

DOI: 10.20103/j.stxb.202302150254

路明远, 吕来新, 金光泽. 台风对小兴安岭阔叶红松林的影响. 生态学报, 2024, 44(3): 1264-1272.

Lu M Y, Lü L X, Jin G Z. Effects of typhoon in a broadleaved-Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 1264-1272.

台风对小兴安岭阔叶红松林的影响

路明远¹, 吕来新², 金光泽^{1,3,4,*}

1 东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040

2 黑龙江凉水国家级自然保护区管理局, 伊春 153106

3 东北林业大学森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

4 东北林业大学东北亚生物多样性研究中心, 哈尔滨 150040

摘要: 台风对森林造成强烈干扰, 改变森林生态系统的结构与功能。分析了 2020 年台风对小兴安岭地区阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林中不同径级、功能群 (耐阴性、生活型、针阔叶) 树木破坏程度的影响和地形 (海拔、坡向、坡度、凹凸度) 在其中的作用。结果表明: 台风对不同径级以及不同功能群树种的受损数量的影响具有显著差异, 具体表现为径级 I (胸径 < 10 cm) > 径级 II (10 cm ≤ 胸径 < 50 cm) > 径级 III (胸径 ≥ 50 cm), 耐阴性强 > 耐阴性弱, 乔木 > 灌木、阔叶树种 > 针叶树种; 而其受损率则表现为径级 II > 径级 III > 径级 I, 耐阴性弱 > 耐阴性强, 乔木 > 灌木、针叶树种 > 阔叶树种; 损坏程度很大程度上取决于坡向与海拔位置, 处于阴坡与低海拔的受损木数量较高, 阔叶树种、灌木与耐阴性强的受损木表现出在阳坡与海拔较高位置出现的可能性更大, 针叶树种、乔木与耐阴性弱的受损木表现出在阴坡与海拔较低位置出现的可能性更大, 阴坡和较低海拔处拔根倒的受损数量显著高于干基折和干中折的受损数量; 地形对受损木的风倒方向具有显著影响。总体而言, 台风对森林的破坏受到多种环境因素和生物因素共同作用的影响, 处于不同地形的不同径级、功能群的树木, 其对台风的抵抗能力有所不同, 且大径级树木、耐阴性弱的树种、乔木和针叶树种对台风的抵抗能力相对较弱, 迎风坡与阴坡的树木对台风的抵抗能力相对较弱, 这为理解极端天气事件对森林动态的影响以及恢复提供理论依据与参考。

关键词: 台风; 干扰; 阔叶红松林; 地形; 功能群

Effects of typhoon in a broadleaved-Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains

LU Mingyuan¹, LÜ Laixin², JIN Guangze^{1,3,4,*}

1 Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve Authority, Northeast Forestry University, Yichun 153106, China

3 Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

4 Northeast Asia Biodiversity Research Center, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: Typhoons will cause strong disturbance to forests, change the structure and functions of forest ecosystems. In this paper, we analyzed the effects of typhoons in 2020 on the damage degrees of trees with different diameter classes and functional groups (shade tolerance, life form, and leaf shape) of broadleaved-Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains and the role of topography (elevation, aspect, slope, and convexity). The results showed that there were significant differences in the effects of typhoon on the number of tree damage of different diameter classes and functional groups, such as class I (DBH > 10 cm) > class II (10 cm ≤ DBH < 50 cm) > class III (DBH ≥ 50 cm), strong shade tolerance > weak shade tolerance, arbor > shrubs, and broadleaved species > coniferous species. While trees damage rates showed that class II > class III > class I, weak shade tolerance > strong shade tolerance, arbor > shrubs, and coniferous species > broadleaved species. The

基金项目: 国家自然科学基金 (32071533); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2572022DS13)

收稿日期: 2023-02-15; **网络出版日期:** 2023-11-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: taxus@126.com

damage degree of trees depended largely on the aspect and altitude, and the number of damaged trees in shady slopes and low elevation was higher. Damaged trees with broadleaved, shrubs and strong shade tolerance species are more likely to appear on the sunny slope and higher elevation, while coniferous species, arbor and weak shade tolerant damaged trees are more likely to appear on the shady slopes and at lower elevations. The number of the damaged trees caused by uprooting in shady slope and low elevation was significantly higher than that in breakage at rootstock and trunk. The topography had a significant effect on the wind fall direction of trees. In general, the destruction of forests by typhoons is affected by a variety of environmental and biological factors. We found that trees with different diameter classes and functional groups in different topography differed in their resistance to typhoons and their response to typhoons varied greatly. In addition, trees with a large DBH, weak shade tolerance, arbor and coniferous species have relatively weak resistance to typhoons, and trees on windward slope and shady slope have relatively weak resistance to typhoons. These provided a theoretical basis and reference for understanding the impact of extreme weather events on forest dynamics and recovery.

Key Words: typhoon; disturbance; broad leaved Korean pine forest; topography; functional groups

台风是自然界中最强的自然灾害之一,经常伴随着强风、强降雨和洪水等事件,强台风对所经过地区的经济、社会和生态环境等方面均产生重大影响^[1-2]。而对于森林生态系统,台风会改变生物可利用的生存空间,增加景观异质性,改变森林结构和功能,影响其物种组成和多样性^[3]。台风对森林的影响,主要表现在大径级个体严重受损,产生拔根倒、干折、枝条折断、大量落叶^[4],并通过产生的倒木、断枝压倒其它植株,引起小面积范围内的树木个体死亡^[5]。台风“卡特里娜”使美国墨西哥湾沿岸森林生物量损失约 105 Tg,占美国年度陆地净碳汇的一半以上^[6]。台风对森林的干扰模式复杂多变^[7],不同森林类型对台风的响应有所不同,而树种、个体大小的差异导致树木对台风的响应同样复杂,并受地形因素影响^[8]。

台风对森林干扰的早期研究主要集中在对树木个体的短期影响上,如落叶树枝损失、树冠扰动^[9]以及受损后的恢复状况等^[10-11]。此后,相关学者分别从不同地区的森林受灾情况^[12],树木的受损方式和存活树木的长期生长动态^[13],森林环境、树木再生动态和森林恢复^[3]等方面进行了研究。台风可以改变林内光热条件,促进林下植物生长更新,维持林分树种多样性^[14],并通过落叶和树木死亡减少冠层覆盖,加速生物量再生与周转,对森林结构和动态产生重要而持续的影响^[15]。作为一种热带灾害性气候,台风对森林生态系统扰动的研究多集中在沿海地区,且大多数研究主要集中于城市树木与社会经济上^[16-17],台风对森林的影响了解甚少。台风在北方温带地区发生频率较低,对温带地区森林的组成、植物多样性的影响知之甚少^[18],研究多集中于干扰后森林的恢复等方面^[19]。南颖等^[10]的研究表明,地形与风灾区的恢复程度呈高度相关;郭利平等^[11]发现风灾后长白山地区不同森林类型的恢复速度不同。

我国偶有台风接近温带海岸线的实例,例如:1986 年的台风“维拉”^[10]、2012 年的台风“布拉万”^[20]等。2020 年,台风“巴威”、“美莎克”、“海神”在半个月先后影响我国东北地区,为历史首次。2020 年 8 月 22 日至 9 月 8 日,三场台风分别从辽宁省庄河市与朝鲜平安北道南部一带(“巴威”)、韩国庆尚南道沿海附近登陆(“美莎克”、“海神”),登陆后转变为北偏东向我国东北方向移动,台风登陆期间中心最大风力达 13 级^[21]。三场台风依次登陆,且相距时间相近,对张广才岭和小兴安岭南部的森林造成了一定程度的破坏。过去台风很少能对小兴安岭森林产生大的干扰,为了了解稀有干扰事件对森林生态系统的影响,本文以地处小兴安岭南坡的阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林为研究对象,分析 2020 年台风对阔叶红松林中不同径级、功能群以及不同地形中受损木的发生特征,以期理解极端天气事件等稀有干扰事件对森林动态的影响以及恢复提供理论依据与参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

研究区位于黑龙江凉水国家级自然保护区(47°10'50" N,128°53'20" E,海拔 280—707 m),地处黑龙江省

伊春市大箐山县,温带大陆性气候明显,年平均气温为 -0.3°C ,年平均降水为 676 mm,年蒸发量为 805 mm,积雪期 130—150 d。全年的主风向为西南风,一般春、夏多西南风,秋、冬多西北风。地带性土壤为暗棕壤。山地植被以地带性顶极植被阔叶红松林为主,红松为建群种,臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、硕桦(*Betula costata*)、紫椴(*Tilia amurensis*)等为主要伴生乔木。毛榛(*Corylus mandshurica*)、刺五加(*Eleutherococcus senticosus*)、瘤枝卫矛(*Euonymus pauciflorus*)、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)等为主要伴生灌木。

1.2 调查方法

本研究在 2005 年设置的黑龙江凉水国家级自然保护区 9 hm² 阔叶红松林动态监测样地进行,样地被分为 900 个 10 m×10 m 小样方^[22],并于 2020 年进行了第 3 次复查。2020 年 8 月中旬复查结束时胸径 >1 cm 的独立个体为 23666 株。台风结束后于 2020 年 9 月中旬对每个小样方进行了对受损木的调查,具体包括:

(1) 受损木的基本信息:记录受损木树牌、物种名称和胸径。将受损木根据径级划分为 <10 cm、10—50 cm 和 >50 cm,即受损木被破坏前在冠层中的位置大体为冠层下层、冠层中层和冠层上层;按照生活型划分为乔木与灌木,按照耐阴性划分为耐阴性弱与耐阴性强^[23],按照叶形态分为阔叶树种与针叶树种。

(2) 树木的受损类型及风倒方向。受损类型分为:拔根倒(连根拔起的树木)、干基折(树干的折断处高度 <1.3 m)、干中折(树干的折断处高度 ≥ 1.3 m);受损木风倒方向,记录为东、西、南、北四个方向。

(3) 小样方的海拔、坡向、坡度和凹凸度。海拔高度划分为低(425.5—445.4 m)、较低(445.5—465.4 m)、较高(465.5—485.4 m)和高(485.5—505.4 m);坡向划分为:阳坡(S、SW)、半阳坡(SE、W)、半阴坡(E、NW)和阴坡(NE、N);坡度划分为平坡(I, <6°)、缓坡(II, 6—15.9°)、斜坡(III, 16—25.9°)和陡坡(IV, >26°);凹凸度分为 2 个等级:凹(<0)、凸(>0)。

(4) 风向数据为黑龙江凉水国家级自然保护区 2020 年 8 月 22 日至 9 月 8 日每 10 mins 的实时风向数据。风向划分为:东(E, 67°—111°)、南(S, 158°—202°)、西(W, 247°—291°)、北(N, 338°—359°, 0°—21°)、东南(SE, 112°—157°)、西南(SW, 203°—246°)、东北(NE, 22°—66°)、西北(NW, 292°—337°)。

1.3 数据分析

本文树木受损率用 Y 表示:

$$Y = n/N \quad (1)$$

其中, n 为的受损株数, N 为总株数。

样地的坡向进行标准化:

$$At = 1/2 \times (1 - \cos(\pi/180 \times (A - 30))) \quad (2)$$

式中, At 为标准化坡向, A 为实际坡向。坡向由阴坡到阳坡对应的标准坡向为 0—1。

采用卡方检验(Chi-square, $\alpha = 0.05$)分析不同径级、树种功能群(耐阴性、生活型、针阔叶)、地形(地面凹凸度、坡向、坡度、海拔)对树木破坏程度的影响以及不同地形对受损木风倒方向的影响。利用主成分分析(PCA)探究了不同地形中受损木发生的规律。卡方检验(Chi-square)使用了 SPSS 26.0 软件,主成分分析使用了 R 4.2.2 的 FactoMineR 包与 Factoextra 包进行分析作图。表 1 中数据为受损木不同受损类型的个体数与受损率,表 2—5 中数据均为平均值 \pm 标准差(株/100 m²)。

2 结果

2.1 受损木特征

2020 年的 3 次台风中共有 203 株 DBH ≥ 1 cm 的木本植物受损,分布于 142 块样方,占 900 个样方的 15.8%,受损木物种共计 20 种。白桦(*Betula platyphylla*)、大黄柳(*Salix raddeana*)、硕桦等树种的株数受损率较高,硕桦、毛榛、红松、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、五角枫(*Acer pictum* subsp. *mono*)的受损个体数较多;拔根倒、干基折和干中折的比例分别为 58%、25%和 17%(表 1)。

表 1 阔叶红松林 9 hm²样地受损木物种组成及受损类型Table 1 Species composition and damage types of wind-blown trees in a 9 hm² plot of a typical mixed broadleaved-Korean pine forest

树种 Species	生活型 Life form	耐阴性 Shade tolerance	针阔叶 Leaf shape	受损类型 Typhoon windthrow patterns/株				总株数 Number	受损率 Damage rate/%
				拔根倒 Uproot	干基折 Breakage at rootstock	干中折 Breakage at trunk	合计 Total		
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	乔木	弱	阔叶	1	3	0	4	9	44.44
硕桦 <i>Betula costata</i>	乔木	弱	阔叶	17	8	6	31	316	9.81
暴马丁香 <i>Syringa reticulata</i> var. <i>amurensis</i>	乔木	弱	阔叶	0	2	2	4	689	0.58
大黄柳 <i>Salix raddeana</i>	灌木	弱	阔叶	0	2	0	2	4	50
刺五加 <i>Eleutherococcus senticosus</i>	灌木	强	阔叶	1	0	1	2	2222	0.09
瘤枝卫矛 <i>Euonymus verrucosus</i>	灌木	强	阔叶	2	1	1	4	1600	0.25
青楷槭 <i>Acer tegmentosum</i>	乔木	强	阔叶	17	6	3	26	1057	2.46
花楷槭 <i>Acer ukurunduense</i>	乔木	强	阔叶	6	1	1	8	1739	0.46
红皮云杉 <i>Picea koraiensis</i>	乔木	强	针叶	1	0	0	1	68	1.47
春榆 <i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japonica</i>	乔木	强	阔叶	2	0	0	2	312	0.64
裂叶榆 <i>Ulmus laciniata</i>	乔木	强	阔叶	4	2	4	10	826	1.21
东北山梅花 <i>Philadelphus schrenkii</i>	灌木	强	阔叶	1	2	2	5	877	0.57
紫椴 <i>Tilia amurensis</i>	乔木	强	阔叶	5	2	2	9	732	1.23
稠李 <i>Padus racemosa</i>	乔木	强	阔叶	2	2	1	5	350	1.43
臭冷杉 <i>Abies nephrolepis</i>	乔木	强	针叶	11	4	0	15	843	1.78
毛榛 <i>Corylus mandshurica</i>	灌木	强	阔叶	15	4	8	27	6585	0.41
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	乔木	强	针叶	19	4	1	24	1076	2.23
水曲柳 <i>Fraxinus manschurica</i>	乔木	强	阔叶	1	1	0	2	274	0.73
五角枫 <i>Acer pictum</i> subsp. <i>mono</i>	乔木	强	阔叶	12	7	2	21	2187	0.96
楸木 <i>Aralia elata</i>	灌木	弱	阔叶	0	1	0	1	122	0.82
受损率 Damage rate (%)				58	25	17			

2.2 台风对不同径级树木的影响

台风对不同径级的树木受损数量产生显著影响 ($P < 0.05$), 表现出径级 I 的受损数量显著高于径级 II 与径级 III, 径级 II 的受损数量显著高于径级 III (表 2); 拔根倒、干基折、干中折的径级 I 受损数量显著高于径级 II 和径级 III, 拔根倒、干基折的径级 II 受损数量显著高于径级 III, 干中折的径级 II 和径级 III 受损数量无显著差异。同一径级的不同受损类型树木受损数量也存在一定的差异, 径级 I 和径级 II 的拔根倒受损数量显著高于干基折和干中折的受损数量 ($P < 0.05$), 干基折与干中折的受损数量无显著差异; 径级 III 的不同受损类型之间无显著差异 (表 2)。不同径级间树木受损率的大小表现为径级 II > 径级 III > 径级 I (表 2)。

表 2 阔叶红松林 9 hm²样地不同受损类型树木的径级分布/(个体数/100 m²)Table 2 Diameter class distribution of different typhoon windthrow patterns in a 9 hm² plot of a typical mixed broadleaved-Korean pine forest

受损类型 Typhoon windthrow patterns	径级 I DBH Class I	径级 II DBH Class II	径级 III DBH Class III	合计 Total
拔根倒 Uproot	0.079±0.399Aa	0.048±0.245Ba	0.011±0.281C	0.130±0.514a
干基折 Breakage at rootstock	0.045±0.243Ab	0.012±0.107Bb	0.002±0.094C	0.058±0.281b
干中折 Breakage at trunk	0.032±0.074Ab	0.004±0.034Bb	0.002±0.047B	0.038±0.218b
合计 Total	0.157±0.531A	0.065±0.298B	0.016±0.124C	0.226±0.667
受损率 Damage rate/%	0.70	1.89	1.11	0.86

同列不同小写字母表示受损类型之间差异显著 ($P < 0.05$); 同行不同大写字母表示不同径级之间差异显著 ($P < 0.05$); DBH: 胸径 (Diameter at Breast Height)

2.3 不同功能群受损木的发生特征

台风对不同功能群树木受损数量存在显著影响 ($P < 0.05$), 其中耐阴性强的树种受损数量显著高于耐阴性弱的树种, 乔木受损数量显著高于灌木, 阔叶树种的受损数量显著高于针叶树种; 然而不同功能群树木受损率的大小表现为耐阴性弱 > 耐阴性强, 乔木 > 灌木, 针叶树种 > 阔叶树种 (表 3)。同一功能群树木中不同受损类型的树木受损数量也存在一定差异, 耐阴性强、乔木、阔叶树种与针叶树种中拔根倒的受损数量显著高于干基折与干中折的受损数量 ($P < 0.05$), 耐阴性强以及阔叶树种的干基折与干中折的受损数量无显著差异, 乔木以及针叶树种的干基折的受损数量显著高于干中折 ($P < 0.05$) (表 3)。

表 3 阔叶红松林 9 hm² 样地不同耐阴性、生活型、针阔叶树木的受损类型/(个体数/100 m²)

Table 3 Typhoon windthrow patterns of different shade tolerance, life form and leaf shape of tree species in a 9 hm² plot of a typical mixed broadleaved-Korean pine forest

受损类型 Typhoon windthrow patterns	耐阴性 Shade tolerance		生活型 Life form		针阔叶 Leaf shape	
	强 Tolerant	弱 Intolerant	乔木 Arbor	灌木 Shrub	阔叶 Broadleaved	针叶 Coniferous
拔根倒 Uproot	0.110±0.482Aa	0.023±0.195B	0.109±0.407Aa	0.021±0.187B	0.096±0.435Aa	0.042±0.228Ba
干基折 Breakage at rootstock	0.040±0.228Ab	0.021±0.159B	0.047±0.245Ab	0.011±0.106B	0.049±0.258Ab	0.011±0.103Bb
干中折 Breakage at trunk	0.029±0.18A1b	0.010±0.113B	0.024±0.168c	0.013±0.126	0.037±0.210Ab	0.001±0.036Bc
合计 Total	0.179±0.600A	0.054±0.271B	0.180±0.539A	0.047±0.347B	0.181±0.590A	0.054±0.254B
受损率 Damage rate/%	0.78	3.7	1.54	0.36	0.82	2.01

同列不同小写字母表示受损类型之间差异显著 ($P < 0.05$); 同行不同大写字母表示耐阴性强弱、乔木与灌木、阔叶与针叶之间差异显著 ($P < 0.05$)

2.4 不同地形中受损木的发生特征

不同海拔中树木受损数量存在显著差异, 表现为低海拔 (425.5—445.4 m) 的树木受损数量显著高于较低海拔 (445.5—465.4 m) 和较高海拔 (465.5—485.4 m) ($P < 0.05$), 低海拔 (425.5—445.4 m) 与高海拔 (485.5—505.4 m) 的树木受损数量无显著差异, 较低海拔 (445.5—465.4 m) 与较高海拔 (465.5—485.4 m) 的树木受损数量无显著差异; 不同坡向中树木受损数量存在显著差异 ($P < 0.05$), 阳坡、半阳坡和半阴坡的树木受损数量显著低于阴坡, 阳坡、半阳坡与半阴坡中的树木受损数量无显著差异; 不同坡度中树木受损数量存在显著差异 ($P < 0.05$), 缓坡、斜坡和陡坡的树木受损数量显著低于平坡, 缓坡、斜坡和陡坡中的树木受损数量无显著差异; 不同凹凸度中树木受损数量无显著差异 ($P > 0.05$) (表 4)。

表 4 阔叶红松林 9 hm² 样地不同受损类型树木在微地形中的分布/(个体数/100 m²)

Table 4 Distribution of different typhoon windthrow patterns in microtopography in a 9 hm² plot of a typical mixed broadleaved-Korean pine forest

地形 Topography	拔根倒 Uproot	干基折 Breakage at rootstock	干中折 Breakage at trunk	合计 Total
海拔级 Altitude class/m				
425.5—445.4	0.129±0.467a	0.123±0.450a	0.076±0.307a	0.329±0.731a
445.5—465.4	0.219±0.627Ab	0.052±0.248Ba	0.052±0.260Ba	0.325±0.794b
465.5—485.4	0.069±0.475Aab	0.042±0.220Aa	0.007±0.087Bb	0.119±0.538b
485.5—505.4	0.015±0.124ab	0.016±0.124b	0.008±0.088b	0.039±0.194ab
坡向 Aspect				
阳坡 S, SW	0.104±0.438Aa	0.059±0.285Ba	0.051±0.207Ba	0.198±0.560a
半阳坡 SE, W	0.144±0.547Aa	0.047±0.255Ba	0.037±0.206Ba	0.229±0.658a
半阴坡 E, NW	0.366±0.982Ab	0.033±0.180Bb	0.033±0.180Bb	0.433±1.174a
阴坡 NE, N	0.667±1.106b	0.500±0.764b	0.500±0.764b	1.667±2.494b
坡度 Gradient				
I (<6°)	0.389±0.591a	0.000±0.000a	0.000±0.000a	0.389±0.591a
II (6—15.9°)	0.139±0.492Ab	0.063±0.301Bb	0.047±0.246Bb	0.250±0.680b
III (16—25.9°)	0.102±0.518Ab	0.060±0.279ABb	0.028±0.186Ba	0.191±0.623b
IV (>26°)	0.111±0.586bAb	0.033±0.180Ba	0.022±0.147Ba	0.167±0.719b
凹凸度 Convexity				
凸 Convex	0.144±0.491A	0.058±0.297B	0.033±0.191B	0.236±0.681
凹 Concave	0.118±0.533A	0.057±0.265B	0.042±0.239B	0.216±0.652

同列不同小写字母表示不同地形凸处与凹处、坡向方向、坡度大小、海拔高低之间差异显著 ($P < 0.05$); 同行不同大写字母表示受损类型之间差异显著 ($P < 0.05$)

在同一地形维度下,不同受损类型的树木受损数量也存在一定差异,其中在较低海拔(445.5—465.4 m)、阳坡、半阳坡、半阴坡、缓坡、斜坡、陡坡、地面凹处与凸处拔根倒的受损数量显著高于干基折与干中折的受损数量($P<0.05$),而干基折与干中折的受损数量无显著差异;在较高海拔(465.5—485.4 m)处拔根倒与干基折的受损数量显著高于干中折的受损数量($P<0.05$),而拔根倒与干基折的受损数量无显著差异;其余地形处树木不同受损类型的受损数量无显著差异(表4)。

研究地在8月22日至9月8日西风、西北风、北风与东北风的风向比率相对较高(图1)。同一风倒方向的树木受损数量在不同地形下的分布存在显著差异($P<0.05$),风倒方向为东的树木受损数量在不同海拔、坡度与凹凸度下的分布存在差异,其中在低海拔(425.5—445.4 m)、平坡与凹处的树木受损数量更高;风倒方向为西的树木受损数量在不同海拔、坡度与凹凸度下的分布存在差异,其中在低海拔(425.5—445.4 m)、斜坡与凸处的树木受损数量更高;风倒方向为南的树木受损数量在不同海拔、坡向与坡度下的分布存在差异,其中在较低海拔(445.5—465.4 m)、阴坡与平坡处的树木受损数量更高;风倒方向为北的树木受损数量在不同坡向与坡度下的分布存在差异,其中在半阴坡与陡坡处的树木受损数量更高(表5)。

不同风倒方向的树木受损数量不存在显著差异($P>0.05$),在同一地形维度下,不同风倒方向的树木受损数量存在差异($P<0.05$),较高海拔(465.5—485.4 m)处,风倒方向为北与西的树木受损数量显著高于风倒方向为东的树木;斜坡处,风倒方向为西的树木受损数量显著高于风倒方向为东的树木;地形凸处,风倒方向为东的树木受损数量显著高于风倒方向为西的树木(表5)。

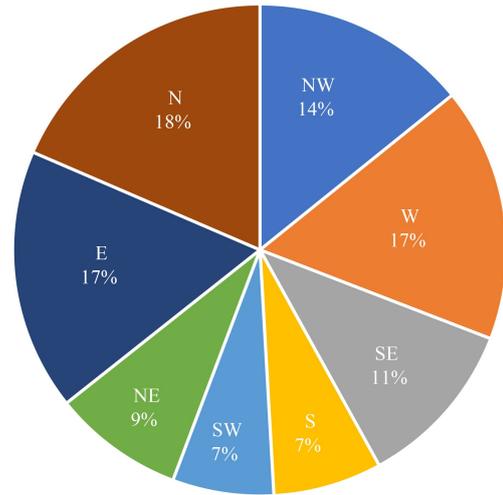


图1 黑龙江凉水国家级自然保护区各风向比率

Fig.1 Wind direction ratio in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve

表5 地形因子对受损木风倒方向的影响/(个体数/100 m²)

Table 5 Effects of different topography factors on wind reversal direction of trees

地形 Topography		东 East	西 West	南 South	北 North	
海拔级	425.5—445.4	0.106±0.362a	0.106±0.376ab	0.059±0.235a	0.059±0.269	
Altitude Class/m	445.5—465.4	0.076±0.265a	0.088±0.322a	0.082±0.349ab	0.079±0.310	
	465.5—485.4	0.004±0.0619bA	0.065±0.256bB	0.023±0.150abAB	0.027±0.194B	
	485.5—505.4	0.000±0.000b	0.016±0.124b	0.023±0.151b	0.000±0.000	
	坡向	阳坡 S, SW	0.041±0.230	0.062±0.299	0.041±0.214a	0.055±0.283a
Aspect	半阳坡 SE, W	0.061±0.239	0.094±0.497	0.054±0.240a	0.027±0.162b	
	半阴坡 E, NW	0.033±0.180	0.100±0.396	0.067±0.249a	0.167±0.898a	
	阴坡 NE, N	0.500±0.764	0.167±0.373	1.000±1.826b	0.000±0.000bA	
坡度	I (<6°)	0.167±0.372ab	0.056±0.229ab	0.167±0.500a	0.000±0.000a	
	Gradient	II (6—15.9°)	0.057±0.256ab	0.079±0.334ab	0.061±0.323a	0.053±0.279a
	III (16—25.9°)	0.025±0.177aA	0.085±0.497aB	0.046±0.209aAB	0.035±0.203aAB	
	IV (>26°)	0.067±0.291b	0.022±0.147b	0.000±0.000b	0.078±0.542b	
凹凸度	凸 Convex	0.071±0.299aA	0.057±0.241aB	0.059±0.328AB	0.049±0.336AB	
	Concave	0.032±0.175b	0.090±0.469b	0.046±0.229	0.048±0.251	
总计 Total	0.050±0.242	0.074±0.380	0.052±0.279	0.049±0.2		

同列不同小写字母表示不同地形凸处与凹处、坡向方向、坡度大小之间差异显著($P<0.05$); 同行不同大写字母表示风倒方向之间差异显著($P<0.05$)

2.5 受损木的主成分分析

主成分分析表明主成分 1、2 轴的特征值之和占总方差的 60.6%，即主成分 1 和 2 轴可解释 4 个变量的 60.6% 的变异；第一主成分包括坡向与海拔，第二主成分包括坡度和地面凹凸度。不同功能群受损木分布在第 1 主轴的不同位置，其中阔叶树种、灌木与耐阴性强的受损木个体落在第 1 主轴的正半轴相对较多，倾向于表现出此功能群的受损木出现在阳坡与海拔较高位置的可能性更大；针叶树种、乔木与耐阴性弱的受损木个体落在第 1 主轴的负半轴相对较多，倾向于表现出此功能群的受损木出现在阴坡与海拔较低位置的可能性更大；受损木多数分布在第 2 主轴的负半轴，表现出受损木出现在平坡与地面凹处的可能性更大(图 2)。

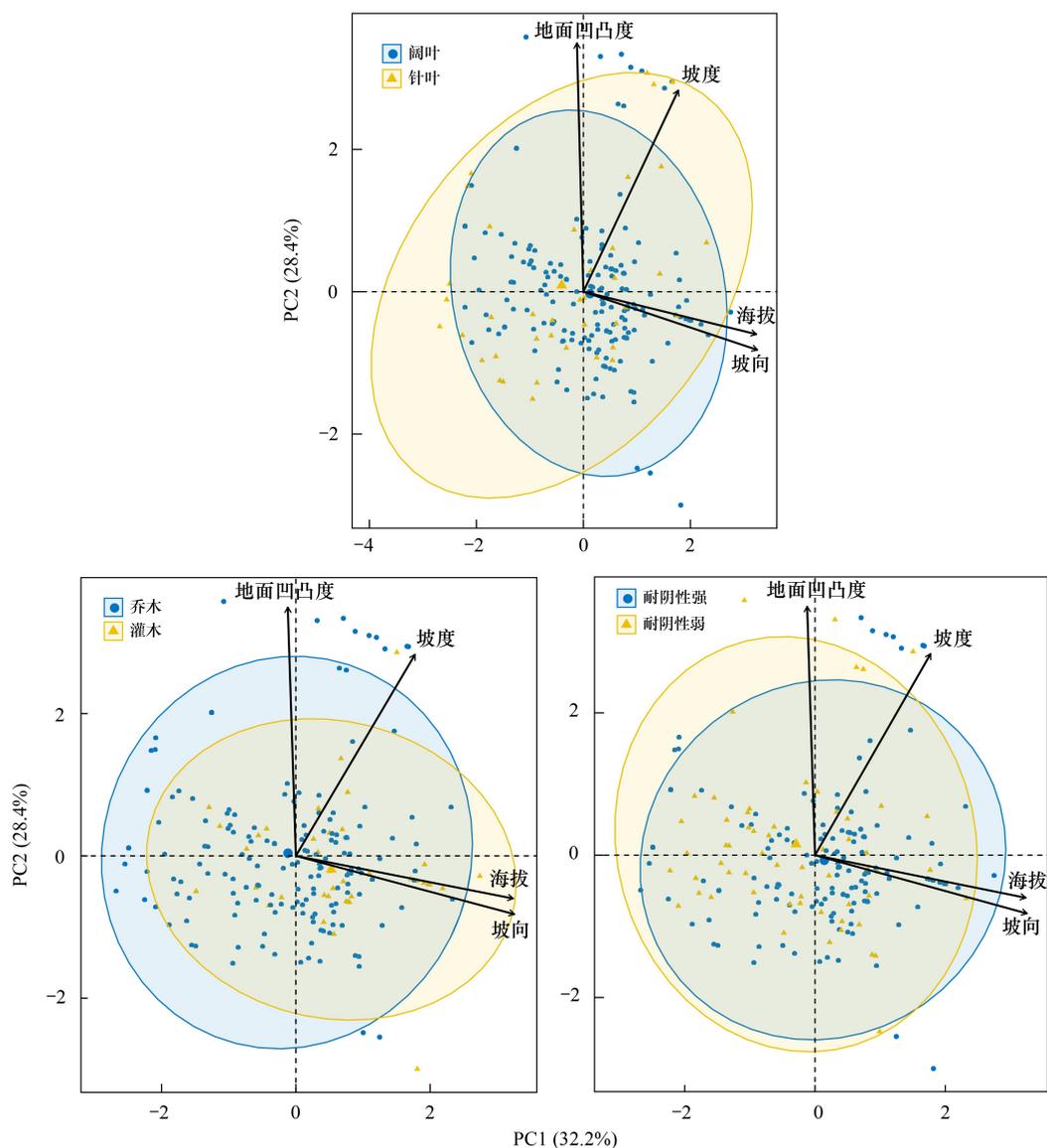


图 2 台风期间阔叶红松林中不同功能群受损木发生的主成分分析

Fig.2 Principal component analysis of wind-blown trees of different functional groups in broadleaved Korean pine forest. altitude; aspect, slope direction; convex

3 讨论

树木风倒的差异由诸多因素决定,它们相互作用,从而形成复杂的受损模式^[24]。本研究中台风对不同径

级的树木受损数量存在显著影响,表现出径级 I 的受损数量显著高于径级 II 与径级 III;而不同径级间树木受损率的大小表现为径级 II > 径级 III > 径级 I。有研究表明植物的抗风能力与胸径成正比,与高度成反比^[25],小径级树木高度较低且具有较好的柔韧性,抗风能力相对较强,但由于小径级树木往往位于林分冠层的最下层(3—8 m 处),故高受损数量与邻近风倒大树有关^[26]。有研究表明台风对森林的破坏,其损伤主要发生在径级较小的林分内^[20],林分冠层上层的树木往往直接面对强风,易遭到破坏并显著影响林下环境^[27]。同一径级中不同受损类型的树木受损数量也存在一定差异,许多树种连根拔起的比例随着胸径增加而降低^[28—29],径级 ≥ 20 cm 的树木比径级 < 20 cm 的树木更容易遭受冠断裂^[30]。

有关树木对抵抗台风能力的研究发现,重要性较高的因素分别为风速 > 其他树木特征 > 树种 > 胸径/高^[31]。可见树种差异也是台风导致受损程度不同的重要原因之一。本研究发现台风对不同功能群树木受损数量存在显著影响,耐阴性强的树种受损数量高于耐阴性弱的树种,乔木受损数量高于灌木,阔叶树种的受损数量高于针叶树种;然而不同功能群树木受损率的大小表现为耐阴性弱 > 耐阴性强,乔木 > 灌木,针叶树种 > 阔叶树种。阔叶红松林作为本地区的地带性顶极植被,群落中耐阴性强的树种占优势,故耐阴性强树种的受损数量更多,耐阴性弱的树种在林分内数量相对较少,而其受损率较高,表明耐阴性弱的树种抗风能力较弱;一些研究表明构成冠层最上层的先锋树种更容易遭受干扰的破坏,使抗耐阴性强的物种在群落中更占优势^[26,32],这与本研究的结果相似。有研究表明,较大体型的树木个体死亡率较高,树木的破坏程度与树木的大小呈正相关^[25,33],这解释了乔木比灌木更容易受到风害;群落中阔叶树种的数目远多于针叶树种,故阔叶树种的受损数量高于针叶树种,针叶树种的受损率更高,是由于在阔叶红松林中,针叶树种构成了冠层最上层,故受损程度较大。

地形因素也是解释台风引起的树木破坏空间模式的主要因素^[34]。起伏的地形会对风速产生影响,在山脊与山谷间隙等地形也会对风速和风向产生影响^[35],而且根据风向的不同,不同坡向的树木损害情况是迎风坡 > 侧风坡 > 背风坡^[36],本研究中树木被台风破坏的程度受坡向影响较大,研究地区在 8 月 22 日至 9 月 8 日期间西风、西北风、北风与东北风的风向比率相对较高,故解释了阴坡的树木受损数量高于阳坡、半阳坡与半阴坡。且有研究表明稳定的根系有利于提高树木抗风性,根系与土壤间的相互作用受土壤强度、湿度、树木根系深度等因素影响^[37—38],许多台风导致树木连根拔起之处均发现了积水,积水导致土壤湿度增加从而显著降低土壤强度^[39],长时间处于土壤含水量较高环境下的树木,其抗风性可能相对较差。地形变化也会导致土壤含水量发生变化,坡向影响太阳的辐射强度,光照从阴坡到阳坡逐渐充足^[40—41],因此阴坡土壤含水率相对较高。这可能解释了处于阴坡的树木抗风能力相对较弱。本研究表明树木的风倒方向会受到地形因子的影响。受损木的倒向是多种因素共同作用的结果,海拔、坡向、坡度与凹凸度等地形因素会影响树木的倒向^[42]。台风对森林的破坏受到多种环境因素和生物因素的共同作用,对森林生态系统产生即时效应和长期效应,本研究只分析了台风对森林树木的短期影响,今后需要对森林生态系统的长期效应进行定位研究。

4 结论

通过对小兴安岭阔叶红松林受到台风损害程度及其影响因素的分析,发现不同径级、不同功能群树木对台风的抵抗能力不同,表现为大径级树木、耐阴性弱的树种、乔木和针叶树种对台风的抵抗能力相对较弱;树木损坏程度也受到树木所处地形的影响,迎风坡与阴坡的树木对台风的抵抗能力相对较弱。总体而言,台风对森林的破坏受到多种环境因素和生物因素的共同作用,处于不同地形的不同径级、功能群的树木,其对台风的抵抗能力有所不同,这为理解极端天气事件对森林动态的影响以及恢复提供理论依据与参考。

参考文献(References):

- [1] 毛星竹, 刘建红, 李同昇, 邱海军. “一带一路”沿线国家自然灾害时空分布特征分析. 自然灾害学报, 2018, 27(1): 1-8.
- [2] Sánchez Sánchez O, Islebe G A. Hurricane Gilbert and structural changes in a tropical forest in south-eastern Mexico. Global Ecology and Biogeography, 1999, 8(1): 29-38.

- [3] Lugo A E. Visible and invisible effects of hurricanes on forest ecosystems; an international review. *Austral Ecology*, 2008, 33(4): 368-398.
- [4] Dunham R A, Cameron A D. Crown, stem and wood properties of wind-damaged and undamaged Sitka spruce. *Forest Ecology and Management*, 2000, 135(1/2/3): 73-81.
- [5] 刘斌, 潘澜, 薛立. 台风对森林的影响. *生态学报*, 2012, 32(5): 1596-1605.
- [6] Chambers J Q, Fisher J I, Zeng H C, Chapman E L, Baker D B, Hurr G C. Hurricane Katrina's carbon footprint on U.S. gulf coast forests. *Science*, 2007, 318(5853): 1107.
- [7] Jones-Held S, Held M, Winstead J, Bryant W. Immediate and delayed effects of severe winds on an old-growth forest in Kentucky: a forty-year retrospective. *Forests*, 2019, 10(3): 271.
- [8] 全川, 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.
- [9] Walker L R. Tree damage and recovery from hurricane Hugo in luquillo experimental forest, Puerto Rico. *Biotropica*, 1991, 23(4): 379.
- [10] 南颖, 刘志锋, 朱卫红, 武耀祥, 薛俊刚. 长白山的台风灾区范围及植被恢复动态——基于遥感技术的研究. *自然灾害学报*, 2011, 20(6): 131-139.
- [11] 郭利平, 姬兰柱, 张伟东, 张悦, 薛俊刚. 长白山西坡风灾区森林恢复状况. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1381-1388.
- [12] 洪奕丰, 王小明, 周本智, 李晓靖, 宋亚斌, 柳萍萍. 闽东沿海防护林台风灾害的影响因子. *生态学杂志*, 2012, 31(4): 781-786.
- [13] Shibuya M, Ishibashi S. Stand-level windthrow patterns and long-term dynamics of surviving trees in natural secondary stands after a stand-replacing windthrow event. *Forestry: an International Journal of Forest Research*, 2019, 92(4): 473-480.
- [14] Xi W M, Peet R K, Lee M T, Urban D L. Hurricane disturbances, tree diversity, and succession in North Carolina Piedmont forests, USA. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30(1): 219-231.
- [15] Ibanez T, Keppel G, Menkes C, Gillespie T W, Lengaigne M, Mangeas M, Rivas-Torres G, Birnbaum P. Globally consistent impact of tropical cyclones on the structure of tropical and subtropical forests. *Journal of Ecology*, 2019, 107(1): 279-292.
- [16] Choy C W, Lau D S, He Y H. Super typhoons Hato and Mangkhut, part I: analysis of maximum intensity and wind structure. *Weather*, 2022, 77(9): 314-320.
- [17] Choy C W, Lau D S, He Y H. Super typhoons Hato and Mangkhut, part II: challenges in forecasting and early warnings. *Weather*, 2022, 77(9): 324-331.
- [18] 奚为民, 陶建平, 李旭光. 强风干扰对森林生态系统的复杂影响: 研究进展和未来展望//自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集. 北京: 中国学术期刊电子出版社, 2009: 402-421.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 刘玉娇, 林虹, 裴永燕. 2020年两次北上台风产生的局地大暴雨天气过程分析. *黑龙江气象*, 2020, 37(4): 1-3, 16.
- [22] 徐丽娜, 金光泽. 小兴安岭凉水典型阔叶红松林动态监测样地: 物种组成与群落结构. *生物多样性*, 2012, 20(4): 470-481.
- [23] Niinemets Ü, Valladares F. Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate Northern Hemisphere trees and shrubs. *Ecological Monographs*, 2006, 76(4): 521-547.
- [24] Peterson C J. Within-stand variation in windthrow in southern boreal forests of Minnesota; is it predictable? *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(2): 365-375.
- [25] 罗冠勇, 宋希强, 杨冬华, 张哲. 海南 10 种园林乔木生物学特性与抗风性关联性分析. *热带作物学报*, 2013, 34(2): 263-267.
- [26] Frangi J L, Lugo A E. Hurricane damage to a flood plain forest in the luquillo mountains of Puerto Rico. *Biotropica*, 1991, 23(4): 324.
- [27] Woods K D. Intermediate disturbance in a late-successional hemlock-northern hardwood forest. *Journal of Ecology*, 2004, 92(3): 464-476.
- [28] Yoshida T, Noguchi M. Vulnerability to strong winds for major tree species in a northern Japanese mixed forest: analyses of historical data. *Ecological Research*, 2009, 24(4): 909-919.
- [29] Webb E L, van de Bult M, Fa'aumu S, Webb R C, Tualalelei A, Carrasco L R. Factors affecting tropical tree damage and survival after catastrophic wind disturbance. *Biotropica*, 2014, 46(1): 32-41.
- [30] Zhang F, Zhou G Y, Hiratsuka M, Tanaka K, Morikawa Y. Influence of an ice storm on aboveground biomass of subtropical evergreen broadleaf forest in Lechang, Nanling Mountains of southern China. *International Journal of Forestry Research*, 2012, 2012: 1-7.
- [31] Xi W M, Peet R K, Decoster J K, Urban D L. Tree damage risk factors associated with large, infrequent wind disturbances of Carolina forests. *Forestry: an International Journal of Forest Research*, 2008, 81(3): 317-334.
- [32] Foster D R. Species and stand response to catastrophic wind in central new England, U.S.A. *The Journal of Ecology*, 1988, 76(1): 135.
- [33] Xi W, Peet R K. Hurricane effects on the piedmont forests: patterns and implications. *Ecological Restoration*, 2008, 26(4): 295-298.
- [34] Peereman J, Hogan J A, Lin T C. Landscape representation by a permanent forest plot and alternative plot designs in a typhoon hotspot, Fushan, Taiwan. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 660.
- [35] Mitchell S J. Wind as a natural disturbance agent in forests; a synthesis. *Forestry: an International Journal of Forest Research*, 2013, 86(2): 147-157.
- [36] Bellingham P J. Landforms influence patterns of hurricane damage; evidence from Jamaican montane forests. *Biotropica*, 1991, 23(4): 427.
- [37] 余光灿, 周光益, 郑芬. 台风“山竹”对广州火炉山森林公园树木的影响. *中国园林*, 2020, 36(10): 122-126.
- [38] Achim A, Ruel J C, Gardiner B A, Laflamme G, Meunier S. Modelling the vulnerability of balsam fir forests to wind damage. *Forest Ecology and Management*, 2005, 204(1): 37-52.
- [39] Huang J W, Su Y, Zhu G Y, Chen R, Wu X F. Uprooting of tree induced by typhoon: a case study of super typhoon Mangkhut in university town of Shenzhen. *E3S Web of Conferences*, 2019, 92: 12012.
- [40] 朱晓勤, 刘康, 秦耀民. 基于 GIS 的秦岭山地植被类型与环境梯度的关系分析. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 192-196.
- [41] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 地形对亚热带山地景观尺度植被格局影响的梯度分析. *植物生态学报*, 2000, 24(4): 430-435.
- [42] 班勇, 徐化成, 李湛东. 兴安落叶松老龄林落叶松林木死亡格局以及倒木对更新的影响. *应用生态学报*, 1997, 8(5): 449-454.