

森林的风/雪灾害研究综述

李秀芬^{1,2}, 朱教君^{1,2*}, 王庆礼¹, 刘足根^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 风/雪灾害不仅极大影响木材生产, 同时对森林生态系统的稳定性也造成很大影响。森林风/雪危害的主要类型有树干弯曲、干(冠)折、掘根以及后续危害等; 其发生主要依赖于气象条件、立地因子、树木和林分特征及其之间的相互作用。其中, 林木尖削度(胸径/树高)和林分结构特征(树种、组成、密度等)是控制树木和林分对风/雪荷载抵抗的主要特征量。因此, 通过造林、调整林分结构, 加强林分管理如间伐、施肥等措施一直是用来减少林木的风/雪灾害的主要措施。另外, 林木或林分发生风/雪害的模型分析研究也取得了很大进展, 但由于森林风/雪害受诸如地形、天气等多种因素影响, 目前所建立的模型系统在实际应用中普适性较差。通过综述以往研究结果认为: 在气象和立地条件难以控制的情况下, 通过改变可控因子——林分结构来减少森林风/雪害是可行的。因此, 研究如何加强森林经营管理, 尤其是不同形式的间伐技术和不同处理的造林措施与风/雪灾害发生的关系、如何增加林木和林分抵抗风/雪灾害的能力等是今后该研究领域的重点和难点。与此同时, 应加强风/雪灾害危险率评估研究, 进而对森林进行风/雪灾害危险率管理; 并注重对受灾前后林地内生态效应的研究, 以便为灾后的森林经营管理和调控提供坚实的理论依据。

关键词: 森林; 风/雪灾害; 经营管理

Forest damage induced by wind/snow: A review

LI Xiu-Fen^{1,2}, ZHU Jiao-Jun^{1,2*}, WANG Qing-Li¹, LIU Zu-Gen^{1,2} (1. *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; 2. *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 148~157.

Abstract: Wind/snow damage not only threatens the productivity of forests, but also has a significant impact on forest stability. Forest damage induced by wind/snow is characterized by stem bending, crown breakage, uprooting and the consequential effects of the damage. Earlier study related to this aspect showed that the existence of such damage depends on the meteorological condition of the forest area, site factors and certain extent of species specific in nature. However, stem taper and characteristics of tree crown are the main characters controlling the tree resistance to wind/snow loading. Though the site factors and meteorological conditions can nearly not be controlled by human beings, forest damage induced by wind/snow might be reduced by forest management techniques such as regeneration, thinning, fertilization and stand structure adjustment. Studies on models for analyzing the occurrence of tree or stand wind/snow damage have greatly progressed, but the evaluation models were not applied commonly in practice because forest wind/snow damage was affected by some other factors such as topography and weather conditions. Moreover, most of the researches were focused on the plantation forest, few of them on the natural forests. Therefore, we believe that it is the viable way to reduce the stand wind/snow damage through changing the controllable factors i. e., tree characters or stand structures, because the meteorological phenomena and site environments are hardly controllable. Based on the certain results, we concluded that studies on the relationships between different thinning levels and afforestation measures with wind/snow damage as well as the techniques for improving the resistance ability of tree

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30371149); 中国科学院百人计划资助项目(BR0301)

收稿日期: 2004-05-12; **修订日期:** 2004-10-15

作者简介: 李秀芬(1974~), 女, 山西应县人, 博士生, 主要从事森林气象和森林生态研究。E-mail: lxf-hyc@163.com

* **通讯作者** Author for correspondence. E-mail: jiaojunzhu@iae.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30371149); The 100-young-researcher project of Chinese Academy of Sciences

Received date: 2004-05-12; **Accepted date:** 2004-10-15

Biography: LI Xiu-Fen, Ph. D. candidate, mainly engaged in forest meteorology and forest ecology. E-mail: lxf-hyc@163.com

against to wind/snow should be paid more attention. In addition, the ecological processes of wind/snow damage for natural forest and their evaluation should be recommended in the future research.

Key words: forests; wind/snow damage; stand managements

文章编号:1000-0933(2005)01-0148-10 中图分类号:Q142,S716,S718.5 文献标识码:A

风/雪灾害是森林生态系统重要的非生物干扰因子,对林业的生产和发展起着重大的影响。风/雪灾害降低木材质量和产量,从而给林业生产造成了巨大的经济损失;主要包括可收获木材的减少,收获费用的增加,潜在生产力的损失和暂时性的市场过剩等^[1]。在欧洲,每年大约有 $4 \times 10^6 \text{m}^3$ 的林木遭受雪害^[2];1990年由“Vivian”和“Wiebke”森林风害造成欧洲森林直接损失木材达 $1.0 \times 10^8 \text{m}^3$ ^[3];1999年发生在欧洲的“Lothar”和“Martin”森林风害损失木材达 $1.8 \times 10^8 \text{m}^3$ ^[4];仅瑞典每年由于风/雪害对森林造成的损失高达 $1.5 \times 10^8 \text{m}^3$ ^[5]。在亚洲,1981年的12月和1986年的3月发生在日本的雪灾给林业所带来的经济损失分别为 6.17×10^8 和 2.17×10^8 美元^[6];1986年发生在我国长白山西坡的森林风害造成的木材损失达 $2.07 \times 10^8 \text{m}^3$ ^[7,8]。在森林生态系统中,以风/雪一类气象灾害所引起的受害木采伐量,在温带地区已占总采伐量的20%,并呈上升趋势^[9]。此外,由于受害树木伤口的形成增加了病虫害侵袭的危险,将对森林生态系统造成进一步的损害^[1,10]。

据气象学家和全球气候变化模型预测表明,由于全球气候变化的影响,各种类型风/雪灾害的发生频率和强度将有增加的趋势^[11~13]。因此,研究森林风/雪灾害问题对于保护好现有的森林资源和指导林区的经营管理具有重要的意义。但是,该方面的研究多集中于国外(欧洲),国内的研究很少。在以往研究的基础上,从森林风/雪灾害的类型、影响因素及降低危害的管理措施等研究方面作了简要总结,以期今后国内的相关研究提供一定参考。

1 森林风/雪灾害及其危害类型

1.1 森林风/雪灾害

森林风/雪灾害是由于大风或积雪作用在树体上引起的^[14],即当附加在树冠和树干上的风力或雪压达到树木承受的极限时,树木的特定部位不能支持这些负荷而造成的树干弯曲、树冠和树干折断以及连根拔起等危害^[15,16]。一旦这些灾害发生,还可能产生进一步的损害^[17]。

1.2 危害类型

1.2.1 树干弯曲(Stem Bending) 树干弯曲是森林风/雪危害最轻的一种,尽管幼树也有折断的可能,但一般情况下小径级的林木更趋向于弯曲,而不是受其他形式的损伤。风/雪灾害导致树干弯曲的类型有上部树干弯曲和根际树干弯曲两种^[1],其中根际树干弯曲所带来的危害较大,据统计,日本柳杉根际弯曲使日本木材利用的损失率达20%以上^[18]。

大风或积雪导致林木弯曲可能持续数年或只持续几个月,甚至在一些极端的情况下,林木可能无法恢复直立。林木恢复的程度取决于弯曲的角度,一些松科类树木弯曲达 40° 时也可恢复得很好,但当树干弯曲超过 60° 时便无法恢复,并且当弯曲的树木多次受压后,将会使树木无法恢复直立甚至造成断裂^[1]。树干弯曲不仅降低了林木的生长,同时也容易导致林木从弯曲点处倾斜或倾倒^[19]。如 Nykänen 等^[1]指出,芬兰北部的树干南侧比较柔弱,其原因就是南面一侧容易积雪。

1.2.2 干(冠)折(Stem and Crown Breakage) 干(冠)折是风/雪害最常见的类型,尤其是在中龄林和成熟林中表现更为突出^[15,20,21],这种损害多发生在树干抗折断能力低于根土盘固着力(root anchorage strength)时^[17]。其中,树木抗折断的能力与 dbh^3 (dbh = 胸径)和 MOR (MOR = 断裂系数)呈正相关^[15,22~26],而断裂系数因树种、木材质地的不同而不同。另外,树木的弹性系数也是影响树木折断的一个重要因子,它主要是影响在风/雪压下树干的偏转程度,进而决定了作用在林木上的扭转力矩,并且弹性系数也因树种不同而不同^[15,27]。树木折断可发生在不同高度处,但距树干基部大约为树高的25%~30%高度处折断较为常见^[22]。折断点不同是由于树种和年龄的不同引起的。例如,在挪威云杉(*Picea abies* L.)中折断的危害一般发生在树冠上部,而欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)和桦树(*Betula* sp.)的折断损伤在树冠的上部、中部和树干的基部都有发生^[28]。实际上,折断点也取决于树木的尖削度(胸径/树高)、木材强度和诸如枝节(knots)、轮枝(whorls)和腐烂(rot)等有缺陷的地方^[22]。但是到目前为止这些不同因素对折断点影响的研究尚没有明确的结论。

损伤后受影响的部分决定于折断发生的部位,如果折断在整个活立木的下部,林木将死亡;如果折断发生在活立木的上部,树木的优势减弱,生长量降低。尽管有些损伤的林木可以恢复的很好,但损伤仍会造成直接的木材损失。特别是对那些经过多次损伤的林木,树干极易弯曲、分杈和多顶枝^[1]。此外,树冠和树干破损后也容易受病虫害的感染^[19,29]。

1.2.3 掘根(Uprooting) 当风/雪压力作用在树体时,如果茎干抗弯折能力大于根土盘固着力,那么林木就发生掘根。树木抵抗掘根的能力与 dbh^2 呈正相关^[30],因此在土壤未冻结的情况下掘根比干折更容易^[23]。而当土壤处于冰冻状态时,干折危害发生的可能性要高于掘根,这是由于冰冻的土壤其根土盘固着力较大^[2]。所以一般情况下掘根多发生在雨水多的季节和土壤松散的地方。此外,根的发育状况和土壤条件也影响树木掘根危害的程度。例如,生长在陡坡地、岩石地和水湿地的树木由于其根系

浅而不均衡,所以在这些地方树木掘根的危害比较严重^[14]。

1.2.4 后续的危害(Consequential Damage) 遭到风/雪灾害后的林分容易被病虫害侵袭,同时也会造成更新困难^[29]。虫害对受灾后的林木影响最大,如,失去多半树冠的欧洲赤松和挪威云杉林分在遭受了虫害的袭击后,其林木的生长速率和木材质量均有大幅度下降,并且虫害也广泛地蔓延于未受灾的林分中^[1]。间伐和施肥相结合的处理手段也会使受灾林分被病虫害侵袭的可能性增加。因此,在受灾后做好森林卫生和清理受害木是很重要的^[17]。

不同林木受灾后遭受病虫害侵袭的程度也不同,如,风/雪灾害后遭受真菌侵染的挪威云杉和桦树比欧洲赤松更为常见。真菌对灾后林木的侵染程度取决于树龄、损伤处的直径和存活木的树冠大小,并且也有可能进一步导致树木发生腐烂^[1]。在德国,风/雪灾害后典型的真菌感染类型是革菌(*Stereum*)和根腐菌(*Fomes* sp.)。灾后造成的危害主要是指经济上的损失,即木材等级和质量下降。此外,受灾后的森林不仅增加了采伐的费用,同时也使再生群体的建立变得困难^[17]。

2 影响森林风/雪灾害的因素

2.1 气象条件

树木上的积雪是否引起雪害取决于降雪量和降雪类型,而降雪量和降雪类型又决定于天气情况,主要是风速和温度^[14]。

雪被树木阻截是一个复杂的过程,涉及雪在整个降落过程中的许多因子:包括粘附,凝聚,风吹,滑落,融化和汽相输送等^[1]。降雪中的水分含量很大程度上依赖于温度。降雪密度决定于空气的湿度和降雪形式,其变动范围在 $0.05 \sim 0.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[1]。研究表明,我国的新雪量积雪密度,以东北黑龙江、长白山和新疆为最大,约为 $0.14 \sim 0.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;华北和西北、东北的其他地区为 $0.11 \sim 0.13 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;秦岭淮河以南地区积雪密度为 $0.13 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[18]。长时间积雪的密度大于新雪,湿雪密度大于干雪。雨夹雪或先降雨后降雪,温度又迅速下降到 0°C 以下时,树木遭受雪害的危险更趋严重^[18,31,32]。Cannell 等^[33]对北美云杉(*Picea sitchensis*)雪荷载的测量表明,在新抽出枝条上积 $4 \sim 8\text{cm}$ 的湿雪,其重量达 $0.9 \sim 2.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1}$,是树枝鲜重的 $3.1 \sim 3.5$ 倍;若为结晶雪,其重量达 $2.3 \sim 4.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1}$,是树枝鲜重的 $7.2 \sim 11.7$ 倍。

当一次降雪或长期积累的雪量达到某一临界值时将可能发生雪害。最适宜降雪积累的气象条件是微风,气温下降和没有阳光。粘附和凝聚恰好在冰点以下时最强烈,当温度范围为 $-3 \sim 0.6^\circ\text{C}$ 时雪片可迅速、大量地在树冠上积累,容易发生雪害^[14]。亦有研究表明温度在 $-5 \sim 3^\circ\text{C}$ 范围也可能是造成雪害的适宜条件^[34]。树冠上拦截的降雪量取决于温度,如果温度超过 0.6°C 并持续 3h 以上时,由于雪可能融化从树上滑落,使雪害减轻或避免^[14];如果温度低于 -5°C 时雪片是干燥的且无法粘附,这样雪片易分散,很难大量积累在树冠上^[35],也可避免雪害发生;当降水初期无风或微风且温度在 0°C 以上,而后温度又降至 0°C 以下时,使得降雪更高效地粘附于树冠上,这样雪害的危险将会加剧^[14]。如果降水后期再有大风出现将会折断已满积雪的林木,使森林遭到更严重的灾害^[17,18,32]。

较高的空气湿度和较低的风速是造成降雪大量积累的主要气象条件^[23]。如果风速超过 $9\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 粘附在树冠降雪将被吹走,不过在近海地区由强风和湿雪所造成的风/雪灾害也有发生。例如在英国的一场雪害事件中记录的风速为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,这场风/雪灾害造成了局部地区 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 木材的损失^[36]。并且这一现象在世界上的其它地方也有发生,如 1974 年发生在日本新潟县和 1977 年发生在我国山西管涔林区的风/雪灾害就属于这种类型^[18,32,37]。遗憾的是,目前关于风与降雪相结合的研究并不多,可获得的统计资料也很少^[36]。

2.2 地形、土壤条件

2.2.1 地形条件 风害多发生在山区风口处,山峰顶部,山脊和山坡上部以及狭谷等风速大的地方^[38~41]。Schmoeckel 等^[40]对 1999 年发生在德国黑森林的“Lothar”风害与地形的关系研究表明,受害地点与地形有非常显著的相关关系。山峰之间的鞍形地带,以及山脊的北侧和迎风面的西侧发生了较大的破坏。在背风处受保护的地区一般受害较小,如背风坡面、溪谷、凹地和与平均风向垂直的峡谷地区。在芬兰,由风引起的灾害大体分布在皆伐地的边缘,其原因是由于皆伐地的边缘风速大,增加了树的风荷载^[24]。乌克兰 Carpathians 地区 16 个气象站 1945~1999 年的风暴(大于等于 $20\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)数据资料表明,在有记录的 6631 次风暴事件中发生在山顶的占 60% ^[4]。在新西兰最严重的风暴事件往往在与山地有关的地形背风波(下风波)和风隧道而加重,这是因为背风波导致山地下风向的低层风速增加^[40]。而 Everham^[12]总结了 14 处温带和热带针叶林和阔叶林受台风影响的情况,表明地形因子与破坏强度间无明显相关性,这可能是由于台风强度太大而造成的。

通常情况下在近海地区落在树上的湿雪持续的时间和降雪量均大于内陆,所以损伤百分率最大的林分也最靠近沿海^[1]。此外,由于地形强迫湿空气抬升形成地形降水也能导致湿雪危害的增加^[14]。如 Yorks Moors 的北部是一个靠近英国北海海岸海拔相对较高的地区,由于其特殊的地理位置使得这个地区经常遭受雪害^[36]。坡地也是影响雪害的一个因素。据报道陡坡的雪害要多一些,但这是由于无风的条件下积雪过多还是由于在这些地形条件下树木形成不对称树冠目前尚不清楚^[1]。不同的地方发生雪害的坡向也不同,如在芬兰的南部地区东坡易发生雪害,北部地区西坡易发生雪害,而瑞典北部的雪灾多发生在东南坡上^[14]。根据 Rottmann^[1]研究表明,雪害发生在欧洲中部的所有坡地上,但北坡、东北坡和东坡(有时甚至是南坡)容易发生雪害。

特别是迎风坡上的林分更容易遭受雪灾。然而,Cremer 等^[43]指出,沟谷地和背风坡处的雪害比暴露地的雪害严重^[44]。这些相互矛盾的研究结果反映了在不同地区引发雪灾的天气条件可能是不同的。降雪量和由降雪引起的雪害与海拔高度也有关,海拔越高遭受雪害的危险越大^[17~19]。这是由于在高海拔地区不仅树冠上的积雪量多而且林木积雪持续的时间也长。但不同地区发生严重湿雪危害的海拔高度也不同,这反映了各地区林分适应雪荷载的能力是有差异的^[1]。

地形条件虽然是人为因素无法改变的,但某一地区不同地形条件下的林分结构可通过造林和林业经营管理来实现。因此,根据地形与风/雪破坏强度的关系因地制宜地进行林分管理是非常有必要的。如,在山区风口处、山峰顶部、山脊和峡谷等风/雪害易发生的地方应避免皆伐,并以择伐更新为宜;同时还要进行早行疏伐但疏伐的程度宜弱,在抚育采伐时强度也不能太大;另外要营造混交林,避免纯林,并选择抗性强的树种造林。对于风速较大的皆伐地边缘和海岸应建立适当的防护林体系^[18]。

2.2.2 土壤条件 林地的土壤影响着根系的结构和分布^[42,45],因此不同土壤类型下生长的林木抵抗风/雪灾害的能力也不同。Oliver 等^[46]研究指出欧洲赤松抵抗掘根的能力以生长在砂土(sandy soil)中的为最小,棕壤土(well-drained soil)次之,泥炭土(peaty gley soil)最大。Moore^[47]对生长在新西兰的 6 种土壤类型下的辐射松(*Pinus radiata*)研究表明,生长在北部黄褐土(yellow-brown earths)和南部黄灰土(yellow-grey earths)的辐射松其最大抵抗弯曲力矩要大于生长在黄褐浮石土(yellow-brown pumice soil earths)的辐射松。当掘根发生在矿质土壤中时根土盘抵抗能力较大,也就是说,根系进入矿质土壤中的深度较大,因此树木的稳定性也高^[48]。另外,生长在不同的土壤厚度和土壤含水量下的林木抵抗灾害的能力是不同的。土层薄、湿度高的土壤比干旱的地方容易遭到破坏^[41]。一般来说在湿地中生长旺盛的林分内主要的破坏类型是掘根,在干旱土壤中大部分的受灾林木是干折^[16,18,49,50]。在新西兰的南部遭到风灾最普遍的类型是掘根^[51],其原因就是这里的淤积土的下面是坚固的砂砾,决定了根系的扎根深度被限制在 0.3~0.4m 土壤中,根系在这样的范围内容易产生由风引起的掘根损伤^[45]。

2.3 树种和林木、林分特征

树冠特性和尖削度(胸径/树高)是影响树木抵抗风/雪灾害的主要因素^[15,52]。树种和林木、林分特征,影响着树木形态的发展和树木对风/雪灾害的敏感性。

2.3.1 树种 树种极大地影响树冠特征和茎干强度(木材强度),树冠浓密且庞大的浅根性树种易受风倒之害。主根发达,木材坚硬或深根性树种,一般不易掘根或干折。如 Peltola 等^[25]通过对欧洲赤松、挪威云杉和桦树的拖拽试验表明,抵抗掘根能力的大小依次为欧洲赤松、桦树、挪威云杉;抵抗干折的能力大小依次为桦树、欧洲赤松、挪威云杉。一般情况下,阔叶树比针叶树具有较强的抗风性^[18,25,49]。这可能是由于在大风吹袭树木时,针叶树是树冠、树干整体摇动的,而阔叶树则树冠随风易于变形,并且枝条摇摆是很不一致的。所以针叶树和阔叶树在抗风性能方面的差异,可能是和这种接受风压的方式不同有关^[32]。并且针叶树要比阔叶树对雪害的敏感性也高。例如在北欧研究发现主要由针叶树组成的林分比主要由桦树组成的林分受雪灾的损伤大,当然在一定条件下桦树也可被严重的损伤^[1]。尽管挪威云杉可供降雪积累的表面积大,但它仍比欧洲赤松抗雪灾的能力强,这可能是由于积雪重量被平均分配,降低了重心高度,再有就是挪威云杉的树冠比欧洲赤松更匀称舒展。树干稳定性的不同也可能是由于不同树种枝条的承重能力和树枝特性的不同。在芬兰北部的高海拔地区,欧洲赤松几乎每年都遭受雪灾,这就降低了欧洲赤松与挪威云杉的比例,因此芬兰北部高坡地上主要由树龄不等的挪威云杉林分构成了森林的上限^[1]。

尽管不同树种存在明显的机械强度差异,但树种间的稳定性差异还是很难判别,因为林木抗风/雪灾害的能力要受许多因素的影响。

2.3.2 林木和林分特征 从总体上来看,树冠的大小和形状是很重要的,树冠宽大的林木比树冠狭窄的林木抗风/雪灾能力弱,这是由于狭窄的树冠水平扩散面积小,极大地减少了受风的面积和降雪积累的表面积^[25,52~54]。例如在雪害高发的地区,天然挪威云杉的树型通常狭窄,因此抵抗灾害的能力要强。不同的树冠类型疏雪效果不同,一般来说枝条向下伸展并且树冠狭窄的针叶林(如挪威云杉)比枝条水平伸展且树冠宽大的林木(如欧洲赤松)抗雪灾的能力要大^[1]。另外,树冠较低的林木由于其承受风/雪压的重心较低,使得林木抗茎折的能力增强^[55]。树冠不均匀的林木对雪害最敏感,这是因为树冠上的雪荷载对树干造成了不平衡的压力。

除树冠特性外,尖削度(胸径/树高)也是影响林木遭受风/雪灾害的重要因素。尖削度小的林木易发生由风/雪压引起的茎干断裂^[15]。很多研究已证明尖削度小于 1:90 或 1:100 的林木特别容易遭受雪灾^[15,23]。雪灾的发生也受不同的树龄、树种的影响。茎干笔直、高大、树冠柔韧和尖削度大的林木比茎干倾斜、弯曲、树冠较短的林木抗断裂的能力强^[6,15,23,27]。据 Peltola^[24]对林分边缘单一的欧洲赤松研究表明,当树高增加时,掘根和干折所需的临界风速减小,特别是具有较小尖削度的林木更容易遭到风害。一般情况下,当树高超过 12m 时风害随树高的增加而增加^[1,24,53]。当然,如果风速达到一定程度时,所有的树都会遭到破坏,但是高度超过 12m 的树木所受危害最大。但风灾并不是随树木一生高度的增加而一直在增加。如,据 Cremer 等^[56]对高度为 30~45m 的辐射松研究表明,风灾不随树高的增加而增加。这一方面的原因可能是当林木成熟时,树木高生长比直径生长衰退的快;另一方面可能是随树龄的增加木材的强度也增加了。在目前的研究中发现树木直径增加将明显的减少风害,并且认

为尖削度可能是影响树木抗风能力最重要的因子之一^[25~27,57]。

林分特征,尤其是林分密度明显地影响着树木形态结构的发展,在密度较大的林分中生长的树木由于其尖削度小,容易遭到风/雪灾害的破坏^[27]。不同的林分内其风速大小也不同,郁闭的林分内风速较小,林木稳定;而刚经过采伐的林分由于风能够穿透更深,进入树的冠层,增加了树的风荷载,林木的稳定性较差^[58]。例如,皆伐地边缘的林木和采伐迹地保留的母树最容易遭受风害^[18,24,59]。据 Petola^[60]对面积不同皆伐地边缘欧洲赤松林内的风速研究表明,皆伐地的面积越大,风穿透林分边缘的能力越强,受灾的危险越高。此外,作为自然选择的结果,天然林的抗风/雪害能力要比人工林强。然而,也有相反的研究指出,在人造林中,由于树木有一致的空间分布和均衡的冠层,所以在林分遭受严重破坏的情况下,人工林受到的破坏很小。通常情况下,针阔混交林抵抗风/雪灾害的能力比针叶纯林强^[31,55]。

3 防御风/雪灾害的管理措施

在森林管理的各个阶段,管理者所实施的决策不同导致森林受到风/雪灾害的程度也不同。虽然某一阶段的管理行为得不到最大的利益,但可以权衡各阶段而采取不同的决策以获得最高的总体利益^[61]。

3.1 造林

3.1.1 造林方式的选择 天然更新能减小风/雪灾害的发生^[55],然而也有研究指出,在已遭到严重破坏的林分中,人工林仅受到较小的损失,这是因为在人造林中树木有一致的空间分布和均衡的冠层^[62]。如果要进行人工造林,树木占有的空间(密度)和分布方式是很重要的因素。例如,Petola^[1]表明通过播种更新的幼林中,条播比撒播的受害危险明显增加。不适当的容器育苗和由于耕作或其它阻碍使根系受到限制的条件下产生的林分都容易遭到危害^[61,63]。在通过移栽更新的林分中,裸根移栽的林分将是一个高危险的林分,因为这种移栽方式会影响树木的生长。因此,为了尽可能的减少风/雪灾害对树木造成的危害,造林方式的选择是很重要的。

3.1.2 树种和产地的选择 在人工林中,使用本地或相似地区种子资源是非常重要的。从较热,近海或低海拔地区运来的种子更易遭受雪害的影响^[19]。例如,在英国来自沿海大树冠的黑松(*Pinus nigra* var. *austriaca*)比内陆小树冠的黑松遭受雪害的危险要高^[64]。虽然在风/雪危害较重的地区最好种植抗性强的树种^[1],但在没有试验的情况下不能确定哪些树种更加合适,过分地依靠观测证据有可能是错误的。在欧洲中部条件下,Rotmann^[1]建议用花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)或落叶树种代替挪威云杉和欧洲赤松,因为前两者被认为对雪害更有抗性,然而,这两种树种能否在目前被欧洲赤松和挪威云杉占领的高危险地区存活和生长,现在还不十分清楚。此外,营造混交林,避免大面积纯林或延续自然演替也能抵御一定的风/雪灾害^[65~69]。

3.1.3 初植密度的选择 因为尖削度随密度增加而减小,如果种植的密度增加,那么风/雪灾害发生的危险性要高^[16,23,27,43]。Johann^[70]指出大部分雪害发生在高密度林分中(如 6900 株·hm⁻²)。在海拔较高的高危地区,人工造林时减小种植密度被认为是最有效的策略^[56],这种策略所带来的收益能超过由于密度减小而导致树高与直径比率减小而带来的不利经济影响^[70]。

3.2 幼苗林分的管理和施肥

3.2.1 幼苗林分的管理 开阔的空间可以刺激树干直径的生长以提高保护能力和减少风/雪灾害的损坏。对于高密度、郁闭但没有间伐的低龄林,由于其树木整体趋于细弱,因此最易遭受风/雪灾害。因此,对密度较大的幼林^[16],早期进行间伐,减小林分密度,促进根系和树干的生长是非常重要的。尤其是那些通过播种进行更新的林分^[56],如果能够较早地、有效地对林分进行管理或间伐,在树干达到遭受风/雪灾害的临界高度前,树干和根系已经足够稳定^[23,27,56],这样就可以减少因灾害而带来的损失。

3.2.2 施肥 施肥后的最初几年内树木比较容易遭受危害^[56],这一方面是因为肥料(例如氮肥)先促进上部冠层的扩展,几年后下部树干才开始增长^[17],即树冠的生长比树干和根系直径的生长增加更多^[17,56],从而导致树冠承载风/雪面积的增加^[28];另一方面是在刚施肥的初期,树干的木材产生了低密度的纤维,使其抗性降低^[56],如果这个时候进行间伐处理,则比单独间伐造成更高的危害。根据 Valinger 等^[17]研究结果,在施肥最初几年内进行间伐会延长树对危害的敏感期^[28]。所以,在高危地区应当通过适当的人工管理措施来避免林分的危险性。如根据树木的生长特点合理安排施肥的种类和数量,并调整或改变间伐的时间和收获日程等^[71]。

3.3 间伐

间伐一方面可以促进树木直径的生长,增加根系的重量和强度,同时也能增加树木的尖削度(胸径/树高),因此能够减少风/雪的危害^[16,43]。另一方面,由于间伐引起的林分内树木之间空隙的增加,在间伐最初的几年内减小了林分的稳定性,容易引起风害。这是因为当间伐产生空隙后风能够从林冠上部进入林冠层,由此增加了间伐后树木的风荷载^[56,72]。据王宝林等^[73]和宋采福等^[74]对间伐后出现风害的云杉(*Taxus cuspidata*)林分分析表明,大幅度的采伐是造成风害的主要原因,并提出在采伐时要以实际情况选择采伐量。因此,选择适当的间伐时期、间伐方式和间伐量是关键^[24]。

3.3.1 间伐时期 未间伐林分中的树木通常容易遭到风/雪灾害^[56]。这是因为随着树木的生长,林分中树的生长空间受到限制,树木高生长和直径生长产生竞争。一旦竞争开始,与高生长相比的树木直径生长明显受到抑制。尤其是在高密度的林分中随

着树龄的增加竞争更强烈,使得树木的尖削度(胸径/树高)明显降低,林分变得脆弱,容易遭到风/雪灾害。因此为了促进尖削度(胸径/树高)的发展而减少风/雪灾害,应当及早进行间伐^[56]。据 Johann^[70]表明,第1次间伐应在平均树高10m或低于10m时进行。如果树苗生长的初始密度较小时,第1次间伐的时间可推迟到平均树高达到15m时再进行^[1]。但是,当树高超过20m时,树高和胸径的比值相对趋于稳定,间伐对促进尖削度增加的作用很小。如果这个时候进行间伐反而会增加风穿透林分的能力,使林木容易遭到风灾^[56]。

3.3.2 间伐方式 下层间伐(如下层择伐)能降低风/雪灾害的危险,这是因为细弱和较小的树被清理的缘故;而在上层间伐(如上层择伐)时优势木被移走,使得留下的细弱林木更容易遭受灾害。在挪威云杉和欧洲赤松林分中,与未间伐的林分相比,重度间伐的林分似乎更易遭受风/雪灾害^[28]。一般情况下,未间伐和上层间伐的林分比下层间伐的林分易受害。经过系统间伐的林分(如按行和列间伐)也比低层间伐的林分容易遭受风/雪的危害^[1]。Zhu 等对海岸林间伐试验研究表明,块状间伐方式可以降低风害的发生^[75]。而也有研究^[76]表明,在间伐时进行块状保留的方式要比分散保留更具抵抗风灾能力,这是因为保留地块的位置可避开那些具有潜在的高危险的地点。Burton^[77]指出间伐时块状保留地应呈现椭圆形(而不是圆形),且其长轴沿信风方向,这样遭受风害的危险最小。

3.3.3 间伐量 许多研究表明,间伐较重的林分和优势木被移走的林分容易遭到风/雪害,尤其在间伐较重的高密度林分^[1]。Cremer 指出在低龄时采取轻度的、经常性的间伐能明显减少风/雪害的发生^[56]。通常情况下,抵抗风/雪灾害能力最大的林分是经过下层轻度间伐的林分(间伐了基本面积的25%),其次是不间伐的林分,最容易遭受灾害的是重度间伐的林分^[28]。

4 森林风/雪灾害危险评估

在这些研究的基础上,许多学者提出了相应减少森林风/雪灾害的危险评估模型。Blackburn 等^[78]和 Galinski^[79]结合树干弯曲理论和风速分布模型提出一个评估风破坏危险性的实际方法;Valinger 等^[52]在对受害地各树木物理特征调查的基础上采用判别分析和逻辑斯蒂分析的方法对受害级别进行了预测;Sawada^[80]建立了一个模拟风压在树冠的垂直方向和水平方向分配的模型,经过 Nakatani 等^[81]的验证后,在日本得到了广泛的应用^[22];Poltola^[2,24,27,60,82]为了研究芬兰平原森林边界的风害情况,以机械假说为基础对林分边缘单株树木进行了试验,并发展了预测林木遭受风/雪危害的临界风速和雪深,在实地应用中取得了很好的结果;Zhu 等在研究不同间伐方式下风对日本黑松(*Pinus thunbergii*)林破坏的基础上表明,根据平均树高和胸径计算的风破坏系数或风与林分结构剖面相结合得到的风破坏系数都能准确地预测林分中的风破坏^[83,84];WINDA 是一个模型系统,是为评估一地形水平下,不同林分的年大风损伤而建立的,它是树木机械动力模型 HWIND^[82]、气流模型 WASP^[85]及预测零平面位移和表面粗糙度模型的一个组合,它对于在造林处理、森林干扰和天气改变条件下评价林分遭受风害的可能性十分有用^[86];在英国由 Gardiner 等^[87]通过大量树木的拉倒试验而建立的可以长时期的评估风对林木的干扰 FOREOLE 模型等。在这些模型中既有单因子评价模型又有综合因子评价模型,但都是针对人工林来研究的,再加上不同地区的地形和天气条件复杂多变、林地内可供利用的风/雪资料缺乏等因素,使得现有评估模型的预测结果与实际情况有一定的差距,并且不具有普适性。

5 总结与展望

森林的风/雪灾害的发生强烈依赖于气象条件、地形、树木和林分特征各因子间的相互作用。气象条件和地形条件是人为因素无法改变的,但对于树木和林分特征却可以通过管理方法和造林措施进行人为控制。例如作为树抵抗风/雪荷载特征量的尖削度和树冠更多地依赖于造林制度、造林方式、树种、起源地、林地条件、种植密度、管理措施和间伐模式的选择等。Valinger 等^[52]在模拟间伐的基础上指出,如果高危险的树木被清除,雪害的危险能减少40%。所以要想得到一个具有较大尖削度的林分,采取合适的管理措施就显得至关重要。但估算不同因子的相对重要性是非常困难的,甚至会导致相矛盾的结果。因此,在减小风/雪危害和增加林地生产潜力间要想获得一个适当平衡的管理措施是非常困难的。有鉴于此,根据对林分遭受风/雪灾后的研究结果确定在特定的地理位置种植什么样的树种和采用什么样的管理措施才能使遭受风/雪灾害的林分的损失达到最小就成为科研人员和管理人员梦寐以求的目标。

森林的风/雪灾害不仅给林业主带来重大的经济损失,同时也对森林生态系统造成了极大的破坏。受全球气候变化的影响,近年来森林风/雪灾害发生的强度和频率也有明显的上升趋势^[10~13,88]。因此,为了减少风/雪灾害带来的损失,了解风/雪灾害危险评估和森林管理间的关系是非常重要的。不同地区各种类型的风/雪灾害出现的概率变化与实施降低风/雪破坏的具体管理措施相结合是目前的研究难点。因为这不仅要考虑到风/雪荷载对不同树木破坏的机械作用原理,还要了解生长在不同地形条件下树木抵抗力的差别,以及不同地区风/雪灾害出现的概率和危害程度。尽管在许多的研究中都进行了定性和定量的危险评估模拟^[39],但是由于在林地内缺乏详细的风/雪资料,再加上复杂地形的影响使得风/雪灾害发生的危险评估受到多种因素的限制,已有的危险评估模式普适性很差^[10]。因此对于综合性的危险概率评估模型的研究将有待于进一步深入,以提高其预测的准确率。

就国内外的研究来看,国外的研究较多,且大都集中在人工林,对天然林的研究很少。而国内这方面的研究非常少,并且已

有的报道也大多是对灾后的情况做简单的调查分析,到目前为止还没有更深入的研究报道出现。另外,无论是国外还是国内对受灾前后林地内不同生态效应研究的报道很少。然而,森林风/雪灾害作为森林生态系统中普遍存在的自然现象,不论其发生在人工林中还是天然林中都会对森林生态系统的健康、安全和稳定起到很大的影响,同时也能引起森林生态系统的改变。因此,在以往研究的基础上,应当展开对风/雪灾害前后的森林生态系统的气象条件、养分循环、水分循环、生物多样性变化、主要树种的生理生态和更新、演替过程等的研究,这对于预测林分未来的更新演替,合理调控和保护好现有的森林资源和指导林区的经营管理具有重要的意义。

References:

- [1] Nykänen M L, Peltola H, Quine C, *et al.* Factors affecting snow damage of tree with particular reference to European conditions. *Silva Fennica*, 1997, **31**(2): 193~213.
- [2] Peltola H, Kellomäki S and Väisänen H. Model computations on the impacts of climatic change on soil frost with implications for windthrow risk of trees. *Climate Change*, 1997b, **41**: 17~36.
- [3] Borchert H, Mößang M and Guglhör W. Development of forest regeneration in Bavaria after the storm damages in 1990. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, *et al.* eds. *Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees*. Published by Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, Germany, 2003. 117~124.
- [4] Lavnyy V, Lässig R. Extent of storms in the Ukrainian Carpathians. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, *et al.* eds. *Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees*. Published by Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, Germany, 2003. 341~348.
- [5] Vlinger E, Fridman J. Modelling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics. *Forest Ecology and Management*, 1997, **135**: 303~313.
- [6] Kato A, Nakatani H. An approach for estimating resistance of Japanese cedar to snow accretion damage. *Forest Ecology and Management*, 2000, **135**: 83~96.
- [7] Hou X Y, Han J X. Regeneration and restoration of Korean pine broadleaf mixed forest in windfall area. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, **32**(5): 420~425.
- [8] Hou X Y, Han J X. The restoration and protection of the wind disaster-interfered area on the western slopes of the changbal mountains. *Journal of Natural Resources*, 1997, **12**(1): 29~34.
- [9] Hou Y Z. Review on forest conservation: Questions and tendency. *World Forest Research*, 1992, **5**(1): 1~6.
- [10] Brunet Y, Fourcaud T, Achim A, *et al.* The venfor project: wind and forest interactions from the tree scale to the landscape scale. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, *et al.* eds. *Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees*. Published by Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, Germany, 2003. 3~8.
- [11] Emanuel K A. The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature*, 1987, **326**: 483~485.
- [12] Everham E M. A comparison of methods for quantifying catastrophic wind damage to forests. In: Coutts M P and Grace J. ed. *Wind and trees*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 340~357.
- [13] Gray W M. Strong association between West African rainfall and US landfall of intense hurricanes. *Science*, 1990, **249**: 1251~1256.
- [14] Solantie R. Effect of weather and climatological background on snow damage of forests in southern Finland in November 1991. *Silva Fennica*, 1994, **28**(3): 203~211.
- [15] Petty J A, Worrell R. Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow. *Forestry*, 1981, **54**(2): 115~128.
- [16] Slodický M. Thinning regime in stands of Norway spruce subjected to snow and wind damage. In: Coutts M P and Grace J, eds. *Wind and trees*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 436~557.
- [17] Valinger E, Lundqvist L. The influence of thinning and nitrogen fertilization on the frequency of snow and wind induced stand damage in forests. *Scottish Forestry*, 1992b, **46**: 311~320.
- [18] He Q T. *Forest Meteorology of China*. Beijing: China Forestry Press, 2001. 62~69, 403~415.
- [19] Megahan W F, Steele R. An approach for predicting snow damage to ponderosa pine plantations. *Forest Science*, 1987, **33**(2): 485~503.
- [20] Kohnle U, Gauckler S. Vulnerability of Forests to storm damage in a forest district of south-western Germany situated in the periphery of the 1999 storm (Lothar). In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, *et al.* eds. *Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees*. Published by Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, Germany, 2003. 151~157.
- [21] Rodgers M, Casey A, Mcmenamin C, *et al.* An experimental investigation of the effects of dynamic loading on coniferous trees planted on

- wet mineral soils. In: Coutts M P, Grace J, eds. *Wind and trees*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 379~403.
- [22] Chiba Y. Modelling stem breakage caused by tyhoons in plantation *Cryptomeria japonica* forests. *Forest Ecology and Management*, 2000, **135**:123~131.
- [23] Päätaalo M L, Peltola H, Kellomäki S. Modelling the risk of snow damage to forests under short-term snow loading. *Forest Ecology and Management*, 1999, **116**: 51~70.
- [24] Peltola H and Kellomäki S. A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fennica*, 1993, **27**(2): 99~111.
- [25] Peltola H, Kellomäki S and Hassinen A. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management*, 2000, **135**: 143~153.
- [26] Petty J A, Swain C. Factors influencing stem break-age of conifers in high winds. *Forestry*, 1985, **58**(1): 75~85.
- [27] Peltola H, Nykänen M L and Kellomäki S. Model computations on the critical combination of snow loading and windspeed for snow damage of Scots pine, Norway spruce and birch sp. at stand edge. *Forest Ecology and Management*, 1997a, **95**: 229~241.
- [28] Valinger E, Lundqvist L and Brandel G. Wind and snow damage in a thinning and fertilization experiment in *Pinus sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1994, **9**: 129~134.
- [29] Schroeder L M, Eidmann H H. Attacks of bark and wood-boring Coleoptera on snow-broken conifers over a two-year period. *Scandinavian Journal of Forestry*, 1993, **69**(12): 857~860.
- [30] Gardiner B A, Stacey G R, Belcher R E, *et al.* Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. *Forestry*, 1997, **70**(3): 233~252.
- [31] Hou Q A, specially meteorological calamity in forest——humid snow. *Forest meteorology thesis collection*. Beijing: Meteorology Press, 1984. 68~71.
- [32] Solantie R, Ahti K. The influence of weather in the snow damage for forests of South-Finland in 1959. *Silva Fennica*, 1980, **14**(4):342~353.
- [33] Cannell M G R, Morgan J. Branch breakage under snow and ice loads. *Tree Physiology*, 1989, **5**: 307~317.
- [34] Worrell R. Snow damages to the stems of coniferous trees. *Unpublished Honours Degree Thesis. Forestry Department, University of Aberdeen*, 1979, 132.
- [35] Schmidt R A, Pomeroy J W. Bending of a conifer branch at subfreezing temperatures: implications for snow interception. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, **20**(8): 1250~1253.
- [36] Wright J A, Quine C P. The use of a Geographical Information System to investigate storm damage to trees at Wykeham Forest, North Yorkshire. *Scottish Forestry*, 1993, **47**(4): 166~174.
- [37] Guild D W. Snow damage in Otago and Southland. New Zealand. *Journal of Forestry*, 1986, **31**(2): 9~14.
- [38] Gardiner B A, Suárez E and Quine C P. Development of a GIS based wind risk system for british forestry. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, *et al.* eds. *Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees*. Published by Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, Germany, 2003. 145~150.
- [39] Quine C P. Assessing the risk of wind damage to forests: practice and pitfalls. In: Coutts M P and Grace J. eds. *Wind and trees*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 379~403.
- [40] Schmoeckel J, Kottmeier C J, Aldinger E, *et al.* Windstorm LOTHAR: Orographic influences on storm damage in the black forest. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, *et al.* eds. *Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees*. Published by Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, Germany, 2003. 15 ~ 21.
- [41] Li X F, Zhu J J, Wang Q L, *et al.* Snow/wind induced damage in natural secondary forests in Liaodong mountainous regions, Liaoning Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(6): 941~946.
- [42] Somerville A. Wind damage to New Zealand State plantation forests. In: Coutts M P, Grace J. eds. *Wind and trees*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 460~467.
- [43] Cremer K W, Carter P R, Minko G. Snow damage in Australian pine plantations. *Australian Forestry*, 1983, **46**(1): 53~66.
- [44] Cremer K W. Snow damage in Eucalypt forests. *Australian Forestry*, 1983, **46**(1): 48~52.
- [45] Watson A. 2000. Wind-induced forces in the near-surface lateral roots of radiata pine. *Forest Ecology and Management*, 1983, **135**:133~142.
- [46] Oliver H R, Mayhead G J. Wind measurements in a pine forest during a destructive gale. *Foresry*, 1974, **47**: 185~195.
- [47] Moore J R. Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* tree grown on a range of soil types. *Forest Ecology and Management*, 2000, **135**: 63 ~71.
- [48] Coutts M P. Components of tree stability. *Plant Soil*, 1986,**71**: 171~188.

- [49] Lin X Z, Zhang T B and Wang Y H. Countermeasures raising wind resistance of street trees. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1999, **16**(2):175~179.
- [50] Pavlík M, Pavlík Š. Gale disasters in slovakia; Consequences and management implications. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, *et al.* eds. *Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees*. Published by Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, Germany, 2003. 183~188.
- [51] Papesch A J G, Moore J R and Hawke A E. Mechanical stability of pinus radiata trees at Eyrewell Forest investigated using static tests. *New Zealand Journal Forest Science*, 1997, **27**(2): 188~204.
- [52] Valinger E, Lundqvist L and Bondesson L. Assessing the risk of snow and wind damage from tree physical characteristics. *Forestry*, 1993, **66**(3): 249~260.
- [53] Chen S Y, Yang X H and Du C Z. Investigation and analysis on the yard tree's characteristic of resilience to wind. *Protection Forest Science and Technology*, 1999, **4** (41): 32~35.
- [54] Li G Q, An S Q. The bending stress analysis of 4 species of woods caused by wind pressure in coastal shelter forest. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1999, **23** (4): 76 ~ 80.
- [55] Lu D H. *Meteorology and Forest Meteorology*. China Forestry Press, 1994. 120~124.
- [56] Cremer K W, Borough C J. Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *New Zealand of Forestry Science*, 1982, **12** (2): 244~268.
- [57] Ancelin P, Courband B and Fourcaud T. A population approach to study forest stand stability to wind; individual tree-based mechanical modeling. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, *et al.* eds. *Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees*. Published by Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, Germany, 2003. 239~246.
- [58] Peltola H, Kellomäi S, Hassinen A, *et al.* Swaying of trees as caused by wind; analysis of field measurements. *Silva Fennica*, 1993, **27** (2): 113~126.
- [59] Achim A, Nicoll B, Mochan S, *et al.* Wind stability of trees on slopes. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, *et al.* eds. *Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees*. Published by Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, Germany, 2003. 231~237.
- [60] Peltola H. Model computations on wind flow and turning moment by wind for Scots pines along the margins of clear-cut areas. *Forest Ecology and Management*, 1996, **83** : 203~215.
- [61] Quine C P, Coutts M P, Gardiner B A, *et al.* Forests and wind; management to minimize damage. *Forestry Commission Bulletin*, 1995, 114.
- [62] Williston H L. Managing pines in the ice-storm belt. *Journal of Forestry*, 1974, **72** (9): 580~582.
- [63] Quine C P, Burnand A C and Coutts M P. Effects of mounds and stumps on the root architecture of Skitka spruce on a peaty gley restocking site. *Forestry*, 1991, **64** : 385~401.
- [64] Lines R. Experiments on lodge pole pine seed origins in Britain. In: *Forestry Commission Technical*. Forestry Commission, Edinburgh, 1996. 10.
- [65] Gao J, Zhang S Y, Fu M F, *et al.* The physioecological characteristics of some important silvicultural species growing in the dry-hot river valley. *Journal of Southwest Forestry College*, 1997, **17**(2):30~35.
- [66] Liao J L. A study on the cultivation test of eucalyptus grandis, eucalyptus urophylla and acacia mangium in pure and mixed forests. *Journal of South China Normal University*, 2000, **4** : 70~73.
- [67] Lin W X. Effect on the crop and the main afforestation tree species of typhoon in Minnan seaside. *Protection Forest Science and Technology*, 1999, (2): 16~18.
- [68] Wang D X. Effects and Planting Techniques of Cunninghamia lanceolata and Michelia macclurei Mixed Forest. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 1998, **25** (4): 78~80.
- [69] Wang C X, Sun C S, Li G H. Investigation report on a mixed forest of Pinus thunbergii and Platycladus orientalis. *Shandong Forestry And Technology*, 1996, **6** :16~20.
- [70] Johann K, Nicht Schnee. sondern falsche Bestandsbehandlung versacht Katastrophen. *Allgemeine Forstzeitung*, 1981, **92** : 163~171.
- [71] Hirvelä H, Hynynen J. Effect of fertilization on the growth, top damage and susceptibility to windthrow of Scots pine stands in Lapland. *Folia Forestalia*, 1990, **764** : 16.
- [72] Zhu J J, Li F Q, Matsuzaki T, *et al.* Effects of thinning on wind damage in Pinus thunbergii plantation—Based on theoretical derivation of risk-ratios for assessing wind damage. *Journal of Forestry Research*, 2003, **14** :1~8.
- [73] Wang B l, Wang Z, Zhang C J, *et al.* Discussion on the intensity of reasonable selection of spruce-fir stand. *Forest Investigation Design*, 1999, **2** : 43~44.

- [74] Song C F, Tu J X, Li R L, *et al.* Primary analysis on phenomenon of windfall and perishing after thinning *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountain. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2001, **26** (1): 34~39.
- [75] Zhu J J, Matsuzaki T, Li F Q, *et al.* Theoretical derivation of risk-ratios for assessing wind damage in a coastal forest. *Journal of Forestry Research*, 2002, **13** (4): 309~315.
- [76] Moore J R, Mitchell S J and Maguire D A. Wind damage in alternative silvicultural systems; review and synthesis of previous studies. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, *et al.* eds. *Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees*. Published by Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, Germany, 2003. 191~198.
- [77] Burton P. Windthrow patches on cut block edges and retention patches in the SBSmc. In: Mitchell S J, Rodney J and Richmond B C. *Winthrow Assessment and Management in British Columbia: Proceedings of the Windthrow Researchers' Workshop*, 2001. 19~31.
- [78] Blackburn P, Petty J A. Theoretical calculations of the influence of spacing on stand stability. *Forestry*, 1988b, **61** : 29~43.
- [79] Galinski W. A windthrow-risk estimation for coniferous trees. *Forestry*, 1989, **61** : 139~146.
- [80] Sawada M. Transformation of tree trunk caused by wind and snow load. Research Material Hokkaido Branch. *Forestry and Forest Products Research Institute*, 1983, **128** : 18.
- [81] Nakatani H, Kato A, Taira H, *et al.* Deflection and resistance of tree stems subjected to snowloads in sugi stands. *Mokuzai Gakkaishi*, 1984, **30** : 886~893.
- [82] Peltola H, Kellomäki S, Väisänen H, *et al.* A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, **29** : 647~661.
- [83] Zhu J J, Matsuzaki T, Li F Q, *et al.* Assessment of effects of thinning on wind damage in *Pinus thunbergii* plantations. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, *et al.* eds. *Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees*. Published by Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, Germany, 2003. 295~303.
- [84] Zhu J J, Gonda Y, Matsuzaki T, *et al.* Modeling relative wind speed by optical stratification porosity within canopy of a coastal protective forest with different stem densities. *Silva Fennica*, 2003, **37** : 189~204.
- [85] Mortensen N G, Landberg L, Troen I, *et al.* *Wind atlas analysis and application program (WASP)*. Ris (National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1998.
- [86] Blennow K, Olofsson E and Olasallnäs A O. Evaluating wind—A tool for assessing the probability of wind damage to forest stands. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, *et al.* eds. *Proceedings of the International Conference of Wind Effects on Trees*. Published by Lab Building, Environment Aerodynamics, Institute of Hydrology, University of Karlsruhe, Germany, 2003. 137~144.
- [87] Gardner B A, Peltola H and Kellomäki S. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling*, 2000, **129**: 1~23.
- [88] Carter T, Posch M and Tuomenvirta H. Silmuscen and Glingen user's guide. Guidelines for the construction of climatic scenarios and use of stochastic weather generator in the Finnish. *Research Programme on Climate Change*, 1995. 62.

参考文献:

- [7] 侯向阳, 韩进轩. 长白山红松阔叶混交林风灾迹地的更新与恢复. *林业科学*, 1996, **22** (5): 419~425.
- [8] 侯向阳, 韩进轩. 长白山西坡风灾干扰区的恢复和保护. *自然资源学报*, 1997, **12** (1): 29~34.
- [9] 侯元兆. 全球森林保护的问题及趋势. *世界林业研究*, 1992, **1** : 1~6.
- [18] 贺庆棠. 中国森林气象学. 北京: 中国林业出版社, 2001. 62~69, 403~413.
- [31] 侯箕, 等. 森林的一种特殊气象灾害——湿雪. *森林气象论文集*. 北京: 气象出版社, 1984. 68~71.
- [41] 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等. 辽东山区天然次生林雪/风灾害成因及分析. *应用生态学报*, 2004, **15** (6): 941~946.
- [49] 林夏珍, 张铁标, 王永华. 行道树抗风倒对策的研究. *浙江林学院学报*, 1999, **16** (2): 175~179.
- [53] 陈士银, 杨新华, 杜盛珍. 庭院绿化树种抗风性能的调查与分析. *防护林科技*, 1999, **4** (41): 32~35.
- [54] 李国旗, 安树青. 海岸带防护林4种树木的风压应力分析. *南京林业大学学报*, 1999, **23** (4): 76~80.
- [55] 陆鼎煌. 气象学与森林气象学. 北京: 中国林业出版社, 1994. 120~124.
- [65] 高洁, 张尚云, 傅美芬, 等. 干热河谷主要造林树种旱性结构的初步研究. *西南林学院学报*, 1997, **17** (2): 59~63.
- [66] 廖建良. 巨尾桉和马占相思纯林、混交林造林的试验研究. *华南师范大学学报*, 2000, **4** : 70~73.
- [67] 林武星. 台风对闽南沿海主要造林树种及农作物的影响. *防护林科技*, 1999, **2** : 16~18.
- [68] 王道兴. 杉木、火力楠混交林效益与营造技术. *福建林业科技*, 1998, **25** (4): 78~80.
- [69] 王宗喜, 孙承善, 李观和. 黑松侧柏混交林调查报告. *山东林业科技*, 1996, **6** : 16~20.
- [73] 王宝林, 王镇, 张从景, 等. 论云冷杉林分的合理择伐强度. *林业勘察设计*, 1999, **2** : 43~44.
- [74] 宋采福, 土建雄, 李润林, 等. 祁连山青海云杉林间伐后出现风倒、枯死现象的初步分析. *甘肃林业科技*, 2001, **26** (1): 34~39.