

DOI: 10.20103/j.stxb.202503130565

杨光,张瑞杰,王立轩,宁吉彬,郑鑫,王明玉,孙建.大兴安岭塔河地区雷击火烧迹地地表可燃物燃烧性变化及其影响因素.生态学报, 2025, 45 (22): - .

Yang G, Zhang R J, Wang L X, Ning J B, Zheng X, Wang M Y, Sun J. Change of combustibility of forest surface fuel and their influencing factors in lightning fire burned area in Tahe of the Greater Khingan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45 (22): - .

# 大兴安岭塔河地区雷击火烧迹地地表可燃物燃烧性变化及其影响因素

杨 光<sup>1</sup>, 张瑞杰<sup>1</sup>, 王立轩<sup>1</sup>, 宁吉彬<sup>1</sup>, 郑 鑫<sup>2</sup>, 王明玉<sup>2</sup>, 孙 建<sup>3,\*</sup>

1 东北林业大学林学院, 森林可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

2 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业草原火灾监测预警与防控工程技术研究中心, 北京 100091

3 黑龙江省自然资源权益调查监测院, 哈尔滨 150040

**摘要:**揭示雷击火烧迹地地表死可燃物燃烧性的变化趋势及其影响因素,为我国大兴安岭地区雷击火烧迹地火灾风险评估提供理论支撑。以大兴安岭塔河地区兴安落叶松林雷击火烧迹地为研究对象,以火烧迹地内地表可燃物为实验材料,测定其理化性质,并通过主成分分析计算其燃烧性,基于聚类分析对其燃烧性进分级,利用随机森林法明确地表可燃物燃烧性的影响因素。地表可燃物的未分解层在火后 17—23 年较易燃,杂木生物量、过火年限和坡向显著影响综合燃烧性 ( $P < 0.05$ );半分解层的地表可燃物中木质素对半分解层可燃物燃烧性的影响显著;地形因素对半分解层可燃物燃烧性影响均不显著 ( $P > 0.05$ )。灰分、热值和粗脂肪均显著影响地表可燃物燃烧性 ( $P < 0.01$ )。灰分和热值分别是未分解层和半分解层地表可燃物燃烧性的最重要影响因素。过火 11 年后的雷击火烧迹地地表可燃物较易燃。森林地表可燃物燃烧性不受单一因素控制,而受多因素共同影响。过火年限、杂木生物量和坡向、坡位显著影响未分解层地表可燃物燃烧性。过火年限、样地生物量和地形因子对半分解层的燃烧性影响均不显著。因此,应对过火 11—23 年的雷击火烧迹地进行重点管控。

**关键词:**雷击火;地表可燃物;燃烧性;综合燃烧性评价;火烧迹地;大兴安岭

## Change of combustibility of forest surface fuel and their influencing factors in lightning fire burned area in Tahe of the Greater Khingan Mountains

YANG Guang<sup>1</sup> ZHANG Ruijie<sup>1</sup> WANG Lixuan<sup>1</sup> NING Jibin<sup>1</sup> ZHENG Xin<sup>2</sup> WANG Mingyu<sup>2</sup> SUN Jian<sup>3,\*</sup>

1 Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management of Ministry of Education, College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 National Forestry and Grassland Fire Monitoring Early Warning and Prevention Engineering Technology Research Center Ecology and Nature Conservation Institute Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 The Natural Resources Rights and Interests Survey and Monitoring Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150040, China

**Abstract:** To reveal temporal trends in post-fire combustibility and its influencing factors in lightning burned areas, so as to provide theoretical support for fire risk assessment of lightning burned areas in the Greater Khingan Mountains in China. This study investigated the lightning-fire burn scars in *Larix gmelinii* forests of the Tahe region, Greater Khingan Mountains. Surface fuel materials collected from the burn scars were analyzed for their physicochemical properties. Principal component analysis (PCA) was employed to calculate combustibility, followed by cluster analysis to classify combustion grades. Random forest method was then applied to identify key factors influencing surface fuel flammability. The litter layer of the

**基金项目:**国家自然科学基金 (32371881); 国家林草局林草科技创新发展研究项目 (2023132032)

**收稿日期:**2025-03-13; **网络出版日期:**2025-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: uskey1027@126.com

forest surface fuel was more flammable at 17—23 after fire, and the ash content had the greatest impact on its flammability. The biomass of other tree species, time after fire and slope aspect significantly affected the comprehensive flammability ( $P < 0.05$ ). The calorific value of surface fuel in the fermentation layer had the greatest influence on its flammability. Terrain factors had no significant effect on the flammability of forest surface fuel in the fermentation layer ( $P > 0.05$ ), Ash content, calorific value and fat significantly affected the combustibility of forest surface fuel ( $P < 0.01$ ), Ash content and high calorific value were the most important factors affecting the combustibility of forest surface fuel in litter layer and fermentation layer, respectively. Collectively, the surface fuels in lightning-fire burn scars exhibited higher flammability at 11 years post-fire. The combustibility of forest surface fuels was not controlled by a single factor but resulted from the combined effects of multiple determinants. Post-fire duration, mixed tree species biomass, slope aspect, and slope position significantly influenced the flammability of undecomposed surface fuels. In contrast, post-fire duration, plot biomass, and topographic factors showed no significant effects on the flammability of partially decomposed fuels. Therefore, priority management measures were required for lightning-fire burn scars with post-fire durations of 11—23 years.

**Key Words:** lightning fires; surface fuel; combustibility; comprehensive evaluation of combustibility; burned area; Greater Khingan Mountains

引发森林火灾的火源可分为天然火源和人为火源,雷击火作为天然火源的主要组成部分,近年来被越来越多学者关注<sup>[1-2]</sup>。相较于人为火,雷击火造成的森林火灾更加剧烈<sup>[3]</sup>,严重危害人类生计和生物多样性<sup>[4-5]</sup>。雷击火发生地点具有随机性,发生在偏远地区时其扑救难度和危害程度均大于其它类型的森林火灾<sup>[6]</sup>。雷击火造成全球北方森林 70% 的森林火灾<sup>[7]</sup>,同时造成我国温带及寒温带森林雷击火造成 45% 的森林火灾<sup>[8]</sup>。大兴安岭作为我国北方森林的重要组成部分,也是我国雷击火发生最集中的区域<sup>[9-10]</sup>。1966—2021 年间共发生雷击火 966 起,发生频率远大于人为火<sup>[11]</sup>。

火烧迹地地表可燃物的变化往往伴随着植被演替进行<sup>[12]</sup>。火烧迹地的植被演替随着林火强度<sup>[13]</sup>和过火时间<sup>[14]</sup>的改变而改变,高烈度的雷击火使森林群落发生逆行演替,从而改变可燃物燃烧性<sup>[15]</sup>。王博等对油松林不同烈度火干扰的可燃物潜在火行为的研究发现,不同烈度火干扰的潜在火行为主要与平均冠幅、未分解层载量、灌木载量和林分密度密切相关<sup>[15]</sup>。李威等研究表明可燃物载量随恢复时间的增加而增加<sup>[16]</sup>。目前的研究中,火烧迹地可燃物的变化特征都是基于潜在火行为<sup>[17]</sup>和可燃物载量<sup>[18]</sup>变化进行的。缺乏对雷击火后可燃物恢复的研究。因此,研究大兴安岭地区森林地表可燃物燃烧性随火后恢复年限的动态变化,是十分有意义的。

可燃物燃烧性是指影响林火行为的可燃物特性<sup>[19]</sup>。可燃物燃烧性被其理化性质、形态特征及其产生的火行为等共同影响<sup>[20-21]</sup>。其中可燃物理化性质如含水率、粗脂肪、灰分、纤维素、木质素<sup>[22]</sup>,可燃物形态如叶片大小和叶片厚度等<sup>[23]</sup>、四维燃烧性如点燃性、持续性、剧烈性和消耗性被广泛应用于可燃物评价中<sup>[19]</sup>。除去可燃物自身因素外,一些指标也间接影响可燃物燃烧性。相关研究表明地形、坡度和海拔是可燃物燃烧性变化的主要因素<sup>[24]</sup>。同时草本冠层生物量会影响可燃物燃烧性<sup>[25]</sup>。由于影响可燃物燃烧性的因素很多,且不在同一量纲下,无法全面系统的对可燃物燃烧性进行评价。主成分分析(Principal Component Analysis PCA)被应用于燃烧性评价中,通过聚类分析对可燃物进行分级<sup>[26]</sup>。Rahman 等对新加坡 22 种沼泽树种的老叶和新叶进行综合燃烧性评价发现四叶草和黄壳苍耳的燃烧性和分解性均较小<sup>[19]</sup>;闫晶等对 6 种北京常见草本植物的燃烧性评价发现野牛草的综合燃烧性最高<sup>[27]</sup>。张今奇等对大兴安岭毕拉河林区兴安落叶松、白桦、黑桦、山杨、蒙古栎叶片、枝条和树皮为研究对象研究燃烧性变化,发现兴安落叶松抗火性弱于阔叶树种<sup>[28]</sup>。

因此,本研究以大兴安岭地区雷击火干扰后不同过火年限的兴安落叶松林为研究对象。分别测定地表可燃物理化性质(粗脂肪、灰分、高位热值、去灰分热值、纤维素、半纤维素、木质素)、样地生物量和地形因子,通

通过对可燃物进行综合燃烧性评价,揭示雷击火烧迹地地表死可燃物燃烧性的变化原因,为我国大兴安岭地区雷击火烧迹地恢复和火灾风险评估提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

塔河县(52°09′—53°23′N,125°19′—125°48′E)隶属于黑龙江省大兴安岭地区,东邻呼玛县,西接漠河市,南靠新林区、呼中区,北以黑龙江主航道中心线为界与俄罗斯隔江相望,是我国重要林木生产基地。塔河县地处北温带,属寒温带大陆性气候。该地区森林覆盖率为90.7%,森林蓄积量5870万m<sup>3</sup>,主要乔木有兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)等。塔河地区作为全国重点火险地区,呈现火源分布复杂、难控性较大的趋势。在2002—2024年,塔河地区共发生雷击火51起,过火面积达到541.97hm<sup>2</sup>。

1.2 样地选取

采用“时空置换”的研究方法<sup>[29]</sup>,于2017年7月26日—8月8日在大兴安岭塔河县内选取1994—2017年间兴安落叶松天然林火烧迹地样地。样地情况见表1。为尽可能消除气候因素、空间距离及林下灌木对地表可燃物的影响,所选样地均为兴安落叶松天然林。

1.3 样品采集与制备

在每块火烧迹地随机设置3个20m×20m的样地的所有胸径大于5cm的乔木进行每木检尺以求取平均胸径。同时在每块样地中设置3个1m×1m的样方。森林地表可燃物可以分为未分解层(L层)、半分解层(F层)、全分解层(H层)<sup>[24]</sup>。由于全分解层不易收集,故在样地中按分解程度不同在每个样方内分别采集未分解层和半分解层样品各1份。其中未分解层由近期枯落的树叶、树枝、树皮等几乎完全未分解的植物残体堆积而成;半分解层由尚可识别的植物组织、处于半分解状态的植物残体所构成<sup>[30]</sup>。将采集完毕的地表可燃物样品充分混匀,经65℃烘干至恒质量,去除杂质,粉碎并过40目筛备用。

表1 兴安落叶松雷击火烧迹地样地基本信息

Table 1 Basic information of the sample plot of the lightning hit fire site of *Larix gmelinii*

| 样地代号<br>Plot code | 过火年限/a<br>Time after fire | 落叶松平均<br>胸径/cm<br>Mean DBH of<br><i>Larix gmelinii</i> | 落 叶 松<br>占比/%<br>Percentage of<br><i>Larix gmelinii</i> | 优势灌木<br>Dominant shrub | 海拔/m<br>Altitude | 坡度/(°)<br>slope | 坡向/(°)<br>Aspect |
|-------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|------------------|-----------------|------------------|
| 1994              | 1994 年 7 月                | 9.88±1.90                                              | 60.93±8.56                                              | 杜香、越桔、笃斯越桔             | 658.67±9.57      | 5±1.41          | 84.33±38.59      |
| 1996              | 1996 年 8 月                | 11.06±0.71                                             | 91.3±4.12                                               | 杜香、笃斯越桔                | 477±6.38         | 1.67±0.47       | 48.67±12.26      |
| 2000              | 2000 年 9 月                | 17.55±2.99                                             | 92.2±3.11                                               | 杜香、越桔                  | 790.33±8.80      | 7±2.16          | 80.67±13.60      |
| 2006              | 2006 年 9 月                | 16.94±5.73                                             | 64.57±10.00                                             | 杜香、杜鹃                  | 516±3.56         | 2±0.81          | 207±5.10         |
| 2010              | 2010 年 6 月                | 18.31±0.00                                             | 100.00±0.00                                             | 杜香                     | 837              | 6               | 58               |
| 2012              | 2012 年 4 月                | 8.87±0.47                                              | 84.77±4.18                                              | 杜香、杜鹃                  | 456.33±6.24      | 9.66±0.47       | 282.67±20.42     |
| 2015              | 2015 年 7 月                | 26.67±0.15                                             | 83.1±2.76                                               | 杜香、杜鹃、悬钩子              | 663.33±4.03      | 10±2.45         | 106.67±12.39     |
| CK                | CK                        | 11.61±1.82                                             | 94.03±5.12                                              | 杜香、笃斯越桔、杜鹃             | 434.33±11.44     | 1.67±0.47       | 47.67±47.62      |

1.4 样品分析

样地乔木生物量的计算:由于样地乔木以落叶松为主,存在其它少部分乔木(杂木)如白桦、蒙古栎、樟子松、红皮云杉、山杨,故通过样地所有类型乔木异速生长方程,参数见<sup>[31—32]</sup>。计算公式如下:

$$\ln W = \ln a + b \ln D \tag{1}$$

式中, $W$ 为生物量, $a$ 、 $b$ 为模型参数, $D$ 为平均胸径

计算样地中出现的所有树种的根、茎、叶、枝生物量。分别求算本研究出现的三种生物量即落叶松生物

量、杂木生物量和总生物量。

**样品粗脂肪含量测定** 粗脂肪含量采用有机萃取法<sup>[33]</sup>。称取 2g 烘干样品置于锥形瓶中,按样品:萃取液=1:15 加入 30mL 石油醚。把锥形瓶放入细胞粉碎机以 250W 萃取 20min。萃取结束后,将锥形瓶中液体转移至离心管离心 10min,取上清液转移到已知重量的培养皿中,常温风干后称质量。每个样品提取 2 次以确保粗脂肪被完全提取。

样品中粗脂肪含量 (Fat%) (%) 用粗脂肪所占百分比表示:

$$\text{Fat}\% = \frac{A_0 - A_1}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $A_0$  为萃取物质与培养皿的总质量 (g);  $A_1$  为培养皿质量 (g);  $m_0$  为落叶松地表可燃物样品质量 (g)

**样品灰分质量分数测定** 灰分质量分数采用干灰化法。称取 5.00g 样品置于炽灼至恒质量的坩埚中,缓缓加热至完全炭化,逐渐升高温度至 500—600℃,使完全灰化并至恒质量,减去坩埚质量即为样品灰分质量,每个样品做 3 次重复以取平均值。样品中粗灰分质量分数 (Ash%):

$$\text{Ash}\% = \frac{A_4 - A_2}{A_3 - A_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $A_2$  为坩埚质量 (g);  $A_3$  为坩埚和样品的质量 (g);  $A_4$  为坩埚和样品的质量 (g)。

**样品热值测定:** 使用氧弹式量热仪测定样品 (Calorific Value, CV)。称取 1g 烘干样品压成样品块,继续烘干至绝干质量,用分析天平精确称取其质量 (精确到 0.0001g) 后测定其热值。每个样品 3 次重复取平均值。

样品去灰分热值 (Ash Free Calorific Value, AFCV) 计算方法如下:

$$\text{AFCV} = \frac{\text{CV}}{1 - \text{Ash}\%} \quad (4)$$

样品纤维素,半纤维素和木质素的测定:使用纤维测定仪 (海能 F800),参考 Van Soest 法<sup>[34]</sup>对样品纤维素,半纤维素,木质素进行测定<sup>[35]</sup>。

## 1.5 数据处理与分析

样地坡位和坡向采用标准化处理,上、中、下坡位分别为数值 3,2,1;标准化坡向公式如下:

$$A' = \frac{1}{2} \times \{ 1 - \cos [ \frac{\pi}{180} \times (A - 30) ] \} \quad (5)$$

式中,  $A'$  为标准化坡向,  $A$  为实际坡向。其中  $A = 30^\circ$ ,  $A' = 0$ ;  $A = 120^\circ$  或  $300^\circ$ ,  $A' = 0.5$ ;  $A = 210^\circ$ ,  $A' = 1$ 。即地理坡向由阴坡到阳坡对应标准坡向由 0—1。

使用 SPSS 27.0 (IBM SPSS Statistics 27) 软件进行数据处理。采用单因素方差分析 (one way ANOVA) 和 Tukey 事后检验 (Tukey's Honestly Significant Difference) 分析差异显著性。采用斯皮尔曼相关性分析 (Spearman Correlation) 对可燃物理化性质环境因子间相关关系及可燃物理化性质间的相关关系。

采用主成分分析方法对粗脂肪,热值,灰分,高位热值,半纤维素,纤维素,木质素等七个可燃物理化性质作为燃烧性指标,采用主成分分析法对燃烧性进行排序和综合得分的计算。并通过系统聚类分析将燃烧性综合指标划分为可燃 (I)、较易燃 (II)、易燃 (III) 3 个等级,以便于对植物叶片的燃烧性进行分类和评估<sup>[26]</sup>。

主成分分析是一种经典降维算法,通过正交变换将与其分量有关的原随机向量转化为与其分量不相关的新随机向量,即将原有随机向量的协方差矩阵化为对角矩阵:

$$y_n = A_1 x_1 + A_2 x_2 + \cdots + A_n x_n$$

式中,  $y_n$  为各植物叶片主成分得分情况;  $A_n$  为各主成分贡献率情况;  $x_n$  为每个因子得分情况。

使用 R 语言 (R 4.3.1) 通过随机森林分析 (Random Forest Analysis, RF) 对影响综合燃烧性  $y$  的各项指标等进行随机森林预测。包括火后过火年限,可燃物理化性质,地形因子等。使用 Origin 2021 对上述所有分析进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 火烧迹地乔木生物量的变化特征

表 2 可知,落叶松生物量和总生物量随过火年限增长呈先上升后下降再上升再下降的变化趋势。而杂木生物量整体随过火年限增长呈现先上升后下降再上升的趋势。同时火后 21 年,三种生物量趋于稳定。杂木生物量在火后 7 年前趋于稳定。火后 2、11、17 年的落叶松生物量和总生物量均高于 CK 组,而杂木生物量占比呈现火后 5、11、23 年高于 CK。

表 2 不同过火年限下火烧迹地杂木生物量,落叶松生物量、总生物量

Table 2 Biomass of other tree species, *Larix gmelinii* biomass and total biomass in the burned area under different time after year

| 过火年限<br>Time after<br>fire/a | 杂木生物量<br>Biomass of other<br>tree species/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 落叶松生物量<br><i>Larix gmelinii</i><br>biomass/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 总生物量<br>Total Biomass/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 过火年限<br>Time after<br>fire/a | 杂木生物量<br>Biomass of other<br>tree species/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 落叶松生物量<br><i>Larix gmelinii</i><br>biomass/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 总生物量<br>Total Biomass/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 23                           | 861.65±185.92                                                      | 1693.70±1594.29                                                     | 2555.35±1536.47                                | 7                            | 0.00                                                               | 622.86±0.00                                                         | 622.86±0.00                                    |
| 21                           | 157.30±212.82                                                      | 2000.91±975.15                                                      | 2158.21±1181.39                                | 5                            | 344.26±197.69                                                      | 2289.50±1723.39                                                     | 2633.76±1820.07                                |
| 17                           | 372.74±232.59                                                      | 3843.35±2621.77                                                     | 4216.10±2774.39                                | 2                            | 286.66±225.62                                                      | 5088.25±2628.21                                                     | 5374.91±2674.80                                |
| 11                           | 990.23±360.88                                                      | 3765.97±1612.33                                                     | 4756.20±1251.53                                | CK                           | 355.17±319.15                                                      | 3353.71±2628.121                                                    | 3708.89±1025.92                                |

### 2.2 火烧迹地地表可燃物理化性质的变化特征

图 1 所示,地表可燃物中未分解层粗脂肪随过火年限增加呈先上升后下降再上升后下降的趋势,火后 5、7 年时粗脂肪占比组间差异不显著( $P>0.05$ ),而火后 11 年,粗脂肪占比组间差异不显著( $P>0.05$ ),除火后 5 年外,其余过火年限的粗脂肪均高于 CK 组。而半分解层可燃物粗脂肪呈先上升后下降再上升趋势。火后 2—11 年时粗脂肪组间差异不显著( $P>0.05$ ),火后 17—23 年组间差异同样不显著( $P>0.05$ )。火后 21 年半分解层地表可燃物粗脂肪趋于稳定,且均大于 CK。火后 2—11 年时未分解层地表可燃物灰分质量分数组间差异不显著( $P>0.05$ )同时,CK 组与火后 21 年时差异不显著,且灰分含量变化较小。同时火后 21 年,灰分含量同样趋于稳定,且均低于 CK 组。未分解层地表可燃物灰分含量随过火年限增加呈先上升后下降再上升趋势。而半分解层灰分含量整体呈先下降后上升再下降后上升趋势。火后 0—7 年半分解层地表可燃物灰分含量组间差异不显著( $P>0.05$ ),火后 11—23 年半分解层可燃物灰分含量组间差异显著( $P<0.05$ )。半分解层

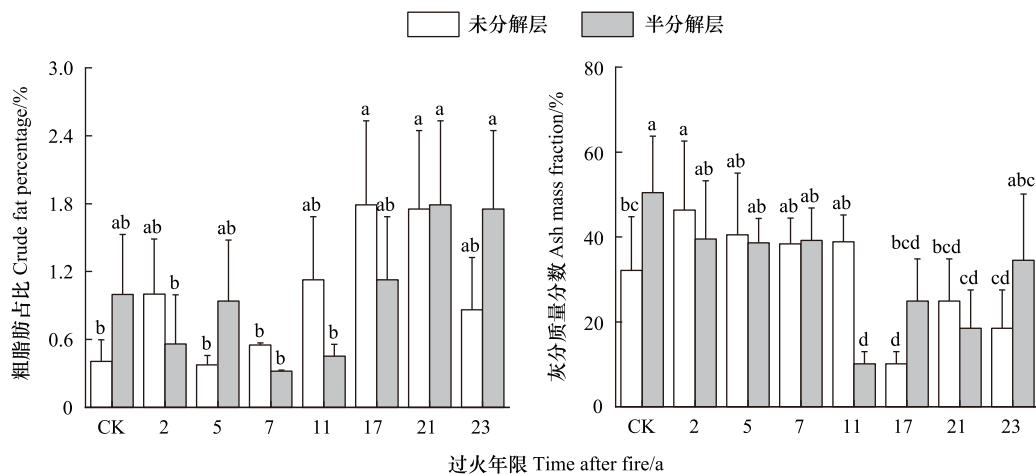


图 1 不同过火年限火烧迹地粗脂肪占比和灰分质量分数

Fig.1 Proportion of fat and ash mass fraction in burned areas with different burn years

误差线为标准差,不同小写字母表示不同过火年限各指标含量差异性显著( $P<0.05$ )

在火后 17 年后灰分含量低于 CK 组。

图 2 所示,未分解层地表可燃物热值随过火年限增加呈先上升后下降再上升趋势,其中,火后 2—11 年和 11 年后热值组间差异不显著 ( $P>0.05$ )。而半分解层地表可燃物热值随过火年限增加呈先上升后下降再上升趋势,半分解层地表可燃物热值在火后 0—7, 11—21 年时组间差异不显著 ( $P>0.05$ )。同时火后 23 年未分解层热值显著高于 CK 组 ( $P<0.05$ ),而火后 23 年半分解层热值高于 CK 组但不显著 ( $P>0.05$ )。未分解层和半分解层的地表可燃物去灰分热值随过火年限增加无明显变化趋势,同样差异不显著 ( $P>0.05$ )。同时火后 23 年时未分解层去灰分热值高于 CK,但不显著 ( $P>0.05$ );而半分解层地表可燃物去灰分热值截然相反。

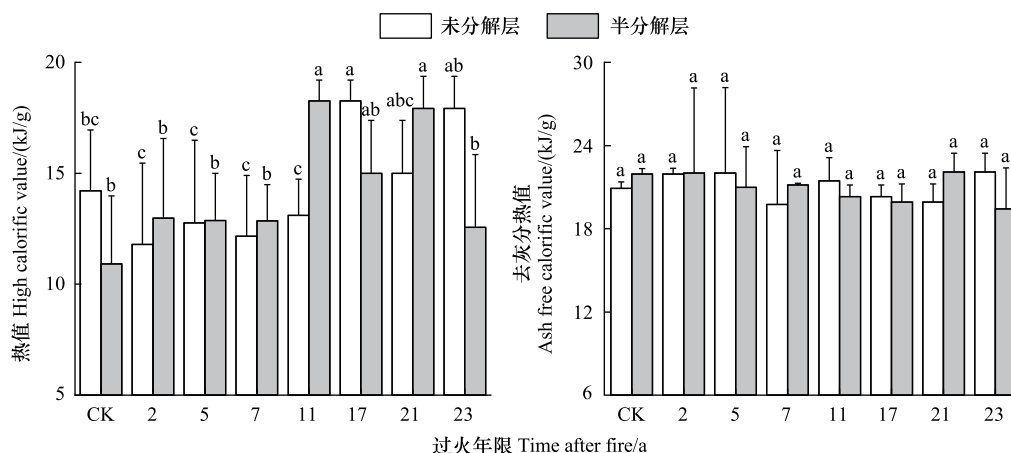


图 2 不同过火年限火烧迹地热值、去灰分热值变化

Fig.2 High calorific value and ash removal Calorific value of burned area with times after fire

由图 3 可知,未分解层和半分解层地表可燃物各组份整体呈木质素>纤维素>半纤维素。其中,半纤维素随过火年限变化不明显。纤维素呈先上升后下降的趋势,木质素呈先上升再下降再上升后下降的趋势。除未分解层地表可燃物火后 21 年时,总纤维素含量均大于木质素。未分解层的地表可燃物半纤维素,纤维素,木质素的最大值分别出现在过火年限 7 年,5 年和 23 年,而半分解层中,半纤维素,纤维素,木质素的最大值分别出现在过火年限 7 年,5 年和 21 年。

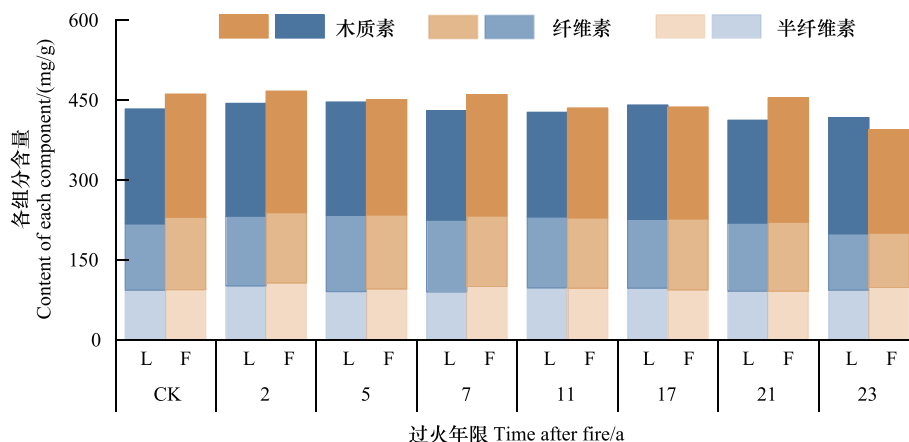


图 3 不同过火年限下可燃物半纤维素、纤维素、木质素含量变化

Fig.3 Changes of hemicellulose, cellulose and lignin contents of combustible materials under different times after fire

L: 未分解层; F: 半分解层

### 2.3 火烧迹地地表可燃物与其环境因子相关性

图 4 可知,地表可燃物的未分解层中,过火年限粗脂肪、热值、呈极显著正相关( $P<0.001$ )与灰分呈现相反变化趋势。未分解层中,落叶松生物量与热值呈显著负相关关系( $P<0.05$ ),总生物量与粗脂肪,热值呈显著负相关关系( $P<0.05$ )。坡位和坡向均与粗脂肪和热值呈极显著负相关,与灰分和去灰分热值间呈显著正相关关系,而坡位与半纤维素呈显著正相关关系。海拔对热值呈显著正相关趋势,与灰分呈相反趋势。坡度与高位热值间呈极显著正相关趋势( $P<0.01$ )。半分解层可燃物中过火年限粗脂肪、热值、呈极显著正相关( $P<0.001$ )与灰分和去灰分热值呈现相反变化趋势。杂木生物量与去灰分热值间呈显著负相关。坡位与热值间呈显著负相关趋势,与灰分呈相反趋势。坡度与粗脂肪间呈极显著正相关趋势,与高位热值呈相反趋势。海拔对可燃物理化性质间关系均不显著。坡度与半纤维素间呈显著正相关趋势。

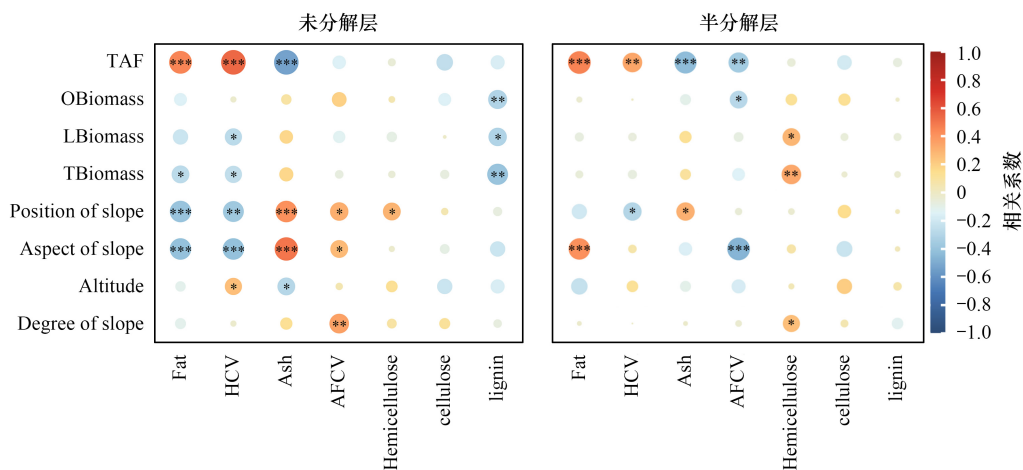


图 4 火烧迹地生物量 and 环境变量与可燃物理化性质间斯皮尔曼相关性 (Spearman's rank correlation)

Fig.4 Spearman's rank correlation between biomass and environmental variables in the burned area and the physical and chemical properties of surface fuel

\*: 在 0.05 级别 (双尾显著); \*\*: 在 0.01 级别 (双尾显著); \*\*\*: 在 0.001 级别 (双尾显著); 其中过火时间, 杂木生物量, 落叶松生物量, 总生物量, 粗脂肪, 热值, 灰分, 去灰分热值均使用其英文缩写 TAF, OBiomass, LBiomass, TBiomass, Fat, HCV, Ash, AFCV, 坡位, 坡向, 海拔, 坡度, 半纤维素, 纤维素, 木质素使用其英文全称分别为 Position of slope, Aspect of slope, Altitude, Degree of slope, Hemicellulose, cellulose lignin

图 5 可知,未分解层和半分解层地表可燃物中,粗脂肪含量与热值呈极显著正相关( $P<0.001$ ),与灰分呈极显著负相关( $P<0.001$ ),热值与灰分呈极显著负相关( $P<0.001$ )。在未分解层可燃物中,灰分与去灰分热值呈极显著正相关( $P<0.001$ ),而在半分解层中,粗脂肪与去灰分热值呈显著负相关( $P<0.05$ ),而灰分与去灰分热值呈显著正相关( $P<0.05$ ),粗脂肪与半纤维素呈显著正相关,热值与木质素呈显著负相关。

### 2.4 火烧迹地可燃物综合燃烧性评价

通过对上述未分解层和半分解层地表可燃物 8 个过火年限的可燃物七种理化性质包括粗脂肪、热值、灰分质量分数、去灰分热值、半纤维素、纤维素和木质素数据进行 Z-Score 标准化,使不同量纲的数据可以在同一。使用标准化后的数据进行主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA),通过上述方法,可以在简化数据结构,同时尽可能保留火烧迹地可燃物理化性质的重要信息。PCA 结果如表 3。对于未分解层和半分解层的地表可燃物,使用五个新变量可以解释上述七个可燃物理化性质,累计方差解释率分别达到 93.593% 和 93.255% (方差解释率>85%)。使用最大方差法 (Varimax-rotation Method) 对提取的因子进行旋转,使载荷矩阵的七种理化性质组成的元素按其平方值尽可能多级分化,将变量分成多个部分,其结果见表 4。本研究中将上述七种可燃物理化性质分为五部分。

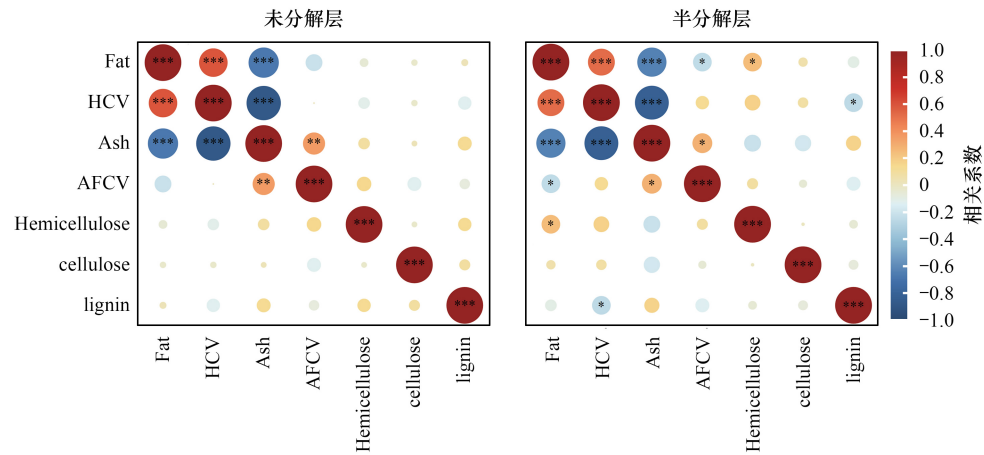


图 5 火烧迹地可燃物理化性质间斯皮尔曼相关性 (Spearman's rank correlation)

Fig.5 Spearman's rank correlation between physical and chemical properties of surface area in the burned area

表 3 主成分的特征根与主成分贡献率

Table 3 Characteristic roots of principal components of combustible materials and contribution rate of principal components

| 新变量<br>New<br>variables | 未分解层 Litter layer                     |                                         |                                                      | 半分解层 Fermentative layer               |                                         |                                                      |
|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                         | 特征根<br>Characteristics<br>of the root | 方差贡献率%<br>Variance<br>contribution rate | 累计方差贡献率%<br>Cumulative variance<br>contribution rate | 特征根<br>Characteristics<br>of the root | 方差贡献率%<br>Variance<br>contribution rate | 累计方差贡献率%<br>Cumulative variance<br>contribution rate |
| 1                       | 2.438                                 | 34.835                                  | 34.835                                               | 2.496                                 | 35.651                                  | 35.651                                               |
| 2                       | 1.222                                 | 17.451                                  | 52.286                                               | 1.375                                 | 19.637                                  | 55.288                                               |
| 3                       | 1.07                                  | 15.284                                  | 67.57                                                | 0.993                                 | 14.187                                  | 69.475                                               |
| 4                       | 1                                     | 14.282                                  | 81.852                                               | 0.883                                 | 12.621                                  | 82.096                                               |
| 5                       | 0.822                                 | 11.741                                  | 93.593                                               | 0.781                                 | 11.159                                  | 93.255                                               |
| 6                       | 0.445                                 | 6.358                                   | 99.951                                               | 0.466                                 | 6.657                                   | 99.912                                               |
| 7                       | 0.003                                 | 0.049                                   | 100                                                  | 0.006                                 | 0.088                                   | 100                                                  |

表 4 旋转后主成分转化矩阵

Table 4 Principal component transformation matrix after rotation

| 公因子<br>Common factor           | 旋转后主成分 Main component after the rotation |        |        |        |        |                         |        |        |        |        |
|--------------------------------|------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                                | 未分解层 Litter layer                        |        |        |        |        | 半分解层 Fermentative layer |        |        |        |        |
|                                | 1                                        | 2      | 3      | 4      | 5      | 1                       | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 油脂 Crude fat content           | 0.812                                    | -0.146 | 0.15   | -0.032 | -0.037 | 0.775                   | -0.273 | -0.074 | 0.133  | -0.079 |
| 高位热值 High heat value           | 0.905                                    | 0.335  | -0.146 | -0.04  | -0.023 | 0.871                   | 0.439  | 0.079  | 0.065  | -0.094 |
| 灰分 Ash mass fraction           | -0.94                                    | 0.147  | 0.139  | 0.048  | 0.013  | -0.94                   | 0.092  | -0.142 | -0.075 | 0.046  |
| 去灰分热值 Ash free calorific value | -0.046                                   | 0.992  | -0.012 | -0.02  | -0.003 | -0.073                  | 0.96   | -0.108 | 0.029  | -0.106 |
| 半纤维素 Hemicellulose             | -0.066                                   | -0.021 | 0.062  | 0.996  | -0.01  | 0.148                   | 0.029  | 0.008  | 0.987  | -0.024 |
| 纤维素 Cellulose                  | -0.041                                   | -0.004 | 0.067  | -0.01  | 0.997  | 0.073                   | -0.091 | 0.985  | 0.008  | -0.034 |
| 木质素 Lignin                     | -0.052                                   | -0.016 | 0.982  | 0.063  | 0.068  | -0.113                  | -0.104 | -0.035 | -0.024 | 0.986  |

将标准化后的粗脂肪,热值,灰分,去灰分热值,木质素,纤维素,半纤维素分别设为  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ , 根据表 4 可得因子模型,计算公式如下:

未分解层

$$y_1 = 0.5271 x_1 + 0.5875 x_2 - 0.6102 x_3 - 0.0299 x_4 - 0.0429 x_5 - 0.0266 x_6 - 0.0338 x_7 \tag{6}$$

$$y_2 = -0.1368 x_1 + 0.3138 x_2 + 0.1377 x_3 + 0.9291 x_4 - 0.0197 x_5 - 0.0038 x_6 - 0.0150 x_7 \tag{7}$$

$$y_3 = 0.1474 x_1 - 0.1434 x_2 + 0.1366 x_3 - 0.0118 x_4 + 0.061 x_5 + 0.0658 x_6 + 0.9648 x_7 \tag{8}$$

$$y_4 = -0.032 x_1 - 0.0400 x_2 + 0.0480 x_3 - 0.0200 x_4 + 0.9953 x_5 - 0.0100 x_6 + 0.0630 x_7 \quad (9)$$

$$y_5 = -0.0370 x_1 - 0.0230 x_2 + 0.0130 x_3 - 0.0030 x_4 - 0.0100 x_5 + 0.9966 x_6 + 0.0679 x_7 \quad (10)$$

$$y = 0.3484 y_1 + 0.1745 y_2 + 0.1528 y_3 + 0.1428 y_4 + 0.1174 y_5 \quad (11)$$

半分解层

$$y_1 = 0.4735 x_1 + 0.5565 x_2 - 0.5838 x_3 - 0.0082 x_4 + 0.2482 x_5 + 0.1418 x_6 - 0.2083 x_7 \quad (12)$$

$$y_2 = -0.2029 x_1 + 0.2652 x_2 + 0.1594 x_3 + 0.7716 x_4 + 0.0708 x_5 - 0.3436 x_6 - 0.3803 x_7 \quad (13)$$

$$y_3 = 0.1917 x_1 + 0.0040 x_2 - 0.0351 x_3 - 0.0452 x_4 + 0.3965 x_5 - 0.7268 x_6 + 0.5240 x_7 \quad (14)$$

$$y_4 = -0.1469 x_1 - 0.2033 x_2 + 0.1873 x_3 + 0.032 x_4 + 0.8780 x_5 + 0.3405 x_6 - 0.1234 x_7 \quad (15)$$

$$y_5 = -0.2026 x_1 + 0.2886 x_2 - 0.0565 x_3 + 0.4086 x_4 - 0.0226 x_5 + 0.4323 x_6 + 0.7198 x_7 \quad (16)$$

$$y = 0.3561 y_1 + 0.1964 y_2 + 0.1419 y_3 + 0.1261 y_4 + 0.1116 y_5 \quad (17)$$

将上述指标标准化后分别带入因子模型中,分别得到  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5$  和  $y$ , 结果见表 5

表 5 未分解层、半分解层地表可燃物不同过火年限可燃物综合得分

Table 5 Comprehensive scores of surface combustibles in litter layer and fermentative layer with different times after year

|                            | 过火时间/a<br>Time after fire | $y_1$   | $y_2$   | $y_3$   | $y_4$   | $y_5$   | $y$     | 排序<br>Sorting | 燃烧性<br>Combustibility |
|----------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|-----------------------|
| 未分解层<br>Litter layer       | 23                        | 1.583   | 0.072   | -0.213  | 0.009   | -1.238  | 0.387   | 2             | II                    |
|                            | 21                        | 0.859   | -0.137  | 0.092   | -0.381  | 0.024   | 0.238   | 3             | II                    |
|                            | 17                        | 1.491   | 0.156   | -0.322  | -0.332  | 0.144   | 0.467   | 1             | II                    |
|                            | 11                        | -0.949  | 0.052   | -0.006  | 0.065   | 0.158   | -0.295  | 6             | I                     |
|                            | 7                         | -1.213  | -0.026  | 0.086   | 0.788   | -0.178  | -0.323  | 7             | I                     |
|                            | 5                         | -0.632  | -0.068  | 0.167   | -0.040  | 0.587   | -0.143  | 5             | I                     |
|                            | 2                         | -1.811  | -0.055  | 0.207   | 0.552   | 0.059   | -0.523  | 8             | I                     |
|                            | 0                         | -0.136  | -0.011  | 0.047   | -0.134  | 0.326   | -0.023  | 4             | I                     |
| 半分解层<br>Fermentative layer | 23                        | -0.6798 | 0.1636  | 0.5062  | -0.2577 | -0.5760 | -0.2352 | 5             | I                     |
|                            | 21                        | 1.5110  | 0.0960  | 0.3922  | -0.6202 | 0.0013  | 0.5350  | 2             | II                    |
|                            | 17                        | 0.8660  | -0.3210 | 0.1288  | -0.0795 | -0.1334 | 0.2390  | 3             | II                    |
|                            | 11                        | 1.5809  | 0.0895  | 0.2166  | -0.1448 | 0.1503  | 0.6104  | 1             | II                    |
|                            | 7                         | -1.1389 | 0.2234  | -0.1040 | -0.7518 | -0.1643 | -0.4901 | 7             | I                     |
|                            | 5                         | -0.8652 | -0.1631 | -0.8967 | 0.3114  | 0.4385  | -0.3794 | 6             | I                     |
|                            | 2                         | -0.3756 | -0.0349 | -0.0128 | 0.6494  | 0.1271  | -0.0464 | 4             | I                     |
|                            | 0                         | -1.6578 | 0.0955  | -0.2996 | 0.3919  | 0.0470  | -0.5601 | 8             | I                     |

由表 5 可知,地表可燃物的未分解层,燃烧性排序表现为火后 17 年>23 年>21 年>CK>5 年>11 年>7 年>2 年;对于半分解层,表现为 11 年>21 年>17 年>2 年>23 年>5 年>7 年>CK。对于七个可燃物理化性质和  $y$  进行系统聚类分析的组间聚类法,将其燃烧性划分为 3 个等级分别为可燃(I)、较易燃(II)和易燃(III)。对于未分解层的地表可燃物,火后 0—11 年表现为可燃(I),火后 17—23 年火烧迹地可燃物表现为较易燃(II)。而半分解层可燃物,火后 0—7 年和 23 年时,火烧迹地可燃物表现为可燃(I),其余过火年限表现为较易燃(II)。

## 2.5 火烧迹地可燃物燃烧性的影响因素

为检验对影响综合燃烧性的火烧迹地过火年限、生物量因子和可燃物理化性质变量进行评价。通过随机森林分析(RF)其重要性排序如图 6。

图 6 所示,其中对未分解层和半分解层地表可燃物的随机森林模型解释率  $R^2$  分别为 0.8518 和 0.8290 ( $P<0.01$ )。地表可燃物的未分解层中,灰分对综合燃烧性  $y$  的影响最大,灰分,热值,粗脂肪,坡向,半纤维素在统计学中极显著影响综合燃烧性  $y$  的影响,而杂木生物量,过火年限和坡向显著影响综合燃烧性  $y$ ,其余指

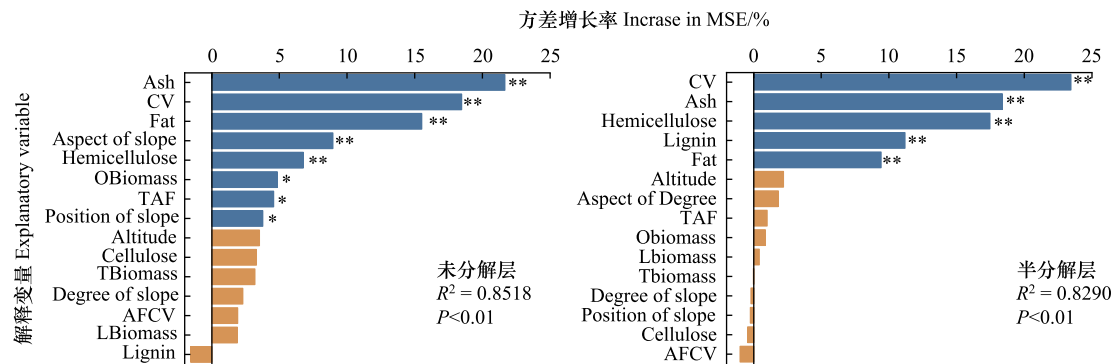


图6 随机森林重要性得分

Fig.6 Random of forest importance score

标对综合燃烧性  $y$  的影响均不显著 ( $P > 0.05$ )。除木质素对综合燃烧性呈负影响外,其余指标对  $y$  均呈正影响。而半分解层地表可燃物中,热值对综合燃烧性  $y$  的影响最大,其中热值、灰分、半纤维素、木质素和粗脂肪极显著影响  $y$  ( $P < 0.01$ )。坡度,坡位,纤维素和高位热值对综合燃烧性  $y$  呈负影响。其余因素对  $y$  的影响不显著。地形因素对半分解层可燃物燃烧性影响均不显著 ( $P > 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 雷击火烧迹地地表可燃物燃烧性变化

本研究中,三种生物量均出现先上升后下降再上升的趋势,这与王丽红等研究相异<sup>[36]</sup>。其可能与“时空置换”的方法有关,不同立地条件和不同生境森林更新方式和树木生长快慢存在差异<sup>[37]</sup>。何潇等研究表明对同一退化特征的森林生态系统进行连年观测,最终发现生物量变化随过火年限变化呈“S”型趋势<sup>[38]</sup>。

粗脂肪作为可燃物中的助燃物质,粗脂肪含量与可燃物燃烧性呈正比<sup>[39]</sup>。就粗脂肪而言,火后 17 年和 21 年未分解层地表可燃物更容易燃烧,而半分解层的地表可燃物于火后 21 年和 23 年更容易燃烧。灰分是指可燃物燃烧后留下的不可燃物质,通常是矿物质的残留,灰分越大,可燃物燃烧性越小<sup>[40]</sup>。本研究中,未分解层地表可燃物于火后 17 年时更易燃烧,而半分解层地表可燃物于 11 年时更易燃烧。就热值而言,本研究中未分解层地表可燃物于火后 17 年和 23 年时更易燃烧,而半分解层地表可燃物于火后 11 年和 21 年时更易燃烧。去灰分热值是去除灰分后的热值,可以更好的反映可燃物热量释放变化<sup>[41]</sup>。不同过火年限去灰分热值差异性不大,这与王立轩等研究结果一致<sup>[24]</sup>。纤维素和半纤维素作为可燃物的基本成分,直接影响可燃物的燃烧性<sup>[42]</sup>。相较于纤维素,半纤维素有更低的热解温度,同时其燃烧后产生的  $\text{CO}_2$  含量更高<sup>[43-44]</sup>。因此,纤维素和半纤维素含量越高,其燃烧性越强<sup>[45]</sup>。本研究中,在火后 7 年,5 年时雷击火烧迹地地表可燃物半纤维素,纤维素最大,更易燃烧。木质素热解温度约在  $500^\circ\text{C}$ ,其不易燃烧,但在燃烧过程中会释放大热量<sup>[42]</sup>。因此木质素含量越高,其燃烧性越差<sup>[46]</sup>。本研究中,火后 23 年和 21 年,未分解层和半分解层的地表可燃物中木质素含量最高,最难燃烧。地表可燃物中的未分解层综合燃烧性较高的 3 组表现为火后 17 年 > 23 年 > 21 年,而半分解层中表现为 11 年 > 21 年 > 17 年。可能与其含有高热值,高粗脂肪和低灰分有关<sup>[47]</sup>。火后 0—23 年的恢复周期内,尽管过火年限极显著影响可燃物粗脂肪,热值和灰分,但未分解层和半分解层可燃物理化性质变化与可燃物综合燃烧性变化均不相同。同时随机森林结果表明,过火年限的重要性小于灰分,热值和半纤维素。表明可燃物燃烧性是由多个指标共同影响,这与张恒研究结果相互印证<sup>[48]</sup>。

本研究中,粗脂肪含量与热值呈极显著正相关,与灰分呈极显著负相关。热值与灰分呈极显著负相关。同时,粗脂肪与半纤维素间,灰分与木质素间均呈正相关关系,与上述结果相互印证<sup>[22]</sup>。同时,相关性分析表明,灰分与去灰分热值间呈显著正相关关系,与热值间相关性不显著。说明灰分是影响可燃物去灰分热值的

主要因素<sup>[39]</sup>。未分解层和半分解层的地表可燃物粗脂肪含量均小于 2.5%,灰分大于 10%,小于张恒等研究结果<sup>[49]</sup>。尽管样地均处于大兴安岭地区,但每个林场地形因素各不相同,故各指标大小间存在差异。未分解层和半分解层的地表可燃物中灰分差异较大,而热值差异不大,去灰分热值差异不大。相较于半分解层,未分解层可燃物粗脂肪,热值,灰分和去灰分热值被环境因子影响显著。本研究中,除火后 23 年的半分解层地表可燃物,总纤维素含量整体大于木质素含量。这与本研究相互印证,其可能在凋落物分解后期,在微生物作用下,一些高分子物质结合成类纤维素结构,其水解后,中长链多糖聚合体归入纤维素,导致纤维素积累<sup>[50]</sup>。

### 3.2 火后雷击火烧迹地地表可燃物燃烧性的变化

环境因子通过影响地表死可燃物载量进而影响森林燃烧性及火行为<sup>[51]</sup>,同时雷击火的发生与地形因子具有很强的相关性<sup>[7]</sup>。因此,本研究将坡度、坡向、坡位、海拔和生物量纳入到雷击火烧迹地的地表死可燃物燃烧性的评价体系内,浅析环境因素与可燃物燃烧性间的关系。本研究中,生物量对未分解层的影响大于半分解层,说明在雷击火后 23 年内,火烧迹地保留木生物量并不是影响其可燃物理化性质的主要因素。杂木生物量显著影响未分解层雷击火烧迹地地表可燃物燃烧性,同时杂木生物量的方差解释率大于落叶松生物量,表明林下凋落物中,杂木如白桦、蒙古栎、山杨等凋落物的燃烧性较落叶松凋落物的燃烧性更强<sup>[49]</sup>。地形因素中海拔和坡向等对可燃物理化性质影响更大<sup>[24,52]</sup>。坡向和坡位可通过太阳辐射影响可燃物含水率进而影响可燃物燃烧性<sup>[53]</sup>。袁红新等研究表明,阳坡可燃物的燃烧性更强,这与本研究相互印证<sup>[54]</sup>。梁瀛等结果表明,随着海拔升高,气温随之降低,导致林下生物多样性降低,进而灌木、草本载量降低,森林燃烧性降低<sup>[55]</sup>。本研究中,海拔对可燃物的燃烧性影响不显著,这与周润青等研究结果相似<sup>[56]</sup>。坡度通过影响林分可燃物持水能力,进而影响可燃物燃烧性<sup>[57]</sup>。本研究中,坡度对雷击火烧迹地地表可燃物燃烧性影响均不显著,本研究中坡度集中在 1°—13°,在此坡度范围内坡度对雷击火烧迹地地表可燃物载量恢复影响较小。但随机森林结果表明,坡向和坡位显著影响未分解层的可燃物燃烧性,地形因素对半分解层中地表可燃物燃烧性影响均不显著( $P>0.05$ )。因此,未来对雷击火烧迹地的可燃物理化性质的研究中,应多考虑坡向和坡位的影响。

## 4 结论

本研究通过对不同过火年限下的兴安落叶松雷击火烧迹地的地表可燃物进行综合燃烧性评价,和燃烧性进行分级,对影响综合燃烧性的各指标进行重要性排序,得出以下结论:

森林地表可燃物燃烧性不受单一因素控制,而受多因素共同影响。火后 17—23 年时未分解层和火后 11—23 年半分解层的雷击火烧迹地地表可燃物较易燃。其中灰分,热值,粗脂肪是地表可燃物燃烧性变化的重要影响因素。灰分和热值分别是未分解层和半分解层地表可燃物燃烧性的最重要影响因素。

杂木生物量显著影响未分解层地表可燃物燃烧性。坡向和坡位显著影响未分解层可燃物燃烧性,过火年限、样地生物量和地形因子对半分解层可燃物燃烧性影响均不显著。

因此,应对过火时间 11—23 年的雷击火烧迹地进行重点管控。本研究中,仅仅考虑了可燃物理化性质、生物量和地形因素对综合燃烧性的评价,未对一些点燃时间,热释放速率等四维燃烧性指标、含水率、燃点等其它可燃物理化性质指标和雷击火发生地的气候条件进行评价。在今后研究中纳入上述变量,会对大兴安岭雷击火烧迹地地表可燃物燃烧性有更科学的评价。

### 参考文献 (References):

- [1] Bates B C, Dowdy A J, McCaw L. A Bayesian approach to exploring the influence of climate variability modes on fire weather conditions and lightning-ignited wildfires. *Climate Dynamics*, 2021, 57(3): 1207-1225.
- [2] Jones M W, Veraverbeke S, Andela N, Doerr, SH, Kolden, C, Mataveli G, Pettinar M L, Quéré, C L, Rosan, TM, Werf, GRVD, Global rise in forest fire emissions linked to climate change in the extratropics. *Science*, 2024, 386(6719): eadl5889.
- [3] Veraverbeke S, Rogers B M, Goulden M L, Jandt R R, Miller C E, Wiggins E B, Randerson J T. Lightning as a major driver of recent large fire

- years in North American boreal forests. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 529-534.
- [ 4 ] Jones M W, Abatzoglou J T, Veraverbeke S, Andela N, Lasslop G, Forkel M, Smith A J P, Burton C, Betts R A, van der Werf G R, Sitch S, Canadell J G, Santín C, Kolden C, Doerr S H, Le Quéré C. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Reviews of Geophysics*, 2022, 60(3): e2020RG000726.
- [ 5 ] Mulverhill C, Coops N C, Boulanger Y, Hoffman K M, Cardinal Christianson A, Daniels L D, Flamand-Hubert M, Wotherspoon A R, Achim A. Wildfires are spreading fast in Canada—we must strengthen forests for the future. *Nature*, 2024, 633(8029): 282-285.
- [ 6 ] Nieto H, Aguado I, García M, Chuvieco E. Lightning-caused fires in central Spain: development of a probability model of occurrence for two Spanish regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 162: 35-43.
- [ 7 ] 彭玉娟, 田晓瑞, 李思薇, 司莉青, 王明玉. 雷击火发生预报的研究进展. *陆地生态系统与保护学报*, 2024(2): 65-70.
- [ 8 ] Liu Z H, Yang J, Chang Y, Weisberg P J, He H S. Spatial patterns and drivers of fire occurrence and its future trend under climate change in a boreal forest of Northeast China. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 2041-2056.
- [ 9 ] 李伟克, 舒立福, 王明玉, 李威, 司莉青, 赵凤君, 李笑笑, 周暖阳. 黑龙江大兴安岭林区雷击火与人为火发生规律及变化趋势. *林业科学*, 2024, 60(4): 136-146.
- [ 10 ] 臧桐汝, 舒立福, 王明玉, 赵凤君, 同小娟, 司莉青, 陈锋. 黑龙江大兴安岭林区雷击火时空分布及驱动因素分析. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2022, 50(12): 64-76.
- [ 11 ] 李威, 舒立福, 王明玉, 李伟克, 苑尚博, 司莉青, 赵凤君, 宋佳军, 王亚惠. 大兴安岭 1980—2021 年雷击火时空分布特征. *林业科学*, 2023, 59(10): 22-31.
- [ 12 ] 李佳琳, 龙腾腾, 王劲, 王秋华. 计划烧除对云南松纯林林下植物的影响. *消防科学与技术*, 2023, 42(3): 392-396.
- [ 13 ] 王绪高, 李秀珍, 贺红土, 冷文芳, 问青春. 大兴安岭北坡落叶松林火后植被演替过程研究. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 35-41.
- [ 14 ] 苏维翰, 张楚然, 邓云, 翟德利, 张明达, 李生发, 李逢昌, 唐志忠, 林露湘. 基于 Landsat 影像评估鸡足山火烧迹地近 40 年植被恢复动态. *生态学报*, 2025, 45(3): 1362-1378.
- [ 15 ] 王博, 韩树文, 顾泽, 陈锋, 白夜, 刘晓东. 不同烈度林火对油松林潜在地表火行为的影响. *生态学报*, 2023, 43(5): 1812-1821.
- [ 16 ] 李威, 张心钥, 周梅, 赵鹏武, 张岐岳, 张今奇. 不同恢复时间火烧迹地地表可燃物载量的变化. *东北林业大学学报*, 2021, 49(7): 78-82.
- [ 17 ] 武超, 罗夏琴, 刘春延, 姜阳, 石加成, 韩博文, 孙龙. 不同强度火干扰对兴安落叶松林可燃物载量的影响. *森林工程*, 2013, 29(5): 24-28.
- [ 18 ] 张今奇, 周梅, 赵鹏武, 舒洋, 李威, 郭娇宇, 管立娟. 不同火烧程度火烧迹地死可燃物载量预测模型. *森林工程*, 2021, 37(3): 21-27, 35.
- [ 19 ] Rahman N E B, Smith S W, Lam W N, Chong K Y, Chua M S E, Teo P Y, Lee D W J, Phua S Y, Aw C Y, Lee J S H, Wardle D A. Leaf decomposition and flammability are largely decoupled across species in a tropical swamp forest despite sharing some predictive leaf functional traits. *New Phytologist*, 2023, 238(2): 598-611.
- [ 20 ] Pausas J G, Keeley J E, Schwilk D W. Flammability as an ecological and evolutionary driver. *Journal of Ecology*, 2017, 105(2): 289-297.
- [ 21 ] 韩喜越, 王晓迪, 崔晨曦, 单延龙, 于渤, 尹赛男, 曹丽丽. 内蒙古大兴安岭根河林业局主要可燃物类型地表细小可燃物特征及其影响因素. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(12): 94-103.
- [ 22 ] 赵帅. 湖北中东部地区 3 种林型的地表可燃物燃烧性比较[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [ 23 ] Zhang S D, Cornwell W K, Zhao W W, van Logtestijn R S P, Krab E J, Aerts R, Cornelissen J H C. Experimental evidence that leaf litter decomposability and flammability are decoupled across gymnosperm species. *Journal of Ecology*, 2023, 111(4): 761-772.
- [ 24 ] 王立轩, 杨光, 高佳琪, 郑鑫, 李兆国, 瓮岳太, 邸雪颖, 于宏洲. 兴安落叶松林火烧迹地地表枯落物燃烧性变化. *林业科学*, 2022, 58(6): 110-121.
- [ 25 ] Gao X L, Schwilk D W. Grass canopy architecture influences temperature exposure at soil surface. *Fire*, 2018, 1(3): 35.
- [ 26 ] 牟韵洁, 高德民, 龙腾腾, 郭在军, 牛海峰. 张家口崇礼区主要植物叶片理化性质及燃烧性分析. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2024, 48(6): 239-244.
- [ 27 ] 闫晶, 宋林姝, 李秉玲, 刘燕. 6 种北京常见草本植物燃烧性分析与评价. *应用生态学报*, 2024, 35(2): 363-370.
- [ 28 ] 张今奇, 周梅, 赵鹏武, 舒洋, 郭娇宇, 李威, 管立娟. 内蒙古大兴安岭东麓 5 种典型树种燃烧性. *温带林业研究*, 2021, 4(1): 27-33.
- [ 29 ] Huang X L, Tang G A, Zhu T X, Ding H, Na J M. Space-for-time substitution in geomorphology. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(10): 1670-1680.
- [ 30 ] 赵畅, 龙健, 李娟, 廖洪凯, 刘灵飞, 张明江, 华健. 茂兰喀斯特原生林不同坡向及分解层的凋落物现存量 and 养分特征. *生态学杂志*, 2018, 37(2): 295-303.
- [ 31 ] Dong L H, Zhang L J, Li F R. A compatible system of biomass equations for three conifer species in Northeast, China. *Forest Ecology and*

- Management, 2014, 329: 306-317.
- [32] Dong L H, Zhang L J, Li F R. Developing additive systems of biomass equations for nine hardwood species in Northeast China. *Trees*, 2015, 29 (4): 1149-1163.
- [33] Cheng C H, Du T B, Pi H C, Jang S M, Lin Y H, Lee H T. Comparative study of lipid extraction from microalgae by organic solvent and supercritical CO<sub>2</sub>. *Bioresource Technology*, 2011, 102(21): 10151-10153.
- [34] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583-3597.
- [35] Yang G, Li B Z, Liu X Y, Wang L X, Zhang Y L, Ning J B, Zhao F J, Wang M Y, Yu H Z. Effect of microbial degradation treatments on lignocellulose, cellulose, and water-holding capacity of four typical forest fuels from Northeast China. *Fire*, 2024, 7(9): 301.
- [36] 王丽红, 辛颖, 邹梦玲, 赵雨森, 刘双江, 任清胜. 大兴安岭火烧迹地植被恢复中植物多样性与生物量分配格局. *北京林业大学学报*, 2015, 37(12): 41-47.
- [37] 张庆龙, 梁宇, 贺红土, 黄超, 刘波, 姜思慧. 树种水平的大兴安岭地上生物量变化特征及其与气候和干扰的关系. *生态学报*, 2019, 39 (12): 4442-4454.
- [38] 何潇, 曹磊, 徐胜林, 李海奎. 内蒙古大兴安岭林区不同恢复阶段森林生物量特征与影响因素. *北京林业大学学报*, 2019, 41(9): 50-58.
- [39] 梁瀛, 张思玉, 努尔古丽, 张毓涛, 程平. 天山中部林区主要树种理化性质及燃烧性分析. *林业科学*, 2011, 47(12): 101-105.
- [40] Kganyago M, Shikwambana L. Assessment of the characteristics of recent major wildfires in the USA, Australia and Brazil in 2018 - 2019 using multi-source satellite products. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1803.
- [41] 曾小平, 蔡锡安, 赵平, 饶兴权. 广东鹤山人工林群落主要优势植物的热值和灰分含量. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 485-492.
- [42] 陈伯轩, 郭妍, 范佳乐, 李保中, 谭传巧, 李东晖, 胡海清, 胡同欣. 黑龙江省 6 种乔木叶片热解特性及气体释放特征. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 76-84.
- [43] Yang H P, Yan R, Chen H P, Lee D H, Zheng C G. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 2007, 86(12/13): 1781-1788.
- [44] Zhang S P, Mei Y Y, Lin G Y. Pyrolysis interaction of cellulose, hemicellulose and lignin studied by TG-DSC-MS. *Journal of the Energy Institute*, 2024, 112: 101479.
- [45] Souza M A, Vale A T. Levantamento de plantas de baixa inflamabilidade em áreas queimadas de Cerrado no Distrito Federal e análise das suas propriedades físicas. *Ciência Florestal*, 2019, 29(1): 181-192.
- [46] Güney C O, Sarı A, Cekim H O, Küçüksille E U, Şentürk Ö, Gülsoy S, Özkan K. An advanced approach for leaf flammability index estimation. *International Journal of Wildland Fire*, 2022, 31(3): 277-290.
- [47] 胡同欣, 杨艺璇, 孙龙, 高传宇. 兴安落叶松林和白桦林下种植大球盖菇对枯落物层燃烧性的影响. *林业科学*, 2022, 58(7): 32-42.
- [48] 张恒, 崔孟然, 单延龙, 王飞. 中蒙边境典型草原草本可燃物燃烧性研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2021, 45(5): 171-177.
- [49] 张恒, 候晓佳, 张秋良. 内蒙古大兴安岭典型林分地表死可燃物燃烧性. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2020, 49(4): 486-491.
- [50] 铁烈华, 符饶, 张仕斌, 周世兴, 黄从德. 华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解过程中纤维素降解对模拟氮、硫沉降的响应. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(1): 16-22.
- [51] 于海晨, 王薇, 杜建华, 刘赵东, 陈敏斯, 王博, 刘晓东. 油松和侧柏林地表可燃物负荷量及影响因素. *北京林业大学学报*, 2021, 43 (6): 33-40.
- [52] 周润青, 刘晓东, 郭怀文. 大兴安岭南部分林分地表可燃物负荷量及其影响因子研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2014, 42 (6): 131-137.
- [53] 魏书精, 胡海清, 孙龙, 魏书威, 李世友. 气候变化背景下我国森林可燃物可持续管理的形势及对策. *森林防火*, 2012(2): 22-25.
- [54] 袁红新. 新疆伊犁河谷地区森林地表可燃物分析及风险评估[D]. 石河子: 石河子大学, 2023.
- [55] 梁瀛, 李吉玖, 赵凤君, 张毓涛, 孔婷婷, 努尔古丽·马坎. 天山中部天山云杉林地地表可燃物载量及其影响因素. *林业科学*, 2017, 53 (12): 153-160.
- [56] 周润青, 刘晓东, 张思玉. 兴安落叶松人工林地地表可燃物分布研究. *森林防火*, 2019(1): 19-23.
- [57] 张状, 宗树琴, 闫星蓉, 张浩, 黄宏超, 翟跃琴, 符利勇. 林分 and 地形因子对崇礼冬奥核心区森林地表可燃物载量的影响. *林业科学*, 2022, 58(10): 59-66.