

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

马泽清^{1,2,3} 王辉民^{1,2*} 王绍强^{1,2} 李庆康^{1,2} 王义东^{1,2,3} 汪宏清^{1,2}

¹中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; ²中国科学院千烟洲红壤丘陵综合开发试验站, 江西泰和 343700; ³中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为深入研究2008年初低温雨雪冰冻灾害对我国南方森林生态系统的影响, 实地调查了中国科学院千烟洲红壤丘陵综合开发试验站(简称千烟洲站)人工林受损状况, 并结合气象资料与空间数据进行了分析。在千烟洲站内主要的5种林型中, 受损林分多为湿地松(*Pinus elliottii*)林, 倒伏区面积为7.72 hm², 占森林面积的6.12%, 地上植被碳储量损失1 462 g·m⁻² (范围在655–5 230 g·m⁻²之间)。持续低温、阴雨潮湿等气象条件是导致湿地松林受损的直接原因, 特别是2008年2月1日的低温、强降水和大风, 加剧了灾害程度。在吉泰盆地低山丘陵区(海拔60–140 m), 高程与局地地形、气象条件密切相关, 因而对冰雪灾害具有较强的指示作用。丘陵顶部土壤贫瘠、受风影响强烈, 林木易受损倒伏。阳坡的林木易偏冠, 这可能是其受损较为严重的原因之一。湿地松林受损的内因主要有冠型、材质、根系分布、叶片特征和年龄等; 此外, 人为割脂也可能是造成湿地松大量倒伏的重要因素。

关键词 冰冻灾害, 自然干扰, 人工林, 植被碳储量损失

Impact of a severe ice storm on subtropical plantations at Qianyanzhou, Jiangxi, China

MA Ze-Qing^{1,2,3}, WANG Hui-Min^{1,2*}, WANG Shao-Qiang^{1,2}, LI Qing-Kang^{1,2}, WANG Yi-Dong^{1,2,3}, and WANG Hong-Qing^{1,2}

¹Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ²Qianyanzhou Integrated Ecological Station of Red Soil Hilly Land, Chinese Academy of Sciences, Taihe, Jiangxi 343700, China; and ³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Aims During mid-January and mid-February 2008, an unexpected severe ice storm occurred over southern China that caused heavy damage to forests. Our objectives were to examine the effect of this storm on subtropical planted forests and to quantify biomass and carbon losses.

Methods We evaluated damage to the forest ecosystem at Qianyanzhou Ecological Station in subtropical China. Twenty-one plots of 10 m × 10 m dimensions were investigated in the affected slash pine (*Pinus elliottii*) plantation. The relationship between damaged area and terrain factors was analyzed using Digital Elevation Model data.

Important findings Of the five major plantations at the ecological station, damages occurred mainly in the slash pine plantation. The area of severely damaged forest with most fallen trees was 7.72 hm², accounting for 6.12% of the total forest area. The aboveground carbon loss in the severely damaged area ranged from 655 to 5 230 g·m⁻², with a mean value of 1 462 g·m⁻². Continuous low-temperature and strong rainfall, particularly when accompanied by strong winds on February 1, 2008, were the direct causes of the damage. Analysis shows that elevation is a good indicator for ice storm damage in the hilly area even though the elevation range was small (60–140 m), because elevation is tightly linked to local terrain factors and weather conditions. Forest growing on the top of a hill was vulnerable to the ice storm due to the barren soil and strong wind. We found that trees planted on the sunny slopes tended to form unbalanced crowns; this might be the reason that severe damage occurred mainly on sunny slopes. The vulnerability of slash pine to the ice storm is believed related to crown types, timber quality, root distribution, leaf characteristics and resin tapping.

Key words freezing rain, natural disturbance, plantation, plant-carbon loss

2008年初,我国南方遭受了罕见的低温雨雪冰冻灾害,灾害波及19个省市,损失森林面积0.193亿 hm^2 ,直接经济损失达573亿元(沈国舫,2008)。其中,湖南、江西等7个省市损失最为惨重,位于赣中吉泰盆地腹地的中国科学院千烟洲生态试验站在这次灾害中也遭受了重创。雨雪冰冻灾害的主要形式包括冰暴(ice storm)、冻雨(freezing rain)和雨淞雨(glaze rain)等,在高纬度地区或海拔较高的高寒地区较为常见。早在20世纪初,国外学者就开展了美国东北部森林受冰雪灾害影响的研究(Ashe, 1918; Abell, 1934; Van Dyke, 1999; Bragg *et al.*, 2003)。美国平均每年受冰雪风暴干扰影响的面积超过180 000 hm^2 ,造成的直接经济损失年均1 000万美元以上(Michaels & Cherpack, 1998; Dale *et al.*, 2001)。1994年,美国西南部发生的严重冰暴灾害造成约37亿美元的直接经济损失;1998年美国东北部和加拿大南部地区遭到冻雨和冰雪灾害(ice pellets and snow fell)的侵袭,波及范围达600 000 hm^2 (Lautenschlager & Nielsen, 1999),直接经济损失超过11亿美元(Lecomte *et al.*, 1998)。美国联邦应急管理署(Federal Emergency Management Agency)的统计资料表明,1968年至2006年间发生的冰雪灾害共有35起,仅1998年至2006年就发生了17起。这些极端气候事件的频繁发生被认为是全球气候变化的重要表现之一。

灾情调查及分析是防灾减灾和灾后恢复重建的基础与前提。1998年北美大冰灾发生后,加拿大派出飞机,在树冠以上60–100 m进行航测,绘制了灾情图,确定了受灾区域,并用地面控制点数据进行了校对(Scarr *et al.*, 2003)。我国由于技术与资金的限制,尚缺乏先进的灾害评估及相关应对机制。2008年的雨雪冰冻灾害影响面积巨大,给灾害评估工作带来了极大的困难。2008年2月28日,国家林业局出台了《雨雪冰冻灾害森林资源损失调查评估实施方案》,并于8月发布了相关的评估报告,对森林资源受灾、受损情况及其影响进行了评估,对于受灾森林植被的恢复具有重要的科学指导意义。

冰雪灾害(ice storms)的影响主要取决于冰的载荷、灾害的持续时间、立地条件及树木的特性;而从森林内因来讲,主要受到冠形、枝条的健康度(fineness of branching)、枝角及树干材质等的影响(Van Dyke, 1999)。树干尖削度(胸径/树高)和林分结

构特征(树种、组成、密度等)也是影响树木和林分对风雪灾害抵抗能力的主要因子(李秀芬等,2005)。树种易受冰雪灾害的原因还有:枝干连接处的内树皮(“included” bark)、腐烂或死亡的树枝、横向树枝的表面积、开阔的树冠和不平衡的树冠(Hauer *et al.*, 1994)。

冰雪灾害是自然干扰的重要形式,对生态系统碳循环过程会产生巨大的影响。作为陆地生态系统最大碳库的森林生态系统能够缓解全球气候变化的进程,同时又不可避免地受到极端气候事件等自然干扰的反馈作用,进而影响全球变化进程。当森林遭遇冰雪灾害后,凋落物会大量增加,很可能破坏生态系统碳平衡。大量的碳从植物碳库转移到凋落物碳库,即发生碳转移;冰雪灾害所带来的凋落物在地表存在的时间不会超过10年或20年(McCarthy *et al.*, 2006)。1998年美国东南部冰雪灾害导致(26.5 ± 3.3) Tg C从活的植物体转移到凋落物内,其中约10%的转移碳汇(carbon sequestration)在第一年内被分解,50%在8年内分解,在25年内转移碳汇将彻底分解完(McCarthy *et al.*, 2006)。阔叶林凋落物的分解周期在10年左右(Mattson *et al.*, 1987);井冈山亚热带常绿阔叶林、针阔叶混交林、高山矮林凋落物分解95%所需的时间为6.8–9.9年(李海涛等,2007a);千烟洲人工林林分分解速率依次为:马尾松(*Pinus massoniana*)林>杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林>湿地松(*Pinus elliottii*)林>混交林,凋落物分解95%的时间为4–10年(李海涛等,2007b)。冰雪灾害带来的植被碳储量的损失绝大部分将在10年内发生转移,由此削弱生态系统的碳汇功能。虽然冰雪灾害对区域碳吸收和碳库有重要的影响,但目前关于冰雪灾害等自然干扰对森林碳汇影响的研究还很少(McCarthy *et al.*, 2006)。

当全球碳循环研究的重点集中在温度和水分等渐变式气候因子变化对生态系统的影响时,冰雪灾害等极端气候事件的频繁发生,使我们不得不反思对全球变化研究的不足。此次冰雪灾害为开启区域碳循环影响的研究提供了契机,而长期的联网观测有助于深刻理解这一过程。本文基于千烟洲生态站已有数据与知识积累,对站区的森林受损情况进行了详细调查,并用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)工具进行了空间分析,初步分析了南方低山丘陵人工林受灾状况及主要影响

因子, 定量研究了典型受损湿地松林的植被碳储量损失, 为今后研究冰雪灾害对森林碳循环的影响积累了科学数据, 也将为灾后生态恢复和森林可持续经营管理提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 样地概况

研究地点位于中国科学院千烟洲红壤丘陵综合开发试验站(简称千烟洲站), 115°04'13" E, 26°44'48" N。试验区总面积约为208 hm²。海拔多在100 m左右, 相对高度差20–50 m, 属典型的红壤丘陵区。根据1985–2004年气象数据总结, 试验区年平均气温17.9 °C, 年平均降水量1 489 mm, 年日照时数1 406 h, 太阳年总辐射量4 349 MJ·m⁻²; 具有典型的亚热带季风气候特征。主要土壤类型有红壤、水稻土、潮土、草甸土等, 成土母质多为红色砂岩、砂砾岩(中国科学院南方山区综合科学考察队和江西省吉安地区自然资源开发治理办公室, 1989; 马

泽清等, 2007; Ma *et al.*, 2008)。

千烟洲是我国较早进行荒山生态恢复的典型地区。自1983年开始营造人工林, 选择树种多为先锋树种, 如马尾松、杉木、湿地松以及木荷(*Schima superba*)等阔叶树, 形成的人工林基本代表了该区域人工林的主要类型。2005年调查的千烟洲站的森林生长和分布情况见表1(马泽清等, 2007)。站区森林面积126.18 hm², 另有柑橘(*Citrus reticulata*)林35.79 hm²。站区造林时间基本上是在1983年到1986年之间, 多为纯林。湿地松林占千烟洲站森林面积的50%左右。受经济利益的驱动, 2000年前后, 站区湿地松林的部分林木被割脂; 但由于管护及时, 割脂的时间不超过两年。

1.2 雨雪冰冻灾害期间的气象特征

根据千烟洲站人工气象监测结果, 2008年1月至2月雨雪冰冻期间表现出如下气象特征: (1)低温持续时间长, 从1月15日至2月5日将近20天, 温度一直处于5 °C以下(图1)。1月、2月平均气温较历年

表1 千烟洲不同森林类型的面积及生长状况

Table 1 Area and growth status of different forest types at Qianyanzhou

林型 Forest type	密度 Density (individuals·hm ⁻²)	胸高断面面积 Section area at breast height (m ² ·hm ⁻²)	地上生物量 Aboveground biomass (g·m ⁻²)	面积 Area (hm ²)
湿地松林 <i>Pinus elliotii</i> forest	1 497	31.5	7 542	75.14
马尾松林 <i>P. massoniana</i> forest	1 905	30.1	8 768	24.84
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	2 368	51.3	14 088	7.73
阔叶林 Broad-leaved forest	2 650	30.3	10 339	6.08
针阔叶混交林 Broad-leaved-conifer mixed forest	1 994	28.1	8 359	1.39
其他森林 Other forest				11.00
总计 Total				126.18

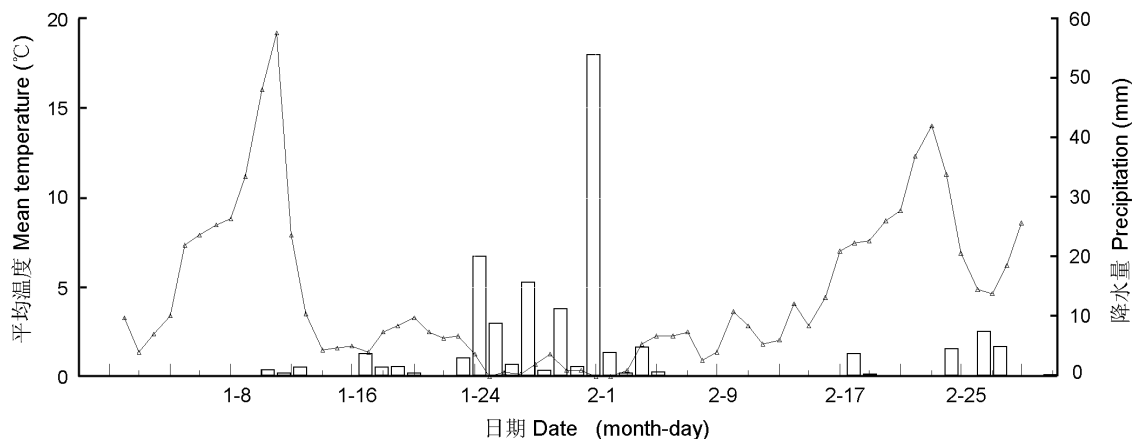


图1 2008年1月至2月日平均气温与降水量。

Fig. 1 Mean daily temperature and daily precipitation from January to February in 2008.

月平均气温分别低2.3 °C和3.6 °C; (2)气温变化剧烈, 1月10日气温高达27.3 °C, 较同期历史最高温度高6.1 °C, 而1月最低温度(-4.7 °C)低于同期历史最低温度(-3.5 °C); (3)阴雨连绵, 湿度大, 降水集中, 1月25日至2月5日空气湿度一直处于饱和状态, 累计降水量为123 mm, 占这两月总降水量的78.7%。对1月20日至2月10日每日8:00、14:00和20:00定向风速的记录分析发现: 西北风是主要风向, 所占比例为55.6%; 风速很低, 多为1级或2级, 日均风速为 $(1.02 + 0.09) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风速最大值为 $2.20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 出现在2月1日。

1.3 研究方法

1.3.1 灾情调查

2008年2月至3月, 在千烟洲站区及附近进行踏查, 结合地形图和遥感影像确定受损区图斑, 并利用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)定位, 记录经纬度信息及相关的实地植被类型、地形、受灾程度和受灾类型等。

1.3.2 制图及空间分析

根据经纬度信息及相关的GIS软件, 进行制图, 统计受损区面积。

利用千烟洲数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据提取高程、坡向(aspect)、坡度和山体阴影(hillshade)等空间信息, 并对受损区进行

空间分析。坡向定义为坡面法线在水平面上的投影与正北方向的夹角。在Arcgis中坡向表示每个栅格与它相邻的栅格之间沿坡面向下最陡的方向, 坡向值有如下规定: 正北方向为0°, 正东方向为90°, 依此类推。在Arcgis空间分析模块中的山体阴影可以分析或模拟地面的光照情况, 亦可测定研究区域中给定位置的太阳光强度和光照时间, 并且对实际地面进行逼真的立体显示, 增强地面的起伏感。山体阴影图不仅很好地表达了地形的立体形态, 而且可以方便地提取地形遮蔽信息。设定入射的太阳方位角初始值为315°, 太阳高度角初始值为45°, 光照产生的表面的灰度值范围为0-255。

1.3.3 典型样地调查

在调查工作中, 将连续成片的林木树干和树枝明显出现物理性损伤的认定为受损区。2008年3月在千烟洲站区受损面积最大的3号区(图2)调查了21块 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的湿地松林样地, 分为折断和倒伏两种类型。由于受损面积和受损程度差异较大, 为了更加全面地反映实际状况, 在2008年4月, 在位于4号严重受损区(图2)的湿地松人工林, 设置了一块面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 、受雨雪冰冻灾害影响的长期观测样地, 同时为进行对比研究, 设置对照(未受损)湿地松林样地一块, 面积为 $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$, 并于2008年10月, 对这两块样地进行了调查。

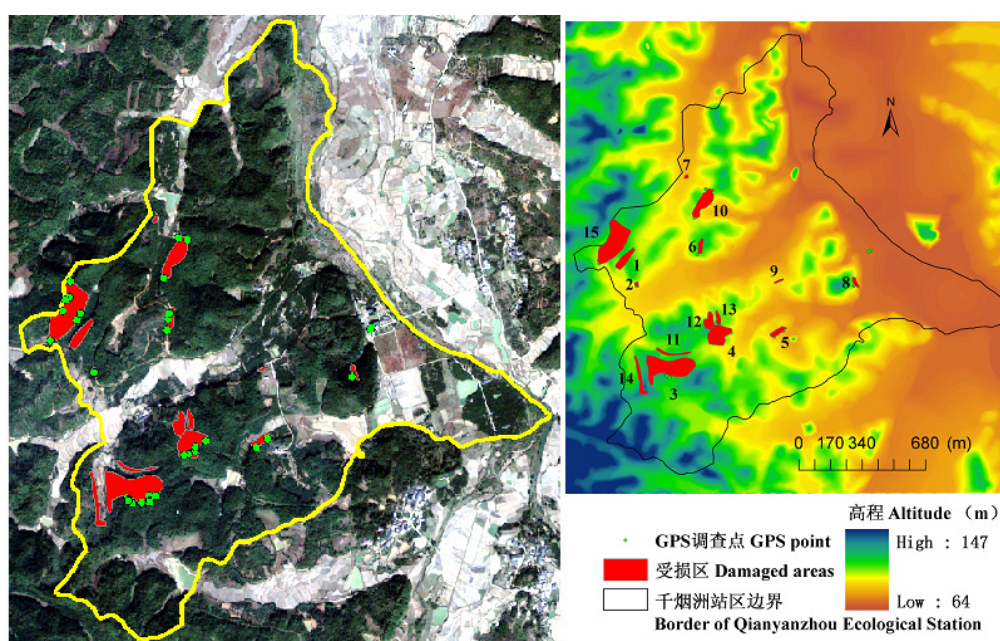


图2 千烟洲站人工林受灾区域分布[0]。图中数字表示受损区域编号。

Fig. 2 Distribution of damaged plantation at Qianyanzhou Ecological Station. Numbers in the figure indicate the serial code of damaged area.

根据实际情况,制定了树木雪灾受害等级评价标准:1级,未受害,树干直立;树冠完整;枝条未折断;2级,轻微受害,树干直立;树冠基本完整;枝条折断少于1/4;3级,中等受害,树干倾斜;树冠受损;枝条折断1/4–1/2;4级,严重受害,树干轻微弯曲;树冠受损;5级,极严重,树干严重弯曲,受害树木倒伏。调查的指标主要有林木的胸径、受灾程度等,并根据下列公式计算样地折断率、倒伏率和受损率:

$$\text{折断率} = \text{折断株数} / \text{总株数} \times 100\%$$

$$\text{倒伏率} = \text{倒伏株数} / \text{总株数} \times 100\%$$

$$\text{受损率} = \text{折断率} + \text{倒伏率}$$

1.3.4 地上生物量和植被碳储量损失统计

根据林木相对生长模型(李轩然等,2006),计算理论的森林生物量,结合受损状况,计算受损区地上生物量。

千烟洲站曾对湿地松各器官的碳含量进行了测定,树干、树枝和树叶的碳含量分别为51.17%、51.37%和53.35%。将每公顷地上生物量分器官计算后,考虑权重计算地上总生物量的碳含量为51.46%(袁小华,1999; Ma *et al.*, 2008)。根据碳含量将千烟洲湿地松林生物量换算为碳密度。

折断损失生物量=(样地叶生物量+样地枝生物量)×折断率

$$\text{倒伏损失生物量} = \text{样地总生物量} \times \text{倒伏率}$$

损失地上总生物量=折断损失生物量+倒伏损失生物量

$$\text{损失植被碳储量} = \text{损失总生物量} \times 51.46\%$$

2 结果和分析

2.1 站区受损概况

通过对千烟洲站区踏查发现,严重受损的基本为湿地松林;一些位于沟谷的杉木林也有倒伏的情况出现;马尾松林、针阔混交林和常绿阔叶混交林

受损并不严重。受损的区域一般位于林缘、路边、沟边等,多呈带状或块状损毁。湿地松林树冠受损严重,倒伏情况严重;杉木树冠顶部损坏,主要为断梢、断头;马尾松受损较少;阔叶树凋落物明显增加,基本没有倒伏。

根据对站区受损生态系统的调查和评估,严重受损的受损区共有15块,总面积为7.72 hm²,占全站区面积的3.71%,占森林面积的6.12%(图2)。核心区和示范区受灾面积分别为4.78 hm²和2.94 hm²。零星林木和柑橘林等经济林的受损并不严重,具体的受损情况没有统计。根据林型分析,受损林型基本上为湿地松林,只有一块杉木林。

根据GPS调查,对15块受损区进行了空间分析。受损区斑块面积在343–20 711 m²之间;受损区的海拔在75–117 m之间,平均值为94 m;南坡和东南坡共有11块,东北坡4块;坡度较缓,平均值为10.3°;受损斑块山体阴影分析的灰度值平均为171,表明向阳区域占的比重较大。

在中亚热带季风气候控制下,冬季盛行西北风。由此推断,阴坡所受的风力应该较强;然而我们得到的结果却是向阳方向的林分损失比重较大。根据我们的调查分析发现,阳坡的林分长势较好,而植物的趋光性往往形成偏冠;连续的低温使冠层的叶片和枝条附着了冰雪,造成冠层受力不均衡,加之湿地松材质疏松,因此受损较严重。

对15个严重受损区面积与其地形因子的分析结果详见表2。由表2可知:受损面积大小与高程和坡度呈正相关关系;受损区面积与区内高程最大值的泊松(Poisson)相关系数达0.596,显著性水平为0.019。受损面积与山体阴影最小值呈负相关关系,与山体阴影最大值呈正相关关系,表明阳坡易受灾。

湿地松林植被碳储量的损失是在极端特殊的气象条件下,多种因素共同作用形成的一种灾害现

表2 受损区面积与地形因子相关系数

Table 2 The correlation coefficients between damaged area and terrain factors

高程 Altitude	受损区面积 Damaged area	坡度 Slope	受损区面积 Damaged area	山体阴影 Hill shade	受损区面积 Damaged area
最小值 Min	0.396 (0.144)	最小值 Min	-0.277 (0.317)	最小值 Min	-0.485 (0.067)
最大值 Max	0.596*(0.019)	最大值 Max	0.450 (0.092)	最大值 Max	0.500 (0.058)
平均值 Mean	0.565*(0.028)	平均值 Mean	0.022 (0.939)	平均值 Mean	0.043 (0.879)

括号内为显著性水平 p 值。*, $p < 0.05$ 。

Values in parenthesis indicate p value. *, $p < 0.05$.

象。由于微气象、局部地形、林分结构、个体差异等多种原因, 湿地松林损失程度或折断部位也有所不同。我们不能过分强调某一具体原因, 而分析所有因素也是不现实的, 所以要根据实际情况分析判断。进一步分析表明, 受损区面积(S)与该区的平均高程(Ht)呈幂函数关系($S = 4.52 \times 10^{-18} \times (Ht)^{10.513}$), 决定系数(R^2)为0.504, $p = 0.003$, $F = 13.198$ 。

尽管该区域内高程的差异并不明显, 起伏只有30多米, 但是丘陵地貌的复杂性却以高程为表征因子。即使海拔只相差10多米, 也可能是坡顶与山谷, 自然条件差异明显, 因此植被、风速、局部小气候的差异也较大。丘陵顶部往往是土壤贫瘠的部位, 气象条件较为复杂, 昼夜温差较大, 受风影响强烈, 较易倒伏。

从千烟洲受灾区域的分析中可以看出, 地形因子中作为表征因子的高程和坡度与冰雪灾害有相关关系, 随着坡度和高程的增加, 受损面积有增加的趋势。

2.2 受灾程度分析

2008年3月在3号区21块受灾样地的调查结果详见表3。由表3可知, 受损折断区(一般受灾)的胸径和林分密度小于倒伏区(严重受损区); 经过 t 检验, 折断区胸径与倒伏区胸径显著性水平为0.144; 折断区林分密度与倒伏区林分密度的显著性水平为0.477。在3号湿地松林受损区, 根据受损程度分为两类: 一类为受损较轻的区域, 即折断区; 另一类

为严重受损区, 即倒伏区。一般受损折断区的受损率平均值为16%, 基本为轻微受害, 如树梢折断、树冠受损; 倒伏区的受损率、折断率和倒伏率分别为62%、24%和38%。最严重的38号样方几乎全部倒伏。

2008年10月对雨雪冰冻灾害长期观测样地的调查结果表明: 样地面积为400 m^2 , 胸高断面面积为25.4 $m^2 \cdot hm^{-2}$, 林分密度为750株 $\cdot hm^{-2}$; 叶面积指数损失了3.16; 受损率、折断率和倒伏率分别为93%、60%和33%。样地内共有林木30株, 活立木16株, 死亡林木14株。对照样地(未受损)面积为225 m^2 , 共有43株林木, 其中活立木36株, 死亡的林木有7株, 基本为自然死亡, 这个林分结构基本上与站区湿地松林状况相近。

2.3 生物量与植被碳储量损失统计

植被碳储量损失调查结果详见表4。湿地松林受灾折断区损失的生物量为388 $g \cdot m^{-2}$, 地上植被碳储量损失为200 $g \cdot m^{-2}$; 严重受损区(倒伏区)倒伏损失生物量、折断损失生物量和总损失生物量平均值分别为3 561、726和4 287 $g \cdot m^{-2}$ 。倒伏区地上植被碳库损失量655–5 230 $g \cdot m^{-2}$, 平均值为2 206 $g \cdot m^{-2}$ 。

2008年10月补充调查的湿地松倒伏区倒伏损失的生物量、折断损失的生物量和地上部分损失的生物量总量分别为1 171、2 194和3 365 $g \cdot m^{-2}$ 。倒伏区地上植被碳库损失量约为1 731 $g \cdot m^{-2}$ 。对照区叶生物量、枝生物量、树干生物量和地上部分总生物

表3 千烟洲湿地松林受损区的灾情分析

Table 3 Damage analysis of slash pine forest at Qianyanzhou

类型 Types	样地数 Number of plot	胸径 Diameter at breast height (cm)	不同受灾程度林木的株数 Number of trees for different classes of damage					林分密度 Forest density (individuals· hm^{-2})	受损率 Damage rate	折断率 Branches breakage rate	倒伏率 Stem breakage rate
			1	2	3	4	5				
折断区 Branches breakage area	9	16.8 (14.1–18.4)	11	1	0	1	0	1289 (900–2400)	16% (0–44%)	16% (0–44%)	0
倒伏区 Severely damaged area	12	17.2 (13.7–19.8)	7	2	1	1	5	1550 (600–2400)	62% (16%–100%)	24% (0–67%)	38% (7%–100%)

表4 千烟洲湿地松林受损区的地上生物量与植被碳储量损失

Table 4 The loss of plant carbon and aboveground biomass in damaged area of slash pine forest at Qianyanzhou

类型 Type	样地数 Number of plot	倒伏损失生物量 Biomass loss for stem breakage ($g \cdot m^{-2}$)	折断损失生物量 Biomass loss for branches breakage ($g \cdot m^{-2}$)	损失生物量 Biomass loss ($g \cdot m^{-2}$)	植物碳储量损失 Plant carbon loss ($g \cdot m^{-2}$)
折断区 Branches breakage area	9	0	388 (0–831)	388 (0–831)	200 (0–427)
倒伏区 Severely damaged area	12	3561 (797–9534)	726 (0–1983)	4287 (1274–10164)	2206 (655–5230)

表5 受损湿地松林地上植被碳储量损失与影响因子的相关矩阵

Table 5 The matrix between plant carbon loss and impact factors in slash pine forest

	胸径 Diameter at breast height	林分密度 Forest density	受灾率 Damage rates	折断率 Branches breakage rates	倒伏率 Stem breakage rates
林分密度 Forest density	-0.468*				
受灾率 Damage rates	0.299	0.032			
折断率 Branches breakage rates	0.129	0.220	0.475*		
倒伏率 Stem breakage rates	0.261	-0.097	0.844**	-0.070	
植被碳储量损失 Carbon loss	0.232	0.254	0.804**	0.224	0.776**

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

量分别为953、2 235、7 146和10 850 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

3号受损区总面积为20 711 m^2 ，其中倒伏区约占57%，损失的植被碳储量平均值为2 206 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ；折断区约为43%，损失的植被碳储量约为200 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ；3号区植被碳储量损失量加权平均值为1 346 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。4号严重受损区面积为8 899 m^2 ，植被碳储量损失量平均为1 731 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。综合考虑两块受损区面积及受损程度，倒伏区植被碳储量损失加权平均值为1 462 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

千烟洲森林面积为126.18 hm^2 ，其中受损区(有倒伏的林木)总面积为7.72 hm^2 ，植被碳储量损失量为1 462 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ；其余森林(面积为118.46 hm^2)植被碳储量损失量为200 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。根据上述结果，站区森林植被碳储量损失约为349.7 $\times 10^3$ kg，平均为277 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

根据对21块样地的相关分析，林分密度与胸径呈负相关关系(详见表5)，相关系数为-0.468；湿地松林植被碳储量损失与林分密度相关关系并不显著，相关系数为0.254。植被碳储量损失与受灾率和倒伏率呈明显的正相关关系。

3 讨论

湿地松林是典型的外来树种，以其生长快、固土效果显著的特点，在造林初期发挥了极大的作用；然而，随着湿地松人工林的生长、成熟，其结构单一、抗性较低的缺点随之显现出来。1995年在我国18个省区统计的栽培面积达190.7万 hm^2 (陈启基等, 1995)。由于湿地松林能在较短的时期内带来经济利益，其栽种面积增加趋势明显。据统计，2007年前后江西省国外松(主要为湿地松)已达56.99万 hm^2 ，约占人工林总面积的27.4% (吴长飞, 2007)。千烟洲湿地松人工林存在或面临的问题正是我国南方人工林经营管理过程中普遍存在的问题。

2008年1月至2月持续低温、阴雨潮湿等极端气象条件是这次冰雪灾害的直接原因。风向和风力是不可忽视的原因，当大量的冰凌附着在林木上，摇摇欲坠时，任何风都具有很大的破坏性，导致灾害的发生。冰雪灾害期间最大降水量发生在2月1日，当天降水量达53.9 mm；日平均气温为0.1 $^{\circ}\text{C}$ ，最高气温只有0.4 $^{\circ}\text{C}$ ；而恰恰在这一天，平均风速却达到了2.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，是灾害期间风力最大的一天。根据推测，正是2月1日的低温强降雨以及大风，使此次冰雪灾害剧烈升级；大多数林木倒伏很可能就发生在这天。2008年2月1日极其特殊的气象条件是这次灾害程度加重的重要原因，这种多个恶劣气象因素叠加在一起的情况较为罕见。

3.1 湿地松林受灾因素分析

湿地松林在此次冰雪灾害中受损严重，受灾类型主要有树体折断、倒伏和压弯等。一方面是地形、小气候等外界因素的影响；另一方面则可能是与其树种、林龄、冠形结构、材质、枝角、根系分布等内因有关。此外，还与人为因素的影响有密切关系，如割脂等破坏行为。

3.1.1 树种在灾害中受损差异明显

湿地松林受损严重，而同龄同密度同地形的马尾松林却表现出较强的抗性。首先，冠形和材质可能是主要原因。通常认为树冠较窄或圆柱状的树冠可能不易倒伏，开阔的树冠和不对称的树冠更易被压断。湿地松树冠近椭圆形，容易受力，从基部折断；马尾松树冠近塔形，树冠受力较为均匀；杉木树冠较窄，往往会断头，但倒伏较少。材质与受损类型和程度关系密切，需进一步调查研究。其次，根系分布是林木倒伏不可忽视的重要因素。对千烟洲站的调查表明：马尾松主根系较浅，但是侧根很多；湿地松主根深，但侧根和细根较少。另外一个重要原因在于湿地松叶性的特征。湿地松针叶粗而

长,比马尾松的叶片肥厚,这样很容易产生着力点;湿地松针叶为三针一束或两针一束,而马尾松都为两针一束,这样湿地松增加了叶片表面积,能产生更多的冰柱。相关研究也表明:同龄的湿地松林的叶面积指数和叶生物量均大于马尾松林(李轩然等,2006)。另外,湿地松倒伏较多与人工割脂可能也有一定的关系,尽管割脂的面积不大,但是不可避免地对树木本身的抗性会产生较大影响,这有待于进一步调查。

3.1.2 地形对于森林受灾具有重要的作用

Kenderes等(2007)对匈牙利Börzsöny山区的研究表明,并非所有的冰雪灾害与地形(海拔和坡度)都有明显的统计学关系,但是地形因子可能会加剧受灾的程度(Bragg *et al.*, 2003),特别是高海拔地区更易遭受冰冻灾害。海拔和一定的坡向导致森林暴露在更强的风口,从而更易受灾(Lafon *et al.*, 1999)。本研究调查的区域相对较小,地形并不十分复杂,初步表明受损程度与海拔有一定关系,阳坡的林分损失略重,具体原因尚待进一步分析研究。

3.1.3 林分密度和林龄是受灾主要影响因素之一

过高的林分密度会导致森林生长空间狭小,而林木为了争夺阳光等资源,树形往往会变得瘦高,容易受损(Van Dyke, 1999),这种现象在人工纯林中表现突出。随着树龄增加,受灾程度会加重(Boerner *et al.*, 1988; Smith, 2000);但是很多研究者认为,大尺寸的老树对冰灾的抗性更强(Bragg *et al.*, 2003)。根据作者实地调查,幼龄的人工林并没有受到严重的灾害,中龄的人工林受灾程度更严重一些;但老龄的天然硬叶阔叶林受损相对较轻,林下小灌木及乔木小苗基本没有受损。

3.1.4 森林受损的最直接因素应为冰的厚度及持续时间

冰雪灾害是一个复杂的扰动,受损的多样性正是复杂性功能的重要体现(Bragg *et al.*, 2003)。森林受损程度受许多因素影响,难以用单一的因素进行分析,最直接的因素是冰的厚度和持续时间。如果结冰厚度很低,并不会对林木造成损害。如果积累的冰凌超过1.3 cm就有可能断枝,造成严重损害(Lemon, 1961; Van Dyke, 1999);如果枝条上冰的重量超过木材的抗压能力,或枝条薄弱区域冰的重量超过载荷,就可能导致枝条折断(Hauer *et al.*, 1993; Van Dyke, 1999)。

3.2 灾害损失与积极应对

千烟洲站区森林乔木层碳储量平均损失约为 $277 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,倒伏区碳储量损失 $1\ 462 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,对照样地的乔木层地上部分碳储量为 $5\ 583 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。受损森林和倒伏区损失的碳储量分别是地上乔木层碳储量的4.96%和25.48%。加拿大老龄温带落叶阔叶林受1998年大冰暴的影响,每公顷损失的生物量为 $19.7 \times 10^3 \text{ kg}$ 或 33.6 m^3 木质残体(woody debris),损失了7%–10%的地上生物量,为森林年凋落量的10–20倍以上,是历史上受损最为严重的记录(Hooper *et al.*, 2001)。通过灾情对照,说明此次千烟洲人工林受灾比较严重。

在全球变化背景下,极端气候事件的频度和强度均呈增加趋势。与气候变化相关的突发性极端气候事件对生态系统的影响可能会更加严重,这不仅会严重损害生态系统,甚至会导致生态系统的彻底崩溃(IPCC, 2007)。森林生态系统在维护国家和区域的生态安全方面具有重要作用,在受灾风险增加的趋势下,亟需积极应对,加强森林管理,调整林分密度、树种组合和林龄结构等,增强人工林生态系统的稳定性和抗逆性。

致谢 国家自然科学基金(30870444)、国家重点基础研究发展计划(973计划)(2009CB421101)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-14)和中国科学院百人计划项目资助。

参考文献

- Abell CA (1934). Influence of glaze storms upon the hardwood forests in the southern Appalachians. *Journal of Forestry*, 32, 3537.
- Ashe WW (1918). Note on "Ice Storms in the southern Appalachians" by Verne Rhoades. *Monthly Weather Review*, 46, 374.
- Boerner RE, Runge SD, Cho DS, Kooser JG (1988). Localized ice storm damage in an Appalachian Plateau watershed. *American Midland Naturalist*, 119, 199–208.
- Bragg DC, Shelton MG, Zeide B (2003). Impacts and management implications of ice storms on forests in the southern United States. *Forest Ecology and Management*, 186, 99–123.
- Chen QJ (陈启基), Ru ZZ (茹正忠), Pan W (潘文), Long YZ (龙应忠), Wei BS (魏柏松) (1995). The cultivation zoning and base-layout of slash pine in China. *Forestry Science and Technology of Guangdong Province* (广东林业科技), 11(4), 1–6. (in Chinese)
- Dale VH, Joyce LA, McNulty S, Neilson RP, Ayres M, Flannigan MD, Hanson PJ, Lrland LC, Lugo AE, Peterson CJ,

- Simberloff DL, Swanson FJ, Stocks BJ, Wotton BM (2001). Climate change and forest disturbances. *BioScience*, 51, 723–734.
- Hauer RJ, Hruska MC, Dawson JO (1994). Trees and ice storms, the development of ice storm resistant urban tree populations. <http://ceinfo.unh.edu/icestorm.htm>. Cited 25 Jul 2009
- Hauer RJ, Wang W, Dawson JO (1993). Ice storm damage to urban trees. *Journal of Arboriculture*, 19, 187–193.
- Hooper MC, Arian K, Lechowicz MJ (2001). Impact of a major ice storm on an old-growth hardwood forest. *Canadian Journal of Botany*, 79, 70–75.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). *Climate Change in 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kenderes K, Aszalós R, Ruff J, Barton Z, Standovár T (2007). Effects of topography and tree stand characteristics on susceptibility of forests to natural disturbances (ice and wind) in the Börzsöny Mountains (Hungary). *Community Ecology*, 8, 209–220.
- Lafon CW, Graybeal DY, Orvis KH (1999). Patterns of ice accumulation and forest disturbance during two ice storms in southwestern Virginia. *Physical Geography*, 20, 97–115.
- Lautenschlager RA, Nielsen C (1999). Ontario's forest science efforts following the 1998 ice storm. *Forestry Chronicle*, 75, 633–641.
- Lecomte EL, Pang AW, Russell JW (1998). *Ice Storm 98. Institute for Catastrophic Loss Reduction (ICLR) Research Paper Series, No. 1*. Institute for Catastrophic Loss Reduction, Ottawa, Canada.
- Lemon PC (1961). Forest ecology of ice storms. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 88, 21–29.
- Li HT (李海涛), Yu GR (于贵瑞), Li JY (李家永), Liang T (梁涛), Chen YR (陈永瑞) (2007a). Dynamics of litter decomposition and phosphorus and potassium release in Jinggang Mountain region of Jiangxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 18, 233–240. (in Chinese with English abstract)
- Li HT (李海涛), Yu GR (于贵瑞), Li JY (李家永), Liang T (梁涛), Chen YR (陈永瑞) (2007b). Decomposition dynamics and nutrient release of litters for four artificial forests in the red soil and hilly region of subtropical China. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 27, 898–908. (in Chinese with English abstract)
- Li XF (李秀芬), Zhu JJ (朱教君), Wang QL (王庆礼), Liu ZG (刘足根) (2005). Forest damage induced by wind/snow: a review. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 25, 148–157. (in Chinese with English abstract)
- Li XR (李轩然), Liu QJ (刘琪璟), Chen YR (陈永瑞), Hu LL (胡理乐), Yang FT (杨凤亭) (2006). Aboveground biomass of three conifers in Qianyanzhou plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 17, 1382–1388. (in Chinese with English abstract)
- Ma ZQ, Liu QJ, Wang HM, Li XR, Zeng HQ, Xu WJ (2008). Observation and modeling of NPP for *Pinus elliottii* plantation in subtropical China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51, 955–965.
- Ma ZQ (马泽清), Liu QJ (刘琪璟), Xu WJ (徐雯佳), Li XR (李轩然), Liu YC (刘迎春) (2007). Carbon storage of artificial forest in Qianyanzhou, Jiangxi Province. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 43(11), 1–7. (in Chinese with English abstract)
- Mattson KG, Swank WT, Waide JB (1987). Decomposition of woody debris in a regenerating, clearcut forest in the southern Appalachians. *Canadian Journal of Forest Research*, 17, 712–721.
- McCarthy HR, Oren R, Kim HS, Johnsen KH, Maier C, Pritchard SG, Davis MA (2006). Interaction of ice storms and management practices on current carbon sequestration in forests with potential mitigation under future CO₂ atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 111 (D15103), 1–10.
- Michaels G, Cherpack J (1998). Ice storm ravages northern forests. National Association of Conservation Districts, Washington, DC. Forestry Notes 7.
- Scarr TA, Hopkin AA, Howse GM (2003). Aerial sketch-mapping of the 1998 ice storm in eastern Ontario. *Forestry Chronicle*, 79, 91–98.
- Scientific Investigation Team of Chinese Academy of Sciences for Southern Mountainous Areas, Management Office of Natural Resources in Ji'an Prefecture of Jiangxi Province (中国科学院南方山区综合科学考察队, 江西省吉安地区自然资源开发治理办公室) (1989). *Management and Development of Red Hilly Area: Experimental Study in Qianyanzhou (红壤丘陵综合开发治理——千烟洲综合开发治理试验研究)*. Science Press, Beijing. 1–23. (in Chinese)
- Shen GF (沈国舫) (2008). Concerned about the impact on forestry in China for freezing rain and snow disaster, the words from editor in chief. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 44(3), 1. (in Chinese)
- Smith WH (2000). Ice and forest health. *Northern Journal of Applied Forestry*, 17, 16–19.
- Van Dyke O (1999). A literature review of ice storm impacts on forests in Eastern North America, in Technical Report 112, Ontario Ministry of Natural Resources Southcentral Sciences Section, 1–29.
- WU CF (吴长飞) (2007). *Plantations Status, Existing Problems and Improvement Measures in Jiangxi Province (江西省人工林现状、存在的问题及其改进措施)*. <http://www.cnj-forestry.cn/files/jishu/2007/2007.11.13-11.17/9c1.pdf>. Cited 25 Jul 2009 (in Chinese)
- Yuan XH (袁小华) (1999). *Effects of Land Use on Terrestrial Ecosystem Organic C in Red Soil Hilly Region in Subtropical China (红壤丘陵区土地利用变化对陆地生态系统有机碳储量的影响)*. Master degree dissertation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing. 1–72. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 曹坤芳 责任编辑: 王 葳