions, 2022, 1-28.
- [89] 郑怀舟,朱锦懋,李守中,魏霞,袁红伟,方舟易.福建长汀土壤严重侵蚀区马尾松树干液流对台风天气的响应.亚热带植物科学, 2011,40(1):13-17.
- [90] Wu M M, Zou X H, Liang Y, Stambaugh M, Fraser J S, Xu W R, He H S. The impact of typhoon on post-volcanic-eruption forest landscape recovery: a study in Changbai mountain through 300 years of historic landscape reconstruction. Landscape Ecology, 2022, 37(5): 1401-1416.
- [91] Guo X Y, Zhang H Y, Wang Y Q, Clark J. Mapping and assessing typhoon-induced forest disturbance in Changbai Mountain National Nature Reserve using time series Landsat imagery. Journal of Mountain Science, 2015, 12(2): 404-416.