

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.03.012

不同演替阶段马尾松林地表可燃物 负荷量及其影响因子

张秀芳¹, 何东进^{1,2}, 李颖¹, 严思晓¹, 游巍斌^{1*}

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学金山学院, 福建 福州 350002)

摘要: [目的] 分析马尾松林不同演替阶段负荷量的变化特征, 确定影响地表可燃物负荷量的关键因子。[方法] 以武夷山国家公园中不同龄级马尾松纯林为研究对象, 采用空间替代时间方法, 分析马尾松林演替发展中不同类型地表可燃物的负荷量特征及其与地形、林分、气象等影响因子的关系。[结果] 显示: (1) 随着马尾松林的演替, 地表活可燃物负荷量呈递减趋势, 地表死可燃物和地表总可燃物负荷量则呈递增趋势; 且总可燃物负荷量主要是由于 1 h 时滞细小可燃物的负荷量构成。(2) 演替初期形成的马尾松幼龄林和后期的成熟林差异最为明显, 至演替后期活地表可燃物下降了 47.21%; 死地表可燃物增加了 113%。(3) RDA 排序结果表明地形因子中的海拔、坡位, 林分因子中的平均枝下高、平均胸径、郁闭度及气象因子中的空气温度与地表可燃物负荷量关系密切。(4) 线性回归分析发现影响不同类型地表可燃物的环境因子不尽相同; 平均胸径对灌木负荷量影响最大; 坡位对草本、1 h 时滞负荷量影响最大; 平均枝下高对 10 h 时滞和总可燃物负荷量影响最大。[结论] 不同演替阶段的马尾松林地表可燃物的负荷量不同, 不同类型地表可燃物的影响因子不同。

关键词: 可燃物负荷量; 环境因子; 冗余分析; 逐步线性回归分析; 马尾松林; 武夷山国家公园

中图分类号: S 762

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)03-0108-10

地表可燃物负荷量直接影响火灾发生的潜在风险强度以及引发由地表火向树冠火蔓延的难易程度^[1], 因此, 深入研究地表可燃物负荷量及其影响因子, 可为森林可燃物管理, 降低森林火险等级提供科学依据。国外最早开始可燃物负荷量的研究, 仅对单一类型的森林可燃物负荷量进行粗放式的探索^[2-3]。20 世纪 60 年代以后, 美国的研究人员开始利用林分因子建立数学模型进行可燃物负荷量的估测。如 Wendel^[4] 发现通过胸径可以估算出树冠可燃物的载量; Brender^[5] 等认为通过胸高断面面积可以估算火炬松 (*Pinus taeda* Linn.) 人工林地被可燃物载量; Ryu 等^[6] 提出通过计划火烧减少可燃物负荷量从而降低火灾风险。国内关于可燃物负荷量研究开始于 20 世纪末, 其研究对象主要集中在东北林区的兴安落叶松林 (*Larix gmelinii* (Rupr.)

Kuzen.)、白桦林 (*Betula platyphylla* Suk.)、红松林 (*Pinus koraiensis* Siebold et Zuccarini), 天山云杉林 (*Picea asperata* Mast.), 滇东北地区的云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.) 以及北京等各大林场等。邸学颖等^[7] 和周润清等^[8] 相继建立大兴安岭兴安落叶松林 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) 的可燃物负荷量模型, 并分析与林分因子的关系; 梁瀛等^[9] 应用相关分析分析了天山中部云杉林地表可燃物负荷量与地形林分因子的相关关系; 徐伟恒等^[10] 对滇东北地区的华山松 (*Pinus armandii* Franch.) 和云南松的地表凋落物的负荷量和火强度进行对比研究; 艾也博等^[11] 应用相关分析和逐步回归分析来分析北京松山自然保护区油松林 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 地表可燃物负荷量与地形、林分和地被物因子的关系。虽然国内对地表可燃物负荷量进行了多

收稿日期: 2020-07-15 修回日期: 2020-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41301203)、福建农林大学林学高峰学科建设项目 (712018007)

* 通讯作者: 游巍斌, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 森林生态学与景观生态学. Email: weibinyou@fafu.edu.cn

方面研究,但目前有关不同演替阶段林分对地表可燃物负荷量的研究相对较少,而且先前研究结果观点不一,其中李成杰^[12]对宽甸地区主要林型地表可燃物负荷量进行初步研究,发现地表可燃物负荷量与演替阶段呈负相关;周绪佳等^[13]对南京市老山国家森林公园和丁山的马尾松林(*Pinus massoniana* Lamb.)地表可燃物负荷量进行研究,发现马尾松林演替阶段与各类地表可燃物载量均呈正相关;而周润清等^[8]和赵雪崑等^[14]则认为地表可燃物负荷量与演替阶段关系不大,可见,林分演替阶段与地表可燃物负荷量的研究还需进一步深入。

武夷山国家公园体制试点区是中国唯一一个既是世界人与生物圈保护区,又是世界文化与自然双遗产的保护地。根据《武夷山国家公园总体规划》,该区林地面积 956.35 km²,占该公园土地总面积的 95.5%。其中,28.6%的林地优势树种为马尾松。该区历史上尚未发生重大森林火灾,其林下积累了大量地表可燃物,再加上林地优势树种马尾松林的枝叶、树干含有大量挥发性的松脂,抗火性能差^[15],这些都无疑加大了该地发生森林火灾的风险。鉴于此,本研究选择武夷山国家公园不同演替阶段的马尾松林为研究对象,分析马尾松林不同演替阶段负荷量的变化特征,并采用冗余分析和逐步线性回归分析来探讨马尾松林地地表可燃物负荷量与环境因子的关系,确定影响地表可燃物负荷量的关键因子,以期科学管理武夷山国家公园地表可燃物,降低森林火灾强度提供科学依据。

1 研究区概况

武夷山国家公园北与江西省交界,南至建阳区黄坑镇,西至光泽县崇仁乡,东至武夷山市武夷街道,地理坐标为 117°24'13"~117°59'19" E, 27°31'20"~27°55'49" N,包括福建武夷山国家级自然保护区、武夷山国家级风景名胜区、九曲溪上游保护地带、光泽武夷天池国家森林公园及周边公益林、邵武市国有林场龙湖场部分区域,总面积 1001.41 km²。武夷山国家公园属中亚热带季风气候型,四季温和湿润,年平均气温约 17~19℃,1月均温 6~9℃,7月均温 28~29℃,年降水量在 2 000 mm 以上,全年降水丰沛且雾日较多;地貌类型自西向东分别属于中山、中低山和丘陵地貌区;主要植被类型以亚热带常绿阔叶林为主,公园内植被类型丰富,其主要优势树种为马尾松林、毛竹(*Phyllostachys edulis*

(Carr.) H.de Lehaie)林、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)林等^[16],是我国亚热带东部地区森林植被保存最完好的区域。

2 材料与方法

2.1 野外调查与采样

在武夷山国家公园东部的武夷山风景名胜区内进行样地调查,该区内马尾松次生林分布面积广,不同年龄组马尾松林占马尾松林总面积比例如下:幼龄林(树龄 1~20 a)约占 10%、中龄林(树龄 21~40 a)约占 21%、近成熟林(树龄 41~50 a)约占 28%、成熟林(树龄在 51~70 a)和过熟林(树龄 ≥ 71 a)约占 41%(由于过熟林在研究区面积积极小,本次调查不对过熟林进行调查)^[17]。通过空间替代时间方法(即在立地条件一致或相近的条件下,在一定的空间尺度内,以不同地点选取的不同林龄的马尾松林来代替同一生长地点上生长的不同林龄的马尾松林地),进一步探究马尾松不同演替阶段森林地表可燃物负荷量特征差异。本研究沿用课题组前期不同龄级马尾松林的划分方法,将马尾松林细分为马尾松幼龄林(I)、马尾松中龄林(II)、马尾松近成熟林(III)和马尾松成熟林(IV)4个演替阶段。

于冬季防火期,持续 7 d 晴天后进行野外采样,采样期间天气晴朗。分别在不同演替阶段马尾松林里设置 2~4 块 20 m × 20 m 的标准样地。在每一块标准样地的一条对角线上的 7、14 和 21 m 处分别设置 1 m × 1 m 小样方 3 块,在另一条对角线上的 7 m、21 m 处设置同样的小样方各 1 块,每个标准样地共设置 5 块小样方。在各小样方内,分别对地表活可燃物(灌木,草本)和死可燃物(1 h 时滞,10 h 时滞)的负荷量进行调查。具体方法如下:地表活可燃物采取刈割法进行收集,收割各小样方的灌木和草本,分别装入标记好的自封袋并称其鲜质量;地表死可燃物采用收获法进行收集,在各小样方内用纸袋按 1 h 时滞($d \leq 0.64$ cm)和 10 h 时滞(0.64 cm $< d \leq 2.54$ cm)的划分标准^[18]对枯枝分别采集并称其鲜质量(实际调查中,由于 100 h 时滞(2.54 cm $< d \leq 7.62$ cm)和 1000 h 时滞($d > 7.62$ cm)的可燃物在研究区样地中数量极少,故本研究不对其进行分析)。同时,选择一天中气温最高的时间段,使用数显温湿度计(TY-9700)和数字照度计(TES-1332A)测定小样方上

方约 1.5 m 处的空气温度、湿度及其光照强度（每天 14:00 前后半小时，每隔 10 min 测定 1 次，连续观测 5 d）；用土壤水分温度测量仪（TZS-IIW）测定土壤表层 0~10 cm 处的土壤温度和湿度。此

外，对样地木本植物进行每木检尺（起测直径 ≥ 2.5 cm），记录树种组成、胸径、树高、枝下高和郁闭度等林分因子，并记录样地的海拔、坡度、坡向等地形因子（样地基本概况见表 1）。

表 1 不同演替阶段马尾松林分的基本概况

Table 1 Basic features of *Pinus massoniana* stands in different succession stages

演替阶段 Succession stage	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	坡位 Slope position	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average height/m	平均枝下高 Average branch-free bole height/m	郁闭度 Canopy cover
I	190	35	4	3	6.48	7.3	5.1	0.9
I	200	22	6	3	6.27	5.7	4.1	0.9
I	185	12	8	3	5.79	6.2	3.2	0.8
II	210	28	7	3	13.8	11.0	7.6	0.4
II	190	20	2	2	21.25	15.0	6.6	0.3
III	200	41	7	2	19.11	18.9	14.2	0.8
III	210	41	3	1	11.24	11.6	8.6	0.5
III	212	40	3	1	10.11	9.4	6.6	0.5
IV	280	37	6	3	23.53	20.3	16.0	0.4
IV	250	37	6	2	28.75	25.1	20.0	0.6
IV	260	22	3	2	20.15	16.9	13.9	0.6
IV	340	22	3	2	24.88	23.1	18.3	0.7

注：I：马尾松幼龄林；II：马尾松中龄林；III：马尾松近成熟林；IV：马尾松成熟林。坡向是以朝东为起点(0°)顺时针旋转的角度表示。坡向1：北坡（247.5°~292.5°）；2：东北坡（292.5°~337.5°）；3：西北坡（202.5°~247.5°）；4：东坡（337.5°~22.5°）；5：西坡（167.5°~202.5°）；6：东南坡（22.5°~67.5°）；7：西南坡（112.5°~167.5°）；8：南坡（67.5°~112.5°）。坡位数据1：上坡位；2：中坡位；3：下坡位。

Notes: I: Young *Pinus massoniana* forest; II: Middle aged *P. massoniana* forest; III: Near-mature *P. massoniana* forest; IV: Mature *P. massoniana* forest. The aspect is based on the east as starting point 0°, and expressed by clockwise rotation angle. Aspect 1: North slope(247.5°~292.5°); 2: Northeast slope (292.5°~337.5°); 3: Northwest slope(202.5°~247.5°); 4: East slope(337.5°~22.5°); 5: West slope(167.5°~202.5°); 6: Southeastern slope(22.5°~67.5°); 7: Southwest slope(112.5°~167.5°); 8: South slope (67.5°~112.5°). Slope position data 1: top of slope; 2: middle of slope; 3: bottom of slope.

2.2 地表可燃物负荷量的测定与计算

将野外采集的样品放入 80℃ 的烘箱内连续烘干至恒质量，称量可燃物样品的绝干质量。

可燃物负荷量是指单位面积上的绝干质量^[19]，计算公式为：

$$W_F = \frac{W_S}{S}$$

式中： W_F 为可燃物的负荷量； W_S 为样方内可燃物的绝干质量（kg）； S 为样方面积（m²）。

2.3 数据处理

采用 Excel2010、Canoco4.5 和 SPSS25.0 软件进行数据处理和分析的。其中，马尾松不同演替阶段地表可燃物负荷量特征采用 SPSS25.0 软件的单因素方差和 LSD 多重比较法进行分析；地表可燃物负荷量与影响因子的关系分别采用 Canoco4.5 软件进行多元统计分析和 SPSS25.0 软件进行逐步线

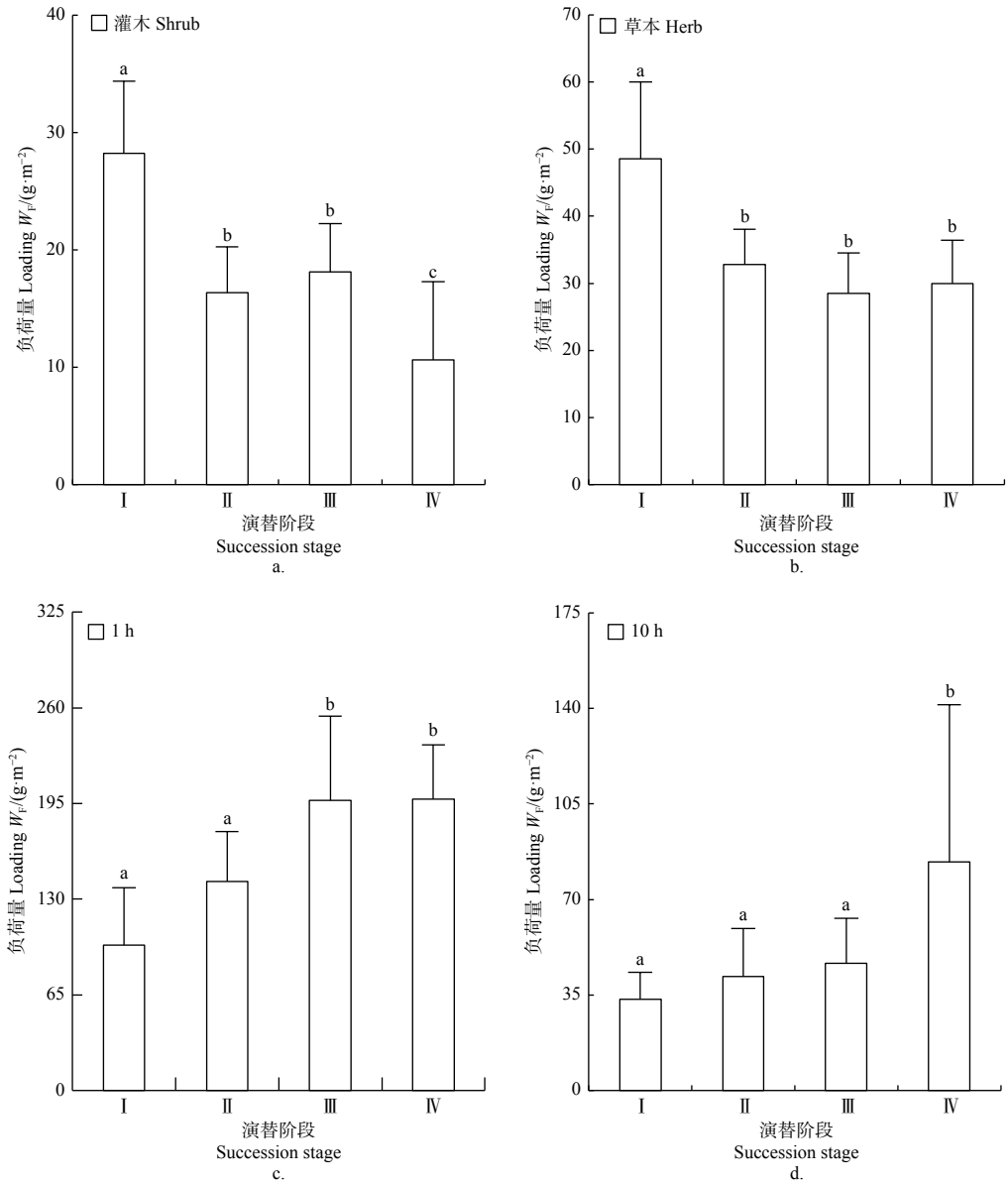
性回归分析并制图。

为确定 Canoco4.5 中采用的多元统计方法首先对地表可燃物负荷量进行去趋势化分析（DCA），Lengths of gradient 的前 4 个轴中最大的值为 0.632 < 3，故采用冗余分析方法（RDA）分析可燃物负荷量与环境因子的关系（此处去趋势化分析后，再选择冗余分析的方法是因为采用此方法在降维之后，其数据信息损失较少，数据发生的畸变最小）。

3 结果与分析

3.1 马尾松林不同演替阶段地表可燃物负荷量特征

不同演替阶段地表可燃物的负荷量不同。随着马尾松林的演替，活可燃物（灌木，草本）负荷量逐渐减少；死可燃物（1 h 时滞，10 h 时滞）负荷量逐渐增多（见图 1）。具体表现为演替初期形成的幼龄林与演替后期的成熟林差异明显，到了演替



注: 不同小写字母表示不同演替阶段地表可燃物负荷量存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同。

Notes: Different lowercase letters indicate that there are significant differences in surface fuel load at different succession stages. $P < 0.05$, and the same is as follows.

图1 马尾松林不同演替阶段地表可燃物负荷量特征

Fig. 1 Characteristics of surface fuel load in different succession stages of *Pinus massoniana* forest

后期活地表可燃物下降了 47.21%, 死地表可燃物增加了 113%。

在灌木中, 马尾松中龄林与近成熟林二者之间无显著差异, 而二者与幼龄林、成熟林之间存在显著差异 (图 1a)。在草本中, 马尾松幼龄林与中龄林、近成熟林和成熟林之间存在显著差异, 而其余三者差异不显著 (图 1b)。在 1 h 时滞中, 幼龄林与中龄林之间无显著差异, 近成熟林与成熟林之间无显著差异 (图 1c)。在 10 h 时滞中, 马尾松成

熟林负荷量最高, 且与幼龄林、中龄林和近成熟林之间均存在显著差异, 而其余三者之间差异不显著 (图 1d)。

活可燃物 (灌木、草本) 负荷量所占的比例总体比死可燃物 (1 h 时滞, 10 h 时滞) 的负荷量少 (图 2a)。其中, 1 h 时滞的地表可燃物负荷量明显高于其他类型可燃物负荷量; 灌木的可燃物负荷量明显低于其他类型可燃物负荷量。随着马尾松林的演替, 总可燃物负荷量逐渐增多 (图 2b), 其

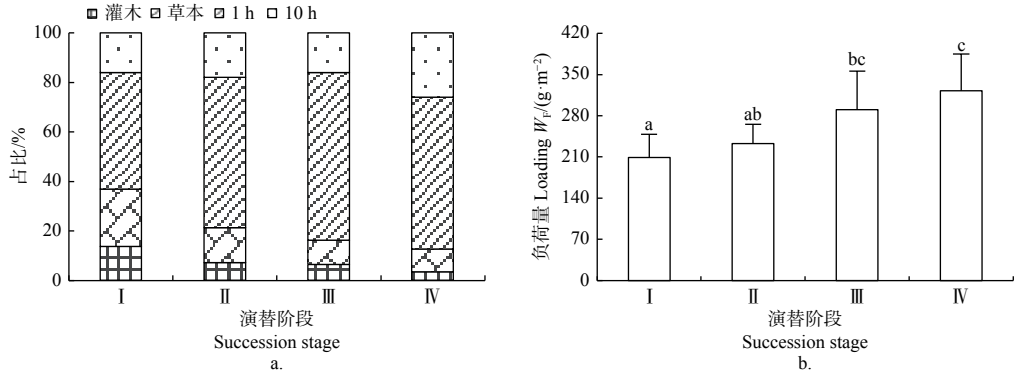


图 2 马尾松林不同演替阶段地表可燃物负荷量占比及总负荷量变化

Fig. 2 The proportion of surface fuel load and the change of total fuel load in different succession stages of *Pinus massoniana* forest

中, 幼龄林与近成熟林和成熟林之间存在显著差异, 中龄林与幼龄林和近成熟林之间无差异, 近成熟林与成熟林之间无差异。

3.2 马尾松林地表可燃物负荷量与环境因子的关系

分别以地形因子、林分因子、气象和土壤因子为解释变量 (虚线), 以不同类型的地表可燃物负荷量为响应变量 (实线), 通过线性约束性 RDA 排序, 分析地表可燃物负荷量与环境因子的响应关系。对地形因子、林分因子、气象和土壤因子进行

解释变量的前向选择, 剔除不显著的环境因子, 筛选显著的环境因子作为解释变量 ($p < 0.05$)。地形因子选择坡位, 海拔这 2 个因子作为解释变量, 累计解释量为 40%, 其中坡位的影响最大, 其次是海拔; 林分因子选择平均枝下高, 平均胸径, 郁闭度 3 个因子作为解释变量, 累计解释量为 46%, 其中平均枝下高的影响最大, 其次是平均胸径和郁闭度; 气象和土壤因子选择空气温度作为解释变量, 累计解释量为 20% (表 2)。

表 2 环境变量在 RDA 分析中的前瞻性选择结果

Table 2 Result of environmental variables from the forward selection of RDA analysis

因子 Factors	环境因子 Environmental factor	显著性 Significance	F	解释量 Explained variation/%
地形因子 Topographical factors	坡位 Slope position	0.002	10.96	24
	海拔 Elevation	0.004	7.72	16
	坡向 Aspect	0.050	4.19	6
	坡度 Slope	0.884	0.15	1
林分因子 Stand factors	平均枝下高 Average branch-free bole height	0.002	11.74	26
	平均胸径 Average DBH	0.014	5.90	11
	郁闭度 Canopy cover	0.012	5.00	9
	平均树高 Average height	0.202	1.63	2
气象和土壤因子 Meteorological and soil factors	空气温度 Air temperature	0.004	7.55	20
	土壤温度 Soil temperature	0.051	2.83	5
	土壤湿度 Soil humidity	0.294	1.17	3
	空气湿度 Air humidity	0.282	1.23	2
	光照 Illumination	0.805	0.21	1

注: 加粗字体表示地表可燃物负荷量与其环境因子存在显著差异 ($p < 0.05$)

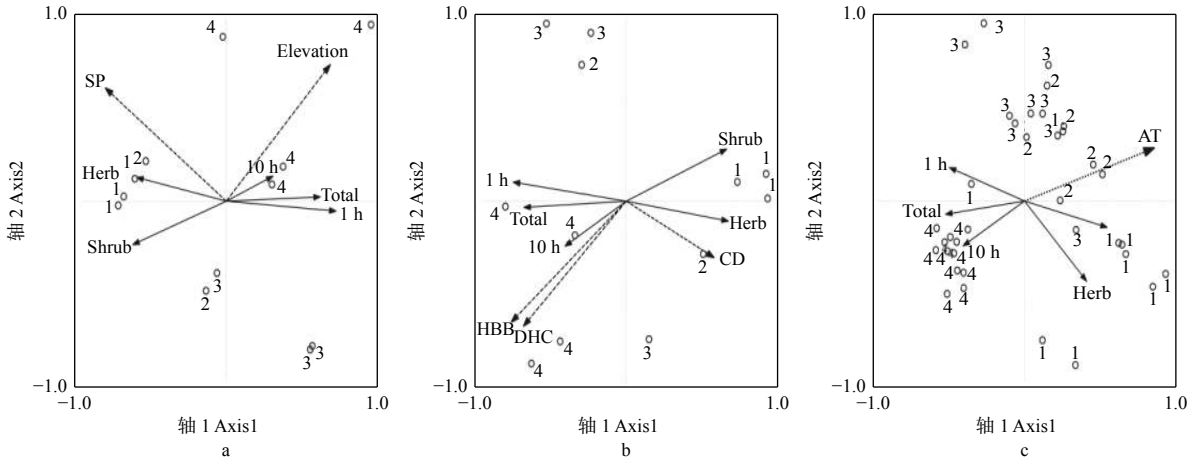
Notes: Bold font indicates that there is significant difference between surface fuel load and environmental factors ($p < 0.05$).

在地表可燃物负荷量与地形因子关系中, 坡位与地表活可燃物负荷量 (灌木, 草本) 呈正相关,

与地表死可燃物负荷量 (1 h 时滞, 10 h 时滞) 和总可燃物负荷量呈负相关; 海拔与地表死可燃物负

荷量(1 h时滞, 10 h时滞)和总可燃物负荷量呈正相关, 与地表活可燃物负荷量(灌木, 草本)呈负相关(图3a)。在地表可燃物负荷量与林分因子关系中, 平均枝下高和平均胸径均与地表死可燃物(1 h时滞, 10 h时滞)和总可燃物负荷量呈正相关, 与地表活可燃物(灌木, 草本)呈负相关;

郁闭度与地表活可燃物负荷量(灌木, 草本)呈正相关, 与地表死可燃物负荷量(1 h时滞, 10 h时滞)和总可燃物负荷量呈负相关(图3b)。在地表可燃物负荷量与气象因子的关系中, 空气温度与地表活可燃物负荷量呈正相关, 与地表死可燃物和总可燃物负荷量呈负相关(图3c)。



注: SP: 坡位; Elevation: 海拔; HBB: 平均枝下高; DHC: 平均胸径; CD: 郁闭度; AT: 空气温度

Notes: SP: Slope position; HBB: average branch-free bole height; DHC: Average DBH; CD: Canopy cover; AT: Air temperature

图3 地表可燃物负荷量与环境因子的RDA排序

Fig. 3 RDA ordination diagram of loading of surface fuel and environmental factors

3.3 不同类型地表可燃物负荷量与环境因子的回归分析

为进一步分析综合环境因子分别对各类型地表可燃物负荷量的影响, 本研究采用线性回归方程方法剔除不显著的环境因子, 选择对各类型地表可燃物负荷量影响最显著的环境因子来建立线性回归模型。不同类型的地表可燃物, 其影响因子各不相同(表3)。具体表现为灌木负荷量与平均胸径呈显著负相关; 草本的负荷量与坡位呈显著正相关, 与

光照呈显著负相关; 1 h时滞负荷量与坡位和郁闭度呈显著负相关, 与海拔和坡向呈显著正相关; 10 h时滞负荷量与平均枝下高呈显著正相关; 总可燃物负荷量与平均枝下高呈显著正相关, 与坡位呈显著负相关。在草本负荷量中, 坡位的标准化回归系数绝对值(0.707)大于光照的标准化回归系数绝对值(0.451), 表明影响草本负荷量的环境因子主要是坡位因子, 其次是光照; 影响1 h时滞负荷量的主要影响因子是坡位, 其次是坡向 > 海拔 > 郁

表3 不同类型地表可燃物负荷量与环境因子的逐步线性回归分析结果

Table 3 Stepwise linear regression analysis of fuel load and environmental factors in *Pinus massoniana*

地表可燃物负荷量类型 Surface fuel load category	回归方程 Regression equation	标准化回归系数 Standardized regression coefficient	R^2	F	P
灌木 Shrub	$Y_1 = 30.413 - 0.788X_7$	$B_{X1} = -0.708$	0.501**	34.088	<0.001
草本 Herb	$Y_2 = 17.946 + 10.701X_2 - 0.11X_3$	$B_{X2} = 0.707$ $B_{X3} = -0.451$	0.474**	14.878	<0.001
1 h时滞	$Y_3 = 158.882 - 60.91X_2 + 0.585X_4 + 14.930X_5 - 1.005X_6$	$B_{X2} = -0.747$ $B_{X4} = 0.444$ $B_{X5} = 0.495$ $B_{X6} = -0.341$	0.711**	19.055	<0.001
10 h时滞	$Y_4 = 21.16 + 3.264X_7$	$B_{X7} = 0.457$	0.209**	8.974	0.005
总可燃物负荷量 Total	$Y_5 = 295.636 + 5.624X_7 - 36.757X_2$	$B_{X7} = 0.451$ $B_{X2} = -0.382$	0.422**	12.047	<0.001

注: X_1 : 平均胸径; X_2 : 坡位; X_3 : 光照; X_4 : 海拔; X_5 : 坡向; X_6 : 郁闭度; X_7 : 平均枝下高。

Notes: X_1 : Average DBH; X_2 : Slope position; X_3 : Illumination; X_4 : Elevation; X_5 : Aspect; X_6 : Canopy cover; X_7 : Average branch-free bole height

闭度；在总可燃物负荷量中，平均枝下高的标准化回归系数的绝对值（0.451）大于坡位的标准化回归系数的绝对值（0.382），表明影响总可燃物负荷量的环境因子主要是平均枝下高，其次是坡位。因此平均胸径对灌木负荷量影响最大，坡位对草本、1 h时滞负荷量影响最大，平均枝下高对10 h时滞和总可燃物负荷量影响最大。

4 讨论

4.1 马尾松林不同演替阶段地表可燃物负荷量特征

活可燃物（灌木，草本）负荷量表现为随着马尾松林的演替，负荷量呈递减趋势。这与李成杰^[12]的宽甸地区主要林型地表可燃物载量与林龄关系的研究结果一致。其主要原因可能是随着马尾松的演替，其林龄的增加，林分的郁闭度增大，树冠相互遮阴，林下草本灌木所需的光照条件无法满足，不利于林下草本灌木的生长^[20]，因此活可燃物（灌木可燃物、草本可燃物）负荷量逐渐减少。死可燃物（1 h时滞，10 h时滞）负荷量表现为随着马尾松林的演替，负荷量呈增加的趋势。其原因可能是随林龄的增加，马尾松林分的冠幅增大，加大了枯枝落叶的掉落量；另外，本研究区马尾松演替后期的样地多处于坡位高，坡度陡，风速大的地段，水分容易散失，温度相对较低，而低温干燥的环境不利于细菌的繁殖，从而枯枝落叶分解速度慢，故死可燃物（1 h时滞、10 h时滞）负荷量逐渐增加^[21]。总可燃物负荷量随着马尾松林的演替过程负荷量逐渐增多；而总可燃物负荷量主要是由1 h时滞细小可燃物负荷量起主导作用，其负荷量明显高于其他类型。1 h时滞的可燃物负荷量一定程度上可表征燃烧的难易程度^[22]，1 h时滞的可燃物负荷量越高，林分越容易在相同的外界诱因作用下发生燃烧，一方面与马尾松林自身特性有关，马尾松树干、枝叶会产生大量挥发性的松脂^[15]。另一方面也说明越到演替后期其发生火灾的危险性越大。

4.2 马尾松林地表可燃物负荷量与环境因子的关系

森林地表可燃物的负荷量是多种环境因素直接或间接作用于植物群落的结果^[23]。近年来，学者运用不同的分析方法对特定地区的地表可燃物负荷量的影响因子进行研究。吴志伟等^[24]采用DCCA排序方法对丰林自然保护区不同红松林群落内地表死可燃物负荷量与环境因子的关系进行定量分析，发现海拔、坡度、树高和枝下高是主要的影响因子。

王叁等^[25]运用CCA排序方法对川西南地区不同类型云南松林的地表可燃物负荷量及其影响因子进行研究，结果表明林龄、平均树高、郁闭度和坡度是影响地表可燃物负荷量的关键因子。田野等^[26]使用RDA排序方法分析冀北辽河源火干扰后油松林地地表可燃物负荷量与环境因子的关系，认为烧死木百分比、胸径和熏黑高与树高的比值对地表死可燃物负荷量的影响较大。梁瀛^[9]采用相关分析方法对天山中部天山云杉林地地表可燃物载量及其影响因素进行分析，认为海拔、坡度、树高和郁闭度对可燃物载量均有一定影响，其中郁闭度影响最显著。可见，研究区的空间异质性以及分析方法的不同均对可燃物负荷量与环境因子的关系产生影响。本研究通过RDA排序方法研究认为，武夷山国家公园内马尾松纯林地地表可燃物负荷量与海拔、坡位等地形因子，平均枝下高、平均胸径、郁闭度等林分因子和空气温度气象因子关系密切，三方面因子的共同作用决定了研究区地表可燃物负荷量的分布格局。

本研究表明坡位与地表活可燃物负荷量呈正相关，与地表死可燃物的负荷量呈负相关，这与王叁等^[25]的研究结果一致。相对来说坡位越靠上，受风力等外界的干扰越严重，其掉落的枯枝落叶受风力的影响不利于保留下来，因而地表死可燃物的负荷量越少。海拔与地表活可燃物负荷量呈负相关，与地表死可燃物负荷量呈正相关，这与Christopher等^[27]的研究结果一致。随着海拔的上升，温度降低，降水减少，不利于灌木草本的生长，故地表活可燃物的负荷量减少。随着海拔的上升，形成低温干燥的环境，减缓枯枝落叶的分解，因此地表死可燃物的负荷量增加。平均枝下高，平均胸径与马尾松林地地表活可燃物负荷量呈负相关，与地表死可燃物负荷量呈正相关。这与陈宏伟等^[28]、吴志伟等^[24]、梁瀛等^[9]、王叁等^[25]的研究结果一致。马尾松林在自然生长的过程中，树高，冠幅不断增加，胸径不断扩大，林木之间竞争加剧，会出现自然整枝直至一部分弱勢林木枯死成为枯枝落叶^[29]。在马尾松林木生长前期，自然整枝现象出现较少，地表死可燃物的负荷量较低，随着平均枝下高，平均胸径的增大，自然整枝现象明显，地表死可燃物的负荷量较高。郁闭度与地表活可燃物负荷量呈正相关，与地表死可燃物负荷量呈负相关，这一结果与梁瀛等^[9]有关天山中部云杉林地地表死可燃物负荷量与林分郁闭度呈正相关的研究结果不一致，可能原因是所采样的林分进行了不同程度的人工抚育，人为改变了

林分密度,郁闭度等生境条件,从而对地表可燃物负荷量产生影响,再加上采样地靠近旅游景区,易受人为因素的干扰,武夷山风景名胜区作为武夷山国家公园内的著名旅游景区,为维护管理,有关部门组织定期对枯枝落叶进行清理,这也对地表可燃物负荷量产生了影响。空气温度与地表活可燃物负荷量呈正相关,与地表死可燃物呈负相关。空气温度高,有利于满足植物生长所需的热量条件,有利于植物生长,增加地表活可燃物负荷,同时温度高有利于微生物的繁殖,可加快枯枝落叶的分解,降低地表死可燃物的负荷量^[30]。

不同类型的地表可燃物,其影响因子各不相同,其中平均胸径对灌木的负荷量影响最大,且二者呈显著负相关;坡位对草本负荷量和1h时滞负荷量影响最大,与草本负荷量呈显著正相关,与1h时滞负荷量呈显著负相关;平均枝下高对10h时滞和总可燃物负荷量影响最大,且均呈显著正相关,因此在监管调控时要因地制宜,选择合理的方案预防森林火灾的发生^[31]。例如,在马尾松林演替前期阶段要注意定期割灌,减少灌木的生长;对坡位较高的马尾松林要定期除草,对坡位较低的马尾松林下调落物定期清理;在马尾松林演替后期阶段,要注意林木的自然整枝现象,增加定期清理林下枯枝落叶的次数,并适当对林分采取疏伐措施,降低林分郁闭度,通过机械手段来减少地表可燃物负荷量。相关研究表明,根据可燃物累计的数量和分解的程度,周期性的实施低强度计划火烧可以有效降低地表可燃物的负荷量^[32-33],故在马尾松演替过程中采取林下可燃物定期清理和计划火烧相结合的方式以调控森林可燃物负荷量,预防森林火灾的发生。本研究在样地调查的过程中,没有考虑林分人工抚育因素以及旅游等人为因素的干扰,在气象数据采集过程中,仅选择一天中气温最高的时间段作为重点观测时段,并未覆盖全天,同时环境因子的选取不够全面,如马尾松林自身的生物学特性、可燃物负荷量动态积累过程、研究区台风暴雨等因素都可能对地表可燃物负荷量造成影响,这些不足均致使研究结果存在一定局限性,今后的研究会结合这些不足进一步改进。

5 结论

通过研究武夷山国家公园马尾松林不同演替阶段地表可燃物负荷量及其与环境因子的关系,发现

不同演替阶段地表可燃物的负荷量不同,随着马尾松林的演替,地表活可燃物负荷量呈递减趋势,地表死可燃物和地表总可燃物负荷量则呈递增趋势;演替初期形成的马尾松幼龄林与演替后期形成的成熟林差异最为明显,到了演替后期活地表可燃物下降了47.21%,死地表可燃物增加了113%;活可燃物负荷量所占的比例总体比死可燃物负荷量少,总可燃物的负荷量主要由1h时滞的细小可燃物构成;RDA排序方法认为地表可燃物负荷量与海拔、坡位等地形因子、平均枝下高、平均胸径、郁闭度等林分因子和空气温度等气象因子关系密切,其中,地表死可燃物和地表总可燃物与海拔、平均枝下高、平均胸径呈正相关,与坡位、郁闭度和空气温度呈负相关,地表活可燃物则相反;线性回归分析认为影响不同类型地表可燃物的环境因子各不相同,其中平均胸径对灌木负荷量影响最大,坡位对草本、1h时滞负荷量影响最大,平均枝下高对10h时滞和总可燃物负荷量影响最大。这一研究结果可掌握武夷山国家公园地表可燃物负荷量的基本规律,为减少武夷山国家公园森林可燃物,降低森林火险强度提供指导意义。

参考文献:

- [1] Sah J P, Ross M S, Snyder J R, *et al.* Fuel loads, fire regimes, and post-fire fuel dynamics in Florida Keys pine forests[J]. *International Journal of Wild Land Fire*, 2006, 15: 463-478.
- [2] Dubois C. *Systematic Fire Protection in the California Forests*[M]. USDA Forest Service, Washington, D. C. 1914, 99.
- [3] Hornby L G. Fuel type mapping in Region One[J]. *For*, 1935, 33(1): 67-72.
- [4] Wendel G W. Fuel weights of pond pine crowns[R]. USDA Forest Service. Southeastern Forest Experiment Station Research Note No. 149, 1960.
- [5] Brender E V, McNab W H. Precommercial thinning of loblolly pine by fertilization[R]. Georgia Forest Research Paper No. 90. Macon, GA, Georgia Forest Research Council, 1978.
- [6] Ryu S R, Chen J Q, Zheng D L, *et al.* Simulating the effects of prescribed burning on fuel loading and timber production (EcoFL) in managed northern Wisconsin forests[J]. *Ecol Model*, 2006, 196: 395-406.
- [7] 邸学颖,王宏良,姚村人,等.大兴安岭森林地表可燃物生物量与林分因子关系的研究[J]. *森林防火*, 1994, 12(2): 16-18.
- [8] 周润青,刘晓东,郭怀文.大兴安岭南部主要林分地表可燃物负荷量及其影响因子研究[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2014, 42(6): 131-137.

- [9] 梁 瀛, 李吉玫, 赵凤君, 等. 天山中部天山云杉林地表可燃物载量及其影响因素[J]. 林业科学, 2017, 53 (12): 153-160.
- [10] 徐伟恒, 吴 超, 杨 磊, 等. 滇东北地区华山松与云南松的地表凋落物载量及火强度对比研究[J]. 西南林业大学学报: 自然科学, 2019, 39 (5): 151-156.
- [11] 艾也博, 寸应得, 范雅倩, 等. 北京松山油松林地表可燃物负荷量的影响因素[J]. 生态学杂志, 2018, 37 (9): 2559-2565.
- [12] 李成杰. 宽甸地区主要林型地表可燃物负荷量初步研究[J]. 辽宁林业科技, 2015, 42 (4): 25-28.
- [13] 周绪佳, 闫德民, 王 鹏, 等. 马尾松林地表可燃物载荷及其影响因素分析[J]. 森林防火, 2019, 38 (4): 18-23.
- [14] 赵雪崑. 沈阳地区主要林型地表可燃物载量及分布研究[J]. 防护林科技, 2018, 36 (1): 29-31.
- [15] 陈存及, 何宗明, 陈东华, 等. 37种针阔树种抗火性能及其综合评价的研究[J]. 林业科学, 1995, 41 (2): 135-143.
- [16] 何东进, 游巍斌, 洪 伟. 世界双遗产地武夷山风景名胜区保护生态学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2018.
- [17] You W B, Lin Li, Wu L Y, *et al.* Geographical information system-based forest fire risk assessment integrating national forest inventory data and analysis of its spatiotemporal variability[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 77: 176-184.
- [18] Reich R M, Lundquist J E, Bravo V A. Spatial models for estimating-fuel loads in the Black Hills, South Dakota, USA[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2004, 13(1): 119-129.
- [19] 徐伟恒, 黄邵东, 杨 磊, 等. 滇东北地区云南松地表可燃物载量及火强度研究[J]. 西部林业科学, 2019, 48 (4): 19-26.
- [20] 雷丽群, 卢立华, 农 友, 等. 不同林龄马尾松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 林业科学研究, 2017, 30 (6): 954-960.
- [21] 严思晓, 刘 万, 林雪儿, 等. 武夷山风景名胜区森林地表可燃物含水率特征及其与环境因子的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24 (1): 146-154.
- [22] 单延龙, 关 山, 廖光焯. 长白山林区主要可燃物类型地表可燃物载量分析[J]. 东北林业大学学报, 2006, 50 (6): 34-36.
- [23] Stambaugh M C, Dey D C, Guyette R P, *et al.* Spatial patterning of fuels and fire hazard across a central U. S. deciduous Forest region[J]. *Landscape Ecology*, 2011, 26(7): 923-935.
- [24] 吴志伟, 贺红士, 刘晓梅, 等. 丰林保护区地表森林死可燃物载量与环境因子的关系[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39 (3): 52-55.
- [25] 王 叁, 牛树奎, 李 德, 等. 云南松林可燃物的垂直分布及影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 24 (2): 331-337.
- [26] 田 野, 牛树奎, 陈 锋, 等. 火干扰后的油松林地表死可燃物负荷及影响因素[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2018, 47 (6): 691-697.
- [27] Christopher R W, Michael J. Coarse woody debris dynamics in the southern Appalachians as affected by topographic position and anthropogenic disturbance history[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217(2/3): 319-330.
- [28] 陈宏伟, 常 禹, 胡远满, 等. 大兴安岭呼中林区森林死可燃物载量及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2008, 27 (1): 50-55.
- [29] 玉 宝. 林木整枝技术研究现状及趋势[J]. 林业科技, 2019, 44 (5): 54-58.
- [30] Li Y Q, Xu M, Sun O J, *et al.* Effects of root and litter exclusion on soil CO₂ efflux and microbial biomass in wet tropical forests[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(12): 2111-2114.
- [31] 李伟克, 张 晨, 谷兴翰, 等. 北京西山侧柏林可燃物调控措施的影响评价[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37 (3): 472-479.
- [32] 宗学政, 田晓瑞, 田 恒, 等. 计划火烧对区域森林燃烧性的影响[J]. 林业科学研究, 2020, 33 (3): 54-62.
- [33] 郑文霞, 郭新彬, 郭林飞, 等. 美国野地-城市交界域火灾管理概述及对我国的启示[J]. 生态学杂志, 2020, 39 (1): 300-307.

Surface Fuel Loading of *Pinus massoniana* Forest in Different Succession Stages and Relevant Affecting Factors

ZHANG Xiu-fang¹, HE Dong-jin^{1,2}, LI Ying¹, YAN Si-xiao¹, YOU Wei-bin¹

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Jinshan College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: [Objective] Based on the analysis of the variation characteristics of the fuel loading of *Pinus massoniana* forest in different succession stages, to determine the key factors affecting the surface fuel load. [Method] Taking pure *P. massoniana* forests with different age classes in Wuyishan National Park as the research object, alternative method of temporal and spatial was used to analyze the characteristics of different types of surface fuel loading and their relationship with terrain, stand, and meteorological factors. [Result] (1) With the succession of *P. massoniana* forest, the surface live fuel loading decreased, while the dead fuel loading and total fuel loading increased. The total fuel loading was mainly caused by 1 hour dead fuel loading. (2) The difference between young and mature *P. massoniana* stands was the most obvious. At the late stage of succession, the surface live fuel loading decreased by 47.21% and the surface dead fuel loading increased by 113%. (3) According to RDA ranking method, the surface fuel loading were closely related to terrain factors (such as altitude, slope position), stand factor (such as average branch-free bole height, average DBH, and canopy density) and meteorological factors (such as air temperature). (4) Linear regression analysis showed that different types of surface fuel loading had different influence factors, among which the average DBH had the greatest impact on the shrub fuel loading, the slope position had the greatest impact on the herb fuel and 1 hour dead fuel loading, the average clear bole height had the greatest impact on the 10 hour dead fuel and total fuel loading. [Conclusion] Surface fuel loading of *P. massoniana* forest are different in various succession stages and the influence factors vary with different types of surface fuel.

Keywords: fuel loading; environmental factors; redundancy analysis; stepwise linear regression analysis; *Pinus massoniana*; Wuyishan National Park

(责任编辑: 彭南轩)