

沿海地区森林风害研究综述

孙洪刚¹, 林雪峰², 陈益泰^{1*}, 张晓磊³

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2. 浙江省温岭市农林局
林业技术推广站, 浙江 温岭 317500; 3. 山东农业大学林学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 从导致森林风害的因素、风害对沿海森林生态系统的影响、风害评估方法、降低森林风害的经营管理措施等方面, 综述了风害与沿海森林生态系统关系的研究成果和不足。我国未来应加强在不同尺度下沿海森林结构与功能关系、局域和区域尺度下各类生物/非生物因素与森林风害的关系以及森林风害预测评估模型的构建等 3 方面的研究。

关键词: 海岸森林; 风害; 风害评估模型; 生态尺度; 森林管理

中图分类号: S424

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2010)05-0577-09

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.05.018

A Review of Forest Wind Damage in the Coastal Areas

SUN Hong-gang¹, LIN Xue-feng², CHEN Yi-tai^{1*}, ZHANG Xiao-lei³

(1. *Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China;*
2. *Extension Station of Forestry Science and Technology, Wenling City Bureau of Forestry,*
Wenling 317500, China; 3. *College of Forestry, Shangdong Agriculture University, Taian 271018, China*)

Abstract: The relationship between coastal forest ecosystem and wind damage was reviewed, including the factors of forest wind damage, wind damage effects on coastal forest ecosystem, evaluation method of wind damage and measures of management for decreasing wing damage. It should pay more attention to the relationship between coastal forest structure and function at different spatial scale, the effects on biotic/abiotic wind damage factors at local and regional scale, and wind risk assessment model.

Key words: Coastal forest; Wind damage; Wind risk assessment model; Ecological scale; Forest management

森林风害是导致沿海地区森林生态系统结构和功能发生变化的重要非生物因素^[1-2], 给林业生产、社会经济及人民生命安全造成重大损失。2005 年 Katrina 飓风使美国密西西比州和路易斯安那州的海岸防护林受害面积达到总面积的 53%, 共计 $3.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[3]。2008 年“森拉克”台风在浙江省苍南县登陆, 导致温州、台州两市林业损失高达 2.17 亿元, 苍南和平阳两县沿海防护林折干、掘根率达 50% 以上, 郁闭度从 0.9 降至 0.5 以下。

近几十年来, 有关生物和非生物因素与森林风害的关系以及风害对热带和亚热带沿海森林生态系统的结构、过程和功能的影响等方面的研究已有

报道^[4-5]。不同空间尺度下的风害评估模型也受到重视, 但多集中在美国、日本以及其他受风害影响严重的国家和地区, 国内的研究报道较少^[6-8]。

中国位于太平洋西岸, 受各种风害(尤其是台风)影响严重, 特别是我国东南沿海的热带和亚热带地区(包括台湾省、海南省), 对已有沿海森林结构和防护功能都带来重要影响。

因此, 研究森林风害对于保护沿海防护林和指导沿海防护林体系建设具有重要意义。本文从影响森林风害的因素、风害对沿海森林生态系统的影响、风害评估方法、降低风害的经营管理措施等方面进行综述, 并展望了今后应重点开展的研究领

域,旨在促进我国森林风害研究更加系统深入。

1 生物/非生物因素与树木风害的关系

当风力达到树木承受的风压极限,树木的特定部位不能抵抗风压时就会发生森林风害^[9]。导致树木风害的作用力主要有两部分组成:风的水平作用力和树木本身质量产生的重力(主要是树冠质量)^[10]。水平作用力首先在树冠中心形成水平压力使树干倾斜,而树干倾斜则导致树干和树冠的重心偏移,由于重力作用,加剧了树干偏移程度。如果风速进一步增加,将造成掘根、折干、折冠及树干弯曲等危害。

导致树木发生风害的因素很多,主要有以下几个方面:

(1)树种特性。不同树种的生长速度、树冠特征、树干物理性质及根系生长特性不同,其抗风能力也有差异。同时,遗传差异也使同一树种不同植株的抗风能力不同^[11]。梁坤南等对尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*) 11 个种源 174 个家系 2~3 年生试验林的生长与抗风性的研究表明,尾叶桉种源/家系的生长性状与其抗风性能呈显著的负相关^[12]。

(2)林龄。随林龄的增长,树木抗风能力逐渐增强,风害类型呈规律变化。幼龄林的风害多数为树干弯曲,发生折干和掘根的可能性很小,这是由于幼树树干木质化比例较小,柔韧度高。风害导致幼龄林树干弯曲可分为上部树干弯曲和根际树干弯曲两种类型。上部树干弯曲在风害停止后,树木将逐步恢复生长,但由于主干和侧枝的顶芽受到强风胁迫和物理损伤,因而生长势较差,同时树冠形状发生变化,容易形成偏冠,再次承受风害的能力下降。根际树干弯曲的树木恢复程度主要取决于树干弯曲状况。中龄林和成熟林的风害类型主要为掘根和折干/冠^[13],取决于树干抗折断能力与根系土壤固着力。当树干抗折断能力低于根系土壤固着力时,风害表现为折干/冠形式;当树干抗弯折能力大于根系土壤固着力时,风害表现为掘根。一般情况下,中龄林风害类型以折干/冠为主,掘根比例随林龄增长而增加^[14]。King 以树干直径与保持树干直立所需最小直径的比值作为树木风害稳定性指标,认为随林龄增加,糖槭(*Acer saccharum*)树干随直径增大而稳定性增强,但却导致树干韧性降低,从而增加了折干的可能性^[15]。

(3)根系的深浅。强风下,深根系树种(直根系长度超过 80 cm)的抗风能力大于浅根系树种(直根系长度小于 80 cm)。当林分密度过大时,林木侧根的生长由于相邻木的竞争而受到限制,根系的土壤固着力降低,易发生掘根风害。Papescha 等对辐射松(*Pinus radiata*)进行弯曲力矩试验表明,与根系深度相比,根系宽幅对弯曲力矩的影响更大^[16]。因此,当侧根系的生长受到限制时,树木根系土壤固着力将减小。但这并不是说,根系的纵向生长与根系土壤固着力无关。Nicol 等的研究表明根系土壤固着力与根系深度有密切关系^[17]。另外,强风持续作用下,树干的不断晃动减小了根系与土壤的摩擦力,尤其在土壤含水量较高的时候,容易发生掘根危害^[18]。

(4)树冠形态、叶面积指数、树高等。一般而言,树冠宽大的树种比树冠窄小的树种抗风能力弱^[9]。叶面积指数越小,树种的抗风能力越强。同一树种,树高越小,冠幅重心越低,抗风能力越强;胸径越大抗风性能越好。不同树种,平均树高越小抗风性能越好^[3]。

(5)非生物因素。土壤类型决定了根系构型及根系生物量,从而影响树木的风害稳定性^[3]。土壤水位高低、重金属含量也会影响树种抗风能力。土壤未冻结时,掘根比折干更容易;而土壤冻结时,折干危害发生的可能性要高于掘根,因此,掘根多发生在雨水多的季节。Ray 等的研究表明,土壤水位低,树木根系长,树木的抗掘根能力增强^[20]。土壤中 Cd⁶浓度的差异,导致树种间树冠特性和树干韧性不同,最终影响树种的风害稳定性^[21]。树木掘根也与土壤盐基饱和度、土壤空气容量有密切关系^[22]。日益严重的大气污染导致土壤酸化,不仅影响植物根系生长、周转率,根系的分布也受到限制,并最终对树木的抗风能力产生影响^[23]。

任何一个生态过程都不是某一个或几个因素起作用,而是多个因素共同作用的结果。目前森林风害研究主要存在以下问题:(1)研究尺度与风害实际作用尺度不符;(2)只考虑单因素或少数几个因素与森林风害的关系,结论具有明显的片面性;(3)缺乏对生物和非生物因素交互作用与风害关系的研究;(4)研究成果多为定性结论,鲜有量化说明。因此,目前的研究成果很难用来指导防、减森林风害的生产实践。

2 生物/非生物因素与林分风害的关系

林分和单株树木在空间尺度上差异明显,因此影响二者风害的生物和非生物因素必然不同。在林分尺度下,主要有以下4方面:

(1)林分密度与林分稳定性。过密林分树木的根系生长受到限制,尖削度也较小。因此,高密度林分,尤其是同龄纯林受风害可能性更大。间伐是调节林分密度的有效方式,间伐使树木侧根得到充分的生长空间,增强根系的土壤固着力。不过,有研究表明间伐使得树木弯曲力矩增大,是导致风害的因素之一^[24]。Peltola 等对气流通过林分密度分别为 2700 ind. hm⁻² 和 1500 ind. hm⁻² 的湿地松(*Pinus elliottii*)的路径进行研究,认为风害与林分密度没有必然联系^[25]。

(2)森林的空间格局。在森林管理过程中,如皆伐、间伐、林区公路修建等,林分空间格局会发生改变,形成林窗,进入林分中的气流路线改变而导致风害发生。如块状皆伐后的第1年,皆伐地边缘树木发生风害的可能性要大^[26]。这主要是由于林窗周围树木弯曲力矩增加的结果。Peltola 等的研究表明,皆伐后形成的林缘与皆伐中心区域相比,气流强度更强^[27]。人类活动使森林中出现不同尺度、形状各异的林窗,森林风害的发生日益频繁。

(3)地形、海拔等改变风强和风向,间接影响森林风害。山坡迎风面、风口、山脊、山坡下风向等特殊地形容易发生森林风害。山谷由于“狭管效应”易形成风害,但随海拔升高,干扰强度逐渐降低^[3]。地形改变风向,形成风向偏角(即风向与林带垂直线的交角),而风向偏角与林带防护功能有密切关系,并以不同风害程度显现。风向偏角在 30° 以内时,气流通过林带的动能减小率变化对各种结构的防护林带都不大于 3%。具有小于最适透风系数的林带,动能减小率随风向偏角的增大而减小;具有大于最适透风系数的林带,动能减小率随风向偏角的增大而增大^[28-29]。

(4)树木尖削度,是评估风害的重要指标。当树木尖削度大于 100 时,林木抗风害的能力严重减弱;尖削度小于 60 时,折干危害显著减小^[30]。尖削度随林龄变化,且可通过间伐调节。过密林分由于林木间的竞争,一般都具有较小的尖削度,易发生风害。因此,在人工林造林时,适当增大株行距,增加树木尖削度,可以避免折干风害。不过,将树木

尖削度作为反映间伐后树木风害稳定性的指标也有不足。这是因为间伐后的几年,树木间竞争程度降低,高生长速度小于径向生长导致树木尖削度减小,根系生长空间也得到扩展,因此树木稳定性增加。而刚间伐的林分密度减小,树冠郁闭度降低,树木的风载荷增加,降低了林分的稳定性。Aoyagi 等指出,库页冷杉(*Abies sachalinensis*)林间伐后 5 年风害程度明显加剧。也有研究认为树木尖削度与风害程度没有必然联系^[31]。这说明间伐林分的风害是树木尖削度与其他生物因子和环境因素共同作用的结果。

3 风害对森林生态系统的影响

3.1 风害对森林结构的影响

风害使森林结构的异质性增强。Katrina 飓风过后,Lower Peral River 区域森林的斑块数量和密度均减小;斑块的平均面积和总的斑块面积增加;斑块形状指数、边界长度也增加,这说明风害后的斑块形状更加复杂和不规则,不同林型受害情况不同^[3]。风害导致林分断面面积减小,尤以过熟林减少的最多,其次是中龄林。风害干扰使森林水平结构呈“流动镶嵌”;多次风害干扰后的林分冠层结构复杂,促进了林分结构的异质性^[32]。受害的林分大多为森林中的优势木时,森林的平均树高减小^[33]。风害导致乔木树种受到损害的同时,对林分中的其他物种也会产生重要影响。飓风“Hugo”1989 年 9 月袭击美国 Congaree 国家森林公园,37% 阔叶林受损,藤本植物密度减小 55%。直到飓风过后 12 年密度才恢复^[34]。

森林结构的恢复比生态系统功能的恢复需要更长的时间^[35]。

3.2 风害对森林生态过程的影响

风害导致林木死亡的过程可持续 40 年之久,但年平均死亡率逐渐降低^[36]。粗木残质体的分解速率对生态系统的营养循环和能量流动有重要影响^[37]。粗木残质体每年的分解速率只有 15% 左右^[38],风害后一段时间内粗木残质体的分解超过了森林获得的净初级生产,导致净生态系统碳平衡的负增长^[36]。

风害引起森林地表的光强分布呈空间异质性,林分内物种组成改变,丰富度显著增加。原有地表植被结构的破坏,为新的物种生长拓展了空间。异龄复层林分的形成增加了森林的稳定性;局域立地

条件的差异也为物种遗传变异提供了外部条件。同时,强风形成的林窗,可加快同龄幼树的世代更新频率^[39]。风害干扰后,演替初期树种一般以外来物种为主,后由原有树种形成的土壤种子库、风害后遗留的幼苗逐渐使林窗郁闭,林窗周围树木的横向生长对林窗郁闭的贡献不大。风害后过熟林的更新以晚期演替树种为主,更新幼苗和幼树多分布在树倒坑、树倒丘及地表隆起的树干上。演替幼苗在直径小于 1/2 树高的林隙中一般无法存活,这主要是由于小林隙很快就会被其周围树冠的侧生长填充。

Wang 等在系统水平上对 Hugo 飓风过后 Puerto Rico 地区热带雨林的时空变化进行研究,结果表明,林冠恢复速度较快的低海拔 Ttabonuco 森林的总生产力年均增加 30%;高海拔的棕榈和矮曲林则由于林冠恢复速度缓慢,总生产力年均减少 20%,风害 5 年后仍然没有恢复;土壤有机碳、CO₂ 的释放略有增加,N 素矿质化速率明显加快^[40]。

3.3 风害对森林生态功能的影响

树木掘根导致树木根丛裸露,表层土壤被扰动,矿质土层、腐殖质等暴露于地表。粗木残质体的分解增加了土壤养分^[37]。同时,林窗内地表温度上升,土壤湿度降低,淋溶作用增强,土壤生物多样性增加而导致了局部土壤成分的异质性^[41]。这种土壤异质性的消失至少要 50~100 a 的时间^[1],而局部立地条件的不同,对风害后更新树种的选择和演替进程有直接影响^[42],尤其是幼树和阳生性树种^[43]。

风害后林内可利用光增加,土壤湿度减小,不同林型内林窗的立地状态趋向于同质化^[44]。演替途径则主要与存活物种、林木更新和林下地被物有关。林窗大小不同,一般以 1 至数株林木风倒后形成的林窗居多。林窗更新主要有以下 3 种途径:土壤种子库、根状茎、植物孢子和繁殖体;原有植物体;林窗边缘树木的横向生长。如果林窗的短径不超过林窗周围的树高,植被结构基本不变;若超过林窗周围的树高,植被生境将发生变化^[45],林窗内的植被组成也将发生改变。

Imbert 等对台风后的季雨林的研究表明,干扰 12 年后,植物区系组成、树干密度、林分断面积、树干径向生长量等都没有恢复。而森林功能的恢复则要分为 3 个阶段:(1)受损木的物候生长恢复;(2)没有生命力的树干,将逐渐腐烂,形成林窗;(3)有

生命力可以正常更新的树木,其对森林的功能继续发挥作用^[46]。

Anja 等对 1990 年 Vivian 飓风后的森林结构、演替、森林保护效应的模拟研究表明,森林结构异质性将持续到 50 年之后,树高大于 5 m 的树种对立地的保护效应明显;风害后未经人工干扰的森林微地形的多样性大于皆伐的林地;皆伐立地的种子库状态与风害后树木早期更新有密切关系,这是因为风害后即可萌发生长的树种可以避免高大草本的竞争压力,对于皆伐立地,风害后即行树种更新,也可减少有蹄类动物的掠食压力^[47]。

Wilson 等对美国西北太平洋沿海森林风害后的演替研究表明,间伐强度、树木尖削度、下风向林缘状态及风害间隔期是导致森林脆弱性的主要因素;前次风害导致的森林景观异质性越大,下次遭受风害的可能性越大;当轮伐期小于风害间隔期时,风害损失比较严重,适当减小轮伐间隔,可以减小风害损失;风害程度随着林龄的增大而增大;对同质林分的块状间伐是导致风害发生的重要因素之一^[48]。

我们认为,风害使森林结构和林内各组分相互关系发生改变,森林功能也相应变化。沿海防护林应综合考虑树种特性、防护林配置模式与防护目标,通过调节森林结构来实现防护目的。

4 模型在风害评估中的应用

减少风害的途径之一就是森林的长期经营建立风害评估模型,一般分为经验模型、统计模型和机理模型 3 种。

经验模型是基于风害后的实地调查、风害的历史记录等划定风害的影响区域,然后主观确定风害等级^[49-50]。该方法主要对影响风害的因子,如地形、生物等因素与风害等级进行简单回归。因此,对于林分结构和组成比较复杂的林分比较实用。不足之处在于该方法只能对空间数据进行解析,无法对风害的发生及影响因素在风害中的作用进行预测和解释。目前对风害的评估更多的是依赖专家的判断而不是数理推导^[51]。Moore 等指出,尽管目前多数风害预测模型研究中量化成分很高,但最终对于风害等级的确定仍然是基于经验方法^[52]。

统计模型可以对长期时间和空间风害信息进行评估,通过回归模型来预测风害。该方法的数据主要来源于实地调查数据、以往风害信息、具体林

分风害等级划分标准等^[51,53],应用回归模型(如 Logistic 模型^[53]、Logit 模型^[3]、Weibull 模型^[54])预测具体类型风害发生的概率^[53,55]。由于具体风害和实地调查数据,该模型对于具体区域或立地条件下的风害预测精度较高。但该模型也有不足之处:(1)由于统计模型需要长期定位观测数据,但这类数据对于某一具体区域或立地条件很难获得;(2)可获得数据信息对应用该方法模拟得到的结果影响显著^[56];(3)该方法不能确定林分/树木参数(如树高、胸径、尖削度等)与风害的数量关系,因此应用范围只限于某一具体林分,不具通用性;(4)统计模型无法说明风害发生的频率,只能对林分的风害等级进行估测。

机理模型是一种模型系统,主要由 2 部分组成:(1)机理模型:用来预测导致掘根、折干风害时的临界风速;(2)气流模型:预测局域气候条件下的风速,对比局域风速超过临界风速的程度来预测风害^[56]。这类模型是建立在单木/林分在风气候状态下力学分析原理上建立的风害评估系统^[29],同时也考虑不同森林经营措施对评估系统的影响^[57]。Gardiner 等指出,机理模型可以避免经验模型和统计模型的简单化,以免丢失重要信息,也应用部分统计方法^[57]。因此,机理模型可应用于不同的地理区域。目前,这类风害评估模型已用于欧洲和北美的人工林经营措施与极端气候之间关系的研究^[39,58-60]。这类模型的优点在于:(1)通过对树木的稳定性和根系的研究,可以评估风害与森林经营措施的关系;(2)对于如何进行森林管理减小风害提供合理建议;(3)建立了树种稳定性评估方法,可应用于不同区域、不同树种风害的评估;(4)机理模型为广义风害预测模型方法^[9],结合地理信息系统、计算模拟可以为林分/景观水平的森林经营提供决策信息^[61-63]。

机理模型是建立在以往经验风害评估信息之上,因此并没有实现完全量化的目标。Gardiner 等指出,机理模型是将确定性与可能性结合起来评估风害的方法^[57]。这类模型的不足之处有:(1)由于所需要的数据信息多数是来自树木水平,因此对于林分水平的风害风险评估精度较低;(2)这类风害评估模型主要是以欧洲和北美的人工林为研究对象提出的,因此应用的局限性很大。目前得到广泛应用的机理模型主要有 Forest GALES 和 WINDA 两种^[49,57,63]。

目前,森林风害模型的研究仍处于探索阶段,在林业经营管理过程中的应用也只限于少数地区。主要的缺陷在于如何量化模型风害等级、风害与森林系统的数量关系以及模型的普适性等。另外,对大尺度(如局域和区域)信息的获取,森林风害长期定位观测等技术也亟待完善。

5 森林风害的预防与管理

5.1 树种选择

树种的抗风能力不仅与材性、生长状态有关,与立地条件和气候条件也有密切关系。在造林树种的选择上,当无法确定立地条件和气候对树种抗风能力的影响时,使用本地或相似气候区的种子资源还是必要的^[64]。

树冠重量/主干重量的比值较大、树冠浓密、尖削度较小的树种,易发生风害^[7],造林时这类树种应慎重选用。深根系树种的抗风能力大于浅根系树种,造林时应尽可能应用。

5.2 造林技术

在沿海小块平原,利用沟、渠、路营造农田林网;在沿海荒滩地,营造经济林、用材林;在沿海山顶、山脊上,采取封、造结合培育水源涵养林;在河流干道两侧,进行通道绿化;在沿海城镇村庄周围,加强环城防护林建设^[65]。沿海的沙荒地和风口地段,应合理密植,加宽基干林带,并选择春、夏雨季造林^[66]。

人工造林时,初植密度是能否充分实现防护效益的关键。结构均匀,透风系数在 0.58 左右的林带,既能保证大部分气流穿过林带,又能使其产生充分的摩擦作用,防风效能最高^[67]。因此,造林过程中应根据树种特性和防护目的来构筑防护林带的结构和确定初植密度,选用优良树种,Ⅰ、Ⅱ级壮苗或容器苗、大苗作为造林材料,栽植时合理修剪苗木枝条和根系,以减少水分蒸腾,施足基肥,并适当深栽(比原根际高出 15 cm)。困难立地可采取 1 年造,2、3 年补植,4 年见成效,循序渐进的方式保证造林成功,也可采取工程措施和生物措施相结合的综合治理办法,如种草固沙的同时,设置挡风竹篱、挡风石墙以提高造林成活率。

5.3 抚育管理

间伐和施肥是林分抚育管理的重要方式。但有研究表明,同时对林分进行间伐和施肥将使林分

的抗风能力下降^[68]。这是因为间伐对林分胸径生长的作用在间伐后第 1 年即有所显现,而施肥效应则在第 2 年才能有所体现,所以对林分进行间伐至少 2 年以后施肥才可以避免风害出现。另外,应避免间伐前施肥,这是由于肥料促进林冠生长,使林冠风载荷增加,易遭受风害,同时树干的纤维密度降低,抗折断能力下降。因此,正确把握间伐和施肥的时机,以促进林分生长至关重要。

5.4 优化林分结构

防护林带应合理设置林带走向(尤其主林带与副林带走向)、林带结构、林带带幅、林带带距;农田林网,主林带宽度为 5 m,副林带为 3~5 m。树种结构要以营造混交林为主,营造纯林为辅^[69]。

合理的林分结构不仅能促进树木生长,也有利提高森林风害抗性^[69-70]。目前,间伐是优化林分结构的最有效方式,这是因为,一方面间伐可以促进林木胸径、树冠和根系的生长,对于增加树木的尖削度、增强树木根系土壤固着力和树干的抗折断能力有积极作用;另一方面间伐后林冠粗糙度增加,进入林内的风使树冠风载荷增加,使间伐后的最初几年林分的稳定性受到不利影响。因此,对林分进行间伐时,应根据林分实际情况,确定间伐作业的科学标准,以保证林分防护效能得到最大限度的发挥。

通过间伐优化林分结构时,应注意以下几个方面:(1)林分间伐强度越大,保留木的风害损失程度也越大,但随着林龄的增大,风害损失会逐渐减小,间伐伐除的断面积占总断面积的 20%~45% 为宜^[71]。Cremer 等的研究表明,通过疏冠改变冠高也可减小风害概率^[72]。(2)块状皆伐可以减小风害对林分整体损害,块状皆伐面积越大,对皆伐林地周围树木风害程度越大,因此,采用小面积、多数量的块状皆伐将有利于降低森林风害。(3)间伐形状最好为椭圆形,其长轴方向应与主风向一致,且在下次风害周期到来之前进行间伐,森林遭受风害的可能性较大,因此应在新一轮风害过后进行间伐,或适当缩短间伐周期。(4)前次风害导致的森林景观异质性越大,下次遭受风害的可能性越大^[46],应考虑通过间伐减小森林景观异质性(如伐除优势木)。过熟林木由于易遭风害,在间伐时应首先考虑,尤其对异龄林中的过熟林木进行块状间伐,以间伐小区周围树木不影响小区内幼树更新为标准,另外包含应压木材、树冠不对称、树干倾斜的树木

也易遭受风害,间伐时也应伐除。

6 结语

我国目前对沿海森林风害的研究多在单木和林分尺度上,对局域和区域尺度上各类生物和非生物因素与森林风害的关系研究较少。研究重点多为台风前后森林结构的变化,长期定位的森林风害研究体系尚未建立。对沿海森林风害的预测、评估研究多基于研究人员的经验判定分析^[73-75],这与森林风害实际影响的空间范围和时间尺度严重不符。因此,今后应在以下几方面开展系统研究:

尺度问题 不同时空尺度下,我国东南沿海热带和亚热带不同森林生态系统类型受风害影响的程度和范围不同。因此,应根据台风路径和影响的时空范围,在单木、林分、系统、局域和区域尺度上研究各个层次系统对森林风害的生态响应。同时,应注重由从低层次(单木)到高层次(区域)系统结构的复杂性所导致系统过程与功能的复杂性和不稳定性的研究。

风害对沿海森林结构和功能的影响 我国东南沿海广泛分布不同类型的森林,风害过后森林结构都会有所变化,森林功能也会发生相应的改变,受立地条件、地形、地貌等非生物因素影响,该过程将更加复杂。因此,应注重森林结构变化导致森林功能改变规律的研究,以探求通过调节森林结构来改变森林功能的途径。同时,也应开展对森林风害前后养分循环、生物多样性变化、优势树种的演替和更新过程的研究,为合理调控和人工促进防护林更新提供理论依据。

风害预估模型 结合实地调查、风害的历史记录、遥感影像、局域地形、气象数据等资料,建立不同尺度沿海森林生态系统的风害模拟系统和森林风害预测系统,为增强沿海森林抗风能力的森林结构调控、风害损失评估以及生态重建提供决策支持。

参考文献

- [1] Ulanova N G. The effects of windthrow on forests at different spatial scales: A review [J]. For Ecol Manag, 2000, 135(1-3): 155-167.
- [2] Schelhaas M J, Nabuurs G J, Schuck A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries [J]. Glob Chang Biol, 2003, 9(11): 1620-1633.
- [3] Wang F, Xu Y J. Hurricane Katrina-induced forest damage in relation to ecological factors at landscape scale [J]. Environ Monit

- Assess, 2009, 156(1-4): 491-507.
- [4] Li X F(李秀芬), Zhu J J(朱教君), Wang Q L(王庆礼), et al. Forest damage induced by wind/ snow: A review [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2005, 25(1): 148-157.(in Chinese)
- [5] Tong C(仝川), Yang Y S(杨玉盛). A review of the impacts of hurricanes and typhoons on forest ecosystems in coastal areas [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2007, 27(12): 5337-5344.(in Chinese)
- [6] Xu H(许涵), Li Y D(李意德), Luo T S(骆士寿), et al. Influence of typhoon Damrey on the tropical montane rain forest community in Jianfengling, Hainan Island, China [J]. Acta Phytoecol Sin(植物生态学报), 2008, 32(6): 1323-1334.(in Chinese)
- [7] Li G Q(李国旗), An S Q(安树青), Zhang J L(张纪林), et al. The bending stress analysis of 4 species of woods caused by wind pressure in coastal shelter forest [J]. J Nanjing For Univ(南京林业大学学报), 1999, 23(4): 76-80.(in Chinese)
- [8] Yang L(杨玲), Huang X L(黄晓兰), Wang X H(王希华), et al. Characteristics of typhoon disturbance on evergreen broad-leaved forest at Tiantong National Forest Park [J]. J Zhejiang For Sci Techn(浙江林业科技), 2006, 26(5): 10-14.(in Chinese)
- [9] Gardiner B A, Quine C P. Wind damage to forests [J]. Biomimetics, 1994, 2: 139-147.
- [10] Fraser A. Wind tunnel studies of the forces acting on the crowns of small trees [J]. Rep For Res, 1962: 178-183.
- [11] Noda R. The damages of forests in Fukuoka prefecture by Typhoon No. 17 and No. 19 in 1991 [J]. J For Environ, 1993, 35: 50-59.
- [12] Liang K N(梁坤南), Bai J Y(白嘉雨). Selection on growth and wind-resistance traits for provenances and families of *Eucalyptus urophylla* [J]. For Res(林业科学研究), 2003, 16(6): 700-707.(in Chinese)
- [13] William J, Robert F, Armentana T. Effects of Hurricane Andrew on stands of slash pine (*Pinus elliottii* var. *densa*) in the everglades region of south Florida (USA) [J]. Plant Ecol, 2000, 146(1): 43-60.
- [14] Wolf A, Møller P F, Bradshaw R W, et al. Storm damage and long-term mortality in a semi-natural, temperate deciduous forest [J]. For Ecol Manag, 2004, 188(1-3): 197-210.
- [15] King D A. Tree form, height growth, and susceptibility to wind damage in *Acer saccharum* [J]. Ecology, 1986, 67(4): 980-990.
- [16] Papescha J G, Moore J R, Hawke A E. Mechanical stability of *Pinus radiata* at Eyrewell forest investigated using static tests [J]. NZ J For Sci, 1997, 27: 188-204.
- [17] Nicoll B C, Gardiner B A, Rayser B, et al. Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth [J]. Can J For Res, 2006, 36(7): 1871-1883.
- [18] Kimmins J, Cao F L. Forest Ecology [M]. Beijing: China Forestry Press, 2005: 239-246.
- [19] Chen S Y(陈士银), Yang X H(杨新华), Du S Z(杜盛珍), et al. Investigation and analysis on the yard tree's characteristic of resilience to wind [J]. Prot For Sci Techn(防护林科技), 1999, 4: 32-35.(in Chinese)
- [20] Ray D, Nicoll B C. The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce [J]. Forestry, 1998, 71(2): 169-182.
- [21] Mayhead G J. Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies [J]. Agri Meteorol, 1973, 12: 123-130.
- [22] Braun S, Schindler C, Volz R, et al. Forest damages by the storm 'Lothar' in permanent observation plots in Switzerland: The significance of soil acidification and nitrogen deposition [J]. Water Air Soil Pollut, 2003, 142(1-4): 327-340.
- [23] Godbold D L, Jentschke G. Aluminium accumulation in root cell walls coincides with inhibition of root growth but not with inhibition of magnesium uptake in Norway spruce [J]. Physiol Plant, 1998, 102: 553-560.
- [24] Gardiner B A, Stacey G R, Belcher R E. Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability [J]. Forestry, 1997, 70(3): 233-252.
- [25] Peltola H, Kellomäki S, Hassinen A, et al. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: An analysis of tree-pulling experiments in Finland [J]. For Ecol Manag, 2000, 135(1-3): 143-153.
- [26] Stacey G, Belcher R, Wood C, et al. Wind flows and forces in a model spruce forest [J]. Boundary-Layer Meteorol, 1994, 69(3): 311-334.
- [27] Peltola H, Kellomäki S, Väisänen H. Model computations of the impact of climatic change on the windthrow risk of trees [J]. Climate Change, 1999, 41(1): 17-36.
- [28] David P R, Pawu K T, Matthias F. Directional wind shear within an old-growth temperate rainforest: Observations and model results [J]. Agri For Meteorol, 2004, 125(1-2): 19-31.
- [29] Kamimura K, Shiraishi N. A review of strategies for wind damage assessment in Japanese forests [J]. J For Res, 2007, 12: 162-176.
- [30] Lekes V, Dandul I. Using airflow modelling and spatial analysis for defining wind damage risk classification (WINDARC) [J]. For Ecol Manag, 2000, 135(1-3): 331-344.
- [31] Aoyagi M, Matsui H. Forest damages caused by typhoon 21 — Analysis using satellite images [J]. North For, 2003, 88: 6-8.(in Japanese)
- [32] Talkkari A, Peltola H, Kellomäki S, et al. Integration of component models from the tree, stand and regional levels to assess the risk of wind damage at forest margins [J]. For Ecol Manag, 2000, 135(1-3): 303-313.
- [33] Boutet J C, Weishampel J F. Spatial pattern analysis of pre- and post-hurricane forest canopy structure in North Carolina, USA [J]. Lands Ecol, 2003, 18(6): 553-559.
- [34] Allen B P, Sharitz R R, Goebel P C. Twelve years post-hurricane liana dynamics in an old-growth southeastern floodplain forest [J]. For Ecol Manag, 2005, 218(1-3): 259-269.
- [35] Ostertag R, Silver W L, Lugo A E. Factors affecting mortality and resistance to damage following hurricanes in a rehabilitated subtropical moist forest [J]. Biotrop, 2005, 37(1): 16-24.

- [36] Busing R T, White R D, Harmon M E, et al. Hurricane disturbance in a temperate deciduous forest: patch dynamics, tree mortality, and coarse woody detritus [J]. *Plant Ecol*, 2009, 201(1): 351–363.
- [37] Zimmerman J K, Willig M R, Walker L R. Introduction: Disturbance and Caribbean ecosystems [J]. *Biotrop*, 1996, 28: 414–423.
- [38] Uriarte M, Rivera L W, Zimmerman J K, et al. Effects of land use history on hurricane damage and recovery in a neotropical forest [J]. *Plant Ecol*, 2004, 174(1): 49–58.
- [39] Spatz H-C, Bruechert F. Basic biomechanics of self-supporting plantings: Wind loads and gravitational loads on a spruce tree [J]. *For Ecol Manag*, 2000, 135(1–3): 33–44.
- [40] Wang H, Hall C A S. Modelling the effects of Hurricane Hugo on spatial and temporal variation in primary productivity and soil carbon and nitrogen in the Luguillo Experimental Forest, Puerto Rico [J]. *Plant Soil*, 2004, 263: 69–84.
- [41] Schaetzl R, Burns S, Smal T, et al. Tree uprooting: Review of types and patterns of soil disturbance [J]. *Physic Geol*, 1990, 11(3): 277–291.
- [42] Peterson C J, Campbell J E. Microsite differences and temporal change in plant communities of treefall pits and mounds in an old-growth forest [J]. *Bull Torrey Bot Club*, 1993, 120(4): 451–460.
- [43] Foster D R, Boose E R. Patterns of forest damage resulting from catastrophic wind in Central New-England, USA [J]. *J Ecol*, 1992, 80: 79–98.
- [44] Zobeck T M, Parker N C, Haskell S, et al. Scaling up from to region for wind erosion prediction using a field-scale wind erosion model and GIS [J]. *Agri Ecol Environ*, 2000, 82(1–3): 247–259.
- [45] Collins B S, Pickett S T A. Vegetation composition and relation to environment in the Allegheny hardwoods forest [J]. *Amer Midland Nat*, 1982, 108: 117–123.
- [46] Imbert D, Portecop J. Hurricane disturbance and forest resilience: Assessing structural vs. functional changes in a Caribbean dry forest [J]. *For Ecol Manag*, 2008, 255(8/9): 3494–3501.
- [47] Anja R, Lorenz F, Peter B, et al. Wind disturbance in mountain forests: Simulating the impact of management strategies, seed supply, and ungulate browsing on forest succession [J]. *For Ecol Manag*, 2007, 242(2/3): 142–154.
- [48] Wilson J. Vulnerability to wind damage in managed landscapes of the coastal Pacific Northwest [J]. *For Ecol Manag*, 2004, 191(1–3): 341–351.
- [49] Olofsson E, Blennow K. Decision support for identifying spruce forest stand edges with high probability of wind damage [J]. *For Ecol Manag*, 2005, 207(1/2): 87–98.
- [50] Hanewinkel M, Zhou W, Schill C. A neural network approach to identify forest stands susceptible to wind damage [J]. *For Ecol Manag*, 2004, 196(2/3): 227–243.
- [51] Gadow K. Evaluating risk in forest planning models [J]. *Silva Fenn*, 2000, 34(2): 181–191.
- [52] Moore J. Difference in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types [J]. *For Ecol Manag*, 2000, 135(1–3): 63–71.
- [53] Jackanen A, Mattila U. Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data [J]. *For Ecol Manag*, 2000, 135(1–3): 315–330.
- [54] Quine C. Estimation of mean wind climate and probability of winds for wind risk assessment [J]. *Forestry*, 2000, 73(3): 247–258.
- [55] Valinger E, Fridman J. Modelling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics [J]. *For Ecol Manag*, 1997, 97(3): 215–222.
- [56] Ancelin P, Courbaud B, Fourcaud T. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands [J]. *For Ecol Manag*, 2004, 203(1–3): 101–121.
- [57] Gardiner B, Quine C. Management of forests to reduce the risk of abiotic damage — A review with particular reference to the effects of strong winds [J]. *For Ecol Manage*, 2000, 135(1–3): 261–277.
- [58] Zeng H, Peltola H, Talkari A, et al. Influence of clear-cutting on the risk of wind damage at forest edges [J]. *For Ecol Manag*, 2004, 203(1–3): 77–88.
- [59] Zeng H, Pukkala T, Peltola H. The use of heuristic optimization in risk management of wind damage in forest planning [J]. *For Ecol Manag*, 2007, 241(1–3): 189–199.
- [60] Mitchell S, Lanquaye-Opoku N, Modzelewski H, et al. Comparison of wind speeds obtained using numerical weather prediction models and topographic exposure indices for predicting windthrow in mountainous terrain [J]. *For Ecol Manag*, 2008, 254(2): 193–204.
- [61] Kerzenmacher T, Gardiner B. A mathematical model to describe the dynamic response of a spruce tree to the wind [J]. *Trees*, 1998, 12: 385–394.
- [62] Mitchell S, Hailemariam T, Kulis Y. Empirical modeling of cutblock edge windthrow risk on Vancouver Island, Canada, using stand level information [J]. *For Ecol Manag*, 2001, 154(1/2): 117–130.
- [63] Blennow K, Sallnäs O. WINDA — A system of models for assessing the probability of wind damage to forest stands within a landscape [J]. *Ecol Modell*, 2004, 175(1): 87–99.
- [64] Zhang J G(张建国), Li J Y(李吉跃), Peng Z D(彭祚登). The Afforestation Techniques [M]. Beijing: Science Publishing House, 2007: 127–134.(in Chinese)
- [65] Wei G H(魏国海). The relationship between typhoon ‘Saomai’ and coastal forest structure [J]. *China For(中国林业)*, 2006, 12: 38.(in Chinese)
- [66] Huang H Z(黄海珍), Xu J Q(许基全). Resistance to typhoon with coastal forest [J]. *China For(中国林业)*, 2006, 8: 32.(in Chinese).
- [67] Li L H(李临淮), Liu C L(刘长乐), He Q T(贺庆棠), et al. The wind vulnerability of the Shelter Forest in the northeastern Beijing [C]// Xiao W F(肖文发), Luo Y Q(骆有庆). Collection of Forest Ecology. Beijing: China Forestry Press, 2007: 34–39.(in Chinese)
- [68] Valinger E. Effects of thinning and nitrogen fertilization on stem growth and stem form of *Pinus sylvestris* trees [J]. *Scand J For Res*, 1992, 7(1): 219–228.
- [69] Lin W X(林武星). The resistant wind effects on the different

Casuarina equisetifolia coastal forest structure in Fujian Province [J]. For Sci Techn(林业科技通讯), 2000, 4:27–28.(in Chinese)

[70] Zhang J L(张纪林), Kang L X(康立新). Advances in the research on the environmental mechanism of coastal forestry in Japan [J]. World For Res(世界林业研究), 1996, 9(2): 41–46. (in Chinese)

[71] Valinger E, Pettersson N. Wind and snow damage in a thinning and fertilization experiment in *Picea abies* in southern Sweden [J]. Forestry, 1996, 69(1): 25–33.

[72] Cremer K, Borough C, Carter P. Effect of stocking and thinning on wind damage in plantations [J]. NZ J For Sci, 1982, 12: 244–268.

[73] Sun W(孙伟), Liu S J(刘少军), Tian G H(田光辉), et al. Fatalness evaluation of typhoon disasters in Hainan island [J]. J Meteor Res Appl(气象研究与应用), 2008, 29(4): 7–9.(in Chinese)

[74] Wang J(王军), Xue S Y(许世远), Shi C(石纯), et al. Dynamic assessment of typhoon disaster condition based on multi-sources remote sensing imagery: Research progress [J]. J Nat Disast (自然灾害学报), 2008, 17(3): 22–28.(in Chinese)

[75] Chen P Y(陈佩燕), Yang Y H(杨玉华), Lei X T(雷小途), et al. Cause analysis and preliminary hazard estimate of typhoon disaster in China [J]. J Nat Disast(自然灾害学报), 2009, 18(1): 64–73. (in Chinese)