

山东省不同林分地表可燃物载量及其燃烧性研究

秦乃花¹, 陈 瑞², 吕常笑¹, 秦晓锐¹, 吴 可^{1*}, 周志强²

(1. 山东省国土空间规划院, 山东 济南 250014; 2. 山东农业大学, 山东 泰安 271018)

摘 要:探究山东省内不同林分地表可燃物的载量及燃烧性,为林木地表可燃物管理提供重要依据,从而增强林木火险预测预报的准确性。以山东省内 11 种主要林分的地表可燃物为研究对象,测定其载量、含水率、燃点、热值等燃烧性指标,并进行相关性检验和主成分分析。结果表明,黑松的可燃物总载量最高为 $20.644 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,杨树林的总载量最低为 $8.483 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。杨树含水率最高,油松林和黑松林含水率较低。同一林分中,枯落物燃点 $<$ 腐殖质燃点,枯落物热值 $>$ 腐殖质热值。枯落物中,油松燃点最低,为 265.667°C ,热值最高,为 $21\,911.778 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。各林分地表可燃物载量与地形因子中的海拔、坡度相关性较大,与林分因子中的林龄、平均树高、平均胸径相关性较大。不同林分地表可燃物燃烧特性中,油松林的燃烧特性最强,杨树林的燃烧特性最弱。

关键词:地表可燃物载量;含水率;燃点;热值;燃烧性;主成分分析

中图分类号:S762.1

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)05-0176-08

Surface Fuel Loading and Combustion Characteristics of Different Forest Types in Shandong Province

QIN Nai-hua¹, CHEN Rui², LÜ Chang-xiao¹, QIN Xiao-rui¹, WU Ke^{1*}, ZHOU Zhi-qiang²

(1. Shandong Territorial Spatial Planning Institute, Jinan 250014, Shandong, China;

2. Forestry College, Shandong Agricultural University, Taian 271018, Shandong, China)

Abstract: Exploring the load and combustibility of surface combustibles in different forest stands in Shandong Province can provide a basis for forest combustible management and improve the accuracy of forest fire prediction and forecasting. Surface combustibles from 11 major forest stands within Shandong Province were used for the study, and their combustibility indicators such as load, water content, ignition point and calorific value were measured, and correlation test and principal component analysis were conducted. The results showed that the highest total combustible load was $20.644 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ for black pine and the lowest total load was $8.483 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ for poplar woods. *Populus* had the highest water content, while *Pinus tabulaeformis* and *P. thunbergii* had lower water content. In the same stand, litter ignition point was lower than humus, and litter calorific value was higher than humus calorific value. The lowest ignition point (265.667°C) and the highest calorific value ($21\,911.778 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$) were found in the litter of *P. tabulaeformis*. The surface combustible load of each stand was highly correlated with elevation and slope in the topographic factor, and with stand age, average tree height, and average diameter at breast height in the stand factor. The burning characteristics of the combustible material on the surface of different forest stands, *P. tabulaeformis* was the strongest, and the burning characteristics of *Populus* was the weakest.

Key words: surface combustible load; moisture content; ignition point; calorific value; combustibility; principal component analysis

收稿日期:2022-06-28 修回日期:2023-02-28

基金项目:山东省财政资金项目(37000021P12000400020N)。

第一作者:秦乃花,硕士,高级工程师。研究方向:森林火灾风险普查、森林资源调查监测、森林资源保护。E-mail:qinnh926@163.com

*通信作者:吴 可,正高级工程师。研究方向:自然资源调查监测、森林生态环境保护。E-mail:34226661@qq.com

林火是存在于森林生态系统中的重要生态因子^[1-2],森林可燃物是林火发生的物质基础。根据空间分布划分森林可燃物,可分为地下、地表和空中可燃物^[3-4]。林火多起源于地表可燃物的燃烧,形成地表火,进而上升为树冠火^[5]。不同林分地表可燃物载量及其燃烧性决定了林火行为的特征。研究分析不同林分森林可燃物载量及其燃烧特性,对地表可燃物的管理和林火预测预报具有重要意义^[6-8]。不同学者对森林可燃物做了大量研究,单延龙等^[9]对长白山林区主要林型进行对比,得出落叶松林可燃物载量相对较高。Casals等^[10]调查地中海松林,其中 Roc Estret 地区地表可燃物载量较高,为 $1.06 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

生态系统各环境因子的作用影响森林可燃物载量的大小和分布。云丽丽等^[6]对阜新地区4种易燃林可燃物载量进行调查研究,得出乔木林可燃物载量大于灌木林可燃物载量。贾斌英等^[11]研究发现油松人工纯林更易燃,其载荷量林分密度、林龄呈正相关且与坡向、坡位都有密切关系。Ivanova等^[12]对西伯利亚针叶林中的黑松林可燃物进行研究,发现地表可燃物载量与胸径、树高和林龄呈显著正相关。Lydersen等^[13]认为地表可燃物与郁闭度相关性较大。胡海清^[14]通过林分因子建立地表可燃物模型,其拟合结果较好。森林燃烧性是森林可燃物被引燃的难易程度和着火后的燃烧状态及燃烧速度等的综合反应^[15]。王刚等^[16]研究了4种不同树种的理化性质参数对其燃烧性的影响,得出森林可燃物的燃烧性受化学组成的综合影响。祝必琴等^[17]通过测定可燃物理化性质和燃烧性,得出不同林型中,针叶林燃烧性最强、最易燃,且树叶易燃性强,树枝则是燃烧性较强。裴建元等^[18]通过研究江西南昌10种常绿阔叶树种的热值和燃点,发现热值越高,燃点越低,火强度越大,可燃物越容易着火。李艳芹等^[19]通过K-Means聚类分析法,从生物学和生态学角度对50个树种的燃烧性质进行分析。王雷等^[20]对呼和浩特市21种园林树种进行燃烧性研究,应用主成分分析进行排序,筛选出地区园林抗火树种。李旭等^[21]运用层次分析法,对滇中地区15种木本植物的燃烧性进行分析。而对于山东省主要林分地表可燃物载量及燃烧性的研究较少,本研究以山东省11种林分的地表可燃物为对象,测定可燃物载量、含水率、燃点、热值,应用主成分分析法比较11种林分的燃烧性并进行综合排序。研究结果可为山东省地表可燃物管理、林火预测预报,以及有关森林防火技术体系的建设和灭火措施的制定提供科学的依据^[12]。

1 研究区概况

山东省位于中国东部沿海($34^{\circ}22.9' - 38^{\circ}24.01' \text{N}$, $114^{\circ}47.5' - 122^{\circ}42.3' \text{E}$),属暖温带季风气候,无霜期180~220 d。夏季多雨,春季少雨,多年平均降水量为676.5 mm。全省中部以山地为主,西南、西北低洼平坦,东部缓丘起伏,形成以山地丘陵为骨架、平原盆地交错环列其间的地形。据统计,森林覆盖率为20.18%。

2 研究方法

2.1 标准地设置与可燃物采集

2.1.1 标准地设置 结合全国第9次森林资源清查成果和山东省各地区优势树种的分布情况,在全省范围内选择具有代表性的黑松林(*Pinus thunbergii*)、赤松林(*P. densiflora*)、侧柏林(*Platycladus orientalis*)、油松林(*P. tabulaeformis*)、麻栎林(*Quercus acutissima*)、刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)、杨树林(*Populus*)、黑松-刺槐林,赤松-麻栎林,侧柏-刺槐林,刺槐-麻栎林,设置 $25.82 \text{ m} \times 25.82 \text{ m}$ 的正方形标准地,林分因子和立地因子情况见表1。

2.1.2 可燃物样品采集 于2021年3—6月、9—11月进行采样。灌木层采样:在样地内设置5个 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的小样方,收获、测定其地上干、枝和叶鲜重。混合5个样方内的灌木,不少于500 g,带回实验室测定其干鲜比。

草本层、枯落物层、腐殖质层采样:参照刘赵东^[33]的方法将对枯落物分为3类,在灌木样方内设置 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方,分别收获草本、枯落物1(基径 $<0.6 \text{ cm}$ 的小枝、叶、果、杂草)、枯落物2(直径 $0.6 \sim 2.5 \text{ cm}$ 的小枝)、枯落物3(直径 $2.5 \sim 7.62 \text{ cm}$ 的枝条和直径 $>7.62 \text{ cm}$ 的枯倒木)及腐殖质样品。现场混合使每类样品不少于300 g,装入样品袋中,带回实验室测定。

2.2 室内试验与计算

将采集样品放入 80°C 烘箱内烘干48 h至绝干,电子天平称重,计算其可燃物载量和含水率^[33]。将烘干后的枯落物和腐殖质样品用植物粉碎机磨成粉末状,过40目筛。用DW-02型点着温度测定仪测定燃点,用ZDHW-6000微机全自动量热仪测定热值。

2.3 数据处理与分析

运用Excel 2010对数据整理,SPSS Statistics 25进行方差分析和显著性检验,利用Pearson相关性分析来检验相关性,origin2019b(32bit)作图。对地表可燃物的载量、含水率、燃点、热值进行主成分分析,并对树种燃烧性进行排序。

表 1 各林分因子调查概况
Table 1 General information of the stand factor survey

林分	海拔/m	坡向	坡位	坡度/ (°)	郁闭度	林分密度/ (株·hm ⁻²)	平均 树高/m	平均 胸径/cm	平均 枝下高/m	平均 年龄/a	龄组
油松林	482.25	北、南	上中脊	2.50	0.57	1391.88	8.95	13.24	2.41	38.50	近熟林
黑松林	246.38	北-南	上中下脊	2.77	0.70	1702.70	7.44	11.90	2.65	28.00	中龄林
赤松林	284.21	北-南	上中下脊	2.73	0.65	1721.41	6.39	10.50	2.52	30.00	中龄林
侧柏林	351.44	北-南	上中下脊	2.84	0.60	2191.24	7.61	10.45	1.68	42.00	中龄林
麻栎林	308.71	北-南	上中下谷	3.11	0.67	1608.22	8.22	11.72	2.63	22.67	中龄林
刺槐林	415.11	北-南	上中下脊	2.56	0.62	1571.65	9.52	12.84	2.55	21.48	近熟林
杨树林	31.35	无坡向	平地	6.00	0.70	886.95	16.13	16.36	3.92	9.32	幼龄林
黑松-刺槐混交林	228.36	北-南	上中脊	2.55	0.64	1730.96	7.11	12.41	1.64	28.00	中龄林
赤松-麻栎混交林	330.00	北-南	上中脊	2.33	0.72	1819.00	7.39	11.29	2.74	26.00	中龄林
侧柏-刺槐混交林	351.87	北-南	上中下脊	2.40	0.63	2111.07	6.61	10.12	1.27	35.00	幼龄林

3 结果与分析

3.1 不同林分地表可燃物载量

由图 1 可见,各林分中枯落物 1 和腐殖质载量占地表可燃物总载量高,草本层和枯落物 3 载量占比较低。黑松、麻栎、刺槐、杨树、黑松-刺槐林、赤松-麻栎林、侧柏-刺槐林和刺槐-麻栎林 8 种林分中,枯落物 1 载量占地表可燃物总载量分别为 43.02%、52.67%、44.78%、40.36%、44.56%、65.61%、51.88%、49.48%,

草本层载量占地表可燃物总载量依次为 1.45%、2.11%、3.76%、0.26%、1.88%、1.43%、3.20%、2.32%。在赤松林中,枯落物 1 载量占其林分地表可燃物总载量最高,枯落物 3 载量占地表可燃物总载量最低,分别为 48.16%、0.22%;侧柏林中,枯落物 1 载量占其林分地表可燃物总载量最高,枯落物 3 占地表可燃物总载量最低,分别为 53.54%、0.69%。油松林分中地表可燃物总载量占比最高的是腐殖质层,为 37.36%,占比最低的是枯落物 3,为 2.30%。

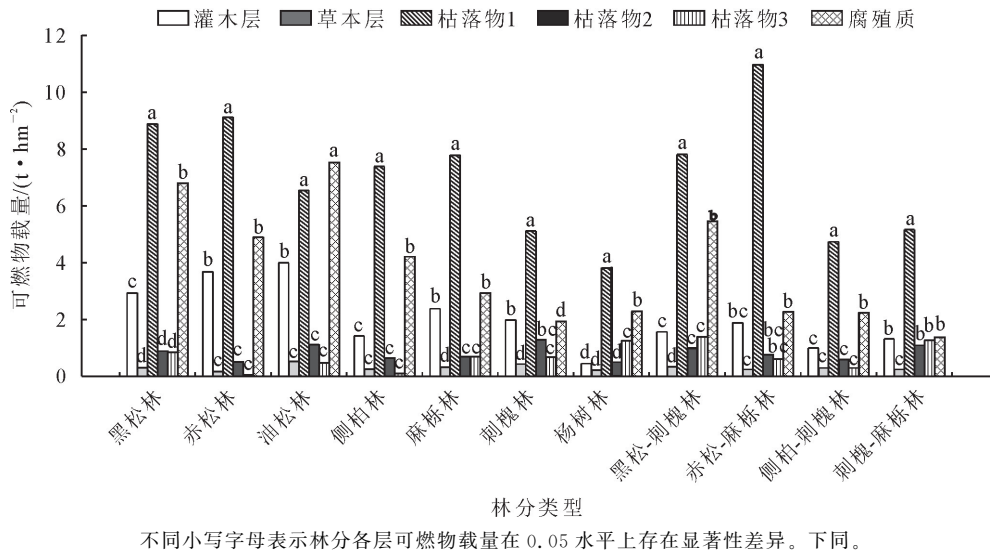


图 1 同一林分不同层次地表可燃物载量
Fig. 1 Surface combustible fuel load of different layers in the same forest

由图 2 可知,黑松的可燃物总载量最高为 20.644 t·hm⁻²,杨树林的总载量最低为 8.483 t·hm⁻²。各林分枯落物 2 和枯落物 3 载量均无显著差异。油松林的灌木层与赤松林的灌木层载量无显著差异,与杨树林灌木层载量差异较显著。油松林的草本层载量与赤松林、杨树林、赤松-麻栎林、刺槐-麻栎林草本层载量差异显著。赤松-麻栎林的枯落物 1 载量最高,与油松林、刺槐林、杨树林、侧柏-刺槐林、刺槐-麻栎林的枯落物 1 载量有显著差异。

油松林的腐殖质层载量与麻栎林、刺槐林、杨树林、赤松-麻栎、侧柏-刺槐林、刺槐-麻栎林的腐殖质层载量有显著差异。

3.2 不同林分地表可燃物含水率

林下灌木层和草本层都是活可燃物,含水率远高于其他死可燃物,自然环境下极难被引燃。因此,只对枯落物层和腐殖质层进行含水率分析。由表 2 可知,不同林分间杨树林枯落物层含水率最高,为 39.70%,油松林的枯落物层含水率最低,为 19.41%。

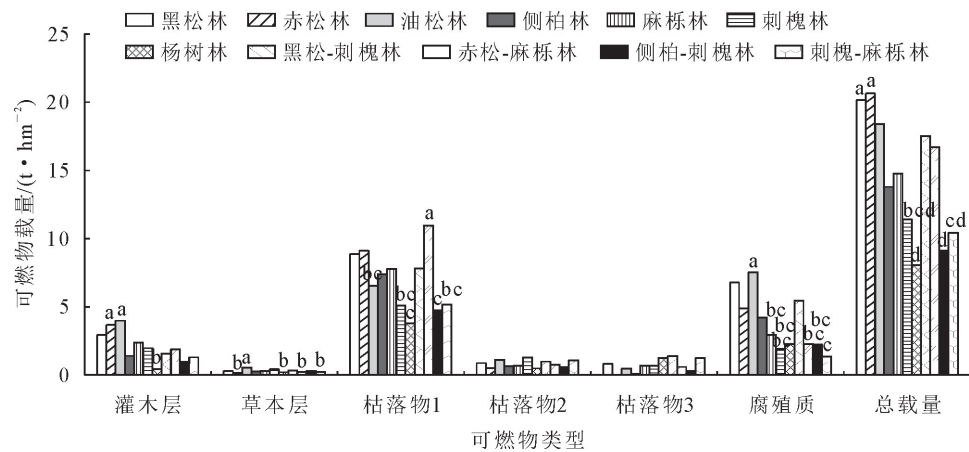


图 2 同一层次不同林分地表可燃物载量

Fig. 2 Surface combustible fuel load of different stands at the same level

表 2 不同林分地表可燃物含水率

Table 2 Surface fuel moisture content of different forest

林分	含水率 (%)			
	灌木层	草本层	枯落物	腐殖质
黑松林	122.47	189.15	28.28	33.78
赤松林	183.59	302.96	26.95	30.87
油松林	201.98	177.47	24.41	37.73
侧柏林	107.95	141.14	22.20	27.66
麻栎林	115.03	213.83	18.61	22.68
刺槐林	119.87	305.14	14.30	19.67
杨树林	228.93	361.64	15.70	17.35
黑松-刺槐林	116.09	197.33	21.86	27.85
赤松-麻栎林	117.54	231.15	20.80	25.49
侧柏-刺槐林	133.90	198.80	16.42	22.35
刺槐-麻栎林	129.50	300.85	15.24	18.07

杨树林腐殖质层含水率最高,为 40.73%,黑松林腐殖质层含水率最低,为 20.35%。

3.3 不同林分地表可燃物燃点、热值

单位质量可燃物完全燃烧时所放出的热量值叫作热值^[22]。热值越高,火行为的强度越大^[23-25]。易燃物质在被迫着火后,将外来火源移去仍能保持继续燃烧,且燃烧时间不少于 5 s 的最低温度称为燃点或者着火点^[26]。由表 3 可知,同一林分中,枯落物燃点<腐殖质燃点,枯落物热值>腐殖质热值。因此,枯落物比腐殖质发生火险的概率更大。枯落物中,油松燃点最低,为 265.67℃,黑松次之,为 268.81℃;刺槐-麻栎林燃点最高,为 283.15℃。油松林热值最高,为 21 911.78 J·g⁻¹,杨树林热值最低,为 15 432.05 J·g⁻¹。整体来看针叶林比阔叶林和混交林更易燃烧。这可能是因为针叶树种内含大量油脂类成分,引起燃烧的可能性更大。

3.4 地表可燃物载量与影响因子的相关性

将不同林分的可燃物总载量与立地因子(海拔、坡度)、林分因子(郁闭度、林分密度、平均树高、平均

胸径、平均枝下高和林龄)进行相关分析(图 3),发现海拔与油松林的可燃物总载量呈显著负相关,这可能是因为随着海拔的升高,油松林分密度变小,枯枝落叶凋落量少。海拔与麻栎林的可燃物总载量呈显著正相关。麻栎属阔叶树种,叶片面积较大,增加了与空气接触面,再加上海拔高的地区风力较大,加速了枯枝的凋落。油松林与侧柏林的可燃物总载量与坡度呈极显著负相关,随着坡度的增大,植物附着力降低且土壤趋于干燥、贫瘠,树木生长缓慢,植株细弱,枝、叶凋落量减少。麻栎林与郁闭度呈显著正相关。郁闭度增大,枝叶茂盛、自然整枝,使枯落物累积量增加,腐殖质载量也相应增加,高郁闭度环境适合耐阴草本植物的生长,同时郁闭环境使林内气温低,湿度大,降低了微生物对枯落物和腐殖质的降解能力。侧柏林与林分密度呈极显著正相关,林分密度大,林下调落物越多。油松林、黑松林、赤松林、刺槐林和侧柏林与平均树高呈显著或极显著正相关。油松林和麻栎林与平均枝下高呈显著或极显著正相关。赤松林、侧柏林、麻栎林、刺槐林和侧柏-刺槐林与平均胸径呈显著或极显著正相关。平均树高、平均枝下高越高,林下空间充足,空气流通好,灌木层和草本层载量相应增大。平均胸径越大,自身代谢加快,凋落枯枝增多。赤松-麻栎林与平均枝下高呈显著负相关,这可能是因为混交林的林分组成有关。油松林、黑松林与林龄呈极显著正相关,麻栎林、黑松-刺槐林与林龄呈显著正相关。刺槐林与林龄呈显著负相关。刺槐生长年限较短,林龄越大,刺槐枯死的可能性就越大,再加上地表微生物对枯落物和腐殖质的分解,因此林下可燃物的载量变小。

3.5 地表可燃物燃烧性的主成分分析

把载量、含水率、燃点、热值(X_1, X_2, X_3, X_4)4 个指标作为地表可燃物燃烧性研究的主要变量因子,基于主成分分析法对不同林分燃烧性进行综合评价。

表 3 不同林分地表可燃物燃点、热值

Table 3 Ignition points and calorific values of surface fuel of different forest

林分	枯落物		腐殖质	
	燃点/℃	热值/(J·kg ⁻¹)	燃点/℃	热值/(J·kg ⁻¹)
黑松林	268.81±7.09	19.35±1.56	311.42±11.54	9.48±3.22
赤松林	275.33±11.42	19.12±1.37	307.71±14.11	10.42±3.21
油松林	265.67±5.01	20.91±1.41	302.00±10.46	12.83±2.13
侧柏林	276.71±9.91	18.74±2.00	312.47±6.40	8.86±3.29
麻栎林	280.24±7.27	18.08±1.63	318.86±8.19	7.46±1.94
刺槐林	283.15±3.03	17.16±1.46	321.75±14.26	7.08±2.71
杨树林	278.41±5.19	15.43±1.30	326.23±4.64	6.46±1.80
黑松-刺槐林	275.94±7.65	19.13±2.44	307.79±11.64	8.81±3.43
赤松-麻栎林	277.27±4.13	18.70±2.66	316.82±29.67	8.367±2.48
侧柏-刺槐林	281.25±4.39	17.68±1.03	319.38±6.39	7.91±0.88
刺槐-麻栎林	285.25±4.47	16.87±1.51	324.70±10.79	12.83±2.13

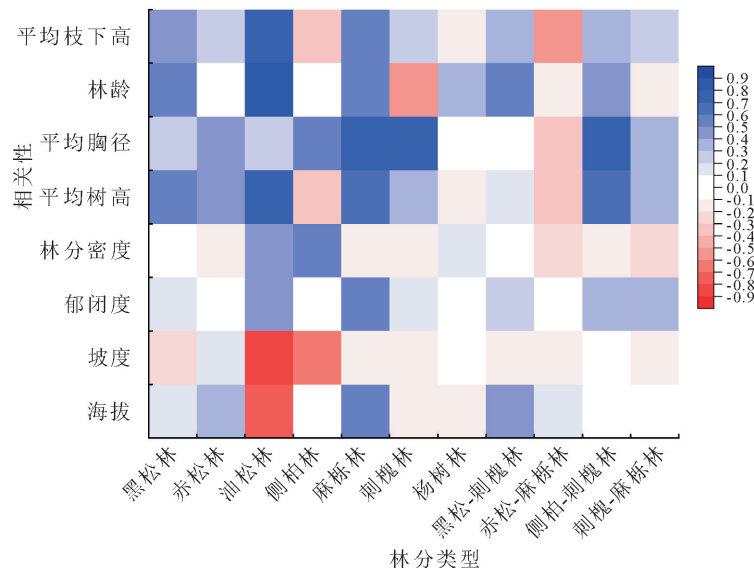


图 3 地表可燃物载量与林分因子及地形因子的相关性

Fig. 3 Correlation between surface fuel load and stand factor and terrain factor

从表 4 可以看出,枯落物中,主成分 1 的贡献率最大,为 76.94%,特征值为 3.078,说明主成分 1 起主导作用。在主成分 1 中载量、含水率、热值载荷值较高,且这 3 个指标对主成分 1 产生正向影响,说明载量、含水率、热值对于燃烧性的分析评价影响显著,燃点则产生负向影响。主成分 2 的贡献率为 15.754%,特征值为 0.630,其中载量载荷值较高,产生正向影响,含水率和热值产生负向影响。

从表 5 可以看出,腐殖质中主成分 1 的特征值为 3.769,贡献率达到 94.222%,载量、含水率、热值载荷值较高,燃点对腐殖质有负影响。

3.6 不同林分地表可燃物燃烧性的综合评价

结合所提取主成分的情况,构建地表可燃物燃烧性的评估模型。再以主成分所对应载荷值及特征值来获得相关的特征向量。

枯落物建立因子得分模型如下。

$$f_1 = 0.413X_1 + 0.546X_2 - 0.508X_3 + 0.523X_4 \quad (1)$$

$$f_2 = 0.859X_1 - 0.093X_2 + 0.494X_3 - 0.103X_4 \quad (2)$$

腐殖质层建立因子得分模型如下。

$$f = 0.521X_1 + 0.538X_2 - 0.529X_3 + 0.525X_4 \quad (3)$$

式中: f_1 、 f_2 为枯落物层主成分 1、2 的得分; f 为腐殖质主成分 1 的得分,以各主成分的贡献率为权重,计算得到各层综合评价函数。

$$F_{枯} = (76.943 \times f_1 + 15.754 \times f_2) / 92.697 \quad (4)$$

$$F_{腐} = 94.222 \times f / 94.222$$

通过 10 位专家打分确定各层所占权重:枯落物层权重为 0.73,腐殖质层权重为 0.27,带入下列公式

$$F_{总} = F_{枯} \times 0.73 + F_{腐} \times 0.27 \quad (5)$$

由表 6 可知,不同林分林下地表可燃物燃烧特

性强弱排序为:油松林>黑松林>赤松林>黑松-刺槐混交林>赤松-麻栎混交林>侧柏林>麻栎林>侧柏-刺槐林>刺槐林>刺槐-麻栎林>杨树林。油松林的燃烧特性最强,杨树林的燃烧特性最弱。

表 4 枯落物中不同指标的主成分分析
Table 4 Principal component analysis of different indicators in litter

研究指标	主成分 1	主成分 2
X_1	0.413	0.859
X_2	0.546	-0.093
X_3	-0.508	0.494
X_4	0.523	-0.103
特征值	3.078	0.630
贡献率(%)	76.943	15.754
累计贡献率(%)	76.943	92.697

表 5 腐殖质中不同指标的主成分分析
Table 5 Principal component analysis of the different metrics in humus

研究指标	主成分 1
X_1	0.521
X_2	0.538
X_3	-0.529
X_4	0.525
特征值	3.769
贡献率(%)	94.222
累计贡献率(%)	94.222

表 6 不同林分综合得分及排序
Table 6 Comprehensive score and ranking of different stands

林分	$F_{枯}$	$F_{腐}$	地表燃烧性 综合得分	燃烧 特性排序
黑松林	1.947	1.917	1.939	2
赤松林	1.344	1.731	1.449	3
油松林	1.637	4.038	2.285	1
侧柏林	0.199	0.524	0.287	6
麻栎林	-0.273	-1.042	-0.481	7
刺槐林	-1.577	-1.845	-1.649	9
杨树林	-2.049	-2.434	-2.153	11
黑松-刺槐林	0.804	1.155	0.899	4
赤松-麻栎林	1.011	-0.574	0.583	5
侧柏-刺槐林	-1.462	-1.149	-1.377	8
刺槐-麻栎林	-1.582	-2.321	-1.782	10

4 结论与讨论

4.1 结论

选取载量、含水率、燃点、热值 4 个能直接反应可燃物燃烧性的因子,来研究不同林分地表可燃物的燃烧特性,得出黑松的可燃物总载量最高,含水率低;杨树林的总载量最低,含水率最高。同一林分中,枯落物燃点<腐殖质燃点,枯落物热值>腐殖

质热值。各林分地表可燃物载量与地形因子中的海拔、坡度相关性较大,与林分因子中的林龄、平均树高、平均胸径相关性较大。不同林分地表可燃物燃烧特性中,油松林的燃烧特性最强,杨树林的燃烧特性最弱。

由于时间和试验条件的限制,未考虑灰分、粗脂肪、蔓延速度等因素对于燃烧性的影响,下一步还需要继续完善。此外,本地区还分布有其他林分,在以后研究中,可以对更多林分进行调查和分析,以完善对山东省不同林分类型地表可燃物的研究,从而制定更加科学合理的森林可燃物管理措施。

4.2 讨论

4.2.1 不同林分可燃物载量对其燃烧性的影响
森林地表可燃物是林火发生的基础,各种环境要素通过不同的方式影响着植物群落的生长,进而影响着可燃物的载量,不同层次可燃物载量影响着火行为特征^[26]。研究表明,可燃物的积累大大增加了火灾发生的概率^[27-29]。秋冬季节阔叶树种叶片大量凋落,地表枯落物累积量剧增,地表总载量显著增多,加上冬季气温低,风速大,空气相对干燥,容易引发森林火灾。本文研究了山东省 11 种林分地表可燃物载量的变化规律发现,油松林、黑松林、赤松林、侧柏林、麻栎林、刺槐林、杨树林、黑松-刺槐林、赤松-麻栎林、侧柏-刺槐林、刺槐-麻栎林的可燃物总量分别为 20.154、20.644、18.392、13.789、14.773、11.407、8.047、17.521、16.714、9.127、10.431 t·hm⁻²,针叶林和针阔混交林的地表总可燃物载量远高于 10 t·hm⁻²,阔叶林的地表总可燃物载量略高于 10 t·hm⁻²,阔叶混交林地地表总可燃物载量低于 10 t·hm⁻²,这可能是因为针叶树种体内含有大量油脂,该成分较为特殊,不易分解,随着树木生长,枯枝落叶逐渐积累,加上布设样地区域长期未进行可燃物清理,使针叶林地地表可燃物载量增加,具有较高的森林火灾隐患。因此我们要加强对林下可燃物尤其是针叶林林下可燃物的清理,通过清理采伐减少地表可燃物的载量^[30]。

相关结果分析表明,地表可燃物载量大小与地形因子和林分因子有密切关系^[31]。本研究结果表明,海拔、坡度、平均树高、平均胸径、平均枝下高、林龄是影响地表可燃物载量的主要因子,结果与王叁等^[32]基本一致。刘赵东^[33]认为北京地区油松林地地表可燃物总载量与海拔和坡度呈显著正相关关系,这与本研究结果相反,这是因为研究区油松多为成熟林,郁闭度小,长势缓慢,此外高海拔地区地表可燃物受风力影响得不到补充。坡度越大,土壤越干燥,地表可燃物稳固性差,出现缓坡聚集现象,使地

表总可燃物载量减少。苗杰等^[5]研究认为,烟台市赤松、黑松林地地表可燃物载量与树高无线性相关关系,本研究结果表明,平均树高与地表可燃物载量呈显著正相关,这与样地的选择有较密切关系。刺槐林中,平均胸径与林分密度中存在显著负相关,这与艾也博等^[34]的研究结果一致。国内有学者研究认为,地表可燃物载量与林龄密切相关^[32,35-36],本研究通过相关性分析得出林龄是影响可燃物载量的一个重要因子。

4.2.2 不同林分可燃物含水率、燃点、热值对其燃烧性的影响 可燃物热值的高低反映了林火强度,热值越高释放的能量越多,林火强度越大,燃烧速度越快^[37]。燃点高低是判断可燃物易燃性的重要指标。通过对 11 种林分可燃物含水率、燃点及热值的测定分析得出,油松的含水率低,热值最高,燃点最低,说明油松较其他树种易燃,这可能是由于油松枝干内树脂、木质素等化合物含量较高,不易溶解,使得含水率偏低、热值偏高^[38]。这与何晓等^[39]、贾斌英等^[11]研究针叶树种较阔叶树种有较高热值且针叶林比阔叶林易燃性强的结论一致。通过主成分分析法对不同林分的地表可燃物燃烧性进行了排序,得出油松林的燃烧特性最强,杨树林的燃烧特性最弱。这与解国磊等^[40]的研究结果一致。

参考文献:

- [1] 陈伯轩,郭妍,范佳乐,等. 黑龙江省 6 种乔木叶片热解特性及气体释放特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 76-84.
CHEN B X, GUO Y, FAN J L, *et al.* Pyrolysis and gas emissions characteristics of six tree species in Heilongjiang Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(1): 76-84. (in Chinese)
- [2] 解国磊, 马丙尧, 马海林, 等. 山东半岛昆嵛山地区主要森林类型可燃物垂直分布及影响因子[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 153-158.
XIE G L, MA B Y, MA H L, *et al.* Vertical distribution of the main forest types and influence factors in hilly region of Shandong[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(6): 153-158. (in Chinese)
- [3] 单延龙, 张敏, 于永波. 森林可燃物研究现状及发展趋势[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2004, 5(3): 264-269.
SHAN Y L, ZHANG M, YU Y B. Current situation and developing trend of the study on forest fuel[J]. Journal of Beihua University: Natural Science, 2004, 5(3): 264-269. (in Chinese)
- [4] 郑焕能, 骆介禹, 耿玉超. 几种林火强度计算方法的评价[J]. 东北林业大学学报, 1988, 32(5): 103-108.
- [5] 苗杰, 路兆军, 王淑惠, 等. 烟台市赤松-黑松林分结构因子对地表可燃物载量的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(9): 109-112.
- [6] 云丽丽, 王睿照, 刘晗琪, 等. 4 种主要林型可燃物载量及其燃烧性研究[J]. 辽宁林业科技, 2021, 48(5): 26-30.
- [7] ELLSWORTH L M, KAUFFMAN J B, REIS S A, *et al.* Repeated fire altered succession and increased fire behavior in basin big sagebrush-native perennial grasslands[J]. Ecosphere, 2020, 11(5): 3124.
- [8] COPPOLETT A M, MERRIAM K E, COLLINS B M. Post-fire vegetation and fuel development influences fire severity patterns in re-burns[J]. Ecol. Appl., 2016, 26(3): 686-699.
- [9] 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.
SHAN Y L, GUAN S, LIAO G X. Surface fuel loads of principal fuel types in Changbai Mountain forest region[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2006, 50(6): 34-36. (in Chinese)
- [10] CASALS P, VALOR T, BESALÚ A, *et al.* Understory fuel load and structure eight to nine years after prescribed burning in Mediterranean pine forests[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 362: 156-168.
- [11] 贾斌英, 刘薇. 辽阳地区森林地被可燃物载荷量的研究[J]. 辽宁林业科技, 2016, 43(4): 17-20, 46.
- [12] IVANOVA G A, KUKAVSKAYA E A, IVANOV V A, *et al.* Fuel characteristics, loads and consumption in scots pine forests of central Siberia[J]. Journal of Forestry Research, 2020, 31(6): 2507-2524.
- [13] 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.
- [14] 胡海清. 利用林分特征因子预测森林地被可燃物载量的研究[J]. 林业科学, 2005, 51(5): 96-100.
HU H Q. Predicting forest surface fuel load by using forest stand factors[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 51(5): 96-100. (in Chinese)
- [15] 王秋华, 俞新水, 李世友, 等. 森林可燃物的动态特征研究综述[J]. 林业调查规划, 2012, 37(5): 40-43.
WANG Q H, YU X S, LI S Y, *et al.* Study on dynamic characteristics of forest fuel[J]. Forest Inventory and Planning, 2012, 37(5): 40-43. (in Chinese)
- [16] 王刚, 毕湘虹, 骆介禹, 等. 大兴安岭几种主要可燃物化学组成与燃烧性[J]. 森林防火, 1996, 14(1): 22-24.
- [17] 祝必琴, 黄淑娥, 田俊, 等. 亚热带季风区不同林型可燃物理化性质及燃烧性研究[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(6): 1149-1154.
ZHU B Q, HUANG S E, TIAN J, *et al.* A Study on the physical-chemical properties and flammability of different forest types in semi-tropical monsoon area[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2011, 33(6): 1149-1154. (in Chinese)
- [18] 裴建元, 严员英, 叶清, 等. 10 种常绿阔叶树种理化性质的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(2): 16-21.
PEI J Y, YAN Y Y, YE Q, *et al.* Study on physical and chemical properties of 10 evergreen broad leaf tree species[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(2): 16-21. (in Chinese)
- [19] 李艳芹, 胡海清. 帽儿山主要树种燃烧性分析与排序[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(5): 34-38.

- LI Y Q, HU H Q. Sequence of combustibility of principal tree species in Maoershan mountain area, Heilongjiang Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(5): 34-38. (in Chinese)
- [20] 王雷,徐家琛,朱鹏飞,等.呼和浩特市主要园林树种理化性质及燃烧性研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2020,44(3):74-80.
- WANG L, XU J C, ZHU P F, *et al.* Physical and chemical properties and combustibility of predominant landscape tree species in Hohhot, China [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2020, 44(3): 74-80. (in Chinese)
- [21] 李旭,王秋华,张雨瑶.滇中火灾高发区15种木本植物燃烧性研究[J].林业调查规划,2016,41(2):62-68.
- LI X, WANG Q H, ZHANG Y Y. Studies on combustibility of 15 woody plants in the high fire risk area of central Yunnan [J]. Forest Inventory and Planning, 2016, 41(2): 62-68. (in Chinese)
- [22] 叶功富,高伟,陈增鸿,等.滨海沙地主要优势树种凋落物热值与养分特征[J].东北林业大学学报,2014,42(8):57-60.
- YE G F, GAO W, CHEN Z H, *et al.* Litter calorific value and nutrient characteristics of major dominant tree species in coastal sandy areas [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(8): 57-60. (in Chinese)
- [23] 李颖,严思晓,张秀芳,等.武夷山国家公园内4种森林类型地表可燃物热值特征比较[J].应用与环境生物学报,2020,26(6):1385-1391.
- LI Y, YAN S X, ZHANG X F, *et al.* Comparison of surface fuel calorific value characteristics of four forest types in Wuyishan national park [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(6): 1385-1391. (in Chinese)
- [24] XAVIER V D, PAULO P L. Fire spread in canyon [J]. International Journal of Wildland Fire, 2004, 13(3): 253-274.
- [25] STEPHENS S L, MOGHADDAS J J. Experimental fuel treatment impacts on forest structure, potential fire behavior, and predicted tree mortality in a California mixed conifer forest [J]. For. Ecol. Manage., 2005(215): 21-36.
- [26] 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.
- [27] 于忠奎.提高森林防火技术是确保森林资源安全的保证[J].科学种养,2016,11(3):311.
- [28] 田晓瑞,舒立福,王明玉.林火动态变化对我国东北地区森林生态系统的影响[J].森林防火,2005,23(1):5.
- TIAN X R, SHU L F, WANG M Y. Influences of fire regime changes on the forest ecosystem in northeast China [J]. Forest Fire Prevention, 2005, 23(1): 5. (in Chinese)
- [29] 闫想想,王秋华,缪秀丽,等.昆明西山林场5种可燃物的火行为研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2021,45(1):197-204.
- YANG X X, WANG Q H, MIU X L, *et al.* Fire behavior of five kinds of fuels in Xishan forest farm, Kunming City [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2021, 45(1): 197-204. (in Chinese)
- [30] 舒立福,王明玉,田晓瑞,等.关于森林燃烧火行为特征参数的计算与表述[J].林业科学,2004,50(3):179-183.
- SHU L F, WANG M Y, TIAN X R, *et al.* Calculation and description of forest fire behavior characters [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 50(3): 179-183. (in Chinese)
- [31] 赵璇,游玮,晁志,等.秦岭东段不同密度油松飞播林地地表可燃物载量及其影响因素研究[J].西北林学院学报,2022,37(1):159-165.
- ZHAO X, YOU W, CHAO Z, *et al.* Surface fuel loads and influencing factors on aerial seeding *Pinus tabulaeformis* forests with different densities in the eastern Qinling mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1): 159-165. (in Chinese)
- [32] 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.
- WANG S, NIU S K, LI D, *et al.* Vertical distribution of fuels in *Pinus yunnanensis* forest and related affecting factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(2): 331-337. (in Chinese)
- [33] 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.
- [34] 艾也博,寸应得,范雅倩,等.北京松山油松林地地表可燃物负荷量的影响因素[J].生态学杂志,2018,37(9):2559-2568.
- AI Y B, CUN Y D, FAN Y Q, *et al.* Factors affecting surface fuel load of *Pinus tabulaeformis* forest in Songshan, Beijing [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(9): 2559-2568. (in Chinese)
- [35] 周志权.辽东3种主要林型地被可燃物载量的研究[J].东北林业大学学报,2000,44(1):32-34.
- ZHOU Z Q. Loading capacity of fuels of ground cover for three major forest types in eastern Liaoning [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2000, 44(1): 32-34. (in Chinese)
- [36] 刘艳红,马炜.长白落叶松人工林可燃物碳储量分布及燃烧性[J].北京林业大学学报,2013,35(3):32-38.
- LIU Y H, MA W. Carbon distribution and combustibility of fuels in *Larix olgensis* plantations. [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(3): 32-38. (in Chinese)
- [37] XAVIER V D, PAULO P L. Fire spread in canyon [J]. International Journal of Wildland Fire, 2004, 13(3): 253-274.
- [38] 王立海,孙墨珑.小兴安岭主要树种热值与碳含量[J].生态学报,2009,29(2):953-959.
- WANG L H, SUN M L. Caloric values and carbon contents of dominant trees in Xiaoxing'anling forest region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 953-959. (in Chinese)
- [39] 何晓,包维楷,辜彬,等.中国高等植物干质量热值特点[J].生态环境,2007,16(3):973-981.
- HE X, BAO W K, GU B, *et al.* The characteristic of gross caloric values of higher plants in China [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(3): 973-981. (in Chinese)
- [40] 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 forest flammable fuel loads and combustion of the main forest types in mountainous area of Shandong [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 158-163. (in Chinese)