

# 重庆缙云山马尾松针阔混交林火干扰下的碳损失估算

尹乐<sup>1,2</sup>, 王云琦<sup>1,2†</sup>, 王松年<sup>1,2</sup>, 王太强<sup>3</sup>, 刘玉芳<sup>3</sup>, 孟祥江<sup>4</sup>, 薛沛沛<sup>4</sup>, 张建聪<sup>1,2</sup>,  
王琳涛<sup>1,2</sup>, 张洪珊<sup>1,2</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院 重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 100083, 北京;

2. 北京林业大学水土保持学院 重庆三峡库区森林生态系统教育部野外科学观测研究站, 100083, 北京;

3. 重庆缙云山国家级自然保护区管理局, 400700, 重庆;

4. 重庆市林业科学研究院 重庆武陵山森林生态系统国家定位观测研究站, 400700, 重庆)

**摘要:** 林火的发生会对森林生态系统的稳定性产生胁迫, 导致气候变化, 是森林碳库减少的主要干扰因子之一。为探究火干扰下森林的碳损失量, 以重庆缙云山典型林种针阔混交林为研究对象, 利用生物量法进行估算火干扰下的枯落物层及乔灌层的碳损失量。结果表明: 1) 相同火干扰程度下消耗的可燃物量表现为枯落物层( $41.33 \text{ t}/\text{hm}^2$ )>灌木层( $1.28 \text{ t}/\text{hm}^2$ )>乔木层( $0.27 \text{ t}/\text{hm}^2$ ), 缙云山马尾松针阔混交林地表分布有大量的可燃物, 导致燃烧物以枯落物及上层腐殖质为主; 森林各部分可燃物的消耗量随着火干扰程度的增加而增加; 2) 针阔混交林枯落物层及乔木层可燃物载量主要随着熏黑高度和乔木死亡率的增加而增加, 灌木层可燃物载量主要随着熏黑高度和乔木死亡率的增加而减少; 3) 不同程度火干扰下森林植被碳损失量有所差异, 缙云山马尾松针阔混交林样地内碳损失量主要由重度火干扰提供, 火干扰后造成的碳吸收损失总量为  $5.68 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 。综上, 缙云山针阔混交林被轻度火干扰程度最大, 且以地表火为主, 燃烧物主要以枯落物及上层腐殖质为主, 所消耗可燃物总量较多, 碳损失量较大。

**关键词:** 针阔叶混交林; 火干扰; 碳损失量; 生物量法; 缙云山

中图分类号: X826 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2023)03-0128-09

DOI: 10.16843/j.sswc.2023.03.016

## Estimation of carbon loss under fire disturbance in *Pinus massoniana* coniferous and broad-leaved mixed forest in Jinyun Mountain, Chongqing

YIN Le<sup>1,2</sup>, WANG Yunqi<sup>1,2</sup>, WANG Songnian<sup>1,2</sup>, WANG Taiqiang<sup>3</sup>, LIU Yufang<sup>3</sup>, MENG Xiangjiang<sup>4</sup>,  
XUE Peipei<sup>4</sup>, ZHANG Jiancong<sup>1,2</sup>, WANG Lintao<sup>1,2</sup>, ZHANG Hongshan<sup>1,2</sup>

(1. Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation,  
Beijing Forestry University, 100083, Beijing, China; 2. Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research  
Station, Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, Beijing, China;

3. Chongqing Jinyun Mountain National Nature Reserve Administration, 400700, Chongqing, China; 4. Chongqing Academy of  
Forestry Sciences, Chongqing Wuling Mountain Forest Ecosystem National Research Station, 400700, Chongqing, China)

**Abstract:** [Background] Jinyun Mountain is located at the end of the Three Gorges Reservoir Area, with a forest coverage rate of 96.6%, and a large area of mixed coniferous and broad-leaved forests, which is an important carbon reservoir component of the Three Gorges Reservoir Area. Affected by

收稿日期: 2023-01-05 修回日期: 2023-03-13

项目名称: 北京林业大学热点追踪项目“重庆缙云山森林火灾调查和灾后植被恢复重建研究”(2022BLRD11); 重庆市科技兴林项目“重庆防护林林分结构质量精准提升技术研究”(渝林科研2020-10)

第一作者简介: 尹乐(1999—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 森林碳循环。E-mail: 1455780358@qq.com

†通信作者简介: 王云琦(1979—), 女, 博士, 教授。主要研究方向: 水土保持。E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn

extreme high temperature weather, a forest fire occurred in the southern foothills of Jinyun Mountain on August 21, 2022, and the author estimated the carbon release amount of litter layer and arbor irrigation layer under this forest fire disturbance, aiming to provide a scientific reference for the calculation of carbon loss after fire disturbance and the restoration of vegetation carbon sink function. [Methods] Taking the coniferous and broad-leaved mixed forest of typical forest species in Jinyun Mountain in Chongqing as the research object, by dividing different levels of fire disturbance in Jinyun Mountain, setting up 12 fixed standard sample plots, biomass method was used to collect samples of trees, shrubs and litter layers after fire disturbance and undisturbed areas, comparing the differences between the two, and flux tower data was combined to estimate the carbon loss and carbon release under forest fire disturbance. [Results] 1) The combustible load of litter layer and arbor layer in coniferous and broad-leaved mixed forest mainly increased with the increase of blackening height and tree mortality. The combustible load of the shrub layer mainly decreased with the increase of blackening height and tree mortality. Combustible consumption under the same forest fire disturbance degree: litter layer ( $41.33 \text{ t}/\text{hm}^2$ ) > shrub layer ( $1.28 \text{ t}/\text{hm}^2$ ) > arbor layer ( $0.27 \text{ t}/\text{hm}^2$ ), the combustibles were mainly litters and upper humus. The consumption of combustibles in various parts of the forest increases with the increase of forest fire disturbance. 2) There was a significant positive correlation between litter layer and arbor layer and blackening height and tree mortality ( $P < 0.01$ ), and the correlation with other stand investigation factors was not significant, indicating that the combustible material load of litter layer and arbor layer increased with the increase of blackening height and tree mortality in coniferous and broad-leaved mixed forests. There was a significantly negative correlation between shrub layer and blackening height and tree mortality ( $P < 0.05$ ), but not with stand investigation factors, indicating that the combustible material load of shrub layer decreased with the increase of blackening height and tree mortality after forest fire disturbance. 3) The carbon emission in the coniferous and broad-leaved mixed forest plot in Jinyun Mountain was mainly provided by severe fire disturbance, and the total fuel consumption and carbon release of the coniferous and broad-leaved mixed forest in Jinyun Mountain were 5 468.66 kg, the carbon release amount was 2 460.90 kg, and the total carbon absorption loss caused by forest fire disturbance was  $5.68 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ . [Conclusions] To sum up, this study shows that the coniferous broad-leaved mixed forest of Jinyun Mountain is most disturbed by mild fire, and the surface fire is the mainstay, and the combustion materials are mainly litter and upper humus, and the total amount of combustible materials consumed is more and the total carbon release is large. The results may provide data reference for the study of carbon balance and carbon cycle in the study area, and provide a scientific basis for the later restoration of vegetation carbon sink function.

**Keywords:** coniferous and broadleaved mixed forest; fire disturbance; carbon loss; biomass method; Jinyun Mountain

近几十年来由于工业发展等众多原因,大气 $\text{CO}_2$ 浓度升至80万年以来最高水平,导致全球气候发生变化。森林是陆地上碳的主要存储库,世界森林面积占陆地总面积的1/3,其碳储量几乎占到陆地碳库总量的50%,其固碳量约占整个陆地生态系统的2/3<sup>[1]</sup>。森林碳汇是植物通过光合作用从大气中吸收合成有机物 $\text{CO}_2$ ,并将其储存在生物体内或土壤中,从而起到降低大气 $\text{CO}_2$ 浓度和缓解气候变化的作用<sup>[2]</sup>。森林生态系统碳库通常分

为生物量碳库、凋落物碳库、死木碳库和土壤有机碳库<sup>[3]</sup>。在全球陆地生态系统中,森林与草地、湿地和农田等生态系统类型相比具有更强的碳汇功能和增汇潜力。林火是森林生态系统的主要干扰因素之一,在全球范围内林火平均每年燃烧约300万~500万 $\text{hm}^2$ 森林,排放 $\text{CO}_2$ 约80亿t,减少植被储存10%的碳。火灾、土地利用变化等人类活动均会增加森林碳释放,加剧全球森林的碳汇功能的降低<sup>[4]</sup>。通过有效提升全球森林生态系统

固碳能力,能够抵消化石燃料燃烧释放的 CO<sub>2</sub><sup>[5]</sup>。由于植被自身组成成分含量不同、林火强度不同等,不同森林发生火干扰释放温室气体及带来的危害程度不同<sup>[6]</sup>。林火通过改变林分特征(郁闭度、林分密度等)以及森林环境要素(光照、温度、水分、土壤养分等)来影响森林生态系统内部的物质循环、能量流动以及信息传递,从而对森林各碳库产生影响。同时其影响森林生态系统植被与群落的生长过程,调控着植被间的交互作用关系<sup>[7]</sup>,影响森林生物量、凋落物量、细根生物量以及生物地球化学循环,进而对森林生态系统的碳密度及其空间分布格局产生重要影响<sup>[8]</sup>。

火干扰对森林生态系统碳损失的影响已有大量的研究,Lyu 等<sup>[9]</sup>通过收集现有遥感数据,计算出 1989—2001 年间巴西朗多尼亚州的碳损失为 1.1 亿 kg;Awuah 等<sup>[10]</sup>通过生物量法估算了加纳摩尔国家公园潮湿到中层燃烧季节和历史的生态系统碳储存;单保君等<sup>[11]</sup>根据 1996—2013 年森林受害蓄积面积数据,采用植被年固碳量计算方法,估算我国森林火灾造成碳汇损失量。近年来,遥感技术发展迅猛,其算法被应用到火干扰对森林生态系统碳损失的估算中<sup>[12]</sup>,在大尺度上估计火干扰面积、可燃物载量等碳影响因子的计量参数,以此来估算火干扰碳损失获得了较好效果。但遥感技术中所获得的计量参数大多通过经验或者数学模型得到,与实际情况存在一定差异,最终得出的估算结果准确性置信程度不足,故可采用生物量法估算单位面积的可燃物载量,并结合遥感技术获取的火干扰面积,达到综合提高火干扰对森林生态系统碳损失的估算精度。

缙云山地处三峡库区尾端,森林覆盖率达 96.6%,内有大面积的针阔叶混交林,是典型的亚热带针阔混交林生态综合体物种基因库,也是三峡库区的重要碳库组分。受极端高温天气影响,2022 年 8 月 21 日缙云山南麓发生林火,笔者以重庆缙云山典型林种针阔混交林为研究对象,通过对缙云山不同等级火干扰进行划分,利用生物量法进行估算火干扰下的枯落物层及乔灌层的碳释放量,明晰不同等级火干扰下不同可燃物的碳损失情况,以期为火干扰后的碳损失计算及植被碳汇功能恢复提供数据依据。

## 1 研究区概况

研究区所在地为重庆市北碚区缙云山国家级自然保护区内(E 106°17'~106°24',N 29°41'~29°52'),

该保护区的整体面积约 76 km<sup>2</sup>,海拔 200~952 m,地处长江三峡库区的尾端,是三峡库区的重要生态屏障。缙云山气候为典型的亚热带季风性湿润气候,降雨量丰富,年平均降水量 1 611.8 mm,但雨量分配不均,冬半年(10—翌年 3 月)降水量为 368 mm,占全年总降水量 22.8%,夏半年(4—9 月)降水量为 1 243.8 mm,占全年总降水量 77.2%;年均蒸发量 777.1 mm,月平均蒸发量为 64.7 mm,其中 7—8 月蒸发量共 255.4 mm,占全年的 32.8%。年平均日照时间低于 1 293 h,夏季日照最多,占全年 35%~40%,冬季最少,仅占 5%~6%;该地区受局部小气候影响潮湿多雾,平均全年有雾日达 89.8 d。主要乔木树种包括马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolate*)、杨桐(*Adinandra bockiana*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、四川大头茶(*Polyspora speciosa*)和山矾(*Symplocos sumuntia*)等;林下灌层植物种主要有小果蔷薇(*Rosa cymosa*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、草珊瑚(*Sarcandra glabra*)等;草层主要分布竹叶草(*Oplismenus compositus*)、接骨草(*Sambucus chinensis*)和佛甲草(*Sedum lineare*)。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

按照研究区内不同的火干扰程度设置固定标准样地,固定标准样地设置要求:根据遥感影像及实际踏查结果,选择火干扰的 3 处区域(图 1):火干扰起点虎头村、火干扰中段薄巴山、火干扰末尾八角池作

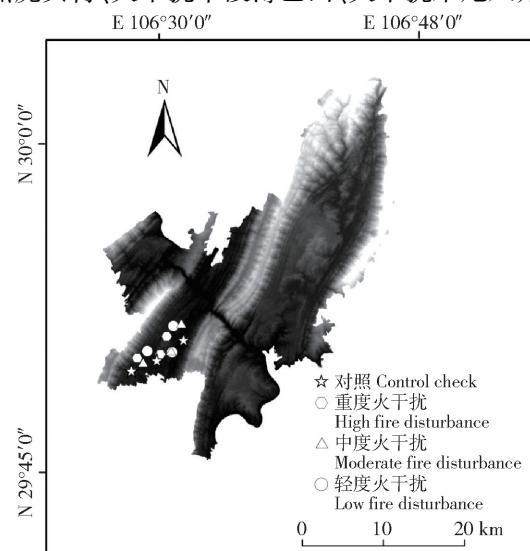


图 1 固定样地概况图

Fig. 1 Overview map of the fixed plot

为样点,根据火干扰迹地内林木的熏黑高度和植被存活情况进行火烈度分级:轻度火干扰(I),10%以上树木被烧伤或烧死,40%树干熏黑高度2 m;重度火干扰(III),80%以上树木被烧伤或烧死,熏黑高度为5 m以上;中度火干扰(II)介于二者之间<sup>[13]</sup>。样地为针阔混交林,针叶树种有马尾松和杉木,阔叶树种主要有四川大头茶、山矾、香樟和杨桐,林下灌木包括杜鹃和草珊瑚等,由于马尾松针阔混

交林林分生长特征,调查区域内林下草本覆盖率不足1%,所以本研究不作考虑。分别在轻度、中度和重度3种火干扰程度的火烧迹地(过火样地)及相邻未干扰林分(未过火林地,即对照样地,CK)设置固定样地(样地基本情况见表1),每个样地规格大小为20 m×20 m,3处区域共选设固定标准样地12块,即12块标准样地=3个区域×(3种火干扰程度+1个对照样地)。

表1 样地基本情况

Tab. 1 Basic characteristics of the sampling plots

编号 No.	火干扰程度 Degree of fire disturbance	海拔 Altitude/ m	坡度 Slope/ (°)	林分密度 Stand density/ (Trees·m <sup>-2</sup> )	平均胸径 DBH/ cm	平均树高 Average tree height/m	平均冠幅 Average crown width/(m×m)	熏黑高度 Blackened height/m	乔木存活率 Survival rate of arbor/%	灌木存活率 Shrub survival rate/%
L1	轻度火干扰 Low	773	26	0.085	18.85±0.94	11.30±0.57	3.6×3.2	2.4	100.0	41.2
L2	轻度火干扰 Low	684	18	0.098	20.26±1.01	12.65±0.63	3.2×3.2	2.1	96.6	16.4
L3	轻度火干扰 Low	683	14	0.123	15.93±0.79	10.77±0.54	3.4×3.2	2.3	92.8	23.5
M1	中度火干扰 Moderate	840	27	0.133	19.43±0.97	12.81±0.64	3.0×3.0	6.4	71.8	21.6
M2	中度火干扰 Moderate	684	20	0.145	19.38±0.97	10.35±0.52	3.7×4.2	6.2	63.3	6.4
M3	中度火干扰 Moderate	882	14	0.075	17.43±0.87	11.74±0.59	3.2×3.1	5.8	69.1	21.2
H1	重度火干扰 High	822	25	0.133	19.97±1.01	12.16±0.61	3.4×3.1	9.9	25.1	0
H2	重度火干扰 High	683	25	0.073	15.04±0.75	9.68±0.48	2.6×2.5	8.8	3.9	0
H3	重度火干扰 High	867	20	0.173	14.98±0.74	8.59±0.43	4.0×3.8	8.2	24.6	0
	对照 Control check	814	17	0.133	23.72±1.12	11.71±0.59	3.8×3.5	0	100.0	100.0
	对照 Control check	675	15	0.098	21.14±1.06	12.08±0.61	4.8×4.7	0	100.0	100.0
	对照 Control check	845	11	0.123	20.33±1.02	11.22±0.56	4.4×4.2	0	100.0	100.0

## 2.2 样地可燃物消耗量调查

1) 乔木层可燃物载量。由于调查样地上发生的火干扰主要为地表火,部分地段有树冠火,且轻度火干扰迹地对乔木的干扰程度较低,因此仅针对中度和重度火干扰区域以及对照区分别选取样木,测定乔木层可燃物量的变化。在火干扰区域内按照标准样方内乔木的平均胸径和平均树高选择样木,分别在胸高1.3 m、树高1/2和3/4处截取树木圆盘,同时在对照区域内寻找胸径和树高接近的样木在相同位置截取圆盘,小心放入采样袋中,标记好带回实验室进行内业测定及分析。根据对照区与火干扰区标准木的各部分可燃物平均值变化,确定中度和重度火干扰后乔木层可燃物的消耗量(t/hm<sup>2</sup>)。

2) 灌木层可燃物载量。在标准样地内采用五点法划定灌木样方(3 m×3 m),在样方中选择3株

平均大小(地径与高度处于平均水平)的标准灌木,采用地上部分收获法分别收集树干、枝和叶,放入采样袋中。如果为丛生状灌木,则在样方内选取1~2丛平均地径的灌丛进行采集,称量,标记好带回实验室进行内业测定及分析。根据对照区与火干扰区域标准灌木的各部分可燃物平均值变化,确定火干扰后灌木层可燃物的消耗量(t/hm<sup>2</sup>)。

3) 林下凋落物及腐殖质载量。在每个灌木样方内按对角线选取小样方(1 m×1 m)调查林下凋落物情况,收集样方内所有凋落物及腐殖质,称鲜质量,并将样品装入采样袋,带回实验室测定含水率,用于计算凋落物单位面积干质量。实验室测定条件为85 °C连续烘干48 h至绝干质量,含水率

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:W为含水率,%;m<sub>1</sub>为干燥前试样质量,g;

$m_2$  为干燥后试样质量, g。

### 2.3 碳吸收损失量计算

研究利用缙云山观测站内的通量观测塔, 对 2022 年 8 月 21—25 日未受到火干扰的针阔叶混交林的净固碳速率进行结算, 结合火干扰迹地面积和

林木的死亡率来计算林火造成的碳吸收损失量。重庆缙云山通量塔位于观测站的针阔叶混交林内, 塔高 35 m, 配备的观测系统包括两个部分, 即开路式涡度相关监测系统和微气象观测系统, 具体的仪器布设详见表 2。

表 2 通量塔仪器布设表  
Tab. 2 Instrument layout of flux tower

观测系统 Observation system	仪器名称 Instrument name	型号 Model	生产商 Manufacturer	安装高度 Installation height/m	频率 Frequency/ Hz
开路式涡度相关监测 系统 Open circuit vorticity-cor- related monitoring system	开路式气体分析仪 Open circuit gas analyzer 三维超声风速仪 Three-dimension ultrasonic anemometer	Li - 7500 CAST - 3	LiCor Inc. , USA Campbell, USA	35 35	10 10
	数据采集器 Data collector	CR3000		35	10
	空气温湿度传感器 Air temperature and hu- midity sensor	HMP60	Vaisala, FIN	25 35	10
微气象观测系统 Micrometeorological obser- vation system	翻斗式雨量筒 Tipping bucket rain gauge 光合有效辐射传感器 Photosynthetically ac- tive radiation sensor 净辐射仪 Net radiometer 风速风向仪 Anemoclinograph	TR - 525M LI - 190SB NR01 03002	Texas Electronics, USA LiCor Inc. , USA Hukseflux, NED RM Young, CN	25 25 35 35	10 10 10 10

涡度相关法可以直接测定植物群落与大气之间的气体交换通量, 其原理是通过测定大气中湍流运动产生的风速脉动和物理量脉动的协方差来测定物质或能量的通量。

大气与植物群落之间的  $\text{CO}_2$  湍流通量<sup>[14]</sup>

$$F_c = \bar{\rho}' \bar{\omega}' \quad (2)$$

式中:  $F_c$  为  $\text{CO}_2$  的湍流通量,  $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\bar{\rho}'$  为  $\text{CO}_2$  密度脉动,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $\bar{\omega}'$  为垂直风速的脉动量,  $\text{m}/\text{s}$ 。

碳吸收损失量<sup>[15]</sup>

$$C_{\text{损}} = C_1 t V \quad (3)$$

式中:  $C_{\text{损}}$  为碳吸收损失量,  $\text{t}$ ;  $C_1$  为  $\text{CO}_2$  的吸收速率,  $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $t$  为林火持续时间,  $\text{d}$ ;  $V$  为样地面积,  $\text{km}^2$ 。

轻中度火干扰下的  $\text{CO}_2$  吸收速率由式(4)计算, 重度火干扰下由于未死亡的林木也基本丧失碳汇功能, 其  $\text{CO}_2$  吸收速率直接定义为:

$$C_1 = \bar{F}_c T_m \quad (4)$$

式中:  $\bar{F}_c$  为  $\text{CO}_2$  通量平均值,  $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $T_m$  为乔木死亡率, %。  $\text{CO}_2$  通量等数据由缙云山通量塔观数据获得, 在 EddyPro - 7.0.6 中进行原始数据处理, 采用 Vicker 提出的处理办法进行质量检测, 将野点及异常值进行剔除, 并进行坐标和通量校正。

### 2.4 林火释放碳量计算

通过火干扰面积和地面调查可燃物消耗量, 分别计算各可燃物类型在不同程度火干扰下消耗的可燃物量。利用 Seiler 提出的火灾损失生物量( $M$ )估算模型<sup>[16]</sup>:

$$M = ABE \quad (5)$$

式中:  $A$  为火干扰面积,  $\text{hm}^2$ ;  $B$  为生物量载量,  $\text{t}/\text{hm}^2$ ;  $E$  为燃烧效率。文中样地可燃物调查数据得到的是单位面积可燃物消耗量, 相当于式(5)中的( $BE$ ), 利用火干扰面积即可求得火灾损失生物量  $M$ 。假设所有被烧掉的可燃物生物质中的碳都转变为气体, 根据植物的含碳率(采用平均值 0.45)计算火灾燃烧造成的碳释放量<sup>[17]</sup>

$$M_e = 0.45 M \quad (6)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 样地可燃物单位面积消耗量

从表 3 可以看出, 火干扰对缙云山森林生态系统各组分都产生影响, 植被生物量降低, 表现为重度火干扰 > 中度火干扰 > 轻度火干扰。将 3 处样地调查数据平均计算后得出, 相同火干扰程度下消耗的可燃物量: 枯落物层 > 灌木层 > 乔木层, 其中轻度、中度和重度火干扰后针阔混交林枯落物层可燃物

量分别减少 8.77、12.67 和 19.89 t/hm<sup>2</sup>;灌木层分别减少 0.35、0.40 和 0.53 t/hm<sup>2</sup>;乔木层中度和重度火干扰后针阔混交林枯落物层可燃物量分别减少 0.09 和 0.18 t/hm<sup>2</sup>。由于此次火干扰以地表火为主,主要消耗枯落物层可燃物,所以火干扰后地面枯落物层可燃物量大幅度减少,灌木层和乔木层可燃物量略有降低,这是由于火干扰区域主要为针阔混交林,且干扰类型主要为地表火,地表枯落物由松针、松枝构成,油脂含量较大,更为易燃,进而导致枯落物层的损失量更大。综合火干扰消耗的各部分可燃物,得到不同火干扰强度平均消耗可燃物总量。其中,重度火干扰消耗的可燃物量最多,为 20.6 t/hm<sup>2</sup>,其次是中度火干扰,为 13.16 t/hm<sup>2</sup>,轻度火干扰消耗的可燃物量最少,为 9.12 t/hm<sup>2</sup>。

表 3 不同样地可燃物单位面积消耗量

Tab. 3 Consumption per unit area of different combustibles indifferent plot t/hm<sup>2</sup>

编号 No.	乔木层 Arbor layer	灌木层 Shrub layer	枯落物层 Litter layer	火干扰等级 Degree of fire disturbance
	L1	/	0.41	8.09
L2	/	0.30	9.29	I
L3	/	0.35	8.93	I
M1	0.13	0.38	12.09	II
M2	0.08	0.50	13.17	II
M3	0.06	0.31	12.76	II
H1	0.11	0.62	20.85	III
H2	0.26	0.52	18.25	III
H3	0.18	0.44	20.58	III

注:/指未在轻度火干扰区域进行乔木可燃物消耗量调查。Notes:  
/ refers to that no arbor combustible consumption survey has been conducted in areas with mild fire disturbance.

### 3.2 可燃物载量与林分特征关系

影响森林火灾发生和持续时间的主要因素包括气候、地形地貌和可燃物类型。其中,可燃物是林火燃烧的物质基础,林火发生时受地理环境因素的差异性、森林群落的复杂性和多样性、自然和人为干扰严重程度等因素的影响,森林中的可燃物载量通常呈现出显著的空间异质性。为进一步探究可燃物载量与其他林分调查因子之间的相关性问题,利用 SPSS 计算各层可燃物载量与平均胸径、坡度等林分调查因子的相关性。由表 4 可知,火干扰后各层可燃物载量与坡度呈正相关,与平均树高呈负相关;枯

落物层、乔木层与熏黑高度、坡向、乔木死亡率、海拔呈正相关,灌木层与其呈负相关;枯落物层、乔木层与平均胸径呈负相关,灌木层与其呈正相关。其中枯落物层、乔木层与熏黑高度、乔木死亡率呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与其他林分调查因子相关性不显著,表明针阔混交林在火干扰后,枯落物层、乔木层可燃物载量会随着熏黑高度和乔木死亡率的增加而增加;灌木层与熏黑高度、乔木死亡率呈显著负相关( $P < 0.05$ ),与林分调查因子相关性不显著,表明火干扰后灌木层可燃物载量随着熏黑高度和乔木死亡率的增加而减少。

表 4 可燃物载量与林分调查因子的相关性

Tab. 4 Correlation between combustible load and stand survey factors

林分调查因子 Stand survey factors	枯落物层 Litter layer	灌木层 Shrub layer	乔木层 Arbor layer
熏黑高度 Blackened height	0.944 **	-0.694 *	0.843 **
平均树高 Mean height	-0.456	-0.501	-0.512
平均胸径 Mean DBH	-0.326	0.545	-0.504
坡度 Slope	0.281	0.102	0.438
坡向 Aspect	0.622	-0.383	0.144
乔木死亡率 Arbor mortality	0.949 **	-0.762 *	0.918 **
海拔 Altitude	0.365	-0.095	0.171

注: \*\* 极显著相关( $P < 0.01$ ), \* 显著相关( $P < 0.05$ )。Notes:  
\*\* very significant correlation ( $P < 0.01$ ), and \* significant correlation ( $P < 0.05$ ).

### 3.3 碳吸收损失量及碳损失量估算

利用缙云山通量塔得到 2022 年 8 月 21—25 日未火烧地段针阔叶混交林平均固碳速率为 1.27 mg/(m<sup>2</sup>·s),图 2 为调查样地内火干扰下碳吸收损失量,表现为火未干扰(4.83 t/(km<sup>2</sup>·d))>轻度火干扰(4.66 t/(km<sup>2</sup>·d))>中度火干扰(3.29 t/(km<sup>2</sup>·d))>重度火干扰(0.86 t/(km<sup>2</sup>·d)),碳吸收损失量表现为随着火干扰程度的加重而逐渐减少的趋势;将未干扰(CK)的碳吸收损失量和火干扰后的碳吸收损失量进行对比发现:重度火干扰后造成的碳吸收损失量最大,为 3.97 t/(km<sup>2</sup>·d),中度火干扰后造成的碳吸收损失量次之,为 1.54 t/(km<sup>2</sup>·d),轻度火干扰后造成的碳吸收损失量最少,为 0.17 t/(km<sup>2</sup>·d),火干扰后造成的碳吸收损失总量为 5.68 t/(km<sup>2</sup>·d)。

本研究调查缙云山火干扰共设置样地 12 块,其中过火样地 9 块,总面积为 3 600 m<sup>2</sup>,综合不同火烈

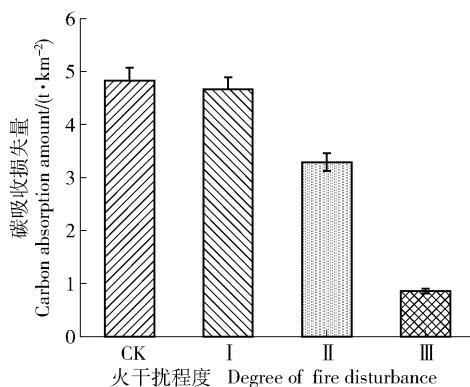


图2 不同火干扰程度下的碳吸收损失量

Fig. 2 Carbon absorption amount under different degree of fire disturbance

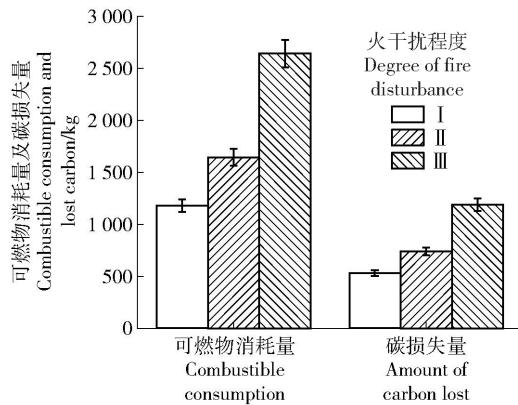


图3 可燃物消耗量及碳损失量

Fig. 3 Combustible consumption and lost carbon

度干扰下消耗林分不同可燃物的消耗量可知,调查样地内火干扰消耗的可燃物总量为5 468.66 kg(图3),其中轻度、中度和重度火干扰消耗的可燃物量分别为1 179.47、1 645.33和2 643.87 kg,即为重度火干扰>中度火干扰>轻度火干扰。样地内共燃烧损失2 460.90 kg 碳,其中轻度、中度和重度分别损失530.76、740.40 和1 189.74 kg 的碳,可以看出,此次缙云山山火燃烧损失的碳量主要由重度火干扰造成,占总释放碳量的48.34%。

## 4 讨论

### 4.1 可燃物消耗量

本研究通过生物量法对火干扰下的不同可燃物消耗量进行估算,发现相同火干扰程度下消耗的可燃物量:枯落物层>灌木层>乔木层,其中轻度、中度和重度火干扰后针阔混交林枯落物层可燃物量分别减少8.77、12.67 和19.89  $t/hm^2$ ;灌木层分别减少0.35、0.40 和0.53  $t/hm^2$ ;乔木层中度和重度火

干扰后针阔混交林枯落物层可燃物量分别减少0.09 和0.18  $t/hm^2$ 。王博等<sup>[18]</sup>发现轻度火干扰主要消耗地表层的枯枝落叶,而中度和重度火干扰下在烧掉大量地表枯落物的同时,会对灌木层和乔木层产生不同程度的破坏;刘剑钊等<sup>[19]</sup>发现森林在火干扰下造成不同的燃烧特征不仅与树种本身的生物学特性有关,还与其林下结构的可燃物量有关。此次火干扰区域主要树种为针叶树,且干扰类型主要为地表火,地表凋落物主要由松针、松枝构成,油脂含量较大,更为易燃,进而导致凋落物的损失量更大。

### 4.2 可燃物碳损失

随着火烈度的增加,乔木烧死率变高,轻中重3种火烈度火干扰迹地树干熏黑比分别为19.7%、55.3% 和82.0%,乔木死亡率分别为3.5%、31.9% 和89.7%。这与罗碧珍<sup>[20]</sup>对广东省火干扰对森林生态系统碳库的影响研究结果相似,说明火干扰对森林生态系统有显著的影响。根据实地踏查结果,火干扰区域内优势树种为马尾松,且以马尾松和杉木为主的针叶林受火干扰的影响最大,针叶树种在林分中所占比例越高,火烈度越高,部分阔叶林即使在重度火干扰内部,也未受到林火影响或仅受到轻微地表火影响,因此阔叶树种可以作为防火树种,在后续植被恢复中应优先考虑。

本研究基于涡相关技术对不同程度火干扰下碳吸收量进行估算,发现碳吸收损失量表现为:林火未干扰>轻度火干扰>中度火干扰>重度火干扰,火干扰后造成的碳吸收损失总量为 $5.68 t/(km^2 \cdot d)$ 。通过生物量法对火干扰后的森林碳损失进行估算,得出缙云山森林生态系统共燃烧损失2 460.90 kg 碳,其中轻度、中度和重度分别损失530.76、740.40 和1 189.74 kg 的碳。魏书精等<sup>[21]</sup>发现大兴安岭北方林1965—2010年46年间的碳排放量为3 122 万4 793.69 t,年均排放量为67.9万t。洪娇娇等<sup>[22]</sup>不同强度火干扰下森林植被碳储量有所差异;辛颖等<sup>[23]</sup>指出重度火干扰后,人工恢复林分的植被碳库和碳汇能力高于天然恢复林分;胡海清等<sup>[24]</sup>发现火干扰强度显著影响乔木和草本碳密度,但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。在不同程度的火干扰下森林碳损失存在差异,主要是由于不同火干扰影响森林的程度不同,轻度火干扰主要影响地表可燃物,对乔木的影响较小,而中度和重度火干扰下在剧烈影响地表可燃物的同时,还会对乔木层产生影响。综上表明,林火导致的

森林碳汇损失量受影响因素主要包括林火次数、火干扰等级、单位面积林地蓄积量及林区所在区域的水热条件、植被类型等。由森林类型的多样性以及森林对火干扰响应过程的复杂性<sup>[25]</sup>，存在森林碳库对火干扰的不同动态响应变化，且这一过程还受研究地区、研究方法、生态系统类型等因素的影响。因此，未来需全面比较不同火干扰类型对不同地区、不同森林生态系统的碳循环及其碳素再分配过程的影响。

此次缙云山山火中，消耗的可燃物主要是由针叶树种提供，林火对于阔叶树种的影响较小，因而为了提升森林碳汇效应，应提倡种植阔叶树作为南方重要防火树种，既达到森林防火的目的，又提高森林碳汇，从而达到防火效应与生态效益的有机统一，实现林业可持续发展，促进生态建设。

## 5 结论

1) 相同火干扰程度下消耗的可燃物量表现为枯落物层( $41.33 \text{ t}/\text{hm}^2$ )>灌木层( $1.28 \text{ t}/\text{hm}^2$ )>乔木层( $0.27 \text{ t}/\text{hm}^2$ )，缙云山马尾松针阔混交林地表分布有大量的可燃物，导致燃烧物以枯落物及上层腐殖质为主；森林各部分可燃物的消耗量随着火干扰程度的增加而增加。

2) 针阔混交林枯落物层及乔木层可燃物载量主要随着熏黑高度和乔木死亡率的增加而增加；灌木层可燃物载量主要随着熏黑高度和乔木死亡率的增加而减少。

3) 不同程度火干扰下森林植被碳损失量有所差异，缙云山马尾松针阔混交林样地内碳损失量主要由重度火干扰提供，火干扰后造成的碳吸收损失总量为  $5.68 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{d})$ 。

## 6 参考文献

- [1] ROMANOV A, LEKSEY A, TAMAROVSKAYA A N, et al. Reassessment of carbon emissions from fires and a new estimate of net carbon uptake in Russian forests in 2001–2021[J]. *Science of the Total Environment*. 2022, 846: 157322.
- [2] QIN Yuanwei, XIAO Xiangming, WIGNERON J P, et al. Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(5):442.
- [3] MACK M C, WALLKER X J, JOHNSTONE J F, et al. Carbon loss from boreal forest wildfires offset by increased dominance of deciduous trees [J]. *Science*, 2021, 372(6539):280.
- [4] VOLKOVA L, PAUL K I, ROXBURGH S H, et al. Tree mortality and carbon emission as a function of wildfire severity in south-eastern Australian temperate forests [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 853: 158705.
- [5] KURBANOV E, VOROBEV O, LEZHNIN S , et al. Remote sensing of forest burnt Area, burn severity, and post-fire recovery: A review[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19):4714.
- [6] FERNANDEZ C. Carbon loss in sediments and sequestration in vegetation after wildfire and mulching in a high-severity burned area in NW Spain[J]. *Journal of Sustainable Forestry*, 2022, 87:1.
- [7] PALM E C, SUITOR M J, JOLY K, et al. Increasing fire frequency and severity will increase habitat loss for a boreal forest indicator species [J]. *Ecological Applications*, 2022, 32(3):2549.
- [8] YANG Yuanhe, SHI Yue, SUN Wenjuan, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. *Science China Life Sciences*, 2022, 65:861.
- [9] LYU Lin, SHEN Jianjun. The potential carbon losses estimation with remote sensing-based data: Case study in Nova Vida Ranch, Rondonia, Brazil. [J] *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022, 43:1235.
- [10] AWUAH J, SMITH S W, SPEED J D M, et al. Can seasonal fire management reduce the risk of carbon loss from wildfires in a protected Guinea savanna? [J] *Ecosphere*, 2022, 13:4283.
- [11] 单保君, 张治军, 王秋华, 等. 1996—2013年火灾对中国森林碳汇损失估算的研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2017, 37(6):156.
- [12] SHAN Baojun, ZHANG Zhijun, WANG Qiuhsua, et al. Estimation of forest carbon sinks loss caused by fire in China during 1996–2013[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Science)*, 2017, 37(6):156.
- [13] 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.
- [14] HU Haiqing, LUO Buzhen, WEI Shujing, et al. Estimation of carbonaceous gases emission from forest fires in Xiaoxing'an Mountains of Northeast China in 1953–2011[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(11):3065.
- [15] 王洪斌. 森林火灾对土壤物理性质的影响[J]. 林业科技情报, 2002, 1(3):84.
- [16] WANG Hongbin. Effect of forest fire on physical property

- of soil [J]. Forestry Science and Technology Information, 2002, 1(3):84.
- [14] BUSINGER J A, ONCLEY S P. Flux measurement with conditional sampling [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990, 7(2):349.
- [15] CHO S, KANG M, et al. Evaluation of forest carbon uptake in South Korea using the national flux tower network, remote sensing, and data-driven technology [J]. Agricultural and Forest Meteorology. 2021, 311:34.
- [16] SEILER W, CRUTZEN P J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning [J]. Climate Change, 1980, 2:207.
- [17] WOLFGANG S, PAUL J. C. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning [J]. Climatic Change, 1980, 2: 207.
- [18] 王博, 韩树文, 顾泽, 等. 不同烈度林火对油松林潜在地表火行为的影响 [J/OL]. 生态学报, 2023, 14(5):1.  
WANG Bo, HAN Shuwen, GU Ze, et al. Effects of wild-fire of different severities on potential surface fire behavior of *Pinus tabuliformis* forest [J/OL]. Journal of Ecology, 2023, 14 (5):1.
- [19] 刘剑钊. 闽北4种林分特征及其林下可燃物载量研究 [J]. 林业勘查设计, 2022, 51(5):8.  
LIU Jianzhao. Study on the characteristics of four stand types in northern Fujian and their understory combustible matter load [J]. Forestry Exploration and Design, 2022, 51(5): 8.
- [20] 罗碧珍. 林火干扰对广东省亚热带森林生态系统碳库的影响研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020:115.  
LUO Bizhen. Effects of forest fire disturbance on carbon pools of subtropical forest ecosystem in Guangdong prov-
- ince, China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020:115.
- [21] 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, 2013:87.  
WEI Shujing. Quantitative evaluation methods of carbon emissions from forest fires in Heilongjiang province, China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013:87.
- [22] 洪娇娇, 陈宏伟, 齐淑艳, 等. 火干扰强度对大兴安岭森林地上植被碳储量的影响 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(8):2481.  
HONG Jiaojiao, CHEN Hongwei, QI Shuyan, et al. Effect of fire severity on carbon storage of aboveground vegetation in Great Xing'an Mountains, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8):2481.
- [23] 辛颖, 邹梦玲, 赵雨森. 大兴安岭火烧迹地不同恢复方式碳储量差异 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (11): 3443.  
XIN Ying, ZOU Mengling, ZHAO Yusen. Difference between carbon storage of burned area under different restorations in Greater Xing'an Mountains, Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3443.
- [24] 胡海清, 罗生, 罗碧珍, 等. 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 [J]. 林业科学研究, 2020, 33(1):19.  
HU Haiqing, LUO Sisheng, LUO Bizhen, et al. Effect of forest fire disturbance on biological carbon density of two typical coniferous forests in Guangdong province, China [J]. Forest Research, 2020, 33(1):19.
- [25] TUBIELLO F N, CONCHEDDA G, WANNER N, et al. Carbon emissions and removals from forests: New estimates, 1990 – 2020 [J]. Earth System Science Data. 2021, 13: 1681.