

火干扰对大兴安岭呼中林区地上死木质残体碳储量的影响*

杨 达^{1,2} 贺红士¹ 吴志伟^{1**} 梁 宇¹ 黄 超¹ 罗 旭¹ 肖江涛¹ 张庆龙¹

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110164; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 基于野外样点实测数据,分析了不同烈度火烧对大兴安岭呼中林区地上死木质残体碳储量的影响。结果表明:不同烈度的火烧会对地上死木质残体碳储量产生显著影响。兴安落叶松林和针阔混交林(落叶松与白桦)中死木质残体碳储量大小为重度火烧>轻度火烧>未火烧,而白桦林中死木质残体碳储量大小为重度火烧>未火烧>轻度火烧。火干扰能显著改变森林中死木质残体碳储量的组成百分比。随着火烧烈度的增加,枯立木比重显著增大,枯落物比重显著减小,而不同火烧烈度下倒木和树桩的碳储量比重变化不显著。不同烈度的火烧对死木质残体碳储量特征的影响不同,轻度火烧下死木质残体碳储量的空间变异性最高,重度火烧下空间变异性最弱。不同火烧烈度下大兴安岭森林死木质残体碳储量差异显著,在进行森林死木质残体碳储量估算时,需要充分考虑这种差异性。

关键词 火干扰; 火烧烈度; 死木质残体; 碳储量; 大兴安岭

文章编号 1001-9332(2015)02-0331-09 中图分类号 Q149 文献标识码 A

Influence of fire disturbance on aboveground deadwood debris carbon storage in Huzhong forest region of Great Xing'an Mountains, Northeast China. YANG Da^{1,2}, HE Hong-shi¹, WU Zhi-wei¹, LIANG Yu¹, HUANG Chao¹, LUO Xu¹, XIAO Jiang-tao¹, ZHANG Qing-long¹ (¹State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110164, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2015, 26(2): 331-339.

Abstract: Based on the field inventory data, the aboveground deadwood debris carbon storage under different fire severities was analyzed in Huzhong forest region of Great Xing'an Mountains. The results showed that the fire severity had a significant effect on aboveground deadwood debris carbon storage. The deadwood debris carbon storage was in the order of high-severity > low-severity > unburned in *Larix gmelinii* stands, and mixed conifer-broadleaf stands (*L. gmelinii* and *Betula platyphylla*), and in the order of high severity > unburned > low-severity in *B. platyphylla* stands. Fire disturbance significantly changed the component percentage of the deadwood debris carbon storage. The component percentage of snags increased and litter decreased with the increasing fire severity. Logs and stumps did not change significantly with the increasing fire severity. The spatial variation of deadwood debris carbon storage in forests burned with low-severity fire was higher than that in unburned forests. The spatial variation of deadwood debris carbon storage with high-severity fires was lowest. This spatial variation needed to be accounted when calculating forest deadwood debris carbon storage.

Key words: fire disturbance; fire severity; deadwood debris; carbon storage; Great Xing'an Mountains.

DOI:10.13287/j.1001-9332.20141203.003

地上死木质残体由掉落的木质碎片、枯立木、树

桩组成,它是北方森林生态系统的重要组成部分^[1-2]。在森林结构和功能上起着重要作用^[3-5]。同时,森林粗木质残体也是生态系统中不可或缺的重要碳库^[6],其储量占到全球森林生物量的10%以上。

* 国家自然科学基金面上项目(41371199,31370483)和国家自然科学基金青年基金项目(31200362)资助。

** 通讯作者。E-mail: wuzhiwei2001@163.com
2014-06-23 收稿,2014-11-15 接受。

粗木质残体的干物质中约 50% 为碳素^[7-10]. 目前, 粗木质残体在碳循环和碳库方面的重要性引起了广泛关注^[11-13]. 例如, 一些学者对粗木质残体的概念、研究方法、研究内容及重要作用进行了综述^[4, 14], 对粗木质残体在沉积物运输^[15]、腐殖质形成^[16]和作为动物生境^[17]等方面的作用也开展了研究. 大兴安岭林区是世界范围内北方森林生态系统的重要组成部分, 对全球碳汇有着重要的作用^[18]. 目前, 大兴安岭森林粗木质残体储量^[19-23]已被广泛研究. 如刘志华等^[23]对呼中林区与呼中自然保护区森林粗木质残体储量进行了比较; 王文娟等^[20]分析了大兴安岭呼中林区粗木质残体贮量及其环境梯度.

有研究表明, 在北方森林, 林火能在林木生长的各个时期影响林分, 极大地改变火前粗木质残体储量和来自乔木层的新的粗木质残体储量^[13]. 林火是形成粗木质残体的一个重要的干扰因素^[24-25], 火烧可导致树干扭曲, 烧焦树冠, 烧伤树根, 导致林木直接死亡并形成森林死木质残体. 同时, 林火会直接烧死部分林木和草本, 改变各层次生物量比例关系, 导致其碳储量变化^[26]. 因此, 要想准确估算死木质残体碳储量, 火干扰是一个必须要考虑的因素. 王文娟等^[27]研究了大兴安岭呼中林区火烧迹地粗木质残体特征. 死木质残体碳储量估算具有不确定性, 多聚焦于粗木质残体碳储量研究, 由于取样困难, 小的凋落物并没有被包括其中^[13], 然而, 小的凋落物可能占到总死木质残体储量的 43%^[28]. 因此, 当前的研究并不能全面揭示死木质残体碳储量特征, 也不利于量化它对碳储量和碳循环的贡献^[12]. 本研究通过定量比较不同火烧烈度下死木质残体碳储量特征, 揭示不同火烧烈度对地上死木质残体碳储量的影响程度, 为我国北方大兴安岭地区森林生态系统碳研究积累基础数据, 也为大兴安岭地区制定合理的火控措施和科学的林火管理策略提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省大兴安岭呼中林业局 (51°17'42"—51°56'31" N, 122°42'14"—123°18'05" E), 总面积 94 万 hm^2 , 其中林地面积 60 多万 hm^2 . 该区海拔多在 700~1200 m, 是雷击火多发区. 该区属寒温带大陆性气候, 具有明显的山地气候特点. 年均温 -4.7 °C, 年降水量 503.6 mm, 主要集中在 6—8 月, 无霜期 80~100 d. 研究区夏季短暂, 冬季寒冷而漫长, 冰冻期长达半年, 绝对最低温度 -47.5 °C.

该区植被在植物区系上属泛北极植物区东西伯利亚植物区系, 以西伯利亚植物区系成分为主, 混有东北植物区系成分和蒙古植物区系成分. 植被属寒温带针叶林, 林型以兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 构成的明亮针叶林为主, 优势树种为兴安落叶松, 其他主要乔木树种有山杨 (*Populus davidiana*)、白桦 (*Betula platyphylla*) 和樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 等.

1.2 试验设计

2013 年 7—8 月, 对大兴安岭呼中林区兴安落叶松林、白桦林和针阔混交林中的枯立木、倒木、树桩、枯枝和落叶, 以及森林中其他木质凋落物等进行调查. 野外调查选择立地条件和林分结构相对一致的过火林分 (2008—2010 年火烧迹地) 和未火烧林分设置样方. 共设 60 个样方, 记录每样方的经纬度、海拔、坡度、坡向、坡位、林型、林龄和火烧烈度等. 调查林分多为中龄林, 树种组成主要包括兴安落叶松、白桦、山杨和樟子松等 (表 1).

本研究中, 将枯枝、落叶和森林中其他木质凋落物统归为枯落物; 因此, 死木质残体分为枯立木、倒木、树桩和枯落物 4 类. 对于枯立木、倒木和树桩, 样方大小为 20 m×20 m. 对样方内枯立木 (高度 > 1.37 m) 进行每木检尺, 记录树种、胸高直径 (DBH) 和树高; 测量样方内倒木大端、中端和小端的直径及长度; 测量树桩 (高度 < 1.37 m) 高度和中端直径. 在 20 m×20 m 大样方中设置 3 个 0.5 m×0.5 m 小样方调查枯落物, 采用全部生物量收获法, 对每个小样方内的枯落物进行收集并称量.

采用综合火烧指数 (composite burn index, CBI) 调查表^[29]确定火烧烈度 (表 2). 该表把林分垂直结构分为 5 个层次, 即 A: 地表可燃物和土壤层; B: 草本、低矮灌木和 < 1 m 高的小树层; C: 高大灌木和高度为 1~5 m 的乔木层; D: 次林冠层 (高度为 5~20 m); E: 主林冠层 (高度 > 20 m). 定性描述每个层次, 综合各层次的 CBI 得分值确定林分火烧烈度. 火烧程度调查中, 每一调查层都有若干个观测变量, 结合观测值确定每个样方的火烧烈度.

1.3 数据分析

1.3.1 枯立木、倒木、树桩的材积 (V) 估算 枯立木材积的计算公式如下^[18]:

$$V = DBA \times H \times f$$

式中: V 为材积 (m^3); DBA 为胸高断面积 (m^2); H 为枯立木高度 (m); f 为形数 (取 0.41).

为了消除倒木形状带来的误差, 倒木材积的计

表 1 各样方树种组成
Table 1 Species composition in plots

样方 Plot	树种组成 Species composition				样方 Plot	树种组成 Species composition			
	落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	樟子松 <i>Pinus sylvestris var. mongolica</i>	山杨 <i>Populus davidiana</i>		落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	樟子松 <i>Pinus sylvestris var. mongolica</i>	山杨 <i>Populus davidiana</i>
1	+	+			31	+	+		
2	+	+			32	+	+	+	
3	+				33	+	+		
4	+				34	+			
5	+				35	+			
6	+	+			36	+	+		
7	+	+			37		+		
8	+				38	+			
9	+	+	+		39	+	+		
10	+	+	+	+	40	+			
11	+	+	+		41	+	+		
12	+	+			42	+	+		
13	+	+	+		43	+	+		
14	+	+	+		44	+	+		
15	+	+		+	45	+	+		
16	+	+		+	46	+	+		
17	+	+	+		47	+	+		
18	+				48	+	+		
19	+				49	+			
20	+				50	+	+		
21	+				51	+			
22	+				52	+			
23	+				53	+	+		+
24	+				54	+	+		+
25		+			55	+	+		+
26	+	+			56	+	+	+	
27	+	+			57	+	+	+	+
28	+	+			58	+	+		+
29	+	+			59	+	+		
30	+	+			60	+	+	+	

+表示有+ indicated existence.

算公式^[30]如下:

$$V = \pi L_1 (D_s^2 + D_L^2) / 80000$$

式中: V 为单个倒木的材积 (m^3); D_s 为小端直径 (cm); D_L 为大端直径 (cm); L_1 为倒木长度 (m).

树桩材积的计算公式如下:

$$V = H \times A_m$$

式中: V 为树桩材积 (m^3); H 为树桩高度 (m); A_m 为树桩中端断面积 (m^2).

将每个样点的枯立木材积、倒木材积、树桩材积换算成单位面积储量 ($m^3 \cdot hm^{-2}$).

1.3.2 枯立木、倒木、树桩的生物量 (M_B) 估算 结合每个样点的胸径和树高,采用主要树种异速生长方程^[31]计算枯立木的生物量.由于是枯立木,生物量方程只包括树干部分^[32].利用样方枯立木材积与

生物量(表 3)的回归关系计算倒木和树桩的生物量,拟合结果见图 1.

将每个样方的枯落物样品进行 24~48 h 烘干

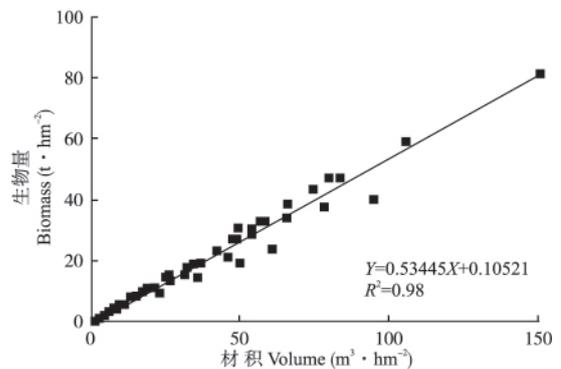


图 1 枯立木材积与生物量的线性回归

Fig.1 Linear regression between biomass and volume of snags.

表 2 综合火烧指数(CBI)调查内容和评价标准

Table 2 Investigated items and evaluation criterion of composite burn index (CBI)

分层 Vertical stratum		林火烈度 Fire severity					
		未过火 Unburned	轻 Low		中 Moderate		重 High
		0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
A	枯枝落叶/直径 < 7.6 cm 的死可燃物消耗	无变化	50% 枯枝落叶被消耗	100% 枯枝落叶被消耗	80% 细可燃物被消耗	80% 细可燃物被消耗	
	半腐殖质	无变化	轻度烧焦	50% 消耗	100% 消耗		
	直径为 7.6~23.3 cm 的粗可燃物	无变化	20% 消耗	40% 消耗	>60% 消耗, 深度烧焦		
	直径 > 20.3 cm 的大型倒木	无变化	10% 消耗	20% 消耗	>40% 消耗, 深度烧焦		
	新生裸露岩石/土壤的盖度/颜色	无变化	10% 发生改变	40% 发生改变	>80% 发生改变	100, 有枝条消耗	
B	叶片变化率(%)	无变化	30	80	95	100	
	存活率(%)	100	90	50	<20	0	
	植物定植	无变化	低	中	高-低	低-无	
	物种组成/多样性	无变化	变化小	变化中等	变化大		
C	叶片变化率(%)	0	20	60~90	>95	有明显的枝条消耗	
	存活率(%)	100	90	30	<15	<1	
	盖度变化率(%)	无变化	15	70	90	100	
	物种组成/多样性	无变化	变化小	变化中等	变化大		
D	绿色林冠(%)	100	80	40	<10	无	
	黑色林冠(%)	无	5~20	60	>85	100%, 有枝条消耗	
	棕色林冠(%)	无	5~20	40~80	<40 / >80	无	
	林冠死亡率(%)	无	15	60	80	100	
	熏黑高度(m)	无	1.5	2.8		>5	
	林木死亡率(%)	无	15	60	80	100	
E	绿色林冠(%)	100	95	50	<10	无	
	黑色林冠(%)	无	5~10	50	>80	100%, 有枝条消耗	
	棕色林冠(%)	无	5~10	30~70	<30 / >70	无	
	林冠死亡率(%)	无	10	50	70	100	
	熏黑高度(m)	无	1.8	4		>7	
	林木死亡率(%)	无	10	50	70	100	

A: 地表可燃物和土壤层 Land surface combustible fuels and soils; B: 草本、低矮灌木和 <1 m 高的小树层 Herbs, low shrubs and trees less than 1 m tall; C: 高大灌木和高度为 1~5 m 的乔木层 Shrubs and trees with 1-5 m tall; D: 次林冠层(高度为 5~15 m) Intermediate trees (5-15 m tall); E: 主林冠层(高度为 >15 m) Large trees (>15 m tall).

(75 °C) 至恒量, 称干质量, 得到每个样方内的枯落物生物量. 把枯立木、倒木、树桩和枯落物的生物量换算成单位面积储量 ($t \cdot hm^{-2}$).

1.3.3 枯立木、倒木、树桩和枯落物的碳储量 (M_C) 估算 枯立木、倒木和树桩的碳密度值 (Q) 为 0.5, 枯落物的碳密度值为 0.45^[33]. 将其单位面积生物量换算成单位面积碳储量^[33-34]. 换算公式为: $M_C = M_B \times Q$ 其中: M_C 为碳储量; M_B 为生物量; Q 为碳密度值.

1.4 数据处理

采用 Origin 9.0 软件对数据进行统计分析. 对数据进行正态性检验和方差齐性检验. 对于符合正态性和方差齐性的数据, 进行一元方差分析 (one-way ANOVA). 若数据之间差异性显著, 则对其进行多重比较 ($\alpha = 0.05$). 对于不满足正态性的数据, 采用非参数检验 (Kruskal-Wallis ANOVA) 进行差异性显著性

分析.

2 结果与分析

2.1 不同火烧烈度对各林型死木质残体碳储量的影响

如图 2 所示, 不同火烧烈度下兴安落叶松林中枯立木碳储量差异显著. 枯立木碳储量在未火烧与轻度火烧、轻度火烧与重度火烧、未火烧与重度火烧之间的差异性均达到显著水平. 随着火烧烈度的增加, 枯立木碳储量不断增加, 未火烧兴安落叶松林的枯立木碳储量最少 ($0.80 t \cdot hm^{-2}$), 重度火烧兴安落叶松林的枯立木碳储量最大 ($13.31 t \cdot hm^{-2}$); 而不同火烧烈度下, 倒木、树桩和枯落物碳储量差异不显著, 倒木、树桩和枯落物碳储量均在轻度火烧下达最大, 分别为 2.14、0.38 和 $4.82 t \cdot hm^{-2}$.

表 3 各样方枯立木材积与生物量
Table 3 Volume and biomass of snags in plots

样方 Plot	材积 Volume ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	生物量 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$)	样方 Plot	材积 Volume ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	生物量 Biomass ($t \cdot hm^{-2}$)
1	18.57	11.07	31	9.27	5.82
2	20.14	11.91	32	30.90	15.55
3	25.37	14.72	33	2.38	1.14
4	149.66	81.83	34	7.98	4.52
5	0.89	0.58	35	33.46	19.24
6	65.26	39.15	36	53.68	28.59
8	106.17	59.25	37	22.44	10.19
9	5.02	2.32	38	32.23	17.87
10	48.46	27.05	40	48.88	30.94
11	54.31	30.35	42	65.31	34.74
12	15.18	7.70	43	94.30	40.27
13	26.69	13.57	44	3.64	1.88
15	47.14	27.70	45	21.80	10.55
16	79.52	46.80	46	6.27	3.81
17	2.62	1.64	47	84.00	46.98
18	74.54	43.73	48	6.32	3.62
19	7.90	4.89	49	56.88	32.76
20	57.97	33.22	50	77.39	37.59
21	19.97	11.83	51	42.65	23.71
22	13.60	8.04	52	26.42	15.55
23	1.26	0.80	53	1.31	0.65
24	9.89	6.00	54	35.26	14.60
25	49.73	19.14	55	36.74	19.76
26	59.99	24.05	56	11.83	5.40
27	16.84	9.48	57	3.16	1.81
28	44.69	21.99	58	6.95	4.22
29	21.10	11.48	59	4.38	2.15
30	14.06	8.79	60	8.46	3.50

不同火烧烈度下针阔混交林的枯立木碳储量差异显著(图 2)。枯立木碳储量在未火烧与轻度火烧、轻度火烧与重度火烧、未火烧与重度火烧之间差异显著。随着火烧烈度的增加,针阔混交林中枯立木碳储量不断增加,未火烧下为 $0.31 t \cdot hm^{-2}$,重度火烧下为 $10.23 t \cdot hm^{-2}$ 。不同火烧烈度下倒木、树桩和枯落物的碳储量差异不显著。

不同火烧烈度下白桦林的枯立木、倒木和枯落物碳储量均存在显著差异(图 2)。枯立木碳储量在未火烧和轻度火烧之间差异不显著,在未火烧与重度火烧、轻度火烧与重度火烧之间差异显著。随着火烧烈度的增加,枯立木碳储量不断增加,未火烧白桦林的枯立木碳储量为 $1.01 t \cdot hm^{-2}$,重度火烧下为 $10.83 t \cdot hm^{-2}$ 。倒木碳储量在未火烧与轻度火烧之间差异不显著,在未火烧与重度火烧、轻度火烧与重度火烧之间差异显著。枯落物碳储量在未火烧与轻度火烧、未火烧与重度火烧之间差异显著,轻度火烧与重度火烧之间差异不显著。随火烧烈度的增加,枯

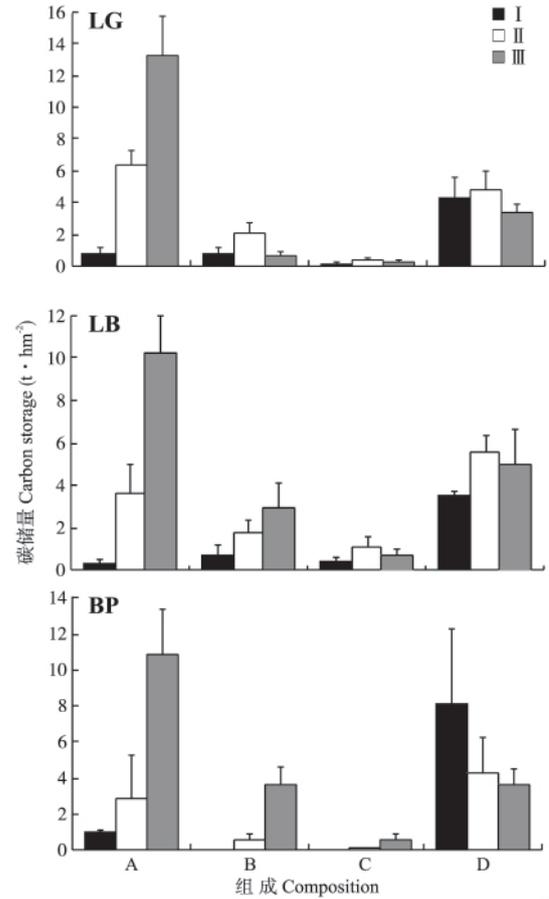


图 2 不同火烧烈度下各林型中死木质残体组成
Fig. 2 Deadwood debris composition in three stands under different fire severities.

LG: 兴安落叶松林 *Larix gmelinii* stand; LB: 针阔混交林 Mixed conifer-broadleaf stand; BP: 白桦林 *Betula platyphylla* stand. I: 未火烧 Unburned; II: 轻度火烧 Low severity; III: 重度火烧 High severity. A: 枯立木 Snag; B: 倒木 Log; C: 树桩 Stump; D: 枯落物 Litter. 下同 The same below.

落物碳储量逐渐减少,未火烧下为 $8.14 t \cdot hm^{-2}$,重度火烧下为 $3.63 t \cdot hm^{-2}$ 。树桩碳储量在未火烧、轻度火烧和重度火烧之间差异均不显著。

2.2 不同火烧烈度对各林型中地上死木质残体总碳储量的影响

如图 3 所示,不同火烧烈度下各林型中总的死木质残体碳储量存在显著差异。不同火烧烈度下,兴安落叶松林中死木质残体碳储量在未火烧与轻度火烧、未火烧与重度火烧之间差异显著,针阔混交林中死木质残体碳储量在未火烧与轻度火烧、轻度火烧与重度火烧、未火烧与重度火烧之间差异均显著。兴安落叶松林和针阔混交林的地上死木质残体碳储量随着火烧烈度的增加而增加,重度火烧分别高达 17.55 和 $18.83 t \cdot hm^{-2}$;不同火烧烈度下,白桦林中死木质残体碳储量在未火烧与重度火烧、轻度火烧

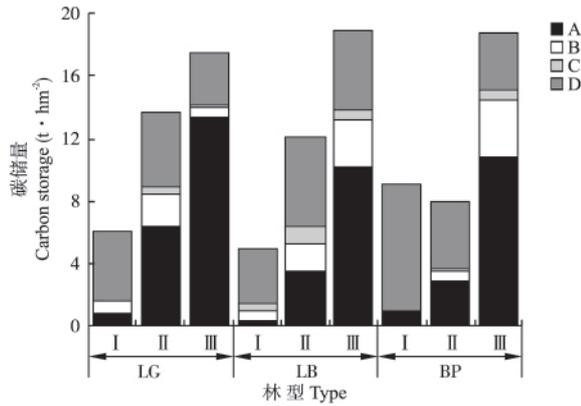


图3 不同火烧烈度下各林型地上死木质残体碳储量
Fig.3 Aboveground deadwood debris carbon storage in three stands under different fire severities.

与重度火烧之间差异显著,未火烧和轻度火烧地上死生物碳储量差异较小,分别为 9.14 和 7.95 $t \cdot hm^{-2}$,重度火烧下则高达 18.68 $t \cdot hm^{-2}$.

如图 4 所示,大兴安岭森林死木质残体碳储量均值为 12.09 $t \cdot hm^{-2}$,置信限为 8.26 ~ 15.92 $t \cdot hm^{-2}$,平均极差为 3.74,极差范围为 0 ~ 9.63.其中,未火烧林分和轻度火烧林分中死木质残体碳储量均值均低于林分平均值,且它们对应的极差都较大,表明未火烧林分和轻度火烧林分死木质残体碳储量相对较少,波动范围较大.而重度火烧下死木质残体碳储量的均值超出了林分均值的上限,表明重度火烧会显著增加森林死木质残体碳储量.同时,重度火烧下林分极差较小,死木质残体碳储量波动较小.表明轻度火烧下森林地上死木质残体碳储量的空间变异性增大,而重度火烧下森林地上木质碳储量的变异性减小.

2.3 不同火烧烈度下各林型死木质残体碳储量的组分比例

如表4所示,枯立木所占比例随火烧烈度的增

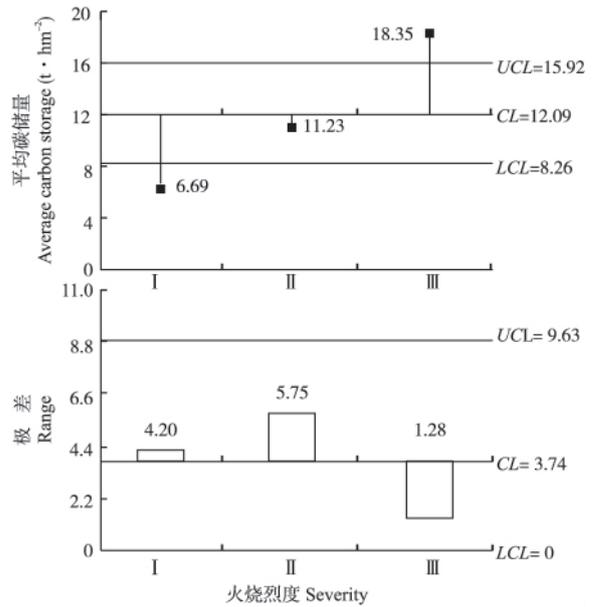


图4 不同火烧烈度下死木质残体碳储量的质量控制图
Fig.4 Quality control chart about deadwood debris carbon storage under different fire severities.

UCL: 上控制限 Upper control limit; CL: 控制限 Control limit; LCL: 下控制限 Lower control limit.

加而增加,在未火烧兴安落叶松林中,枯立木的碳储量比重仅占总死木质残体碳储量的 13.4%,重度火烧则达 75.8%;枯落物碳储量比重随火烧烈度的增加而减少,其比重从未火烧的 72.0%减少到重度火烧的 19.4%;倒木和树桩没有表现出明显的变化趋势.这表明不同火烧烈度能显著改变兴安落叶松林枯立木和枯落物碳储量分配比重,火烧改变了林分中死木质残体碳储量分配格局.

不同火烧烈度下针阔混交林中死生物碳各组分比例存在显著差异(图3和表4).随火烧烈度的增加,枯立木和枯落物的碳储量比重变化趋势与白桦林相同,枯立木的碳储量比重从6.2%增大为

表4 不同火烧烈度下各林分死木质残体碳储量组分百分比

Table 4 Component percentage of deadwood debris carbon storage in stands under different fire severities

林型 Type	火烧烈度 Severity	组分百分比 Component percentage				
		枯立木 Snag	倒木 Log	枯落物 Litter	树桩 Stump	总计 Total
落叶松林 <i>Larix gmelinii</i> stand	未火烧 Unburned	13.4	12.5	72.0	2.1	100
	轻度火烧 Low severity	46.4	15.6	35.2	2.8	100
	重度火烧 High severity	75.8	3.6	19.4	1.2	100
针阔混交林 Mixed conifer-broadleaf stand	未火烧 Unburned	6.2	14.7	70.5	8.6	100
	轻度火烧 Low severity	29.7	14.5	46.5	9.3	100
	重度火烧 High severity	54.3	15.5	26.4	3.8	100
白桦林 <i>Betula platyphylla</i> stand	未火烧 Unburned	10.96	0.033	89.0	0.007	100
	轻度火烧 Low severity	36.7	7.0	54.5	1.8	100
	重度火烧 High severity	58.0	19.4	19.4	3.2	100

54.3% 枯落物从 70.5% 减小为 26.4%; 但是倒木和树桩没有表现出与白桦林中倒木和树桩一致的变化趋势, 其组分比例变化不明显, 且没有规律性。

如表 4 所示, 不同火烧烈度下白桦林中死生物碳各组分比例差异明显。枯立木、倒木和树桩所占比例均随火烧烈度的增加而增加。在未火烧白桦林中, 枯立木、倒木和树桩的碳储量比重只占总死木质残体碳储量的 10.96%、0.033%、0.007%, 重度火烧则达到 58.0%、19.4%、3.2%; 相反, 枯落物碳储量比重随火烧烈度的增加而减少, 其比重从未火烧的 89.0% 减少到重度火烧的 19.4%。表明不同火烧烈度能显著改变白桦林中的死木质残体碳储量的组分比例。

3 讨 论

3.1 火干扰对死木质残体碳储量的影响

林火的发生与森林粗木质残体储量关系密切, 一般高火险区域粗木质储量较高^[35]。本研究表明, 森林中的死木质残体碳储量随火烧烈度的增加而增加。未火烧和轻度火烧的兴安落叶松林中死木质残体碳储量大于针阔混交林; 但是, 在重度火烧烈度下, 针阔混交林中死木质残体碳储量则大于兴安落叶松林。这表明不同烈度的火烧会改变这 2 种林型的死木质残体碳储量格局, 导致过火林分与未火烧原始林分中死木质残体碳储量之间产生差异。

本研究中, 平均死木质残体碳储量为 $12.90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而有研究表明, 大兴安岭森林死木质残体储量为 $11.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 转换为碳储量后为 $5.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[7]。造成这种差异的原因, 一方面可能是因为文献[7]没有考虑到火干扰对该区森林死木质残体碳储量的影响, 另一方面是其估算是在较大尺度上进行的, 而且主要估算了森林中的枯立木和倒木, 不包含枯落物。

有研究表明, 枯立木和倒木是中国原始林粗木质残体储量的主要贡献者^[5]。本研究表明, 无论是过火的林分, 还是未火烧的原始林分, 枯立木和枯落物在死木质残体碳储量中的比重之和均 $>75\%$, 是森林中死木质残体碳储量的主要贡献者。可见, 在估算森林死木质残体碳储量时, 如果不考虑枯落物碳储量, 会造成森林死木质残体碳储量的低估^[13]。

3.2 火干扰下死木质残体碳储量估算的不确定性

林分中死木质残体的来源主要有火干扰、风、病虫害和自然死亡等。所以, 分清新的死木质残体动态(最近林分干扰事件引起的死木质残体输入变化)

和死木质残体总储量之间的关系尤为关键^[36]。过火前的死木质残体主要来自于风、病虫害和树木自然死亡, 而当火灾发生时, 大多数死木质残体更易燃烧, 那么过火前的死木质残体多被消耗掉, 其对过火后的死木质残体储量贡献很少^[13]。所以, 过火后的林分中, 死木质残体储量主要来自于当前火烧, 虽然风、病虫害等干扰因素会对火烧后林分中死木质残体碳储量造成一定的影响, 但对死木质残体碳储量的影响很小。

有研究表明, 粗木质残体动态主要受输入和输出 2 个过程的影响^[13]。且大兴安岭兴安落叶松粗木质残体的分解速率较慢, 体积分解一半的时间约为 50~70 年。王文娟等^[27]对大兴安岭 5 个火烧迹地(时间分别为 <1 、 <1 、17、18 和 45 a)的粗木质残体储量进行了时间序列分析, 发现这些林分尚处于恢复阶段, 粗木质分解过程对粗木质的储量动态影响不明显^[27]。而本研究中样地是 2008—2010 年火烧迹地, 所以没有考虑死木质残体的分解对死木质残体碳储量估算的影响。

3.3 森林死木质残体碳储量估算的复杂性

粗木质储量变化在空间尺度上没有明显的规律性, 这可能由于其影响因素太多, 海拔、林分结构、年平均降雨量、自然灾害和人为干扰均是影响粗木质残体的因子^[5], 导致其存在较大的时空异质性^[10]。由于不同林分类型的分布地段、区域小环境和过火程度的不同, 枯立木、倒木和枯枝落叶的变化因林分类型而异^[26]。同一类型的森林中, 不同林分间由于干扰的程度和群落的发育阶段不同而导致粗木质数量存在差异^[7]。也有研究表明, 粗木质残体储量和分布格局较复杂, 受多因素交叉影响, 地形因子和林分条件是影响森林粗木质残体储量的主要因子^[20]。海拔对粗木质残体的类型及其径级大小等均有影响, 不同海拔的粗木质残体储量存在差异^[5]。

在大兴安岭林区, 除火烧这一重要干扰因子会对死木质残体碳储量产生影响外, 地形和林型等因子也会对森林死木质残体储量造成影响。在选择样地时, 尽可能选择立地条件一致、林分结构相近的林分, 这在一定程度上弱化了地形和林型对死木质残体碳储量的影响, 但这也可能使研究结果具有一定的不确定性。因此, 在以后的研究中, 要同时考虑火干扰和地形、林型的综合作用对死木质残体碳储量的影响, 以揭示该区森林中死木质残体碳储量格局。

参考文献

- [1] Brassard BW, Chen HY. Stand structural dynamics of

- North American boreal forests. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2006, **25**: 115–137
- [2] Seedre M, Taylor AR, Chen HYH, et al. Deadwood debris density of five boreal tree species in relation to field-assigned decay class. *Forest Science*, 2013, **59**: 261–266
- [3] Guo J-F (郭剑芬). Ecological Functions of Forest Floor and Coarse Woody Debris in Forest Ecosystems in Sub-tropical China. Master Thesis. Fuzhou: Fujian Agriculture & Forestry University, 2003 (in Chinese)
- [4] Lyu K-L (吕琨珑), Rao L-Y (饶良懿). Progress on coarse woody debris in forest ecosystems. *Guangdong Agricultural Sciences* (广东农业科学), 2012(12): 156–159 (in Chinese)
- [5] Lyu K-L (吕琨珑), Rao L-Y (饶良懿), Li F-F (李菲菲), et al. Storage and determinants of coarse woody debris in China's forests. *Journal of Zhejiang A&F University* (浙江农林大学学报), 2013, **30**(1): 114–122 (in Chinese)
- [6] Liu WH, Bryant DM, Hutyra LR, et al. Woody debris contribution to the carbon budget of selectively logged and maturing mid-latitude forests. *Oecologia*, 2006, **148**: 108–117
- [7] Li S-J (李世吉), Yang L-P (杨礼攀). A review of the study progress on coarsewoody debris (CWD). *Forest Inventory and Planning* (林业调查规划), 2009, **34**(3): 37–44 (in Chinese)
- [8] Delaney M, Brown S, Lugo AE, et al. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of venezuela. *Biotropica*, 1998, **30**: 2–11
- [9] Carmona MR, Armesto JJ, Aravena JC, et al. Coarse woody debris biomass in successional and primary temperate forests in Chiloé Island, Chile. *Forest Ecology and Management*, 2002, **164**: 265–275
- [10] Hu H-Q (胡海清), Luo B-Z (罗碧珍), Wei S-J (魏书精), et al. A review of storage and function of coarse woody debris in forest ecosystems. *World Forestry Research* (世界林业研究), 2013, **26**(2): 24–29 (in Chinese)
- [11] Yatskov M, Harmon ME, Krankina ON. A chronosequence of wood decomposition in the boreal forests of Russia. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, **33**: 1211–1226
- [12] Manies K, Harden J, Bond-Lamberty B, et al. Woody debris along an upland chronosequence in boreal Manitoba and its impact on long-term carbon storage. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, **35**: 472–482
- [13] Seedre M, Shrestha BM, Chen HYH, et al. Carbon dynamics of North American boreal forest after stand replacing wildfire and clearcut logging. *Journal of Forest Research*, 2011, **16**: 168–183
- [14] Yuan J (袁杰), Hou L (侯琳), Zhang S-X (张硕新). Research progress in coarse woody debris. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2011, **26**(4): 90–98 (in Chinese)
- [15] Harmon ME, Franklin JF, Swanson FJ, et al. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research*, 1986, **15**: 302
- [16] Pedlar JH, Pearce JL, Venier LA, et al. Coarse woody debris in relation to disturbance and forest type in boreal Canada. *Forest Ecology and Management*, 2002, **158**: 189–194
- [17] Lindbladh M, Abrahamsson M, Seedre M, et al. Saproxylic beetles in artificially created high-stumps of spruce and birch within and outside hotspot areas. *Biodiversity and Conservation*, 2007, **16**: 3213–3226
- [18] Gu H-Y (谷会岩), Jin J-B (金靖博), Chen X-W (陈祥伟), et al. Effects of human disturbance on coarse woody debris of *Larix gmelinii* forest on northern slope of Greater Hinggan Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(2): 265–270 (in Chinese)
- [19] Sun X-Y (孙秀云), Wang C-K (王传宽). Carbon dioxide fluxes from downed log decomposition of major tree species in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(12): 5130–5137 (in Chinese)
- [20] Wang W-J (王文娟), Chang Y (常禹), Liu Z-H (刘志华), et al. Coarse woody debris loading capacity and its environmental gradient in Huzhong forest area of Great Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(4): 773–778 (in Chinese)
- [21] Zhang L-M (张利敏), Wang C-K (王传宽). Carbon and nitrogen release during decomposition of coarse woody debris for eleven temperate tree species in the eastern mountain region of northeast China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2010, **34**(4): 368–374 (in Chinese)
- [22] Wang F (王飞), Zhang Q-L (张秋良), Wang B (王冰), et al. Storage and characteristics of coarse woody debris in different aged natural *Ledum palustre-Larix gmelinii* forests in Daxing'anling Mountains of Northeast China. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2012, **31**(12): 2981–2989 (in Chinese)
- [23] Liu Z-H (刘志华), Chang Y (常禹), Hu Y-M (胡远满), et al. Comparison of storage of coarse woody debris between Huzhong Forest Bureau and Huzhong Natural Reserve in Great Xing'an Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2009, **33**(6): 1075–1083 (in Chinese)
- [24] Wang C, Bond-Lamberty B, Gower ST. Carbon distribution of a well- and poorly-drained black spruce fire chronosequence. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 1066–1079
- [25] Van Nieuwstadt MG, Sheil D. Drought, fire and tree survival in a Borneo rain forest, East Kalimantan, Indonesia. *Journal of Ecology*, 2005, **93**: 191–201
- [26] Yan P (闫平), Wang J-S (王景升). Effect of forest fire on distribution and storage of carbon for *Larix gmelinii* forests. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2006, **34**(4): 46–48 (in Chinese)
- [27] Wang W-J (王文娟), Chang Y (常禹), Liu Z-H

- (刘志华), *et al.* Characteristics of coarse woody debris in Huzhong forest area of Great Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(8): 1805-1810 (in Chinese)
- [28] Hély C, Bergeron Y, Flannigan M. Coarse woody debris in the southeastern Canadian boreal forest: Composition and load variations in relation to stand replacement. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, **30**: 674-687
- [29] Wang X-L (王晓莉), Wang W-J (王文娟), Chang Y (常禹), *et al.* Fire severity of burnt area in Huzhong forest region of Great Xing'an Mountains, Northeast China based on normalized burn ratio analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(4): 967-974 (in Chinese)
- [30] Waddell KL. Sampling coarse woody debris for multiple attributes in extensive resource inventories. *Ecological Indicators*, 2002, **1**: 139-153
- [31] Wang X-L (王晓莉), Chang Y (常禹), Chen H-W (陈宏伟), *et al.* Spatial pattern of forest biomass and its influencing factors in the Great Xing'an Mountains, Heilongjiang Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(4): 974-982 (in Chinese)
- [32] Yan P (闫平), Gao S-C (高述超), Liu D-J (刘德晶). The comparative study about the carbon storage of vegetation and soil in three types of *Larix gmelinii* forests. *Forest Resources Management* (林业资源管理), 2008(3): 77-81 (in Chinese)
- [33] Wei S-J (魏书精), Luo B-Z (罗碧珍), Sun L (孙龙), *et al.* Estimates of carbon emissions caused by forest fires in the temperate climate of Heilongjiang Province, China, from 1953 to 2012. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(11): 3048-3063 (in Chinese)
- [34] Hu H-Q (胡海清), Wei S-J (魏书精), Jin S (金森), *et al.* Measurement model of carbon emission from forest fire: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(5): 1423-1434 (in Chinese)
- [35] Rubino DL, McCarthy BC. Evaluation of coarse woody debris and forest vegetation across topographic gradients in a southern Ohio forest. *Forest Ecology and Management*, 2003, **183**: 221-238
- [36] Ter-Mikaelian MT, Colombo SJ, Chen J. Amount of downed woody debris and its prediction using stand characteristics in boreal and mixedwood forests of Ontario, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, **38**: 2189-2197

作者简介 杨 达,男,1986年生,硕士研究生,主要从事景观生态学和干扰生态学研究。E-mail: yangda12@mails.ucas.ac.cn

责任编辑 孙 菊

封面说明

图片由中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室杨达 2013 年 8 月 15 日摄于大兴安岭呼中林区。兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为松科落叶松属落叶乔木,树皮暗灰色或灰褐色,木材蓄积丰富,硬度中等,纹理直,结构细密,有树脂,耐久用,是中国东北林区的主要森林树种。其喜光性强,对水份要求较高,在各种环境中均能生长,尤以生于土层深厚、肥润、排水良好的北向缓坡及丘陵地带生长旺盛。兴安落叶松既可以组成纯林,也可以与白桦、山杨、樟子松、云杉等组成以兴安落叶松为主的混交林。在全球变暖的背景下,林火干扰会对兴安落叶松林的群落组成、生物多样性、演替、碳汇功能等产生重要影响。研究林火干扰对森林地上死木质残体碳储量的影响,能为大兴安岭林区林火管理和持续经营提供科学参考。