

秦岭东段不同密度油松飞播林地表可燃物载量及其影响因素研究

赵璇¹, 游玮², 晁志¹, 李书学³, 卢永民³, 庞越¹, 吴普侠⁴, 王得祥^{1*}

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 陕西省山阳县林业综合服务中心, 陕西 山阳 726400;

3. 陕西省丹凤县流岭国有林场, 陕西 丹凤 726200;

4. 陕西省林业科学院 黄土高原水土保持与生态修复国家林业和草原局重点实验室, 陕西 西安 710000)

摘要:对秦岭东段油松飞播林地表可燃物载量进行系统测定,比较不同密度林分之间的差异,分析林分因子对地表可燃物载量的影响,为油松飞播林可燃物管理、林火预测预报及林分健康经营提供科学依据。在秦岭东段丹凤县流岭飞播林基地 44 a 油松飞播林中设置 3 个密度梯度共 14 块样方,调查样方内地表可燃物载量及相关林分因子,通过方差分析和相关性分析得出不同密度油松飞播林地表可燃物载量差异及林分因子与地表可燃物载量的关系。结果表明,1)秦岭东段油松飞播林地表可燃物载量为 $19.90 \sim 58.08 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中 64% 的林分可燃物载量超过发生重特大森林火灾的临界条件—— $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。各类型可燃物中,下层枯落物载量占比最大。2)不同密度林分地表可燃物总载量由大到小表现为:低密度、高密度、中密度。下层枯落物载量表现为低密度林分显著大于中、高密度林分。灌木枯枝 1 h 时滞可燃物载量表现为高密度林分显著大于中密度林分。地表枯枝 1 h 时滞可燃物载量表现为高密度林分显著大于低密度林分。3)地表可燃物载量与林分因子的关系表现为灌木枯枝 1 h 时滞可燃物载量和地表枯枝 1 h 时滞可燃物载量与密度呈正相关,与枝下高、胸径、树高呈负相关;灌木枯枝 10 h 时滞可燃物载量与树高和冠幅呈负相关;草本层可燃物载量与冠幅呈正相关。秦岭东段油松飞播林地表可燃物载量大,有发生较大森林火灾的物质基础。不同密度林分地表可燃物载量差异较大。密度、胸径、树高、枝下高和冠幅对不同可燃物载量有不同程度的影响。对该区域油松飞播林进行可燃物调控和林火管理的关键是定期清理林下枯枝落叶和易燃灌草,合理调整林分密度并引进难燃阔叶树种营造结构合理的防火混交林。

关键词:油松飞播林;地表可燃物载量;密度梯度;林分因子

中图分类号:S762.1

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)01-0159-07

Surface Fuel Loads and Influencing Factors on Aerial Seeding *Pinus tabulaeformis* Forests with Different Densities in the Eastern Qinling Mountains

ZHAO Xuan¹, YOU Wei², CHAO Zhi¹, LI Shu-xue³, LU Yong-min³, PANG Yue¹, WU Pu-xia⁴,
WANG De-xiang^{1*}

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Shanyang Forestry Integrated Service Centre, Shanyang 726400, Shaanxi, China; 3. Liuling State-owned Forest Farm, Danfeng 726200, Shaanxi, China; 4. Key Laboratory of National Administration of Forestry and Grass on Soil and Water Conservation & Ecological Restoration of the Loess Plateau, Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: This study investigated the surface fuel loads (SFLs) of aerial seeding *Pinus tabulaeformis* forests occurring in the eastern Qinling Mountains, China. The relationship between SFLs and stand factors were

收稿日期:2021-01-05 修回日期:2021-05-26

基金项目:陕西省林业科技项目(SXLK20210201)。

第一作者:赵璇。研究方向:森林生态。E-mail:zhaoxuan0208@nwfu.edu.cn

*通信作者:王得祥,博士,博士生导师。研究方向:森林生态及可持续经营。E-mail:wangdx66@126.com

analyzed, and the differences in SFLs among the stands with different densities were compared. The results would provide scientific data and guidance for fuel management, forest fire forecast and forest health management. Fourteen typical 44-year-old aerial seeding *P. tabuliformis* forest plots with three densities were set up. The effects of forest density on fuel loads and the correlations between fuel loads and stand factors were examined by ANOVA correlation analysis methods. 1) The total fuel loads were between $19.90 - 58.08 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, in which 64% of the plots were greater than the critical condition to trigger the most serious forest fires ($30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$). The under falling loads accounted for the largest proportion of the SFLs. 2) The total fuel loads of the forests with different densities were in the order of low density, high density, middle density. The under falling loads of low density forests were significantly larger than the middle density forests and the high density forests. The 1-hour time lag fuel loads of the high density forest dead woods was significantly larger than the middle density forests. The 1-hour time lag fuel loads surface deadwood of the high density forests were significantly larger than the low density forests. 3) The analysis of the relationship between the SFLs and stand factors indicated that the 1-hour time lag fuel loads of bush deadwoods and surface dead woods were positively correlated with stand density, and were negatively correlated with under branch height, DBH and height. The 10-hour time lag fuel loads of bush dead woods was negatively correlated with height and crown. The herb layer fuel loads were correlated positively with crown. The aerial seeding *P. tabuliformis* forests in the eastern Qinling Mountains had the potential as the material basis for the occurrence of forest fires, because the SFLs were great. Differences in the fuel loads existed among the stands with different densities. Stand factors, including density, DBH, height, under branch height and crown played different roles in different fuel loads. It was suggested that the key points of fuel management and forest fire management were to clean up the litter, shrubs and herbs, to adjust rational stand density, and to introduce broad-leaved tree species with fire resistance into the *P. tabuliformis* forests to form mixed stand for fire protection.

Key words: aerially seeded *Pinus tabuliformis* forest; surface fuel load; density level; stand factor

地表火是最常见的一种森林火灾,能够直接烧死幼树、灌木和下木,烧伤大树干基和裸露根系,影响林木生长和森林更新,危害极大。而地表可燃物是发生地表火的基础,其载量是估计地表火行为指标的重要参数。研究地表可燃物载量及其影响因素对于林火管理、森林火险预测预报以及林分健康经营具有重要意义^[1]。森林地表可燃物载量一直是国内外林火研究的重点。从20世纪60年代就有国外学者通过数学模型来表示地表可燃物载量与林分因子的关系^[2-4]。近年来,也有不少学者继续研究地表可燃物载量与胸径、冠幅、郁闭度等林分因子的关系^[5-7]。国内研究起步稍晚,20世纪80年代起才有学者陆续开展可燃物载量研究。目前国内主要集中在对马尾松(*Pinus massoniana*)林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、侧柏(*Platycladus orientalis*)林、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林、红松(*P. koraiensis*)林、白桦(*Betula platyphylla*)林等人工林或天然林地表可燃物载量的研究^[8-17],但对飞播林,尤其是油松(*P. tabuliformis*)飞播林地表可燃物载量特征及其影响因素的研究还鲜有报道。

油松是北方地区主要的飞播造林树种^[18]。秦

岭东段集中连片的油松飞播林发挥了重要的生态效益和经济效益^[19]。但油松飞播林多分布于干旱且土壤瘠薄的高山、远山地区,对其多采取简单粗放的封育措施,林内枯枝落叶累积较厚,遇到火源极易引发森林火灾。因此,对秦岭东段油松飞播林进行林火管理和林分健康经营的关键是研究该区域油松飞播林地表可燃物载量特征及其影响因素。

本研究通过野外实地调查、室内测定及数据统计分析等手段研究秦岭东段不同密度油松飞播林地表可燃物载量特征,探讨林分因子对地表可燃物载量的影响,从而对该区域森林可燃物调控、林火预防工作以及林分健康经营提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于秦岭东段南麓的丹凤县,地处 $33^{\circ}21'32'' - 33^{\circ}57'04''\text{N}$ 、 $110^{\circ}07'49'' - 110^{\circ}49'33''\text{E}$,属于北亚热带向暖温带过渡的季风性半湿润山地气候区。年日照总时数 2 056 h,无霜期 217 d。年平均气温 13.8°C 。年平均降水量 687.4 mm,集中在7—9月的降水约占年降水量的 41.4%^[20-21]。林区

土壤类型主要为山地棕壤和山地黄棕壤^[22]。丹凤县飞播造林始于 1975 年,至今共完成飞播造林 $11.18 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (含复播 $2.59 \times 10^4 \text{ hm}^2$)。飞播造林使全县森林覆盖率提高约 16.7%,极大加速了荒山绿化进程^[21]。飞播造林树种以油松为主,总成林面积达 $5.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$,大部分飞播区域油松长势优良、成林状况好、林相整齐。流岭林区是商洛飞播林基地的主要组成部分, $2.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 飞播林中仅油松飞播纯林就有 $1.73 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。油松飞播林多为纯林,少量与天然栎类混交。林下灌木主要有绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、野蔷薇(*Rosa multiflora*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、连翘(*Forsythia suspensa*)等。草本植物主要有萱草(*Hemerocallis fulva*)、苔草(*Carex tristachya*)、香青(*Anaphalis sinica*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样方设置 2019 年 7—8 月,对研究区油松飞播林进行充分踏查,采用典型取样在 1975 年飞播的油松纯林中选择地形因子相似、林相较好的林分,设置 14 块面积为 $20 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ 的样方。参考陶观护等^[22]、黄青平等^[23]对油松飞播林密度等级的划分方法,结合研究区油松飞播林密度特征将所设 14 块样方划分为 3 个密度梯度。其中低密度样方(小于 $1\,500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$)3 块,中密度样方($1\,500 \sim 3\,000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$)6 块,高密度样方(大于 $3\,000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$)5 块。通过 5 点取样法在每个样方的 4 个角及中心位置设置 5 个面积为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的灌木样方,5 个面积为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的草本样方、枯落物样方和更新样方。

1.2.2 样方调查

1.2.2.1 样方基本信息调查 记录每个样方的海拔、坡向、坡位、坡度等基本信息(表 1)。对样方内胸径大于等于 5 cm 的乔木进行每木检尺,测其胸径、树高、枝下高和冠幅。

1.2.2.2 地表可燃物载量测定

1)灌木层(含幼树)可燃物载量测定 调查、记录灌木样方内全部灌木及幼树的种名、高度、盖度等(由于未达到乔木起测径阶且高度小于 2 m 的幼树在森林火灾中的作用与灌木相似,故按灌木调查方法来调查^[25])。根据灌木燃烧特性,将灌木分为活枝和枯枝。活枝按直径划分:直径大于 1 cm 的划分为大枝,直径小于等于 1 cm 的划分为小枝。枯枝按时滞分为 4 个等级^[26](表 2)。由于本研究样方中灌木层 100 h 时滞和 1 000 h 时滞可燃物几乎没有,所以只调查 1 h 时滞、10 h 时滞枯死灌木。通过收割

法将小样方内的灌木及幼树全部挖取、分类,称其鲜质量,并取样带回实验室。

表 1 油松飞播林样方基本信息

Table 1 Basic information of the sample plots of aerially seeded *P. tabuliformis* forests

样方	海拔 /m	坡向	坡位	坡度 /($^{\circ}$)	密度 /($\text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$)	密度划分
1	990	东北坡	中部	38	1 120	低密度
2	1 006	东北坡	中部	38	1 200	低密度
3	946	北坡	中部	35	1 340	低密度
4	960	东北坡	中下部	39	1 620	中密度
5	950	东北坡	中部	33	1 840	中密度
6	950	北坡	中下部	38	2 040	中密度
7	1 281	西北坡	中上部	37	2 425	中密度
8	1 282	西北坡	中上部	37	2 775	中密度
9	1 059	北坡	中上部	33	2 800	中密度
10	1 022	北坡	中上部	30	3 200	高密度
11	1 097	东北坡	中上部	37	3 320	高密度
12	998	北坡	中上部	40	3 900	高密度
13	1 087	北坡	中上部	38	3 980	高密度
14	1 043	西北坡	中上部	44	4 120	高密度

注:样方坡向等按孟宪宇所著《测树学》(第 3 版)进行划分^[24]。

表 2 枯死可燃物等级划分

Table 2 Classification of combustible dead fuels

等级	直径/cm
1 h 时滞	<0.635
10 h 时滞	0.635~2.54
100 h 时滞	2.54~7.62
1000 h 时滞	7.62~20.32

2)草本层可燃物载量测定 调查记录草本样方内全部草本的种名、丛数、盖度等。采用收割法将小样方内的草本全部挖取,称其鲜重,取样带回实验室。

3)枯落物层可燃物载量测定 先分别测量枯落物样方内上层枯落物和下层枯落物厚度,再分别将其全部收获并称取鲜重,取样带回实验室。枯落物样方内的地表枯枝可燃物也按时滞分为 4 个等级。由于本研究样方中地表枯枝 1 000 h 时滞可燃物几乎没有,所以只调查 1 h 时滞、10 h 时滞和 100 h 时滞地表枯枝,分别全部收获称取鲜重并取样带回实验室。

1.3 室内测定

将野外调查带回的各可燃物样品放入烘箱内,在 105 $^{\circ}\text{C}$ 下连续烘 24~48 h 至恒重,用电子天平称其绝干质量。

1.4 数据分析

1.4.1 可燃物载量计算 各类型可燃物载量根据以下公式计算^[27]:

$$D = \frac{M_d - M_b}{M_n - M_a}$$

(1)

式中: D 为样品的干湿比; M_d 为烘干后样品和信封总恒重质量, g; M_b 为烘干后信封的干质量, g; M_n 为取样的样品和塑封袋的总鲜质量, g; M_a 为正常状态下塑封袋的质量, g。

$$M = \frac{D \times M_s}{S} / 100 \quad (2)$$

式中: M 为可燃物载量, ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); S 为样方面积, m^2 ; 100 为单位转换系数; M_s 为样方内可燃物的总鲜质量, g。

1.4.2 易燃可燃物分类及载量计算 易燃可燃物具有燃点低、燃烧迅速、降雨后干燥快等特点, 森林起火和蔓延都是从易燃可燃物引燃开始的^[28-29]。本研究中易燃可燃物包括活可燃物和死可燃物。活可燃物包括草本植物、灌木及幼树的小枝。死可燃物包括上层枯落物、地表枯枝 1 h 时滞可燃物和灌木枯枝 1 h 时滞可燃物。易燃可燃物载量根据公式(1)和(2)计算。

1.4.3 数据处理 对不同密度油松飞播林地表可燃物载量进行方差分析, 对地表可燃物载量与林分因子进行相关性分析。所有统计分析通过 SPSS 23.0、Excel 2016 进行。

2 结果与分析

2.1 油松飞播林地表可燃物载量特征

由表 3 可知, 秦岭东段油松飞播林地表总可燃

物载量为 $19.90 \sim 58.08 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中 64% 的油松飞播林总可燃物载量大于 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 超过发生重特大森林火灾的临界条件, 有较大的森林火灾隐患。总可燃物载量中, 占比最大的是下层枯落物, 达 60%~88%; 其次是上层枯落物, 达 8%~24%; 占比最小的是灌木枯枝 1、10 h 可燃物和地表枯枝 100 h 可燃物。油松飞播林内易燃可燃物载量为 $4.05 \sim 11.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在总可燃物载量中占比达 11%~29%。

2.2 不同密度油松飞播林地表可燃物载量差异

由表 4 可见, 秦岭东段 3 个密度梯度油松飞播林灌木枯枝 1 h 时滞可燃物载量表现为高密度林分显著 ($P < 0.05$) 大于中密度林分; 地表枯枝 1 h 时滞可燃物载量表现为高密度林分显著 ($P < 0.05$) 大于低密度林分; 下层枯落物载量表现为低密度林分显著 ($P < 0.05$) 大于中、高密度林分; 总可燃物载量由大到小表现为: 低密度、高密度、中密度, 其中低密度林分显著 ($P < 0.05$) 大于中密度林分。低密度林分中绝大多数可燃物载量都不大, 但占比最大的下层枯落物载量最多, 导致低密度油松飞播林可燃物总载量也最大。高密度林分中大多数可燃物载量均最多, 但都是质量较轻的易燃可燃物, 其下层枯落物载量较少, 所以地表可燃物总载量低于低密度林分。中密度林分中各类型可燃物载量均较少, 所以地表可燃物总载量最小。

表 3 油松飞播林地表可燃物载量基本情况

Table 3 Surface fuel loads of aerially seeded *P. tabulaeformis* forests

($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)

样方	草本层可燃物	灌木活枝		灌木枯枝		地表枯枝可燃物			枯落物层可燃物		总可燃物载量	易燃可燃物
		小枝	大枝	1 h 时滞	10 h 时滞	1 h 时滞	10 h 时滞	100 h 时滞	上层	下层		
1	0.71	0.53	0.20	0.02	0.00	0.18	0.40	0.00	5.27	50.76	58.08	6.71
2	0.79	0.38	0.16	0.00	0.00	0.35	0.45	0.11	6.17	34.90	43.32	7.69
3	0.49	0.87	0.02	0.00	0.00	0.22	0.18	0.00	4.22	45.58	51.58	5.80
4	0.37	1.25	0.68	0.03	0.02	0.40	0.38	0.00	5.99	30.62	39.76	8.05
5	0.64	0.52	0.04	0.00	0.00	0.21	0.30	0.00	3.84	27.09	32.63	5.21
6	1.01	1.08	0.58	0.00	0.03	0.24	0.35	0.00	3.91	27.57	34.77	6.24
7	0.57	0.83	1.22	0.00	0.00	0.62	0.82	0.00	3.78	12.06	19.90	5.79
8	0.77	0.89	0.25	0.00	0.00	0.44	0.49	0.31	3.35	14.06	20.56	5.45
9	0.30	0.63	0.38	0.00	0.00	0.56	0.60	0.00	10.26	30.18	42.92	11.75
10	0.13	1.04	0.50	0.00	0.00	0.69	0.92	0.00	9.85	34.14	47.27	11.71
11	0.42	0.45	1.25	0.00	0.00	0.59	0.58	0.00	4.89	16.59	24.77	6.34
12	0.34	2.02	0.50	0.05	0.04	0.38	0.25	0.00	2.86	14.34	20.78	5.66
13	0.35	1.44	0.80	0.09	0.27	0.58	0.66	0.18	6.24	42.45	53.05	8.70
14	0.63	0.37	0.00	0.09	0.01	0.55	0.32	0.00	2.41	23.65	28.03	4.05

2.3 油松飞播林地表可燃物载量与林分因子的相关性

秦岭东段油松飞播林地表可燃物载量与林分因子的相关性见表 5, 地表枯枝 1 h 时滞可燃物载量与密度呈极显著 ($P < 0.01$) 正相关, 与胸径呈极显著 ($P < 0.01$) 负相关, 与树高和枝下高呈显著 ($P <$

0.05) 负相关。灌木枯枝 1 h 时滞可燃物载量与密度呈显著 ($P < 0.05$) 正相关, 与胸径、枝下高呈显著 ($P < 0.05$) 负相关, 与树高呈极显著 ($P < 0.01$) 负相关。林分因子对地表枯枝 1 h 时滞可燃物载量和灌木枯枝 1 h 时滞可燃物载量影响相似, 地表枯枝 1 h 时滞可燃物载量和灌木枯枝 1 h 时滞可燃物载

表 4 不同密度油松飞播林地表可燃物载量(平均值±标准差)

Table 4 Surface fuel loads of aerially seeded *P. tabulaeformis* forests with different density levels(Mean±SD) (t·hm⁻²)

可燃物类型	密度等级		
	低密度	中密度	高密度
草本层可燃物	0.664±0.157a	0.609±0.260a	0.374±0.180a
灌木小枝	0.593±0.249a	0.866±0.273a	1.066±0.692a
灌木大枝	0.129±0.094a	0.526±0.411a	0.609±0.460a
灌木枯枝 1 h 时滞	0.005±0.009ab	0.005±0.012a	0.046±0.045b
灌木枯枝 10 h 时滞	0.000±0.000a	0.008±0.013a	0.063±0.115a
地表 1 h 时滞可燃物	0.253±0.087a	0.414±0.165ab	0.560±0.113b
地表 10 h 时滞可燃物	0.346±0.145a	0.491±0.196a	0.546±0.270a
地表 100 h 时滞可燃物	0.038±0.066a	0.051±0.125a	0.036±0.080a
上层枯落物	5.220±0.973a	5.188±2.652a	5.249±3.000a
下层枯落物	43.748±8.090a	23.598±8.304b	26.234±11.903b
总可燃物载量	50.995±7.398a	31.756±9.638b	34.781±14.419ab

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

表 5 林分因子与可燃物载量的相关性

Table 5 Correlation coefficients between fuel loads and stand factors

可燃物类型	密度	胸径	树高	枝下高	冠幅
草本层可燃物	-0.446	0.415	0.401	0.150	0.550*
灌木小枝	0.354	-0.376	-0.491	-0.362	-0.325
灌木大枝	0.289	-0.358	-0.285	-0.486	-0.201
灌木枯枝 1 h 时滞	0.627*	-0.584*	-0.715**	-0.628*	-0.316
灌木枯枝 10 h 时滞	0.430	-0.453	-0.558*	-0.397	-0.558*
地表枯枝 1 h 时滞	0.695**	-0.702**	-0.566*	-0.606*	-0.436
地表枯枝 10 h 时滞	0.284	-0.319	-0.137	-0.259	-0.261
地表枯枝 100 h 时滞	0.135	-0.217	-0.286	-0.132	-0.157
上层枯落物	-0.049	0.145	0.205	0.245	-0.318
下层枯落物	-0.450	0.513	0.403	0.505	-0.006
总可燃物载量	-0.397	0.469	0.378	0.475	-0.087

注: *: $P<0.05$; **: $P<0.01$ 。

量随着林分密度的增大而增大,随着油松胸径、树高和枝下高的减小而增大。灌木枯枝 10 h 时滞可燃物载量与树高和冠幅呈显著($P<0.05$)负相关,表现为随着树高和冠幅的增大,灌木枯枝 10 h 时滞可燃物载量减少。草本层可燃物载量与冠幅呈显著($P<0.05$)正相关,表现为随着冠幅的增大,草本层可燃物载量增大。

3 结论与讨论

3.1 结论

秦岭东段油松飞播林地表可燃物载量高,发生森林火灾的可能性大。3 个密度梯度油松飞播林地表可燃物载量差异明显:低密度林分可燃物总载量最大;中密度林分可燃物总载量最小;高密度林分中易燃可燃物如上层枯落物、灌木小枝、1 h 时滞可燃物等载量最大。地表枯枝 1 h 时滞、草本层、灌木枯枝 1 h 时滞及灌木枯枝 10 h 时滞等可燃物易受密度、胸径、树高、枝下高和冠幅等林分因子影响。

3.2 讨论

可燃物载量是估计林火蔓延、火强度、火焰高度和能量释放等的重要参数^[1]。胡志东等^[30]研究表明,当总地表可燃物载量 $<2.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,发生森林火灾可能性较小,而当总地表可燃物载量 $>10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,有发展成大的森林火灾的可能性。秦岭东段油松飞播林总地表可燃物载量均 $>10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中 64%的林分总可燃物载量 $>30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,超过发生重特大森林火灾的临界条件,说明该区域油松飞播林具有发生较大森林火灾的物质基础。地表可燃物中枯落叶、细小枯枝和草本植物等是容易引起森林火灾的易燃可燃物,其载量大小反映引起森林火灾的难易程度。秦岭东段油松飞播林内易燃可燃物载量较高,为 $4.05\sim11.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,一遇火源就会迅速被引燃,引发森林火灾。下层枯落物载量在总可燃物载量中占比最大,这与刘赵东^[27]、李伟明^[31]和闫泳霖^[32]等的研究结果一致。油松飞播林大多分布在人力难以到达的深山远山

区,因长期封育没有进行合理经营管理,林内枯枝落叶常年累积,有较大的森林火灾隐患^[27,31-35]。

低密度林分下层枯落物载量显著大于中、高密度林分。林娜^[36]研究不同林龄不同密度油松林凋落物分解特点时发现,近熟林在密度为 1 375 株·hm⁻² 时分解最快。本研究中低密度林分密度与 1 375 株·hm⁻² 接近,林下空间较大,通风较良好,枯枝落叶分解速率较快,处于分解和半分解状态的下层枯落物载量相应较高。高密度林分灌木枯枝 1 h 时滞可燃物载量显著大于中密度林分,这是由于密度高的林分空间狭小,灌木层植物之间竞争大,长势弱、枝条纤细的灌木及幼树处于竞争劣势,容易枯死。高密度林分地表枯枝 1 h 时滞可燃物显著大于低密度林分,这是由于密度大的飞播林内乔木分布密集,枝条交错生长,对空间和阳光的竞争较大,细小枝梢容易折断掉落于地面。总可燃物载量表现为低密度林分最大,且显著大于中密度林分,这与李成杰^[37]、卢中波^[38]、李缙^[39]研究地表可燃物载量随密度增大而减小的结果基本一致。这是因为低密度林分中下层枯落物载量最多,导致总载量也最大,而中密度林分中下层枯落物载量最小,各类型可燃物载量也较小,所以总载量最小。

密度、胸径、树高、枝下高和冠幅对油松飞播林地表可燃物载量的影响主要体现在对灌木枯枝 1、10 h 时滞可燃物、地表枯枝 1 h 时滞可燃物以及草本层可燃物的影响上。灌木枯枝 1 h 时滞可燃物载量与密度呈显著正相关,与胸径、枝下高呈显著负相关,与树高呈极显著负相关。这是因为随着林分密度的增大,油松生长竞争激烈,侵占林下灌木生长空间、掠夺土壤中的水分和养分,导致灌木长势差,枝条容易枯死。灌木枯枝 10 h 时滞可燃物载量与树高和冠幅呈显著负相关,这是因为干形通直、冠形圆满的油松林下空间较大,有利于灌木层植物生长,灌木长势较好不易枯死。地表枯枝可燃物载量均与密度正相关,这与周润青^[40]的研究结果一致。这是由于生存空间和营养物质有限,密度越大,乔木层油松间种内竞争就越大,不仅不利于油松的生长,对灌木层和草本层植物的生长也极为不利,整个林分活力低,地表枯枝就相应较多。地表枯枝中 1 h 时滞可燃物载量与树高、枝下高呈显著负相关,与胸径呈极显著负相关,这是因为油松飞播林的密度比天然林、人工林大得多^[41-42],密度大的林分乔木层生长空间狭小,油松生长竞争大,整体较为低矮、纤细,长势不佳,细枝末梢容易枯死掉落在地面。草本层可燃物载量与冠幅呈显著正相关,这是由于冠幅大的林分油松分布较为稀疏,林下空间相对较大,草本层生长

状况良好,载量较大。

秦岭东段油松飞播林密度大,林内树木生长状况不佳,易受病虫鼠害侵扰,再加上长期封育,林内地表可燃物大量堆积,有发生重大森林火灾的可能性。应及时对油松飞播林进行适当抚育,定期伐除遭受病虫鼠兔侵害以及雪压、风折的病死木和枯立木,引进难燃阔叶乡土树种营造防火混交林。并定期清理林下堆积的枯枝落叶,对丛生易燃的灌草进行选择性地机械割除。

参考文献:

- [1] 秦富仓. 林火原理[M]. 北京:机械工业出版社,2014:53.
- [2] WENDEL G W. Fuel weights of pond pine crowns[R]. USDA Forest service, Southeastern Forest Experiment Station Research Note,1960:149.
- [3] BROWN J K. Estimating crown fuel weights of red pine and jack pine[M]. Ogden: USDA Forest Service Research Paper Ls-20,1965:12.
- [4] GROSBY J S. Litter and duff fuel in shoot leaf pine stands in southeast Missouri [M]. Washington: USDA Forest Service Lent States Forest Expstn Techpap,1961:178.
- [5] WEBSTER C R, JENKINS M A. 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):319-330.
- [6] LYDERSEN J M, COLLINS B M, KNAPP E E, *et al.* Relating fuel loads to overstorey structure and composition in a fire-excluded Sierra Nevada mixed conifer forest [J]. International Journal of Wildland Fire,2015,24(4):484-494.
- [7] KÜCÜK Ö, BİLGİLİ E, SAGLAM B. Estimating crown fuel loading for calabrian pine and Anatolian black pine[J]. International Journal of Wildland Fire,2008,17(1):147-154.
- [8] 袁春明,文定元. 马尾松人工林可燃物负荷量和烧损量的动态预测[J]. 东北林业大学学报,2000,28(6):24-27.
YUAN C M, WEN D Y. Dynamic prediction for forest loading and fuel consumption of masson pine plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University,2000,28(6):24-27. (in Chinese)
- [9] 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(4):18-23.
- [10] 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.
WU Z W, HE H S, LIU X M, *et al.* Relationship between loading of dead forest fuels in surface soil and environmental factors in fenglin nature reserve[J]. Journal of Northeast Forestry University,2011,39(3):52-55. (in Chinese)
- [11] 王刚,杜嘉林. 大兴安岭森林可燃物载量与林分因子关系的研究[J]. 森林防火,2004(2):17-19.
- [12] 单延龙,张敏,胡海清. 大兴安岭地区樟子松林地表可燃物模型[J]. 东北林业大学学报,2005,33(2):74-97.
SHAN Y L, ZHANG M, HU H Q. Models for surface fuels of

- Pinus sylvestris* var. *mongolica* forests in Daxing'anling Region[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2005, 33(2): 74-97. (in Chinese)
- [13] 梁瀛, 李吉玖, 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.
LIANG Y, LI J M, ZHAO F J, et al. Surface fuel loads of tianshan spruce forests in the central tianshan mountains and the impact factors[J]. 2017, 53(12): 153-160. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] 姜宏志. 枫桦红松林地被死可燃物载量估测模型研究[J]. 林业科技, 2016, 41(6): 21-23.
- [16] 周润青, 刘晓东, 张思玉. 兴安落叶松人工林地表可燃物分布研究[J]. 森林防火, 2019(1): 19-23.
ZHOU J Q, LIU X D, ZHANG S Y. Study on the distribution of surface combustibles in *Larix gmelinii* plantation[J]. Forest Fire Prevention, 2019(1): 19-23. (in Chinese)
- [17] 杨思琪. 北京西山林场主要树种燃烧性及侧柏林和油松林可燃物负荷量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017: 1-34.
- [18] 徐化成. 油松天然林的地理分布和种源区划分[J]. 林业科学, 1981, 17(3): 258-268.
- [19] 韩洛川. 油松飞播造林研究综述[J]. 陕西林业科技, 1993(4): 67-71.
- [20] 丹凤县志编纂委员会. 丹凤县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1994: 1-325.
- [21] 王群, 张力, 王更. 丹凤县飞播造林情况的调研分析[J]. 农业开发与装备, 2018(6): 87-102.
- [22] 陶观护, 卜元坤, 薛卫鹏, 等. 不同密度油松飞播林灌草多样性与林分空间结构关系[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(2): 172.
TAO G H, BU Y K, XUE W P, et al. Relationship between understory diversity and stand spatial structure in air-drilled *Pinus tabulaeformis* forests of different densities[J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(2): 172. (in Chinese)
- [23] 黄青平, 王得祥, 刘华, 等. 陕西商洛油松飞播林生长规律及其影响因子分析[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 157-162.
HUANG Q P, WANG D X, LIU H. Analysis on the growth rhythm and environmental impact factors of aerially seeded *Pinus tabulaeformis* plantation in Shangluo[J]. Journal of Northwest Forest University, 2013, 28(1): 157-162. (in Chinese)
- [24] 孟宪宇. 测树学[M]. 3版. 北京: 中国林业出版社, 2006: 49-69.
- [25] 牛树奎. 北京山区主要森林类型火行为与可燃物空间连续性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012: 22.
- [26] DEEMING J E, BURGAN R E, COHEN J D. The national fire-danger rating system-1978 [R]. Ogden: USDA Forest Service, General Technical Report INT, 1977: 39.
- [27] 刘赵东. 北京地区不同森林类型地表可燃物载量及影响因子研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019: 15-16.
- [28] 胡海清. 林火生态与管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 39.
- [29] 解国磊, 丁新景, 马风云, 等. 鲁中山区主要森林类型易燃可燃物垂直分布及其燃烧性[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 158-163.
XIE G L, DING X J, MA F Y, et al. Vertical distribution of the flammable fuel loads and combustion of the main forest types in mountainous area of Shandong[J]. Journal of Northwest Forest University, 2016, 31(1): 158-163. (in Chinese)
- [30] 胡志东. 森林防火[M]. 北京: 中国林业出版社, 2003: 23-24.
- [31] 李伟明. 北京十三陵林场主要林分类型地表可燃物负荷量及影响因子研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018: 21-25.
- [32] 闫泳霖. 五台林区4种林分类型地表可燃物负荷量及其影响因子研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2016: 12-29.
- [33] 杨语田. 辽宁省东部三种针叶树种地表可燃物载量与火行为特点研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017: 12-13.
- [34] 解国磊. 山东省山区主要森林类型可燃物分布及潜在火行为研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016: 18-21.
- [35] 陈婷, 郝敏, 孔范龙, 等. 枯落物分解及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1927-1935.
CHEN T, XI M, KONG F L, et al. A review on litter decomposition and influence factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(7): 1927-1935. (in Chinese)
- [36] 林娜. 不同密度油松人工林针叶凋落物分解特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011: 46.
- [37] 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(4): 25-28.
- [38] 卢中波, 王蕾. 人工落叶松林内死可燃物负荷量模型的研究[J]. 防护林科技, 2014(3): 1-2.
- [39] 李缙. 沈阳马耳山森林群落地表可燃物及火险等级的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017: 19-22.
- [40] 周润青, 刘晓东, 郭怀文. 大兴安岭南段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.
ZHOU J Q, LIU X D, GUO H W. Surface fuel loading and relevant influencing factors of main forest types in southern Daxing'anling[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2014, 42(6): 131-137. (in Chinese)
- [41] 马明科, 钱拴提. 秦岭山区油松飞播林生长状况调查研究[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(9): 69-72.
- [42] 韩东锋, 孙丙寅, 孙德祥. 不同营造方式对秦岭油松人工林生长影响的研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(6): 154-158.
HAN D F, SUN B Y, SUN D X. Effects of different forestation patterns on the growth of *Pinus tabulaeformis* stands on Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forest University, 2011, 26(6): 154-158. (in Chinese)