

DOI: 10.5846/stxb201309222322

王静, 温学发, 王辉民, 王晶苑. 冰雪灾害对中亚热带人工针叶林净初级生产力的影响. 生态学报, 2014, 34(17): 5030-5039.

Wang J, Wen X F, Wang H M, Wang J Y. The effects of ice storms on net primary productivity in a subtropical coniferous plantation. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 5030-5039.

冰雪灾害对中亚热带人工针叶林净初级生产力的影响

王 静, 温学发*, 王辉民, 王晶苑

(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)

摘要: 结合中亚热带江西千烟洲人工针叶林 2005、2008 和 2011 年 3 次树木清查数据以及树木相对生长方程, 比较了 2008 年 1 月南方冰雪灾害前后的 NPP, 评价了森林生态系统灾后的恢复能力。结果表明: 乡土树种马尾松 (*Pinus massoniana*) 与杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 比外来树种湿地松 (*Pinus elliotii*) 抗灾害能力强; 在个体水平上, 胸径 (D) 较大的树木抗灾害能力较差。灾后马尾松与杉木的 D 增长率降低, 而湿地松增大。冰雪灾害导致大量碳 (10.44 t C/hm^2) 从乔木层碳库转移到死生物量碳库, 占乔木层碳储量的 18.28%。灾前 NPP 和碳利用效率 (CUE) 分别为 $736.23 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 0.41; 灾后经过近 4 年的恢复, NPP 和 CUE 分别为 $683.08 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 0.38。

关键词: 冰雪灾害; 净初级生产力; 碳利用效率; 相对生长方程

The effects of ice storms on net primary productivity in a subtropical coniferous plantation

WANG Jing, WEN Xuefa*, WANG Huimin, WANG Jingyuan

Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Chinese Academy of Sciences; Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: In the context of global warming, climate change will increase the occurrence probability of extreme weather events such as severe droughts and ice storms. In recent years, the increasing frequency of ice storms in southern China has prompted us to study the impact of these weather events on the net primary productive (NPP) of forest ecosystem, particularly plantations, which are more sensitive to extreme weather events. Severe ice storms during mid-January and mid-February 2008 in southern China provided an opportunity to study the effects of this disturbance on the NPP of a plantation. We used data from field inventories and eddy covariance observations to evaluate the direct impact of the ice storms and the post-ice storm recovery in a subtropical plantation at Qianyanzhou, Jiangxi Province. We developed biomass allometric equations for the three major plantation species; estimated the NPP before and after the ice storms by combining the forest inventories for 2005, 2008, and 2011; and evaluated the recovery ability of the ecosystem. We obtained the following results. (1) The optimal biomass model developed from our survey data was a power function model. The biomass model fit for slash pine (*Pinus elliotii*) and Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) was improved after adding tree height as a further independent variable, whereas that of Masson pine (*Pinus massoniana*) was not. Compared to the biomass data collected from other stands calculated using allometric equations, the biomass calculated using the optimal model was closest to the observed values. (2) The exotic species slash pine was more severely damaged by ice storms compared with the native species Masson pine and Chinese fir; this difference can be attributed to the specific characteristics of the slash pine. A

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2012CB416903); 国家自然科学基金项目 (31130009); 中国科学院知识创新工程重要方向青年人才项目 (KZCX2-EW-QN305)

收稿日期: 2013-09-22; 修订日期: 2014-06-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wenxf@igsrr.ac.cn

large number of broadleaved trees regenerated in the study plot after the ice storms. (3) At the individual level, the extent of damage to trees varied with the stem diameter at breast height (D); trees with a larger D were more susceptible to ice storm damage than trees with a smaller D . Prior to the ice storms, the D growth rate of Masson pine and Chinese fir increased with increasing D class (the maximum values were 1.9 and 0.8 cm/a, respectively), whereas the D growth rate of slash pine increased with decreasing D class, with a maximum value of 0.1 cm/a. Post-ice storm, the relationships between the D growth rate and D class of the three species were exactly reversed. (4) The carbon (C) density of living trees in tree layer was 57.10 t C/hm² pre-ice storm, but decreased to 46.66 t C/hm² (a reduction of -10.44 t C/hm² or 18% of the original living tree biomass pool) post-ice storm. The NPP was 736 g C m⁻² a⁻¹ pre-ice storm, and the carbon-use efficiency (the ratio of NPP to gross primary production, CUE) was 0.41. After nearly 4 years of recovery, the NPP was 683.08 g C m⁻² a⁻¹ and the CUE was 0.38. Furthermore, the biomass C storage of living trees had increased to 54.38 t C/hm².

Key Words: ice storm; net primary productivity; carbon-use efficiency; allometric equation

全球变化背景下,极端天气发生概率逐年增加。全球每年有数百万公顷的森林遭受飓风、冰雪灾害、干旱等极端天气的影响^[1],其生物多样性、生产力、养分循环和群落对物种入侵的阻力等均发生变化^[2]。与天然林相比,人工林更易受极端天气的影响,甚至在短期内转为碳源^[3]。中国南方森林占中国总碳汇的 65%^[4],50%以上的森林是 20 世纪 80 年代营造的人工林^[4],具有非常高的植被生产力^[5],对全球碳汇格局具有重要影响^[3]。然而,近年来中国南方人工林经常遭受冰雪灾害,亟需加强冰雪灾害对人工林生态系统影响的研究。

目前,关于中国南方冰雪灾害对人工林生态系统影响的研究主要集中在树木受损情况(机械损失:树冠、树干折损、树木倒伏等;生理损伤:冻害^[6])、受损机制、群落结构及碳储量损失几方面^[7]。树木受损情况与树种特性、林分特征及立地条件密切相关^[6,8-14]。不同树种因树种特性及地形差异在相同地区受损程度不同;外来物种>乡土物种^[6];高海拔、迎风坡向树木>低海拔、被风坡树木^[6]。另外,受林分特征影响,不同林分受灾情况不同:人工林>天然林^[6,10];落叶树种>常绿树种^[15];针叶林>阔叶林^[16]。冰雪灾害引起的树木倒伏、折损导致乔木层生物量损失,转移至凋落物中^[8,15]。另外,树木损伤形成林分空隙,加快了其他物种的入侵速度^[10]。

由于极端天气对生态系统的影响时间远超过了其持续时间^[17],灾后对生态系统的长期监测尤为重要。然而,国内关于人工林在冰雪灾害后生产力变化的报道还较少。2008 年南方冰雪灾害后,江西千烟洲针叶人工林潜在生产力降低^[3],碳汇损失 66 g

C/m²^[18];浙江省安吉县毛竹林的总初级生产力降低 3%^[19]。灾后人工林净初级生产力(NPP)变化情况的研究目前还没有。

一般情况下,利用特定时间段内生物量的差值计算 NPP。树木相对生长方程结合林分调查数据是计算生物量的主要方法^[20],但存在一定的不确定性^[9];相同树种在不同立地条件下的相对生长方程存在差异^[21],直接引用其他区域的相对生长方程将为 NPP 的准确计算带来误差^[22]。另外,部分研究认为利用胸径(D)这单一变量即可准确拟合树木相对生长方程^[23],但也有研究认为增加树高(H)这一变量后可提高方程计算生物量的效果^[24]。

2008 年 1 月,中国南方遭受了 50 年一遇的冰雪灾害,大面积的树木倒伏与折损。这为我们研究冰雪灾害对生态系统 NPP 的影响提供了契机。碳利用效率(CUE)不仅能反映森林生态系统将大气中的碳转化为陆地生物量的能力^[25],还可以作为生态系统受干扰后恢复能力的指标。因此,本研究利用江西千烟洲地区冰雪灾害前后(2005、2008 和 2011 年)3 次生物量清查数据,拟合并选择合适的树木相对生长方程;对比冰雪灾害前后的 NPP;结合凋落物相关数据,计算 CUE,评价冰雪灾害之后生态系统的恢复能力。

1 研究方法

1.1 研究区概况

中国生态系统研究网络(CERN)千烟洲红壤丘陵农业开发试验站(26°44'52"N,115°03'47"E)位于江西省泰和县境内,海拔 102 m,相对高度 20—

50 m, 土壤类型以红壤为主^[26], 属中国南方典型红壤丘陵区。试验区年平均气温 17.9 °C, 年平均降水量 1485.1 mm, 降水量年际变化大, 季节分配不均匀, 水热不同步, 具有典型的亚热带季风气候特征。试验区的原地带性植被为亚热带常绿阔叶林, 由于大量人为干扰逐渐退化为灌木和草丛, 经过综合治理后, 现主要为 1985 年左右营造的人工林。本试验地为以通量观测塔为中心的 1 hm² 的永久性样地, 样地内 3 个主要建群种马尾松、湿地松和杉木以 49:48:3 的面积比例呈块状混生, 并伴生少量以木荷为主的阔叶树^[27]。林下灌丛以白栎 (*Quercus fabri*)、欏木 (*Loropetalum chinense*)、美丽胡枝子 (*Lespedeza formosa*) 组成; 草本植物以刺芒野古草 (*Arundinella setosa*) 为主^[28]。

1.2 数据获取与分析

分别在 2005 年 7 月、2008 年 1 月和 2011 年 10 月对样地 (1 hm²) 内乔木层 D 和树高 H 进行调查。马泽清等^[8]在灾后 (2008 年 3 月) 调查了样地内 21 个 (10 m×10 m) 湿地松样方的受损情况。

本文根据 2005 年 7 月乔木层 D 调查结果^[26,29-33], 按等面积径级株数法选取马尾松 (8 株)、湿地松 (8 株) 和杉木 (5 株) 标准木, 伐倒, 获取标准木各器官的鲜重和干鲜比。由于相同树种地上部分

与地下部分生物量比值较稳定^[34], 本研究只对平均木的根部生物量进行调查, 计算 1 hm² 样地中单株树木平均投影面积下的所有根系生物量。树木各器官取一定比例样品烘干称重^[27]。

2005 年 7 月, 在样地内随机设置草本、灌木样方各 6 个, 利用收获法获取林下植被生物量, 烘干称重^[27]。2003 年, 样地内随机设置了 24 个凋落物收集器, 每月收集 1 次^[27], 烘干称重。

1.3 数据分析

1.3.1 森林群落 NPP 的计算

森林群落 NPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 是指特定时间段内植被生物量 (B) ($\text{g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)、凋落物量 (L , $\text{g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 之和, 由于动物取食量较少, 在本研究中不予考虑。

$$\text{NPP} = (B + L) / N$$

式中, B 包括乔木层生物量和林下植被生物量; $N(a)$ 表示两次清单调查的时间间隔。

(1) 乔木层生物量

1) 树木相对生长方程的拟合

利用最小二乘法 (SPSS 13.0) 将标准木与平均木生物量分别以 D^2H 和 D 为自变量拟合曲线, 以决定系数 (R^2) 和均方根误差 (SE) 为标准, 选取最优的方程。结果表明幂函数拟合方程的效果最好, 方程系数见表 1。

表 1 分别以树木胸径 (Stem diameter at breast height, D)、树高 (Tree height, H) 和 D 为自变量的相对生长方程, a 、 b 为方程系数

Table 1 The allometric equations with stem diameter at breast height (D) and tree height (H) or D as independent variable, a and b are coefficients of the equation

树种 Species	$y = a(D^2H)^b$				$y = aD^b$			
	a	b	R^2	SE	a	b	R^2	SE
马尾松 <i>P. massoniana</i>	0.0647	0.8817	0.9627	0.1295	0.3278	1.9875	0.9777	0.1001
湿地松 <i>P. elliotii</i>	0.0533	0.8910	0.9897	0.0595	0.2038	2.1316	0.9790	0.0851
杉木 <i>C. lanceolata</i>	0.0132	1.0301	0.9960	0.0692	0.0494	2.5629	0.9593	0.2216

2) 树木相对生长方程精度检验

以平均精度 (AA) (SPSS 13.0) 为标准检验拟合的相对生长方程预测效果 (表 2)^[31]。

$$AA = 1 - \sum (| \text{实际值} - \text{估计值} | / \text{实际值}) / n$$

式中, 实际值表示标准木的实际生物量, 估计值表示拟合的相对生长方程计算的生物量, n 表示标准木的数量。

本研究拟合的相对生长方程精度大部分在 0.9 以上 (杉木以 D 为自变量拟合的方程精度为 0.85) (表 2)。

表 2 树木单株生物量最优相对生长方程预测效果^[3]

Table 2 Predictive effect of optimal allometric equation for estimating single-tree's biomass^[3]

相对生长方程 allometric equation	马尾松 <i>P. massoniana</i>	湿地松 <i>P. elliotii</i>	杉木 <i>C. lanceolata</i>
$y = a(D^2H)^b$	0.91	0.96	0.95
$y = aD^b$	0.94	0.94	0.85

3) 不同区域树木相对生长方程计算生物量对比

泰勒图可以用来揭示模型模拟结果与观测值的匹配程度, 本研究利用泰勒图 (matlab 2013a) 对比分

析本研究拟合的树木异速生长方程与其他地区的异速生长方程计算的树木生物量。

4) 阔叶树生物量计算

本研究区阔叶树木较少,且以木荷为主,本文直接引用其他地区木荷的树木相对生长方程^[35-36]: $y = 1.3569 \times (0.0245 \times (D^2 H)^{1.0118})$ 来计算样地内部阔叶树种生物量。

(2) 凋落物生物量

本研究区域从 2003—2007 年每月收集一次凋落物,2008—2011 年数据缺。本研究样地邻近条件相似林分年凋落物量与乔木层活立木年生长量存在线性关系^[28],本文本研究利用 2005 年 7 月—2007 年 12 月这段时间的年凋落物量与乔木层生物量年增长量的关系($y = 1.66x$)计算 2008 年 2 月—2011 年 10 月的凋落物量。由于冰雪灾害后林分年凋落物量减少^[37],直接用未受损林分年凋落物量与乔木层活立木年增长量关系推算高估灾后林分的凋落物量。

(3) 倒木生物量

3 次树木清查结果显示:2005 年 7 月—2008 年 1 月,马尾松、湿地松和杉木死亡率分别为 9.5%、14.4%和 2.1%;2008 年 1 月—2011 年 10 月分别为 11.1%、31.4%和 5.4%。另外,马泽清等^[8]在灾后的调查结果显示:马尾松与杉木受损较小,湿地松受损严重,倒伏区折断率为 38%,冰雪灾害长期影响观测样地内倒伏率为 33%。这表明 2008 年 1 月—

2011 年 10 月死亡的树木基本上是由冰雪灾害引起的,即这个时间段内的倒木生物量与冰雪灾害引起的倒木生物量近似相等。利用树木相对生长方程与林分清单调查数据计算倒木生物量。结合各树种的碳密度,计算冰雪灾害引起的生态系统碳库之间的碳转移量。

1.3.2 碳利用效率

在生态系统尺度上,总初级生产力与总生态系统生产力(GEP)相等。本研究利用涡度相关技术计算 $GEP(g C m^{-2} a^{-1})$ ^[38]:

$$GEP = \sum GEP_i / N$$

式中, GEP_i 表示每个月的总生态系统生产力($g C m^{-2} a^{-1}$); N 表示时间间隔(a)。碳利用效率(CUE):

$$CUE = NPP / GEP。$$

2 结果与讨论

2.1 不同区域相对生长方程计算生物量的差异

本研究拟合的树木相对生长方程计算 3 个针叶树种生物量与观测值最为接近,而引用其他区域的方程计算误差较大(图 1)。这表明本研究选取的标准木数量虽少,但拟合的方程适用于本研究地,直接引用其他区域的方程将会带来较大误差。湿地松与杉木以 $y = a(D^2 H)^b$ 计算生物量的精度高于 $y = D^b$,马尾松则与之相反(图 1)。为统一计算,本研究利用 $y = a(D^2 H)^b$ 计算各树种生物量。

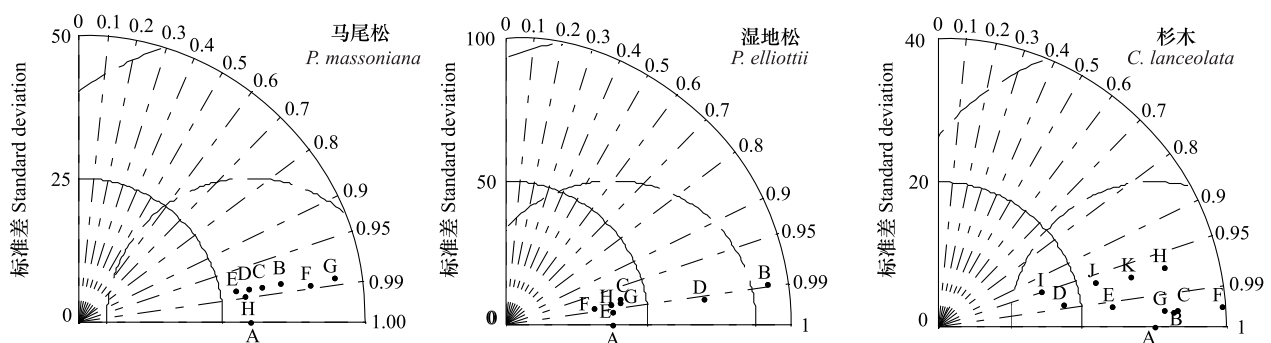


图 1 对比分析不同相对生长方程计算马尾松、湿地松和杉木生物量的效果

Fig.1 Comparison of different allometric equation for estimating biomass of masson, slash pine and fir

马尾松:A 表示观测值、B^[39]、C^[40]、D^[41]、E($y = a(D^2 H)^b$)、F^[30]、G^[40]、H($y = aD^b$);湿地松:A 表示观测值、B^[42]、C^[43]、D^[29]、E($y = a(D^2 H)^b$);F^[44]、G^[28]、H($y = aD^b$);杉木:A 表示观测值、B^[33]、C^[45]、D^[32]、E^[46]、F^[47]、G($y = a(D^2 H)^b$);H^[33]、I^[32]、J^[46]、K($y = aD^b$)

2.2 冰雪灾害前后林分动态

将 D 以 2 cm 为一个径级分组,结果显示:2005

年 7 月和 2008 年 1 月马尾松 D 在第 6 个径级(10—12 cm)出现峰值;湿地松 D 偏大,峰值在第 8 个径级

(14—16 cm); 杉木在第 7 个 (12—14 cm) 径级。2011 年 10 月, 马尾松、湿地松、杉木径级分布的峰值分别第 7、10、10 个径级 (图 2)。3 个针叶树种径级峰值在冰雪灾害过后向右偏移。阔叶树种 *D* 灾前多集中于 2、3 两个较小径级, 且数量较少; 灾后, 3、4、5 径级的数量显著增多。这表明冰雪灾害形成的林隙促进了阔叶树种进入样地的速率, 林分物种组成发生了变化。

本研究区不同树种受冰雪灾害的影响存在差异, 湿地松受灾情况最为严重, 马尾松次之, 杉木最小 (图 2)。这表明外来树种受灾程度大于乡土树种, 与本区域其他灾后调查结果一致^[6,8]。地形对人

工林受灾程度影响较大^[9], 但由于本研究区面积为 1 hm², 范围小, 地形条件较为一致, 不同树种受灾情况的差异主要是由其自身生物学特性决定的。湿地松的针叶结构^[8]导致同龄湿地松林叶面积指数大于马尾松林^[26]; 树冠近似椭圆^[8]; 树干的尖削度小^[6]; 主根深但侧根少^[8]; 因原产地为美洲沿海温暖湿润地区, 生长快, 材质相对于乡土树种马尾松和杉木疏松^[8], 以上特征导致湿地松在树冠积累大量冰雪之后更容易倒伏。另外, 马泽清^[8]、邵全琴等^[6]认为割脂也可能是湿地松、马尾松受灾较为严重的一个因素, 割脂人为地降低树干的机械结构强度。

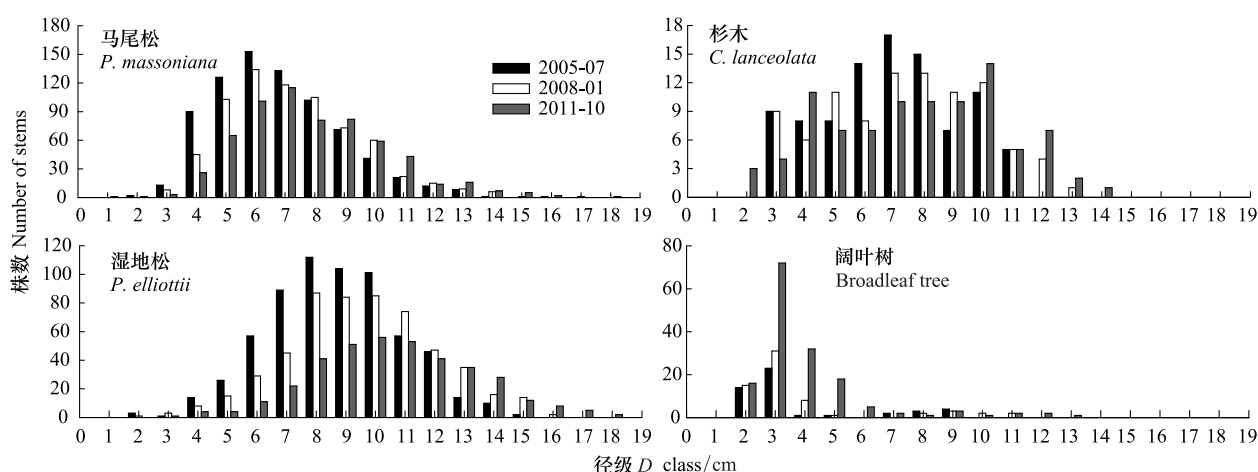


图 2 2005 年 7 月、2008 年 1 月和 2011 年 11 月 3 个主要树种和阔叶树种的径级分布

Fig.2 Stem diameter at breast height (*D*) class distributions of the three main species and the broadleaf tree, respectively in July 2005, January 2008 and November 2011

在个体水平上, 树木 *D* 是决定其对抗灾害能力的决定因子。先前有研究表明树木的径级越大, 越易受冰雪灾害的影响^[48], 但是也有相反结论的报道^[49], 而 Zhou^[50]认为冰雪灾害引起的树木死亡与 *D* 径级没有关系。本研究中马尾松、湿地松自然死亡主要发生在较小径级, 而冰雪灾害引起的树木死亡主要集中在较大径级 (图 3)。这表明该地区树干径级越大树种抗冰雪灾害的能力越弱。这可能是由于大径级树木更易腐朽、更易受外因 (昆虫、病害的侵袭) 影响, 树干力学性能相对于较小径级树木低^[54]。另外, 较大径级树木树冠普遍偏大, 积累大量冰雪后, 容易风折、倒伏^[51-52]。

冰雪灾害前, 马尾松与杉木 *D* 增长率随径级的增大而增大, 最大值分别为 1.9 和 0.8 cm/a; 而湿地

松增长率随径级增大而减小, 且增长缓慢, 最大值为 0.1 cm/a (图 4)。冰雪灾害后, 3 个主要针叶树种 *D* 增长率与 *D* 的关系则完全相反 (图 4)。马泽清等^[53]研究发现湿地松在林龄 20a 左右时因林分密度过大、树木可利用资源降低, *D* 增长率开始降低。灾前研究区内湿地松林龄为 23a, *D* 增长率较低为正常现象。灾后, 湿地松大径级范围大量倒伏、折损, 活立木周围空间变大、可利用资源增加, 树冠向四周扩展, 叶面积增加, 从而使湿地松 *D* 增长率增大。而马尾松、杉木两个树种则可能是因为在灾前郁闭度较小、可利用资源较多, *D* 增长率较大; 由于受冰雪灾害的影响较小, 灾后随着林分郁闭程度增加, 可利用资源减小, *D* 增长率降低。

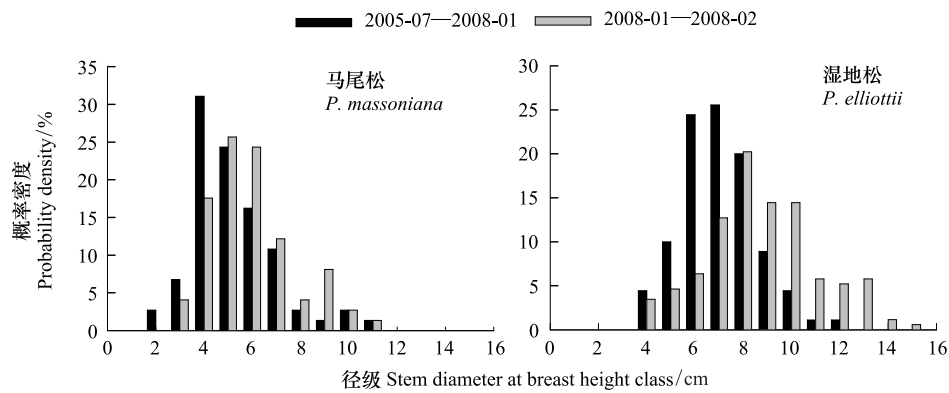


图3 马尾松与湿地松的树木死亡径级分布概率

Fig.3 Probability density distributions for stem diameter at breast height class of tree mortality of mason pine and elliotti

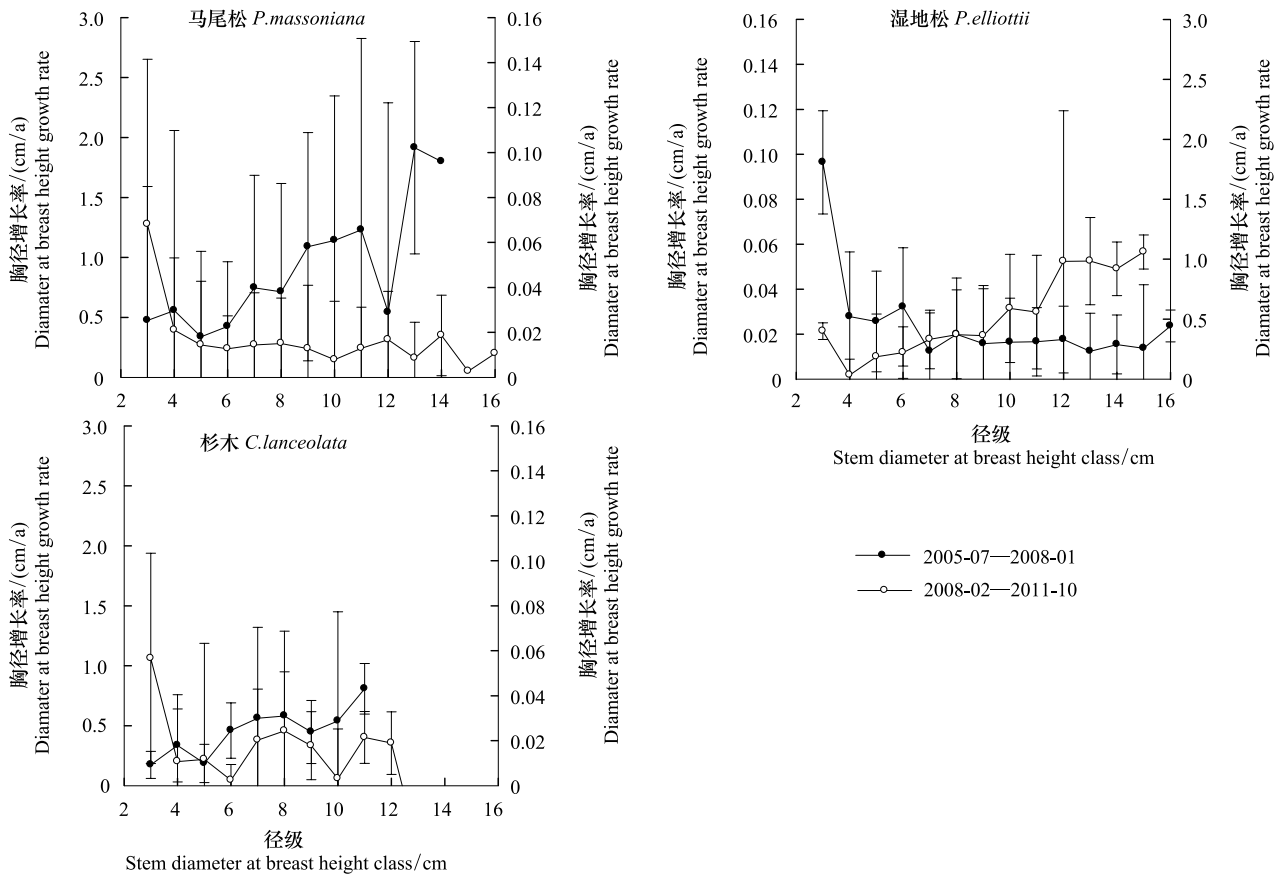


图4 3个主要树种在不同径级的增长率

Fig.4 The stem diameter at breast growth rate at different classes of tree main species

2.3 冰雪灾害对 NPP 的影响

2005 年 7 月,乔木层总贮碳量为 52.86 t C/hm^2 ,其中马尾松、湿地松、杉木和阔叶树的比例分别为 41.16%、53.84%、3.63% 和 1.36%;2008 年 1 月(灾前),乔木层总贮碳量为 57.10 t C/hm^2 ,马尾松与湿地松所占比例有所下降,杉木、阔叶树所占比例增

加;灾后林内大量树木折断、倒伏,乔木层总贮碳量降为 46.66 t C/hm^2 ,其中湿地松所占比率下降,其他树种比例上升;经过近 4 年的恢复,乔木层总贮碳量为 54.38 t C/hm^2 (表 3)。

2008 年冰雪灾害使南方森林生物量损失严重:广东省湿地松林损失 4982 g/m^2 ,杉木林损失

4617 g/m²^[15];江西省千烟洲地区湿地松林地上部分平均损失为 4286 g/m²^[8];大岗山毛竹损失为 16426 g/m²^[50]。本研究区生物量损失相对较低(2000 g/m²左右)。乔木层生物量的大量损失导致乔木层碳库中的碳大量(10.44 t C/hm²)转移至死生物量碳库中,占乔木层碳储量的 18.28%。1998 年美国东南部冰雪灾害从植被碳库转移到死生物量碳库中的碳是美国森林年固碳量的 10%^[54]。大量碳在碳库之间

的转移对区域和国家碳平衡的影响显著。在温暖、湿润的亚热带地区,粗木质分解速度很快,24.3 年的时间即可分解 95%^[55]。这表明冰雪灾害引起的碳库转移增加了生态系统向大气的 CO₂排放量,从而削弱了生态系统的碳汇能力。本研究林分恢复将近 4 年的时间后,乔木层总贮碳量(54.38 t C/hm²)快速增加(表 3),但仍未恢复到灾害发生前的水平。

表 3 主要树种碳储量(t C)及其所占比例
Table 3 The carbon storage and percentage of main species

时间 Time		马尾松 <i>P.massoniana</i>	湿地松 <i>P.ellottii</i>	杉木 <i>C.lanceolata</i>	阔叶 Broadleaf species	针叶林 Mixed forest
2005 年 7 月	碳储量 Carbon storage/tc	21.76	28.46	1.92	0.72	52.86
Jul-2005	比例 Percentage/%	41.16	53.84	3.63	1.36	
2008 年 1 月	碳储量 Carbon storage/tc	23.31	30.34	2.46	0.99	57.10
Jan-2008	比例 Percentage/%	40.83	53.13	4.30	1.74	
2008 年 2 月	碳储量 Carbon storage/tc	21.73	21.57	2.37	0.99	46.66
Feb-2008	比例 Percentage/%	46.58	46.24	5.07	2.12	
2011 年 10 月	碳储量 Carbon storage/tc	24.06	26.03	2.77	1.51	54.38
Oct-2011	比例 Percentage/%	44.25	47.87	5.10	2.77	

本研究区灾前 NPP 为 736 g C m⁻² a⁻¹;灾后下降为 683 g C m⁻² a⁻¹(表 4);CUE 在灾前为 0.41,灾后为 0.38(表 4)。灾害引起的树木折损、倒伏引起生态系统 NDVI 指数降低^[56],光合作用下降,而呼吸作用所受影响较小^[18],导致 NPP 和 CUE 降低。灾

后,随着受损树木的恢复以及林隙阔叶树种的入侵,80%以上的受灾森林在灾后 1a 内恢复到正常水平^[57]。千烟洲地区 GEP 在 2008 年前半年较其他年份偏低很多,但在下半年这种差距逐渐减小,这表明灾后生态系统固碳能力(CUE=0.38)逐渐恢复^[18]。

表 4 生态系统的净初级生产力(NPP)、总生态系统生产力(GEP)及碳利用效率(CUE)

Table 4 The Net Primary Productivity (NPP)、Gross Ecosystem Productivity (GEP) and Carbon Use Efficiency (CUE) of the ecosystem

时间 Time	生态系统的净初级生产力 Net primary productivity/ (g C m ⁻² a ⁻¹)	总生态系统生产力 Gross ecosystem productivity /(g C m ⁻² a ⁻¹)	碳利用效率 Carbon use efficiency
2005-07 — 2008-01	736.23	1802.05	0.41
2008-02 — 2011-10	683.08	1780.8	0.38

冰雪灾害之后,粤北森林受损针叶林年凋落物量为未受损林分的 12.11%^[37],按这个比例推算灾后凋落物生物量,NPP 和 CUE 将分别降低为 386.35 g C m⁻² a⁻¹和 0.27。前文已经提到,本研究区受冰雪灾害的影响较其他区域小,年凋落物量与未受损林分差异应相对较小。如果受损林分年凋落物量是未受损林分的 50%,则林分 NPP 为 514.28 g C m⁻² a⁻¹,CUE 为 0.29;如果受损林分年凋落物量是未受损林分的 80%,则林分 NPP 为 615.56 g C m⁻² a⁻¹,CUE 为 0.35。这表明本研究计算灾害年凋落物的方法高估

了生态系统灾后的 NPP 和 CUE。

3 结论

本研究以幂函数拟合的树木相对生长方程计算的生物量与观测值最为接近,且优于其他地区的树木相对生长方程;湿地松和杉木以 *D*、*H* 为自变量拟合的方程效果优于以 *D* 为自变量拟合的方程,马尾松则相反。冰雪灾害形成的林分空隙导致大量阔叶树种入侵。不同树种抗冰雪灾害能力存在差异;湿地松受灾害影响最为严重,马尾松次之,杉木最小;

在个体水平上,树木径级越大,受损越严重。受冰雪灾害影响较小的马尾松与杉木在灾后 D 增长率降低;而湿地松则相反,最大 D 增长率可达 1.06 cm/a 。冰雪灾害引起大量碳 (10.44 t C/hm^2) 从乔木层碳库转移至死生物量碳库,加快了生态系统向大气释放 CO_2 的速度。冰雪灾害导致生态系统固碳能力 (NPP、CUE) 下降,冰雪灾害之前 (2005 年 7 月—2008 年 1 月) NPP 与 CUE 分别为 $736.23 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 0.41;经过近 4 年的恢复后,生态系统固碳能力逐渐增强,但仍未达到冰雪灾害之前的水平, NPP 和 CUE 分别为 $683.08 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 0.38。

References:

- [1] Galik C S, Jackson R B. Risks to forest carbon offset projects in a changing climate. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257 (11): 2209-2216.
- [2] Jentsch A, Beierkuhnlein C. Research frontiers in climate change: Effects of extreme meteorological events on ecosystems. *Comptes Rendus Geoscience*, 2008, 340(9/10): 621-628.
- [3] Huang K, Wang S H, Zhou L, Wang H M, Liu Y F, Yang F T. Effects of drought and ice rain on potential productivity of a subtropical coniferous plantation from 2003 to 2010 based on eddy covariance flux observation. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 35021-35021.
- [4] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [5] Zhou B Z, Gu L H, Ding Y H, Shao L, Wu Z M, Yang X S, Li C Z, Li Z C, Wang X M, Cao Y H, Zeng B S, Yu M K, Wang S K, Sun H G, Duan A, An Y F, Wang X, Kong W J. The great 2008 Chinese ice storm: Its socioeconomic-ecological impact and sustainability lessons learned. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(1): 47-60.
- [6] Shao Q Q, Huang L, Liu J Y, Kuang W H, Li J. Analysis of forest damages caused by the snow and ice chaos along a transect across Southern China in Spring 2008. *Journal of Mountain Science*, 2009, 21(2): 219-234.
- [7] Cao K F, Chang K. The ecological effects of an unusual climatic disaster: The destruction to forest ecosystems by the extremely heavy glaze and snow storms occurred in early 2008 in southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34 (2): 123-124.
- [8] Ma Z Q, Wang H M, Wang S Q, Li Q K, Wang Y D, Wang H Q. Impact of a severe ice storm on subtropical plantations at Qianyanzhou, Jiangxi, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(2): 204-212.
- [9] Zhang J G, Duan A G, Tong S Z, Sun H G, Deng Z F, Zhang S G. Harm of frost and snow suppress to near mature stands of *Cunninghamia lanceolata* plantations. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11): 18-22.
- [10] Wen Q Z, Wei X F, Zhao Y F, Luo S H, Zhang Z H, Wang Z H. Impact of the freezing rain and snow disasters on five plantations in the Southeast Yunnan. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11): 23-27.
- [11] Cai Z L, Zhong Q P, Liu Q Y, Bai L H. Investigation on main trees species damaged by ice storm in Guangxi and the restoration measures. *Forest Research*, 2008, 21(6): 837-841.
- [12] Wang X, Hu Yang S, Zhou G Y, Li J X, Qiu Z J, Zhao X, Zou B. Effects of the frozen rain and snow disaster on the dominant species of castanopsis forests in Yangdongshan Shierdushui Provincial nature reserve of Guangdong. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(9): 41-47.
- [13] Xu J M, Li G Y, Lu Z H, Xiang D Y, Zeng B S, Zhang N N, Guo H Y. Investigation on eucalypt forest plantations subjected to the freezing catastrophe in Southern China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(7): 103-110.
- [14] Tang J M, Song C W, Dai J H, Liu H G, Zheng X Y. Investigation on the frozen snow damage of main afforestation tree species in Hubei Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44 (11): 2-10.
- [15] Chen H Y, Xue L, Li J Y, Chen S Q, Qin X S, Chen C G, Jiang J. Comparison between characteristics of ice damage to three stands. *Journal of South China Agricultural University*, 2010, 31 (2): 78-81.
- [16] Wu K K, Peng S L, Chen L Y, Xu Y W, Zhu L R, Lin Z G. Characteristics of forest damage induced by frozen rain and snow in South China: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30 (3): 611-620.
- [17] Jentsch A, Kreyling J, Beierkuhnlein C. A new generation of climate-change experiments: Events, not trends. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(7): 365-374.
- [18] Zhang W J, Wang H M, Wen X F, Yang F T, Ma Z Q, Sun X M, Yu G R. Freezing-induced loss of carbon uptake in a subtropical coniferous plantation in southern China. *Annals of Forest Science*, 2011, 68(6): 1151-1161.
- [19] Xu X J, Zhou G M, Liu S G, Du H Q, Mo L F, Shi Y J, Jiang H, Zhou Y F, Liu E B. Implications of ice storm damages on the water and carbon cycle of bamboo forests in southeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 177: 35-45.
- [20] Foody G M, Boyd D S, Cutler M E. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 463-474.
- [21] Xiao W F, Nie D P, Zhang J C. Study on biomass and energy use efficiency of the stands of *Cunninghamia lanceolata* in China. *Forest Research*, 1999, 12(3): 237-243.
- [22] Campoe O C, Stape J L, Laclau J P, Marsden C, Nouvellon Y. Stand-level patterns of carbon fluxes and partitioning in a *Eucalyptus grandis* plantation across a gradient of productivity, in São Paulo State, Brazil. *Tree Physiology*, 2012, 32 (6): 696-706.
- [23] Wang C K. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222(1/3): 9-16.

- [24] Bartelink H H. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. *Forest Ecology and Management*, 1996, 86 (16): 193-203.
- [25] DeLucia E H, Drake J E, Thomas R B, Gonzalez-Meler M. Forest carbon use efficiency: Is respiration a constant fraction of gross primary production? *Global Change Biology*, 2007, 13 (6): 1157-1167.
- [26] Li X R, Liu Q J, Chen Y R, Hu L L, Yang F T. Aboveground biomass of tree conifers in Qianyanzhou plantation. *Chin. Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1382-1388.
- [27] Shen W Q, Liu Y F, Ma Q Y, Yang F T. Carbon distribution, carbon store and carbon sink function of pine forest plantation. *Practical Forestry Technology*, 2006, 8(5): 5-8.
- [28] Ma Z Q, Wang H M, Wang S Q, Li Q K, Wang Y D, Wang H Q. Impact of a severe ice storm on subtropical plantations at Qianyanzhou, Jiangxi, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(2): 204-212.
- [29] Cao H L, Ren H, Peng S L. The community structure and energy characteristics of *Pinus elliotii* artificial forest in Heshan. *Guhaia*, 1998, 18(1): 24-28.
- [30] Du H, Song T Q, Zeng F P, Wen Y G, Peng W X. Biomass and its allocation in pinus massoniana plantation at different stand ages in East Guangxi. *Acta Botanica Boreal-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(2): 394-400.
- [31] Li Y, Zhang J G, Duan A G, Xiang C W. Selection of biomass estimation models for Chinese fir plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3036-3046.
- [32] Ye J Z, Jiang Z L. The structure of biomass of a Chinese fir plantations in south of Jiangsu hilly. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(1): 7-14.
- [33] Ye J Z, Jiang Z L, Zhou B L, Han F Q, Chen S B. Annual dynamic of the biomass of Chinese fir forest on Yangkou forestry farm, Fujian province. *Journal of Nanjing Institute of Forestry*, 1984, (4): 1-9.
- [34] Perala D A, Alban D H. Allometric Biomass Estimators for Aspen-Dominated Ecosystems in the Upper Great Lakes. Paul: US Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, 1994.
- [35] Yang H, Zhang Y S, Zeng Z G, Long W, Luo Y C, Zhou X P, Tang L F. A study on the biomass and growth of three forestation models in Jishui region. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2004, 26(2): 164-168.
- [36] Cheng Y, Hong W, Wu C Z, Qi X H. Distribution characters of schima superba aboveground biomass and its productivity. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, 2009, 15 (3): 318-322.
- [37] Xu Y W, Zhu L R, Wu K K, Zhou Z P, Peng S L. Litter dynamics in different forest types suffered an extreme ice storm in the subtropical region, southern China. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 20(10): 1443-1448.
- [38] Wen X F, Wang H M, Wang J L, Yu G R, Sun X M. Ecosystem carbon exchanges of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought, 2003—2007. *Biogeosciences*, 2010, 7(1): 357-69.
- [39] Yang T. The investigating and study to the natural secondary mixed forest's biomass and the root system's spreading character of the oak and the horse-tail pine. *Journal of Xinyang Agriculture College*, 2004, 14(4): 4-9.
- [40] Zhang Z J, Wang Y H, Yuan Y X, Li Z Y, Cao L, Zhang G Z, Yu P T, Wang Y. Study on the biomass structure and distribution of natural secondary forest of *Pinus massoniana*. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2006, 29(5): 37-43.
- [41] Xie W D, Ye S M, Yang M, Zhao L J. Biomass and distribution pattern of pinus massoniana plantation in Southeast area of Guangxi. *Journal of Beihua University: Natural Science*, 2009, 10 (1): 68-71.
- [42] Xiao X C, Li Z H, Tang Z J, Sheng J M, Gong X J, Zhu N. Effects of stand density on biomass and productivity of *Pinus elliotii*. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2011, 31(3): 123-129.
- [43] Zhang W Z. The study on biomass and productivity of *Pinus elliotii* plantation in Pingnan County. *Forestry Prospect and Design*, 2010, (2): 11-16.
- [44] Ma Z Q, Liu Q J, Xu W J, Li X R, Liu Y C. Carbon storage of artificial forest in Qianyanzhou, Jiangxi province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(11): 1-7.
- [45] Huang Z H, Tian D L, Kang W X, Xiang W H, Yan W D. Dynamics of biomass distribution in first rotation of Chinese fir plantations in Huitong county, Hunan provinve. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2011, 31 (5): 37-43.
- [46] Lin S M, Xu T G, Zhou G Y. Biomass of Chinese fir forest plantation. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1991, 8(3): 288-294.
- [47] Hu Y H, Pang Q L. Study on the biomass and distribution pattern of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. in Western of Hubei. *Hubei Forestry Science and Technology*, 2012, (3): 6-9.
- [48] Rhoads A G, Hamburg S P, Fahey T J, Siccamo T G, Hane E N, Battles J, Cogbill C, Randall J, Wilson G. Effects of an intense ice storm on the structure of a northern hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32 (10): 1763-1775.
- [49] Rebertus A J, Shifley S R, Richards R H, Roovers L M. Ice storm damage to an old-growth oak-hickory forest in Missouri. *American Midland Naturalist*, 1997, 137(1): 48-61.
- [50] Zhou B Z, Li Z C, Wang X M, Cao Y G, An Y F, Deng Z F, Letu G, Wang G, Gu L H. Impact of the 2008 ice storm on moso bamboo plantations in southeast China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G3): 2005-2012.
- [51] Bruederle L P, Stearns F W. Ice storm damage to a southern Wisconsin mesic forest. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 1985, 112(2): 167-175.
- [52] Seischab F K, Bernard J M, Eberle M D. Glaze storm damage to western New York forest communities. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 1993, 120(1): 64-72.
- [53] Ma Z Q, Liu Q J, Wang H M, Guo Z W. The growth pattern of *Pinus elliotii* Plantation in central subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1525-537.

- [54] McCarthy H R, Oren R, Kim H S, Johnsen K H, Maier C, Pritchard S G, Davis M A. Interaction of ice storms and management practices on current carbon sequestration in forests with potential mitigation under future CO₂ atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D15): 1-10.
- [55] Mobley M L, Richter D, Heine P R. Accumulation and decay of woody detritus in a humid subtropical secondary pine forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, 43(2): 109-118.
- [56] Zhao Z P, Shao Q Q, Huang L. Response of NDVI to forest damages caused by the severe snow and ice chaos in the South of China, 2008 A case study of mountainous forest in central Jiangxi Province. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(4): 535-540.
- [57] Sun Y, Gu L H, Dickinson R E, Zhou B Z. Forest greenness after the massive 2008 Chinese ice storm: Integrated effects of natural processes and human intervention. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(3): 35702.
- 参考文献:**
- [7] 曹坤芳, 常杰. 突发气象灾害的生态效应: 2008 年中国南方特大冰雪灾害对森林生态系统的破坏. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 123-124.
- [8] 马泽清, 王辉民, 王绍强, 李庆康, 王义东, 汪宏清. 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. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 204-12.
- [9] 张建国, 段爱国, 童书振, 孙洪刚, 邓富宗, 张守攻. 冰冻雪压对杉木人工林近成熟林分危害调查 3. *林业科学*, 2008, 44(11): 18-22.
- [10] 温庆忠, 魏雪峰, 赵元藩, 罗顺宏, 张正华, 王振和. 雨雪冰冻灾害对滇东南 5 种人工林的影响. *林业科学*, 2008, 44(11): 23-27.
- [11] 蔡子良, 钟秋平, 刘清元, 白灵海. 广西主要树种冰雪灾害吊车及恢复调查. *林业科学研究*, 2008, 21(6): 837-841.
- [12] 王旭, 黄世能, 周光益, 李家湘, 邱志军, 赵霞, 邹滨. 冰雪灾害对杨东山十二度水自然保护区栲类林建群种的影响. *林业科学*, 2009, 45(9): 41-47.
- [13] 徐建民, 李光友, 陆钊华, 项东云, 曾炳山, 张宁南, 郭洪英. 南方桉树人工林雨雪冰冻灾害调查分析. *林业科学*, 2009, 44(7): 103-110.
- [14] 汤景明, 宋丛文, 戴均华, 刘恒贵, 郑孝严. 湖北省主要造林树种冰雪灾害调查. *林业科学*, 2008, 44(11): 2-10.
- [15] 陈红跃, 薛立, 李吉跃, 陈世清, 秦新生, 陈传国, 姜杰. 冰雪灾害对 3 种不同林分的损害特征比较. *华南农业大学学报*, 2010, 31(2): 78-81.
- [16] 吴可可, 彭少麟, 陈蕾伊, 徐雅雯, 朱丽蓉, 林真光. 南方森林雨雪冰冻灾害的特征. *生态学杂志*, 2011, 30(3): 611-620.
- [21] 肖文发, 聂道平, 张家诚. 我国杉木林生物量与能量利用率的研究. *林业科学研究*, 1999, 12(3): 237-243.
- [26] 李轩然, 刘琪璟, 陈永瑞, 胡理乐, 杨凤亭. 千烟洲人工林主要树种地上生物量的估算. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1382-1388.
- [27] 沈文清, 刘允芬, 马钦彦, 杨凤亭. 千烟洲人工针叶林碳素分布、碳贮量及碳汇功能研究. *林业实用技术*, 2006, 8(5): 5-8.
- [28] 马泽清, 王辉民, 王绍强, 李庆康, 王义东, 汪宏清. 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. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 204-212.
- [29] 曹洪麟, 任海, 彭少麟. 鹤山湿地松人工林的群落结构与能量特征. *广西植物*, 1998, 18(1): 24-28.
- [30] 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 温远光, 彭晚霞. 桂东不同林龄马尾松人工林的生物量及其分配特征. *西北植物学报*, 2013, 33(2): 394-400.
- [31] 李燕, 张建国, 段爱国, 相聪伟. 杉木人工林生物量估算模型的选择. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3036-3046.
- [32] 叶镜中, 姜志林. 苏南丘陵杉木人工林的生物量结构. *生态学报*, 1983, 3(1): 7-14.
- [33] 叶镜中, 姜志林, 周本琳, 韩福庆, 陈世彬. 福建省洋口林场杉木林生物量的年变化动态. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 1984, (4): 1-9.
- [35] 杨桦, 詹有生, 曾志光, 龙蔚, 骆昱春, 周小平, 汤良富. 吉水三种造林模式林分生物量及生长量研究. *江西农业大学学报*, 2004, 26(2): 164-168.
- [36] 程煜, 洪伟, 吴承祯, 祁新华. 木荷地上部分生物量分布特征与生产力. *应用于环境生物学报*, 2009, 15(3): 318-322.
- [37] 徐雅雯, 朱丽蓉, 吴可可, 周志平, 彭少麟. 雨雪冰冻灾害后粤北森林各林型凋落物动态. *生态环境学报*, 2011, 20(10): 1443-1448.
- [39] 杨涛. 麻栎马尾松天然次生混交林生物量结构及根系分布特征调查研究. *信阳农业高等专科学校学报*, 2004, 14(4): 4-9.
- [40] 张治军, 王彦辉, 袁玉欣, 李志勇, 曹磊, 张国增, 于澎涛, 王颖. 马尾松天然次生林生物量的结构与分布. *河北农业大学学报*, 2006, 29(5): 37-43.
- [41] 谢伟东, 叶绍明, 杨梅, 招礼军. 桂东南丘陵地马尾松人工林群落生物量及分布格局. *北华大学学报: 自然科学版*, 2009, 10(1): 68-71.
- [42] 肖兴翠, 李志辉, 唐作钧, 盛金明, 龚细娟, 朱宁. 林分密度对湿地松生物量及生产力的影响. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(3): 123-129.
- [43] 张维轴. 屏南县湿地松人工林生物量及生产力的研究. *林业勘察设计*, 2010, (2): 11-16.
- [44] 马泽清, 刘琪璟, 徐雯佳, 李轩然, 刘迎春. 江西千烟洲人工林生态系统的碳蓄积特征. *林业科学*, 2007, 43(11): 1-7.
- [45] 黄志宏, 田大伦, 康文星, 项文化, 闫文德. 湖南会同第 1 代杉木人工林生物量分配动态. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(5): 37-43.
- [46] 林生明, 徐土根, 周国模. 杉木人工林生物量的研究. *浙江林学院学报*, 1991, 8(3): 288-294.
- [47] 胡炎红, 庞启亮. 鄂西地区杉木林生物量模拟及其分配格局. *湖北林业科技*, 2012, (3): 6-9.
- [53] 马泽清, 刘琪璟, 王辉民, 郭志文. 中亚热带湿地松人工林生长过程. *生态学报*, 2011, 31(6): 1525-1537.
- [56] 赵志平, 邵全琴, 黄麟. 2008 年南方特大冰雪冻害对森林损毁的 NDVI 响应分析-以江西省中部山区林地为例. *地球信息科学学报*, 2009, 11(4): 535-540.