

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.01.003

# 林火干扰对广东省 2 种典型针叶林森林生物碳密度的影响

胡海清<sup>1</sup>, 罗斯生<sup>1</sup>, 罗碧珍<sup>1\*</sup>, 魏书精<sup>2</sup>, 李小川<sup>2</sup>, 王振师<sup>2</sup>,  
吴泽鹏<sup>2</sup>, 周宇飞<sup>2</sup>, 刘 菲<sup>1</sup>

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

**摘要:** [目的] 定量研究不同林火干扰对森林生物碳库的变化规律, 揭示林火干扰对森林生物碳密度的影响机制, 为林火干扰后森林生态系统碳汇管理提供参考依据。[方法] 以广东省亚热带 2 种典型针叶林为研究对象, 采用相邻样地比较法, 以野外调查采样与室内试验分析为主要手段, 定量测定不同林火干扰强度对森林生物碳库(植被碳库和凋落物碳库)碳密度与碳分配格局的影响。[结果] 林火干扰对亚热带 2 种典型针叶林的植被和凋落物碳密度有影响, 均表现为对照>轻度林火干扰>中度林火干扰>重度林火干扰。轻度林火干扰对植被碳密度的影响差异不显著( $P>0.05$ ), 而中度和重度林火干扰则显著降低了植被碳密度( $P<0.05$ )。相同林火干扰强度下, 植被各组分碳密度的变化均表现为乔木最大。乔木碳密度在不同林火干扰强度下均呈现为对照>轻度林火干扰>中度林火干扰>重度林火干扰, 而草本碳密度则呈现与乔木碳密度相反的变化趋势。林火干扰显著影响乔木和草本碳密度, 亦对灌木碳密度产生了影响。不同林火干扰强度对凋落物碳密度的影响有所差异, 但不同林火干扰强度均显著减少了凋落物碳密度( $P<0.05$ ), 并随林火干扰强度的增加其减少幅度增大。[结论] 林火干扰减少了植被和凋落物碳密度, 进而对森林生态系统的碳密度产生重要影响。

**关键词:** 森林生物量; 碳密度; 林火干扰; 影响机制; 亚热带针叶林

**中图分类号:** S714.2, S762.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2020)01-0019-09

森林生态系统作为全球碳库的重要组成部分, 在全球碳平衡与碳预算中发挥重要作用<sup>[1]</sup>。森林生态系统碳库主要包括植被碳库、凋落物碳库和土壤有机碳库。植被碳库主要包括植物的地上部分(干、枝、叶和皮)和地下部分(活根的全部生物量)所固定的碳<sup>[2-3]</sup>。据估算, 全球森林植被碳储量约为 359.00~373.00 Pg, 平均碳密度为 86.00  $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[4-5]</sup>。全球植被层占全球森林碳储量的 42%~50%<sup>[6]</sup>, 凋落物碳库虽然占全球森林碳储量的 5%(43 Pg), 但其变化对全球碳收支和碳减排目标具有重要意义<sup>[7]</sup>。

近年来, 国内外学者通过不同方法开展了林火

干扰对森林生物碳库影响的研究。目前, 国内外有关林火干扰对森林碳库的影响主要集中在碳排放<sup>[2, 8]</sup>、含碳气体排放<sup>[9-10]</sup>、碳排放物<sup>[11-12]</sup>、碳释放<sup>[13-14]</sup>、碳循环<sup>[2]</sup>、碳平衡<sup>[15]</sup>、碳排放模型与方法<sup>[16]</sup>、碳储量<sup>[17]</sup>、碳时空分布<sup>[18]</sup>等的影响。通过采用国外经验计量参数的方法, 直接估算全国大尺度林火干扰碳损失量, 如王效科等<sup>[13]</sup>估算了中国国家尺度森林火灾排放的  $\text{CO}_2$ 、CO 和  $\text{CH}_4$  总量。Lü等<sup>[19]</sup>估算了中国 1950—2000 年森林火灾碳损失量, 并对时空规律进行分析。通过遥感影像估测大尺度估测计量参数, 未进行小尺度计量参数的实测, 直接估算国家尺度的碳损失量, 如田晓瑞等<sup>[14]</sup>

收稿日期: 2019-04-15 修回日期: 2019-07-07

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201404402); 国家自然科学基金面上项目(31470657); 广西自然科学基金项目(2014GXNSFBA118108); 中央高校基本科研业务费专项资金(2572017PZ05)

\* 通讯作者: 罗碧珍, E-mail: luobizhen8@163.com

估算 1991—2000 年中国森林火灾直接碳损失量。庄亚辉等<sup>[9]</sup>对我国生物质燃烧排放的含碳痕量气体进行估算。采用经验排放因子方法与统计资料：曹国良等<sup>[11]</sup>对我国大陆包括森林火灾的生物质燃烧排放的污染物进行估算。利用统计资料估算碳损失量方面：陆炳等<sup>[12]</sup>利用统计资料对我国 2007 年全年大陆地区生物质燃烧排放污染物进行估算。

目前，我国林火干扰碳损失量方面的研究主要存在以下问题，对林火干扰碳损失量计量参数测定的实验较少，未对参数测定进行规范及未考虑尺度转换问题，直接把小尺度得到的数据用于大尺度的估算<sup>[15]</sup>。而采用较为可靠的通过森林生态系统小尺度的实测计量参数的定量研究较少，尤其是在森林生态系统水平对林火干扰后，各森林生态系统碳库碳密度的动态变化研究鲜见报道<sup>[20]</sup>。为此，本研究以广东省亚热带 2 种典型针叶林为研究对象，采用相邻样地比较法，以野外调查采样与室内试验分析为主要手段，在森林生态系统水平上，定量测定不同林火干扰强度对森林生物碳库（植被碳库和凋落物碳库）碳密度与碳分配的影响：（1）定量研究不同林火干扰强度（轻度、中度和重度林火干扰）对亚热带 2 种典型森林类型植被碳密度及植被各组分（乔木、灌木和草本）碳密度的变化规律及空间分布格局。（2）定量研究不同林火干扰强度对亚热带 2 种典型森林类型凋落物碳密度的变化规律。通过分析林火干扰后碳密度的空间分布格局及变化

规律，旨在更好地理解林火干扰后短期内生态系统碳密度的变化规律，为林火干扰后生态系统碳汇管理以及定量评价林火干扰对森林生态系统碳库的影响提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样地设置

根据广东省历史森林火灾时空分布特点，结合广东省亚热带森林资源分布状况，按照火烧迹地燃烧状况，在广东省佛冈县火烧迹地及相邻未烧林分设置标准固定的样地。2017 年 4 月 4 日，广东省佛冈县发生森林火灾，过火面积约 400 hm<sup>2</sup>，火灾发生后 1 周内，选择林火干扰强度（同时分轻度、中度和重度 3 种林火干扰强度）基本相同（林火干扰样地基本情况见表 1），分别在火烧迹地及相邻未火烧林分（对照样地），设置固定样地，于火后 1 年后（1 个生长周期）进行外业调查及实验样品采集，调查采集植被生物量和凋落物生物量。为了有效地获取广东省亚热带有代表性的典型人工成熟林森林类型的数据，选择马尾松林（*Pinus massoniana* Lamb.）和杉木林（*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.）2 种典型森林类型进行采样，在未过火林地（未火烧样地即对照样地）和过火林地设置规格为 20 m×20 m 的 3 个重复作为固定标准样地，共选设固定标准样地 24 块。

表 1 广东省 2 种典型森林类型林火干扰样地基本情况

Table 1 Basic situation of forest fire disturbance in sample plot in Guangdong Province

典型森林类型 Typical forest type	林龄范围/a	平均胸径/cm	平均树高/m	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度	坡度/(°)	坡位	坡向	海拔/m	土壤类型	森林起源
马尾松林( <i>Pinus massoniana</i> Lamb. forests)	31~35	21.15±4.23	17.58±3.25	859±156	0.85	10~20	中坡	阳坡	250~280	赤红壤	人工林
杉木( <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.)Hook. forests)	27~29	18.27±3.25	16.59±4.23	1426±199	0.90	5~15	中坡	阳坡	265~290	赤红壤	人工林

注：数据为平均值±标准差。  
Note: The data are: mean±SD.

### 1.2 森林生物量调查

#### （1）乔木层生物量调查

在设置好的标准样地内，以 5 cm 为起测胸径，2 cm 为径阶，调查因子包括胸径、树高、树种组成等<sup>[2]</sup>。在每个对照样地内选取各径级的标准木 3 株，采集乔木的干、枝、叶和皮。采集的样品野外称其鲜质量，并取样，标记好带回实验室进行

内业测定及分析。

#### （2）灌木层生物量调查

根据灌木分布的均匀程度沿标准样地的对角线设置小样方。当分布较为均匀时设置 2 m×2 m 重复样方 3 个；当分布不均匀时设置 5 m×5 m 重复样方 3 个<sup>[2]</sup>。调查灌木层的盖度、株数和平均高度，各树种数量、地径、高度等，然后按灌木种类

收割样方内的所有灌木, 称量, 并取样, 标记好带回实验室进行内业测定及分析。

### (3) 草本层生物量调查

在标准样地内沿另一对角线设置 1 m×1 m 的重复样方 3 个, 调查草本层种类、盖度和平均高度, 然后全部收割、称量, 并取样, 标记好带回实验室进行内业测定及分析。

### (4) 凋落物层生物量调查

在标准样地内按对角线选取 1 m×1 m 的重复样方 3 个, 分别收集小样方内的枯枝和落叶(针叶和阔叶分开)并记录其鲜质量, 并取样, 标记好带

回实验室进行内业测定及分析。

## 1.3 生物量测定

利用相对生长法估测乔木生物量:

$$Y = a(D^2H)^b$$

式中:  $Y$ 表示乔木地上生物量 ( $t \cdot hm^{-2}$ ),  $D$ 表示胸径 (cm),  $H$ 表示树高 (m),  $a$ 、 $b$ 为系数。广东省 2 种典型针叶林乔木层生物量回归方程与回归系数见表 2。灌木、草本和凋落物的生物量测定, 主要采用测定含水率法。植被生物量包括乔木、灌木和草本的生物量之和。

表 2 广东省 2 种典型森林类型乔木层生物量回归方程与决定系数

Table 2 Regression equation and coefficient of determination of two typical forest types in Guangdong Province

典型森林类型 Typical forest type	组分 Component	回归方程 Regression equation	$a$	$b$	决定系数 Coefficient of determination( $R^2$ )	样本数 ( $N$ )
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forests	干 Trunk	$Y = a(D^2H)^b$	0.356 4	1.328 1	0.935 2	30
	枝 Branch	$Y = a(D^2H)^b$	0.219 5	1.621 5	0.865 7	30
	叶 Leaf	$Y = a(D^2H)^b$	0.051 4	1.532 1	0.994 7	30
	皮 Bark	$Y = a(D^2H)^b$	0.094 1	1.502 3	0.912 4	30
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forests	干 Trunk	$Y = a(D^2H)^b$	0.081 2	2.012 3	0.923 6	30
	枝 Branch	$Y = a(D^2H)^b$	0.003 1	2.965 4	0.945 7	30
	叶 Leaf	$Y = a(D^2H)^b$	0.021 1	2.123 6	0.935 9	30
	皮 Bark	$Y = a(D^2H)^b$	0.018 2	2.123 5	0.894 8	30

## 1.4 森林生物量碳含量的测定

将烘干的植被和凋落物样品磨碎过 0.25 mm 筛, 存放于玻璃瓶中。用 MultiN/C3100 分析仪 (Multi N/C3100, Analytik Jena AG, Jena, Germany) 联用固体模块测定碳含量, 每次测 3 个平行样, 对测定结果取平均值作为一个样本数, 测量精度为 0.01%, 误差为±0.2%。

## 1.5 单位面积碳密度的计算

$$C_t = M \times F_c / 1\ 000 \quad (1)$$

式中:  $M$ 为生物量碳密度;  $F_c$ 表示生物量的碳含量。

## 1.6 林火干扰强度划分

利用森林火灾调查和森林可燃物载量的有关情况, 把林火干扰强度划分为 3 个等级 (重度、中度、轻度)<sup>[2]</sup>。重度林火干扰: 火灾烧死木占 70%~100%, 乔木熏黑高度 ≥5 m, 林下灌木全部烧毁, 凋落物烧光; 中度林火干扰: 火灾烧死木占 30%~70%, 乔木熏黑高度在 2~5 m, 林下灌木几乎

被烧毁 (>50%), 凋落物几乎被烧毁 (>50%); 轻度林火干扰: 火灾烧死木在 30% 以下, 乔木熏黑高度 ≤2 m, 林下灌木部分被烧毁 (≤50%), 凋落物部分被烧毁 (≤50%)。

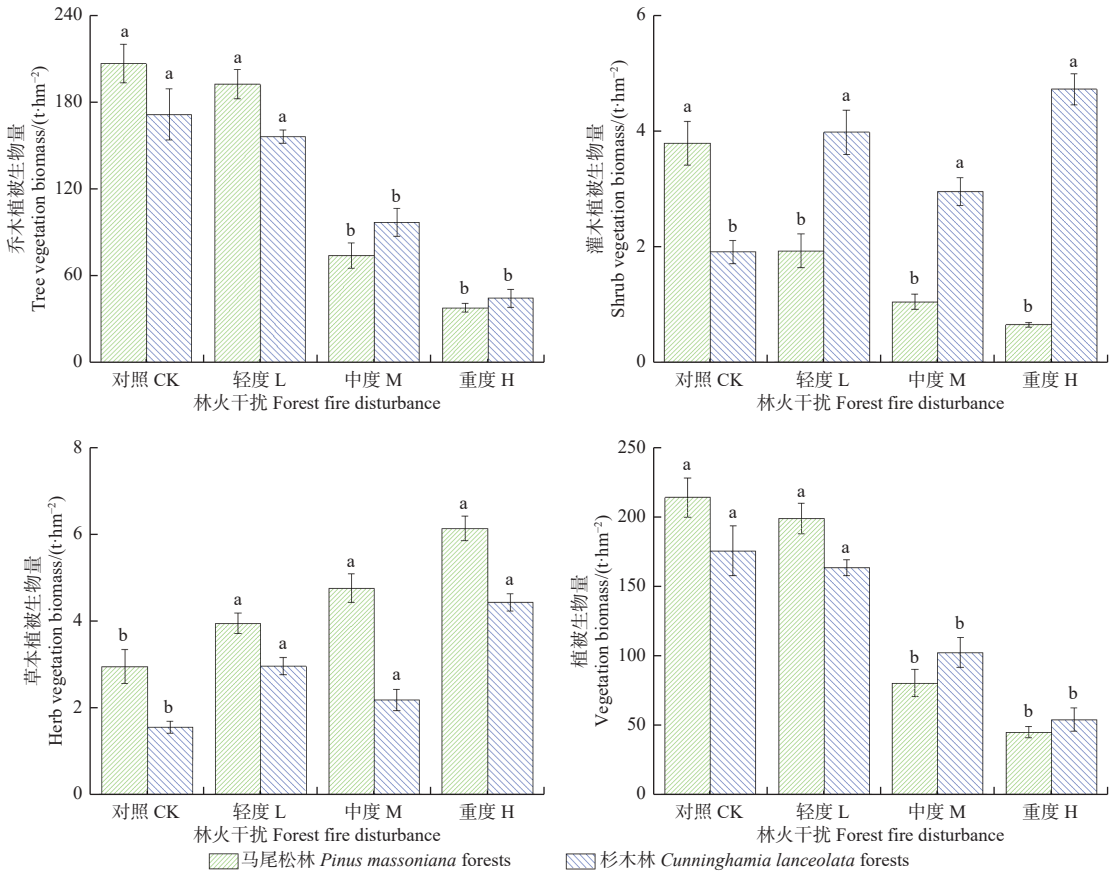
## 1.7 数据统计分析

数据统计分析采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件处理。运用 SPSS18.0 软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 并比较不同林火干扰强度样地与对对照样地之间碳密度的差异 (LSD 检验), 显著性水平设置  $\alpha=0.05$ 。用 Origin9.1 绘制图表。

# 2 结果与分析

## 2.1 林火干扰对植被碳密度的影响

2.1.1 植被生物量 从图 1 可知, 林火干扰降低了广东省亚热带 2 种典型森林类型植被生物量, 对植被各组分 (乔木、灌木和草本) 生物量均产生影响, 表现为对照>轻度林火干扰>中度林火干扰>重



不同小写字母表示同一森林类型不同林火干扰强度与对照样地之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Different small letters indicate significant difference between different forest fire disturbance intensity and control check plots in the same forest type at  $P < 0.05$  level. 下同。The same below.

图1 林火干扰对广东省2种典型森林类型植被生物量的影响

Fig. 1 Effect of forest fire disturbance on vegetation biomass of two typical forest types in Guangdong Province

度林火干扰。相同林火干扰强度下, 植被各组分生物量的变化均表现为乔木最大, 而林火干扰显著增加了草本生物量 ( $P < 0.05$ )。

马尾松林的对照、轻度、中度和重度林火干扰样地的植被生物量依次为 212.97、198.55、80.15 和 44.99  $t \cdot hm^{-2}$ , 轻度、中度和重度林火干扰样地与对照样地相比分别降低了 6.77%、62.37% 和 78.88%, 杉木林的植被生物量依次为 174.04、163.02、102.07 和 53.99  $t \cdot hm^{-2}$ , 轻度、中度和重度林火干扰样地与对照样地相比分别降低了 6.33%、41.35% 和 68.98%, 均仅中度和重度林火干扰样地呈现差异显著 ( $P < 0.05$ )。2 种森林类型的乔木生物量在不同林火干扰后与对照样地相比均表现为下降趋势, 但仅中度和重度林火干扰后表现为差异显著 ( $P < 0.05$ ), 即中度和重度林火干扰显著减少了乔木生物量; 马尾松林的灌木生物量在不同林火干扰后与对照样地相比均表现为下降趋势, 且差异显著 ( $P < 0.05$ ), 即 3 种林火干扰强度均显著减少了

马尾松林的灌木生物量, 而杉木林的灌木生物量在不同林火干扰后与对照样地相比均表现为增加, 且差异显著 ( $P < 0.05$ ), 即 3 种林火干扰强度均显著增加了灌木生物量。马尾松林的草本从对照样地的 2.72  $t \cdot hm^{-2}$  增加到重度林火干扰强度的 6.13  $t \cdot hm^{-2}$ , 增加了 125.47%, 杉木林的草本从对照样地的 1.11  $t \cdot hm^{-2}$  增加到重度林火干扰强度的 4.42  $t \cdot hm^{-2}$ , 增加了 299.75%, 增幅均较大, 且 3 种林火干扰强度均提升了草本生物量 ( $P < 0.05$ )。

在 2 种森林类型的对照样地中生物量大小为马尾松林 > 杉木林, 重度林火干扰后生物量大小为杉木林 > 马尾松林。说明重度林火干扰对杉木植被生物量损失较少。

2.1.2 林火干扰对植被碳密度的影响 由图 2 可得出, 林火干扰对广东省亚热带 2 种典型森林类型的植被碳密度均有影响, 轻度林火干扰对植被碳密度的影响差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 而中度和重度林火干扰则显著降低了植被碳密度 ( $P < 0.05$ )。林火干扰强

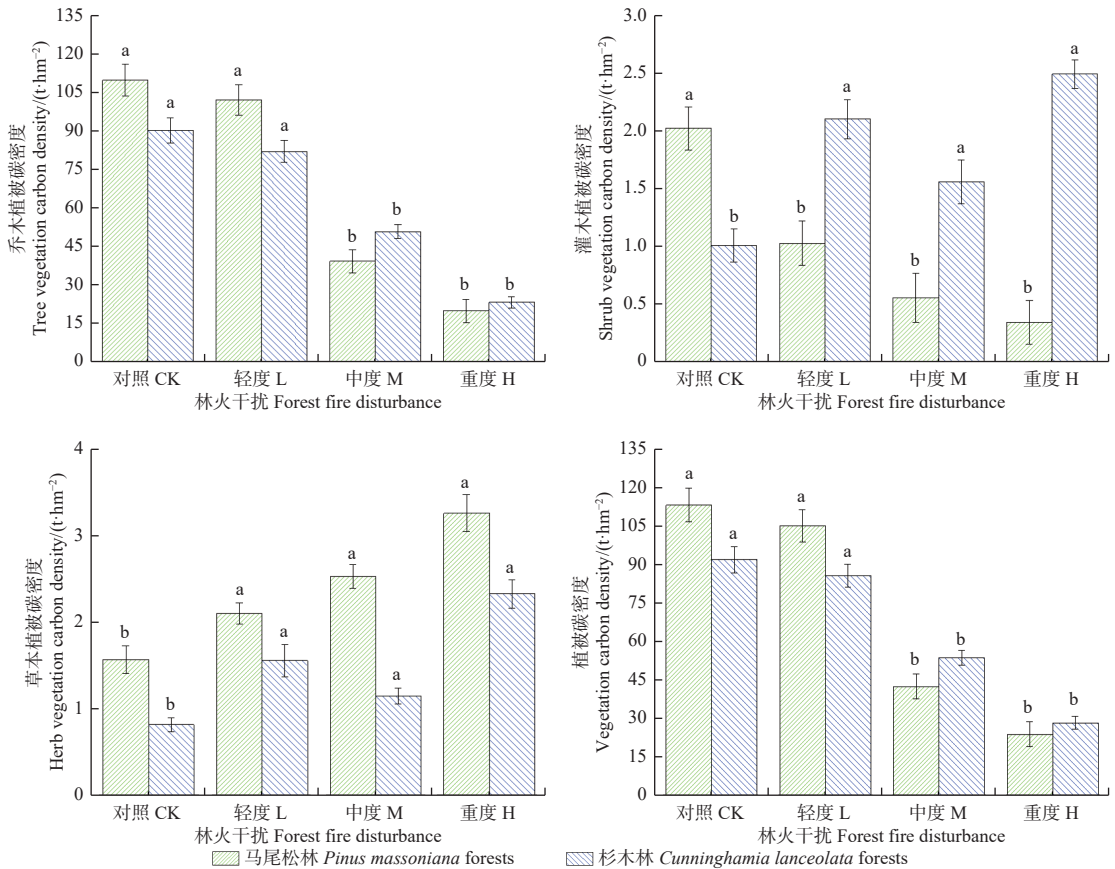


图2 林火干扰对广东省2种典型森林类型植被碳密度的影响

Fig. 2 Effect of forest fire disturbance on vegetation carbon density of two typical forest types in Guangdong Province

度显著影响植被碳密度, 表现为对照>轻度林火干扰>中度林火干扰>重度林火干扰。相同林火干扰强度下, 植被各组碳密度的变化均表现为乔木最大, 而林火干扰显著提高了草本碳密度 ( $P<0.05$ )。

马尾松林的对照、轻度林火干扰、中度林火干扰和重度林火干扰样地植被碳密度为 23.57~113.06 t·hm<sup>-2</sup> 之间, 轻度、中度和重度林火干扰样地与对照样地相比分别降低了 6.81%、62.54% 和 79.16%。杉木林的对照、轻度林火干扰、中度林火干扰和重度林火干扰样地植被碳密度分别为 91.65、85.73、53.65 和 28.20 t·hm<sup>-2</sup>, 轻度、中度和重度林火干扰样地与对照样地相比分别降低了 6.46%、41.46% 和 69.23%。2 种森林类型均在中度和重度林火干扰后呈现差异显著 ( $P<0.05$ ), 而轻度林火干扰后表现为差异不显著 ( $P>0.05$ )。马尾松林的乔木碳密度在不同林火干扰后与对照样地相比均表现为下降趋势, 但仅中度和重度林火干扰后表现为差异显著 ( $P<0.05$ ); 灌木碳密度在不同林火干扰后与对照样地相比均表现为下降趋势, 且差异

显著 ( $P<0.05$ ), 即 3 种林火干扰强度均降低了灌木碳密度; 但草本却从对照样地的 1.29 t·hm<sup>-2</sup> 增加到重度林火干扰强度的 2.90 t·hm<sup>-2</sup>, 增加了 125.47%, 增幅较大, 且 3 种林火干扰强度均显著增加了草本碳密度 ( $P<0.05$ )。杉木林的乔木碳密度在不同林火干扰后与对照样地相比均表现为下降趋势, 且差异显著 ( $P<0.05$ ); 灌木碳密度虽从对照样地的 0.75 t·hm<sup>-2</sup> 增加到重度林火干扰强度的 2.41 t·hm<sup>-2</sup>, 但中度林火干扰增幅慢于轻度和重度林火干扰; 草本碳密度在不同林火干扰后与对照样地相比均表现为上升趋势, 与对照相比, 3 种林火干扰后均呈现为差异显著 ( $P<0.05$ )。

从以上分析可知, 林火干扰对 2 种森林类型植被碳密度的影响程度主要受乔木碳密度的影响, 虽然林火干扰后, 由于地表光照和地表养分的改变, 促进草本碳密度的显著增加, 但并不影响植被碳密度在不同林火干扰后表现出减少的趋势。对照样地中植被碳密度为马尾松林>杉木林, 重度林火干扰后植被碳密度为杉木林>马尾松林。

## 2.2 林火干扰对凋落物碳密度的影响

2.2.1 凋落物生物量 根据图3可得出,随着林火干扰强度的增加,各森林类型凋落物生物量均呈下降趋势。与对照样地相比,马尾松林和杉木林在不同林火干扰强度后,凋落物生物量均呈现为差异显著( $P<0.05$ )。马尾松林和杉木林轻度林火干扰后的凋落物生物量分别为4.37和5.32  $t\cdot hm^{-2}$ ,依次下降了19.96%和30.18%。中度林火干扰后凋落物生物量分别为3.66和5.10  $t\cdot hm^{-2}$ ,依次下降了32.97%和33.07%。重度林火干扰后凋落物生物量分别为2.79和4.53  $t\cdot hm^{-2}$ ,依次减少了48.90%和40.55%。由此可见,林火干扰对马尾松林凋落物生物量的影响最大。同一林火干扰强度下,2种森林类型凋落物生物量亦呈减少趋势,但随着林火强度的增加,由于不同森林类型对林火干扰的响应不同,与对照样地凋落物生物量的变化未出现一致性规律。2种森林类型均在重度林火干扰后凋落物生物量下降最多。

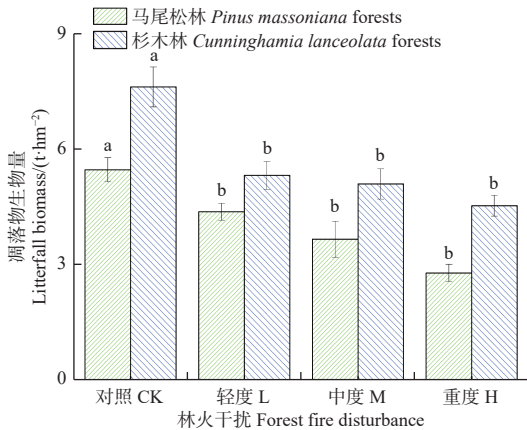


图3 林火干扰对广东省2种典型森林类型凋落物生物量的影响

Fig. 3 Effect of forest fire disturbance on Litterfall biomass of two typical forest types in Guangdong Province

2.2.2 林火干扰对凋落物碳密度的影响 根据图4可知,虽然不同林火干扰强度对凋落物碳密度的影响有所差异,但不同林火干扰强度均显著减少了凋落物碳密度( $P<0.05$ ),并随林火干扰强度的增加变化幅度增大。马尾松林和杉木林在轻度林火干扰后凋落物碳密度分别为2.21和2.64  $t\cdot hm^{-2}$ ,与对照相比依次降低了19.93%和30.16%;中度林火干扰后为1.85和2.53  $t\cdot hm^{-2}$ ,与对照相比依次降低了32.97%和33.07%;重度林火干扰后为1.41和2.25  $t\cdot hm^{-2}$ ,与对照相比依次降低了48.91%和40.48%。同一林

火干扰强度下,2种森林类型凋落物碳密度亦呈减少趋势,但随着林火强度的增加,由于不同森林类型对林火干扰的响应不同,与对照样地凋落物的碳密度的变化量未呈现一致性规律。2种森林类型均在轻度林火干扰后凋落物碳密度减少幅度最小,而重度林火干扰后凋落物碳密度减少幅度最大。植被是凋落物碳密度的主要来源,林火干扰后总体上减少植被碳密度,因而林火干扰后凋落物碳密度亦呈下降的规律。

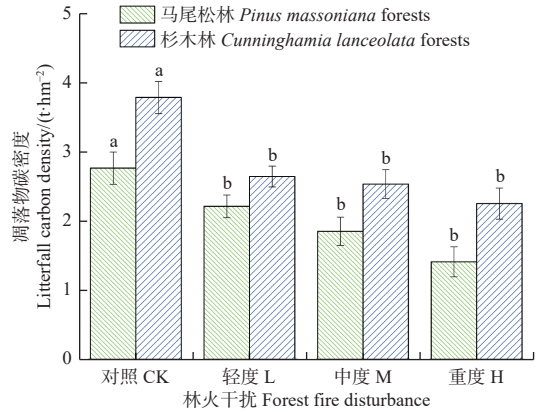


图4 林火干扰对广东省2种典型森林类型凋落物碳密度的影响

Fig. 4 Effect of forest fire disturbance on Litterfall carbon density of two typical forest types in Guangdong Province

## 3 讨论

### 3.1 林火干扰对植被碳密度影响

本研究发现植被碳密度随着林火干扰强度的增加而不断减少,这与王长龙等<sup>[21]</sup>对林火干扰后东北蒙古栎林碳密度变化规律相似;林火干扰后促进草本碳密度的增加,这与潘登等<sup>[22]</sup>研究林火干扰对大兴安岭植被碳密度的影响结果相似,主要是因为林火干扰后林分郁闭度下降,有利于草本获得更多的光照,从而促进草本的生长发育。本研究发现乔木碳密度在林火干扰后降低幅度最大,这与杨达<sup>[17]</sup>在大兴安岭的研究结果相似。Gibson等<sup>[23]</sup>的研究发现阿拉斯加北方黑云杉林在火后10年其植被碳库大小与林火干扰强度并未有相关性。虽然不同林火干扰强度对植被各组分产生不同影响,但在2种森林类型的对照样地及3种林火干扰强度中乔木碳密度均是植被碳密度主要组成部分,在植被碳密度中占主体地位,因而林火干扰对植被碳密度的影响程度主要受乔木碳密度的影响,虽然林火干

扰后,由于地表光照和地表养分的改变<sup>[24]</sup>,促进草本碳密度的显著增加,但并不影响植被碳密度在不同林火干扰后表现出减少的趋势。对对照地中植被碳密度为马尾松林>杉木林,重度林火干扰后为杉木林>马尾松林。

本研究发现2种典型森林类型在林火干扰后乔木碳密度在不同林火干扰强度下均呈现为对照>轻度林火干扰>中度林火干扰>重度林火干扰;而草本碳密度在不同林火干扰强度下则呈现与乔木碳密度相反的变化趋势。即林火干扰强度显著影响乔木和草本碳密度。但林火干扰对灌木碳密度的影响受树种的影响而表现为较大的差异性。马尾松林的灌木碳密度在不同林火干扰后与对对照地相比均表现为下降趋势,且差异显著( $P<0.05$ );杉木林的灌木碳密度虽从对对照地的 $0.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到重度林火干扰强度的 $2.41\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,但中度林火干扰增幅慢于重度林火干扰。通过以上分析可知,森林类型、植被状况对林火干扰的响应不同,导致林火干扰对灌木碳密度的影响不同,因而在以后的研究中要关注植被类型对林火干扰的响应,进一步量化不同林火干扰强度对植被碳密度的影响。

### 3.2 林火干扰对凋落物碳密度影响

林火干扰对广东省亚热带2种典型森林类型凋落物碳密度的影响与林火干扰强度有关,重度林火干扰使凋落物碳密度显著降低,而轻度林火干扰对其影响虽然显著,但与重度林火干扰相比,随着林火干扰强度的增加,其增幅较快。这可能与重度林火干扰后植被碳密度的变化相关(植被碳密度是凋落物的主要来源)。本研究发现随着林火干扰强度的增加,各种森林类型凋落物碳密度整体表现为减少趋势,这与黄钰淇等<sup>[25]</sup>对昆明人工林凋落物的研究结果一致。同一林火干扰强度下,2种森林类型凋落物碳密度亦呈减少趋势,但随着林火强度的增加,由于不同森林类型对林火干扰的响应不同,与对对照地凋落物碳密度的变化量未呈现一致性的规律。2种森林类型均在重度林火干扰后凋落物碳密度减少比例最多,尤其是马尾松林样地减少到 $1.41\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。本研究2种森林类型的对对照地凋落物碳密度均高于林火干扰样地,且不同森林类型随林火强度的变化幅度并不相同,主要原因是森林类型差异导致的<sup>[17]</sup>,因而,在对对照地凋落物碳密度

相近的情况下,林火干扰后,马尾松林和杉木林凋落物碳密度的变化趋势并不相同。

### 3.3 林火干扰对森林生物碳密度的影响机制

轻度林火干扰虽显著提高了草本碳密度,亦对灌木碳密度产生了重要影响,但对占植被主体地位的乔木碳密度的影响差异不显著,因而未导致植被碳密度的显著变化。而中度和重度林火干扰虽显著提高了草本碳密度,也对灌木碳密度产生了影响,但显著降低了乔木碳密度,进而显著降低了植被碳密度。森林植被是凋落物的主要来源,林火干扰改变了凋落物的来源。虽轻度林火干扰减少了乔木碳密度,但影响差异不显著,同时显著增加了草本碳密度,并影响了灌木碳密度,从而减少了凋落物的来源,进而显著减少了凋落物碳密度。而中度和重度林火干扰虽显著增加了草本碳密度,并影响灌木碳密度,但显著降低了乔木碳密度,从而减少了凋落物的来源,进而显著减少了凋落物碳密度。

## 4 结论

本研究通过研究不同林火干扰强度对广东省亚热带2种典型针叶林森林生物碳密度的短期影响,定量研究不同林火干扰强度(轻度、中度和重度)对2种针叶林的植被碳密度和凋落物碳密度的变化规律和空间分布格局,并揭示了林火干扰对森林生物碳密度的影响机制。林火干扰对亚热带2种典型针叶林的植被和凋落物碳密度均有影响,表现为对照>轻度林火干扰>中度林火干扰>重度林火干扰。轻度林火干扰对植被碳密度的影响差异不显著( $P>0.05$ ),而中度和重度林火干扰则显著降低了植被碳密度( $P<0.05$ )。相同林火干扰强度下,植被各组分碳密度的变化均表现为乔木最大。乔木碳密度在不同林火干扰强度下均呈现为对照>轻度林火干扰>中度林火干扰>重度林火干扰,而草本碳密度则呈现与乔木碳密度相反的变化趋势为重度林火干扰>中度林火干扰>轻度林火干扰>对照。林火干扰强度显著影响乔木和草本碳密度,亦对灌木碳密度产生了影响。不同林火干扰强度对凋落物碳密度的影响有所差异,但不同林火干扰强度均显著减少了凋落物碳密度( $P<0.05$ ),并随林火干扰强度的增加其减少幅度增大。研究表明:林火干扰减少了植被和凋落物碳密度,进而对森林生态系统的碳密度产生重要影响。通过分析林火干扰后碳密度的空间分

布格局及影响机制,从而为林火干扰后生态系统碳汇管理提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] 曾伟生,陈新云,蒲莹,等.基于国家森林资源清查数据的不同生物量和碳储量估计方法的对比分析[J].林业科学研究,2018,31(1):66-71.
- [2] 徐小锋,田汉勤,万师强.气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响[J].植物生态学报,2007,31(2):175-188.
- [3] 魏书精.黑龙江省森林火灾碳排放定量评价方法研究[D].哈尔滨:东北林业大学博士论文,2013.
- [4] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [5] Lal R. Forest soils and carbon sequestration[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1-3): 242-258.
- [6] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333: 988-993.
- [7] 李志安,邹碧,丁永祯,等.森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展[J].生态学杂志,2004,23(6):77-83.
- [8] 魏书精,罗碧珍,胡海清,等.黑龙江省温带森林火灾碳排放的计量估算[J].生态学报,2014,34(11):3048-3063.
- [9] 庄亚辉,曹美秋,王效科,等.中国地区生物质燃烧释放的含碳痕量气体[J].环境科学学报,1998,18(4):337-343.
- [10] 胡海清,罗碧珍,魏书精,等.1953~2011年小兴安岭森林火灾含碳气体排放的估算[J].应用生态学报,2013,24(11):3065-3076.
- [11] 曹国良,张小曳,王丹,等.中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单[J].中国环境科学,2005,25(4):389-393.
- [12] 陆炳,孔少飞,韩斌,等.2007年中国大陆地区生物质燃烧排放污染物清单[J].中国环境科学,2011,31(2):186-194.
- [13] 王效科,冯宗炜,庄亚辉.中国森林火灾释放的CO<sub>2</sub>、CO和CH<sub>4</sub>研究[J].林业科学,2001,37(1):90-95.
- [14] 田晓瑞,舒立福,王明玉.1991~2000年中国森林火灾直接释放碳量估算[J].火灾科学,2003,12(1):7-10.
- [15] 吴沁淳,陈方,王长林,等.自然火灾碳排放估算模型参数的遥感反演进展[J].遥感学报,2016,20(1):11-26.
- [16] 高浩,张甲坤,郑伟,等.基于不同分辨率卫星数据的林火排放对比研究[J].地理研究,2017,36(5):850-860.
- [17] 杨达,贺红士,吴志伟,等.火干扰对大兴安岭呼中林区地上死木残体碳储量的影响[J].应用生态学报,2015,26(2):331-339.
- [18] 刘志华,杨健,贺红士,等.黑龙江大兴安岭呼中林区火烧点格局分析及影响因素[J].生态学报,2011,31(6):1669-1677.
- [19] Lü A, Tian H, Liu M, *et al.* Spatial and temporal patterns of carbon emissions from forest fires in China from 1950 to 2000[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: D05313.
- [20] 刘晓东,王博.森林燃烧主要排放物研究进展[J].北京林业大学学报,2017,39(12):118-124.
- [21] 王长龙,任生,陈晓才,等.森林火灾后蒙古栎林碳素分布及储量的分析[J].吉林林业科技,2010,39(1):1-4.
- [22] 潘登,张合平,潘高,等.桂西南松栎林火行为研究及碳排放计量[J].自然灾害学报,2017,26(5):51-61.
- [23] Gibson C M, Turetsky M R, Cottenie K, *et al.* Variation in plant community composition and vegetation carbon pools a decade following a severe fire season in interior Alaska[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2016, 27(6): 1187-1197.
- [24] Muir P. Disturbance effects on structure and tree species composition of *Pinus massoniana* Lamb forests in western Montana[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23: 1617-1625.
- [25] 黄铄淇,胡慧蓉,韩钊龙,等.林火对昆明人工林凋落物和表层土壤碳氮的影响[J].四川农业大学学报,2014,32(1):18-22.



# Effect of Forest Fire Disturbance on Biological Carbon Density of Two Typical Coniferous Forests in Guangdong Province, China

HU Hai-qing<sup>1</sup>, LUO Si-sheng<sup>1</sup>, LUO Bi-zhen<sup>1</sup>, WEI Shu-jing<sup>2</sup>, LI Xiao-chuan<sup>2</sup>, WANG Zhen-shi<sup>2</sup>,  
WU Ze-peng<sup>2</sup>, ZHOU Yu-fei<sup>2</sup>, LIU Fei<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

**Abstract:** [Objective] To study the variation law of forest fire disturbance to forest biological carbon pool, and to reveal the mechanism of forest fire disturbance on forest biological carbon density, so as to provide references for the management of carbon sink in forest ecosystems after fire disturbance. [Method] Taking 2 typical subtropical coniferous forests in Guangdong province as the research object, the effects of different forest fire intensity on carbon density and carbon distribution of forest biological carbon pool (vegetation carbon pool and litterfall carbon pool) were measured quantitatively at the level of forest ecosystem by using the method of adjacent plots comparison with the analysis of field investigation sampling and laboratory test as the main means. [Result] The results showed that forest fire disturbance had an effect on the carbon density of vegetation and litterfall in the 2 coniferous forests, and can be ranked according to the severity degree as control > light forest fire disturbance > moderate forest fire disturbance > high forest fire disturbance. There was no significant difference in the effect of light forest fire disturbance on the carbon density of vegetation ( $P > 0.05$ ), while moderate and high forest fire disturbance significantly reduced the carbon density of vegetation ( $P < 0.05$ ). Under same forest fire intensity, the tree showed the largest change in carbon density of vegetation components. Under different forest fire intensity, the carbon density change of trees followed the order of control > light forest fire interference > moderate forest fire disturbance > high forest fire disturbance, while the change of carbon density of herbs showed a trend opposite to carbon density of trees. The intensity of forest fire disturbance significantly affected the carbon density of trees and herbs, and also had an effect on the carbon density of shrubs. The effects of different forest fire intensity on the carbon density of litterfall varied, but the carbon density of litterfall was significantly reduced by various forest fire intensity ( $P < 0.05$ ), and the extent increased with the increase of forest fire intensity. [Conclusion] Forest fire disturbance reduces the carbon density of vegetation and litterfall, which in turn has an important effect on the carbon density of forest ecosystem.

**Keywords:** forest biomass; carbon density; forest fire disturbance; influence mechanism; subtropical coniferous forest

(责任编辑: 彭南轩)