

DOI:10.13332/j.1000-1522.20180361

## 北京妙峰山林场地表潜在火行为及燃烧性分析

李连强<sup>1</sup> 牛树奎<sup>1</sup> 陈锋<sup>1</sup> 陶长森<sup>1</sup> 陈羚<sup>1</sup> 张鹏<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学实验林场, 北京 100095)

**摘要:**【目的】森林燃烧性是森林被引燃的难易程度和着火后的火行为特征, 分析可燃物火行为及燃烧性为妙峰山林场地表可燃物管理、火险区划及森林防火提供依据。【方法】利用林场内 12 种主要森林类型调查数据和二类清查资料, 选择地表潜在火行为、火环境、可燃物理化性质及床层结构 4 大类指标, 采用主成分分析和聚类分析法计算 104 个小班地表可燃物燃烧性并对地表可燃物燃烧性指数 CI 进行了排序。【结果】(1) 无风条件下 104 个小班中, 各优势树种小班地表潜在火行为有以下规律: 针叶林普遍较大且地表火强度达到 2 000 kW/m 以上、蔓延速度 3 m/min 以上、火焰高度 1.5 m 以上, 灌木林次之地表火强度 700~2 000 kW/m、蔓延速度 1.5~3 m/min、火焰高度 1~1.5 m, 阔叶林较小地表火强度 700 kW/m 以下、蔓延速度 1.5 m/min 以下、火焰高度 1 m 以下。(2) 主成分分析表明, 地表可燃物燃烧性与火行为指数正相关, 与海拔因素负相关, 与含水率负相关, 与有效负荷量和床层高度正相关。(3) 聚类分析表明, 小班地表可燃物燃烧性指数 CI 分为 5 个等级: 高燃烧性(I)、较高燃烧性(II)、可燃性(III)、较低燃烧性(IV)、低燃烧性(V)。各燃烧性等级的小班优势树种分别为: 油松、落叶松、侧柏等针叶林, 位于林场东南、西北部; 油松、落叶松、侧柏与栓皮栎、五角枫等针阔混交林, 主要位于林场西北部; 栓皮栎、黄波罗、五角枫等阔叶纯林, 集中于林场东南、西北部; 山桃、荆条等灌木林及少数栓皮栎林、黄波罗等阔叶混交林, 分布在林场东北部; 荆条、山杏、鼠李、绣线菊等灌木, 主要位于林场西南和中部。【结论】以油松、落叶松等针叶林为主的小班地表潜在火行为普遍较大, 极易形成高强度地表火, 易发生树冠火; 燃烧性受到火环境、火行为和可燃物的影响, 特别是可燃物有效负荷量、床层高度、海拔和含水率因子; 高燃烧性和较高燃烧性小班多数位于林场北部、西北部, 要注重对不同燃烧等级小班分类管理、科学巡护。

**关键词:** 小班; 地表可燃物; 主成分分析; 潜在火行为; 燃烧性

**中图分类号:** S762.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2019)03-0058-10

**引文格式:** 李连强, 牛树奎, 陈锋, 等. 北京妙峰山林场地表潜在火行为及燃烧性分析 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(3): 58-67. Li Lianqiang, Niu Shukui, Chen Feng, et al. Analysis on surface potential fire behavior and combustion of Miaofeng Mountain Forest Farm in Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(3): 58-67.

### Analysis on surface potential fire behavior and combustion of Miaofeng Mountain Forest Farm in Beijing

Li Lianqiang<sup>1</sup> Niu Shukui<sup>1</sup> Chen Feng<sup>1</sup> Tao Changsen<sup>1</sup> Chen Ling<sup>1</sup> Zhang Peng<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Experimental Forest Farm of Beijing Forestry University, Beijing 100095, China)

**Abstract:** [Objective] Forest combustion is the difficulty degree of igniting a forest and the characteristics of fire behavior after a fire. Analysis of combustible fire behavior and combustion can provide a scientific basis for the forest fire prevention management and fire zoning under the forest of Miaofeng Mountain Forest Farm. [Method] Through the investigation of surface combustibles of 12 major forest types in farm, combined with the continuous forest resources, this paper selects four categories of indicators: surface fire behavior, fire environment, flammable physical properties and bed structure to calculate the combustibility

收稿日期: 2018-11-01 修回日期: 2018-12-22

基金项目: 国家林业局林业科技推广项目(2015-04)。

第一作者: 李连强。主要研究方向: 生态规划与管理。Email: 1164629835@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 牛树奎, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 生态规划与管理。Email: niushukui@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

of 104 small class surface fuels by principal component analysis and cluster analysis, and the surface combustibles combustion index (CI) and ranking were calculated. [Result] (1) In 104 small classes, the potential fire behavior of each dominant tree species in small classes was from large to small: coniferous forests was generally larger and the surface fire intensity reached 2 000 kW/m, the spread speed was above 3 m/min, and the flame height was over 1.5 m. The shrub was second, and its surface fire intensity was 700–2 000 kW/m, the spreading speed is 1.5–3 m/min, and the flame height is 1–1.5 m. The broadleaved was the lowest and it had a surface fire intensity of 700 kW/m or less, a propagation speed of 1.5 m/min or less, and a flame height of 1 m or less. (2) Principal component analysis showed that, the fire behavior index was directly proportional to the combustion, and the altitude factor was inversely proportional to the combustion. The water content was inversely proportional to the combustion. The effective load and the bed height were directly proportional to the combustion. (3) Cluster analysis showed that, the small class surface fuel combustion index (CI) was divided into five grades: high combustion (I), higher combustion (II), combustion (III), lower combustion (IV), low combustion (V). Small-shift dominant species of each flammability class, such as *Pinus tabuliformis*, *Larix gmelinii* and *Platycladus orientalis*, distributed in the southeastern and northwestern of the forest farm. Mixed forest of the *Pinus tabuliformis*, *Platycladus orientalis* and *Quercus variabilis*, *Acer monoMaxim.* mainly located in the northwestern corner of the forest farm. Broadleaved pure forest, such as cork oak, *Quercus variabilis*, *Phellodendron amurense*, *Acer mono*, which were concentrated in the southeastern and northwestern of the forest farm. Mountain peach and shrubs such as *Vitex negundo* and a few broadleaved mixed forests, such as *Quercus variabilis*, *Juglans mandshurica*, which were distributed in the northwestern forest farm. The shrubs such as *Vitex negundo*, *Armeniaca sibiricat*, *Rhamnus davurica* and *Spiraea salicifolia*, mainly located in the southwestern and central forest farm. [Conclusion] The potential fire behavior of small-scale of *Pinus tabuliformis* and *Larix gmelinii* forests is generally large, and it is easy to form high-intensity surface fires, which are prone to canopy fires. Combustibility is affected by fire environment, fire behavior and combustibles, especially combustible payload, bed height, altitude and moisture content factors. Small classes of the higher-combustion and high-combustion are located in the north and northwest of the forest farm. It is necessary to pay attention to the small-class classification management and scientific patrol of different combustion levels.

**Key words:** small class; surface fuel; principal component analysis; potential fire behavior; forest combustion

森林可燃物是森林火灾发生的基础也是森林燃烧的主体<sup>[1]</sup>, 普遍认为森林燃烧性(Forest combustion)是可燃物被引燃难易程度及着火后表现的火行为综合特征, 是森林火灾引发、林火行为预测、林火生态影响评价和生物防火林带建设的重要基础<sup>[2-5]</sup>。森林燃烧性受到可燃物、火环境和火源等条件制约和控制<sup>[6-8]</sup>。其中森林植被类型的自身理化性质是决定火行为和燃烧性的基础<sup>[9]</sup>, 火源条件是引发森林火灾的主导因素<sup>[10]</sup>, 火环境是森林燃烧的重要条件<sup>[11]</sup>。

国内外对于燃烧性的研究, 一方面分析可燃物含水率、负荷量、抽提物、灰分、热值等理化性质。如覃先林等<sup>[12]</sup>对东北林区落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦(*Betula platyphylla*)和柞树(*Quercus mongolic*)的细小可燃物含水率变化进行了研究, 利用多元统计方法建立多种可燃物含水率与其相关因子的回归模型; 李旭等<sup>[13]</sup>选择滇中 15 种木本植物的化学性质、

生物学和生态学特征指标, 应用层次分析对 15 种木本植物的燃烧性进行排序和分类。另一方面探究火环境和火源条件对森林燃烧性的影响。如王月等<sup>[14]</sup>对辽宁西北部地区主要林型地被可燃物种类、组成、载量及燃烧性进行研究, 确定易燃、较易燃和不易燃林分; 李艳琴等<sup>[15]</sup>运用聚类分析法, 选择 50 个树种的生物学、生态学指标分析树种燃烧性; Fréjaville 等<sup>[16]</sup>利用地表火行为模型评估地表可燃物燃烧性, 探讨降水与郁闭度对森林燃烧性的影响; 苏文静等<sup>[17]</sup>对昆明地区 9 种藤本植物的叶片含水率、单位面积质量、燃烧速率和损坏速率等进行了测定, 评价藤本叶片燃烧性。综上可见对于燃烧性的研究主要集中在单个可燃物、单个林分层次上的中小尺度研究, 燃烧性中的火行为分析和 ArcGIS 在森林燃烧中的应用研究较少。

本文以北京妙峰山林场 104 个小班和小班内 12

个主要森林类型为研究对象,选择地表潜在火行为、火环境、可燃理化性质和床层结构4类指标,结合林场二类清查资料确定不同小班的综合燃烧性指数(Combustion index, CI),运用主成分分析和聚类分析计算不同小班燃烧性并进行排序,使用 ArcGIS 制作林场森林火灾燃烧性等级图,研究结果对林场可燃物管理、火灾控制及火险区划等具有现实意义<sup>[18]</sup>。

## 1 研究区域概况

北京妙峰山林场位于北京海淀区(39°54'N、116°28'E),横跨海淀、门头沟2区。山地以褐土为主,成土母岩多为石灰岩。海拔为100~1153 m,坡度16°~35°。暖温带大陆性季风气候,年均气温12.2℃,最高气温39.7℃,最低气温-19.6℃,年降水量近700 mm。

该地区自然资源丰富,暖温带落叶阔叶林,经演化现在以次生林和人工林为主。针叶林主要有油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等;阔叶林主要有栓皮栎(*Quercus variabilis*)、五角枫(*Acer truncatum*)和黄波罗(*Phellodendron amurense*)等。灌木林主要有荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、山桃(*Amygdalus persica*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)、胡枝子(*Lespedeza floribunda*)、绣线菊(*Spiraea trilobata*)等。草本包括茜草(*Rubies cordifolia*)、求米草(*Cheupodium album*)、

苔草(*Carex lanceolata*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 外业调查

在防火紧要期进行全面踏查,在妙峰山104个小班内的12种主要森林类型中随机选择36块20 m×20 m连续性较好、人为干扰较少具有代表性的标准地,每个森林类型3块。

对林分的乔木层、灌木层、草本和枯枝落叶层进行调查,分别树种测定树高、胸径、冠幅、活枝下高和死枝下高。每个标准地内设置5 m×5 m样方16个,测定灌木、草本和枯枝落叶层。在5 m×5 m样方内,测定灌木种类、盖度、高度,全部收割并分别称质量、取样;100时滞枯枝称质量、取样。在每个5 m×5 m样方固定一个角,设置1 m×1 m样方,测定草本植物种类、盖度和高度,分种类收割并称质量、取样;收割枯草称质量、取样;收集1时滞枯枝,称质量、取样;收集枯枝落叶层,称质量、取样;并测定各层的厚度。使用塑料袋收集可燃物,采用电子钩秤(精度1 g)称取质量,并扣除塑料袋的质量;采集样品100 g左右放入统一规格的牛皮纸信封内,采用电子天平(精度0.01 g)称质量,记载日期、标准地号、可燃物种类、质量。把样品带回实验室对可燃物理化性质进行测定,同时获取2014年妙峰山林场的二类清查数据。其中,可燃物种类划分标准见表1<sup>[19-20]</sup>。

表1 可燃物种类划分标准

Tab. 1 Classification criteria for fuel

| 类别 Category             | 灌木层 Shrub layer | 草本层 Herbal layer  | 枯枝落叶层 Litter layer             | 规格 Specification      |
|-------------------------|-----------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 活可燃物 Living combustible | 叶 Leaf          | 鲜草 Fresh grass    |                                |                       |
|                         | 小枝 Small branch |                   |                                | 直径 Diameter < 1 cm    |
|                         | 大枝 Big branch   |                   |                                | 直径 Diameter ≥ 1 cm    |
| 枯死可燃物 Dead combustible  |                 | 枯草 Withered grass |                                |                       |
|                         |                 |                   | 1 h 滞枯枝 Dead branch 1 hour     | 直径 Diameter < 0.6 cm  |
|                         |                 |                   | 10 h 滞枯枝 Dead branch 10 hour   | 0.6 ~ 2.5 cm          |
|                         |                 |                   | 100 h 滞枯枝 Dead branch 100 hour | 2.5 ~ 7.5 cm          |
|                         |                 | 枯叶 Withered leaf  |                                | 落叶层 Leaf litter layer |

### 2.2 内业实验与计算

#### 2.2.1 可燃物理化性质的测定

利用电热风干燥箱测定含水率(Moisture content,  $M$ )和负荷量(Combustible load,  $W_n$ ),在105℃条件下将可燃物烘干至恒质量,根据样品干湿比及野外调查的各类可燃物质量,得出样方可燃物计算公式。

$$W_{no} = \sum_{p=1}^n W_{nop} = \sum_{p=1}^n \frac{W_{op}}{S_p} \quad (1)$$

式中: $W_{no}$ 为第 $o$ 个样方的可燃物负荷量( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), $W_{nop}$ 为第 $o$ 个样方第 $p$ 种类可燃物负荷量( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), $W_{op}$ 为第 $o$ 个样方第 $p$ 种类可燃物干质量( $\text{kg}$ ), $S_p$ 为第 $p$ 种类可燃物调查的样方面积( $\text{m}^2$ )。

使用 PRR3600 型全自动氧弹式量热仪测定样

品的热值(Heat,  $H$ ), 将野外样品在实验室烘干、粉碎, 取约 1 g 压成样品块, 再烘干去除水分, 用分析天平准确称量后(精确到 0.000 1 g), 使用量热仪测定样品的热值。每种可燃物的每个样品做 3 个重复, 求平均值。采用可燃物负荷量加权平均的方法计算林分层次可燃物种类的加权平均热值。

利用高温炉(SX<sub>2</sub>-12-10)测定灰分含量(Ash content,  $S$ ), 将烘干样品放入已经洗净并称质量和编号的坩埚, 再放到 105 °C 烘箱中烘至恒重并称质量; 在调温万用电炉上加热炭化, 之后在高温炉 600 °C 条件下灰化 8 h, 冷却后称质量。每种可燃物的每个样品做 3 个重复, 求平均值。

参考牛树奎等<sup>[19]</sup>、Wagner<sup>[21]</sup>研究, 有效可燃物总矿质含量 0.055 5, 有效矿质含量 0.010, 1 时滞表面积体积比 1 250 m<sup>-1</sup>, 10 时滞表面积体积比 253 m<sup>-1</sup>, 100 时滞表面积体积比 77 m<sup>-1</sup>。根据牛树奎等<sup>[19-20]</sup>利用表面积载量加权平均法计算各样方可燃物的理化性质。

### 2.2.2 地表潜在火行为计算

在无风、坡度参考二类清查资料, 计算 104 个小班地表潜在火行为, 主要包括地表火蔓延速度(Spread speed,  $R$ )、反应强度(Reaction intensity,  $I_R$ )、火强度(Fire intensity,  $I$ )、火焰高度(Flame height,  $L$ )。

地表潜在火行为的计算参考 Rothermel 模型<sup>[22]</sup>。其中, 反应强度( $I_R$ )与可燃物热值、有效负荷量、潜在反应速率、矿物质抑制系数、水分阻滞系数成正比<sup>[22]</sup>, 地表火蔓延公式<sup>[19-23]</sup>:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \Phi_W + \Phi_S)}{\rho_b \varepsilon Q_g} \quad (2)$$

式中:  $R$  为蔓延速度 (m/min),  $I_R$  为反应强度 (kJ/(m<sup>2</sup>·min)),  $\xi$  为与热传导有关的系数,  $\Phi_W$  和  $\Phi_S$  分别为风速和坡度调整系数,  $\rho_b$  可燃物干质量颗粒体密度 (kg/m<sup>3</sup>),  $\varepsilon$  为与体密度有关的加热系数,  $Q_g$  点燃单位质量可燃物的热量 (kJ/kg)。

地表火强度的计算参考美国物理学家 Byram<sup>[24]</sup> 在 1959 年提出计算火线强度公式, 其国际标准<sup>[21-22]</sup>:

$$I = \frac{1}{60} H W_n R \quad (3)$$

式中:  $I$  为火线强度 (kW/m),  $H$  为可燃物热值 (kJ/kg),  $W_n$  为有效可燃物负荷量 (kg/m<sup>2</sup>),  $R$  为林火的蔓延速度 (m/min)。

火焰高度参考 Byram<sup>[24]</sup> 提出的火焰高度公式, 其国际标准<sup>[23]</sup>:

$$L = 0.007 7 I^{0.46} \quad (4)$$

式中:  $L$  为火焰高度 (m),  $I$  为火线强度 (kW/m)。

### 2.2.3 小班燃烧性指标计算

本文选择小班地表可燃物潜在火行为、火环境条件、可燃物理化性质和床层结构 4 类因子作为小班燃烧性的评价指标。

小班地表潜在火行为利用 Rothermel 模型<sup>[22]</sup> 计算, 火环境因子利用二类清查资料中的小班坡度 (Slope)、海拔 (Elevation,  $E$ )、郁闭度 (Canopy closure,  $CD$ ) 表述, 小班地表可燃物理化性质因子有灰分含量、热值、含水率, 小班地表可燃物床层结构因子包括可燃物负荷量、床层高度 (Fuel bed depth,  $h$ )、紧密度 (Mean packing ratio,  $\beta$ )、比表面积 (Surface area to volume ratio,  $\sigma$ )<sup>[25]</sup>。根据小班内 12 中主要森林类型的地表可燃物理化性质和床层结构数据, 利用树种组成和郁闭度指标计算小班地表可燃物理化性质和床层结构指标:

$$F_{ti} = \sum_{j=1}^n F_{ij} C_i P_{ij} \quad C_i = \frac{CD_i}{CD_{\max}} \quad (5)$$

式中:  $F_{ti}$  为小班理化性质和床层结构指标,  $F_{ij}$  为  $i$  小班内  $j$  种森林类型理化性质和床层结构指标,  $P_{ij}$  为  $i$  小班内  $j$  种森林类型树种组成比例,  $C_i$  为  $i$  小班郁闭度比,  $CD_i$  为  $i$  小班郁闭度 (%),  $CD_{\max}$  为小班最大郁闭度 (%)。其中, 共 12 种森林类型  $j$  为 1 ~ 12; 104 个小班  $i$  为 1 ~ 104。

主成分分析是将多个指标通过降维简化为少量综合指标的一种方法, 用少数变量尽可能多的反映原来变量的信息<sup>[26]</sup>。设  $\mathbf{F} = (F_1, F_2, \dots, F_l)$  是  $l$  维随机向量,  $\mathbf{F}$  为多个小班燃烧性指数矩阵, 即小班地表可燃物燃烧性指数 ( $F_i$ ) 由此得到主成分得分:

$$PC_i = a_{1i} F_1 + a_{2i} F_2 + \dots + a_{li} F_l \quad (6)$$

第  $n$  个主成分方差贡献率在 85% ~ 90% 时, 取前  $n$  个主成分, 来反映燃烧性指数  $F_i$  的信息。其综合得分:

$$CI = W_1 \cdot PC_1 + W_2 \cdot PC_2 + \dots + W_n \cdot PC_n \quad (7)$$

式中:  $PC_i$  为第  $i$  个主成分得分,  $CI$  为综合燃烧性指数,  $W_n$  为第  $n$  个主成分贡献率,  $PC_n$  为第  $n$  个主成分得分。

选择 Excel2016 和 SPSS21 统计软件, 利用主成分分析法计算 104 个小班燃烧性指数, 通过聚类分析确定小班燃烧性等级排序, 建立燃烧性等级体系并利用 ArcGIS 绘制妙峰山林场燃烧等级分布图。

## 3 结果与分析

### 3.1 林分地表可燃物理化性质与床层结构特征

可燃物理化性质与床层结构相互作用, 共同决定森林地表潜在火行为及燃烧性特征<sup>[27]</sup>, 小班内 12 种主要森林类型地表可燃物理化性质和地表床层结构的加权平均值具有差异性(见表 2)。

表2 小班内12种主要森林类型地表可燃物理化性质和床层性质

Tab. 2 Properties of surface combustible beds and physicochemical in 12 major forest types in small classes

| 林分类型<br>Stand type                               | 地表可燃物理化性质<br>Physicochemical property |                                   |                                  | 地表可燃物燃烧床结构<br>Surface combustible burning bed               |                                 |                                  |   |
|--|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|---|
|  | 灰分<br>Ash/%                           | 热值<br>Heat/(kJ·kg <sup>-1</sup> ) | 含水率<br>Moisture<br>content (M)/% | 负荷量<br>Fuel load<br>(W <sub>0</sub> )/(kg·m <sup>-2</sup> ) | 床层高度<br>Fuel bed<br>depth (h)/m | 紧密度<br>Mean packing<br>ratio (β) | 比表面积<br>Surface area to<br>volume ratio (σ)/m <sup>-1</sup> |
| 侧柏 <i>Platyclus orientalis</i>                   | 0.098                                 | 18 321.11                         | 95.665                           | 0.128   | 0.965                           | 0.000 13                         | 291.732   |
| 黄波罗 <i>Phellodendron amurense</i>                | 0.102                                 | 17 806.84                         | 133.416                          | 0.189   | 0.823                           | 0.000 12                         | 418.788   |
| 落叶松 <i>Larix gmelinii</i>                        | 0.096                                 | 17 993.72                         | 106.969                          | 0.212   | 0.955                           | 0.000 16                         | 418.947   |
| 栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>                    | 0.101                                 | 17 877.27                         | 121.031                          | 0.190   | 0.918                           | 0.000 11                         | 245.519   |
| 油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>                    | 0.097                                 | 18 296.42                         | 110.755                          | 0.134   | 0.787                           | 0.000 05                         | 426.940   |
| 五角枫 <i>Acer mono</i>                             | 0.098                                 | 17 786.94                         | 119.221                          | 0.037   | 0.928                           | 0.000 03                         | 310.798   |
| 荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> | 0.101                                 | 17 606.78                         | 112.741                          | 0.833   | 0.935                           | 0.001 44                         | 394.634   |
| 胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>                     | 0.102                                 | 17 603.93                         | 113.920                          | 0.657   | 0.570                           | 0.000 57                         | 399.899   |
| 小叶鼠李 <i>Rhamnus davurica</i>                     | 0.101                                 | 17 604.19                         | 112.904                          | 0.501   | 0.628                           | 0.000 59                         | 399.418   |
| 绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i>                   | 0.101                                 | 17 604.11                         | 112.909                          | 0.579   | 0.540                           | 0.000 51                         | 399.566   |
| 山桃 <i>Prunus davidiana</i>                       | 0.103                                 | 17 703.69                         | 112.872                          | 0.409   | 0.990                           | 0.000 36                         | 398.486   |
| 山杏 <i>Armeniaca sibirica</i>                     | 0.102                                 | 17 704.70                         | 112.861                          | 0.630   | 0.550                           | 0.000 55                         | 398.468   |

注:地表可燃物包括灌木、鲜草等活可燃物,枯枝、落叶、枯草等死可燃物;比表面积为表面积与体积比。Notes: surface combustibles include live combustibles such as shrubs and fresh grasses, litter, dead grass and other dead combustibles. The specific surface area is the surface area to volume ratio.

理化性质反映可燃物自身易燃性,可燃物床层反映燃烧的环境<sup>[3]</sup>。其中,理化性质指标主要包括灰分含量、热值和含水率。12种主要森林类型地表可燃物理化性质的加权平均值取值范围分别为0.096%~0.102%、17 603.93~18 321.11 kJ/kg、95.665%~133.416%。侧柏、落叶松和油松林灰分含量较小,热值较大,含水率较低;而黄波罗、栓皮栎和五角枫3种乔木林及荆条、胡枝子、鼠李、绣线菊、山桃和山杏等灌木林灰分含量较大,热值较小,含水率较高,说明针叶林地表可燃物易燃性大于阔叶林地表可燃物易燃性。可燃物床层指标主要包括可燃物负荷量、床层高度、紧密度和表面积与体积比。12种主要森林类型地表可燃物床层指标加权平均值变化范围分别为0.037~0.833 kg/m<sup>2</sup>、0.54~0.99 m、0.000 03~0.001 44、245.52~426.94 1/m。灌木林可燃物负荷量加权平均值大于乔木林地表可燃物负荷量加权平均值,地表可燃物床层高度加权平均值差异性较小,油松地表可燃物表面积与体积比加权平均值较大。

### 3.2 小班地表潜在火行为特征

根据小班主要森林类型地表床层结构和地表初始蔓延速度结合林场二类清查资料中的坡度数据,在无风条件下计算小班尺度的地表潜在火行为(图1)。

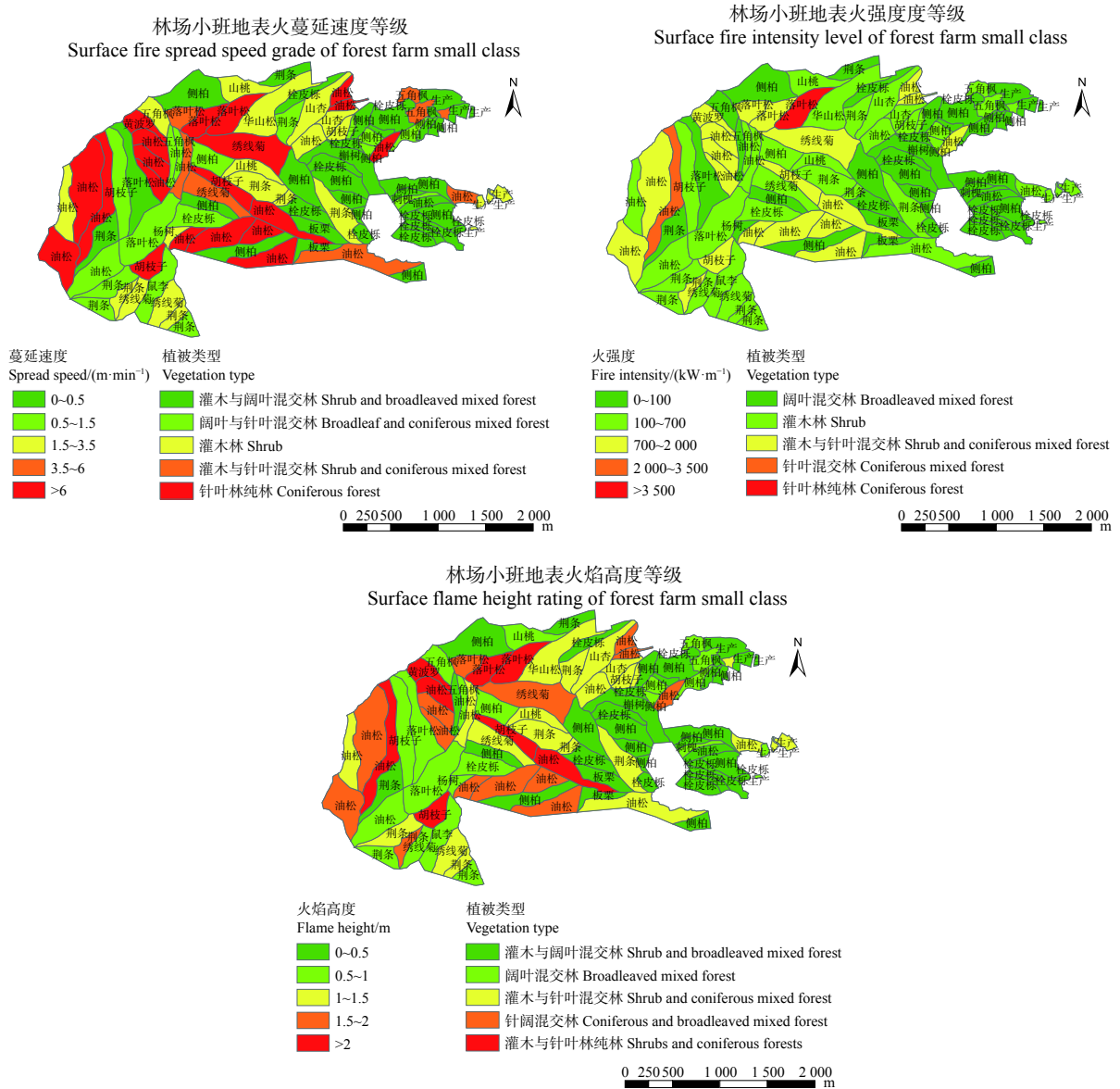
地表潜在火行为指标主要包括地表火强度、地表火蔓延速度和火焰高度并划分了5个等级。以油松、侧柏、落叶松等针叶林为优势树种的小班地表潜

在火行为普遍较大,地表火强度达到2 000 kW/m、蔓延速度3 m/min以上、火焰高度达1.5 m以上,而阔叶林和灌木林地地表潜在火行为则相对较小。

根据火强度等级划分原则<sup>[28]</sup>,各小班优势林分的地表潜在火行为存在以下规律:地表火强度中,大于2 000 kW/m多为落叶松、油松、侧柏等林分,位于林场北部和西北部属于高火强度等级;700~2 000 kW/m多为侧柏、油松和栓皮栎混交林,位于林场西北部属于中等火强度;700 kW/m以下小班面积最大,多为栓皮栎、五角枫等阔叶林,荆条、绣线菊、山杏灌木林及辅助生产林属于低等火强度。地表火蔓延速度中,3.5 m/min以上为高等级蔓延速度,易引发较大火灾,多为针叶林主要位于林场西北部;蔓延速度为1.5~3.5 m/min的小班为中等等级,一般坡度较平缓,面积较小,多为阔叶林和灌木林,主要在林场东北部;蔓延速度1.5 m/min以下的小班,所占小班面积大且分布不均匀,以灌木林和辅助性生产林为主分布在林场东部。地表火焰高度达1.5 m以上的小班属于较高等级,其面积最小;而中等火焰高度(1~1.5 m)和低等火焰高(0~1.5 m)的小班面积较大。

### 3.3 林场小班地表可燃物燃烧性分析

小班地表可燃物燃烧性分析能够为林场林火预防和扑救提供指导降低森林火灾造成的损失。其中,表3反映小班地表可燃物燃烧性指标的主成分



侧柏、黄波罗、落叶松、栓皮栎、油松、五角枫、荆条、胡枝子、鼠李、绣线菊、山桃、山杏。 *Platycladus orientalis*, *Phellodendron amurense*, *Larix gmelinii*, *Quercus variabilis*, *Pinus tabuliformis*, *Acer mono*, *Vitex negundo* var. *heterophylla*, *Lespedeza bicolor*, *Rhamnus davurica*, *Spiraea salicifolia*, *Prunus davidiana*, *Armeniaca sibirica*.

图 1 北京妙峰山林场小班地表潜在火行为指标

Fig. 1 Potential fire behavior index of small class in Beijing of the Miaofeng Mountain

分析结果,能够表述不同指标在燃烧性中的作用;表 4 反映利用聚类分析后划分的小班燃烧性等级<sup>[28]</sup>;最后,利用 ArcGIS 绘制了妙峰山林场燃烧性等级图(图 2)。

由累计方差贡献率大于 80% 的原则,选择了 5 个主成分累计方差贡献率为 86.5%,另外所属成分舍去降维。由载量矩阵(表 3)可以看出,第 1 主成分各指标系数较大的分别为  $I_R(-0.396)$ 、 $CD(-0.354)$ 、 $S(0.335)$ 、 $W_n(-0.398)$ 、 $\beta(0.365)$  包含 4 大类指标反映地表可燃物自身燃烧性,第 1 主成分值较小,燃烧性则较大,因此反应强度、郁闭度和负荷量与燃烧性呈正相关。第 2 主成分  $R$ 、 $I$ 、 $L$  的系数分别为 0.463、0.429、0.437 而其余系数都小于 0.4,所以第 2 主成

分主要反映火行为指标在可燃物燃烧性中的作用。一般地表潜在火行为指标大的小班,第 2 主成分值较小(系数为负值)燃烧性则较大。第 3 主成分  $E$  的系数为 0.489,明显大于其余各项系数,所以第 3 主成分主要反映燃烧性中火环境的作用大小。一般地表可燃物燃烧性大的小班,第 3 主成分值较小而海拔也较小。第 4 主成分  $M$  的系数为 0.659 大于其余各项系数,所以第 4 主成分反映可燃物物理性质在燃烧性中的作用。一般燃烧性越大,第 4 主成分值越小含水率就越小。第 5 主成分  $h$  的系数为 0.682 且为负数,所以第 5 主成分反映地表可燃物床层在燃烧性中的作用。地表可燃物床层高度与燃烧性正相关,如果可燃物床层较高第 5 主成分较小燃烧性较大。

表3 小班地表可燃物燃烧性指数的主成分分析

Tab. 3 Principal component analysis of combustible combustion index in small classes

| 指标项目<br>Index item                                      | 第1主成分<br>Component 1                             | 第2主成分<br>Component 2 | 第3主成分<br>Component 3 | 第4主成分<br>Component 4 | 第5主成分<br>Component 5 |       |
|---|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|
| <i>C</i>  |  | -0.115               | 0.692                | 0.218                | -0.101               |       |
| <i>R</i>  | 0.13   | -0.463               | -0.194               |                      |                      |       |
| 火行为指标<br>Fire behavior<br>indicator                     | <i>I</i>   | 0.161                | -0.429               | -0.251               |                      |       |
|   | <i>L</i>   | 0.205                | -0.437               | -0.107               |                      |       |
|   | <i>I<sub>R</sub></i>                             | -0.396               | 0.184                |                      |                      |       |
| 火环境指标<br>Fire environment<br>indicator                  | <i>CD</i>  | -0.354               |                      | -0.142               | 0.228                |       |
|   | <i>Slop</i>                                      | 0.139                | -0.316               | -0.214               | 0.326                |       |
| 载荷矩阵<br>Load matrix                                     | <i>E</i>   | 0.159                | -0.248               | 0.489                | 0.241                |       |
|   | 理化性质指标<br>Physical and<br>chemical<br>properties | <i>S</i>             | 0.335                | 0.24                 |                      | 0.149 |
|   |  | <i>H</i>             | -0.3                 | -0.22                | 0.12                 |       |
|   | <i>M</i>   |                      |                      |                      | 0.659                | 0.529 |
|   | <i>W<sub>n</sub></i>                             | -0.398               | 0.173                |                      |                      |       |
| 床层结构指标<br>Bed structure<br>index                        | <i>h</i>   | -0.172               |                      | -0.211               | 0.332                |       |
|   | <i>β</i>   | 0.365                | 0.159                |                      |                      |       |
| <i>σ</i>  | 0.25   | -0.178               | 0.241                | -0.446               |                      |       |
| 主成分的方差开方<br>Variance square of PC standard<br>deviation | 2.324  | 1.923                | 1.251                | 1.131                | 1.020                |       |
| 贡献率<br>Contribution rate                                | 0.360  | 0.246                | 0.104                | 0.085                | 0.069                |       |
| 方差贡献率<br>Contribution rate of variance                  | 0.360  | 0.606                | 0.711                | 0.796                | 0.865                |       |
| 累积方差贡献率<br>Cumulative contribution rate of<br>variance  | 0.360  | 0.606                | 0.711                | 0.796                | 0.865                |       |

注: *C*为常数; *R*为蔓延速度、*I*为火强度、*L*为火焰高度、*I<sub>R</sub>*为反应强度; *CD*为郁闭度、*Slop*为坡度、*E*为海拔; *S*为灰分含量、*H*为热值、*M*为含水率; *W<sub>n</sub>*为负荷量、*h*为床层高度、*β*为紧密度、*σ*为比表面积。Notes: *C*, constant; *R*, spread speed; *I*, fire intensity; *L*, flame height; *I<sub>R</sub>*, reaction intensity; *CD*, canopy closure; *Slop*, slope degree; *E*, elevation; *S*, ash content; *H*, calorific value; *M*, moisture content; *W<sub>n</sub>*, effective load; *h*, bed height; *β*, tightness; *σ*, specific surface area.

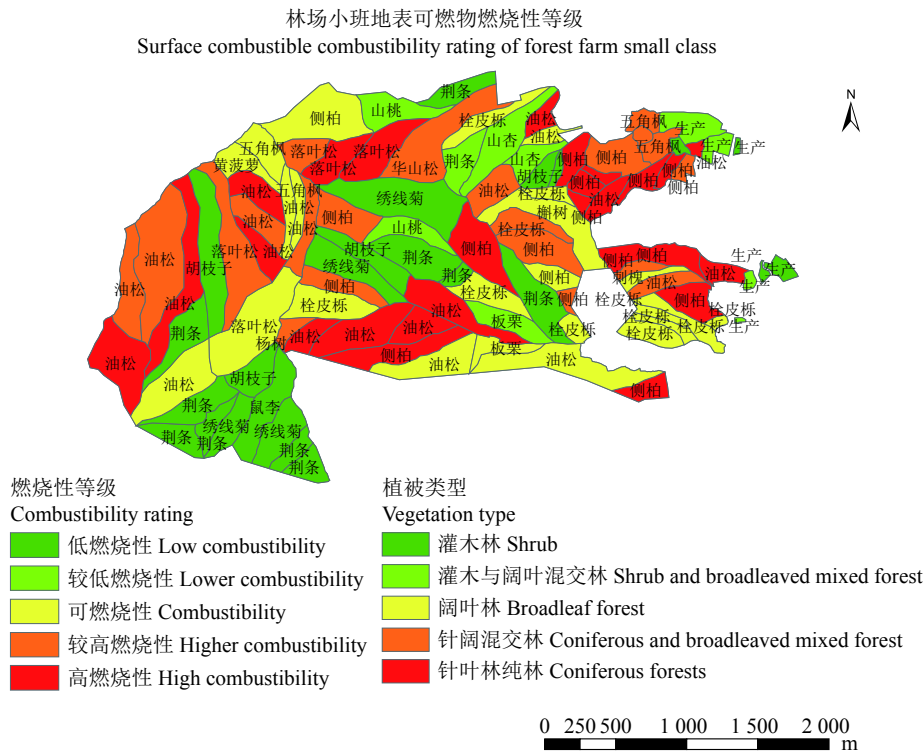
表4 妙峰山林场小班森林燃烧性等级

Tab. 4 Combustion grade of the small class in Miaofeng Mountain Forest Farm

| 燃烧性指数<br>Combustion index<br>(CI) | 分布<br>Distribution                       | 植被类型<br>Forest type   | 聚类结果<br>Clustering result | 燃烧性等级<br>Combustion rating       |
|-----------------------------------|--|---|---------------------------|----------------------------------|
| < -1                              | 东南、西北部<br>Southeast, northwest           | 油松、落叶松、侧柏等针叶林<br>Coniferous forests such as <i>Pinus tabulaeformis</i> ,<br><i>Larix gmelinii</i> , <i>Platycladus orientalis</i> , etc.  | -2.111 ~ -1.002           | 高燃烧性<br>(I) High combustible     |
| -1 ~ -0.5                         | 西北部<br>Northwest                         | 油松、侧柏与栓皮栎、五角枫等阔混交林<br>Coniferous and broadleaved mixed forests such as<br><i>Pinus tabulaeformis</i> , <i>Platycladus orientalis</i> ,<br><i>Quercus variabilis</i> , <i>Acer mono</i> , etc. | -0.818 ~ -0.509           | 较高燃烧性<br>(II) Higher combustible |
| -0.5 ~ 0                          | 东南、西北角<br>Southeast, northwest<br>corner | 栓皮栎、黄波罗、五角枫等阔叶林<br>Broadleaved forests such as <i>Quercus variabilis</i> ,<br><i>Phellodendron amurense</i> , and <i>Acer mono</i> , etc.   | -0.435 ~ -0.041           | 可燃烧性<br>(III) Combustible        |
| 0 ~ 1                             | 东北部<br>Northeast                         | 山桃、荆条等灌木林及少数阔叶混交林<br>Shrubs such as <i>Prunus davidiana</i> and <i>Vitex<br/>negundo</i> and a few broadleaved mixed forests, etc.  | 0.065 ~ 0.880             | 较低燃烧性<br>(IV) Lower combustible  |
| > 1                               | 西南部和中部<br>Southwest, central part        | 荆条、山杏、鼠李、绣线菊等灌木林<br>Shrubs such as <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> ,<br><i>Armeniaca sibirica</i> , <i>Rhamnus davurica</i> , and<br><i>Spiraea salicifolia</i> , etc.          | 1.255 ~ 2.356             | 低燃烧性<br>(V) Low combustible      |

由图2可以看出,属于高燃烧性等级的小班,一般以油松、落叶松、侧柏等针叶林为优势树种,该区

域一般分布在林场东南部、西北部,分布非常不均;地表可燃物含水率低,中等海拔,且有效负荷量较



侧柏、落叶松、栓皮栎、油松、五角枫、荆条、胡枝子、鼠李、绣线菊、山桃、山杏。 *Platycladus orientalis*, *Phellodendron amurense*, *Larix gmelinii*, *Quercus variabilis*, *Pinus tabulariformis*, *Acer mono*, *Vitex negundo* var. *heterophylla*, *Lespedeza bicolor*, *Rhamnus davurica*, *Spiraea salicifolia*, *Prunus davidiana*, *Armeniaca sibirica*.

图 2 北京妙峰山林场小班地表可燃物燃烧性等级

Fig. 2 Small class surface fuel combustibility rating in the Miaofeng Mountain Forest Farm

多,易引发高强度地表火;针叶林空间分布非常集中,在大风条件下极易引发树冠火,应通过抚育间伐和修枝降低树冠火的发生概率,兼顾地表可燃物的清理降低地表火强度。属于较高燃烧性等级的小班,一般为油松、落叶松、侧柏与栓皮栎、五角枫等针阔混交林为优势树种的小班,地表可燃物负荷量较大,湿度较针叶纯林稍大,较易引发中等强度地表火;由于阔叶林的影响,混交林空间较大,可能引发树冠火;该区域主要集中在林场西北部,在防火期内应严格控制火源,对地表可燃物进行集中清理,降低地表火的发生。属于可燃性等级的小班,主要分布在林场东南角、西北部,一般为栓皮栎、黄波罗、五角枫等阔叶纯林及阔叶林较多的针阔混交林,这类林分湿度偏大、阴凉,特别是灌木、草本含水率较高,不易引发地表火;在正常抚育同时,需实施人工整枝,保持优良的林冠结构。属于较低燃烧性等级的小班,主要为山桃、荆条灌木林及少数栓皮栎林等阔叶混交林,灌木、草本含水率较高,不易引发地表火;该区域分布在林场东北部,注意进行日常巡视,防止地表可燃物堆积。属于低燃烧性等级的小班面积最小,主要在林场西南部和中部,包括荆条、山杏、鼠李、绣线菊等灌木林,一般不发生树冠火;应加强日常巡护适时进行割灌处理减少地表可燃物有效负

荷量。

## 4 结果与讨论

本文利用北京妙峰山林场小班内主要 12 种森林类型地表可燃物调查数据及二类清查资料,分析了 104 个小班地表潜在火行为和燃烧性特征得出以下结论:

(1)以油松、侧柏、落叶松等针叶林为优势树种的小班地表潜在火行为普遍较大,地表火强度达到 2 000 kW/m 以上、蔓延速度 3 m/min 以上、火焰高度达 1.5 m 以上,而阔叶林小班相对较小。这一结论与牛树奎等人<sup>[21-22]</sup>研究结果一致。导致这一结果的原因可能是油松、侧柏、落叶松等地表可燃物灰分含量相对较小、热值较大、含水率较低、有效负荷量和比表面积都较大,而阔叶林地表可燃物则相反。

(2)主成分分析得到,火行为特征与燃烧性指数正相关;火环境中的海拔因素与燃烧性呈负相关;可燃物理化性质中的含水率对燃烧性影响最大且与燃烧性呈负相关;地表床层结构中的有效可燃物负荷量和床层高度对燃烧性影响最大且与燃烧性呈正相关。因此,森林燃烧性大小不仅取决于地表火行为,还与可燃物自身理化性质、火环境及可燃物床层结构密切相关,多种因素综合作用造成可燃物燃烧性



差异<sup>[27]</sup>。

(3)根据聚类分析把林场小班燃烧性划分为5等级:高燃烧性( $CI < -1$ )、较高燃烧性( $-1 \leq CI < -0.5$ )、可燃性( $-0.5 \leq CI < 0$ )、较低燃烧性( $0 \leq CI < 1$ )、低燃烧性( $CI \geq 1$ )。以油松、落叶松等针叶林为主的小班为高燃烧性,主要分布在林场东南部、西北部。以油松、落叶松等与栓皮栎、五角枫等针阔混交林为主的小班为较高燃烧性,主要分布在林场西北角。以栓皮栎、黄波罗等阔叶林为主的小班为可燃性,主要分布在林场东南、西北部。较低燃烧性的小班主要优势树种为山桃、荆条及少数栓皮栎、五角枫等阔叶混交林,一般分布在东北部。低燃烧性的小班优势树种为荆条、山杏、鼠李、绣线菊等灌木林主要分布在林场西南和中部。

本研究在燃烧性等级的划分、可燃理化性质和火行为因素对燃烧性影响的结论与舒立福等<sup>[7]</sup>、Fréjaville等<sup>[16]</sup>和王晓丽<sup>[29]</sup>关于燃烧性的研究一致。山杏、荆条为低燃烧性与王晓丽等<sup>[31]</sup>结论一致,但是绣线菊燃烧性结论相反,可能是本文考虑了火环境和床层结构对燃烧性的影响,而王晓丽等<sup>[30]</sup>的研究只是考虑了理化性质因子。由于森林燃烧性影响因素众多,加之本研究没有考虑到可燃物自身的空间异质性,特别是地表植被和枯立木分布的随机性,使得可燃物空间分布的复杂性增强<sup>[31]</sup>,在一定程度上影响了对森林燃烧性结果的合理解释,因此仍需长期跟踪深入研究。

#### 参 考 文 献

- [1] 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):264-369.  
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): 264-369.
- [2] Gill A M, Zylstra P. Flammability of Australian forests[J]. *Australian Forestry*, 2005, 68(2): 87-93.
- [3] 胡乙山,张立,唐贺统.森林可燃物及其燃烧特性研究[J].*防护林科技*, 2005(3): 26-27.  
Hu Y S, Zhang L, Tang H T. Study on forest fuel and its combustibility[J]. *Protection Forest Science & Technology*, 2005(3): 26-27.
- [4] 王秋华,肖慧娟,徐盛基,等.滇中安宁“3·29”重大森林火灾火烧迹地灌木林的燃烧性研究[J].*安全与环境学报*, 2016, 16(1): 138-141.  
Wang Q H, Xiao H J, Xu S J, et al. Retrogressive study and analysis of the burning features of the shrubs in the fire taking place on 29 March, 2006, in Anning, Yunnan[J]. *Journal of Safety & Environment*, 2016, 16(1): 138-141.
- [5] 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.
- [6] Zylstra P J. Flammability dynamics in the Australian Alps[J]. *Austral Ecology*, 2018, 43(5): 579-591.
- [7] 舒立福,张小罗,戴兴安,等.林火研究综述(II):林火预测预报[J].*世界林业研究*, 2003, 16(4): 34-37.  
Shu L F, Zhang X L, Dai X A, et al. Forest fire research(II): fire forecast[J]. *World Forestry Research*, 2003, 16(4): 34-37.
- [8] 杨璐嘉,王成武,唐章英,等.基于GIS的普达措国家森林公园火险区划分分析[J].*企业技术开发*, 2015, 34(28): 25-28.  
Yang L J, Wang C W, Tang Z Y, et al. Analysis of Pudacuo National Forest Park fire zoning based on GIS[J]. *Technological Development of Enterprise*, 2015, 34(28): 25-28.
- [9] 黄宝华,张华,孙治军.基于层次分析(AHP)的山东林火风险区划研究[J].*火灾科学*, 2014, 23(4): 225-232.  
Huang B H, Zhang H, Sun Z J. Shandong forest fire danger division research based on analytic hierarchy process(AHP)[J]. *Fire Safety Science*, 2014, 23(4): 225-232.
- [10] 李小川,李兴伟,王振师,等.广东森林火灾的火源特点分析[J].*中南林业科技大学学报*, 2008, 28(1): 89-92.  
Li X C, Li X W, Wang Z S, et al. Analysis of fire source characteristics of Guangdong forest fires[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2008, 28(1): 89-92.
- [11] 张尚印,祝昌汉,陈正洪.森林火灾气象环境要素和重大林火研究[J].*自然灾害学报*, 2000, 9(2): 111-117.  
Zhang S Y, Zhu C H, Chen Z H. Research on forest fire meteorological environmental elements and large forest fires[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2000, 9(2): 111-117.
- [12] 覃先林,张子辉,易浩若,等.一种预测森林可燃物含水率的方法[J].*火灾科学*, 2001, 10(3): 159-162.  
Qin X L, Zhang Z H, Yi H R, et al. A methodology to predict the moisture of forest fuels[J]. *Fire Safety Science*, 2001, 10(3): 159-162.
- [13] 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 & Planning*, 2016, 41(2): 62-68.
- [14] 王月,高国平,周绍砚,等.辽宁西北部地区森林地被可燃物及其燃烧性的研究[J].*沈阳农业大学学报*, 2006, 37(5): 716-719.  
Wang Y, Gao G P, Zhou S Y, et al. Combustible ground cover and combustibility of forest in Northwest Liaoning Province[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, 37(5): 716-719.
- [15] 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): 34-36.  
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): 34-36.

- [16] Fréjaville T, Curt T, Carcaillet C. Tree cover and seasonal precipitation drive understory flammability in alpine mountain forests[J]. *Journal of Biogeography*, 2016, 43(9): 1869–1880.
- [17] 苏文静, 张思玉, 何诚, 等. 昆明地区9种藤本植物活叶片的燃烧性[J]. *林业资源管理*, 2017(6): 120–123.
- Su W J, Zhang S Y, He C, et al. Combustion characteristics of live leaves of 9 lianas species in Kunming, Yunnan Province[J]. *Forest Resources Management*, 2017(6): 120–123.
- [18] 梁瀛, 李吉玫, 赵凤君, 等. 天山中部天山云杉林地表可燃物载量及其影响因素[J]. *林业科学*, 2017, 53(12): 153–160.
- Liang Y, Li J M, Zhao F J, et al. Surface fuel loads of Tianshan Spruce forests in the central Tianshan Mountains and the impact factors[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53(12): 153–160.
- [19] 牛树奎. 北京山区主要森林类型火行为与可燃物空间连续性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- Niu S K, Fire behavior and fuel spatial continuity of major forest types in the Mountainous Area, Beijing[M]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [20] 牛树奎, 贺庆棠, 陈锋, 等. 北京山区主要针叶林可燃物空间连续性研究: 可燃物水平连续性与树冠火蔓延[J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(3): 1–7.
- Niu S K, He Q T, Chen F, et al. Spatial continuity of fuels in major coniferous forests in Beijing mountainous area: fuel vertical continuity and crown fire occurrence[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(3): 1–7.
- [21] Wagner C E V. Conditions for the start and spread of crown fire[J]. *Revue Canadienne De Recherche Forestière*, 1977, 7(1): 23–34.
- [22] Rothermel R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels.[M]. Ogden: Usda Forest Service General Technical Report, 1972.
- [23] 单延龙, 舒立福, 王洪伟, 等. Rothermel 火蔓延模型特征参数的解析[J]. *森林防火*, 2003(1): 22–25.
- Shan Y L, Shu L F, Wang H W, et al. Analysis of characteristic parameters of Rothermel's fire spread model[J]. *Forest Fire Prevention*, 2003(1): 22–25.
- [24] Byram G M. Combustion of forest fuels [C]//Davis K P. Forest fire: control and use. New York: McGraw-Hill Book Company, 1959: 77–84.
- [25] 夏智武. 森林地表可燃物燃烧性评价研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- Xia Z W. Study on evaluation of forest surface fuel flammability [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.
- [26] 宋叙言, 沈江. 基于主成分分析和集对分析的生态工业园区生态绩效评价研究: 以山东省生态工业园区为例[J]. *资源科学*, 2015, 37(3): 546–554.
- Song X Y, Shen J. The ecological performance of eco-industrial parks in Shandong based on principal component analysis and set pair analysis[J]. *Resources Science*, 2015, 37(3): 546–554.
- [27] 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.
- [28] Hoffman C M, Morgan P, Mell W, et al. Surface fire intensity influences simulated crown fire behavior in lodgepole pine forests with recent mountain pine beetle caused tree mortality[J]. *Forest Science*, 2013, 59(4): 390–399.
- [29] 王晓丽. 北京山区森林燃烧性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- Wang X L. Study on combustibility of forests in Beijing Mountain Area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [30] 王晓丽, 牛树奎, 阚振国. 北京地区主要树种理化性质研究及易燃性初步分析[J]. *林业资源管理*, 2008(4): 83–88.
- Wang X L, Niu S K, Kan Z G. The preliminary analysis of the characteristics and flammability of main tree species in Beijing Area[J]. *Forest Resources Management*, 2008(4): 83–88.
- [31] 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.

(责任编辑 赵勃  
责任编辑 舒立福)