

DOI: 10.5846/stxb202009262498

王一帆, 谌小勇, 邹东军, 雷俊杰, 吴小红, 王钧, 闫文德, 梁小翠. 湘南典型次生林粗木质残体生物量、碳储量和养分特征. 生态学报, 2022, 42(8): 3441-3448.

Wang Y F, Chen X Y, Zou D J, Lei J J, Wu X H, Wang J, Yan W D, Liang X C. Biomass, carbon storage and nutrient content of coarse woody debris in secondary-growth forests in southern Hunan. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3441-3448.

湘南典型次生林粗木质残体生物量、碳储量和养分特征

王一帆^{1,3}, 谌小勇², 邹东军^{1,4}, 雷俊杰^{1,5}, 吴小红^{3,4}, 王 钧^{3,5}, 闫文德^{1,6,*}, 梁小翠^{3,6}

1 中南林业科技大学 生命科学与技术学院, 长沙 410004

2 College of Arts and Sciences, Governors State University, Illinois 60484, USA

3 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004

4 城市森林生态湖南省重点实验室, 长沙 410004

5 湖南省国家公园工程技术研究中心, 长沙 410004

6 亚热带森林生态湖南省普通高校重点实验室, 长沙 410004

摘要:对九龙江森林公园次生常绿阔叶林粗木质残体(CWD)进行量化研究,了解亚热带典型次生林 CWD 的本底数据。以九龙江森林公园典型天然次生林中的 6 个 20m×20m 的标准样地为对象,调查并分析样地内不同分解等级 CWD 的生物量、碳储量和养分特征变化。九龙江森林公园亚热带典型次生林的 CWD 储量在 2.8—30.4t/hm²之间,碳储量在 6.10—6.75t/hm²之间,大量营养元素(N、P、K、Ca、Mg)含量相对稳定,化学计量变化不显著,微量营养元素中 Pb 与 Cd 元素含量随着分解等级的增加而增加。九龙江森林公园亚热带典型次生林的 CWD 储量在亚热带常绿阔叶林中处于中等水平,CWD 主要以分解中后期的倒木为主,反映出该次生林处于中幼龄林阶段,具有较高的碳储量,养分含量相对稳定,并表现出 Pb 与 Cd 在 CWD 中积累的现象,在中度分解和重度分解的 CWD 中 Pb 含量分别增加了 62.65%和 69.88%,Cd 含量则分别增加了 33.33%和 100%,其内在机理有待进一步深入研究。研究结果有助于进一步了解 CWD 如何参与森林生态系统养分循环、重金属积累等生态过程,比较不同林分干扰历史下 CWD 储量、分布及养分特征的异质性,补充 CWD 参与碳循环和碳平衡过程的本底数据,为亚热带典型次生林的保护与可持续经营提供了科学依据。

关键词:亚热带次生林;粗木质残体;生物量;化学计量;养分特征

Biomass, carbon storage and nutrient content of coarse woody debris in secondary-growth forests in southern Hunan

WANG Yifan^{1,3}, CHEN Xiaoyong², ZOU Dongjun^{1,4}, LEI Junjie^{1,5}, WU Xiaohong^{3,4}, WANG Jun^{3,5}, YAN Wende^{1,6,*}, LIANG Xiaocui^{3,6}

1 Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China

2 College of Arts and Sciences, Governors State University, Illinois 60484, USA

3 National Engineering Laboratory of Applied Technology for Forestry & Ecology in Southern China, Changsha 410004, China

4 City of Hunan Province Key Laboratory of Forest Ecology, Changsha 410004, China

5 Engineering, Technology & Research Center of National Park in Hunan Province, Changsha 410004, China

6 Key Laboratory of Subtropical Forest Ecology, Colleges and Universities of Hunan Province, Changsha 410004, China

基金项目:国家重点研发计划资助(2020YFA0608100);湖南省重点研发计划项目(2020NK2022);湖南省教育厅创新平台开放基金项目(18K054);湖南省教育厅优秀青年项目(18B171)

收稿日期:2020-09-26; **网络出版日期:**2021-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csfufywd@hotmail.com

Abstract: In order to understand the structural and function roles played by coarse woody debris (CWD) in typically subtropical secondary-growth forests, the biomass, carbon storage and nutrient content of CWD were investigated in Jiulongjiang Forest Park, southern Hunan, China. The result showed the CWD biomass ranged from 2.8 t/hm² to 30.4 t/hm² and the carbon storage ranged from 6.095 t/hm² to 6.751 t/hm² in the study sites. The contents of other nutrients (N, P, K) were relatively stable, and the stoichiometric changes were not significant. The contents of Pb and Cd increased with the increase of decay classes. The CWD storage of the typical subtropical secondary forest in Jiulongjiang Forest Park was at a middle level when compared to the existing cases of the subtropical evergreen broad-leaved forests elsewhere. The CWD was mainly composed by logs in the medium- and late-decay, which reflected this forest was in the stage of young growth forest, with high carbon storage, relatively stable nutrient content. In the medium- and late-decay, the Pb content increased by 62.65% and 69.88% respectively, the Cd content increased by 33.33% and 100%, respectively, the internal mechanism of the significant accumulation of Pb and Cd in CWD needed to be further studied. The results could help us understand how CWD participates in the ecological processes such as nutrient cycling and heavy metal accumulation in forest ecosystems, help to compare the heterogeneity of CWD reserves, distribution and nutrient content under different forest disturbances history, supplement the background data of CWD's participation in the carbon cycle and carbon balance process. The results provide scientific basis for the protection and sustainable management of subtropical secondary forests.

Key Words: subtropical secondary forests; coarse woody debris; biomass; stoichiometric; nutrient content

粗木质物残体(Coarse woody debris, CWD)通常是指森林中直径 $\geq 10\text{cm}$,长度 $\geq 1\text{m}$ 的死木质物,包括地上的枯立木、倒木、根桩、大枯枝,它们是森林生态系统中重要的结构和功能要素^[1-3],同时还是许多物种的栖息地和食物源^[4-5]。CWD参与并影响着森林生态系统的能量流动、养分循环、碳库贮存和群落更新,在调节森林小气候、保持水土、促进土壤发育和森林更新以及维持森林生态系统的生物多样性等方面发挥十分重要的作用^[6-8],越来越受到国内外学者的高度重视。

在19世纪后期至20世纪初,美欧等国家就开始了CWD的相关研究,探讨了昆虫和微生物在倒木分解过程中作用和外界环境因子对分解进程的影响^[9]。进入20世纪80年代以后,CWD的研究更多地集中在CWD的来源、数量分布、贮量组成、养分贮藏和动态过程以及其对生物多样性的影响及保护,对森林生物生产力的维持和对森林生态系统碳循环和碳平衡的贡献等方面^[3]。同时,CWD分解速率和分解养分动态变化、分解格局变化及与微生物和真菌的关系等也逐渐成为研究热点^[9]。研究表明CWD占森林生态系统地上部分生物量的20%^[10],成熟森林中CWD碳含量占到地上总生物碳含量的10%—20%^[11]。虽然我国的CWD研究起步较晚,但经过30多年的研究已取得了长足的进展。对国内主要森林类型中CWD的数量和分布特征、碳贮量、分解动态和元素变化、水文功能、景观美学和生态文化等进行了研究^[1-4],研究区域涉及温带针叶林和针阔混交林、高原针叶林、亚热带常绿阔叶林和针阔混交林及沿海防护林等地^[12-25],这些研究为全面认识不同森林类型CWD的数量特征和生态功能特征提供了不可缺少的基础数据,但研究区域以温带森林为主,对于气候条件复杂多变,群落组成差异较大的亚热带森林,相关研究仍显不足。迄今为止,少有研究注意到我国湘南地区次生林中CWD的数量、贮量和养分分布特征,对其在次生林生态系统中养分生物地球化学循环作用的研究鲜见报道。

本研究选取湖南省汝城县九龙江森林公园内典型的中低海拔原始次生林为研究对象,调查林内CWD的数量、储量及分布特征,对其不同分解等级的生物量、碳储量及养分含量特征进行分析,以期更全面而深入地认识我国亚热带次生林生态系统的结构和功能,补充CWD作为森林生态系统重要养分库及碳库参与碳循环和碳平衡过程的植被本底数据,为比较不同群落结构及干扰历史下CWD储量、分布及养分特征的异质性;研究CWD如何参与森林生态系统养分循环、重金属积累等生态过程提供基础数据和科学参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究地(图 1)设在湖南汝城九龙江森林公园(113°38′15″—113°50′25″E, 25°21′00″—25°29′44″N), 该公园总面积为 15644.8hm²。海拔 185—1403m, 地势起伏大, 坡度为 23°—32°。研究区属于中亚热带向南亚热带过渡的季风湿润气候区, 气候温和, 具有四季分明, 温暖湿润, 热量丰富, 雨量充沛, 光照充足等特点。境内年平均气温为 16.4℃, 月平均最低气温出现在 7 月, 为 6.2℃; 月平均最高气温出现在七月, 为 25.6℃。年平均降水量为 1584mm, 降水多集中在 4—6 月和 8—9 月。年平均相对湿度达到 82%。年平均日照时数 1731h, 年平均无霜期长达 274d, ≥10℃ 活动积温为 5097.4℃。区内以山地黄壤为主, 土层厚度一般在 70—100cm, 呈酸性至微酸性, 有机质和全氮含量较丰富, 速效钾含量中等, 速效磷含量缺乏。区内植物种类丰富, 植被类型为亚热带常绿阔叶林。天然次生林中的主要优势树种是罗浮栲(*Castanopsis fabri* Hance), 黧蒴栲(*Castanopsis fissa*(Champ.ex Benth.) et Wils.), 岭南青冈(*Cyclobalanopsis championii* (Benth.) Oerst.), 樟树(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl.), 凤凰润楠(*Machilus phoenicis* Dunn), 新木姜子(*Neolitsea aurata* (Bl.) Koidz.), 毛桃木莲(*Magnolia kwangtungensis* Merr.), 桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa* (Aiton) Hassk.)。

1.2 研究方法

在九龙江森林公园典型天然次生林中设置了 6 个 20m×20m 的标准样地, 样地概况如下(表 1), 在每个标准样地实地进行 CWD 调查。

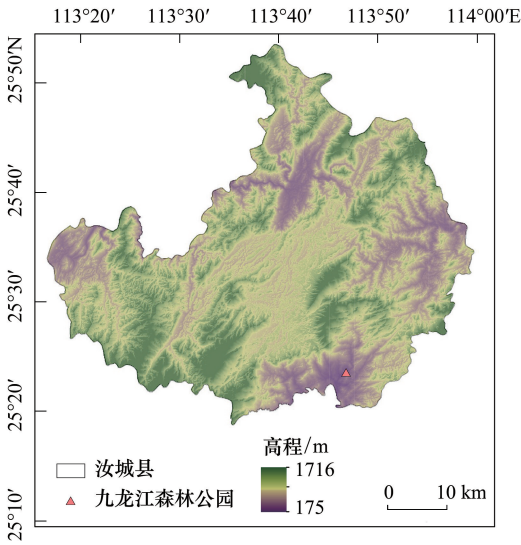


图 1 研究区位置图
Fig.1 Location of the research region

表 1 研究样地概况

Table 1 Characteristics of the experimental plots in the sturdy site						
样地编号 No.	林分年龄 Age/a	林分密度 Density/(株/hm ²)	平均胸径 DBH/cm	平均树高 Height/m	坡位 Location	坡度 Slope
1	36	1175	12.7	10.8	坡下部	30
2	25	1250	11.4	9.6	坡中部	28
3	36	1100	13.6	11.9	坡下部	30
4	28	1350	12.4	10.1	坡中部	25
5	25	1675	11.2	9.7	坡中部	28
6	21	1825	10.2	9.1	坡中部	25

DBH: 胸径 Diameter at breast height

本研究参考国际通用研究规范, 根据其倾斜角度(偏离垂直方向)是否小于 45°将样地中的 CWD 分为枯立木和倒木 2 种类型^[26]。枯立木测量胸径和高度; 倒木测量其大、小头直径, 中央直径和长度, 并结合 Sollins 的 3 等级分级系统(表 2)和实际情况确定各倒木的分解等级^[27]。

在每个标准样地分别收集样地内枯立木和倒木的样品, 其中倒木样品按不同分解等级采取。样品带回实验室后, 用排水法对样品的密度进行求算, 首先称好样品的质量, 然后在容器内装好一定量的水, 将样品放入到容器内, 计算水分体积的变化求得样品的体积。之后, 将样品置于 105℃ 烘箱中烘至恒重并称重, 最后通过

计算质量体积比获得样品的密度。

表 2 CWD 分解等级划分标准
Table 2 Descriptions of the CWD decay classes

分解等级 Classes	树皮和侧枝 Bark and branches	边材 Sapwood	心材 Heartwood
I(轻度分解)Early decay	基本完整或小部分缺损	完好或出现片状腐烂	完好
II(中度分解)Medium decay	树皮大部分脱落,树枝大部分缺损	大面积腐烂	完好
III(重度分解)Late decay	全部脱落	基本全部腐烂	部分腐烂

CWD: 粗木质残体 Coarse woody debris

采用平均直径和圆柱体公式计算 CWD 的蓄积量;采用 CWD 材积和相应的密度求得 CWD 的生物量,计算倒木平均直径结合长度推算覆盖面积。

1.3 营养元素含量的测定

分别取不同分解等级的 CWD 的样品,经过烘干和粉碎,测定其营养元素的含量。有机 C 采用重铬酸钾氧化法测定,N 用凯氏定 N 法,P 用钼蓝比色法,K,Ca 和 Mg 用原子吸收分光光度法,微量元素(Cu,Mn,Zn,Pb,Cd,Fe,Co)含量采用原子吸收分光光度法测定。

1.4 数据处理

运用 Excel 2016 处理实验数据,利用 Minitab 19 one-way ANOVA 进行单因素方差分析,采用 Tukey 多重比较在显著性水平为 $\alpha=0.05$ 下比较各指标不同分解等级的差异性。

2 结果与分析

2.1 CWD 的总体分布特征

九龙江森林公园典型次生常绿阔叶林 CWD 的材积在 $5.9\text{—}54.6\text{m}^3/\text{hm}^2$ 之间,CWD 生物量在 $2.8\text{—}30.4\text{t}/\text{hm}^2$ 之间,其中倒木所占比例较大,除样地 5 占比 21.67% 以外,其他样地占比在 57.57%—97.37% 之间(表 3)。坡下部 CWD 生物量分别是 $26.7\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $30.4\text{t}/\text{hm}^2$,显著高于坡中部($2.8\text{—}11\text{t}/\text{hm}^2$),对两种坡位 CWD 的覆盖面积进行 t 检验,差异显著($P<0.05$),这可能与坡下部样地林分年龄较大,部分枝条从坡中部滚落到坡下部有关。

表 3 各样地不同组分 CWD 储量
Table 3 Storage for the two types of CWD at six plots

样地编号 No.	坡位 Location	倒木 Logs		枯立木 Snags		合计 Sum		CWD 覆盖面积 Coverage area/ (m^2/hm^2)
		材积 Volume/ (m^3/hm^2)	生物量 Biomass/ (t/hm^2)	材积 Volume/ (m^3/hm^2)	生物量 Biomass/ (t/hm^2)	材积 Volume/ (m^3/hm^2)	生物量 Biomass/ (t/hm^2)	
1	坡下部	36.1	20.1	13	6.6	49.1	26.7	117.23
2	坡中部	15.8	7.3	0.9	0.5	16.7	7.8	85.78
3	坡下部	53	29.6	1.6	0.8	54.6	30.4	325.86
4	坡中部	11.3	6.3	9.2	4.7	20.5	11.0	75.83
5	坡中部	2.4	1.3	9.1	4.7	11.5	6.0	28.09
6	坡中部	5	2.3	0.9	0.5	5.9	2.8	36.30

2.2 不同分解等级的 CWD 储量

九龙江森林公园典型次生常绿阔叶林 CWD 的倒木总体处于分解后期,重度分解的倒木占倒木总量的 79.19%,轻度分解和中度分解的倒木分别占倒木总量的 5.04% 和 15.77%,枯立木的分解特征两极分化,处于轻度分解和重度分解的枯立木分别占枯立木总量的 52.65% 和 41.03%,处于中度分解的枯立木最少,仅占

6.32%(表4)。对两种坡位下不同分解等级的 CWD 储量进行 t 检验,仅处于重度分解的倒木储量在不同坡位下差异显著($p<0.05$),这可能是因为坡下部林分的林龄较大,分布有更多处于分解后期的倒木。

表 4 不同组分不同分解等级 CWD 储量/(t/hm^2)

Table 4 Storage for the two types of CWD in different decay classes

分解等级 Classes	倒木 Logs	枯立木 Snags	储量合计 Storage volume
I(轻度分解)Early decay	0.56(5.04%)	1.55(52.65%)	2.11(15.01%)
II(中度分解)Medium decay	1.76(15.77%)	0.19(6.32%)	1.94(13.79%)
III(重度分解)Late decay	8.83(79.19%)	1.21(41.03%)	10.04(71.20%)

2.3 不同分解等级的 CWD 碳储量变化

将不同分解等级的倒木与枯立木生物量与其碳素含量相乘,得出不同分解等级 CWD 的碳储量。九龙江森林公园典型次生常绿阔叶林 CWD 的倒木碳储量随着分解等级增加先增加后降低,在中度分解阶段达到最大值($5.515t/hm^2$),是轻度分解阶段的 3.15 倍,重度分解阶段的 1.85 倍,倒木碳储量的平均值为 $3.415t/hm^2$;枯立木碳储量随着分解等级增加先急剧降低后增加,在轻度分解阶段达到最大值($4.766t/hm^2$),是中度分解阶段的 8.21 倍,是重度分解阶段的 1.26 倍,枯立木碳储量的平均值为 $3.039t/hm^2$;不同分解等级的 CWD 碳储量总体相对均衡,在 $6.10—6.75t/hm^2$ 之间(表 5)。

表 5 不同组分不同分解等级 CWD 碳储量/(t/hm^2)

Table 5 Carbon density for the two types of CWD in different decay classes

分解等级 Classes	倒木碳储量 Carbon storage of logs	枯立木碳储量 Carbon storage of snags	合计 Sum
I(轻度分解)Early decay	1.75	4.77	6.52
II(中度分解)Medium decay	5.52	0.58	6.10
III(重度分解)Late decay	2.98	3.77	6.75
平均值 Average	3.42	3.04	6.46

2.4 不同分解等级的 CWD 养分特征

2.4.1 不同分解等级的 CWD 养分元素含量变化

九龙江森林公园典型次生常绿阔叶林 CWD 的有机碳含量在 $301.05—331.40g/kg$ 之间,其中,重度分解的 CWD 有机碳含量最高,轻度分解的 CWD 最低,差值为 $30.35g/kg$ 。重度分解的 CWD 有机碳含量与轻度和中度分解的 CWD 有机碳含量差异极显著($P<0.01$)。CWD 的 N 含量在 $0.13—0.19g/kg$,随着分解等级的增加呈先减少后增加趋势,轻度分解的 CWD 的 N 含量最高。P 含量在 $0.0330—0.0338g/kg$ 之间,随着分解等级的增加呈增加趋势。K 含量在 $0.15—0.39g/kg$ 之间,随着分解等级的增加呈减少趋势。Ca 含量在 $6.84—9.86g/kg$ 之间,Mg 含量在 $0.39—0.63g/kg$ 之间,Ca 和 Mg 的含量均随着分解等级的增加呈增加趋势。除有机碳含量以外,其他养分元素含量在不同分解等级间差异均不显著(表 6)。

表 6 不同分解等级 CWD 的 C、N、P、K、Ca、Mg 含量变化

Table 6 Change of C, N, P, K, Ca, Mg content with CWD in different decay classes

分解等级 Classes	有机碳 Organic carbon/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	全钾 Total kalium/ (g/kg)	钙 Ca/ (g/kg)	镁 Mg/ (g/kg)
I(轻度分解)Early decay	$301.05\pm 10.78a$	$0.19\pm 0.06a$	$0.0330\pm 0.0060a$	$0.39\pm 0.37a$	$6.84\pm 5.15a$	$0.39\pm 0.20a$
II(中度分解)Medium decay	$302.85\pm 9.58a$	$0.13\pm 0.02a$	$0.0344\pm 0.0062a$	$0.37\pm 0.28a$	$9.86\pm 5.53a$	$0.48\pm 0.30a$
III(重度分解)Late decay	$331.40\pm 29.40b$	$0.17\pm 0.05a$	$0.0338\pm 0.0055a$	$0.15\pm 0.06a$	$9.02\pm 5.33a$	$0.63\pm 0.32a$

不同小写字母表示同一养分含量在不同分解等级 CWD 间差异显著性,显著水平为 0.05

2.4.2 不同分解等级的 CWD 生态化学计量变化

不同分解等级的 C:N 比在 1748—2310 之间, CWD 的 C:N 比随着分解等级的增加先增加后减少, 其中轻度分解的 C:N 比最小, 中度分解最大。不同分解等级的 C:P 比在 9044—10042 之间, CWD 的 C:P 比随着分解等级的增加先减少后增加, 其中中度分解的 C:P 比最小, 重度分解最大。不同分解等级的 N:P 比在 3.97—5.81 之间, CWD 的 N:P 比随着分解等级的增加先减少后增加, 其中中度分解的 N:P 比最小, 轻度分解最大。方差分析表明, CWD 生态化学计量比在不同分解等级之间的差异均不显著(表 7)。

表 7 不同分解等级 CWD 生态化学计量变化

Table 7 Change of stoichiometry with CWD in different decay classes

分解等级 Classes	C:N	C:P	N:P
I(轻度分解) Early decay	1748±502a	9371±1596a	5.81±2.27a
II(中度分解) Medium decay	2310±345a	9044±1585a	3.97±0.81a
III(重度分解) Late decay	2092±682a	10042±2011a	5.17±1.63a

不同小写字母表示同一生态化学计量在不同分解等级 CWD 间差异显著性, 显著水平为 0.05

2.4.3 不同分解等级的 CWD 微量元素含量变化

不同分解等级 CWD 的 Pb 含量在 8.3—14.1mg/kg 之间, 差异显著 ($P<0.05$), 不同分解等级的 CWD 的 Cd 含量在 0.3—0.6mg/kg 之间, 差异极显著 ($P<0.01$), Pb 含量在中度分解和重度分解等级的 CWD 中分别比轻度分解增加了 62.65% 和 69.88%, Cd 含量则分别增加了 33.33% 和 100%。其他元素含量在不同分解等级的 CWD 中差异均不显著(表 8)。

表 8 不同分解等级 CWD 的微量元素含量变化

Table 8 Change of microelement content with CWD in different decay classes

分解等级 Classes	Cu/ (mg/kg)	Mn/ (mg/kg)	Zn/ (mg/kg)	Pb/ (mg/kg)	Cd/ (mg/kg)	Fe/ (mg/kg)	Co/ (mg/kg)
I(轻度分解) Early decay	3.9±1.4a	46.8±018.6a	13.4±9.9a	8.3±3.8a	0.3±0.1a	59.4±2.22a	2.4±15.a
II(中度分解) Medium decay	4.2±1.2a	58.5±42.7a	18.0±17.2a	13.5±4.0ab	0.4±0.2ab	49.7±18.9a	3.0±0.6a
III(重度分解) Late decay	5.1±1.6a	49.0±16.8a	21.8±17.3a	14.1±5.2b	0.6±0.2b	54.5±14.2a	3.4±0.5a

不同小写字母表示同一微量元素在不同分解等级 CWD 间差异显著性, 显著水平为 0.05

3 讨论

3.1 CWD 的储量和组成特征

九龙江森林公园亚热带典型次生林的 CWD 储量在 2.8—30.4t/hm² 之间, 各样地的 CWD 储量差异较大, CWD 的数量与森林类型、年龄、自然和人为干扰的程度与气候条件影响有关^[28], CWD 储量还与大径级的倒木数量有关, 其空间分布是生物因素、非生物因素与自然随机过程共同作用的结果^[29], 因而 CWD 在森林中的分布与储量具有异质性。我国森林 CWD 储量为 1—80t/hm², 高纬度地区, 针叶林 CWD 储量一般高于针阔混交林; 而低纬度地区一般表现为阔叶林>针阔混交林>针叶林^[30]。与亚热带地区其他森林相比, 九龙江森林公园典型次生常绿阔叶林的 CWD 储量均值为 14.12t/hm², 远低于亚热带地区 42.09—98.46t/hm² 和北亚热带地区 33.14—38.42t/hm², 但高于部分中亚热带地区 7.35—8.25t/hm², 与江西中亚热带典型常绿阔叶林的 11.293t/hm² 相近, 总体在亚热带常绿阔叶林中处于中等水平^[9-11, 24-25, 31-34]。

CWD 的组成特征在一定程度上反映着森林的演替阶段和群落结构特征^[27]。CWD 的储量通常随着林分年龄增长呈“U”型增长, 表现出中幼龄林和老龄林死亡率较高的特征^[35]。九龙江森林公园的 CWD 中倒木占比较大, 除样地 5 占比在 21.67% 外, 其他样地占比在 57.57%—97.37% 之间, 这可能是因为九龙江森林公园的倒木多为木材坚硬的硬阔树种, 分解相对缓慢, 一定程度上也反映出九龙江森林公园的亚热带典型次生林处于中幼龄林的阶段。

3.2 CWD 的碳储量和养分特征

不同分解等级的 CWD 碳储量在 $6.10\text{--}6.75\text{t}/\text{hm}^2$ 之间,略高于江西中亚热带典型常绿阔叶林的 $4.781\text{t}/\text{hm}^2$ ^[9],其中倒木主要集中在中度分解阶段($5.515\text{t}/\text{hm}^2$),枯立木则集中在轻度分解阶段($4.766\text{t}/\text{hm}^2$)和重度分解阶段($3.771\text{t}/\text{hm}^2$),CWD 的分解格局受温度、光照和降水量等环境因子影响,也与 CWD 自身的理化性质、径级结构等有关^[36]。研究结果与江西中亚热带典型常绿阔叶林倒木主要分布在中度和重度分解等级^[9]、缙云山常绿阔叶林主要分布在分解中后期^[11]相近,倒木与枯立木主要集中的分解阶段差异可能与其与地面接触的面积、树种组成和林木耐腐性差异等因素有关。

重度分解的 CWD 有机碳含量最高($331.40\text{g}/\text{kg}$),与轻度和中度分解的差异极显著,除有机碳含量以外,其他养分元素含量在不同分解等级差异均不显著。CWD 占森林生态系统中地上有机质储量的 $1\%\text{--}45\%$,是森林生态系统重要的营养库和碳库^[27,37-39]。CWD 与凋落物相比分解相对缓慢,具有较大的储碳潜力,可能在缓解全球气候变化和碳循环中起到重要作用,未来的森林经营和管理中需要重视 CWD 对森林生态系统可持续发展的重要性。

统计分析表明本研究中不同分解等级的 CWD 生态化学计量比差异并不显著,说明九龙江森林公园亚热带典型次生林的 C、N、P 含量相对稳定。微量元素含量变化显示 CWD 的 Pb 与 Cd 含量随着分解等级的增加而增加,分别达到差异显著和极显著水平,对川西高山森林的调查中也发现了 CWD 附生苔藓中 Pb 和 Cd 存在“积累-释放”的变化^[40],本研究中未发现 Pb 和 Cd 在高度腐解等级的“释放”变化,可能与研究采用的分解等级标准不同有关,但相比其他重金属元素,Pb 和 Cd 在不同研究地均呈现出显著的积累现象,这可能与其自身化学性质和 CWD 上附生苔藓的吸存特性有关,CWD 对重金属元素在森林生态系统中的循环与迁移过程有什么影响尚不清楚,有待进一步研究。

4 结论

研究结果表明,九龙江森林公园亚热带典型次生林的 CWD 储量在 $2.8\text{--}30.4\text{t}/\text{hm}^2$ 之间,在亚热带常绿阔叶林中处于中等水平,CWD 组成上以处于分解后期倒木为主(占比 79.19%),一定程度上反映出该次生林处于中幼龄林阶段。本研究中的 CWD 具有较高的碳储量($6.10\text{--}6.75\text{t}/\text{hm}^2$),多于同纬度地区典型亚热带常绿阔叶林,其中有机碳含量随分解等级增加显著增加,具有较大的储碳潜力,其他养分元素(N、P、K)含量相对稳定,生态化学计量变化不显著,Pb 元素含量在中度分解和重度分解的 CWD 中分别增加了 62.65% 和 69.88% ,Cd 含量则分别增加了 33.33% 和 100% ,二者表现出在 CWD 中的积累现象,其内在机理有待深入研究。研究结果为亚热带典型次生林的保护与可持续经营提供了科学依据。

参考文献(References):

- [1] 李世吉,杨礼攀.森林粗木质物残体(CWD)的研究进展.林业调查规划,2009,34(3):37-44.
- [2] 王殿龙,刘妍妍.森林粗木质残体研究综述.林业科技情报,2009,41(4):1-3.
- [3] 闫恩荣,王希华,黄建军.森林粗死木质残体的概念及其分类.生态学报,2005,25(1):158-167.
- [4] Siitonen J. Forest management, coarse woody debris and saproxylic organisms: fennoscandian boreal forests as an example. Ecological Bulletins, 2001, 49: 11-41.
- [5] Bunnell F L, Houde I. Down wood and biodiversity—implications to forest practices. Environmental Reviews, 2010, 18(1): 397-421.
- [6] Christensen M, Hahn K, Mountford E P, Ódor P, Standovár T, Rozenbergar D, Diaci J, Wijdeven S, Meyer P, Winter S, Vrska T. Dead wood in European beech (*Fagus sylvatica*) forest reserves. Forest Ecology and Management, 2005, 210(1/3): 267-282.
- [7] Schaetzl R J, Burns S F, Johnson D L, Small T W. Tree uprooting: review of impacts on forest ecology. Vegetatio, 1988, 79(3): 165-176.
- [8] Rubino D L, McCarthy B C. Evaluation of coarse woody debris and forest vegetation across topographic gradients in a southern Ohio forest. Forest Ecology and Management, 2003, 183(1/3): 221-238.
- [9] 吴春生,刘苑秋,魏晓华,李晓东,刘亮英,欧阳勋志,郭晓敏,张文元,莫其锋.中亚热带典型森林倒木生物量、碳储量及其分布格局.林业科学研究,2016,29(3):307-316.

- [10] 樊小丽, 周光益, 赵厚本, 邱治军, 刘伟新, 梁瑞友. 岭南藜蒻栲-罗浮栲群系粗木质残体的基本特征. 林业科学研究, 2016, 29(3): 448-454.
- [11] 黄力, 高祥阳, 齐猛, 周侠, 杨超, 李笑寒, 杨圣贺, 钱深华, 杨永川. 缙云山常绿阔叶林粗木质残体储量及特征. 林业科学, 2019, 55(1): 103-109.
- [12] 赵秀海. 长白山红松针阔混交林倒木对天然更新的影响(I)——倒木自身特点对天然更新的影响. 吉林林学院学报, 1996, 12(1): 1-4.
- [13] 班勇, 徐化成. 兴安落叶松老龄林落叶松林木死亡格局以及倒木对更新的影响. 应用生态学报, 1997, 8(5): 449-454.
- [14] 陈镜园, 毕连柱, 宋国华, 张伟, 王全波, 刘妍妍, 金光泽. 小兴安岭丰林阔叶红松林木质物残体的贮量特征分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(6): 76-84.
- [15] 张连金, 王天罡, 封焕英, 杜满义, 赖光辉, 辛学兵, 孔庆云. 京西油松混交林枯立木空间结构特征. 生态学杂志, 2019, 38(4): 937-944.
- [16] 陈灿, 林勇明, 林宇, 洪滔, 李键, 吴承祯, 沈少丽. 沿海湿地松防护林粗木质残体特征研究. 广东农业科学, 2016, 43(8): 86-93.
- [17] 任毅华, 罗大庆, 周尧治, 方江平, 卢杰. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉原始林粗木质残体空间格局分析. 生态学报, 2019, 39(21): 8048-8057.
- [18] 李翺然, 常顺利, 张毓涛. 天山雪岭云杉林粗木质残体储量特征. 生态学报, 2019, 39(10): 3730-3739.
- [19] 戚玉娇, 张广奇, 熊志斌, 杨婷婷. 喀斯特常绿落叶阔叶混交林粗木质残体的空间分布格局. 生态学报, 2019, 39(13): 4933-4943.
- [20] 段斐, 吴福忠, 杨万勤, 肖洒, 周蛟, 谭波. 川西高山峡谷区暗针叶林粗木质残体金属元素贮量特征. 应用与环境生物学报, 2016, 22(4): 623-630.
- [21] 魏平, 温达志, 黄忠良, 张倩媚, 孔国辉. 鼎湖山季风常绿阔叶林死木生物量及其特征. 生态学报, 1997, 17(5): 505-510.
- [22] 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. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2033-2041.
- [23] 张慧玲, 杨万勤, 汪明, 廖妹, 张川, 吴福忠. 岷江上游高山森林溪流木质残体碳、氮和磷贮量特征. 生态学报, 2016, 36(7): 1967-1974.
- [24] 李凌浩, 邢雪荣, 黄大明, 刘初钊, 何建源. 武夷山甜槠林粗死木质残体的贮量、动态及其功能评述. 植物生态学报, 1996, 20(2): 132-143.
- [25] 刘文耀, 谢寿昌, 谢克金, 杨国平. 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. 植物学报, 1995, 37(10): 807-814.
- [26] Harmon M E, Sexton J. Guidelines for Measurements of Woody Detritus in Forest Ecosystems. Seattle: University of Washington, 1996: 73.
- [27] Sollins P. Input and decay of coarse woody debris in coniferous stands in western Oregon and Washington. Canadian Journal of Forest Research, 1982, 12(1): 18-28.
- [28] Harmon M E, Franklin J F, Swanson F J, Sollins P, Gregory S V, Lattin J D, Anderson N H, Cline S P, Aumen N G, Sedell J R, Lienkaemper G W, Cromack K Jr, Cummins K W. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. Advances in Ecological Research, 1986, 15: 113-302.
- [29] Escandón A B, Paula S, Rojas R, Corcuera L J, Coopman R E. Sprouting extends the regeneration niche in temperate rain forests: The case of the long-lived tree *Eucryphia cordifolia*. Forest Ecology and Management, 2013, 310: 321-326.
- [30] 吕琨琨, 饶良懿, 李菲菲, 李会杰, 朱梦洵, 朱振亚, 周建. 中国森林粗木质残体储量及其影响因素. 浙江农林大学学报, 2013, 30(1): 114-122.
- [31] 何东进, 何小娟, 洪伟, 覃德华, 刘进山, 蔡昌棠. 天宝岩猴头杜鹃林粗死木质残体数量特征. 福建林学院学报, 2008, 28(4): 293-298.
- [32] 杨方方, 李跃林, 刘兴诏. 鼎湖山木荷(*Schima Superba*)粗死木质残体的分解研究. 山地学报, 2009, 27(4): 442-448.
- [33] 温琳华, 梁宏温, 温远光, 梁家善, 黄棉. 大明山常绿阔叶林粗死木质残体贮量的初步研究. 广西林业科学, 2010, 39(4): 197-200.
- [34] 郑关关. 灵石山常绿次生林木质残体的组成、碳储量及其分解[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- [35] Pedlar J H, Pearce J L, Venier L A, McKenney D W. Coarse woody debris in relation to disturbance and forest type in boreal Canada. Forest Ecology and Management, 2002, 158(1/3): 189-194.
- [36] Zhou L, Dai L M, Gu H Y, Zhong L. Review on the decomposition and influence factors of coarse woody debris in forest ecosystem. Journal of Forestry Research, 2007, 18(1): 48-54.
- [37] Moseley K R, Castleberry S B, Ford W M. Coarse woody debris and pine litter manipulation effects on movement and microhabitat use of *Ambystoma talpoideum* in a *Pinus taeda* stand. Forest Ecology and Management, 2004, 191(1/3): 387-396.
- [38] 陈华, Harmon M E. 温带森林生态系统粗死木质物动态研究——以中美两个温带天然林生态系统为例. 应用生态学报, 1992, 3(2): 99-104.
- [39] Laiho R, Prescott C E. Decay and nutrient dynamics of coarse woody debris in northern coniferous forests: a synthesis. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(4): 763-777.
- [40] 王壮, 杨万勤, 吴福忠, 常晨晖, 李俊, 汤国庆, 汪沁. 高山森林粗木质残体附生苔藓植物的重金属吸存特征. 生态学报, 2017, 37(9): 3028-3035.