

# 黄河三角洲刺槐人工林风害成因\*

曹帮华<sup>1\*\*</sup> 张玉娟<sup>1</sup> 毛培利<sup>2</sup> 李成波<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>山东农业大学农业生态与环境重点实验室, 山东泰安 271018; <sup>2</sup>中国科学院烟台海岸带研究所山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东烟台 264003; <sup>3</sup>山东黄河三角洲国家级自然保护区大汶流管理站, 山东东营 257509)

**摘要** 在调查2010年6—7月大风对黄河三角洲地区人工刺槐林的影响基础上,测定了风倒木形态指标、根系特征及其所处林窗的大小和土壤紧实度,分析滨海盐碱地人工刺槐林风倒的成因。结果表明:风倒是刺槐林遭受风害的主要形式,以胸径15~20 cm的树木受害最严重。随着径级的增加,风倒木的树高、冠幅、冠高和尖削度显著增加,而枝下高、冠幅/冠高和枝下高/树高变化不显著;根系长度先迅速增加而后增加缓慢,根系质量逐渐增加。随林窗面积增加,倒木株数先增加后下降,100~150 m<sup>2</sup>林窗倒木株数最多。土壤紧实度随土壤深度增加而增加,而随样木径级增加变化不显著。随径级增加,树形因子增大、根系生长受抑是刺槐风倒的重要原因,而林窗起到了促进作用。

**关键词** 风倒 树形 根系 林窗

文章编号 1001-9332(2012)08-2049-06 中图分类号 S718 文献标识码 A

## Formation causes of wind damage to *Robinia pseudoacacia* plantation in Yellow River Delta.

CAO Bang-hua<sup>1</sup>, ZHANG Yu-juan<sup>1</sup>, MAO Pei-li<sup>2</sup>, LI Cheng-bo<sup>3</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Agricultural Ecology and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China; <sup>2</sup>Shandong Province Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China; <sup>3</sup>Dawenliu Station of Yellow River Delta National Nature Protection Zone, Dongying 257509, Shandong, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2012 23(8): 2049-2054.

**Abstract:** Based on the investigation of the gale-caused damage to the *Robinia pseudoacacia* plantation in the Yellow River Delta in June-July 2010, this paper measured the morphological indexes and root system characteristics of fallen trees, gap sizes, and soil compactness, aimed to analyze the formation causes of the wind damage to the plantation. Wind-falling was the main form of the wind damage to the *R. pseudoacacia* plantation, and the damage was more serious for the trees with the diameter at breast height of 15-20 cm. For the fallen trees, their tree height and their crown width, height, and taper degree increased significantly with the increase of the diameter at breast height, while the height under branch, the ratio of crown width to height, and the ratio of the height under branch to tree height showed no significant change. With the increase of diameter class, root length had a rapid increase first but a slow increase then, while root mass increased gradually. With increasing forest gap area, the number of fallen trees decreased after an initial increase, being the maximum in the gap areas of 100-150 m<sup>2</sup>. Soil compactness increased with soil depth, but did not show significant changes with the stand diameter class. Increased tree shape factors and suppressed root growth resulting from the increased diameter could be the main factors causing wind-falling, and forest gap played a promotion role.

**Key words:** wind-falling; tree shape; root; gap.

沿海地区森林风害是影响森林生态功能发挥的

重要非生物因素<sup>[1-2]</sup>,是生态建设和林业生产极为重要的限制因子,对林业经济经常造成重大损失。例如,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3.7×10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>,占总面积的53%<sup>[3]</sup>。许涵等<sup>[4]</sup>研究发现2005年达维台风过

\* 国家自然科学基金项目(30950016)、国家农业成果转化资金项目(2011GB2C600024)和山东省优秀青年教师国内访问学者项目资助。  
\*\* 通讯作者。E-mail: caobanghua@126.com  
2011-12-03 收稿 2012-05-21 接受。

后,我国海南省尖峰岭热带山地雨林天然次生林内出现了大量的风倒木、断枝和落叶,导致群落郁闭度减少、透光性增强,产生大量的林窗,使群落的组成结构发生显著的变化。2008年“森拉克”台风导致浙江省的温州、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。由于南方热带、亚热带地区台风频发,森林风害的研究多集中在这些地区。而在我国北方地区,森林风害研究很少,仅见王玉岱等<sup>[5]</sup>报道了1997年11号台风对山东省泰安市绿化树木的危害,对于立地条件差、风害频发的黄河三角洲地区森林风害的研究更是未见报道。

对于森林风害的发生机制,国内外进行了大量研究,主要集中在生物因素和非生物因子上。树木抗风能力与树种、树形(如树高、冠幅、尖削度等)、树龄、根系类型、木材材性、生长健康状况等综合因素密切相关<sup>[3,5-11]</sup>。土壤类型决定了根系构型及根系生物量,进而影响树木的风害稳定性<sup>[3]</sup>。土壤水位低,树木根系长,树木抗掘根的能力增强<sup>[12]</sup>。树木掘根与土壤盐基饱和度、土壤空气容量<sup>[13]</sup>及土壤湿度<sup>[14]</sup>也有密切关系。

黄河三角洲多风,大风常夹杂着雨水,除了带来充沛的水资源外,有时也造成了许多树木的倒伏和风折,这种因风而倒伏和折断的树木叫作风倒木和风折木。风倒和风折是一种自然灾害,严重影响着森林健康和森林生态系统功能的发挥,也对森林更新产生重要影响。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林是黄河三角洲区域最主要的森林生态系统,对该地区防风固沙、改善环境发挥了重要的作用。自20世纪70年代中期,刺槐被广泛种植,主要分布在大汶流自然保护区、一千二自然保护区和黄河故道附近,至今刺槐林保存面积仍达8000 hm<sup>2</sup><sup>[15-16]</sup>。在2010年6—7月的大风灾害中,刺槐人工林出现了大面积风倒、风折现象,给黄河三角洲地区的防护林建设及盐碱化治理造成了巨大的损失。本文拟通过对这次风害的野外调查,试图阐明刺槐林风倒的原因,为黄河三角洲地区人工林的建设提供指导。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究地区位于山东省东营市河口区(37°59′14″—37°88′23″ N, 118°53′27″—118°55′41″ E),属暖温带半湿润地区,大陆性季风气候,年均气温为12.3℃,无霜期206 d,≥10℃的积温约4300℃,太阳辐射年总量5146~5411 MJ·m<sup>-2</sup>,年降水量550~600 mm,7—8月降水量约占全年降水量的50%,且多暴雨,易形成旱、涝灾害。土壤主要为滨海盐土,含盐量在1.0‰~2.6‰,局部地段在0.5‰~1.0‰,最高可达3.6‰。土壤pH 6.79~8.87,地下水位约1.5 m,水质矿化度较高。天然优势植物群落为盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)群落,光板地分布相当普遍。群落种类组成主要有矮芦苇(*Phragmites australis*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)等,碱蓬优势群落植被覆盖率平均8%~27%,高者达33%,光板地的植被覆盖率不足5%。

研究区林分为20世纪80年代人工栽植的刺槐纯林,南北行栽植,株距3 m,行距3.5~5 m。由于对历年风倒木、枯死木、病倒木的不断清理,林分内已出现一些较大的林窗,最大林窗面积可达15 m×17 m,林窗内以草本植物为主。林分整体长势良好,干形通直,部分林木出现干梢。刺槐林土壤理化性质见表1。

据山东省东营市气象局资料,自2010年6月降雨逐渐增多,其中7月3日该地区突降暴雨,降水量达139.4 mm;7月10日又遭遇平均风速为8.7 m·s<sup>-1</sup>的西南风,出现明显的风害。故在7月下旬对风害情况进行了调查。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样地设置及取样** 2010年6—7月的大风灾害过后,及时对大风造成的风倒木和风折木进行调查。在对研究区进行整体踏查基础上,根据刺槐林外貌特征、风倒状况,选择3个具有代表性的地段,在每个地段设置100 m×100 m的标准地,进行每木调查,调查内容包括:每木树高(H)、胸径(DBH)、南

表1 刺槐林土壤理化性质

Table 1 Soil physico-chemical properties of *Robinia pseudoacacia* plantation

土层 Soil layer (cm)	有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解 N Available N (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效 P Available P (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效 K Available K (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH	含盐量 Salt content (g·kg <sup>-1</sup> )
0~20	11.59	0.61	43.21	8.72	132.30	7.76	1.42
20~40	5.97	0.62	35.14	7.32	92.10	7.75	1.53
40~60	4.12	0.43	13.07	6.79	54.30	7.99	1.97

北冠幅、东西冠幅、枝下高(L)、冠高(Hc)、生长状况、林窗面积、土壤紧实度、树木在样方内的坐标位置等。根据野外调查林分胸径与数量,将样地内所有林木分为5个径级: DBH < 10 cm,记做I; 10 cm ≤ DBH < 15 cm,记做II; 15 cm ≤ DBH < 20 cm,记做III; 20 cm ≤ DBH < 25 cm,记做IV; 25 cm ≤ DBH < 30 cm,记做V。

**1.2.2 土壤紧实度的测定** 在样地内分径级、按照倒伏程度选择径级样木各3株(共45株)样木的胸径大小与表2中各个径级的平均胸径相等或者近似,在树体上挂牌标号,备测。土壤紧实度采用对角线法使用SC900型Cone index土壤紧实度仪测定,每株样木分别测定4个样点,测量深度为10、15和20 cm。

**1.2.3 风害调查** 依据风折部位及倒伏程度将林地内林木的风害程度分为3个等级: 1) 风折木: 仅断梢或树干在2/3树高以上折断者,或存在部分断枝者,且风倒后树干与地面夹角 ≥ 60°; 2) 风倒木: 风倒后的树干与地面的夹角 < 60°; 3) 健康木: 正常,没有明显断梢或断干,主干挺直。

**1.2.4 根系调查** 采用1/4营养面积取样法,以更有效地反映出林木根系分布实际状况<sup>[12]</sup>。根据倒木根系的直观分布情况,选取具有代表性的1/4营养区,调查根系直径 < 2 cm、2~4 cm 和 > 4 cm 的活根长度,并用烘箱在70℃烘干后测量其干质量。

**1.2.5 林窗调查** 本研究中调查的林窗为扩展林窗(expanded gap, EG)。扩展林窗指由林窗空隙周围树木的树干所围绕成的土地面积或空间,它包括了林冠空隙及其边缘到周围树木的树干基部所围成的面积或空间部分<sup>[17]</sup>。林窗面积计算采用椭圆法,即测量林窗最长轴(L)和其垂直方向上的最长轴(W),按公式  $EG_{area} = \pi L \cdot W/4$  计算<sup>[17-18]</sup>。根据林窗面积大小将林窗分为4个等级: A  $0 \text{ m}^2 \leq EG_{area} < 50 \text{ m}^2$ ; B  $50 \text{ m}^2 \leq EG_{area} < 100 \text{ m}^2$ ; C  $100 \text{ m}^2 \leq EG_{area} < 150 \text{ m}^2$ ; D  $EG_{area} > 150 \text{ m}^2$ 。

### 1.3 数据处理

文中数据均采用SPSS 16.0软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和双因素方差分析(two-

way ANOVA),采用最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异( $\alpha = 0.05$ ),用Pearson相关系数检验各因子间的相关关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同倒伏程度树木的径级分布

调查发现,样地内刺槐风倒木198株,风倒率为11.0%;风折木仅为5株,风折率为0.3%;累计受害率为11.3%。且风倒率显著大于风折率,是刺槐林此次遭受风害的主要形式。其原因可能与该地先降大雨造成土壤疏松,而后大风造成机械倒伏有关。在风倒树木中,径级III树木最多,占风倒木总数的41.9%,其次为径级II和径级IV,分别占风倒木总数的23.2%和18.2%。这与刺槐林在该径级中的树木数量多有关。

### 2.2 风倒木树冠形状指标

由图1可以看出,随着径级的增加,风倒木的树高、冠幅、冠高和尖削度逐渐增加,而枝下高、冠幅/冠高、枝下高/树高的变化不大。方差分析结果表明,不同径级之间风倒木的树高( $F = 4.22$ )、冠幅( $F = 4.68$ )和尖削度( $F = 7.59$ )差异极显著,冠高差异显著( $F = 3.14$ ),而枝下高( $F = 0.33, P = 0.86$ )、冠幅/冠高( $F = 0.76, P = 0.56$ )和枝下高/树高( $F = 0.12, P = 0.97$ )差异不显著。

### 2.3 风倒木根系特征

由图2可以看出,随着风倒木径级的增加,直径 < 2 cm 和 > 4 cm 的根系长度先迅速增加,然后变化不大,直径在2~4 cm 的根系长度逐渐增加;不同直径的根系之间, < 2 cm 的根系长度最大。方差分析表明,对于根系长度,不同径级之间的差异极显著( $F = 7.62$ ),径级I最短( $P < 0.05$ ),径级II和III差异不显著;不同根系直径之间差异极显著( $F = 18.70$ )根系直径 < 2 cm 的最长( $P < 0.01$ )根系直径2~4 cm 和 > 4 cm 差异不显著;二者有着显著的交互作用( $F = 3.31$ )表明随径级增加,根系长度明显增加。

随着风倒木径级的增加,根系生物量逐渐增加;不同直径的根系之间, > 4 cm 的根系生物量最大。方差分析表明,不同径级之间差异极显著( $F = 8.87$ )径级I和II差异不显著,极显著低于径级III;不同根系直径之间差异显著( $F = 5.86$ ),根系直径 < 2 cm 和2~4 cm 差异不显著,显著低于直径 > 4 cm 根系生物量;二者有着显著的交互作用( $F = 3.46$ )表明随径级增加,根系生物量增加明显。

表2 刺槐林不同倒伏程度树木径级分配

Table 2 Structure of the size classes of lodging individual of *Robinia pseudoacacia* plantation

倒伏程度 Lodging degree	径级 Diameter class					合计 Sum
	I	II	III	IV	V	
风倒木 Windfall	26	46	83	36	7	198
风折木 Snapped tree	0	4	0	1	0	5
健康木 Healthy tree	122	325	923	342	87	1799

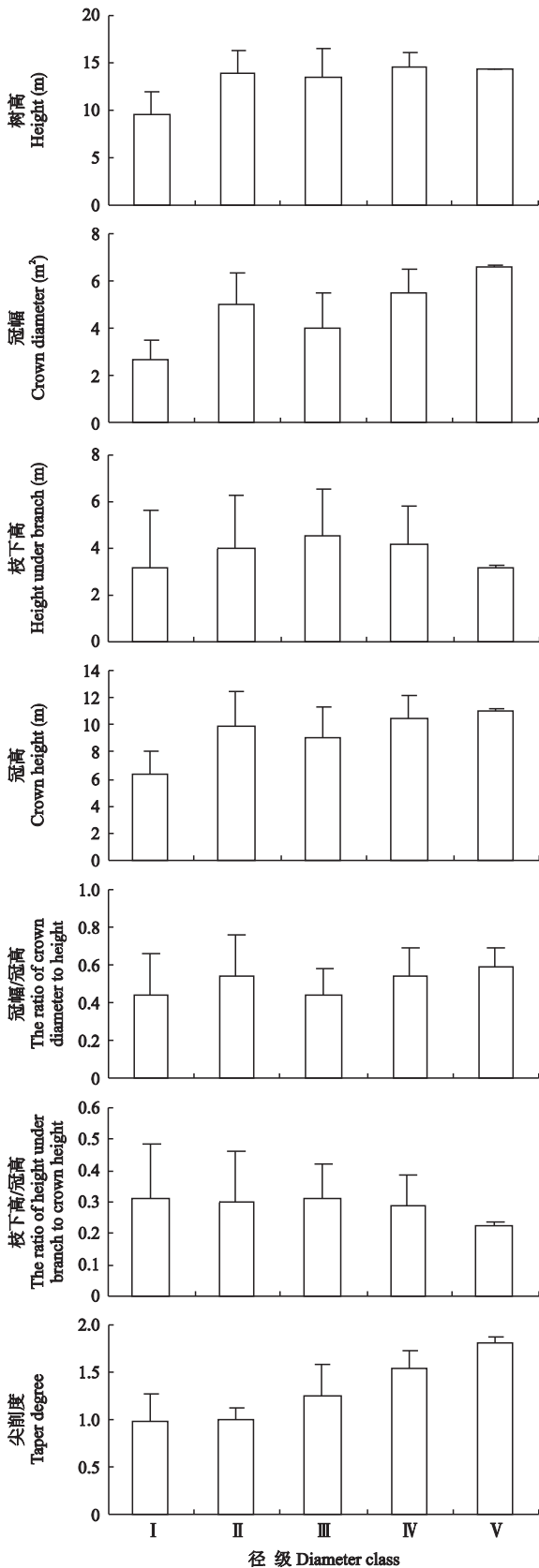


图 1 风倒木树冠形状指标随径级的变化  
 Fig. 1 Changes of morphological parameters of the windfalls with diameter class ( mean ± SD ).

2.4 林窗大小对树木风倒的影响

由图 3 可以看出 随着林窗面积的增加 林窗内的风倒木株数逐渐增加,以 C 级林窗中的风倒株数最多. 方差分析表明 不同林窗等级之间的差异极显著(  $F = 5.97$  ),表明林窗大小对刺槐风倒有着显著的影响.

2.5 土壤紧实度随径级的变化

由图 4 可以看出 随着径级的增加 0 ~ 5 cm 土壤的紧实度变化很小,10 ~ 15 cm 的先降低再增加 然后再降低 20 ~ 25 cm 的先降低再增加. 相关分析发现,20 ~ 25 cm 的土壤紧实度与风倒木数量负线性相关不显著,相关系数为 0.70,存在着一定的负相关性. 随着土壤深度的增加,土壤紧实度增加. 方差分析表明,不同径级之间的土壤紧实度差异不显

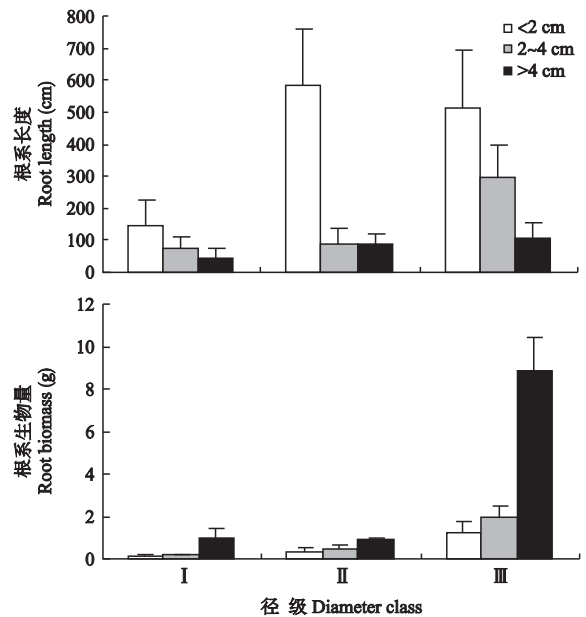


图 2 风倒木根系长度和根系生物量随径级的变化  
 Fig. 2 Changes of root length and biomass of the windfalls with diameter class ( mean ± SD ).

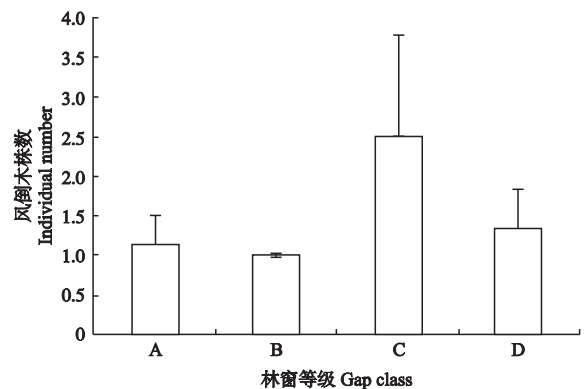


图 3 风倒木株数随林窗面积的变化  
 Fig. 3 Change of windfall number with gap area ( mean ± SD ).

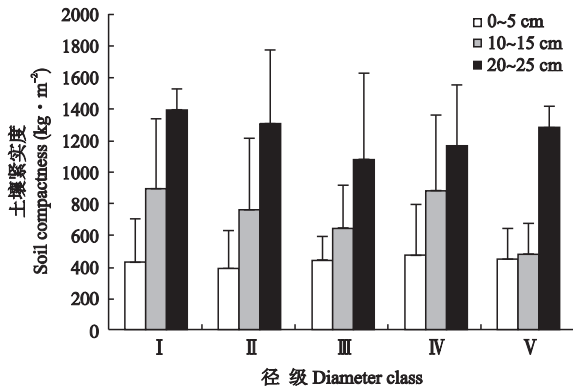


图4 土壤紧实度随风倒木径级的变化

Fig. 4 Changes of soil compactness with diameter class of the windfalls (mean  $\pm$  SD).

著 ( $F=0.39$ ); 不同土壤深度之间差异极显著 ( $F=14.87$ ), 而径级与土壤深度之间没有显著交互作用 ( $F=0.27$ ).

### 3 讨 论

黄河三角洲地区地势平坦, 年大风日数在 10 d 左右, 且多集中在春季, 年平均风速一般在  $3.2 \sim 4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  [19]. 受水分、土壤含盐量、潜水水位与矿化度等因素的影响, 自然植被以灌草丛为主, 高度有限, 防风能力差. 刺槐林作为黄河三角洲地区分布面积最大的乔木林分, 树高在  $7.5 \sim 15 \text{ m}$  [20], 具有较强的防风能力.

对刺槐风倒木形态特征的研究表明, 随着胸径径级的增加, 树高冠幅显著增加. 有研究表明, 树木胸径的增加可以提高抗风能力, 但树高增加却能降低抗风能力 [21]. 冠幅的增加对其抗风能力不利, 主要与其受风面积增大有关 [7, 22-23]. 尖削度也是判断树木抗风能力最重要的指标之一 [24]. 它与树木抗风能力呈正相关 [25]. 刺槐倒木的形成是多种形态因子综合变化的体现.

树木根系特征对其抗风能力有着重要的影响. 深根系树种抗风能力高于浅根系树种 [5, 8, 26]. 刺槐无明显主根, 属于浅根性树种, 限制了其抗风能力. 研究表明, 刺槐风倒木的活根系长度由径级 II 到径级 III 增加缓慢, 说明随树干直径冠幅增加, 根系在土壤中的扩展受到抑制, 加之  $20 \sim 25 \text{ cm}$  土壤紧实度降低, 风倒木数量在径级 III 最多. 这与陈绶柱等 [27] 对木麻黄抗风能力研究的结论一致. 径级 IV 和 V 中倒木数量降低, 与随根系增粗, 根系分布变深,  $20 \sim 25 \text{ cm}$  土壤紧实度增加有关. 说明径级 III 是根系扩展的关键时期. 有研究发现, 地下水位、土壤含盐量是

影响黄河三角洲刺槐健康生长的重要原因 [28], 也是造成风倒木根系大量死亡的成因. 由于地下水水位浅, 土壤含盐量高, 限制了刺槐活根系垂直与水平扩展, 影响了其抗风能力; 而风害发生在暴雨后不久, 土壤湿度大, 根土盘固力小, 是树木风倒的主要诱因.

林窗大小对刺槐风倒有显著作用, 且林窗面积在  $100 \sim 150 \text{ m}^2$  时更容易遭受风倒危害. 这与林窗形成后, 其边缘气流加速林分内气流路线改变有关 [29-30]. 皆伐试验发现, 边缘气流强度强于皆伐中心区域, 导致边缘林木风倒或风折 [31]. 块状皆伐后的第 1 年, 皆伐地边缘树木发生风害的可能性加大 [32], 这主要是由于林窗周围树干弯曲力矩增加造成的.

### 4 小 结

黄河三角洲地区刺槐人工林遭受风害是多因素综合影响的结果. 由于该地区地处海陆作用区域, 受海风影响大; 作为冲积平原, 地势平坦, 加之地下水位浅、含盐量高, 植被以灌草为主, 防风能力差. 而刺槐林作为该区域最主要的森林植被, 冠层高, 容易遭受风害. 同时, 恶劣的生境限制了刺槐根系的生长, 在暴雨和大风的共同作用下, 易产生风倒. 因此, 如何通过工程措施改善林地立地条件, 通过营林措施 (合理密度、与深根性树种混交、整形修枝等) 改善林分结构, 提高刺槐林抗风倒能力, 维持其防护效益, 应成为今后黄河三角洲刺槐人工林经营的主要研究内容.

### 参考文献

- [1] Ulanova NG. The effects of windthrow on forests at different spatial scales: A review. *Forest Ecology and Management*, 2000, **135**: 155 - 167
- [2] Schelhaas MJ, Nabuurs GJ, Schuck A. Natural disturbances in the European forests in the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 1620 - 1633
- [3] Wang F, Xu YJ. Hurricane Katrina-induced forest damage in relation to ecological factors at landscape scale. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **156**: 491 - 507
- [4] 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. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2008, **32**(6): 1323 - 1334 (in Chinese)
- [5] Wang Y-D (王玉岱), Zhu A-P (朱爱萍), Chen J-H (陈建华), et al. Survey of typhoon damage to landscape trees in Tai'an. *Shandong Forestry Science and Technology* (山东林业科技), 1998(3): 45 - 47 (in Chinese)
- [6] Li H-X (李慧仙), Xin W-H (信文海). Wind-resist-

- ant species selection and radix Saposhnikovia measures of coastal urban in South China. *Journal of South China University of Tropical Agriculture* (华南热带农业大学学报), 2000, **6**(1): 15–17 (in Chinese)
- [7] Li G-Q (李国旗), An S-Q (安树青). The bending stress analysis of 4 species of woods caused by wind pressure in coastal shelter forest. *Journal of Nanjing Forestry University* (南京林业大学学报), 1999, **23**(4): 76–80 (in Chinese)
- [8] Wu Z-H (吴志华), Li T-H (李天会), Zhang H-L (张华林), et al. Studies on growth and wind-resistance traits of *Casuarina* and *Acacia* stands from coastal protection forest. *Pratacultural Science* (草业学报), 2010, **19**(4): 166–175 (in Chinese)
- [9] Platt WJ, Doren RF, Armentano TV. Effects of Hurricane Andrew on stands of slash pine (*Pinus elliottii* var. *densa*) in the everglades region of south Florida (USA). *Plant Ecology*, 2000, **146**: 43–60
- [10] King DA. Tree form, height growth, and susceptibility to wind damage in *Acer saccharum*. *Ecology*, 1986, **67**: 980–990
- [11] Foster DR. Species and stand response to catastrophic wind in central New England, USA. *Journal of Ecology*, 1998, **76**: 135–151
- [12] Ray D, Nicoll BC. The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce. *Forestry*, 1998, **71**: 169–182
- [13] 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. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2003, **142**: 327–340
- [14] Wang F, Xu YJ. Hurricane Katrina-induced forest damage in relation to ecological factors at landscape scale. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **156**: 491–507
- [15] Liu Q-S (刘庆生), Liu G-H (刘高焕), Yao L (姚玲). Detection of *Robinia pseudoacacia* planted forest canopy health using Landsat ETM image data. *Remote Sensing Technology and Application* (遥感技术与应用), 2008, **23**(2): 142–146 (in Chinese)
- [16] Zhang J-F (张建锋), Xing S-J (邢尚军). Research on soil degradation of *Robinia pseudoacacia* plantation under environmental stress. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2009, **40**(5): 1086–1091 (in Chinese)
- [17] Runkle JR. Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America. *Ecology*, 1982, **63**: 1533–1546
- [18] Dynesius M, Johnson BG. Dating uprooted trees: Comparison and application of eight methods in a boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, **21**: 655–665
- [19] Wang J-Y (王建源), Feng J-S (冯建设), Yuan A-M (袁爱民). Analysis the changes of agricultural climate resources environment in Dongying. *Shandong Meteorological* (山东气象), 2005, **25**(1): 22–24 (in Chinese)
- [20] Song C-Y (宋创业), Liu G-H (刘高焕), Liu Q-S (刘庆生), et al. Distribution patterns of plant communities in the Yellow River Delta and related affecting factors. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(12): 2042–2048 (in Chinese)
- [21] Li X-F (李秀芬), Zhu J-J (朱教君), Wang Q-L (王庆礼), et al. Snow/wind damage in natural secondary forests in Liaodong mountainous regions of Liaoning Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(6): 941–946 (in Chinese)
- [22] Valinger E, Lundqvist L, Bondesson L. Assessing the risk of snow and wind damage from tree physical characteristics. *Forestry*, 1993, **66**: 249–260
- [23] Chen S-Y (陈士银), Yang X-H (杨新华), Du S-Z (杜盛珍). Investigation and analysis on the yard tree’s characteristic of resilience to wind. *Protection Forest Science and Technology* (防护林科技), 1999(4): 32–35 (in Chinese)
- [24] Mitchell SJ. Stem growth responses in Douglas-fir and Sitka spruce following thinning: Implications for assessing windfirmness. *Forest Ecology and Management*, 2000, **135**: 105–114
- [25] Cremer KW, Borough CJ, Carter PR. Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1982, **12**: 244–268
- [26] Hou Q (侯倩), Li Y-D (李意德), Kang W-X (康文星), et al. Selection of tree species for anti-typhoon shelter forests of tropical coastal city in Hainan. *Journal of Central South University of Forestry & Technology* (中南林业科技大学学报), 2011, **31**(5): 184–192 (in Chinese)
- [27] Chen S-Z (陈绥柱), Cen F (岑奋), Wu Z-P (吴泽鹏). Analysis on typhoon-resistance of sandy coast windbreak and sand-fixation *Casuarina equisetifolia* test forest. *Guangdong Forestry Science and Technology* (广东林业科技), 1999, **15**(1): 26–29 (in Chinese)
- [28] Yao L (姚玲), Liu G-H (刘高焕), Liu Q-S (刘庆生), et al. Remote sensing monitoring the health of artificial *Robinia pseudoacacia* forest. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (武汉大学学报·信息科学版), 2010, **35**(7): 863–867 (in Chinese)
- [29] Ruel JC. Factors influencing windthrow in balsam fir forests: From landscape studies to individual tree studies. *Forest Ecology and Management*, 2000, **135**: 169–178
- [30] Zeng H, Peltola H, Talkkari A, et al. Influence of clear-cutting on the risk of wind damage at forest edges. *Forest Ecology and Management*, 2004, **203**: 77–88
- [31] Peltola H, Kellomäki S, Väisänen H. Model computations of the impact of climatic change on the windthrow risk of trees. *Climate Change*, 1999, **41**: 17–36
- [32] Stacey G, Belcher R, Wood C, et al. Wind flows and forces in a model spruce forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, **69**: 311–334

作者简介 曹帮华,男,1964年生,教授,博士生导师.主要从事树木生理生态和森林培育研究. E-mail: caobanghua@126.com

责任编辑 李凤琴