

网络出版时间:2022-04-20 09:35 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.10.007
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20220418.1012.012.html

火烧强度对山西太岳山油松林地表可燃物的影响

陈思帆¹,高 健²,高 敏¹,顾 泽¹,索奥丽¹,王忆文¹,刘晓东¹

(1 北京林业大学 森林资源生态系统过程北京市重点实验室,北京 100083;
2 北京市园林绿化局 森林防火事务中心,北京 102200)

【摘 要】 【目的】分析不同火烧强度下油松林地表可燃物负荷量特征及其与火后环境因子间的关系,并研究林下草本和灌木层的物种多样性特征,为有效管理油松林地表可燃物及探索火烧迹地林下植被早期更新提供依据。 【方法】以山西太岳山天然油松林火烧迹地为研究对象,根据不同火烧强度(轻度火烧、中度火烧和重度火烧)分别设置 3 块 20 m×20 m 的样地,以未过火样地为对照,统计各样地中未烧死木株数百分比、树木平均熏黑高度、平均胸径、林分密度等林分因子及坡向、坡度、海拔等地形因子;每块样地中再设置 2 m×2 m 和 1 m×1 m 的样方各 5 个,调查样方内未分解落叶、半分解枯叶、1 h 时滞枯枝、10 h 时滞枯枝等死可燃物负荷量和灌木、草本等活可燃物负荷量,并测量灌木和草本层的物种数、株数、盖度、密度和频度,计算物种多样性指数。利用多重比较(LSD)法分析不同强度火烧迹地地表可燃物负荷量和林下草本与灌木层的物种多样性,通过冗余分析(redundancy analysis, RDA)探讨各林分因子和地形因子对地表可燃物负荷量的影响。 【结果】 ①不同火烧强度对油松林地表可燃物总负荷量影响显著($P<0.05$),未分解落叶($P<0.05$)、半分解落叶($P<0.05$)、1 h 时滞枯枝($P<0.05$)、10 h 时滞枯枝($P>0.05$)等死可燃物负荷量随着火烧强度的增加呈下降趋势,草本($P<0.05$)、灌木($P<0.05$)等活可燃物负荷量则呈先下降后上升趋势。 ②RDA 分析表明,半分解落叶可燃物负荷量与未烧死木株数百分比呈正相关,与平均熏黑高度呈负相关;1 h 时滞枯枝、草本可燃物负荷量与平均胸径呈显著负相关;未分解落叶可燃物负荷量与坡度呈正相关,灌木可燃物负荷量与海拔呈正相关。 ③不同火烧强度对油松林草本层 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数均有显著影响($P<0.05$),但对丰富度指数影响不显著($P>0.05$),上述指数均以轻度火烧迹地最高;不同火烧强度对灌木层 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数、丰富度指数均有显著影响($P<0.05$),且均以中度火烧迹地最高。 【结论】中、重度火烧可以有效降低油松林地表可燃物负荷量;不同火烧强度干扰下,林分、地形因子共同对地表可燃物负荷量产生影响;轻度火烧可以促进草本层的物种多样性,中度火烧可以促进灌木层的物种多样性。因此,对地表可燃物进行合理管理,可以降低森林火灾风险,并可促进火烧迹地林下植被的初期恢复。

【关键词】 火烧强度;油松林;地表可燃物;可燃物负荷量;物种多样性

【中图分类号】 S762 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-9387(2022)10-0068-10

Effects of fire intensity on surface fuel of *Pinus tabuliformis* in Taiyue Mountain, Shanxi Province

CHEN Sifan¹, GAO Jian², GAO Min¹, GU Ze¹, SUO Aoli¹, WANG Yiwen¹, LIU Xiaodong¹

(1 Beijing Key Laboratory for Forest Resources and Ecosystem Processes, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2 Forest Fire Prevention Affairs Center of Beijing Municipal Forestry and Parks Bureau, Beijing 102200, China)

Abstract: 【Objective】The characteristics of surface fuel load and its relationship with post-fire environmental factors in *Pinus tabuliformis* under different fire intensities were analyzed and the species diversity characteristics of understory herb and shrub layers were studied to provide basis for effective manage-

【收稿日期】 2021-11-12
【基金项目】 国家重点研发计划项目(2020YFC1511601)
【作者简介】 陈思帆(1997—),女,河南商丘人,在读硕士,主要从事森林防火研究。E-mail:1251748499@qq.com
【通信作者】 刘晓东(1969—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,主要从事森林防火研究。E-mail:xd-liu@bjfu.edu.cn

ment of surface fuel in *P. tabuliformis* and early regeneration of understory vegetation in burned areas. 【Method】 Three plots of 20 m×20 m were set up according to different fire intensities (light fire, moderate fire and severe fire) in the burned area of natural *P. tabuliformis* in Taiyue Mountain, Shanxi using unburned area as control. Stand factors including percentage of unburned trees, average blackened height, average breast diameter and stand density and topographic factors including slope aspect, slope and altitude were determined. Five subplots of 2 m×2 m and 1 m×1 m were set up in each plot. Dead combustible load indexes of undecomposed fallen leaves, semi-decomposed fallen leaves, 1 h lag dead branch and 10 h lag dead branch and living combustible load indexes of shrubs and herbs were investigated. Species number, plant number, coverage, density and frequency of shrub and herb layers were measured, and the species diversity index was calculated. Multiple comparison (LSD) method was used to analyze the surface fuel load and species diversity of understory herb and shrub layers in sites with different intensities. The redundancy analysis (RDA) was used to explore the effects of stand factors and topographic factors on the loading of surface fuel. 【Result】 ① Different fire intensities had significant effects on the total surface fuel load of *P. tabuliformis* ($P<0.05$). The combustible material loads of undecomposed fallen leaves ($P<0.05$), semi-decomposed fallen leaves ($P<0.05$), 1 h lag dead branch ($P<0.05$) and 10 h lag dead branch ($P>0.05$) showed a downward trend with the increase of fire intensity, while the combustible material load of herbs ($P<0.05$) and bushes ($P<0.05$) showed a trend of decreasing first and then increasing. ② Redundancy analysis (RDA) showed that the combustible material load of semi-decomposed fallen leaves was positively correlated with the percentage of unburned trees, and negatively correlated with the average blackened height. The 1 h lag dead branch load and herbal fuel load of *P. tabuliformis* were negatively correlated with the average breast diameter. The combustible material load of undecomposed fallen leaves was positively correlated with slope and that of bushes was positively correlated with altitude. ③ The influence of different fire intensities on Shannon-Wiener index and Pielou evenness index of herb layer of *P. tabuliformis* was significant ($P<0.05$), while there was no significant difference on Richness index ($P>0.05$), with the highest indexes in light fire sites. The influence of different fire intensities on Shannon-Wiener index, Pielou evenness index and Richness index of shrub layer of *P. tabuliformis* was all significant ($P<0.05$), with the highest values in moderate fire sites. 【Conclusion】 Moderate and severe fire effectively reduced the surface fuel load of *P. tabuliformis*. Forest stand and topographic factors had effects on the loading of surface fuel under different fire intensities. Light fire promoted species diversity in herb layer and moderate fire promoted species diversity in shrub layer. Therefore, reasonable management of surface fuel under different fire intensities can reduce the risk of forest fire and promote the initial recovery of understory vegetation in burned areas.

Key words: fire intensity; *Pinus tabuliformis*; surface fuel; fuel load; species diversity

近年来,随着全球气候持续变暖,森林火灾频发,给森林生态系统造成严重影响^[1-3]。火行为特征的重要指标之一是火焰高度,是判断火烧强度的重要依据,火焰高度在树木上形成的外在属性因子——熏黑高度,可以间接反映火烧强度^[4-5]。森林火灾往往是由地表火逐渐蔓延形成的,轻、中度地表火可以改善林分结构,促进物质循环;重度地表火则会破坏林分结构和功能,打破生态平衡^[6-7],因此了解不同火烧强度下森林地表可燃物特征,以及林分、地形因子对地表可燃物负荷量的共同影响,对合理

调控地表可燃物和火后林下植被初期演替阶段的研究具有重要意义。

地表可燃物负荷量是决定森林燃烧的重要因子^[8]。闫平等^[9]比较了过火与未过火林地之间地表可燃物负荷量的变化,发现林火可以降低各林层的负荷量。杨达等^[10]通过建立数学模型估算不同火烧强度下地表死可燃物负荷量,发现随着火烧强度的增加地表死可燃物负荷量显著降低。田野等^[11]通过研究冀北辽河源油松林火烧迹地地表死可燃物特征,同样认为火烧强度的增加可以降低地表死可

燃物负荷量。因此,对于火烧强度增加可以有效降低地表死可燃物负荷量已有共识,但需要进一步探讨不同火烧强度对地表总可燃物负荷量的影响。

在地表可燃物负荷量影响因子研究方面, Lydersen 等^[12] 通过研究针叶林地表可燃物与冠层结构之间的关系并建立预测模型,发现郁闭度是主要的预测因子。周润青等^[13] 对大兴安岭南多种林分地表可燃物的负荷量进行研究,认为平均树高和平均胸径等是影响地表可燃物负荷量的主要因子。艾也博等^[14] 对北京松山自然保护区油松林地表可燃物与地形、林分因子进行逐步回归分析,认为地表活可燃物负荷量与海拔呈显著正相关,地表死可燃物负荷量与郁闭度和林分密度呈显著正相关。此外,不同火烧强度也是影响地表可燃物变化的重要因子。韩杰等^[15] 研究云南松火烧迹地更新早期草本层特征后认为,火烧强度和地形因子、林分因子共同构成了火烧后早期群落草本层物种组成的主要控制因子。而 Collins 等^[16] 对火后美国西部针叶林地表可燃物负荷量特征进行的研究认为,林分因子是地表可燃物负荷量的主要影响因子,但火烧强度对其影响不大,可能是因为还受到地形等环境因子的共同作用。因此需要深入研究地表可燃物负荷量特征与不同火烧强度、林分因子和地形因子之间的复杂关系,为采取针对性管理措施提供理论依据。林下草本和灌木层的物种多样性是衡量火后林下植被恢复的重要指标之一^[17]。林火干扰的强度处于轻度水平时,草灌层出现一些物种更替,可以维持林下植被的物种多样性^[18]; Ray 等^[19] 认为,中度火烧强度有利于乔、灌木幼苗更新,使林下植被的物种多样性达到最高。重度火烧会严重破坏林分结构,导致更新的种类仅为喜光耐旱的草本^[20]。Hart 等^[21] 认为,在火烧迹地恢复初期,草本和灌木层的物种多样性会发生显著变化。因此,研究火后初期林下植被的物种多样性,可以揭示森林群落草本和灌木层的更新特征,为后续火烧迹地林下植被恢复提供科学依据。

油松(*Pinus tabulaeformis*)是华北地区的主要造林树种之一,在水土保持、气候调节等方面都发挥着重要作用^[22]。油松林分布面积广,特别是在山西等地具有很强的代表性,是典型的针叶林分。但油松球果、针叶中富含油脂,属易燃树种,燃烧后火势蔓延迅速,容易引发大面积高强度森林火灾^[20]。研究油松林火烧迹地的地表可燃物特征,对于采取合理调控措施、掌握火后林下植被早期更新规律具有

重要意义,但同时考虑不同火烧强度下油松林地表可燃物负荷量特征和林分、地形因子共同对地表可燃物负荷量造成的间接影响,以及分析不同火烧强度下林下植被物种多样性变化的相关研究还相对较少。因此,本研究根据不同火烧强度(轻度火烧、中度火烧、重度火烧)布设样地,从地表可燃物负荷量、林分因子和地形因子对地表可燃物负荷量的共同影响以及林下植被物种多样性 3 个方面,探究山西太岳山北麓油松天然林地表可燃物特征,以期对地表可燃物的科学管理和火烧迹地植被早期恢复研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省太岳山北麓,地理坐标为 $112^{\circ}11' \sim 112^{\circ}24'E$, $36^{\circ}41' \sim 36^{\circ}50'N$, 平均海拔约 1 250 m, 该地区气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 $8.6^{\circ}C$, 年平均降水量 600~650 mm, 降雨主要集中在 7—9 月,无霜期 120~155 d。区内地貌复杂、沟壑纵横,土壤类型以石灰岩、花岗岩发育而成的棕壤、褐土为主。主要乔木树种有油松和蒙古栎(*Quercus mongolica*)等,灌木主要有绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、多花胡枝子(*Lespedeza floribunda*)等,草本主要有细叶薹草(*Carex duriuscula* subsp. *stenophylloides*)、小红菊(*Chrysanthemum chanetii*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等^[23]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与调查 2019 年 3 月 29 日山西省长治市沁源县境内发生了一场森林火灾,火烧后的植被、土壤、环境均发生了显著变化。火烧强度根据树木平均熏黑高度占树木平均高度的比值、未烧死木所占比例以及冠层存活情况进行划分:(1)轻度火烧。树木平均熏黑高度占林木平均高度的 $1/3$ 以下,未烧死木占总株数的 70% 以上,冠层大部分存活。(2)中度火烧。树木平均熏黑高度占林木平均高度的 $1/3 \sim 2/3$,未烧死木占总株数的 30%~70%,冠层少部分存活,中下部叶子发黄或枯死。(3)重度火烧。树木平均熏黑高度占林木平均高度的 $2/3$ 以上,未烧死木占总株数的 30% 以下,冠层全部死亡,无枯死叶^[24]。

2021 年 7—8 月,以研究区内油松天然林为对象,根据不同火烧强度(轻度火烧、中度火烧和重度火烧),分别设置 3 块 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的标准样地,另在

火烧迹地周围未过火油松林设置对照样地 3 块,对照样地树木平均熏黑高度为 0,未烧死木占总株数的 100%。记录样地的林分因子、地形因子以及火烧强度等信息,具体详见表 1。

表 1 不同火烧强度油松天然林样地的基本概况

Table 1 Basic survey of sample plots of *Pinus tabulaeformis* natural forest with different fire intensities

火烧强度 Fire intensity	样地号 Plot No.	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	坡向/(°) Slope aspect	林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density	平均 胸径/cm Average breast diameter	郁闭度 Canopy density	平均 树高/m Average tree height	未烧死木 株数百分比/% Percentage of unburned trees	平均熏黑 高度/m Average blackened height
对照 Unburned	1	1 213	30	330	1 766.67	10.54	0.60	7.06	100.00	0.00
	2	1 189	29	29	1 822.22	14.95	0.65	7.62	100.00	0.00
	3	1 183	21	26	1 400.00	13.47	0.55	6.63	100.00	0.00
轻度 Light fire	4	1 195	32	16	1 511.11	13.53	0.60	7.87	97.06	1.04
	5	1 189	35	12	2 000.00	12.43	0.75	7.74	90.00	1.70
	6	1 183	29	304	1 366.67	14.71	0.45	7.59	94.74	0.85
中度 Moderate fire	7	1 382	23	42	1 050.00	17.45	0.30	9.47	61.54	5.52
	8	1 365	20	85	1 250.00	14.60	0.45	10.93	64.00	5.76
	9	1 371	22	35	1 150.00	16.03	0.35	10.20	68.00	5.64
重度 Severe fire	10	1 282	20	25	950.00	8.89	0.20	6.62	2.38	6.62
	11	1 273	23	74	700.00	11.05	0.15	7.05	0.00	7.05
	12	1 267	21	60	825.00	9.97	0.20	6.83	0.00	6.83

在每个标准样地四角距边缘 1 m 处及中央各设 1 个 2 m×2 m 的样方,同时 在每个 2 m×2 m 的样方内设置 1 个 1 m×1 m 的样方^[25-26]。调查地表可燃物时分为死可燃物和活可燃物,死可燃物为地表枯枝落叶,活可燃物为地表草本和灌木。采用全收获法调查地表可燃物负荷量,在 2 m×2 m 的样方内将灌木全部割除称量鲜质量;在 1 m×1 m 的样方内按照草本、未分解落叶、半分解枯叶、1 h 时滞枯枝(直径<0.64 cm)、10 h 时滞枯枝(0.64 cm≤直径≤2.54 cm)的顺序全部收集并分别称取鲜质量^[27-28]。由于研究样地内的 100 h 时滞枯枝、1 000 h 时滞枯枝极少,因此本研究仅对 1 h 时滞枯枝和 10 h 时滞枯枝进行了分析。对每个样方内的每种可燃物分别取样约 200 g,带回实验室测定含水率。调查林下草本和灌木层物种多样性时,先在 2 m×2 m 的样方内调查灌木的种类、株数、盖度和频度,再在 1 m×1 m 的样方内调查草本的种类、株数、盖度和频度,最后计算草本和灌木层物种多样性指标。

1.2.2 地表可燃物负荷量计算 将地表可燃物样品放入烘箱内,在 105 ℃条件下持续烘干 48 h 至质量恒定,用电子天平称取地表可燃物样品的绝干质量,计算不同种类地表可燃物样品的含水率。再利用以下公式计算不同种类地表可燃物负荷量,最后对 5 个样方内相同种类的地表可燃物负荷量求平均,即可得到样地中各类别地表可燃物负荷量^[13]。

$$F=\frac{(1-\text{可燃物样品含水率})\times W}{100A}。$$

式中:F 为可燃物负荷量(t/hm²),W 为样方中调查

的可燃物鲜质量(g),A 为调查可燃物所在样方的面积(m²)。

随后用 SPSS 22 软件中的多重比较(LSD)方法,分析不同火烧强度油松林样地中地表可燃物负荷量的差异,采用邓肯(Duncan)多重极差检验法在 P=0.05 水平上进行差异显著性检验,最后在 Origin 2015 中绘图。

1.2.3 环境因子与地表可燃物负荷量的关系分析

运用 R3.6.1 中 Vegan 程序包,对不同火烧强度下地表可燃物负荷量与林分因子(未烧死木株数百分比、平均熏黑高度、平均胸径、林分密度)和地形因子(坡向、坡度、海拔)的关系进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),通过去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)排序确定统计方法,即当 DCA 分析得出 Axis lengths (max) 小于 3.0,则采用冗余分析;若 Axis lengths (max) 大于 4.0,则采用典范对应分析(CCA);当第 1 排序轴为 3.0~4.0,则 2 种方法都可以选用^[11]。分析之前,需要对数据进行正态分布及方差齐性检验,若不满足该前提条件,应对数据进行自然对数转换处理^[20]。RDA 分析初次得到的 R² 值需要校正,通过执行命令“RsquareAdj()”实现。随后进行 anova 置换检验,在 P=0.05 水平上对 RDA 排序轴的显著性进行检验,最后在 R3.6.1 中绘图。

1.2.4 林下植被物种多样性计算 草本和灌木层物种多样性采用 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数和丰富度指数(指样地内灌木或草本的数量)进行评价^[29]。其中 Shannon-Wiener 指数、Pielou

均匀度指数的计算公式为：

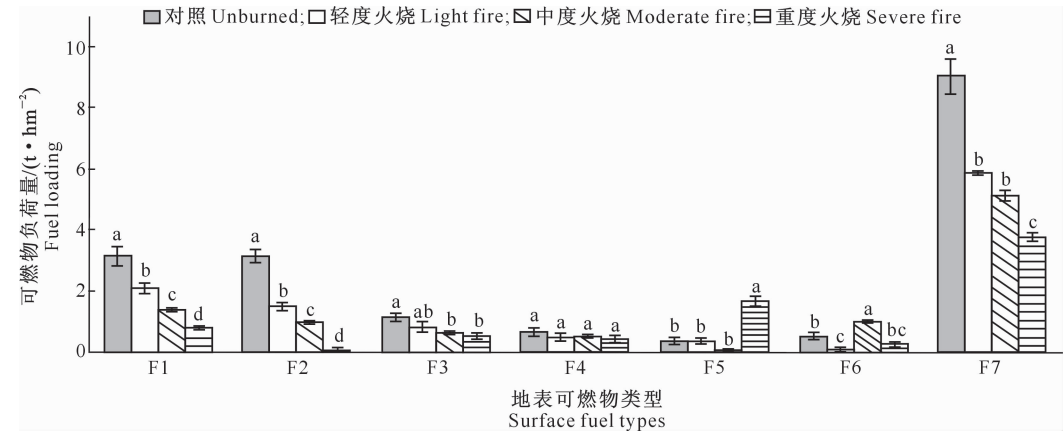
$$H=-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i;$$
$$E=H/\ln S;$$

P_i =(相对密度+相对频度+相对盖度)/3。
式中： H 为 Shannon-Wiener 指数， S 为丰富度指数， P_i 为灌木或草本层物种 i 的相对重要值， E 为 Pielou 均匀度指数。采用 SPSS 22 软件中的多重比较(LSD)方法分析不同火烧强度油松林下植被物种

的多样性特征，采用邓肯(Duncan)多重极差检验法在 $P=0.05$ 水平上进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 火烧强度对油松林地表可燃物负荷量的影响
对不同火烧强度下油松林地表可燃物负荷量进行调查，运用多重比较分析未分解落叶、半分解落叶、1 h 时滞枯枝、10 h 时滞枯枝及草本、灌木可燃物负荷量的变化特征，结果如图 1 所示。

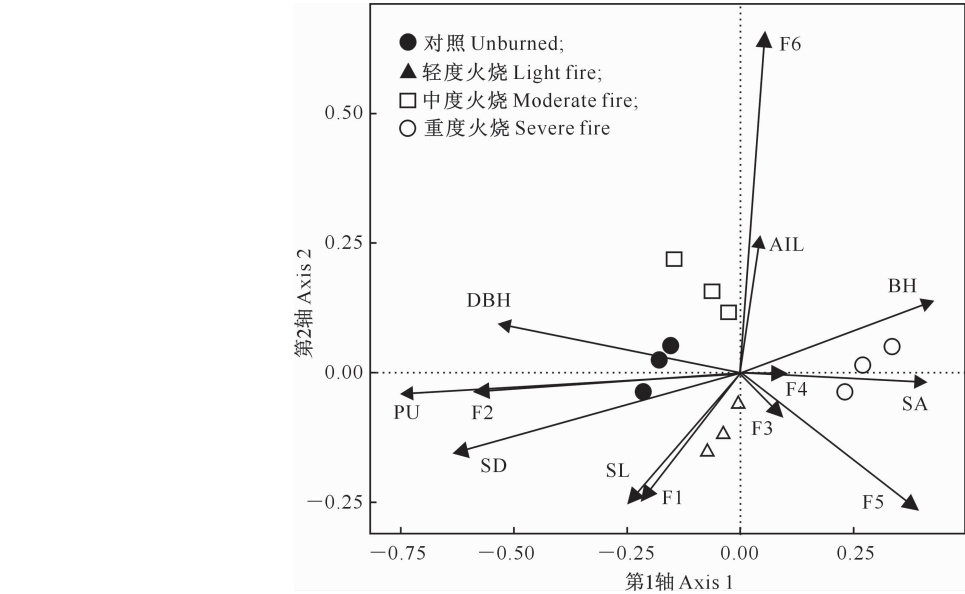


F1. 未分解落叶;F2. 半分解落叶;F3. 1 h 时滞枯枝;F4. 10 h 时滞枯枝;F5. 草本;F6. 灌木;F7. 地表总可燃物;图 2 同。
图柱上标不同小写字母表示不同火烧强度间差异显著($P<0.05$)
F1. Undecomposed fallen leaves;F2. Semi-decomposed fallen leaves;F3. 1 h lag dead branch;F4. 10 h lag dead branch;
F5. Herbal;F6. Bushes;F7. Surface total combustibles. Fig. 2 is the same.
Different lowercase letters indicate significant differences among different fire intensities ($P<0.05$)

图 1 不同火烧强度下油松天然林各类地表可燃物负荷量的比较

Fig. 1 Comparison of various surface fuel loadings of *Pinus tabulaeformis* natural forest under different fire intensities
由图 1 可知，与对照相比，随着火烧强度增加，地表总可燃物负荷量均显著下降($P<0.01$)，其中对照的总可燃物负荷量为 9.07 t/hm^2 ，显著高于其他样地。随着火烧强度的增加，未分解落叶可燃物负荷量显著降低($P<0.05$)，重度火烧较对照降低了 2.36 t/hm^2 ；半分解落叶可燃物负荷量也呈显著下降趋势($P<0.05$)，其中对照(3.15 t/hm^2)是重度火烧(0.08 t/hm^2)的 39.38 倍；1 h 时滞枯枝可燃物负荷量均有所降低，其中中、重度火烧与对照差异显著($P<0.05$)，以重度火烧的可燃物负荷量最少，仅为 0.54 t/hm^2 ；不同火烧强度之间，10 h 时滞枯枝可燃物负荷量为 $0.68\sim0.45 \text{ t/hm}^2$ ，相互间均无显著差异($P>0.05$)。草本可燃物负荷量表现出重度火烧(1.69 t/hm^2)>对照(0.39 t/hm^2)>轻度火烧(0.37 t/hm^2)>中度火烧(0.07 t/hm^2)的变化趋势，对照与轻、中火烧强度间无明显差异，但均与重度火烧强度之间存在显著差异($P<0.05$)；灌木可燃物负荷量在不同火烧强度之间同样具有一定差异($P<0.05$)，但变化趋势不同，表现为中度火烧(1.01 t/hm^2)>对照(0.53 t/hm^2)>重度火烧(0.28 t/hm^2)>轻度火烧(0.10 t/hm^2)。整体而言，随着火烧强度的加重，死可燃物和总可燃物负荷量呈下降趋势，活可燃物负荷量呈先下降后上升的趋势。
2.2 油松林火烧迹地中的环境因子与地表可燃物负荷量的关系
通过去趋势对应分析确定统计方法，因为 Axis lengths (max)= $0.62<3$ ，故选择 RDA 进行分析。对地表可燃物负荷量矩阵与所有火后环境因子进行冗余分析(RDA)，通过执行 ordiR2step 向前选择，筛掉郁闭度和平均树高因子，最终选择未烧死木株数百分比、平均熏黑高度、平均胸径、林分密度、坡向、坡度、海拔等 7 个指标的解釋变量矩阵。RDA 分析结果总体显著($P<0.05$)，校正解釋率为 65.64%。经置换检验可知，第 1 轴($P=0.019$)与所有排序轴具有显著差异($P<0.05$)，即表示环境因

子与地表可燃物负荷量之间存在线性关系。根据分 析结果绘制冗余分析(RDA)排序图,结果见图 2。



PU. 未烧死木株数百分比;BH. 平均熏黑高度;DBH. 平均胸径;SD. 林分密度;SA. 坡向;SL. 坡度;AIL. 海拔
PU. Percentage of unburned trees;BH. Average blackened height;DBH. Average breast diameter;SD. Stand density;
SA. Slope aspect;SL. Slope;AIL. Altitude

图 2 不同火烧强度油松天然林地表可燃物负荷量与环境因子的冗余分析(RDA)排序图
Fig. 2 Redundancy analysis (RDA) ordination diagram of surface fuel loadings and environmental factors in *Pinus tabulaeformis* natural forests with different fire intensities

由图 2 可知,对第 1 轴影响最大的是未烧死木株数百分比,沿着未烧死木株数百分比箭头的连线方向,样地沿“重度—中度—轻度—对照”梯度变化,说明未烧死木株数百分比可以代表火烧强度对地表可燃物负荷量的影响。半分解落叶可燃物负荷量(F2)与未烧死木株数百分比箭头的连线几乎重合,表明二者呈较强的正相关;半分解落叶可燃物负荷量与平均熏黑高度箭头连线的夹角呈钝角,显示二者显著负相关;1 h 时滞枯枝(F3)、草本可燃物负荷量(F5)与平均胸径箭头连线的夹角将近 180°,表明

其呈显著负相关;未分解落叶可燃物负荷量(F1)与坡度箭头连线的夹角较小,说明二者呈显著正相关;灌木可燃物负荷量(F6)与海拔箭头连线的夹角也较小,表明二者也呈显著正相关。

2. 3 不同火烧强度对油松林林下植被物种多样性的影响

由表 2 可知,火烧后林下植被草本层和灌木层的物种数均发生了变化,对照样地中的草本有 18 种,在轻度火烧条件下增加到了 21 种;灌木在中度火烧下最多,有 7 种,相比对照增加了 3 种。

表 2 不同火烧强度油松天然林林下植被物种数的比较

Table 2 Species number of understory vegetation of <i>Pinus tabulaeformis</i> natural forests under different fire intensities				
林层 Forest layer	对照 Unburned	轻度火烧 Light fire	中度火烧 Moderate fire	重度火烧 Severe fire
草本层 Herbal layer	18	21	17	19
灌木层 Bushy layer	4	4	7	4

为了进一步对火烧迹地中草本层和灌木层的物种多样性进行分析,分别计算了多样性指数,结果如表 3 所示。由表 3 可知,火烧强度对草本层 Shannon-Wiener 指数具有显著影响($P<0.05$),其中对照样地、中度火烧样地与轻度和重度火烧样地之间均具有显著差异($P<0.05$);Pielou 均匀度指数在不同火烧强度样地之间也具有一定差异,其中轻度火烧与对照和中度火烧样地之间具有显著差异

($P<0.05$);丰富度指数与 Shannon-Wiener 指数的变化趋势相同,均表现为轻度火烧>重度火烧>中度火烧,但各样地之间均无显著差异($P>0.05$)。不同火烧强度对灌木层 Shannon-Wiener 指数也具有一定影响,其中中度火烧与对照、轻度火烧、重度火烧样地之间均具有显著差异($P<0.05$);Pielou 均匀度指数在中度火烧下达到最大值,并且与轻度火烧样地之间具有显著差异($P<0.05$);丰富度指

数表现为中度火烧>重度火烧>轻度火烧,并且中
度火烧与其他火烧强度之间均具有显著差异($P<$

表 3 不同火烧强度下油松天然林林下植被的物种多样性

Table 3 Species diversity of understory vegetation of <i>Pinus tabulaeformis</i> natural forests under different fire intensities				
林层 Forest layer	火烧强度 Fire intensity	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	丰富度指数 Richness index
草本层 Herbal layer	对照 Unburned	2.76±0.05 b	1.11±0.02 b	11.00±0.72 a
	轻度火烧 Light fire	3.19±0.10 a	1.25±0.05 a	13.00±0.58 a
	中度火烧 Moderate fire	2.74±0.14 b	1.11±0.02 b	10.67±0.88 a
	重度火烧 Severe fire	3.13±0.03 a	1.17±0.02 ab	12.67±0.93 a
灌木层 Bushy layer	对照 Unburned	1.67±0.12 b	1.33±0.21 ab	3.67±0.33 b
	轻度火烧 Light fire	1.38±0.44 b	1.05±0.29 b	3.67±0.33 b
	中度火烧 Moderate fire	3.55±0.02 a	1.90±0.04 a	6.33±0.33 a
	重度火烧 Severe fire	1.89±0.18 b	1.36±0.13 ab	4.00±0.00 b

注:同列数据后标不同小写字母表示同一林层不同火烧强度间差异显著($P<0.05$)。
Note:Different lowercase letters indicate significant differences among different fire intensities in same forest layer ($P<0.05$).

3 讨论与结论

森林地表可燃物是引起森林火灾的重要因素之一,因此减少森林地表可燃物负荷量是降低林火发生的重要途径。本研究分析了山西省太岳山天然油松林下地表可燃物在不同火烧强度下的动态变化,发现随着火烧强度的增加,地表总可燃物负荷量呈下降趋势,这与周文昌等^[30]的研究结果一致。半分解落叶可燃物负荷量随着火烧强度增加显著减少,因为中度、重度火烧后地表死可燃物被大量烧光,林内无枝叶遮挡会使风速增大,易导致主干残留的少许枯枝落叶脱落,从而形成较少的半分解落叶可燃物负荷量^[31]。地表活可燃物负荷量随火烧强度增加而上升,是由于中度和重度火烧会改变森林原有树种组成,破坏草本和灌木层结构的稳定性,导致中度火烧迹地中的喜阳灌木和重度火烧迹地中的旱生草本显著增多,从而使得中度火烧样地中的灌木可燃物负荷量和重度火烧样地中的草本可燃物负荷量显著增多^[29]。

地表可燃物负荷量与火烧迹地中的林分、地形因子之间存在复杂关系。本研究发现,未烧死木株数百分比对地表可燃物负荷量影响最大。未烧死木株数百分比体现了火烧强度的大小,随着火烧强度的降低,半分解落叶可燃物负荷量显著增加,这与杨达等^[10]的研究结果一致。林分密度与草本可燃物负荷量呈显著负相关,林分密度越小,林内光照越强,林下草本生长越旺盛,因此草本负荷量也随之增加,这与艾也博等^[14]的结论相一致。林木平均胸径越大,在自然生长过程中越容易在地表积累大量枯枝落叶,这不利于草本的生长,但会导致半分解落叶可燃物负荷量增多,草本可燃物负荷量降低,这与前

人的观点^[13]一致。未分解落叶可燃物负荷量与坡度呈正相关,这是由于随着坡度的增加,土壤相对变得贫瘠和干燥,导致地表死可燃物的分解速率降低,因此未分解落叶可燃物负荷量增多^[32]。灌木可燃物负荷量与海拔呈显著正相关,这可能是因为海拔较高的地区气温较低,林木生长量也较低,林内光照充足,因此灌木生长比较旺盛^[14]。本研究结果表明,在不同火烧强度下,地表可燃物负荷量的变化与林分因子和地形因子均具有显著关系,这与韩杰等^[15]的观点一致。

分析火烧迹地中林下植被物种多样性的变化,对于了解过火林地草本和灌木层植被初期恢复特征具有重要意义。轻度火烧迹地中草本数量最多,因此对应的 Shannon-Wiener 指数和物种丰富度指数最大,因为轻度火烧对林地危害小,火后少量裸地有利于种子发芽,这与王鼎等^[33]的观点一致。同时轻度火烧后林内郁闭度相对较高,冠层大部分存活,不利于灌木层恢复更新,从而导致灌木层物种多样性指数偏低^[18]。中度或重度火烧会改变森林原有树种组成,破坏草本和灌木层结构的稳定性,为一些外来物种提供适宜的生长条件,从而导致中度和重度火烧迹地中的旱生草本、喜阳灌木显著增多^[34]。中度火烧的林下植被灌木层物种多样性显著高于其他火烧迹地,可能是因为乔木层郁闭度大幅降低,灌木层优先得到了更多的光照,原有适应性强的物种仍然存在,但因环境异质性的增加,又有大量外来物种侵入,短时间内可以快速提升灌木层的 Shannon-Wiener 指数和丰富度指数,在优势种还未形成之前,Pielou 均匀度指数也很高,这与前人的研究结果^[35-36]相似。重度火烧对群落结构破坏严重,较短时间内植被数量难以恢复到原来的水平,大量喜光

植物侵入,这可能是导致草本层重度火烧迹地的多样性指数较中度火烧迹地高的原因^[24]。由于新增的草本重要值相对较低,随着乔木幼苗生长的恢复,新增的草本会被原先的植被所取代,后续乔木更新给灌木和草本层结构带来的变化,还有待进一步研究^[37]。

对山西太岳山油松林火烧迹地的研究表明,不同火烧强度对油松林地表可燃物总负荷量产生了显著影响;在不同火烧强度的干扰下,林分、地形因子均对地表可燃物负荷量存在明显影响;不同火烧强度对草本层 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数具有一定影响,其中以轻度火烧强度的影响最为显著,但火烧强度对丰富度指数均无显著影响;中度火烧强度对灌木层 Shannon-Wiener 指数和丰富度指数均具有显著影响。其中轻、中度火烧由于烧死了部分林木,对林分进行了适当干扰,有效降低了竞争排斥效应,促进了林内资源的均匀利用,从而有助于维持较高的物种多样性。因此对地表可燃物采取合理的管理措施,可以有效降低森林火灾风险,保护草本和灌木层物种多样性,促进火烧迹地初期林下植被的恢复。

[参考文献]

- [1] Lindenmayer D, Taylor C, Blanchard W. Empirical analyses of the factors influencing fire severity in southeastern Australia [J/OL]. Ecosphere, 2021, 12 (8): e03721. (2021-08-10). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3721>.
- [2] Liu Q, Shan Y, Shu L, et al. Spatial and temporal distribution of forest fire frequency and forest area burnt in Jilin Province, Northeast China [J]. Journal of Forestry Research, 2018, 29 (5): 1233-1239.
- [3] Luo R, Hui D, Miao N, et al. Global relationship of fire occurrence and fire intensity: a test of intermediate fire occurrence-intensity hypothesis [J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2017, 122(5): 1123-1136.
- [4] 陶长森, 牛树奎, 陈 羚, 等. 妙峰山林场主要针叶林冠层特征及潜在火行为 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(5): 82-89.
Tao C S, Niu S K, Chen L, et al. Canopy characteristics and potential crown fire behavior of main coniferous forest in Miaofeng Mountain Forest Farm in Beijing [J]. Journal of Beijing Forest University, 2018, 40(5): 82-89.
- [5] Smit I P J, Asner G P, Govender N, et al. An examination of the potential efficacy of high-intensity fires for reversing woody encroachment in savannas [J]. The Journal of Applied Ecology, 2016, 53(5): 1623-1633.
- [6] Gustafsson L, Granath G, Nohrstedt H, et al. Burn severity and soil chemistry are weak drivers of early vegetation succession following a boreal mega-fire in a production forest landscape [J]. Journal of Vegetation Science, 2020, 32(1): 1-13.
- [7] 满子源, 孙 龙, 胡海清, 等. 南方 8 种森林地表死可燃物在平地无风时的燃烧蔓延速率与预测模型 [J]. 林业科学, 2019, 55 (7): 197-204.
Man Z Y, Sun L, Hu H Q, et al. Prediction model of the spread rate of eight typical surface dead fuel in southern China under windless and flat land [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(7): 197-204.
- [8] Vetaas O R, Shrestha K B, Sharma L N. Changes in plant species richness after cessation of forest disturbance [J]. Applied Vegetation Science, 2020, 24(1): 1-11.
- [9] 闫 平, 王景升. 森林火灾对兴安落叶松林生态系统碳素分布及储量的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(4): 46-48.
Yan P, Wang J S. Effect of forest fire on distribution and storage of carbon for *Larix gmelinii* forests [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2006, 34(4): 46-48.
- [10] 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质残体碳储量的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 331-339.
Yang D, He H S, Wu Z W, et al. Influence of fire disturbance on aboveground deadwood debris carbon storage in Huzhong forest region of Great Xing'an Mountains, Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(2): 331-339.
- [11] 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子 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2018, 47(6): 691-697.
Tian Y, Niu S K, Chen F, et al. Surface dead fuel load and relevant influencing factors of *Pinus tabulaeformis* forest after fire disturbance [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2018, 47(6): 691-697.
- [12] 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.
- [13] 周润青, 刘晓东, 郭怀文. 大兴安岭南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 Edi), 2014, 42(6): 131-137.
- [14] 艾也博, 寸应得, 刘艳红, 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.
Ai Y B, Cun Y D, Liu Y H, et al. Factors affecting surface fuel load of *Pinus tabuliiformis* forest in Songshan, Beijing [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(9): 2559-2565.
- [15] 韩 杰, 应凌霄, 李贵祥, 等. 云南松混交林火烧迹地更新早期草本层物种多样性的空间格局 [J]. 植物生态学报, 2016, 40 (3): 200-211.
Han J, Ying L X, Li G X, et al. Spatial patterns of species di-

- iversity in the herb layer of early post-fire regeneration in mixed *Pinus yunnanensis* forests [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(3): 200-211.
- [16] Collins B M, Lydersen J M, Fry D L, et al. Variability in vegetation and surface fuels across mixed-conifer-dominated landscapes with over 40 years of natural fire [J]. Forest Ecology and Management, 2016, 381: 74-83.
- [17] 陈 锋. 林火干扰对落叶松林物种多样性和地上生物量的影响研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- Chen F. Study on forest fire on understory vegetation diversity and biomass of *Larix gmelinii* burned area [D]. Beijing: Beijing Forest University, 2019.
- [18] 栗马玲, 宋沼鹏, 刘艳红, 等. 火烧强度对兴安落叶松群落叶片功能性状及功能多样性的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4021-4030.
- Li M L, Song Z P, Liu Y H, et al. Effects of fire intensity on leaf functional traits and functional diversity of *Larix gmelinii* community [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4021-4030.
- [19] Ray T, Malasiya D, Rajpoot R, et al. Impact of forest fire frequency on tree diversity and species regeneration in tropical dry deciduous forest of Panna Tiger Reserve, Madhya Pradesh, India [J]. Journal of Sustainable Forestry, 2021, 40(8): 831-845.
- [20] 王 博, 韩树文, 武英达, 等. 辽河源自然保护区油松林火烧迹地林木更新研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(4): 41-50.
- Wang B, Han S W, Wu Y D, et al. Forest regeneration of *Pinus tabulaeformis* burned area in Liaoheyuan Nature Reserve of northern China [J]. Journal of Beijing Forest University, 2020, 42(4): 41-50.
- [21] Hart S A, Chen H Y H. Understory vegetation dynamics of North American Boreal Forests [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2006, 25(4): 381-397.
- [22] 周 彬. 太岳山油松林人工林水文特征研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- Zhou B. Research on ecohydrological characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantations in Taiyue Mountain [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [23] 金 山, 武帅楷. 太岳山油松林火烧迹地恢复初期植物群落结构特征 [J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4182-4193.
- Jin S, Wu S K. The plant community structure of burned *Pinus tabulaeformis* forest in Taiyue Mountain in the early ecological restoration stage [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4182-4193.
- [24] 李 威, 周 梅, 赵鹏武, 等. 大兴安岭东麓火烧迹地恢复初期植被特征 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(1): 51-55.
- Li W, Zhou M, Zhao P W, et al. Vegetation characteristics in the early stage of restoration of burned area in eastern Daxing'an Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(1): 51-55.
- [25] 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.
- [26] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范 [J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.
- Fang J Y, Wang X P, Shen Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory [J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 533-548.
- [27] 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): 153-159.
- 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): 153-159.
- [28] 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.
- Liu Z D. Study on surface fuel loading and influencing factors of different forest types in Beijing area [D]. Beijing: Beijing Forest University, 2019.
- [29] 李俊清, 牛树奎. 森林生态学 [D]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Li J Q, Niu S Q. Forest ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [30] 周文昌, 牟长城, 刘 夏, 等. 火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松-苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6387-6395.
- Zhou W C, Mu C C, Liu X, et al. Effects of fire disturbance on litter mass and soil carbon storage of *Betula platyphylla* and *Larix gmelinii*-*Carex schmidtii* swamps in the Xiaoxing'an Mountains of Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6387-6395.
- [31] 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子 [J]. 生态学报, 2008, 27(1): 50-55.
- Chen H W, Chang Y, Hu Y M, et al. Load of forest surface dead fuel in Huzhong area of Daxing'anling Mountains and relevant affecting factors [J]. Journal of Ecology, 2008, 27(1): 50-55.
- [32] 于海晨, 王 薇, 刘晓东, 等. 油松和侧柏林地表可燃物负荷量及影响因素 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 33-40.
- Yu H C, Wang W, Liu X D, et al. Surface fuel load and influencing factors of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* [J]. Journal of Beijing Forest University, 2021, 43(6): 33-40.
- [33] 王 鼎, 王梓璇, 冯倩倩, 等. 兴安落叶松林植物物种组成及多样性对轻度火干扰的响应 [J]. 林业资源管理, 2017(3): 80-85.
- Wang D, Wang Z X, Feng Q Q, et al. Study on species composition and diversity of mild burned phytocoenosis after different regeneration years [J]. Forest Resources Management, 2017(3): 80-85.

2017(3):80-85.

[34] 韩风林,布仁仓,常禹,等. 大兴安岭白桦-兴安落叶松林火烧迹地林下植被群落恢复过程的动态分析[J]. 生态学杂志, 2015,34(2):312-318.
Han F L, Bu R C, Chang Y, et al. Dynamics of recovery process of understory vegetation of *Betula platyphylla-Larix gmelinii* forest in Daxing'an Mountains after fire disturbance [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(2):312-318.

[35] Roberts M. Response of the herbaceous layer to natural disturbance in North American forests [J]. Canadian Journal of Botany, 2004,82(9):1273-1283.

[36] 刘广菊,胡海清,张海林,等. 火频度和火强度对植物群落结构稳定性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2008,36(7):32-33.
Liu G J, Hu H Q, Zhang H L, et al. Impact of fire frequency and fire intensity on stability of community structure [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008,36(7):32-33.

[37] 褚燕琴,牛树奎,陈锋,等. 火干扰及环境因子对油松林林下植被的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2017,34(1):96-103.
Chu Y Q, Niu S Q, Chen F, et al. Fire disturbance and environmental factors for the undergrowth in a *Pinus tabulaeformis* forest [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2017,34(1):96-103.

(上接第 67 页)

[43] 郭敏杰,邓丽,苗建利,等. 基于主成分分析的高油酸花生品种品质评价[J/OL]. 分子植物育种, 2021:1-19. [2022-01-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail46.1068.S.2021089.1345.007.html>
Guo M J, Deng L, Miao J L, et al. Quality evaluation of peanut varieties with high-oleic acid based on principal component analysis [J/OL]. Molecular Plant Breeding, 2021:1-19. [2022-01-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail46.1068.S.2021089.1345.007.html>

[44] 姚琳,孙璇,咸拴狮,等. 甘蓝型油菜籽粒油酸、亚油酸、亚麻酸和蛋白质含量变异及相关性分析[J]. 中国粮油学报, 2021,36(5):82-87.
Yao L, Sun X, Xian S S, et al. Variation and correlation analysis of oleic acid, linoleic acid, linolenic acid and protein content in *Brassica napus* seeds [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021,36(5):82-87.

[45] 柴春山,戚建莉,蔡国军,等. 文冠果籽油含量及其脂肪酸组分的变异分析[J]. 经济林研究, 2013,31(2):100-103,117.
Chai C S, Qi J L, Cai G J, et al. Variation analysis on kernel oil content and its fatty acid composition in *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Non-wood Forest Research, 2013,31(2):100-103,117.

[46] 邬贤梦,官春云,李桐. 油菜脂肪酸品质改良的研究进展[J]. 作物研究, 2003,17(3):152-158.
Wu X M, Guan C Y, Li X. Research progress on fatty acid quality improvement of rape *Brassica napus* L. [J]. Crop Research, 2003,17(3):152-158.

[47] Wang R K, Fan J S, Chang P, et al. Genome survey sequencing of *Acer truncatum* Bunge to identify genomic information, simple sequence repeat (SSR) markers and complete chloroplast genome [J]. Forests, 2019,10(2):1-9.

[48] Ma Q Y, Sun T L, Li S S, et al. The *Acer truncatum* genome provides insights into the nervonic acid biosynthesis [J]. The Plant Journal, 2020,104(3):662-678.