

DOI: 10.5846/stxb201406101196

蔡慧颖, 邸雪颖, 金光泽. 小兴安岭谷地云冷杉林粗木质残体碳密度特征研究. 生态学报, 2015, 35(24): - .

Cai H Y, Di X Y, Jin G Z. Carbon density of coarse woody debris in a spruce-fir valley forest in Xiaoxing'an Mountains, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

小兴安岭谷地云冷杉林粗木质残体碳密度特征研究

蔡慧颖¹, 邸雪颖², 金光泽^{1,*}

¹ 东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040

² 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040

摘要:以小兴安岭谷地云冷杉林 9.12 hm² 固定样地为研究对象, 分析粗木质残体 (Coarse Woody Debris, CWD) 碳密度的基础特征, 揭示其与林分因子和物种多样性的关系。结果表明: (1) 谷地云冷杉林 CWD 碳密度为 13.25 tC/hm², 其中云杉 (*Picea* spp.)、冷杉 (*Abies nephrolepis*)、兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 和未知种的 CWD 碳密度分别为 3.59、2.61、3.06 和 2.85 tC/hm²。(2) 不同腐烂等级下 CWD 碳密度呈近正态分布, 多集中在 II 和 III 等级, 分别占总量的 42.7% 和 35.4%。不同径级的 CWD 碳密度也呈近正态分布, 主要分布在 30—40 cm 和 40—50 cm 径级上。干中折断、拔根倒、枯立木和干基折断为谷地云冷杉林 CWD 碳密度的主要存在方式。腐烂等级为 I 和 V 的 CWD 中, 拔根倒的碳密度最高, 其他腐烂等级中均为干中折断的碳密度最高。(3) CWD 碳密度表现出较强的空间异质性, 其随着林分平均胸径、最大胸径和胸高断面面积的增加而下降, 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$); 而与林分密度、多样性指数和均匀度指数均无显著相关性 ($P > 0.05$)。

关键词:粗木质残体; 碳密度; 腐烂等级; 林分因子; 物种多样性

Carbon density of coarse woody debris in a spruce-fir valley forest in Xiaoxing'an Mountains, China

CAI Huiying¹, DI Xueying², JIN Guangze^{1,*}

¹ Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

² School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: Coarse woody debris (CWD) is a substantial carbon pool and a source of nutrients within forest ecosystems. It plays several important ecological roles including the regulation of nutrient cycling and energy flow, as well as habitat provision for many organisms. The CWD carbon density basic character, the relationship between CWD carbon density and stand factors, and species diversity were studied in a large permanent plot (9.12 hm²) of spruce-fir valley forest in Xiaoxing'an Mountains. The results showed that: (1) total carbon density of CWD in the spruce-fir valley forest was 13.25 tC/hm², and the carbon density of CWD for spruce (*Picea* spp.), fir (*Abies nephrolepis*), dahurian larch (*Larix gmelinii*), and unidentified species were 3.59, 2.61, 3.06, and 2.85 tC/hm², respectively. (2) CWD carbon density under different decay classes followed a normal distribution with greater concentrations in classes II and III, which accounted for 42.7% and 35.4% of the total CWD carbon density, respectively. CWD carbon density within different DBH classes also followed a normal distribution, with higher values in the 30—40 cm and 40—50 cm classes. The primary forms of CWD carbon density originated from breakage at the trunk, uprooted blow-down, standing dead, and breakage at the rootstock. Uprooted blow-down had the highest carbon density in decay classes I and V. However, breakage at the trunk had the highest carbon density of other decay classes. (3) CWD carbon density showed a high spatial heterogeneity and it

基金项目:国家科技支撑计划项目 (2011BAD37B01); 中央高校基本科研业务费专项 (2572014AA10)

收稿日期:2014-06-10; **网络出版日期:**2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: taxus@126.com

decreased with increasing stand mean DBH, maximum DBH, and basal area ($P < 0.05$). No significant relationships were observed between CWD carbon density and stand density, diversity index, and evenness index.

Key Words: coarse woody debris (CWD); carbon density; decay classes; stand factors; species diversity

粗木质残体(Coarse Woody Debris, CWD)是森林生态系统的重要组成部分,在生态系统的结构与功能方面发挥着极为重要的作用^[1]。CWD不仅可以储存能量、碳素、养分和水分,为动植物和微生物提供栖息地和生存基质,还能够通过调节水分流动和沉积物的运动进而影响地形地貌^[2]。这些重要的生态功能引起了学者的广泛关注,包括CWD的基础特征^[3]、空间分布格局^[4, 5]、分解动态^[6, 7]、养分贮量^[8, 9]和维持生物多样性^[2]等方面;此外,环境梯度^[10, 11]、人为及自然干扰^[12, 13]对CWD的影响也有报道。

在全球气候变化背景下,CWD在森林生态系统碳循环中的重要作用成为其研究的核心内容之一。CWD是森林生态系统中不容忽视的重要碳库,其碳密度受林分起源、演替阶段、气候条件(温度、降水)和干扰历史等多种因素的共同作用。未经干扰的天然林CWD碳密度通常高于次生林和人工林^[14]。杨玉盛等发现格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)天然林的CWD碳库显著高于(4.11倍)人工林^[15]。CWD碳密度随森林演替进程有逐渐增加的趋势^[16]。在鼎湖山亚热带森林生态系统中,处于演替后期的季风常绿阔叶林CWD碳密度高出演替初期马尾松(*Pinus massoniana*)林CWD碳密度的100多倍^[17]。在夏威夷热带山地森林,CWD碳密度随年均温度的增加而下降^[18]。干扰事件(如森林火灾、冰雪灾害、病虫害等)在空间和时间上发生的不规律性,结合森林在景观尺度上的斑块状分布,也会造成不同森林生态系统之间及各生态系统内部CWD碳密度较高的空间异质性^[19, 20]。此外,CWD的分解作为植被碳输出的主要途径之一,将碳素释放回大气或固定到土壤有机碳中,进而影响森林生态系统的碳循环^[21]。CWD的分解是一个缓慢的生态学过程,林地滞留时间较长,通常采用空间替代时间的方法,用腐烂程度代表其实际分解过程中不同阶段结构和养分元素的变化^[2]。CWD与林分的生长、死亡和结构也有着密切的关系。Schlegel和Donoso发现在老龄林中,经log转换后第III腐烂等级的原木生物量与林分平均直径存在显著的线性负相关关系,说明林木的径级结构能够较好地预测原木生物量^[22]。Muller和Liu也发现CWD生物量与活立木胸高断面存在一定的负相关关系^[23]。

谷地云冷杉林作为小兴安岭地区的非地带性顶极植被,是黑龙江省重要的森林类型和用材林基地之一,在涵养水源、保育土壤和维持生物多样性等方面发挥着重要作用^[24]。然而,自20世纪90年代以来,全球气候变暖导致林内生境发生较大变化,树木开始大面积死亡^[25],大量的CWD保留于森林内,成为云冷杉森林生态系统中的重要组分。CWD碳库的稳定和发展都会对处在衰退状态的谷地云冷杉林的碳循环产生重要影响,而目前对该林型CWD碳密度以及林分结构对其分布的影响研究尚少。因此,本文以小兴安岭谷地云冷杉林为研究对象,探讨其CWD碳密度的基础特征,分析不同腐烂等级下CWD碳密度的分布,揭示其与林分因子和物种多样性的关系,旨在评价CWD在谷地云冷杉林碳循环中的作用,为森林生态系统的可持续管理提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

本研究在黑龙江凉水国家级自然保护区(N47°10'50", E128°53'20")进行。该保护区地处小兴安岭山脉的南段达里带岭支脉的东坡,境内平均海拔为400 m左右,地带性土壤为山地暗棕壤,具有明显的温带大陆性季风气候特征。冬长夏短,夏季温凉多雨,冬季严寒干燥。年平均气温只有-0.3℃,年均最高气温7.5℃,年均最低气温-6.6℃。年均降水量676 mm,降水集中在6—8月,年平均相对湿度78%,积雪期130—150 d,无霜期100—120 d。在该地区海拔较低的河谷地带,存在逆温层,温度低、湿度大,有岛状永冻层,分布着谷地云冷杉林,树种组成以云杉(*Picea* spp.)和冷杉(*Abies nephrolepis*)为主,林龄300年以上,平均胸径

5.1 cm^[26]。

1.2 研究方法

野外调查:本研究在 2006 年建立的 9.12 hm² (380 m × 240 m) 云冷杉林永久性固定样地上进行,将样地划分成 912 个 10 m × 10 m 的小样方,采用相邻网格法进行调查。

活立木调查:2006 年调查了样地内所有胸径 (diameter at breast height, DBH) ≥ 1 cm 的活立木,鉴定种名,测量其胸径、树高、坐标和状态 (存活、倒伏、枯立),并对其定位挂牌,于 2011 年进行了复查。

CWD 调查:2007 年调查了样地内所有粗头直径 ≥ 2 cm 的 CWD,鉴别树种 (因高度腐烂而无法鉴别的树种定义为未知种),测量直径 (高度腐烂的 CWD 根据轮廓估测其直径),记录坐标;确定 CWD 的存在形式,包括拔根倒、干基折断、干中折断、根桩、枯立木和树段 6 种;测量 CWD 高度或长度;并采用 5 级分类系统划分其腐烂等级^[27],具体调查方法参照金光泽等 (2009)^[28]。

CWD 密度的测定:取样时将 CWD 根据其直径分为三个径级 (径级 I:直径 < 7.5 cm;径级 II:7.5 cm ≤ 直径 < 22.5 cm;径级 III:直径 ≥ 22.5 cm)。在 9.12 hm² 样地范围内,各树种 CWD 按不同径级下不同腐烂等级分别随机采集样品,每个样品重复 3 次。腐烂程度较低 (I、II、III 级) 的 CWD,取厚度约 5 cm 的圆盘;腐烂程度较高 (IV、V 级) 的 CWD,用已知容积的铝盒取样。采用排水法测定 CWD 圆盘样品的体积 (V),重复测量三次求其平均值。对于用铝盒取样的 CWD 样品,铝盒的容积即为其样品体积。然后将所有样品置于 75℃ 的烘箱内烘至恒重 (G),则 CWD 密度为样品的干重 (G) 与其体积 (V) 的比值。

CWD 碳浓度的测定:将上述各 CWD 样品烘干后机械粉碎、制样,采用 multi C/N 3000 分析仪 (Analytic Jena AG, Germany) 测定其碳浓度。将各树种不同径级下不同腐烂等级的各样品碳浓度求平均值。

数据分析:本研究中 CWD 体积的计算参考部颁东北地区主要乔木树种二元材积公式^[29]。CWD 生物量根据 CWD 的密度与其体积的乘积得到。通过 CWD 各组单位面积的生物量与其相应的碳浓度之乘积,累加得到各样方的 CWD 碳密度。为了解 CWD 碳密度与林分因子及物种多样性的关系,以大样地 912 个样方为单位,确定每个样方内 CWD 的碳密度、活立木的平均 DBH、最大 DBH、胸高断面积、密度和物种多样性。物种多样性采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 和 Pielou 均匀度指数 (J) 表示:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln(P_i) \quad (1)$$

$$J = \frac{H'}{\ln(S)} \quad (2)$$

式中, P_i 为物种 i 的株数占总株数的比例, S 是物种的丰富度 (物种数目)。根据以上六个因子的第 12.5、25、37.5、50、62.5、75 和 87.5 百分位数,分别将其数据集划分成 8 组^[30]。例如,对应于上述百分位数的活立木平均 DBH 分别为 4.5、4.9、5.4、5.9、6.6、7.7 和 9.6 cm。则第一组包括平均 DBH ≤ 4.5 cm 的 116 个样方;第二组包括 4.5 cm < 平均 DBH ≤ 4.9 cm 的 112 个样方;依此类推,第八组包括平均 DBH > 9.6 cm 的 114 个样方。最大 DBH、胸高断面积、林分密度、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数采用同样的方法进行分组。计算得到各组内相应因子和 CWD 碳密度的平均值。采用 Kruskal-Wallis 检验分析不同树种、径级、死亡方式和腐烂等级下 CWD 碳密度的差异,用一元线性回归和幂函数分析 CWD 碳密度与各林分因子的关系,所有分析的显著性水平为 0.05,统计分析采用 R 软件完成。

2 结果

2.1 CWD 碳密度的物种组成

谷地云冷杉林 CWD 的密度、平均直径和胸高断面积分别为 1097 N/hm²、10.5 cm 和 18.48 m²/hm² (表 1)。冷杉的 CWD 的密度最高,其次为云杉,分别为 532 和 133 N/hm²,未知种的密度为 291 N/hm²;而云杉和冷杉的平均直径均相对较小,分别为 7.9 和 12.1 cm;未知种的胸高断面积明显较高,为 7.28 m²/hm²。谷地云

冷杉林 CWD 碳密度总量为 13.25 tC/hm², 其中针叶树种云杉 (3.59 tC/hm²)、兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) (3.06 tC/hm²)、冷杉 (2.61 tC/hm²) 和红松 (*Pinus koraiensis*) (0.64 tC/hm²) 的碳密度较高, 分别占 CWD 总碳密度的 27%、23%、20% 和 5%。相对于针叶树种而言, 阔叶树种 CWD 碳密度较低, 其中碳密度最高的白桦 (*Betula platyphylla*) (0.38 tC/hm²), 仅占 CWD 总碳密度的 3%。未知种的碳密度 (2.85 tC/hm²) 也占有较高比例, 为 CWD 总碳密度的 22%。

表 1 小兴安岭谷地云冷杉林固定样地 (9.12 hm²) CWD (粗木质残体) 的物种组成和碳密度

Table 1 Species composition and carbon density of CWD (Coarse Woody Debris) in spruce-fir valley forest permanent plot (9.12 hm²) in the Xiaoxing'an Mountains, China

树种 Species	密度 Density/ (N/hm ²)	平均直径 Mean diameter/ (cm)	胸高断面积 Basal area/ (m ² /hm ²)	碳密度 Carbon density	
				(tC/hm ²)	(%)
云杉 <i>Picea</i> spp.	133	12.1	3.19	3.59	0.27
兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	47	21.4	2.97	3.06	0.23
未知种 Unidentified species	291	13.0	7.28	2.85	0.22
冷杉 <i>Abies nephrolepis</i>	532	7.9	3.69	2.61	0.20
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	12	16.9	0.60	0.64	0.05
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	38	10.0	0.52	0.38	0.03
其他 Others	44	6.7	0.24	0.12	0.01
总计 Total	1097	10.5	18.48	13.25	1.00

2.2 不同腐烂等级下 CWD 碳密度的分布

谷地云冷杉林不同腐烂等级的 CWD 碳密度存在显著差异 ($P < 0.05$), 呈近正态分布, 主要分布在 II 和 III 等级, 分别为 5.66 和 4.69 tC/hm² (表 2)。V 等级的 CWD 碳密度最小, 仅为 0.36 tC/hm², 占 CWD 总碳密度的 3%。各树种不同腐烂等级的碳密度与总 CWD 碳密度分布趋势一致, 均表现出 II 和 III 等级碳密度较高, V 等级碳密度最低的趋势; 而未知种的碳密度多分配于腐烂程度偏高的等级上, 其 III (1.25 tC/hm²)、IV (0.82 tC/hm²) 和 V (0.31 tC/hm²) 等级的碳密度明显高于其他树种; 而云杉在腐烂等级 I 的碳密度 (0.44 tC/hm²) 明显高于其他树种。谷地云冷杉林不同径级的 CWD 碳密度也呈近正态分布, 主要分布在 30—40 cm 和 40—50 cm 的径级上, 分别为 3.18 和 3.04 tC/hm²。不同腐烂等级下最高的 CWD 碳密度多分布在 30—40 cm 径级上。不同径级 CWD 碳密度皆表现为 II 和 III 腐烂等级较高, V 等级最低。谷地云冷杉林 CWD 碳密度的存在方式以干中折断 (4.54 tC/hm²)、拔根倒 (3.64 tC/hm²)、枯立木 (2.41 tC/hm²) 和干基折断 (2.33 tC/hm²) 为主, 分别占 CWD 总碳密度的 34.3%、27.5%、18.2% 和 17.6%, 均显著高于以根桩和树段形式存在的 CWD 碳密度 ($P < 0.05$)。腐烂等级 I 和 V 中, 以拔根倒状态存在的 CWD 碳密度最高, 分别为 0.50 和 0.17 tC/hm²; 而其他腐烂等级中均为干中折断碳密度最高。

2.3 CWD 碳密度与林分因子及物种多样性的关系

谷地云冷杉林不同样方内 CWD 碳密度差异较大, 标准差为 16.52, 变异系数为 1.25, 最小值为 0, 而最大值为 128.30 tC/hm²。在 912 个样方内, CWD 碳密度在 0—10 tC/hm² 之间的样方数量最多, 共 550 个。随碳密度的增加, 样方数量减少, 大于 60 tC/hm² 的样方仅 20 个 (图 1)。图 2 表明, 谷地云冷杉林 CWD 碳密度随林分平均 DBH 和最大 DBH 的增加而下降, 两者呈显著负相关 ($P < 0.05$), 分别可以解释其样方间变化的 76% 和 86%; CWD 碳密度与林分胸高断面积也表现出显著的负相关关系 ($P < 0.05$), 胸高断面积可以解释其 74% 的变化; CWD 碳密度随林分密度、多样性指数和均匀度指数的增加均有略微增加的趋势, 但三个方程皆无显著相关性 ($P > 0.05$)。

表 2 谷地云冷杉林固定样地 (9.12 hm²) CWD 碳密度在不同腐烂等级下的分布

Table 2 Distribution of CWD carbon density under different decay class in spruce-fir valley forest permanent plot (9.12 hm²)

组分		腐烂等级 Decay class					总计
Components		I	II	III	IV	V	Total
树种	云杉 <i>Picea</i> spp.	0.44	1.98	0.89	0.28	0.01	3.59a
Species	兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	0.18	1.60	0.93	0.35	0.01	3.06b
	未知种 Unidentified species	0.02	0.45	1.25	0.82	0.31	2.85c
	冷杉 <i>Abies nephrolepis</i>	0.12	1.25	1.13	0.09	0.02	2.61d
	红松 <i>Pinus koraiensis</i>	0.07	0.16	0.35	0.05	0.00	0.64e
	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	0.08	0.19	0.09	0.01	0.01	0.38f
	其他 Others	0.02	0.03	0.06	0.01	0.00	0.12f
径级/cm	≤10	0.04	0.32	0.45	0.02	0.01	0.84e
Diameter class	10—20	0.13	0.63	0.92	0.12	0.02	1.83e
	20—30	0.14	1.11	0.77	0.28	0.08	2.37c
	30—40	0.32	1.31	1.06	0.38	0.12	3.18a
	40—50	0.18	1.28	0.93	0.57	0.09	3.04b
	>50	0.12	1.01	0.57	0.25	0.05	2.00d
存在方式	拔根倒 Uprooted blow-down	0.50	1.11	1.35	0.51	0.17	3.64a
Existing type	干基折断 Breakage at rootstock	0.19	0.71	0.79	0.51	0.12	2.33a
	干中折断 Breakage at trunk	0.10	2.01	1.89	0.53	0.00	4.54a
	根桩 Stump	0.00	0.01	0.02	0.01	0.04	0.08c
	枯立木 Standing die	0.12	1.77	0.52	0.01	0.00	2.41a
	树段 Trunk segment	0.01	0.05	0.13	0.05	0.02	0.26b
总计 Total		0.92d	5.66a	4.69b	1.62c	0.36e	13.25

树种、径级、存在方式和腐烂等级中不同小写字母表示 CWD 碳密度差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the species, diameter class, existing type and decay class meant significant difference in CWD carbon density at 0.05 level.

3 讨论

CWD 碳库是连接森林植被碳库和土壤碳库养分循环和能量流动的纽带,在保持森林生态系统的完整性和稳定性方面起着不可替代的作用^[27]。小兴安岭谷地云冷杉林 CWD 碳密度为 13.25 tC/hm²,高于我国北方针叶林 CWD 碳密度范围 7.9—16.2 t/hm²^[31](按含碳率 0.5 计算)。这是由于谷地云冷杉林已处于老龄阶段和衰退状态,树木死亡率很高,致使 CWD 碳密度较高。此外,本研究结果略低于同一地区典型阔叶红松林 CWD 的碳密度 (13.49 tC/hm²)^[32],这与云冷杉林 CWD 的树种组成、径级结构和环境条件等密切相关。云冷杉林 CWD 的密度 (1097 N/hm²) 为阔叶红松林 (380 N/hm²) 的近 3 倍,CWD 平均直径 (10.5 cm) 低于阔叶红松林 (15.6 cm)。谷地云冷杉林高郁闭度的林分结构加剧了种内和种间竞争,造成主要树种冷杉和云杉小径级上的大量死亡,而小径级 CWD 在碳密度的积累上不占优势,且在阴暗潮湿的环境下更容易分解。虽然云冷杉林 CWD 的胸高断面面积 (18.48 m²/hm²) 高于阔叶红松林 (15.80 m²/hm²),但云冷杉林中未知种占 CWD 总胸高断面面积的比例最高 (39.4%),而未知种多为腐烂程度较高而无法辨别的树种,其分解程度高,碳素已逐渐释放到大气或土壤中,自身储存的碳并不

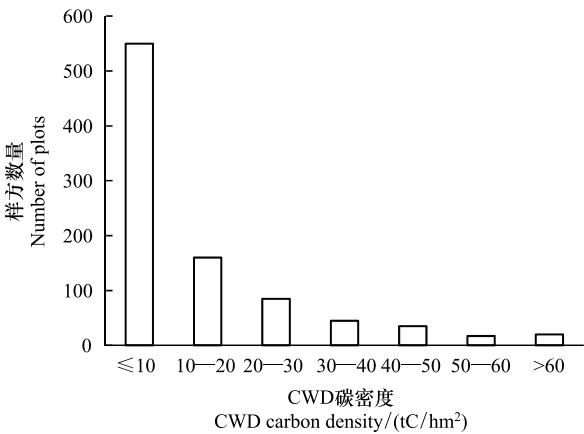


图 1 谷地云冷杉林固定样地 (9.12 hm²) CWD 碳密度的分布

Fig. 1 Distribution of CWD carbon density in spruce-fir valley forest permanent plot (9.12 hm²)

粗木质残体 (Coarse Woody Debris, CWD)

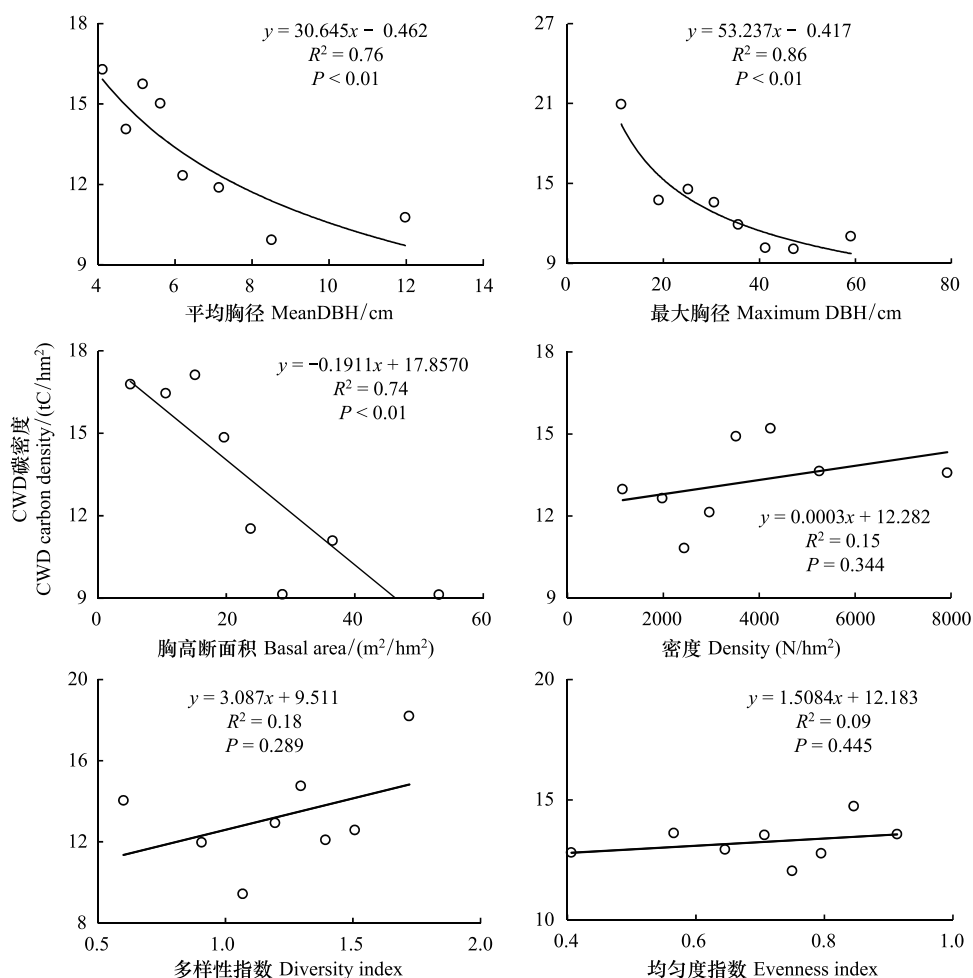


图2 谷地云冷杉林固定样地 (9.12 hm²) CWD 碳密度与林分平均胸径、最大胸径、胸高断面面积、密度、多样性指数及均匀度指数的回归分析

Fig. 2 Regression analysis between CWD carbon density and stand mean DBH, maximum DBH, basal area, density, diversity index and evenness index in spruce-fir valley forest permanent plot (9.12 hm²)

多。CWD 碳密度的树种组成以云杉、兴安落叶松、未知种和冷杉等为主，未知种虽然鉴别不出具体的物种，但可从其木材材质鉴别出主要为针叶树种。CWD 碳密度的树种分配反映出上层木的树种组成结构，谷地云冷杉林主林层为稀疏的大径级兴安落叶松，次林层为高郁闭度的中小径级云杉和冷杉，主林层树木的自然衰老和次林层树木的剧烈竞争形成了 CWD 碳密度的树种分配格局。

CWD 在森林中一旦形成便开始不断分解、腐烂、释放和养分归还，这是一个复杂的生态学过程，受温度、湿度、氧气、二氧化碳、代谢基质和微生物等多种因素的共同影响^[2]。CWD 的分解状态常用腐烂等级表示，在多数森林生态系统中，CWD 多分布在中等腐烂等级上^[33]。虽然各树种的木材理化性质、CWD 形成和分解的时间不同，但本研究中 CWD 总碳密度及主要树种 CWD 碳密度均以 II 和 III 腐烂等级为主，说明谷地云冷杉林 CWD 碳密度的年输入量和输出量相对稳定。在腐烂等级 I 中，云杉 CWD 的碳密度明显较高，这与谷地云冷杉林近年来云杉的大量死亡有关^[25]，形成的 CWD 在短时间内还没有分解到更高的程度。

CWD 的径级大小通过影响其材积和分解速率进而影响 CWD 的碳密度。CWD 的径级越大，材积越大，分解速率越慢，滞留在林内的时间越长，导致林内积累的 CWD 碳密度越高。长期以来，不同学者对 CWD 的直径定义不同。最初，Harmon 将 CWD 定义为直径 ≥ 2.5 cm 的木质残体^[2]；随着生态学研究的发展，为便于大尺度的生态学研究结果进行比较，美国林业部林务局将 CWD 定义为直径 ≥ 10.0 cm 的木质残体，而直径 < 10.0 cm 的木质残体为细木质残体，目前关于 CWD 的研究多采用此标准^[14, 27, 34]。但为便于与不同定义的研

究结果相比较,并为不同定义的研究者提供参考,本研究将 CWD 定义为直径 ≥ 2.0 cm 的木质残体,但 2—10 cm 的 CWD 碳密度所占比例很小,为 6.3%。谷地云冷杉林 CWD 碳密度主要集中在 30—40 cm 和 40—50 cm 径级上,呈近正态分布,而同一地区的阔叶红松林 CWD 碳密度则随径级的增加而增加^[32]。这种不一致的结果主要因为两个森林生态系统内不同径级下 CWD 材积的分布不同。不同腐烂等级下 CWD 碳密度的最高值多分布在 30—40 cm 径级上,表明云冷杉林树木为非过熟死亡,而是由外力干扰导致。

谷地云冷杉林 CWD 碳密度主要以干中折断、拔根倒、枯立木和干基折断的形式存在,这与云冷杉林较高的林分密度和较薄的土层厚度有关。高的林分密度增加了个体间对养分、水分和光照的竞争,而枯立木正是树木个体之间生存竞争引起的自然稀疏的结果。干中折断和干基折断也大多是由枯立木在风或其他外力作用下折倒形成的。因谷地云冷杉林内有岛状永冻层存在,土层较薄,且云杉、冷杉、兴安落叶松和红松等为浅根性树种,故以拔根倒形式存在的 CWD 碳密度也占有较高比例。此外,近年来云冷杉林根系活力下降和根部菌根衰退,导致的根部腐朽也促进了拔根倒形式 CWD 的形成。腐烂等级 I 中拔根倒的 CWD 碳密度最高,说明短期内死亡的树木多为拔根倒形式,主要是部分径级较大的树木在风较大的春季或秋季,在风力作用下发生拔根倒,并在发生拔根倒时把周围的小树连根带起而形成。腐烂等级 II、III 和 IV 的 CWD 碳密度以干中折断为主,表明在过去的一段时期树木多以枯立木形式死亡,随时间推移 CWD 逐渐分解,在外力作用下形成了干中折断。

谷地云冷杉林 CWD 碳密度表现出较强的空间异质性,这与干扰事件有着密切关系,如风害导致树木拔根倒死亡,往往将相邻个体的根系一同拔起,形成 CWD 的斑块状分布。在本研究中,CWD 碳密度随林分平均胸径、最大直径和胸高断面积的增加而下降,而与林分密度无显著的关系,这与其他学者的研究结果一致^[22, 23]。小径级幼树的生长和存活受养分和水分等资源斑块状分布的限制而呈聚集分布,但随着林龄的增加,个体间对环境资源的竞争加剧,大量的幼树死亡形成高的 CWD 碳密度。少数个体存活成长为大径级树木,此时林分达到稳定状态,死亡个体数目较少,CWD 虽然有径级上的优势,但其碳密度也不高。这种森林生长发育过程中 CWD 个体数量的明显变化,形成了 CWD 碳密度与林分平均胸径和胸高断面积的显著负相关关系。CWD 碳密度具有很强的空间异质性,因此这种关系是否适用于不同研究尺度、地理位置和不同的森林类型中,还需在今后的研究中进一步验证。物种多样性和生态系统功能间的关系及其内在机制一直是生态领域探讨的热点,目前已有许多学者研究了物种多样性对森林生物量和生产力的影响^[35],而是否高物种多样性的森林生态系统拥有高的碳密度是个关键问题^[36]。本研究发现谷地云冷杉林碎屑碳库 CWD 碳密度与物种多样性指数和均匀度指数均无显著关系。这可能与本研究地各样方间物种组成结构和生境条件没有明显差异有关,后续研究中还应进一步探索不同环境梯度下物种多样性对森林碳密度复杂的驱动作用,以揭示不同资源对森林生态系统碳密度的影响机制。

参考文献 (References):

- [1] 陈华,徐振邦.粗木质物残体生态研究历史、现状和趋势.生态学杂志,1991,10(1):45-50.
- [2] Harmon M E, Franklin J F, Swanson F J, Sollins P, Gregory S V, Lattin J D, Anderson N H, Cline S, Aumen N, 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: 133-302.
- [3] 刘妍妍,金光泽.小兴安岭阔叶红松林粗木质残体基础特征.林业科学,2010,46(4):8-14.
- [4] Muller R N. Landscape patterns of change in coarse woody debris accumulation in an old-growth deciduous forest on the Cumberland Plateau, southeastern Kentucky. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(5): 763-769.
- [5] 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.生态学报,2010,30(22):6072-6081.
- [6] Chambers J Q, Higuchi N, Schimel J P, Ferreira L V, Melack J M. Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon. *Oecologia*, 2000, 122(3): 380-388.
- [7] Beets P N, Hood I A, Kimberley M O, Oliver G R, Pearce S H, Gardner J F. Coarse woody debris decay rates for seven indigenous tree species in the central North Island of New Zealand. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(4): 548-557.
- [8] 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.植物生态学报,2010,34(4):368-374.

- [9] 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.
- [10] 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. *Ecological Indicators*, 2008, 8(5): 686-690.
- [11] 刘妍妍, 金光泽. 地形对小兴安岭阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林粗木质残体分布的影响. *生态学报*, 2009, 29(3): 1398-1407.
- [12] 谷会岩, 代力民, 王顺忠, 于大炮, 周莉. 人为干扰对长白山红松针阔叶混交林粗木质残体的影响. *林业科学*, 2006, 42(10): 1-5.
- [13] Keller M, Palace M, Asner G P, Pereira R Jr, Silva J N M. Coarse woody debris in undisturbed and logged forests in the eastern Brazilian Amazon. *Global Change Biology*, 2004, 10(5): 784-795.
- [14] 杨礼攀, 刘文耀, 杨国平, 马文章, 李达文. 哀牢山湿性常绿阔叶林和次生林木质残体的组成与碳贮量. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2153-2159.
- [15] 杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 何宗明, 陈光水. 格氏栲天然林与人工林粗木质残体碳库及养分库. *林业科学*, 2005, 41(3): 7-11.
- [16] Eaton J M, Lawrence D. Woody debris stocks and fluxes during succession in a dry tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 2006, 232(1/3): 46-55.
- [17] 唐旭利, 周国逸. 南亚热带典型森林演替类型粗死木质残体贮量及其对碳循环的潜在影响. *植物生态学报*, 2005, 29(4): 559-568.
- [18] Iwashita D K, Litton C M, Giardina C P. Coarse woody debris carbon storage across a mean annual temperature gradient in tropical montane wet forest. *Forest Ecology and Management*, 2013, 291: 336-343.
- [19] 梁宏温, 温琳华, 温远光, 梁家善, 黄道京. 特大冰雪灾害干扰下大明山常绿阔叶林木质残体的贮量特征. *林业科学*, 2012, 48(3): 11-16.
- [20] Gough C M, Vogel C S, Kazanski C, Nagel L, Flower C E, Curtis P S. Coarse woody debris and the carbon balance of a north temperate forest. *Forest Ecology and Management*, 2007, 244(1/3): 60-67.
- [21] Yang F F, Li Y L, Zhou G Y, Wenigmann K O, Zhang D Q, Wenigmann M, Liu S Z, Zhang Q M. Dynamics of coarse woody debris and decomposition rates in an old-growth forest in lower tropical China. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(8): 1666-1672.
- [22] Schlegel B C, Donoso P J. Effects of forest type and stand structure on coarse woody debris in old-growth rainforests in the Valdivian Andes, south-central Chile. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5-6): 1906-1914.
- [23] Muller R N, Liu Y. Coarse woody debris in an old-growth deciduous forest on the Cumberland Plateau, southeastern Kentucky. *Canadian Journal of Forest Research*, 1991, 21(11): 1567-1572.
- [24] 李文华. 小兴安岭谷地云冷杉林群落结构和演替的研究. *自然资源*, 1980, (4): 17-29.
- [25] 王庆贵. 谷地云冷杉林对全球气候变化的响应. 北京: 科学出版社, 2009.
- [26] 张冕, 米湘成, 金光泽. 小兴安岭凉水谷地云冷杉林群落组成与空间格局. *科学通报*, 2014, 59(24): 2377-2387.
- [27] 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.
- [28] 金光泽, 刘志理, 蔡慧颖, 台秉洋, 蒋小兰, 刘妍妍. 小兴安岭谷地云冷杉林粗木质残体的研究. *自然资源学报*, 2009, 24(7): 1256-1266.
- [29] 中华人民共和国农林部. 立木材积表: LY 208-77. 北京: 技术标准出版社, 1978.
- [30] Hui D F, Wang J, Le X, Shen W J, Ren H. Influences of biotic and abiotic factors on the relationship between tree productivity and biomass in China. *Forest Ecology and Management*, 2012, 264: 72-80.
- [31] 马伟, 孙玉军. 我国的森林生物量研究. *世界林业研究*, 2009, 22(5): 71-76.
- [32] 刘妍妍, 金光泽, 黎如. 小兴安岭阔叶红松林粗木质残体的贮量特征 // 2010 中国科协年会第五分会场全球气候变化与碳汇林业学术研讨会优秀论文集. 北京: 中国林学会, 2010.
- [33] von Oheimb G, Westphal C, Härdtle W. Diversity and spatio-temporal dynamics of dead wood in a temperate near-natural beech forest (*Fagus sylvatica*). *European Journal of Forest Research*, 2007, 126(3): 359-370.
- [34] Currie W S, Nadelhoffer K J. The imprint of land-use history: patterns of carbon and nitrogen in downed woody debris at the Harvard forest. *Ecosystems*, 2002, 5(5): 446-460.
- [35] Fornara D A, Tilman D. Ecological mechanisms associated with the positive diversity-productivity relationship in an N-limited grassland. *Ecology*, 2009, 90(2): 408-418.
- [36] Kirby K R, Potvin C. Variation in carbon storage among tree species: implications for the management of a small-scale carbon sink project. *Forest Ecology and Management*, 2007, 246(2-3): 208-221.