

# 中亚热带典型森林倒木生物量、 碳储量及其分布格局

吴春生<sup>1</sup>, 刘苑秋<sup>1\*</sup>, 魏晓华<sup>2</sup>, 李晓东<sup>1</sup>, 刘亮英<sup>1</sup>, 欧阳勋志<sup>1</sup>,  
郭晓敏<sup>1</sup>, 张文元<sup>1</sup>, 莫其锋<sup>3</sup>

(1. 江西农业大学林学院, 江西 南昌 330045; 2. 加拿大不列颠哥伦比亚大学地球与环境科学系, 加拿大;  
3. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510520)

**摘要:** [目的] 研究中亚热带地区的江西省内不同森林类型、林分类型林内倒木的生物量、碳储量及其数量特征分布格局, 为该区域森林生态系统功能评估积累基础数据。 [方法] 以亚热带典型森林 133 个样地为研究对象, 采用实测法对样方内直径  $\geq 1$  cm, 长度  $\geq 1$  m 的倒木逐一测量其中央直径和长度, 并记录其分解程度和树种组成。 [结果] 表明: 杉木林和马尾松林倒木生物量和碳储量分别为  $0.684 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.279 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $0.553 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.207 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 常绿阔叶林和次生常绿阔叶林分别为  $11.293 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $4.781 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $1.888 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.812 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 松阔混交林和杉阔混交林分别为  $1.248 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.521 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $1.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.432 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 针叶林中 II、III 径级倒木生物量较大且与其他两个径级差异显著, 针阔混交林中 II 径级倒木与 I、III 径级倒木生物量差异显著, 常绿阔叶林林内 I 径级倒木生物量与 II、III、IV 和 V 径级差异显著。杉木林和马尾松林中中度分解倒木生物量最大分别为  $0.332 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.321 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 且分别显著大于相应林分类型中的轻度和重度分解倒木; 常绿阔叶林表现出同样的变化规律。 [结论] 中亚热带地区典型针叶林和常绿阔叶林中不同林分类型之间倒木生物量差异显著, 而针阔混交林差异不显著。3 种森林类型(针叶林、常绿阔叶林和针阔混交林)中不同林分类型之间倒木碳储量差异显著。江西森林倒木主要分布在 5~10 cm 和 10~15 cm 的 II、III 径级, 且主要处于中度分解等级。针阔混交林(松阔和杉阔)倒木主要分布在海拔 700 m 以下, 常绿阔叶林倒木分布在海拔 650 m 以上。研究结果表明, 常绿阔叶林倒木由于其较大的生物量和碳储量可能会在缓解全球气候变暖和碳循环中扮演重要的作用, 且在未来的森林经营和管理中应该重视倒木对森林可持续发展的重要性。

**关键词:** 中亚热带; 典型森林; 倒木; 生物量 - 碳储量; 分布格局

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

## Biomass, Carbon Storage and Distribution Patterns of Fallen Trees in Mid-subtropical Forests

WU Chun-sheng<sup>1</sup>, LIU Yuan-qiu<sup>1</sup>, WEI Xiao-hua<sup>2</sup>, LI Xiao-dong<sup>1</sup>, LIU Liang-ying<sup>1</sup>, OUYANG Xun-zhi<sup>1</sup>,  
GUO Xiao-min<sup>1</sup>, ZHANG Wen-yuan<sup>1</sup>, MO Qi-feng

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China; 2. Earth and Environmental Science Department, University of British Columbia, Okanagan, Canada; 3. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

**Abstract:** [Objective] The study aims at investigating the biomass, carbon storage and the quantity distribution of fallen tree within different forest types or stands in Jiangxi Province of mid-subtropics. [Method] The field survey

收稿日期: 2015-09-29

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA05050205)资助。

作者简介: 吴春生, 博士生, 研究方向: 森林碳循环 - 森林养分循环及与水分的耦合关系。e-mail: 1013259834@qq.com。

\* : 通讯作者

was carried out, the central diameter and length were measured, and the decay class and species composition of fallen tree (diameter  $\geq 1$  cm, length  $\geq 1$  m) within 133 plots in subtropical typical forests were recorded. [ **Result** ] The biomass and carbon storage in *Cunninghamia lanceolata* forests were  $0.684 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $0.279 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$ , while that in *Pinus massoniana* forests were  $0.553 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $0.207 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$ . However, the biomass and carbon storage in evergreen broadleaf forests were  $1.248 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $0.521 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and in secondary evergreen broadleaf forests were  $1.888 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $0.812 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$ . The biomass and carbon storage in *P. massoniana*-broadleaf mixed forests were  $1.248 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $0.521 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$ , while in *C. lanceolata*-broadleaf forests were  $1.280 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $0.432 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; the fallen tree biomass of diameter class II and III were relatively larger than the others, which were significantly different from other diameter class in coniferous forests, there were significant differences between fallen tree biomass of diameter II and I, III in coniferous-broadleaf mixed forests, while the fallen tree biomass of diameter class I was significantly different from II, III, IV and V. The moderate decays of fallen tree of *C. lanceolata* and *P. massoniana* were at  $0.332 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $0.321 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , which was higher than those in mild and severe decay of fallen tree. The decay of fallen tree in evergreen broadleaf forest was similar to *C. lanceolata* and *P. massoniana*. [ **Conclusion** ] These indicated that the biomass of fallen tree within different coniferous and evergreen broadleaf forests was significantly varied, while no significant difference was found with different coniferous-broadleaf forests in mid-subtropics. The carbon storage of fallen tree within different coniferous, evergreen broadleaf and coniferous-broadleaf forests were significantly different. The fallen trees in Jiangxi mainly dominated by diameter class II (5 ~ 10 cm) and III (10 ~ 15 cm), and most were in moderate decay. The fallen tree of coniferous-broadleaf forests was primary distributed below 700 m a. s. l, while the fallen tree of evergreen broadleaf forests was mainly distributed above 650 m a. s. l. The results suggested that the fallen tree may play a key role in mitigating global warming and carbon cycles because of the larger amount of biomass and carbon storage in evergreen broadleaf forests. It is necessary to pay more attention to the influence of fallen tree on sustainable development of forests in the future's operation and management.

**Keywords:** mid-subtropics; typical forests; fallen tree; biomass-carbon storage; distribution

在生态系统中, 倒木具有减少林内水土流失, 影响森林土壤发育, 提供动植物、微生物生境, 维持生物多样性等重要生态功能<sup>[1]</sup>, 是森林生态系统中重要的结构性和功能性的组成要素<sup>[2-5]</sup>。研究证实, 倒木还能够为种子的着床和萌发提供优越而又合适的环境<sup>[6-10]</sup>, 为许多森林动物<sup>[11-13]</sup>和微生物<sup>[14]</sup>提供适宜的生存环境和居所, 并在森林旱季时可能成为局部小生境的重要的水分来源和储备<sup>[15-17]</sup>。森林倒木的这些重要的生态功能和作用, 使有关其的研究在近年受到众多森林生态学家、生理生态学家、森林土壤生态学家、生物多样性研究学者的高度重视。

国外对倒木的研究最早开始于一些病理学家和昆虫学家对倒木分解过程中微生物作用和昆虫的种类及分解者对外界环境因子的响应的研究。进入20世纪90年代以后, 在全球变化背景下, 伴随着碳源碳汇问题研究的深入, 学者们关注到倒木在碳源碳汇中的重要作用, 并逐渐把其当作森林生态系统

碳库的重要组成部分<sup>[18-19]</sup>, 倒木对森林生态系统碳循环和碳平衡作用的研究引起世界各国科学界的极大关注<sup>[20-25]</sup>。同时, 倒木分解速率<sup>[26]</sup>和分解养分动态变化<sup>[27-29]</sup>、分解格局变化<sup>[24]</sup>及与微生物<sup>[30]</sup>和真菌的关系<sup>[31-32]</sup>的研究也慢慢地成为了研究的热点。

我国倒木生态学的研究开展较晚, 研究始于20世纪80年代初期, 同样随着倒木在碳源碳汇中作用研究的慢慢开展, 我国对倒木分解动态变化<sup>[33-35]</sup>、影响因素<sup>[36-38]</sup>及倒木生物量和碳储量<sup>[5, 39-42]</sup>的研究也陆续出现, 而以133个样地为研究对象来对中亚热带典型森林倒木生物量和碳储量的分布格局进行分析的研究未见报导。上述研究的主要森林类型包括热带季节雨林、西南湿性常绿阔叶林、季风常绿阔叶林和武夷山甜槠(*Castanopsis eyrei* (Champ.) Tutch)林等, 而对中亚热带区江西典型森林倒木的研究未见报道。为此, 基于样地调查开展中亚热带区江西省典型森林类型倒木的储量及其分布特征的

研究,可以为该区域森林生态系统功能评估积累基础数据,对进一步揭示森林生态系统储量特征及功能平衡过程有重要意义。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究区为江西省,属于亚热带季风气候,地理坐标  $24^{\circ}29' \sim 30^{\circ}05' \text{ N}$ ,  $113^{\circ}34' \sim 118^{\circ}29' \text{ E}$ ,境内地貌类型较为齐全,常态地貌为山地和丘陵为主。土壤类型主要包括潮土、水稻土、红壤、黄红壤、黄壤、黄棕壤及山地草甸土等,一年四季分明、光照时间较长、雨水量较为充沛。全年平均气温  $18.9^{\circ}\text{C}$ ,日照时数  $1\ 686.3 \text{ h}$ ,降水量  $1\ 438.1 \text{ mm}$ 。全省森林类型主要包括常绿阔叶林、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)林、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)林、阔叶林、针阔混交林、毛竹(*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie)林和灌木林<sup>[43-44]</sup>,而据第8次全国森林资源清查江西省森林资源清查成果数据显示,杉木林、马尾松林、阔叶林、针阔混交林占江西森林面积的  $79.0\%$ ,是江西省森林碳汇功能的主体<sup>[45]</sup>。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样地设置与调查** 2011年7月到2013年7月,按各设区市各优势树种的面积和蓄积分布进行分配,在江西境内共选择了133个样地(剔除有人为清理现象的样地)进行研究。森林类型包括常绿阔叶林、次生常绿阔叶林,杉木(人工、天然)林,马尾松(天然、人工)林,针阔混交(松阔、杉阔)等(样地信息见附表1)。调查样地面积为  $800 \text{ m}^2$ ,对样地内直径  $\geq 1 \text{ cm}$ ,长度  $\geq 1 \text{ m}$  的倒木逐一测量其中央直径和长度,并记录其分解程度和树种组成,每一倒木取一小段带回实验室测定含水量、密度并测量倒木材积以及化学组成和养分含量等指标。同时记录样地的海拔、坡度、坡向等基本信息。

**1.2.2 倒木分解程度划分** 基于<sup>[46]</sup>制定的标准,根据实际情况将赣南地区不同森林类型内倒木分为如下3个分解等级:

轻度分解:倒木树皮、侧枝完整或已缺损,边材完好。

中度分解:树皮大部分脱落,边材部分腐烂。

高度分解:树皮全无,边材大面积腐烂,心材部分腐烂。

**1.2.3 实验分析** 用 Excel 2007、SPSS17.0 及 Origin8.0 对本实验的数据进行相应的处理,统计不同森林类型倒木的数量特征和储量特征,对各径级、各分解等级倒木数量和储量进行分析、作图。

**倒木生物量:**野外调查时对不同森林类型各分解等级倒木进行直接称量测鲜质量,对取回的倒木圆盘进行烘干处理计算干质量,最后求得倒木生物量( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

**倒木密度:**用排水法对倒木的密度进行求算,首先称好倒木圆盘的质量  $m(\text{g})$ ,然后在容器内装好一定量的水  $v_1(\text{mL})$ ,将倒木放入到容器内,计算水体积的变化  $v_2(\text{mL})$ ,最后计算得出倒木密度  $\rho$ 。

$$\rho = m / (v_1 - v_2)$$

**倒木材积(蓄积量)**的计算采用中央断面近似求积法<sup>[47]</sup>,公式如下:

$$V = (\pi D^2 \times h) / 4$$

其中, $V$ 为倒木材积( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ), $D$ 为倒木中央直径( $\text{cm}$ ), $h$ 为倒木长度( $\text{m}$ )。

**倒木碳储量:**按照倒木的形态和腐烂等级(轻度、中度和重度)进行分类,分别计算枯倒木的体积,并根据不同腐烂等级的密度计算枯倒木的干质量,结合相应腐烂等级样本的碳含量计算枯倒木的碳储量(公式1),以  $\text{tc} \cdot \text{hm}^{-2}$  表示。

$$C_{DW_i} = \sum_{j=1}^3 [V_{LDW_{ij}} \times D_{LDW_{ij}} \times CF_{LDW_{ij}}]$$

式中, $C_{DW_i}$ 是生态系统  $i$  枯死木的碳储量,即是枯倒木碳储量  $C_{LDW_{ij}}$ ,单位均为  $\text{tc} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $V_{LDW_{ij}}$  为腐烂等级  $j(j=1,2,3$  分别表示轻度分解、中度分解和重度分解)的枯倒木体积( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $D_{LDW_{ij}}$  为不同腐烂等级枯倒木的密度( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $CF_{LDW_{ij}}$  为不同腐烂等级枯倒木的平均含碳量。

## 2 结果与分析

### 2.1 倒木生物量和碳储量

本研究选择江西典型6种森林类型为研究对象,包括杉木林,马尾松林,松阔混交林,杉阔混交林,次生常绿阔叶林和原生常绿阔叶林。从研究结果中可以看出,倒木生物量和碳储量最大的是常绿阔叶林分别为  $11.293 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $4.781 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,最小的是马尾松林分别为  $0.553 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $0.207 \text{ tc} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同森林类型倒木生物量和碳储量具有一定的差异,基本变化趋势为常绿阔叶林 > 针阔混交林 > 针叶林(表1)。

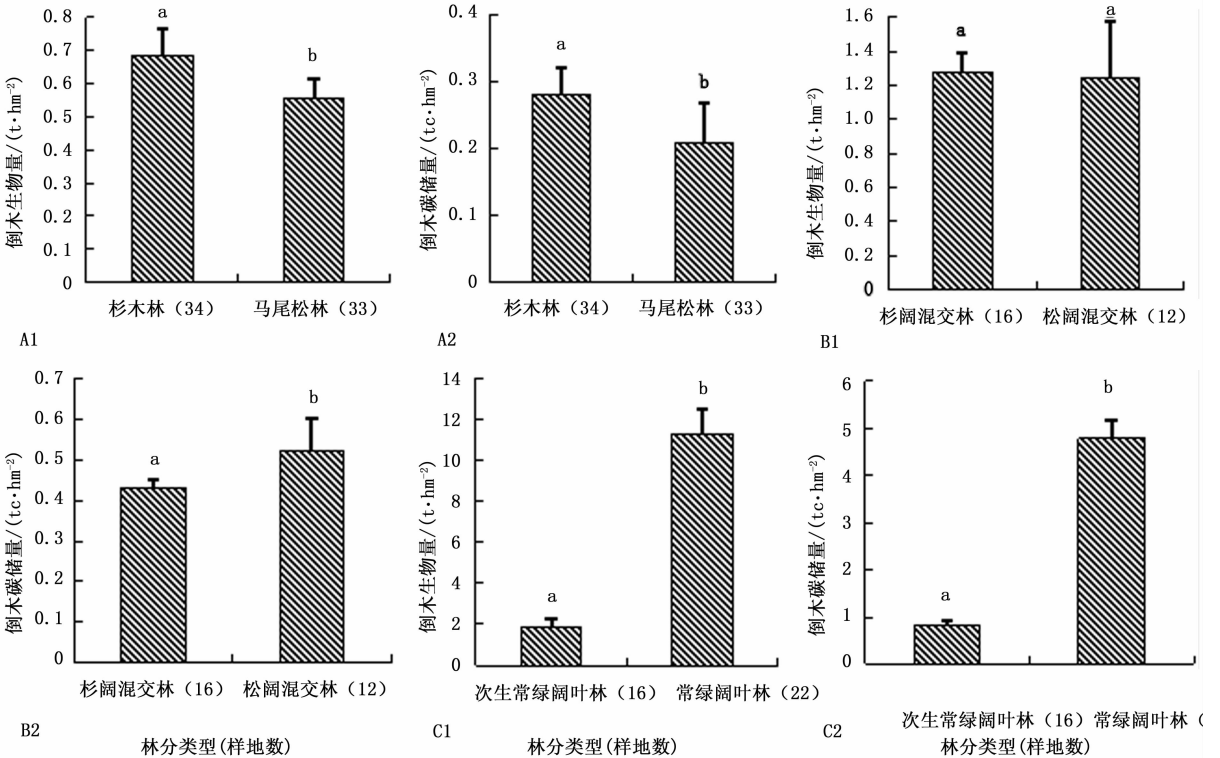
表1 江西典型森林类型倒木生物量和碳储量

森林类型(样地数)	林龄分布范围/a	生物量/( $t \cdot hm^{-2}$ )	碳储量/( $tc \cdot hm^{-2}$ )
杉木林(34)	14~43	$0.684 \pm 0.08a$	$0.279 \pm 0.04a$
马尾松林(33)	10~47	$0.553 \pm 0.06b$	$0.207 \pm 0.06b$
杉阔混交林(16)	13~39	$1.280 \pm 0.11a$	$0.432 \pm 0.02a$
松阔混交林(12)	15~41	$1.248 \pm 0.33a$	$0.521 \pm 0.08b$
次生常绿阔叶林(16)	6~17	$1.888 \pm 0.42a$	$0.812 \pm 0.1a$
常绿阔叶林(22)	10~52	$11.293 \pm 1.23b$	$4.781 \pm 0.37b$

注:不同小写字母表示同一森林类型(针叶林、针阔混交林、常绿阔叶林)不同林分类型间差异显著性,显著水平为0.05。

不同森林生态系统的种类组成不一样,森林空间结构有差异,对外界干扰的响应不同,会带来倒木生物量、碳储量及其分布格局的差异。从下图1可以看出:针叶林(杉木林  $0.684 t \cdot hm^{-2}$  和马尾松林  $0.553 t \cdot hm^{-2}$ ) 和常绿阔叶林(原生林  $11.293 t \cdot hm^{-2}$  和次生常绿阔叶林  $1.888 t \cdot hm^{-2}$ ) 中不同林

分类型之间倒木生物量差异显著,而针阔混交林(松阔  $1.248 t \cdot hm^{-2}$  和杉阔林  $1.28 t \cdot hm^{-2}$ ) 不同林分类型间倒木生物量差异不显著(图1 A1、B1、C1)。可能原因是常绿阔叶林基本树高、胸径都要大于次生常绿阔叶林,且常绿阔叶树由于其常绿、枝叶繁茂等自然特性,当两者在遭遇自然干扰(如雨雪冰冻)时,枝叶更加繁茂的承受的外界干扰压力会更大,当然其倒伏、断梢和折枝的概率会更高;再加上常绿阔叶树高较高、胸径较大,自然当树木倒下形成倒木生物量也会更大;杉木枝叶较马尾松结构更加紧凑、组成更加密集,当其遭受干扰时,倒伏、断梢的概率要大于马尾松,结果就是杉木林倒木生物量大于马尾松林。从倒木碳储量上来看常绿阔叶林与次生常绿阔叶林、马尾松林与杉木林、杉阔混交林与松阔较林的碳储量差异都显著(图1 A2、B2、C2)。



注:不同小写字母表示同一森林类型不同林分类型间差异显著性,显著水平为0.05

图1 不同森林类型倒木生物量和碳储量

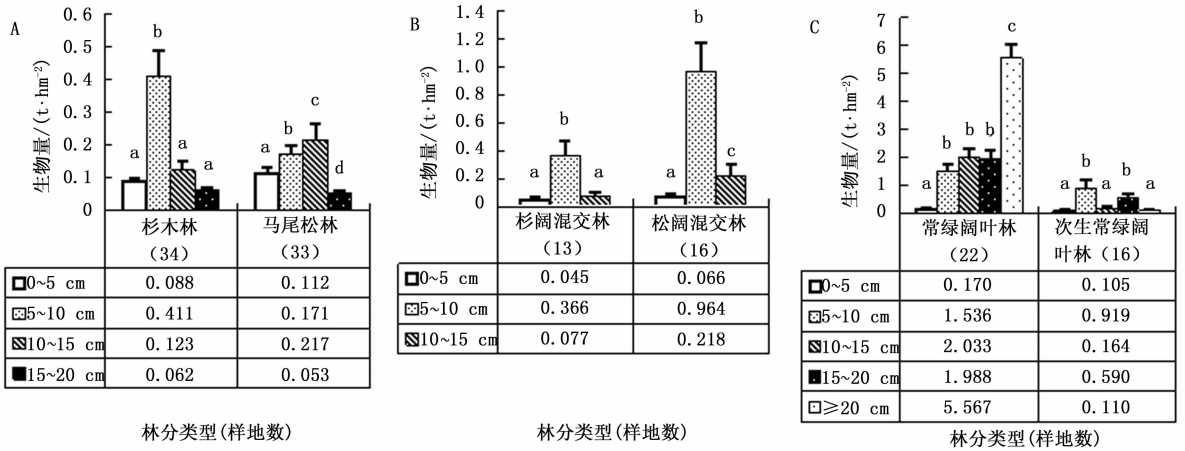
## 2.2 倒木径级结构

倒木径级结构是指各径级倒木的数量在倒木总数量中所占的比例。将不同类型森林倒木以5 cm为径阶分为0~5、5~10、10~15、15~20和 $\geq 20$  cm(上限排除法)5级,分别称为I径级木、II径级木、III径级木、IV径级木和V径级木。

2.2.1 倒木生物量的径级分布 从图2中可以看出,不同森林类型间倒木径级有较大差异,针叶林中杉木和马尾松林内都只有前4级(I、II、III、IV)径级倒木分布,其中II、III径级倒木生物量较大且与其他两个径级差异显著(图2A);杉木林内II径级倒木生物量最大,为  $0.411 t \cdot hm^{-2}$ ,与其它径级倒木生物量

差异显著;原因一方面是本研究中杉木林内树木平均胸径为 12.83 cm,马尾松林为 12.44 cm,按照概率论理论,倒伏最多应该为分布最集中部分,本研究径级是倒木的中央直径,自然要比 1.3 m 处的胸径要稍小,这样就可以综合解释杉木和马尾松倒木主要分布在 II、III 径级;另一方面是针叶树中较大胸径树由于其根系较深抵御外界干扰能力可能较强,结果使得倒木处于 IV 径级以下;当自然干扰(如,雨雪冰冻)发生时,侧枝折断的可能性会比较大,容易形成 II、III 径级倒木;另一方面当其自然整枝发生时形成的倒木也是比树木直径要小的较低径级(II、

III)倒木。针阔混交林中松阔和杉阔混交林内只有前 3 径级(I、II、III)倒木分布(图 2B),且两者林内 II 径级倒木与 I、III 倒木生物量差异显著,可能原因和上面相似,本研究中松阔混交林内树木平均胸径是 11.44 cm,杉阔混交林是 11.41 cm。常绿阔叶林内 I 径级倒木生物量与 II、III、IV 差异显著,且与 V 径级倒木差异非常显著(图 2C),次生常绿阔叶林 I、III、V 与 II、IV 径级倒木生物量差异显著,可能原因是原生常绿阔叶林平均胸径大且多为高大乔木,当树木由于各种原因影响倒伏时较容易形成大径级倒木(V)。

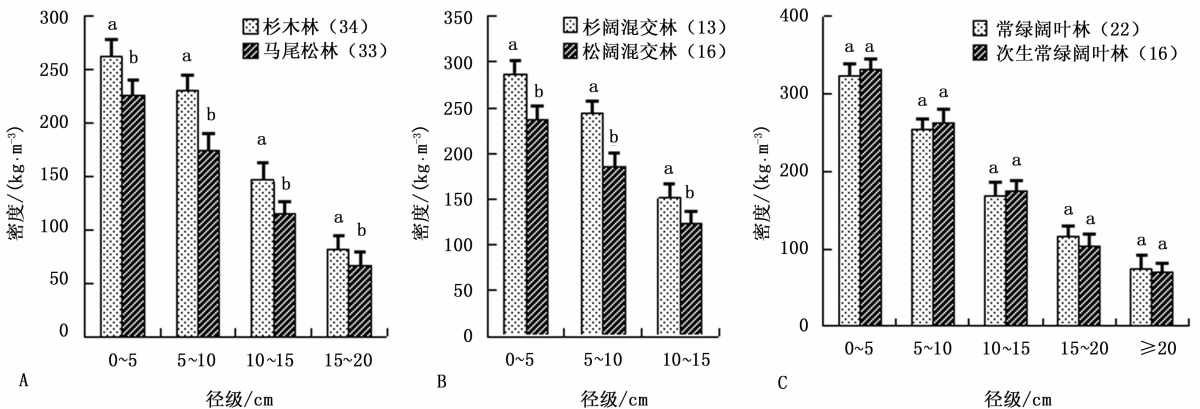


注:不同小写字母表示同一林分类型不同径级间差异显著性,显著水平为 0.05

图 2 不同森林类型倒木径级变化

2.2.2 倒木密度的径级分布 倒木密度是指单位面积倒木的质量。不同径级倒木其物理和化学组成会随着密度而发生改变<sup>[48]</sup>,密度的变化其与倒木含

水率有较大的关系<sup>[49]</sup>,对不同径级倒木分解变化过程具有一定的解释意义。



注:不同小写字母表示同一径级不同森林类型间差异显著性,显著水平为 0.05

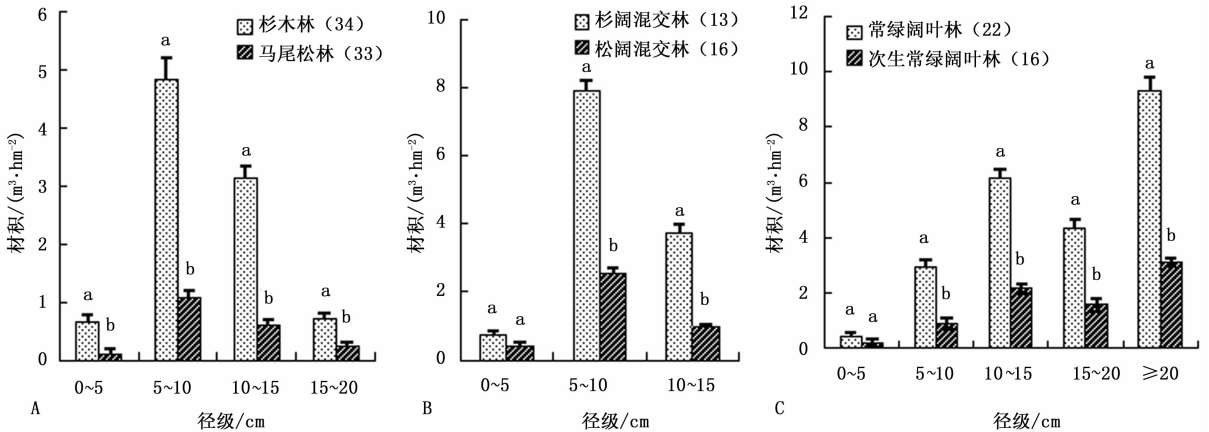
图 3 不同森林类型倒木密度的径级结构变化

从图 3 中可知,不同森林类型在各径级的倒木密度分布差异较大,杉木林与马尾松林在 4 个径级

的倒木密度差异显著(I、II、III、IV)(图 3A),针阔混交林 3 个径级(I、II、III)倒木密度差异显著(图

3B),原生常绿阔叶林与次生常绿阔叶林在各径级间倒木密度差异都不显著(图3C),可能原因是同一径级不同森林类型间,杉木与马尾松、杉阔与松阔倒木分解等级相差较大,而常绿阔叶林与次生常绿林相差不大。随着径级增加,倒木密度都在减少,可能原因是本研究中较低径级(I、II)倒木多处于轻度或中度分解等级,较高径级(III、IV)倒木多处于中度或重度分解等级。

2.2.3 倒木材积的径级分布 不同径级倒木材积变化,不仅是对倒木数量特征中倒木多少的反映,更重要的是反映倒木径级大小及长度的变化。从图4中可知,针叶林和针阔混交林不同径级倒木材积变化表现为 I < II > III(图4A、B),常绿阔叶林不同径级倒木材积变化为 I < II < III > IV < V 的双峰变化(图4C)。



注:不同小写字母表示同一径级不同林分类型间差异显著性,显著水平为0.05

图4 不同森林类型倒木材积的径级结构变化

针叶林和针阔混交林倒木材积主要集中在5~10 cm的II径级木,且本研究倒木材积主要由树高和中央直径决定,可能原因如上述图2解释一样;针阔混交林形成的原因可能是针叶林受干扰后,阔叶树加入而形成的,或是阔叶林受较强干扰后,针叶林加入。固其相对常绿阔叶林年龄较小,使得林内植株胸径和材积均较小,在干扰情况下倒伏或断梢时其材积也较小。常绿阔叶林主要集中在≥20 cm的V径级木,可能原因是常绿阔叶林林内≥20 cm的大径级植株,在受外界干扰较容易倒伏,同时当自然干扰发生时,大树的较大分枝也较容易折断,因此大径级倒木较多。

### 2.3 倒木分解特征

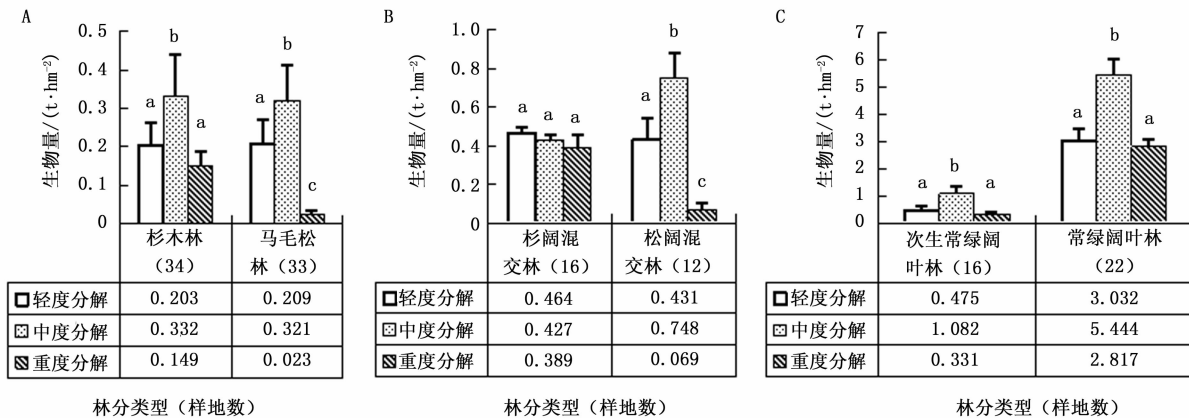
在前人的研究中不难发现倒木分解释放养分、CO<sub>2</sub>速率等和倒木自身树种组成、直径、分解等级有很大的关系,随着倒木分解的进行,倒木生物量、密度、材积等都会发生较大变化,故通过分析不同森林类型不同分解倒木数量特征分布规律,可进一步为研究生态系统养分循环过程、为碳汇功能研究、森林碳计量提供更好的理论数据。

2.3.1 不同分解等级倒木生物量 从图5可以看

出,杉木林和马尾松林中度分解等级倒木生物量分别为0.332 t·hm<sup>-2</sup>、0.321 t·hm<sup>-2</sup>,分别大于相应的轻度和重度分解等级。针阔混交林中杉阔混交林内不同分解等级倒木生物量差异不显著;松阔混交林不同分解等级间差异显著,且表现为中度分解等级0.784 t·hm<sup>-2</sup>>轻度分解0.431 t·hm<sup>-2</sup>>重度分解0.069 t·hm<sup>-2</sup>。除杉阔混交林外各类型森林都以中度分解等级的倒木生物量最大,而且与轻度分解、重度分解等级的有显著差异。

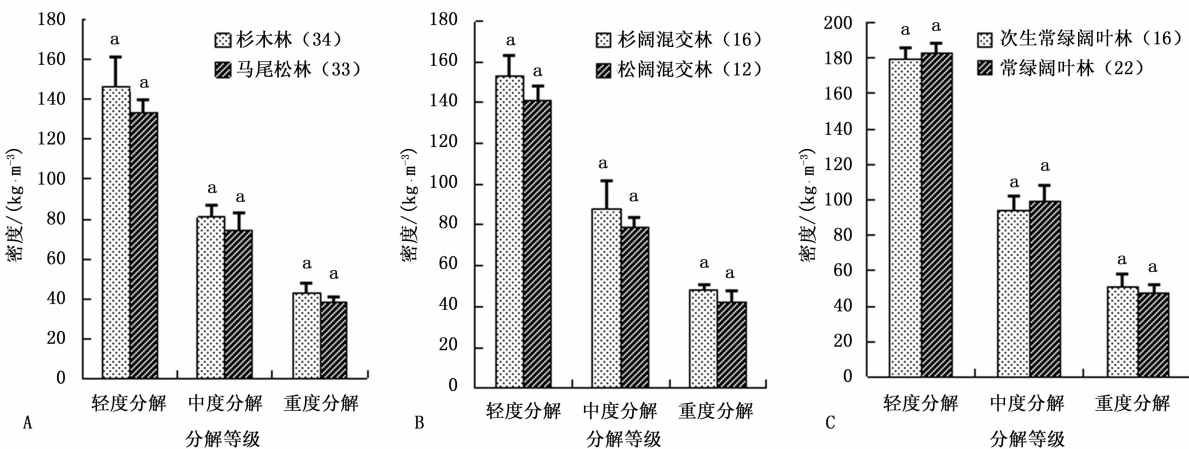
2.3.2 不同分解等级倒木密度 随着分解的进行,倒木密度(单位面积的质量)会发生较大的变化,尤其是不同树种间由于内部结构的不同、微生物活动的差异,不同森林类型间环境条件,如光照、温度、水分条件等的影响,这些都会对倒木的密度变化产生不同程度的影响。

从不同森林类型各分解等级倒木密度变化结果中可以看出,在各分解等级不同森林类型间倒木密度差异都不显著(图6A、B、C)。同一分解等级杉木倒木密度要大于马尾松,杉阔混交林倒木密度要大于松阔混交林,原生常绿阔叶林与次生常绿阔叶林倒木密度之间差异很小。



注:不同小写字母表示同一林分类型不同分解等级间差异显著性,显著水平为0.05

图5 不同森林类型不同分解等级倒木径级变化



注:不同小写字母表示同一分解等级不同林分类型间差异显著性,显著水平为0.05

图6 不同森林类型不同分解等级倒木密度变化

### 2.4 倒木沿海拔的空间分布规律

因倒木的产生主要受人干扰和环境条件变化影响,因此在一定空间上会产生差异的。从图7中可知,针叶林(杉木和马尾松)倒木主要分布在海拔400 m以下,主要是因为杉木和马尾松林在地处中亚热带的江西主要分布在较低海拔;针叶林(杉木和马尾松)倒木生物量随着海拔的增加先下降,可能原因是低海拔地区(100~150 m)存在的人为干扰较严重,使得倒木生物量较大。针阔混交林倒木生物量随着海拔增加而增加。常绿阔叶林倒木随着海拔变化,生物量先增加后减小。

针阔混交林(松阔和杉阔)倒木主要分布在海拔700 m以下,常绿阔叶林倒木分布在海拔650 m以上,可能原因是森林植物自然分布的结构,常绿阔叶林一般分布在海拔相对较高的林地,针叶林(杉木和马尾松)主要分布在较低海拔,自然针阔混交林主

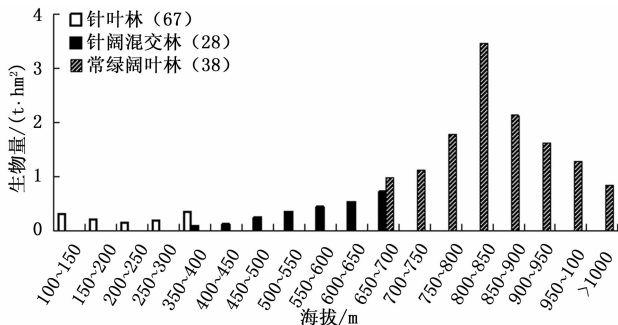


图7 不同森林类型倒木在不同海拔分布规律

要分布在两者之间。

## 3 讨论

### 3.1 倒木生物量差异

倒木作为森林生态系统重要的功能单位,其储量大小不但直接影响森林生物多样性的保育与森林

群落的演替<sup>[50]</sup>,而且在维持森林生态系统养分循环的稳定性、增强森林生态系统抗干扰等方面都有着不可替代的作用<sup>[51]</sup>。

从生物量上看,我国温带地区的大兴安岭森林倒木生物量为  $11.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[52]</sup>;长白山针阔混交林倒木贮量为  $7.9 \sim 16.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[53]</sup>;秦岭巴山冷杉 (*Abies fargesii* Franch) 林贮量为  $15.85 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[54]</sup>。本研究中,江西典型森林常绿阔叶林倒木生物量  $11.293 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,针阔混交林倒木生物量为  $1.248 \sim 1.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,较大兴安岭森林和长白山针阔混交林低。常绿阔叶林倒木生物量较小陇山锐齿栎 (*Quercus aliena* var. *acuteserrata* Maxim) 天然林 ( $29.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )<sup>[40]</sup>、鼎湖山季风常绿阔叶林 ( $25.278 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )<sup>[55]</sup>、云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林 ( $98.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )<sup>[56]</sup>低,比福建武夷山甜槠林 ( $7.349 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )<sup>[57]</sup>高,其他 3 种森林类型倒木生物量都处于较低水平。出现这种结果的可能原因是江西地处中亚热带地区,与上述研究地存在较大的纬度差异;同时由于本研究所涉及的样方数量较多,在一定程度上会消弱平均值;最后本研究中样地海拔分布差异较大(如常绿阔叶林从海拔 650 m 到 1 000 m 都有分布),可能会因为环境条件差异(如降雨、降雪和风等)而影响倒木的结果。

### 3.2 倒木的径级分布和分解特征

倒木径级一方面影响其分解及倒木储量,倒木的径级越小,其与地面的接触面积更大<sup>[58]</sup>,分解更快;同种树木径级越大,分解速率越慢,存在森林生态系统中的时间越长,倒木储量越大。另一方面,倒木径级分布受林分组成结构、立地条件以及干扰的影响。如柳泽鑫等<sup>[59]</sup>研究冰灾后粤北常绿阔叶林粗死木质残体表明,迎风坡林分大径级树种形成大量倒木;而背风坡林分小径级树种受低温冻害的影响,大量枯萎死亡。在哀牢山原生林中,倒木和枯桩都以大径级为主,大多数的木质物残体以直径 40 cm 以上倒木为主,次生林倒木以小径级为主<sup>[60]</sup>。本研究结果显示,倒木针叶林和针阔混交林,这两种森林类型倒木主要分布在 5~10 cm 和 10~15 cm 的 II、III 径级。常绿阔叶林各径级倒木分布差异较大,且较针叶林和针阔混交林分布更加均匀。结果说明针叶林和针阔混交林,林内树木竞争导致自然整枝以及下层小径级个体枯死概率较大,遭遇雨雪及病虫害时更容易形成倒木,且常绿阔叶林林内不仅活立木组成和群落结构会较针叶林和针阔混交林

有较大差异,而且其林内树木倒伏之后形成的倒木,其组成与径级结构方面也会发生明显变化。

倒木分解在森林生态系统中发挥重要的作用<sup>[61-63]</sup>,但是影响倒木分解和数量分布差异不同的原因众多,包括林分受干扰程度<sup>[64]</sup>、倒木径级大小导致其与地面接触的面积<sup>[65]</sup>、分解等级<sup>[7]</sup>等。本研究结果显示常绿阔叶林中度、重度分解等级比例大于针叶林和针阔混交林,针叶林和针阔混交林倒木主要分布在轻度、中度分解等级(图 3)。这与刘妍研等对小兴安岭阔叶红松 (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) 林倒木的研究结果倒木主要分布在 II、III 等级<sup>[66]</sup>,赵鹏武等<sup>[67]</sup>对兴安落叶松 (*Larix gmelini* (Rupr.) Rupr.) 倒木研究发现倒木最多分布在 III、V 等级和对白桦 (*Betula platyphylla* Suk.) 倒木研究最多分布在 II、III、IV 等级<sup>[67]</sup>,贺旭东对万木林常绿阔叶林的研究倒木最多分布在 III~IV 等级<sup>[68]</sup>,王俊峰等的对长白山云冷杉的研究倒木最多分布在 III、IV、V 一致<sup>[69]</sup>。结果说明林分类型导致的林内环境条件的差异对倒木的分解具有较为明显的影响。

## 4 结 论

(1) 中亚热带地区典型针叶林和常绿阔叶林中不同林分类型之间倒木生物量差异显著,而针阔混交林中不同林分类型差异不显著。

(2) 3 种森林类型(针叶林、常绿阔叶林和针阔混交林)中不同林分类型之间倒木碳储量差异都显著。

(3) 江西森林倒木主要分布在 5~10 cm 和 10~15 cm 的 II、III 径级,且主要处于中度分解等级。

(4) 针阔混交林(松阔和杉阔)倒木主要分布在海拔 700 m 以下,常绿阔叶林倒木分布在海拔 650 m 以上。

(5) 常绿阔叶林倒木由于其较大的生物量和碳储量可能会在缓解全球气候变暖和碳循环中扮演重要的作用,且在未来的森林经营和管理中应该重视倒木对森林可持续发展的重要性。

### 参 考 文 献:

- [1] Harmon M E, Ferrell W K, Franklin J F. Effects on carbon storage of conversion of old-growth forest to young forests[J]. Science, 1990, 247: 699 - 701.
- [2] 宋泽伟,唐建维. 西双版纳热带季节雨林的粗死木质残体及其养分元素[J]. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2033 - 2041.
- [3] Woodall C W, Nagel L M. Downed woody fuel loading dynamics of a



- large-scale blow down in northern Minnesota, U. S. A [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 247: 194 – 199.
- [4] 王文娟, 常禹, 刘志华, 等. 大兴安岭呼中林火灾烧迹地粗木质残体特征[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1805 – 1810.
- [5] 邓云, 张文富, 邓晓保, 等. 西双版纳热带季雨林粗木质物残体储量及其空间分布[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 261 – 270.
- [6] Graham R L, Cranack K J. Mass, nutrient and decay rate of dead boles in rain forests of Olympic National Park [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1982, 12: 511 – 521.
- [7] Harmon M E, Franklin J F, Swanson J, *et al.* Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems [J]. *Advance in Ecological Research*, 1986, 15: 133 – 302.
- [8] Harmon M E, Franklin J F. Tree seedlings on logs in Picea-Tsuga forests of Oregon and Washington [J]. *Ecology*, 1989, 70: 48 – 59.
- [9] Gray A N, Spies T A. Microsite controls on tree seedling establishment in conifer forest canopy gaps [J]. *Ecology*, 1997, 78: 2458 – 2478.
- [10] 徐化成. 中国大兴安岭森林 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [11] Torgersen T B, Bull E. Down logs as habitat for forest dwelling ants: The primary prey of pileated woodpeckers in northeastern Oregon [J]. *Northwest Science*, 1995, 69: 294 – 303.
- [12] Rabe M J, Morrell T E, Green H, *et al.* Characteristics of ponderosa pine snag roosts used by reproductive bats in northern Arizona [J]. *Journal of Wildlife Management*, 1998, 62: 612 – 621.
- [13] Timothy S M, Mark J K. Demographic responses of shrews to removal of coarse woody debris in a managed pine forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 189: 387 – 395.
- [14] Amaranthus M P, Trappe J M, Bednar L, *et al.* Hypogeous fungal production in mature Douglas-fir forest fragments and surrounding plantations and its relation to coarse woody debris and animal mycophagy [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, 24: 2157 – 2165.
- [15] Harmon M E, Sexton J. Water balance of conifer logs in early stages of decomposition [J]. *Plant and Soil*, 1995, 172: 113 – 152.
- [16] 邓红兵, 肖宝英, 代力民, 等. 溪流粗木质残体的生态学研究进展 [J]. *生态学报*, 2002, 22(1): 87 – 93.
- [17] 赵玉涛, 余新晓, 程根伟, 等. 粗木质残体(CWD)的水文生态功能 – 当前森林水文研究中被忽视的重要环节 [J]. *山地学报*, 2002, 20(1): 12 – 18.
- [18] Chambers J Q, Higuchi N, Schimel J P, *et al.* Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon [J]. *Oecologia*, 2000, 122: 380 – 388.
- [19] Hermann S, Prescott C E. Mass loss and nutrient dynamics of coarse woody debris in three Rocky Mountain coniferous forests: 21 year results [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38(1): 125 – 132.
- [20] Darcey K, Iwashita, Creighton M, Litton, Christian P. Coarse woody debris carbon storage across a mean annual temperature gradient in tropical montane wet forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 291: 336 – 343.
- [21] Shawn Fraver, Amy M Milo, John B, *et al.* Woody Debris Volume Depletion Through Decay: Implications for Biomass and Carbon Accounting [J]. *Ecosystems*, 2013, 16: 1262 – 1272.
- [22] Rianius T A, Caruso M, Jonsell, *et al.* Dead wood creation to compensate for habitat loss from intensive forestry [J]. *Biological Conservation*, 2014, 169: 277 – 284.
- [23] Russell M B, Fraver S, Aakala T, *et al.* Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood: A review [J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 350: 107 – 128.
- [24] Cousins S J M, Battles J J, Sanders J E, *et al.* Decay patterns and carbon density of standing dead trees in California mixed conifer forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 353: 136 – 147.
- [25] Shingo Katsumata, Satoru Hobara, Takashi Osono, *et al.* Mass, nitrogen content, and decomposition of woody debris in forest stands affected by excreta deposited in nesting colonies of Great Cormorant [J]. *Ecological Research*, 2015, 30: 555 – 561.
- [26] Russell M B, Woodall C W, Fraver S, *et al.* Residence Times and Decay Rates of Downed Woody Debris Biomass/Carbon in Eastern US Forests [J]. *Ecosystems*, 2014, 17: 765 – 777.
- [27] Yu Fukasawa, Shingo Katsumata, Akira S Mori, *et al.* Accumulation and decay dynamics of coarse woody debris in a Japanese old-growth subalpine coniferous forest [J]. *Ecological Research*, 2014, 29: 257 – 269.
- [28] Bantle A, Borken W, Matzner E. Dissolved nitrogen release from coarse woody debris of different tree species in the early phase of decomposition [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014a, 334: 277 – 283.
- [29] Bantle A, Borken W, Ellerbrock R H, *et al.* Quantity and quality of dissolved organic carbon released from coarse woody debris of different tree species in the early phase of decomposition [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014b, 329: 287 – 294.
- [30] Pasanen H, Junninen K, Kouki J. Restoring dead wood in forests diversifies wood-decaying fungal assemblages but does not quickly benefit red-listed species [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 312: 92 – 100.
- [31] Poznanovic S K, Lilleskov E A, Webster C R. Sharing rotting wood in the shade: ectomycorrhizal communities of co-occurring birch and hemlock seedlings [J]. *Mycorrhiza*, 2015, 25: 153 – 164.
- [32] Yu Fukasawa, Kazunari Takahashi, Tomotsugu Arikawa, *et al.* Fungal wood decomposer activities influence community structures of myxomycetes and bryophytes on coarse woody debris [J]. *Fungal Ecology*, 2015, 14: 44 – 52.
- [33] 张利敏, 王传宽. 东北东部山区 11 种温带树种粗木质残体分解与碳氮释放 [J]. *植物生态学报*, 2010a, 34(4): 368 – 374.
- [34] 袁杰, 蔡靖, 侯琳, 等. 秦岭火地塘天然次生油松林倒木储量与分解 [J]. *林业科学*, 2012, 48(6): 141 – 146.
- [35] 矫海洋, 王顺忠, 王曼霖, 等. 大兴安岭北坡兴安落叶松粗木质残体呼吸动态 [J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(6): 29 – 33.
- [36] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层和粗木质残体有机化学组成研究 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2008, 3(3): 40 – 45.
- [37] 张修玉, 管东生, 张海东. 广州三种森林粗木质残体(CWD)的储量与分解特征 [J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5227 – 5236.
- [38] 常晨晖, 吴福忠, 杨万勤, 等. 高寒森林倒木在不同分解阶段的

- 质量变化[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 14-22.
- [39] 杨方方, 李跃林. 鼎湖山粗死木质残体生物量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(5): 750-752.
- [40] 何帆, 王得祥, 张宋智. 小陇山林区主要森林群落凋落物及死木质残体储量[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(1): 046-050.
- [41] 王飞, 张秋良, 王冰, 等. 不同年龄杜香-兴安落叶松林粗木质残体贮量及特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 2981-2989.
- [42] 曾掌权, 汪思龙, 张灿明, 等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段木质残体碳密度特征[J]. 林业资源管理, 2014, 4(2): 66-72.
- [43] 李鑫, 欧阳勋志, 刘琪璟. 江西省 2001—2005 年森林植被碳储量及区域分布特征[J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 655-665.
- [44] 张志云, 蔡学林, 杜天真, 等. 江西森林立地分类、评价及适地适树研究[J]. 江西农业大学学报, 1997, 19(6): 1-30.
- [45] 邓清华, 张邦文, 金苏蓉, 等. 江西省 4 种主要森林类型土壤有机碳特征比较[J]. 江西农业大学学报, 2014, 26(11): 87-89.
- [46] Sollins P. Input and decay of coarse woody debris in coniferous stand in western Oregon and Washington[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1982, 12: 18-28.
- [47] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [48] Delaney M, Brown S, Lugo A E, et al. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest in six life zones of Venezuela[J]. Biotropica, 1998, 30, 2-11.
- [49] Fraver S, Milo A M, Bradford J B, et al. Woody debris volume depletion through decay: implications for biomass 25 and carbon accounting[J]. Ecosystems, 2013, 16, 1262-1272.
- [50] Graham S A. The felled tree trunk as an ecological unit[J]. Ecology, 1925, 6(4): 397-411.
- [51] Story K A, Weldrick C K, Mews M, et al. Intertidal coarse woody debris: A spatial subsidy as shelter or feeding habitat for gastropods? [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 66: 197-203.
- [52] 谷会岩, 金靖博, 陈祥伟, 等. 人为干扰对大兴安岭北坡兴安落叶松林粗木质残体的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 265-270.
- [53] 代力民, 徐振邦, 陈华. 阔叶红松林倒木贮量的变化规律[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 149-154.
- [54] 杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 等. 格氏栲天然林与人工林粗木质残体碳库及养分库[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 7-11.
- [55] 唐旭利, 周国逸, 周霞, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林粗死木质残体的研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 484-489.
- [56] 刘文耀, 谢寿昌, 谢克金, 等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林凋落物和粗死木质物的初步研究[J]. 植物学报, 1995, 37(10): 807-814.
- [57] 李凌浩, 邢雪荣, 黄大明, 等. 武夷山甜槠林粗死木质残体的储量、动态及其功能评述[J]. 植物生态学报, 1996, 20(2): 132-143.
- [58] Harmon M E, Nadelhoffer K J, Blair J M. Measuring decomposition, nutrient turnover, and stores in plant litter. [M] / Robertson G P, Coleman D C, Bledsoe C S, et al (eds). Standard Soil Methods for Long Term Ecological Research. New York Oxford: Oxford University Press, 1999: 202-234.
- [59] 柳泽鑫, 张璐, 区余端, 等. 冰灾后粤北常绿阔叶林粗死木质残体的组成与结构[J]. 西南林业大学学报, 2011, 31(4): 18-23.
- [60] 杨礼攀, 刘文耀, 杨国平, 等. 哀牢山湿性常绿阔叶林和次生林木质物残体的组成与碳贮量[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2153-2159.
- [61] Chambers J Q, Schimel J P, Nobre A D. Respiration from coarse wood litter in central Amazon forests[J]. Biogeochemistry, 2001, 52: 115-131.
- [62] Jomura M, Kominami Y, Tamai K, et al. The carbon budget of coarse woody debris in a temperate broad-leaved secondary forest in Japan[J]. Tellus B, 2007, 59(2): 211-222.
- [63] Woodall C W, Liknes G C. Relationships between forest fine and coarse woody debris carbon stocks across latitudinal gradients in the United States as an indicator of climate change effects[J]. Ecological Indicators, 2008a, 8: 686-690.
- [64] Hagemann U, Moroni M T, Gleiner J, et al. Disturbance history influences downed woody debris and soil respiration[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 260: 1762-1772.
- [65] Strahm B D, Harrison R B, Terry T A, et al. Soil solution nitrogen concentrations and leaching rates as influence by organic matter retention on a highly productive Douglas-fir site[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 218: 74-88.
- [66] 刘妍妍, 金光泽. 小兴安岭阔叶红松林粗木质残体空间分布的点格局分析[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6072-6081.
- [67] 赵鹏武, 海龙, 宋彩铃, 等. 大兴安岭北部兴安落叶松原始林倒木研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 173-177.
- [68] 贺旭东, 杨智杰, 郭剑芬, 等. 万木林自然保护区常绿阔叶林木质残体贮量及其组成[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(2): 46-52.
- [69] 王俊峰, 郑小贤, 王铁牛, 等. 长白山云冷杉倒木贮量及倒木对更新的影响[J]. 华北农业学报, 2004, 19(s1): 45-49.
- [70] 何东进, 何小娟, 洪伟, 等. 森林生态系统粗死木质残体的研究进展[J]. 林业科学研究, 2009, 22(5): 715-721.

(责任编辑: 彭南轩)