

# 缙云山常绿阔叶林雪灾受损特征及影响因素

李笑寒, 黄力, 杨圣贺, 杨超, 钱深华, 赵亮, 杨永川\*

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** [目的] 探讨西南地区亚热带常绿阔叶林在雪灾中的受损程度和特征, 并分析其主要影响因素, 为森林保护和管理提供科学参考。 [方法] 2016年1月23日雪灾后, 在缙云山的常绿阔叶林、马尾松林和杉木林中分别设置调查样方, 将样方中所有树木分为七个受损等级, 确定样方内所有树高 $\geq 5$  m个体在雪灾中的受损等级, 并记录受损树木的胸径和所处地形的坡度, 利用 Pearson 相关分析, 分析胸径大小、坡度与树木受损之间的关系; 计算不同森林类型受损指数, 并利用单因素方差分析判断不同森林类型受损指数之间的差异。 [结果] 共调查了树木 1 041 株, 受损树木占 17.96%, 其中轻度受损和重度受损个体占总受损个体比例分别为 57.22% 和 42.78%。树木受损比例随胸径增加而增加; 树木受损类型与胸径之间关系密切, 断枝少个体比例与胸径显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 在轻度损伤中所占比例最高 (55.22%), 与之相反, 倒伏个体比例与胸径显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 在重度损伤中所占比例最高 (42.78%)。树木受损类型与坡度之间也有一定关系。随着坡度的增加, 折断个体的比例逐渐上升, 与坡度显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 另外随着坡度的增加, 断枝多和倒伏个体的比例增加, 树木受损程度加重。不同森林类型之间的受损程度差异显著 ( $P < 0.05$ ), 受损指数结果为桫椤林 > 马尾松林 > 杉木林。 [结论] 缙云山常绿阔叶林在此次雪灾中受到了一定的损害, 胸径、坡度和森林类型是影响树木受损程度和类型的主要因素。小径级树木主要以压弯为主, 中等径级个体主要以折断和倒伏为主, 大径级个体主要以断枝为主。坡度较大的生境中的树木更易在雪灾中受到损害。常绿阔叶林 (桫椤林) 在雪灾中的受损程度相比于常绿次生针叶林 (马尾松林和杉木林) 更大。本研究对亚热带常绿阔叶林在突发自然灾害中的保护和管理能提供一定的参考和指导。

**关键词:** 雪灾导致森林受损; 自然干扰; 常绿阔叶林; 缙云山

中图分类号: S761

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)05-0735-08

## Patterns and Factors Causing Snow-induced Forest Damage in a Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest on Jinyun Mountain

LI Xiao-han, HUANG Li, YANG Sheng-he, YANG Chao, QIAN Shen-hua, ZHAO Liang, YANG Yong-chuan

(Key Lab of Three Gorges Reservoir Region Eco-Environment of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** [Objective] The objectives of this study are to determine quantitatively the levels of snow-induced forest damage in a subtropical evergreen broad-leaved forest on Jinyun Mountain, and to analyze the main factors causing the different levels of damage. [Method] Quadrats were established in different forest stands, including an evergreen broad-leaved forest stand, a *Pinus massoniana* and a *Cunninghamia lanceolata* forest stand on Jinyun Mountain after the snowstorm of January 23rd, 2016. All the trees with height  $\geq 5$  m in the quadrates were divided into 7 levels of damage, and the diameter at breast height (DBH) and slope of each damaged individual were recorded. The relationship between level of damage and DBH size, slope, and forest type, respectively by using Pearson correlation analysis. The differences in the calculated Damage Index among different forest types were analyzed using One-Way ANOVA. [Result] In this study, 1 041 trees were investigated, among which 17.96% were damaged in

收稿日期: 2016-12-26

基金项目: 重庆市研究生科研创新项目 (CYS15014)、桫椤林、木荷林植被志编研 (2015FY210200 - 16)、教育部留学归国人员启动基金。

作者简介: 李笑寒 (1990—), 男, 重庆铜梁人, 硕士研究生, 研究方向为植被生态学。E-mail: 15730269285@163.com.

\* 通讯作者: 博士, 教授, 主要从事生态保育与生物多样性研究。E-mail: yeyang@cqu.edu.cn.

snowstorm. Within the snow-damaged individuals, slightly damaged ones and severely damaged ones accounted for 57.22% and 42.78%, respectively. The proportion of damaged individuals increased with the increasing of *DBH*. The types of tree damage were closely related to the *DBH* sizes: the amount of individuals suffered from slight branch loss had a significant positive correlation with their *DBH* sizes ( $P < 0.01$ ), and slight branch loss was the most common type of damage (accounting for 55.22% of the total individuals) among the slightly damaged individuals. While, the amount of uprooted individuals showed a significant negative correlation with *DBH* ( $P < 0.05$ ), and uprooting was the most common type of damage (accounting for 42.78% of the total individuals) among the severely damaged individuals. There was a relationship between the type of damage and the slope. The amount of individuals suffered from snapping increased significantly with the increase of the slope. Further, with the increasing of the slope, the amount of individuals suffered from severe branch loss and uprooting increased as well. The levels of forest damage differed significantly among forest types. The calculated Damage Index was the highest for the *Castanopsis fargesii* stand, followed by *Pinus massoniana* stand and *Cunninghamia lanceolata* stand, respectively. [ **Conclusion** ] In this study, *DBH* size, slope and forest type are the major factors contributing to the differing snow-induced damage patterns. The trees with smaller *DBH* sizes are apt to suffer from bending, while the trees of medium *DBH* sizes being likely to suffer from snapping and uprooting, and the trees with larger *DBH* being likely to suffer from branch loss. Trees were more likely to be damaged as the slope increased. Among forest types, *Castanopsis fargesii* evergreen forest suffered from a more severe damage than the *Pinus massoniana* forest and *Cunninghamia lanceolata* forest. This study will provide implications for the conservation and management of subtropical evergreen broad-leaved forest following the natural disturbances.

**Keywords:** Snow-induced forest damage; natural disturbance; evergreen broad-leaved forest; Jinyun Mountain

森林在发展过程中会受到很多外部因素的干扰, 冰雪灾害是主要影响因素之一<sup>[1]</sup>。常绿阔叶林由于林冠密度高, 在冰雪灾害中更容易蓄积大量冰雪, 导致树干弯曲、折断和倒伏<sup>[2-3]</sup>, 这些损伤给群落带来的直接和间接的影响很难在短期内恢复<sup>[4]</sup>。雪灾产生的林冠残体, 不但增加了森林火灾和虫害风险<sup>[3,5-6]</sup>, 在较长的时间内还会导致森林凋落物量的减少, 从而影响到森林生态系统的物质循环。而且, 树木倒伏和断枝产生的林窗将直接导致林下光环境的改变, 从而影响到林下幼苗的更新, 对森林群落的物种组成和未来发展造成潜在的影响<sup>[7-9]</sup>。

2008年以前, 关于冰雪灾害对森林植被影响的研究主要集中在欧美地区, 国内的研究则相对较少<sup>[10]</sup>。早在1937年, Campbell<sup>[11]</sup>的研究就发现冰雪灾害有导致森林衰退的风险, 而且冰雪灾害还促进外来物种的入侵, 从而对森林群落造成一定的影响<sup>[12]</sup>。Duguay<sup>[13]</sup>等把受损类型进行定量分析评估加拿大西南部老龄林在冰雪灾害中的受损情况。Warrillow<sup>[14]</sup>等在阿帕拉契亚山脉中段研究了不同地形对树木受损程度的影响, 认为斜坡上的树木更易受损。Proulx<sup>[15]</sup>等利用回归分析探讨了叶面积雪与树木受损类型之间的关系, 指出叶面积雪和树木尺寸对树木的受损程度起决定性的影响, 并认为受

灾之后森林的恢复需要漫长的时间。Weeks<sup>[16]</sup>和Smolnik<sup>[17]</sup>等分别研究了雪灾对美国特拉华州和新罕布什尔州森林的长期影响, 指出雪灾会引起森林结构与组成上持久的变化。2008年前, 国内研究主要涉及冰雪灾害对北方寒温带森林的影响, 如李秀芬等<sup>[18-19]</sup>研究了辽东地区森林中树木种类、树木大小和林型与风雪灾害的关系, 但对我国亚热带常绿阔叶林冰雪灾害的研究明显不足<sup>[8]</sup>。2008年, 我国南方地区大范围的雨雪冰冻灾害给南方森林植被造成严重损害<sup>[20-21]</sup>, 国内学者对此进行了大量的研究, 研究内容主要集中在此次雨雪灾害对不同类型森林损伤程度的评估。如金毅等<sup>[22]</sup>研究了古田山冰雪灾害对其群落组成以及结构的影响; 骆土寿等<sup>[5]</sup>研究了冰雪灾害中粤北次生林所受的影响; 徐建民等<sup>[23]</sup>则对南方桉树人工林在雪灾中的受损情况进行了研究。西南地区的常绿阔叶林也在此次雪灾中受到一定的损害, 但缺少定量的调查与评价。

本研究主要评估了缙云山常绿阔叶林在2016年1月23日突发雪灾中的受损情况, 分析造成树木损伤的不同因素以及明确不同森林类型对雪灾的响应及抗性的差异, 旨在为常绿阔叶林在突发自然灾害中的管理和保护提供一定的参考与指导。

# 1 调查方法

## 1.1 调查区域与样地概况

研究地点位于缙云山国家级自然保护区(106°20' E,29°49' N),面积约1 400 hm<sup>2</sup>。属典型的亚热带季风湿润性气候,年平均气温 13.6℃,最高平均气温 24.3℃,极端高温 36.2℃,最低平均气温 3.1℃,极端低温 -4.6℃;年平均降水量 1 611.8 mm,相对湿度为 85% 以上<sup>[24]</sup>。区内保存了典型的亚热带常绿阔叶林,2013 年我们分别在缙云山青龙寨与复兴寺建立了 1 个 50 m × 100 m 的固定样地,进行长期生态学监测。样地内植被群落为多种共优势类型,主要优势种为栲(*Castanopsis fargesii* Franch)、润楠(*Machilus pingii* (Oliv.) Hemsl)、薯豆

(*Elaeocarpus japonicas* Sieb. et Zucc)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)、黄杞(*Engelhardtia roxburghiana* Wall)<sup>[25]</sup>。2016 年初重庆地区遭遇近 20 年来的最强大雪,15 个区县出现积雪,最大积雪深度达到 11 cm,此次雪灾给重庆地区的常绿阔叶林造成一定的损害。

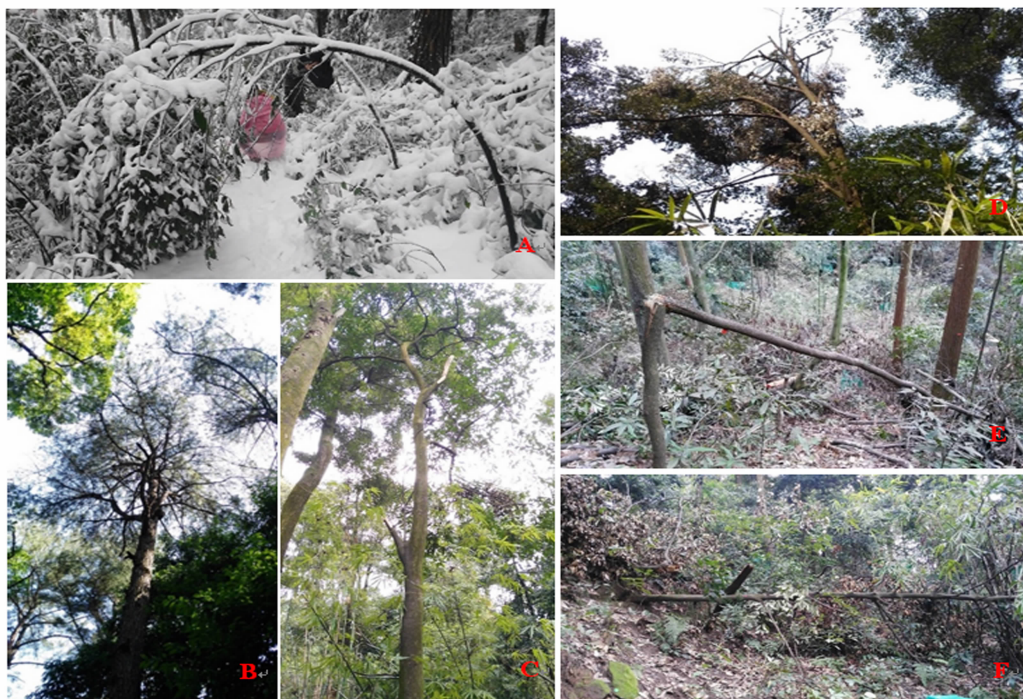
## 1.2 调查与数据处理方法

雪灾过后,我们调查了样地内高度在 5 m 以上的树木。基于雪灾后树木受损的实际情况,并参考有关 2008 年雪灾影响的相关研究,我们将树木的受损类型分为正常或受损不明显、压弯、断枝少、断枝多、断梢、折断和倒伏为七个等级(表 1)<sup>[20,26-27]</sup>。压弯、断枝少和断枝多 3 种为轻度损伤,断梢、折断和倒伏为重度损伤(图 1)。

表 1 树木雪灾受损等级划分<sup>[20,26-27]</sup>

Table 1 Description of different levels of snow-induced damage used in this study

受损类型 Damage type	受损等级 Damage class	受损程度 Damage extent	受损类型描述 Description of damage type
正常或受损不明显 Normal	0		树冠层完整,受损不明显 The canopy is complete, damage is not apparent
压弯 Bent	1	轻度损伤	树干弯曲或者倾斜 The trunk bending or tilting
断枝少 Slight branch loss	2	Slightly damaged	少于 50% 的树木分枝折断 Less than 50% of tree branches broken
断枝多 Severe branch loss	3		多于 50% 的树木分枝折断 More than 50% of tree branches broken
断梢 Crown broken	4		林冠中的树干折断 Trunks were broken in the canopy
折断 Snapping	5	重度损伤	1.3 m 以上林冠以下树干折断
倒伏 Uprooted	6	Severely damaged	The trunks broken between more than 1.3 m and below the canopy
			1.3 m 以下处折断或倒伏 The tree broken or lodging under 1.3 m



A 为压弯;B 为断枝少;C 为断枝多;D 为断梢;E 为折断;F 为倒伏

A: bent; B: slight branch loss; C: severe branch loss; D: crown broken; E: snapping; F: uprooted

图 1 缙云山树木受损程度示意图

Fig. 1 Examples of different types of snow-induced damage on Jinyun Mountain.

1.2.1 影响树木受损的相关因素 如前文所述,胸径(*DBH*)和坡度(*SD*)都是影响树木受损的因素<sup>[2]</sup>。我们选择样地内树高在5 m以上的树木,于离地面1.3 m处测量其胸径,用以分析胸径与树木受损程度之间的关系。在调查过程中,在距离受损树木树基0.5 m处选择5个点,测量其坡度(*SD*),取平均值作为树木所处坡度,用以分析不同的坡度与树木受损程度之间的关系。缙云山地处西南地区,主要植被类型为亚热带常绿阔叶林,并以栲树林为主。此外马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)和杉木也是我国亚热带地区人工林中的主要树种<sup>[28]</sup>。在缙云山植物园核心区也有一定规模的分布。为了比较不同森林类型与树木受损程度之间的关系,分别选取了马尾松林与杉木林作为研究对象。每种森林类型分别选取3个立地条件相似的20 m×20 m样方,记录样方内树木的受损程度;同时在栲树林中选择3个立地条件相似的20 m×20 m样方,记录其中树木的受损程度,作为栲树林进行比较。

1.2.2 数据处理 基于调查所得数据,对不同受损类型树木的个体数进行统计。为了说明不同胸径、坡度与树木受损程度之间的关系,参考相关研究<sup>[29]</sup>,将不同受损类型树木的*DBH*和坡度进行分级。根据实际状况,将*DBH*从3 cm开始(本次实测的最小*DBH*值),每间隔5 cm划分1个径级,*DBH*>48 cm作为最大径级,共划分为10个径级;将坡度

(*SD*)从1°开始(本次实测的最小坡度值),每间隔5°划分为1个坡度级,*SD*>46°为最大坡度级,共划分为10个坡度级。利用SPSS Statistics 19.0软件分别将胸径级和坡度级的均值与受损程度进行Pearson相关分析。同时利用surfer8.0软件绘制样地地形图以及受损树木分布图。

同时为了分析不同森林类型之间树木受损的差异,参考相关研究<sup>[21]</sup>,引入受损指数( $I_D$ )进行评估,计算方法如下:

$$I_D = \sum (D_{Li} \times n_i) / (D_{Lmax} \times N)$$

其中, $D_{Li}$ 为第*i*级的受损等级, $n_i$ 为受损等级为*i*的树木个数, $D_{Lmax}$ 为某样地内受到的最大的受损等级, $N$ 为样本总数目。利用SPSS Statistics 19.0软件,对不同森林类型间的受损指数进行正态检验并进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 缙云山常绿阔叶林受损总体情况

本研究共调查树木1 041株,其中受损个体的比例占17.96%。受损树木中轻度损伤的个体所占比例最大,达到57.22%,高于重度损伤个体的比例(42.78%)。树木受损类型多样,其中轻度损伤个体中以断枝少所占比例最多,占总受损株数的40.11%;在重度损伤个体中,倒伏所占比例最大,占总受损株数的17.65%(表2)。

表2 缙云山雪灾树木受损类型的分布(树高≥5 m)

Table 2 Summary of the number of trees(≥5 m) by damage type on Jinyun Mountain

受损程度 Damage extent	受损类型(等级) Damage type(class)	个体数 No. of individuals	受损类型比例 Individuals by damage type/%	受损程度比例 Individuals by damage extent/%
轻度损伤 Slightly damaged	压弯 Bent(1)	13	6.95	57.22
	断枝少 Slight branch loss(2)	75	40.11	
	断枝多 Severe branch loss(3)	19	10.16	
重度损伤 Severely damaged	断梢 Crown broken(4)	28	14.97	42.78
	折断 Snapping(5)	19	10.16	
	倒伏 Uprooted(6)	33	17.65	

### 2.2 树木受损类型与胸径之间的关系

不同径级树木的受损类型分布不同。总的来说,轻度损伤树木的比例随着胸径的增加而增加,在43 cm<*DBH*≤48 cm范围内达到最大;重度损伤树木的比例则相反,在8 cm<*DBH*≤13 cm范围内达到最大(图2)。

Pearson相关性分析显示:断枝少个体的比例与胸径呈显著正相关( $r=0.785, P<0.01$ );折断个体和倒伏个体的比例均与胸径呈显著负相关( $r =$

$-0.763, P<0.05; r = -0.690, P<0.05$ )(表3)。

随着胸径的增加,断枝少个体的比例逐渐增加(图3a),其中,在43 cm<*DBH*≤48 cm范围内,树木断枝少比例最高,在*DBH*>28 cm的树木中,断枝的比例超过了50%。折断与倒伏在各径级所占百分比均呈现先增加再减少的趋势。此外,在23 cm<*DBH*≤28 cm范围,树木折断比例最高,而*DBH*>28 cm的树木都未折断。8 cm<*DBH*≤12 cm树木倒伏的比例最高,此后降低。

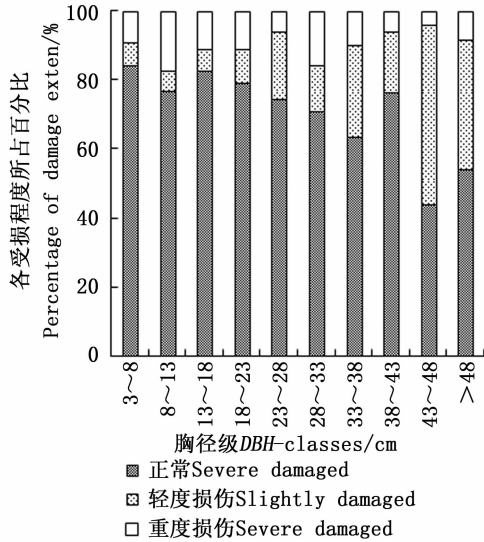


图2 不同径级下各受损程度所占百分比

Fig.2 Percentages of individuals of different damage extents by DBH-classes

压弯个体和断梢个体的比例与胸径之间关系不显著 ( $r = -0.504, P > 0.05$ ;  $r = -0.236, P > 0.05$ , 表3)。压弯的树木仅出现在  $3\text{ cm} \leq DBH \leq 8\text{ cm}$  的范围内。断梢个体的径级分布没有明显趋势,但在较低径级 ( $13\text{ cm} < DBH \leq 18\text{ cm}$ ) 和较高径级 ( $33\text{ cm} < DBH \leq 38\text{ cm}$ ) 分布的比例较高,而在  $23\text{ cm} < DBH$

$\leq 28\text{ cm}$  径级范围分布比例最低(图3a)。上述结果表明随胸径增加,树木不容易压弯,但更容易折断或者倒伏;随胸径继续增加,胸径较大的树木很少折断和倒伏,却增加断枝的可能性(图3a)。

### 2.3 树木受损类型与坡度之间的关系

Pearson 相关性分析结果表明,断梢个体的比例与坡度呈显著负相关关系 ( $r = -0.640, P < 0.05$ ); 折断个体的比例与坡度呈显著正相关关系 ( $r = 0.842, P < 0.01$ )。其它受损类型与坡度没有显著的相关性 ( $P > 0.05$ ) (表3)。不同坡度级上各受损类型所占比例表明压弯的类型主要发生在分布于  $21^\circ < SD \leq 26^\circ$  坡度范围的树木中(图3b)。在  $11^\circ < SD \leq 16^\circ$  的坡度范围,树木断枝少的比例最高,随着坡度增加,断枝少树木比例减少;而断枝多的树木的比例则呈现先减少后增加的趋势,其中,在坡度  $SD > 46^\circ$  的树木中比例最高。树木断梢比例最高发生在  $1^\circ \leq SD \leq 6^\circ$  的坡度范围内,最低比例则出现在  $21^\circ < SD \leq 26^\circ$  的坡度范围。随着坡度的增加,树木折断和倒伏的比例亦增加,其中,在  $1^\circ \leq SD \leq 6^\circ$  中树木折断比例最低,而  $SD > 46^\circ$  中比例最高;最低的树木倒伏比例发生在  $11^\circ < SD \leq 16^\circ$  的坡度范围,最高比例则在  $36^\circ < SD \leq 41^\circ$  的坡度范围。

表3 树木受损程度与胸径和坡度的相关系数(r)

Table 3 Correlation coefficients (r) between DBH, SD and damage types

项目 Items	压弯 Bent	断枝少 Slight branch loss	断枝多 Severe branch loss	断梢 Crown broken	折断 Snapping	倒伏 Uprooted
胸径 DBH	-0.504	0.785 **	0.718 *	-0.236	-0.763 *	-0.690 *
坡度 SD	-0.394	-0.54	0.506	-0.64 *	0.842 **	0.6

\* 表示在 0.05 水平上差异显著, \*\* 表示在 0.01 水平上差异显著。

\* indicates significant difference at the  $P < 0.05$ , and \*\* indicates significant difference at the  $P < 0.01$ .

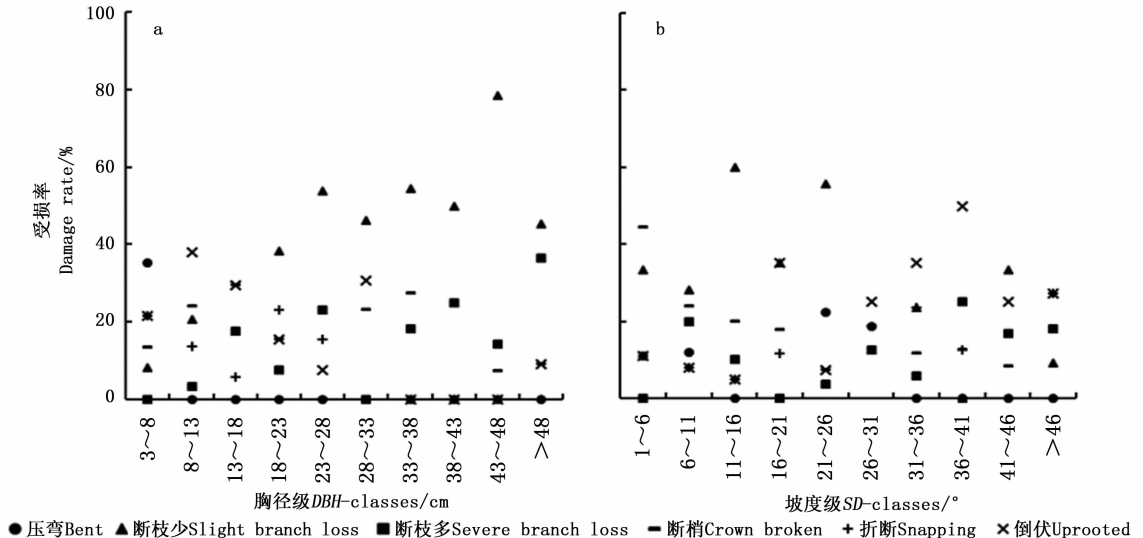


图3 各受损类型个体比例在不同胸径级和坡度级的分布

Fig.3 Proportion of individuals(grouped by damage types) by the (a) DBH-classes and (b) SD-classes



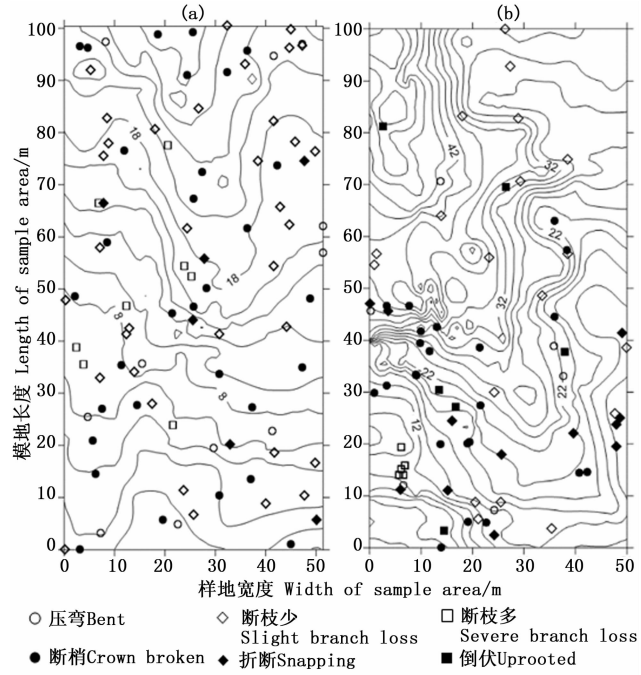
青龙寨样地相对平缓,各受损等级树木分布较均匀(图4a)。而复兴寺样地的坡度比较陡峭且地形较为复杂,受损树木,特别是倒伏等重度损伤的树木多分布于坡度较大的山坡,且受损树木也相对更加集中(图4b)。随坡度增加,树木折断和倒伏的可能性也增加,折断与倒伏的最高比例皆出现在 $SD > 36^\circ$ 的山坡;而随坡度增加,断枝少的可能性降低,断枝多的可能性则增加(图3b)。因此,坡度越大,树木更容易折断和倒伏。

#### 2.4 树木损伤程度与森林类型之间的关系

3种不同森林类型在雪灾中的受损指数呈正态分布( $P > 0.05$ )。One-Way ANOVA显示(表4),栲树林、马尾松林和杉木林之间的受损指数差异显著( $P < 0.05$ )。多重比较分析表明杉木林与马尾松林差异不明显,但两者与栲树林均差异显著;栲树林受损指数最高(0.21),而杉木林最低(0.03),马尾松林介于两者之间(表4)。

3种不同森林类型之间受损分布也不相同。表4显示了马尾松林和杉木林的损伤以断枝少为主,分别为8.59%和5.03%,杉木林有较少比例的折断和倒伏。栲树林受损分布比较广泛,也以断枝少为主,但是比例大于马尾松林和杉木林,占到总数的12.16%,而且有树木倒伏,比例占6.76%。

由于栲树长期适应于较温暖的自然环境,其对雪灾的耐性最低,受损类型分布较多样,受损指数最



(a)为青龙寨样地;(b)为复兴寺样地。

(a) the plot at Qinglongzhai; (b) the plot at Fuxingsi

图4 缙云山1 hm<sup>2</sup>样地地形图及受损树木分布

Fig. 4 Distribution of damaged trees in a 1 hm<sup>2</sup> plot on Jinyun Mountain

高;而马尾松林和杉木林主要受损类型集中于断枝,其他的受损类型中受损树木所占百分比很低,所以受损指数小于栲树林。

表4 不同森林类型受损指数及显著性差异

Table 4 Difference in the damage index across forest types

森林类型 Forest type	树木 总数 Total	不同受损类型个体数 Individual number and percentages							损指数 Damage index
		正常 Undamaged	压弯 Bent	断枝少 Slight branch loss	断枝多 Severe branch loss	断梢 Crown broken	折断 Snapping	倒伏 Uprooted	
栲树林 <i>Castanopsis fargesii</i> forest	74	48 64.86%	2 2.70%	9 12.16%	4 5.41%	4 5.41%	3 4.05%	5 6.76%	0.21 <sup>a</sup>
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forest	128	115 89.84%	0 0.00%	11 8.59%	2 1.56%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	0.07 <sup>b</sup>
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	199	187 93.97%	0 0.00%	10 5.03%	0 0.00%	0 0.00%	1 0.50%	1 0.50%	0.03 <sup>b</sup>

注:字母不同表示在0.05水平下差异显著,字母相同表示在0.05水平下差异不显著。

Note: Different letters indicate the difference is significant at  $P < 0.05$ , and same letters indicate no significant difference.

### 3 讨论

#### 3.1 树木受损与胸径之间的关系

胸径是反映树木在雪灾中受损程度的一个重要性状指标<sup>[2]</sup>。本研究中,树木受损比例与胸径之间有相关关系,胸径越大,树木受损比例越高(图2),与古田山常绿阔叶林,粤北地区森林和 Tianjing-

Mountain 地区森林在雪灾中的受损特征相似<sup>[20,30-31]</sup>。一般认为,树木胸径的大小与其冠幅的大小成正比<sup>[2]</sup>,胸径越大,冠幅越大,树木在雪灾中承受的雪量也越大,因此,树冠极易受到损害;另外,胸径大的树木往往处于林冠上层,更容易受到冰雪的直接损害,而较小径级的树木处于林下,受到损害的概率相对较小<sup>[26,31]</sup>。

树木个体的受损类型也与胸径之间有较强的相关关系。本研究发现,压弯个体仅出现在  $3\text{ cm} \leq DBH \leq 8\text{ cm}$  的树木中,折断和倒伏主要发生在  $DBH < 33\text{ cm}$  的树木中,而大径级树木 ( $DBH > 43\text{ cm}$ ) 以断枝为主,胸径增加,其他受损类型都有减少的趋势,断枝的可能性则相应增加了(图3)。此结果与树木在冰雪灾害中受损特征的一般规律相似,即压弯仅出现小径级树木个体中,倒伏和折断主要发生于中等径级树木个体中,而大径级树木主要以断枝为主<sup>[27,29,32]</sup>。径级较小的树木多为幼龄个体,其树干韧性较强,树冠相对较小,在雪灾中不易折断,主要被压弯<sup>[20]</sup>;中等胸径的树木,其冠幅相对较大,能够蓄留更多的冰雪,但其树干和根系的强度不足以支撑起冰雪的重量,所以容易发生折断与倒伏<sup>[33]</sup>;大径级树木树干粗壮根系发达,不易倒伏,但树枝抗折断的能力小于树根的固着力,容易受到断枝损害<sup>[1]</sup>,所以大径级树木断枝的比例较大,说明大径级的树木更倾向于轻度损伤。

### 3.2 树木受损与坡度之间的关系

树木受损程度除了与其自身属性有关外,还与其所处的环境条件有关,如坡度、坡向和海拔都是影响树木受损程度的因素<sup>[34-36]</sup>。本研究选择的样地所处海拔与坡向差异不大,故主要考虑坡度对树木受损的影响。结果显示,随着坡度的增加,断枝少的可能性减少,但相应的断枝多和断梢的可能性增加,同时随坡度的增加,树木也更容易折断和倒伏,树木损伤趋向于重度损伤(图3b,4),此结果与何俊等<sup>[29]</sup>对九连山常绿阔叶林冰雪灾害的研究的结论相似。由于树木的趋光性,生长在坡面上的树木其树冠生长不对称,使树木的某一面受力过强,当外界压力过大时就容易造成倒伏<sup>[10,20,37]</sup>。另外,陡坡上土层较浅,树木根系相对较浅,树木抗干扰能力弱,雪灾发生时容易造成树木倒伏<sup>[38]</sup>。而且,陡坡上倒伏的树木有更大的趋势倒向相邻的树木,从而引起相邻树木的损伤,表现为陡坡受损树木的分布更加集中<sup>[38-39]</sup>。

### 3.3 树木受损与森林类型之间的关系

不同森林类型的受损指数表现为栲树林 > 马尾松林 > 杉木林的趋势。这个结果与邵全琴等<sup>[37]</sup>在江西潘阳湖流域山地所做研究以及陈红跃等<sup>[40]</sup>在广东北部对三种不同林分的损害特征比较的结果相似。三种森林类型都以断枝为主要受损类型,但栲树林中受损的树木中断枝比例远高于马尾松林和杉

木林,而且栲树林中还有一定比例折断和倒伏的个体。叶面积雪量决定了树木的受损程度<sup>[15,41]</sup>,阎恩荣等<sup>[21]</sup>认为:叶面积越大的树木,其树冠蓄积冰雪的量越大,对枝干等支撑器官造成的压力也就越大,从而导致树木受损。栲树作为常绿阔叶树种,其树冠巨大树叶密集,相对于针叶树种,它蓄留的雪量较大<sup>[10]</sup>,所以受到损害更大。而且栲树林中大量掉落的枝条易对较矮的树木造成二次伤害。

杉木林与马尾松林的受损程度并没有显著的差异,马尾松林受损程度略大于杉木林,但杉木林中有个体出现了折断等严重受损的情况(表4)。马尾松针叶在枝条上集束成马尾状,相对杉木来说容易积累冰雪造成损害,所以受损率较杉木严重<sup>[42]</sup>。杉木的树冠较马尾松狭窄,受到冰雪的危害小<sup>[43]</sup>,但杉木的木质较为松脆,更容易折断<sup>[31,40]</sup>。

## 4 结论

缙云山地处中国西南,气候温润,降雪较少,其常绿阔叶林适应于较温暖的环境,因此在此次雪灾中遭受一定程度的损害。胸径、坡度和森林类型是影响树木受损程度和类型的主要因素。随着胸径的增加,树木受损比例增大,小径级树木在雪灾中更容易压弯;中等径级树木在雪灾中更容易折断和倒伏;大径级树木则以断枝为主要受损类型。胸径的增加,树木重度损伤的可能性减少,但是轻度损伤的可能性增加。随着坡度的增加,断枝少的可能性减少,但是断枝多和断梢的可能性增加,使树木更易发生折断和倒伏现象。坡度越大,树木更容易受到雪灾的损伤,特别是重度损伤。本研究表明,相对于马尾松林和杉木林,常绿阔叶林(栲树林)在雪灾中受损较大。本文研究结果对亚热带常绿阔叶林在突发自然灾害中的保护和管理能提供一定的参考和指导。

### 参考文献:

- [1] 张志祥,刘鹏,邱志军,等.浙江九龙山自然保护区黄山松种群冰雪灾害干扰及其受灾影响因子分析[J].植物生态学报,2010,34(2):223-232.
- [2] 郭淑红,薛立.冰雪灾害对森林的影响[J].生态学报,2012,32(16):5242-5253.
- [3] 李秀芬,李教君,王庆礼,等.森林的风/雪灾害研究综述[J].生态学报,2005,25(1):148-157.
- [4] 黄川腾,庄雪影,李荣喜,等.冰灾后南岭五指山森林树种的受损与早期恢复[J].生态学杂志,2012,31(6):1390-1396.
- [5] 骆土寿,杨昌腾,吴仲民,等.冰雪灾害对粤北天然次生林的损害及产生的林冠残体量[J].热带亚热带植物学报,2010,18

- (3):231-237.
- [6] Konôpka B, Zach P, Kulfan J. Wind-an important ecological factor and destructive agent in forests[J]. *Forestry Journal*, 2016, (62): 123-130.
- [7] 廖进平, 黄帮文, 刘菊莲, 等. 风雪灾害对濒危植物银鹊树种群结构的影响[J]. *浙江林业科学*, 2010, 30(1): 74-78.
- [8] 张磊, 王晓荷, 米湘成, 等. 古田山常绿阔叶林凋落量时间动态及冰雪灾害的影响[J]. *生物多样性*, 2011, 19(2): 206-214.
- [9] 张志国, 马遵平, 刘何铭, 等. 天童常绿阔叶林林窗的地形分布格局[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 621-625.
- [10] 徐雅雯, 吴可可, 朱丽蓉, 等. 中国南方雨雪冰冻灾害受损森林植被研究进展[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(6): 1485-1494.
- [11] Campbell W A. Decay hazard resulting from ice damage to northern hardwoods[J]. *Journal of Forestry*, 1937, 35(11): 1156-1158.
- [12] Song XY, Aaron H J, Brown C, *et al.* Snow damage to the canopy facilitates alien weed invasion in asubtropical montane primary forest in southwestern China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 391: 275-281.
- [13] Duguay SM, Arii K, Hooper M, *et al.* Ice storm damage and early recovery in an old-growth forest[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2001, 67: 97-108.
- [14] Warrillow M, Mou P. Ice Storm Damage to Forest Tree Species in the Ridge and Valley Region of Southwestern Virginia[J]. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 1999, 126(2): 147-158.
- [15] Proulx OJ, Greene DF. The relationship between ice thickness and northern hardwood tree damage during ice storms[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(10): 1758-1767.
- [16] Weeks BC, Hamburg SP, Vadeboncoeur MA. Ice storm effects on the canopy structure of a northern hardwood forest after 8 years[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39(8): 1475-1483.
- [17] Smolnik M, Hessl A, Colbert J J. Species-specific effects of a 1994 ice storm on radial tree growth in Delaware[J]. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 2006, 133(4): 577-584.
- [18] 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[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 941-946.
- [19] 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等. 次生林雪风害干扰与树种及林型的关系[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(4): 28-33.
- [20] 曼兴兴, 米湘成, 马克平. 雪灾对古田山常绿阔叶林群落结构的影响[J]. *生物多样性*, 2011, 19(2): 197-205.
- [21] 阎恩荣, 仲强, 周武, 等. 浙江天童雨雪冰冻灾后林木机械受损与相关功能性状的关联[J]. *浙江林学院学报*, 2010, 27(3): 360-366.
- [22] 金毅, 陈建华, 米湘成, 等. 古田山 24ha 森林动态监测样地常绿阔叶林群落结构和组成动态: 探讨 2008 年冰雪灾害的影响[J]. *生物多样性*, 2015, 23(5): 610-618.
- [23] 徐建民, 李光友, 陆钊华, 等. 南方桉树人工林雨雪冰冻灾害调查分析[J]. *林业科学*, 2008, 44(7): 103-110.
- [24] 刘勇, 王玉杰, 王云琦, 等. 重庆缙云山森林生态系统服务功能价值评估[J]. *北京林业大学学报*, 2013, 35(3): 46-55.
- [25] 杨超, 黄力, 高祥阳, 等. 缙云山常绿阔叶林凋落动态及组成[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(1): 1-9.
- [26] 苏志尧, 刘刚, 区余端, 等. 车八岭山地常绿阔叶林冰灾后林木受损的生态学评估[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 213-222.
- [27] 温远光, 李婉婷, 朱宏光, 等. 特大冰冻干扰对大明山常绿阔叶林树冠及林冠层状况的影响[J]. *广西科学*, 2014, 21(5): 454-462.
- [28] 李轩然, 刘琪璟, 陈永瑞, 等. 千烟洲人工林主要树种地上生物量的估算[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1382-1388.
- [29] 何俊, 赵秀海, 张春雨, 等. 九连山自然保护区常绿阔叶林冰雪灾害研究[J]. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(2): 180-185.
- [30] 赵霞, 沈孝清, 黄世能, 等. 冰雪灾害对杨东山十二度水省自然保护区木本植物机械损伤的初步调查[J]. *林业科学*, 2008, 4(11): 164-167.
- [31] Zhu L, Zhou T, Chen B, *et al.* How does tree age influence damage and recovery in forests impacted by freezing rain and snow? [J]. *Science China: Life Sciences*, 2015, (5): 472-479.
- [32] 葛晓雯, 侯捷建, 王立海, 等. 小兴安岭红松针阔混交林立木掘根特征[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 380-386.
- [33] 何茜, 李吉跃, 陈晓阳, 等. 2008年初特大冰雪灾害对粤北地区杉木人工林树木损害的类型及程度[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 195-203.
- [34] 李洪军, 刘鹏, 张志祥, 等. 杉木人工林冰雪灾害受灾和萌生情况调查及影响因子分析[J]. *云南植物研究*, 2010, 32(2): 158-166.
- [35] Lafon C W. Ice Storms in Central Hardwood Forests: The Disturbance Regime, Spatial Patterns, and Vegetation Influences [J]. *Managing Forest Ecosystems*, 2016, 32: 147-166.
- [36] Nagel T A, Firm D, Rozenberger D, *et al.* Patterns and drivers of ice storm damage in temperate forests of Central Europe [J]. *European Journal of Forest Research*, 2016, 135(6): 519-530.
- [37] 邵全琴, 黄麟, 刘纪远, 等. 2008年春季中国南方冰雪冻害林木物理折损典型样带分析[J]. *山地学报*, 2009, 27(3): 177-187.
- [38] 汤景明, 宋从文, 戴均华, 等. 湖北省主要造林树种冰雪灾害调查[J]. *林业科学*, 2008, 44(11): 2-10.
- [39] 吴可可, 彭少麟, 陈蕾伊, 等. 南方森林雨雪冰冻灾害的特征[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(3): 611-620.
- [40] 陈红跃, 薛立, 李吉跃, 等. 冰雪灾害对3种不同林分的损害特征比较[J]. *华南农业大学学报*, 2010, 31(2): 79-81.
- [41] Nock A C, Lecigne B, Taugourdean O, *et al.* Linking ice accretion and crown structure: towards a model of the effect of freezing rain on tree canopies [J]. *Annals of Botany*, 2016, (4): 1-11.
- [42] 蔡子良, 钟秋平, 刘清元, 等. 广西主要树种中冰雪灾害调查及恢复措施[J]. *林业科学研究*, 2008, 21(6): 837-841.
- [43] 马泽清, 王辉民, 王绍强, 等. 雨雪冰冻灾害对中亚热带人工林的影响—以江西省千烟洲为例[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 204-212.