

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*

杨礼攀^{1,2} 刘文耀^{1,3*} 杨国平¹ 马文章^{1,2} 李达文¹

(¹中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; ²中国科学院研究生院, 北京 100049; ³ Curtin University of Technology, Perth WA 6845, Australia)

摘要 研究了哀牢山山地湿性常绿阔叶林和 3 个主要次生演替类型 (栎类萌生林、滇山杨林和旱冬瓜林) 木质物残体的组成和碳贮量特征。结果表明: 哀牢山徐家坝地区原生森林 (常绿阔叶林) 木质物残体的碳贮量达 $36.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 树种组成以腾冲栎、木果石栎和景东石栎等为主, 多数是直径 $\geq 10 \text{ cm}$ 的大径级、处于中等分解状态的倒木。这主要是由于该区常年潮湿温凉, 木质物残体中占优势的壳斗科倒木的材质坚硬, 难以分解。3 类次生林木木质物残体的碳贮量在 $1.2 \sim 5.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 为栎类萌生林 > 滇山杨林 > 旱冬瓜林, 表现出木质物残体碳贮量随群落演替进程而逐渐增加的趋势。

关键词 山地湿性常绿阔叶林 次生林 碳贮量 木质物残体 哀牢山

文章编号 1001-9332(2007)10-2153-07 **中图分类号** Q948.1 **文献标识码** A

Composition and carbon storage of woody debris in moist evergreen broad-leaved forest and its secondary forests in Ailao Mountains of Yunnan Province YANG Lǐ-pán^{1,2}, LIU Wen-yao^{1,3}, YANG Guo-ping¹, MA Wen-zhang^{1,2}, LI Da-wen¹ (¹Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Curtin University of Technology, Perth WA 6845, Australia). -Chin. J. Appl. Ecol., 2007, 18(10): 2153–2159

Abstract This paper studied the composition and carbon storage of woody debris in the primary moist evergreen broad-leaved forest and its main secondary forests (regenerated *Lithocarpus* forest, *Populus bonatii* forest and *Alnus nepalensis* forest) in Ailao Mountains of Yunnan Province. The results showed that in the primary forest, the carbon storage of woody debris amounted to $36.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. *Castanopsis wattii*, *Lithocarpus xylocarpus* and *L. chintungensis* were the main contributors, and most of them were the logs with larger diameter and at intermediate stage of decay. The unique environment of richer precipitation, higher humidity and lower temperature in the study area, and the decay-resistance of hardwood were favorable to the accumulation of woody debris. The three secondary forests had a carbon storage of $1.2 \sim 5.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, which decreased in the order of regenerated *Lithocarpus* forest > *P. bonatii* forest > *A. nepalensis* forest, showing a tendency of increasing carbon storage with succession course.

Key words mountain moist evergreen broad-leaved forest, secondary forest, carbon storage, woody debris, Ailao Mountains

1 引言

以枯立木、倒木、枯桩、枯落大枝等为主组成的木质物残体是森林生态系统中重要的结构性和功能

性组成要素^[3,5-6,8-9]。在森林生态系统,尤其是在自然老龄林生态系统中,木质物残体贮量大,存留时间比较长,是生态系统内不容忽视的碳库,但以往的研究常忽视这一部分内容^[1,22-23]。

不同森林类型木质物残体的组成和贮量不同,与所处气候带、林分年龄结构、树种组成、微生境变化和林木的耐腐蚀性等相关^[5,9,16-19]。20世纪90年代以来,随着全球碳汇问题和生物多样性保护研究的

* 国家自然科学基金项目 (30470305) 和中国科学院“百人计划”资助项目。

** 通讯作者。E-mail: liuw@xtbg.ac.cn

2006-11-13 收稿, 2007-07-16 接受。

开展^[13, 25], 有关森林木质物残体的研究已有报道, 但多集中于北美、北欧等的温带森林^[5, 16, 18]和热带森林, 对亚热带地区的研究明显不足^[20-21].

云南省是我国亚热带山地森林分布较多的主要省区之一, 在高海拔地区有较大面积的原生常绿阔叶林, 是我国西南地区重要的森林类型^[7, 26]. 在哀牢山徐家坝地区分布有 5 300 hm² 繁茂连片的山地湿性常绿阔叶林, 林相完整, 结构复杂, 林内倒木、枯桩和大枯枝等粗木质物残体非常丰富. 而且在其附近有小面积因人为干扰形成的次生群落, 有利于开展对比实验研究. 为此, 本文以该区域山地湿性常绿阔叶林及受破坏后形成的各类次生群落中木质物残体为研究对象, 探讨人为干扰对森林生态系统木质物残体组成与碳贮量的影响, 旨在为区域森林资源的保护与管理提供科学依据.

2 研究地区与研究方法

2.1 自然概况

本研究地点位于哀牢山自然保护区核心区的徐家坝地区 (24°32'N, 101°01'E), 海拔高度 2 400~2 600 m. 该区终年受西南季风的控制, 降水丰沛, 干湿季分明, 年降水量 1 931.1 mm, 年均相对湿度 83%, 年均温度 11.0 °C, 最冷月 (1月) 平均温度 4.7 °C, 最热月 (7月) 平均温度 16.4 °C, 极端最低温度 -8 °C, 全年无霜期 180 d 年日照时数 1 239 h, 具有高原山地“冬暖夏凉”的气候特征^[7, 15].

在哀牢山徐家坝地区分布着原生的常绿阔叶林和次生植被两大类型. 其中, 以木果石栎 (*Lithocarpus xylocarpus*)、腾冲栲 (*Castanopsis wattii*) 和景东石栎 (*L. chintungensis*) 为代表的山地湿性常绿阔叶林是区内面积最大、保存最完好的原生植被, 约占该区面积的 80%. 该群落垂直分层明显, 一般分为 3 层: 乔木层高 20~25 m, 胸径 30~50 cm, 一些胸径 130 cm 以上的老树仍生机勃勃. 群落优势树种除木果石栎、腾冲栲和景东石栎外, 还有相当数量的滇木荷 (*Schinus noronhai*)、红花木莲 (*Manglietia insignis*)、绿叶楠 (*Machilus viridis*)、舟柄茶 (*Hartia siensis*) 等; 灌木层以箭竹 (*Sinarundinaria nitida*) 为主, 层盖度 70% 左右; 草本层中蕨类所占的比例较高, 层盖度约 30%. 林地上老树衰老枯死形成的倒木、枯立木和大枝数量多, 分布不均匀, 构成了哀牢山山地湿性常绿阔叶林重要的景观特征^[7, 11].

栎类次生林、滇山杨 (*Populus bonatii*) 林和旱冬瓜 (*Alnus nepalensis*) 林基本上代表了该区原生常绿

阔叶林受到不同程度的人为干扰和破坏的次生群落状况及其恢复演替趋势^[11, 15]. 栎类次生林是原生常绿阔叶林遭受人为砍伐或轻微的火烧, 由伐桩根系和萌生枝条恢复形成. 其物种组成与原生常绿阔叶林大致相当, 林冠不整齐, 具有较高的林木密度和基面积, 树木年龄结构较均匀^[26], 树龄在 90~110 年左右, 萌生现象突出. 与老龄林相比, 滇山杨林和旱冬瓜林为 20 世纪 60 年代本区域修建徐家坝水库过程中, 部分原生林遭受严重破坏后形成的次生植被, 林龄较小. 滇山杨次生林主要出现在徐家坝周围的低丘和缓坡地带, 呈零星小片分布, 乔木层高 15~20 m, 以滇山杨为主, 相当数量的林木出现中腐现象, 显现出衰退的状态, 在不少地段已有少量的木果石栎、滇木荷、景东石栎等种类, 预示着群落朝木果石栎、景东石栎、腾冲栲为优势的常绿阔叶林的方向演替^[15]. 旱冬瓜林是在原生林遭受彻底破坏又加火烧后逐渐形成的, 呈小块状分布于原生林林缘, 群落高度 10~15 m, 结构简单, 物种贫乏, 乔木几乎全是旱冬瓜, 层盖度 40%. 灌木种类均混杂于草本层中, 主要有玉山竹 (*Yushania niitakayamensis*) 和芒种花 (*Hypericum patulum*); 草本层以毛蕨菜 (*Pteridium revolutum*) 为主, 现仍受到频繁放牧 (猪、牛、羊) 和轻度森林砍伐的干扰影响.

2.2 研究方法

2.2.1 野外调查 近年来, 为了便于比较, 国外的森林管理和研究机构对木质物残体的概念等进行了统一, 把直径标准由原来的 2.5 cm 提高到 ≥ 10 cm^[16], 称为粗木质物残体 (coarse woody debris, CWD), 而把直径 2.5~10.0 cm 的木质物残体界定为细木质物残体 (fine woody debris, FWD). 因此, 在本研究中, 把直径 ≥ 2.5 cm 的倒木、枯立木、枯桩和大枝等木质物残体分为两部分调查: 1) 直径 2.5~10 cm 的为细小径级木质物残体; 2) 直径 ≥ 10 cm 的为粗木质物残体. 在野外调查中, 原生的山地常绿阔叶林设立 3 个 100 m $\times$ 100 m 的样地, 而栎类萌生林、旱冬瓜林、滇山杨林中每个次生林设置 4 个 50 m $\times$ 50 m 的样地. 在每个原生林 1 hm² 样地和次生林 0.25 hm² 样地上, 逐一测量直径 ≥ 10 cm 的倒木、枯桩和大枝等 (CWD) 的长度 (或高度)、基径、小头直径, 记录各组分的树种, 划分分解等级, 取样测定其密度, 然后以圆台体模型测算其体积, 再根据相应分解等级的密度计算其质量. 同时, 观测记录各样地枯立木种类及其株数, 测量基径、胸径和树高, 野外确定分解等级, 取样测定其密度, 采用邱学忠等^[14]

表 1 哀牢山徐家坝地区山地常绿阔叶林主要树种的树干生物量模型^[14]

Tab 1 Allometric equations of the stem biomass of dominant species in the montane evergreen broad-leaved forest at Xujiaba region of Ailao Mts

树种 Species	树干生物量模型 Biomass model for the stem
木果石栎 <i>Lithocarpus xylocarpus</i>	$W = 0.0347(D^2H)^{0.9740}$
景东石栎 <i>Lithocarpus dhinlungensis</i>	$W = 0.0226(D^2H)^{0.6193}$
腾冲栲 <i>Castanopsis wattii</i>	$W = 0.0177(D^2H)^{1.0168}$
红花木莲 <i>Manglietia insignis</i>	$W = 0.5029(D^2H)^{0.5682}$
滇木荷 <i>Schinus noronhai</i>	$W = 0.3595(D^2H)^{0.3471}$
绿叶润楠 <i>Machilus viridis</i>	$W = 0.0283(D^2H)^{0.9560}$
其他树种 Other species	$W = 0.16095(D^2H)^{0.7469}$

建立的生物量回归模型推算其生物量(表 1)。

细木质物残体现存量的测量是在每个原生林的 1 hm² 样地中, 设置 16 个 10 m × 10 m 小样方^[26]; 在每个 0.25 hm² 的次生林样地中, 设置 4 个 10 m × 10 m 的小样方中调查得到。具体方法是在每个 100 m² 的小样方内, 收集直径在 2.5~10 cm 之间的小倒木、大枝等, 称取鲜质量, 混合后称取 3~5 份样品, 在 105℃ 烘干至恒量再称量, 得出样品干鲜比, 求得每公顷样地中的干质量, 最后求取单位面积的现存量。

2.2.2 木质物残体分解等级划分 以 Sollins 于 1980 年制定的 5 级划分系统为基础^[17, 21], 结合哀牢山潮湿生境下常绿阔叶林木质物残体的分解状况以及其它亚热带常绿阔叶林木质物残体分解等级划分的标

准^[24], 在野外条件下, 依据直观辨别木质物残体的形态特征、木质结构及颜色、植物生长状况等, 并借助刀片、尺子等简单工具测度, 划分出不同腐解等级的木质物残体(表 2)。

2.2.3 CWD 各组分碳含量及其碳贮量 在本研究中, 每个森林群落木质物残体碳贮量是通过木质物残体各组分单位面积贮量与其各组分碳含量之乘积, 然后累加获得。

2.3 数据处理

采用 SPSS 12.0 软件对数据进行相关分析, 并用 LSD 法进行多重比较。

3 结果与分析

3.1 木质物残体的树种组成

在实际调查中, 由于对直径介于 2.5~10.0 cm 之间的木质物残体的树种较难区分, 而直径 ≥ 10.0 cm 的木质物残体(CWD)是主体, 故主要对直径 ≥ 10.0 cm 的 CWD 的树种组成进行分析比较。由表 3 可以看出, 原生林中的 CWD 由 18 种树木组成, 贮量为 70.3 t · hm⁻², 其中腾冲栲的贮量最大。栎类萌生林的 CWD 由 15 种树种组成, 但其贮量只有 5.1 t · hm⁻², 无明显的优势树种, 瑞丽鹅掌柴、景东石栎和多花山矾等数量较多, 其 CWD 生物量约占总贮量的 45.0%。在滇山杨林中, 滇山杨的枯立木、倒木、枯枝是构成其 CWD 的主体, 占总贮量的 85.6%, 且有少量的景东石栎、木果石栎和华

表 2 哀牢山徐家坝地区森林木质物残体的分解等级

Tab 2 Classification system for WD decay classes in montane forest at Xujiaba region of Ailao Mts

分解等级 Decay classes	叶 Leaves	树枝 Branches and twigs	树皮 Bark	木质结构和颜色 Wood consistency	植物生长 Vegetation growing	根系入侵 Invaded by roots	间接手段 Indirect measure
存在 Present		有小枝, 粗枝完整 Twigs present large branches keep intact	完整, 坚固 Intact tight	坚实, 原色 Solid original color	苔藓 Mosses	无 Absent	死亡 1~2 年, 木质部仍新鲜 Cambium still fresh, died less than 2 years
无 Absent		有粗枝, 无小枝 Absent of twigs large branches present	基本完整, 局部松弛 Intact on the whole, tight	坚实, 原色 Solid original color	苔藓和蕨类 Mosses and ferns	无 Absent	开始腐解, 刀片可刺进 2~5 mm Cambium decayed, knife blade penetrated 2~5 mm
无 Absent		无 Absent	部分存在, 松弛 Partly present loose	较坚固, 开始退色 Semi-solid faded	苔藓、蕨类和少量幼苗 Mosses ferns and few seedlings	边材区域 Sapwood area	刀片可刺进 1~2 cm Knife blade penetrated less than 2 cm
无 Absent		无 Absent	少量, 松弛 Trace present loose	部分坚固, 易破裂 Partly solid and breakable, faded	苔藓及幼苗、灌木分布 Moss cover thoroughly seedlings and few shrubs	可见部分心材 Heartwood	刀片能切入 2~5 cm Knife blade penetrated 2~5 cm
无 Absent		无 Absent	无 Absent	松软, 极易破碎成粉末 Soft and powdery, heavily faded	几乎覆盖苔藓等, 灌木和大树生长 Moss shrubs trees	入侵全部, 穿透心材 Through-out the heartwood	刀片能任意刺入木质部 Knife blade penetrated all the way

表 3 哀牢山徐家坝地区原生林及次生林中木质物残体的物种组成
Tab 3 Species composition of WD in the primary and secondary forests at Xujiaba region in Ailao Mts

森林类型 Forest type	树 种 Tree species	CW D贮量* B iomass (mean ±SE, t · hm ^{- 2})	百分比 Percent	
原生林 Primary forest	腾冲栲 <i>Castanopsis w attii</i>	53. 26 ±13. 09	75. 73	
	景东石栎 <i>L. chin tung ensis</i>	3. 22 ±0. 45	4. 57	
	木果石栎 <i>L. xylocarp us</i>	2. 58 ±1. 47	3. 68	
	绿叶润楠 <i>M achilus virilis</i>	2. 28 ±0. 87	3. 24	
	滇木荷 <i>Schima noronhae</i>	1. 87 ±0. 37	2. 66	
	其它 Others	7. 11 ±0. 65	10. 12	
	合计 Total	70. 33 ±13. 80	100	
次生林 Secondary forest	栎类次生林 <i>Lithocarpus</i> regrowth	瑞丽鹅掌柴 <i>Schefflera sw e li ensis</i>	1. 14 ±0. 35	22. 31
	景东石栎 <i>L. chin tung ensis</i>	景东石栎 <i>L. chin tung ensis</i>	0. 76 ±0. 33	14. 87
		多花山矾 <i>Synp locos ramosissin a</i>	0. 40 ±0. 19	7. 83
		其它 Others	2. 81 ±0. 94	54. 99
		合计 Total	5. 11 ±0. 88	100
	滇山杨林 <i>P. bonatii</i> forest	滇山杨	5. 51 ±0. 99	85. 56
	景东石栎 <i>L. chin tung ensis</i>	景东石栎 <i>L. chin tung ensis</i>	0. 75 ±0. 69	11. 65
		其它 Others	0. 18 ±0. 29	2. 79
		合计 Total	6. 44 ±0. 44	100
	旱冬瓜林 <i>A. nepalensis</i> forest	<i>A. nepa len sis</i>	2. 40 ±0. 32	100

* 各群落木质物残体贮量数据为直径 ≥10.0 cm 的 CWD Biomass data were based on the CWD of ≥10.0 cm.

山松. 旱冬瓜林中 CWD 则全由单一树种旱冬瓜组成.

3.2 木质物残体的径级结构

在原生林中, 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, 其中直径 100 cm 以上的大树约占其木质物残体总贮量的 50% (图 1), 枯立木多数为直径 20~40 cm 的枯死树木. 在 3 类次生林中, 除栎类次生林中有 10.7% 的 40~60 cm 径级的木质物残体以外, 其余的组成都以小径级为主, 滇山杨林内直径 20~40 cm 的木质物残体组分占总贮量的 76.2%, 旱冬

瓜林中直径 2.5~10 cm 的枯枝占其总贮量的 55.6%. 由此可以看出, 原生林遭受破坏后形成的次生林, 不仅活立木组成和群落结构发生很大变化, 而且其木质物残体组成与径级结构方面也发生了明显变化.

3.3 木质物残体贮量的分解等级分布

由图 2 可以看出, 哀牢山原生林及次生林中各分解等级木质物残体的组成与比例存在较大差异. 在原生林中, 木质物残体具备完整的分解系列 (I~V 级), 中、高级分解状态 (III~V 级) CWD 占贮量的 74.3%; 次生林中木质物残体以轻度分解状态 (I~II 级) 为主, 其木质物残体在栎类次生林、滇

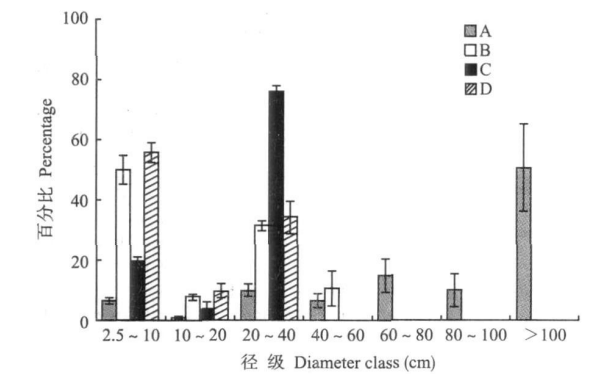


图 1 哀牢山徐家坝地区原生林及次生林木质物残体的径级组成

Fig 1 Diameter classes of WD in primary and secondary forests at Xujiaba region in Ailao Mts (mean ±SE).

A: 原生林 Primary forest B 栎类次生林 *Lithocarpus* regrowth C: 滇山杨林 *P. bonatii* forest D: 旱冬瓜林 *A. nepalensis* forest 下同 The same below.

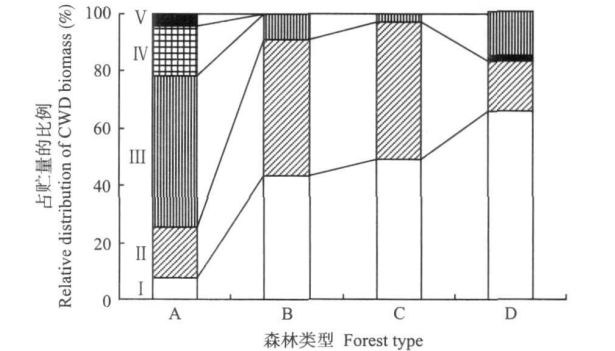


图 2 哀牢山徐家坝地区原生林及次生林木质物残体不同分解状态的比例

Fig 2 Relative distribution of WD biomass among decay classes in the primary and secondary forests at Xujiaba region of Ailao Mts

I~V : 分解等级 Decay classes

表 4 哀牢山徐家坝地区原生林和次生林木质物残体的组成和数量

Tab 4 Composition and biomass ofWD in primary forest and secondary forests at xujiaba region of Ailao Mountains(mean±SE)

组成 Component	原生林 Primary forest		次生林 Secondary forest					
			栎类萌生林 <i>Lithocarpus</i> regrowth		滇山杨林 <i>P. bonatii</i> forest		旱冬瓜林 <i>A. nepalensis</i> forest	
	数量 Amount (t·hm ⁻²)	%	数量 Amount (t·hm ⁻²)	%	数量 Amount (t·hm ⁻²)	%	数量 Amount (t·hm ⁻²)	%
倒木 Logs	61.72±14.25a	82.44	1.74±0.27b	17.58	5.35±0.35b	66.71	0.71±0.23b	29.58
枯立木 Snags	3.18±0.29a	4.25	2.43±0.52a	24.55	0.68±0.19b	8.48	0.26±0.16b	10.83
树桩 Stumps	3.97±0.26a	5.30	0.28±0.12b	2.73	—	—	0.15±0.02b	6.25
大枝 Branches (≥10 cm)	1.46±0.34a	1.95	0.66±0.13b	6.67	0.42±0.14b	5.24	—	—
合计 Total	70.33±13.90	93.94	5.11±0.88	51.62	6.44±0.44	80.30	2.24±0.32	46.67
大枝 Branches (2.5~10 cm)	4.54±0.34a	6.06	4.79±0.52a	48.38	1.58±0.09b	19.70	1.28±0.22b	53.33
合计 Total	74.87±13.82	100.00	9.90±0.88	100	8.02±0.44	100	2.40±0.16	100

不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters meant significant difference at 0.05 level

表 5 哀牢山徐家坝地区原生和次生林木质物残体的碳贮量和分布

Tab 5 Composition and carbon storage ofWD in primary forest and secondary forests at xujiaba region of Ailao Mountains

组成 Component	原生林 Primary forest		次生林 Secondary forest					
			栎类萌生林 <i>Lithocarpus</i> regrowth		滇山杨林 <i>P. bonatii</i> forest		旱冬瓜林 <i>A. nepalensis</i> forest	
	C贮量 C storage (t·hm ⁻²)	%	C贮量 C storage (t·hm ⁻²)	%	C贮量 C storage (t·hm ⁻²)	%	C贮量 C storage (t·hm ⁻²)	%
倒木 Logs	29.97	81.97	0.84	16.90	2.60	65.66	0.34	28.57
枯立木 Snags	1.64	4.49	1.25	25.15	0.35	8.84	0.13	10.92
树桩 Stumps	1.93	5.28	0.13	2.62	—	—	0.07	5.88
大枯枝 Large branches (≥10 cm)	0.74	2.02	0.33	6.64	0.21	5.30	—	—
合计 Total	34.28	93.74	2.55	51.31	3.16	79.80	0.54	45.38
小枯枝 Branches (2.5~10 cm)	2.29	6.26	2.42	48.69	0.80	20.20	0.65	54.62
合计 Total	36.57	100	4.97	100	3.96	100	1.19	100

山杨林和旱冬瓜林中木质物残体总贮量的 90.9%、97.3%和 83.3%,而中等分解程度的木质物残体所占比例很少。

3.4 CWD组成和碳贮量

由表 4可以看出,哀牢山徐家坝地区原生林及次生林木质物残体的贮量及其组成存在较大差异。原生林中木质物残体的贮量最大(74.9 t·hm⁻²),其中≥10 cm的 CWD占总贮量的 93.9%,倒木是其主要成分,而直径 2.5~10 cm的 FWD只占 6.1%。3类次生林的木质物残体贮量在 2.4~9.9 t·hm⁻²。栎类次生林中,大倒木、大枯枝的比例减少,直径≥10 cm的 CWD占其总贮量的 51.6%,10 cm以下的枯枝数量也较多;在滇山杨林中,直径在 10 cm以上的大枯枝、枯立木较多,占其总贮量的 80.3%;旱冬瓜林内 2.5~10 cm径级的枯枝、干等占群落木质物残体总贮量的 53.3%。

森林木质物残体的碳贮量与木质物残体贮量和组成特征相一致。在哀牢山徐家坝地区,原生林的碳贮量最大(36.6 t·hm⁻²),其中多数碳素贮存于倒木中;3类次生林木质物残体的碳贮量在 1.2~

5.0 t·hm⁻²之间变化(表 5),为栎类次生林>滇山杨林>旱冬瓜林。其中,处于演替初级阶段的旱冬瓜林木质物残体贮量最小,与本区次生群落的恢复演替进程基本一致,表现出随演替进程木质物残体碳贮量逐渐增加的趋势。

4 讨 论

4.1 木质物残体的贮量特征

本研究中,哀牢山山地湿性常绿阔叶林木质物残体的碳贮量明显高于福建武夷山甜槠林^[10]和广东鼎湖山季风常绿阔叶林^[20],处于亚热带常绿阔叶林木质物残体碳贮量的上限,介于温带森林和热带森林之间^[5,9,19-21]。这与哀牢山山地湿性常绿阔叶林木质物残体的组成、径级结构、木材性质、环境条件和人为干扰状况等密切相关^[11-12]。在该类森林中,木质物残体居多数的一些大径级壳斗科植物种类的倒木,木材坚硬,难以分解;研究区位于哀牢山顶部,海拔高,常年温凉潮湿,林内光照不足,不利于倒木的分解;加上地处哀牢山自然保护区的核心区,

人为干扰少^[7-11],均为该类阔叶林木木质物残体的积累提供了条件.哀牢山山地湿性常绿阔叶林木木质物残体组成分析的结果表明,倒木所占比例最大,与其它地区的老龄林报道相一致^[5-18-20],反映了此类森林处于过熟的老龄林状态.

哀牢山山地湿性常绿阔叶林的地上部生物量为 $345.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[14],占该森林群落地上部生物量的 21.3%,略高于其它地区成、过熟林的上限值^[18-20],说明哀牢山高山潮湿温凉的气候、较少的人为干扰和木材耐腐蚀性强等因素十分有利于林内木质物残体的积累;从本区林内直径 100 cm 以上枯倒木分解状况及其周围树木生长分析来看,倒木倒地时间可能已超过百年,在林地保留时间较长.高贮量的木质物残体是山地森林生态系统重要的碳库,对森林生态系统 C 循环具有长期和缓慢的影响^[5-20-23].

4.2 木质物残体的组成结构

本研究结果表明,森林木质物残体的组成与分解格局随群落的结构及演替变化存在较大差异.在原生林中,木质物残体主要由直径 $\geq 10 \text{ cm}$ 的倒木、枯枝、枯桩等构成,多处于较高分解状态;在次生林中,除滇山杨林外,其余两类次生林中直径 2.5 ~ 10.0 cm 的细小枯枝、干等 (FWD) 数量约占各自群落木质物残体贮量的 50%,且多以轻度分解状态所占比例较大.这与其它亚热带地区常绿阔叶林不同演替类型森林群落木质物残体的组成与分解等级格局^[21]相似.不同类型森林群落活立木和木质物残体生物量的树种组成有所不同.在原生林中,活体生物量中以木果石栎、绿叶润楠和腾冲栲所占比例最大,合计占地上生物量的 78.6%;但在木质物残体的树种组成中,腾冲栲占 CWD 总贮量的 75.7%,株数少,但多为直径 $> 100 \text{ cm}$ 的大树,其木材具有很强的耐腐蚀性,难以分解,在森林内积累量最多.在次生林中,旱冬瓜林受到的干扰强度最大,乔木层由单一的先锋树种所占据,处于群落恢复演替的初级阶段,木质物残体主要由枯死的旱冬瓜的干和枝组成;滇山杨林群落中乔木层树种组成除滇山杨外,已出现景东石栎、木果石栎等本区原生林的建群种和来自这些树种的木质物残体,在一定程度上反映出该类次生群落恢复演替时间相对较长,且林内有较多的滇山杨患心腐病^[15],成为倒木的重要来源之一,同时促进了其它树种的进入、生长发育和林木更替;栎类萌生林有近百年的恢复历史,在群落结构和树种组成上与原生林基本相似,但在木质物残体构成中无明显的优势树种,特别是大径级的树木, FWD 在

群落木质物残体中的比例仍高于原生林,说明森林群落要形成高贮量的木质物残体需要很长时间.这与唐旭利等^[21]的研究报道相一致.由此也说明森林木质物残体的组成、贮量及其动态特征与以往的干扰历史、林木生长及森林演替进程等有密切的关系.

4.3 人为干扰对木质物残体贮量的影响

人为干扰活动对森林木质物残体的贮量和组成有明显的影响^[5-21]. 20 世纪 90 年代中期,本区原生林中木质物残体的总贮量达 $98.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中倒木占总贮量的 85.8%^[12].但由于管理部门对森林木质物残体的生态功能认识不足,对林内的倒木、枯立木、大枯枝等保护力度不够. 2005 年的调查结果表明,区内原生林木质物残体的贮量有所下降,其中倒木、枯立木数量明显减少,且分布不均匀,在靠近路旁、林缘或易于搬运处的倒木、枯立木、大枯枝已被用作薪材或建筑用材,不仅直接影响到山地森林生态系统木质物残体组成、贮量及其分布格局,而且对生态系统的碳库贮存、养分循环、群落更新以及生境质量产生一定的影响.目前,保护区管理部门在加强森林资源保护和管理的同时,也加强了林内粗死木质物残体的保护,以保持森林生态系统的完整性.但是,由于旱冬瓜林分布在保护区边缘,目前仍受放牧和薪柴收获的干扰,直接影响到其群落内木质物残体的贮量和组成.

致谢 感谢哀牢山生态站李常军、杨文诤和罗成昌等在野外调查工作中提供的帮助和支持.

参考文献

- [1] Brown S. 1990. Measuring carbon in forests: Current status and future challenges. *Environmental Pollution*, **116**: 362-372.
- [2] Grove SJ. 2001. Extent and composition of dead wood in Australian lowland tropical rainforest with different management histories. *Forest Ecology and Management*, **154**: 35-53.
- [3] Hao Z-Q (郝占庆), Lü H (吕航). 1989. An overview of the roles of coarse woody debris in forest ecosystem. *Advance in Ecology* (生态学进展), **6**(3): 179-183 (in Chinese).
- [4] Harmon ME. 2001. Carbon sequestration in forests: Addressing the scale question. *Journal of Forestry*, **99**(4): 24-29.
- [5] Harmon ME, Franklin JF, Swanson FJ *et al.* 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research*, **15**: 133-302.
- [6] Harmon ME, Sexton J. 1996. Guidelines for Measurements of Woody Detritus in Forest Ecosystems. Washington: US LTER Network Office, University of Wash-

- ington
- [7] Jin Z-Z (金振洲). 1983 On the characteristics and nature of the evergreen broad-leaved forest in Xujiaaba region, Ailao Mts//Wu Z-Y (吴征镒), ed Research in Forest Ecosystems on Ailao Mountains, Yunnan Kuming Yunnan Science and Technology Press 204-214 (in Chinese)
- [8] Kapeluck PR. 2002 Coarse Woody Debris in an Age Sequence of Southern Appalachian Forests. Ph. D. dissertation, Clemson, South Carolina, US, Clemson University
- [9] Keller M, Palace M, Asner GP, et al. 2004 Coarse woody debris in undisturbed and logged forests in the eastern Brazilian Amazon. *Global Change Biology*, **10** (5): 784-795
- [10] Li L-H (李凌浩), Xing X-R (邢雪荣), Huang D-M (黄大明), et al. 1996 Storage and dynamics of coarse woody debris in *Castanopsis eyrei* forest of Wuyi Mountain, with some considerations for its ecological effects. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **20**(2): 132-134 (in Chinese)
- [11] Liu WY, Fox JED, Xu ZF. 2002 Biomass and nutrient accumulation in montane evergreen broad-leaved forest (*Lithocarpus xylocarpus* type) in Ailao Mountains, SW China. *Forest Ecology and Management*, **158**: 223-235
- [12] Liu W-Y (刘文耀), Xie S-C (谢寿昌), Xie K-J (谢克金), et al. 1995 Preliminary studies on litterfall and coarse woody debris in mid-mountain humid evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **37**(10): 807-814 (in Chinese)
- [13] Mao L-X (毛留喜), Sun Y-L (孙艳玲), Yan X-D (延晓冬). 2006 Modeling of carbon cycling in terrestrial ecosystem: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **17**(11): 2189-2195 (in Chinese)
- [14] Qiu X-Z (邱学忠), Xie S-C (谢寿昌), Jing G-F (荆桂芬). 1984 A preliminary study on biomass of *Lithocarpus xylocarpus* forest in Xujiaaba region, Ailao Mts, Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica* (云南植物研究), **6**(1): 85-92 (in Chinese)
- [15] Sheng G-Y (盛才余), Xie S-C (谢寿昌). 1990 Studies on the growth regularity and the successional status of *Populus bonatii* in the Ailao Mountains. *Journal of Southwest Forestry College* (西南林学院学报), **11**(1): 33-40 (in Chinese)
- [16] Siitonen J, Martikainen P, Punttilä P, et al. 2000 Coarse woody debris and stand characteristics in mature managed and old-growth boreal mesic forests in southern Finland. *Forest Ecology and Management*, **128**: 211-225
- [17] Sollins P. 1982 Input and decay of coarse woody debris in coniferous stands in western Oregon and Washington. *Canadian Journal of Forest Research*, **12**: 18-28
- [18] Spies TA, Franklin JF, Thomas TB. 1988 Coarse woody debris in Douglas-fir forests of western Oregon and Washington. *Ecology*, **69**: 1689-1702
- [19] Sturtevant BR, Bissonette JA, Long JN, et al. 1997 Coarse woody debris as a function of age, stand structure and disturbance in boreal Newfoundland. *Ecological Applications*, **7**: 702-712
- [20] Tang X-L (唐旭利), Zhou G-Y (周国逸). 2005 Coarse woody debris biomass and its potential contribution to the carbon cycle in successional subtropical forests of southern China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **29**(4): 559-568 (in Chinese)
- [21] Tang X-L (唐旭利), Zhou G-Y (周国逸), Zhou X (周霞), et al. 2003 Coarse woody debris in monsoon evergreen broad-leaved forests of Dinghushan Nature Reserve. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **27**(4): 484-489 (in Chinese)
- [22] Wilke W, Hess T, Bengel C, et al. 2005 Coarse woody debris in a montane forest in Ecuador: Mass, C and nutrient stock and turnover. *Forest Ecology and Management*, **205**: 139-147
- [23] Woodwell GM, Whitaker RH, Reiners WA, et al. 1978 The biota and the world carbon budget. *Science*, **199**: 141-146
- [24] Yan E-R (闫恩荣), Wang X-H (王希华), Huang J-J (黄建军). 2005 Concept and classification of coarse woody debris in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **25**(1): 158-167 (in Chinese)
- [25] Yang JC (杨景成), Han X-G (韩兴国), Huang JH (黄建辉), et al. 2003 Effects of land use change on carbon storage in terrestrial ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **14**(8): 1385-1390 (in Chinese)
- [26] Young SS, Carpenter C, Wang ZJ. 1992 Study of the structure and composition of an old growth and secondary evergreen broad-leaved forest in the Ailao Mountains in Yunnan, China. *Mountain Research and Development*, **12**(3): 269-284

作者简介 杨礼攀,男,1974年生,博士研究生.主要从事植物生态学及恢复生态学研究,发表论文3篇. E-mail lipany@xtbg.ac.cn

责任编辑 李凤琴