

以地表死可燃物评估八达岭林场森林燃烧性

王晓丽¹, 牛树奎^{1,*}, 马钦彦¹, 阚振国²

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国人民武装警察部队警种指挥学院, 北京 102202)

摘要: 森林燃烧性是森林火险评估的基础, 也是制定营林防火措施的依据。以北京市八达岭林场 18 种主要森林类型的地表死可燃物为研究对象, 分别以死可燃物负荷量、含水率及综合属性为分析依据, 结合国内外最新研究成果、林场实际情况和样地调查, 分别讨论并对比不同森林类型的燃烧性, 并划分等级。研究得出, 以地表死可燃物综合属性为分析依据, 研究不同森林类型的燃烧性更符合林场实际情况, 并以综合属性为依据绘制林场燃烧性等级图, 同时, 死可燃物负荷量和含水率的分析, 可以为营林防火措施的制定提供理论依据。

关键词: 林分燃烧性; 可燃物负荷量; 可燃物含水率; 综合属性

文章编号: 1000-0933(2009)10-5313-07 中图分类号: Q142, Q948, S718.5 文献标识码: A

Forests combustibility evaluation in Badaling Forest Farm based on surface dead fuel

WANG Xiao-Li¹, NIU Shu-Kui^{1,*}, MA Qin-Yan¹, KAN Zhen-Guo²

1 Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, China

2 Command College of Armed Police Forces, Beijing 102202, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5313 ~ 5319.

Abstract: Forest combustibility is the foundation for fire danger rating system, as well as the theoretical basis for fuel reduction treatments. The combustibility of 18 forest types in Beijing Badaling Forest Farm were studied in this research based on the surface dead fuel. The fuel load, fuel moisture, and integrated attributes were analyzed. Combined with the latest scientific research achievement in this area, the actual situation of forest farm, as well as the sample plots survey, the combustibility of different forest types were discussed and classified. The result shows that the combustibility evaluation which based on integrated attributes is more reasonable, and the forest fire danger map is finished based on the integrated attributes. Also, the surface dead fuel load and fuel moisture analysis can be used as the theoretical basis for the fuel management.

Key Words: forest combustibility; fuel load; fuel moisture; integrated attribute

森林燃烧性 (forest combustibility) 是描述一个有多种树木和植被所构成的森林群落对火的反应, 一般是指森林群落被引燃着火的难易程度以及着火后所表现的燃烧状态和燃烧速度的综合^[1], 是林火研究的重点和难点, 也是描述森林火灾的属性之一。本研究以北京市八达岭林场 18 种主要森林类型的地表死可燃物为研究对象, 结合国外最新研究成果, 以地表死可燃物负荷量、含水率、综合属性为分析依据, 评估不同森林类型的燃烧性; 同时, 对比 3 种不同分析依据, 所得森林燃烧性评估的差异, 并以死可燃物综合属性为依据绘制不同森林类型的燃烧性等级图。本次研究结果得出: 应用地表死可燃物综合属性评估森林燃烧性符合林场实际

基金项目: 北京市科委重大科技资助项目 (D0706001000091); 北京市教育委员会共建重点学科资助项目 (XK100220655)

收稿日期: 2008-06-17; 修订日期: 2009-03-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shukuiniu@bjfu.edu.cn

情况,为森林燃烧性的进一步研究奠定理论基础,同时得出地表死可燃物负荷量、含水率,可以为营林防火措施的制定提供科学依据。

1 研究方法

1.1 森林燃烧性评估指标的选取

国内外关于森林燃烧性的研究主要包括两方面内容:一方面是以可燃物类型,林分结构,可燃物负荷量等为基础,定性讨论森林燃烧性;另一方面主要是侧重于不同森林类型林火模型(火灾发生、蔓延等)的建立,通过可燃物属性的分析预测林火发生的可能性、林火行为,这也一直是林火研究的热点^[2]。无论是定性的森林燃烧性分析还是定量的林火模型研究都是以可燃物属性为基础的林火研究,而在可燃物属性中负荷量和含水率是重点,也是林火研究的焦点。

(1)可燃物负荷量是火种类、林火发生可能性和树冠火蔓延程度的主要影响因素^[3-9],同时也是燃烧性的评估指标之一^[10,11]。因此,研究中根据死可燃物负荷量的大小,以等级的形式评估林分燃烧性。

(2)可燃物含水率是评估森林燃烧性的重要指标之一^[12,13]。一方面,低含水率是森林火灾发生的决定性因素^[14],灌木丛鲜叶含水率低于 75% 时,易发生火灾^[15],针叶含水率低于 100% 时,针叶林有发生树冠火的可能性^[16];另一方面,低含水率是火强度的影响因素之一,干旱季节发生的高强度林火主要是由于低含水率造成的^[17,18]。

E. Chuvieco 和 I. Aguado 将可燃物含水率转化为预测森林火灾发生的有效变量^[19],本研究基于该成果,评估林分燃烧性。

如果 $FMC > ME$, 则:

$$IP_f = \{1 - [(FMC - ME)/(FMC_{\max} - ME)]\} \times 0.2$$

另外

$$IP_f = 0.3 + [(ME - FMC)/(ME - FMC_{\min})] \times 0.8$$

其中, IP_f 为火灾发生可能性(ignition potential); FMC 为可燃物含水率(fuel moisture content); ME 为熄灭含水率(moisture of extinction)。熄灭含水率是指火灾不能维持燃烧的临界含水率,针叶和草本的熄灭含水率一般为 12% ~ 200%,死可燃物约为 12% ~ 40%。本研究选取死可燃物熄灭含水率为 30%,因为死可燃物中纤维素的饱和点是 30%,低于该临界含水率,林分具有一定的森林火险^[20]。

(3)林火研究大多基于不同的环境条件和研究目的,侧重于可燃物负荷量或者含水率的单方面研究。例如,干旱地区主要考虑含水率的影响,可燃物累积较多的林分主要考虑负荷量的影响。在一个林分内,是否应同时考虑两者的综合属性呢?本研究结合国外的最新研究成果,形成以可燃物负荷量和含水率为自变量、可以评估森林燃烧性的有效变量,即可燃物综合属性^[20], BFI :

$$BFI = (0.3 - FMC)/FI$$

其中, FMC 为可燃物含水率, FI 为可燃物负荷量。当含水量大于 30% 时, BFI 为负值。当 FMC 减少, FI 增大时, BFI 增大,森林燃烧性加强。

综上所述,研究中选取可燃物负荷量、含水率、综合属性为分析依据,研究森林燃烧性。

1.2 研究地概况

八达岭林场位于北京市延庆县境内,距市区 60 km。全场基本处于山区,平均海拔 780 m,年平均气温 10.8℃,无霜期 160 d 左右,年均降水量 454 mm,多集中在 7、8 月份,年平均相对湿度 56.2%,年平均风速约 3.1 m/s。林场的森林类型属于华北区暖温带落叶阔叶林及山地垂直带的代表类型,从山下到山顶,分布有针叶林、阔叶林和灌丛,是北京地区森林垂直谱系分布比较完整和典型的地区之一。

八达岭林场在秋季防火期内,气候干燥、风大,易引发火灾;同时,八达岭是著名旅游区,人流量大,增加了人为火灾发生的可能性,具有森林火险。因此,对林场森林燃烧性的研究是必要的。

1.3 地表死可燃物外业调查和室内试验

本次研究选取的 18 种林型包括:针叶林(油松林 *Pinus tabulaeformis* forest、侧柏林 *Platycladus orientalis*

Franco forest、华山松林 *Pinus armandii* Franch. forest、华北落叶松林 *Larix principis-rupprechtii* Mayr forest);阔叶林(五角枫林 *Acer mono* Maxim forest、山杏林 *Armeniaca sibirica* Lam. forest、白梨林 *Pyrus bretschneideri* Rehd forest、刺槐林 *Robinia pseudoacacia* L. forest、辽东栎林 *Quercus wutaishanica* Mayr forest、杨树林 *Populus* L. forest、榆树林 *Ulmus pumila* L. forest、栎树林 *Koelreuteria paniculata* Laxm. forest);天然次生林(暴马丁香林 *Syringa amurensis* Rupr. forest、杂木林 Mixed broadleaved forest、糠椴林 *Tilia mandshurica* Rupr. forest、黑桦林 *Betula dahurica* Pall forest、核桃楸林 *Juglans mandshurica* Maxim forest、山丁子林 *Malus baccata* Borkh forest)。

在整理大量的林场资料和系统踏查后,基于林场的遥感图像,以主要树种组成、坡度、坡向、海拔等为分类依据,确定研究地,并具体到小班(图1)。根据研究地的情况分别设置20 m×20 m、20 m×30 m、30 m×30 m、20 m×50 m等面积大小不同的标准地(图2)。



图1 研究地位置图

Fig. 1 Location mapping of study areas

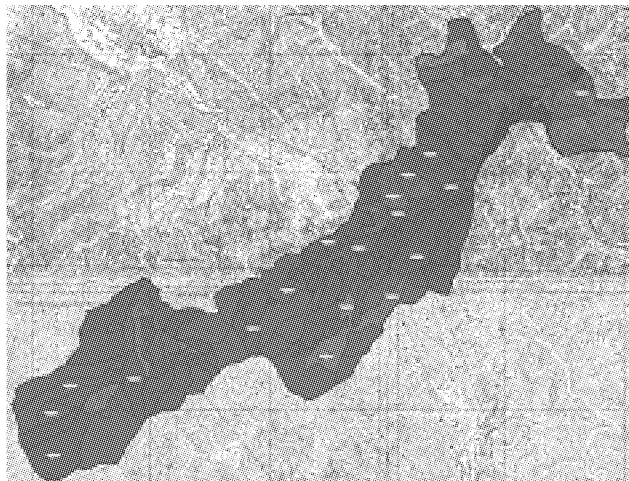


图2 样地分布图

Fig. 2 Distributing mapping of plots

应用对角线法,设置5个1 m×1 m的小样方,测定枯落叶和枯草的湿重,取样;设置5个2 m×2 m的样方,分类测定枯枝湿重,取样。枯枝的分类标准是时滞,即1时滞(0.0~0.6cm)、10时滞(0.6~2.5cm)、100时滞(2.5~7.6cm)、1000时滞(>7.6cm)。

在标准地内,连续7 d分别9:00,11:00,14:00,16:00,对死可燃物的枯落叶、枯草、4个时滞的枯枝分别称重、抽样。

将野外调查抽取的样品放入80℃的烘干箱内烘干至恒重,按(式1)计算可燃物负荷量,按(式2)计算可燃物含水率。

$$Fl = \frac{(W_D - W_B) \times W_P}{(W_N - W_A)} \quad (1)$$

$$FMC = \frac{(W_N - W_A) - (W_D - W_B)}{(W_D - W_B)} \quad (2)$$

式中, Fl 为单位可燃物负荷量($g \cdot m^{-2}$); W_N 为在自然状态下采集样品时称得的重量(g); W_D 为样品烘干后的重量(g); W_A 为信封湿重(g); W_B 为信封干重(g); W_P 为5个抽样样方单位面积可燃物平均湿重(g); FMC 为可燃物含水率。

1.4 数学分析方法

根据死可燃物负荷量的大小、 IP_f 值和 BFI 值对18种森林类型的燃烧性进行排序,并应用SPSS13.0软件划分3个燃烧性等级,即低燃烧性、可燃性、高燃烧性。随着林内地表死可燃物负荷量增加,含水率降低,森林火灾发生的可能性增大,林分燃烧性等级增强。

1.5 不同森林类型林分燃烧性等级图的绘制

以地表死可燃物综合属性为评估指标,利用 Photo Shop- CS₂绘图工具,绘制森林燃烧性等级图。

2 结果与分析

2.1 应用死可燃物负荷量分析森林燃烧性

地表死可燃物负荷量大小及连续程度影响火灾发生的可能性和地表火蔓延。低燃烧性林分是指林内地表死可燃物累积少,不易被点燃。研究中,侧柏林、华山松林、山杏林、栎树林属于幼龄林,林龄小,林内地表没有过多的死可燃物累积,油松林的营林迹象严重,地表枯枝落叶被清理过。因此,针叶林分(油松林、侧柏林、华山松林)和部分阔叶林(山杏林、栎树林)均属于低燃烧性林分。可燃性林分是指林内存在一定量的地表死可燃物,可以被引燃并维持火灾蔓延。暴马丁香林,刺槐林,黑桦林,辽东栎林,山丁子林和杨树林均属于可燃性林分,在有外来火源或者干旱、风大等有利于火灾发生的季节里,可以发生森林火灾。高燃烧性林分是指林内累积大量的地表死可燃物,极易着火,有利于火灾蔓延。天然次生林中的核桃楸林,糠椴林,杂木林,林龄大,林内有大量的地表死可燃物积累,针叶林分中的华北落叶松林内地表死可燃物负荷量大,这些林分均属于高燃烧性林分(表1~表3)。

表1 不同林型地表死可燃物属性表

Table 1 The floor fine fuel properties of different forest types

森林类型* Forest types	负荷量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) Fuel load	含水率 Fuel moisture	IP_f 值 Ignition potential	BFI 值 The Burnable fuels index
侧柏林 <i>Platycladus orientalis</i> Franco forest	0.9543	0.1124	0.9518	0.1791
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> forest	0.7246	0.1002	0.9846	0.1448
五角枫林 <i>Acer mono</i> Maxim forest	1.2719	0.6829	0.0447	-0.4870
华山松林 <i>Pinus armandii</i> Franch. forest	0.7184	0.1355	0.9048	0.1182
山杏林 <i>Armeniaca sibirica</i> Lam. forest	0.7171	0.4839	0.0642	-0.1319
白梨林 <i>Pyrus bretschneideri</i> Rehd forest	1.2974	0.3977	0.1310	-0.1267
刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i> L. forest	1.4615	0.3845	0.0922	-0.1235
暴马丁香林 <i>Syringa amurensis</i> Rupr. forest	1.5395	0.2189	0.7444	0.1249
杂木林 Mixed broadleaved forest	2.2800	0.1381	0.8153	0.3690
糠椴林 <i>Tilia mandshurica</i> Rupr. forest	1.8347	0.2771	0.3415	0.0420
辽东栎林 <i>Quercus wutaishanica</i> Mayr forest	1.3497	0.2886	0.3175	0.0154
黑桦林 <i>Betula dahurica</i> Pall forest	1.5513	0.5817	0.0218	-0.4369
核桃楸林 <i>Juglans mandshurica</i> Maxim forest	1.9805	0.4243	0.0406	-0.2462
华北落叶松林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> Mayr forest	1.8766	0.1446	0.9115	0.2917
杨树林 <i>Populus</i> L. forest	1.2159	0.1982	0.8874	0.1238
榆树林 <i>Ulmus pumila</i> L. forest	1.2930	0.2753	0.3121	0.0320
栎树林 <i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm. forest)	1.2865	0.1708	0.8495	0.1662
山丁子林 <i>Malus baccata</i> Borkh forest	1.6730	0.2273	0.5099	0.1216

* 下同 the same below

2.2 基于死可燃物含水率分析森林燃烧性

林内地表死可燃物很小或者很薄,形成的可燃物层结构疏松,空隙大,水分易蒸发,含水率受相对湿度影响较大,容易干燥、易燃。低燃烧性林分是指林内地表死可燃物含水率相对较高,不易发生火灾。核桃楸林,黑桦林,山杏林,五角枫林,白梨林,刺槐林都处于阴坡,除山杏林外,其他林分的郁闭度较大,地表死可燃物含水率高,引燃可燃物需要的热量大,属于低燃烧性林分。可燃性林分是指林内地表死可燃物含水率相对较低,可以引发火灾。暴马丁香林,糠椴林,辽东栎林,山丁子林,榆树林,杂木林均属于可燃性林分,在干旱风大等气候条件下,可以发生森林火灾。高燃烧性是指林内地表死可燃物含水率极低,受相对湿度、风速的影响,易引起火灾且形成高强度林火,是预防森林火灾的重点。研究中,侧柏林,华山松林,栎树林属于幼龄林,

尚未郁闭。杨树林和华北落叶松林冠幅小,郁闭度小。尚未郁闭或者郁闭度小的林分内,太阳辐射大,地表死可燃物含水率低。油松林是所有林分中,死可燃物含水率最小,最易燃林分。因此,针叶林(侧柏林、华山松林、华北落叶松林、油松林)和阔叶林中的栎树林、杨树林均属于高燃烧性林分(表1~表3)。

基于地表死可燃物含水率分析可以得出,针叶林的含水率要小于阔叶林,更易发生森林火灾。除林分受到郁闭度、坡向等林分因子的影响外,这也和树种的理化性质有关,针叶树种易燃^[21],针叶林内地表死可燃物由于含有较多的油脂不易分解,含水率低,热量大,易引发火灾。

2.3 应用死可燃物综合属性分析森林燃烧性

研究中地表死可燃物综合属性(*BFI*)将可燃物负荷量和含水率联合成具有评估意义的定量指标,依据*BFI*的大小得出:白梨林,山杏林,五角枫林由于地表死可燃物累积少,含水率高,不易引发森林火灾,林分具有低燃烧性。核桃楸林虽具有较高的地表死可燃物负荷量,但林分郁闭度大,含水率高,点燃死可燃物需要的热量高,属于低燃烧性林分。其次,华山松林、油松林、榆树林地表死可燃物累积少,但含水率低;糠椴林虽然地表死可燃物累积多,但含水率相对较高;暴马丁香林,辽东栎林,山丁子林、杨树林具有一定的地表死可燃物,含水率较低;这些林分均属于可燃烧性林分,可以引发森林火灾。再次,华北落叶松林和杂木林的地表死可燃物负荷量累积多,含水率小,侧柏林和栎树林虽然负荷量很小,但是含水率极低,这些林分易发生高强度林火,有利于火灾蔓延,具有高燃烧性(表1~表3)。

表 2 不同森林类型的燃烧性排序

Table 2 Combustibility order of different forest type			
森林类型 Forest types	基于负荷量 的排序 Order by fuel load	基于 IP_f 值排序 Order by IP_f	基于 BFI 值的排序 Order by BFI
侧柏林	4	17	16
油松林	3	18	14
五角枫林	6	3	1
华山松林	2	15	10
山杏林	1	4	4
白梨林	9	6	5
刺槐林	11	5	6
暴马丁香林	12	11	13
杂木林	18	12	18
糠椴林	15	9	9
辽东栎林	10	8	7
黑桦林	13	1	2
核桃楸林	17	2	3
华北落叶松林	16	16	17
杨树林	5	14	12
榆树林	8	7	8
栎树林	7	13	15
山丁子林	14	10	11

表 3 不同森林类型的燃烧性等级

Table 3 Combustibility rank of different forest type			
指标说明 Indexes explanation	低燃烧性 Low combustibility	可燃性 Medium combustibility	高燃烧性 High combustibility
基于负荷量划分 Rank by fuel load	白梨林,侧柏林,华山松林,栎树林,山杏林,油松林,榆树林,五角枫林	暴马丁香林,刺槐林,黑桦林,辽东栎林,山丁子林,杨树林	核桃楸林,华北落叶松,糠椴林,杂木林
数据范围(负荷量) Data range(load)	0. 7171 ~ 1. 2930	1. 2974 ~ 1. 6730	1. 8347 ~ 2. 2800
基于含水率划分 Rank by fuel moisture	核桃楸林,黑桦林,山杏林,五角枫林,白梨林,刺槐林	暴马丁香林,糠椴林,辽东栎林,山丁子林,榆树林,杂木林	侧柏林,华北落叶松林,华山松林,栎树林,杨树,油松林
数据范围(含水率) Data range(moisture)	0. 0218 ~ 0. 1310	0. 3121 ~ 0. 8153	0. 8495 ~ 0. 9846
基于综合指标划分 Rank by integrated attribute	白梨林,刺槐林,核桃楸林,黑桦林,山杏林,五角枫林	暴马丁香林,华山松林,糠椴林,辽东栎林,山丁子林,杨树林,油松林,榆树林	侧柏林,华北落叶松,栎树林,杂木林
数据范围(综合指标) Data range(integrated attribute)	- 0. 4870 ~ 0. 0000	0. 0154 ~ 0. 1448	0. 1662 ~ 0. 3690

2.4 比较不同分析依据评估森林燃烧性的差异性

通过以上的分析可以得出,以地表死可燃物负荷量、含水率、综合属性为分析依据,得出有些相同林分的燃烧性具有差异。

侧柏林和栎树林属于幼龄林,以地表死可燃物负荷量为分析指标,属于低燃烧性林分,但死可燃物含水率极低,易引发火灾,因此,以综合属性为分析指标,林分具有高燃烧性,与林分的实际情况相符,侧柏林和栎树林易着火且易形成高强度林火。同样,华山松林和油松林内,由于较少的死可燃物累积和极低的含水率,通过综合属性的评估,属于可燃性林分,符合实际的林分情况。因此,这些林分虽然可以引发火灾,但是林内地表死可燃物累积并不高,不应采取传统的营林防火措施,集中清理地被可燃物。在侧柏林、栎树林和华山松林内,可以在树干周围等可燃物累积较多的地方进行简单清理,避免高强度林火对幼树树干的灼烧。在油松林内,可以通过补种难燃树种,消灭林窗等措施,增大林分郁闭度,增大地表死可燃物含水率,从而降低火灾发生的可能性。

核桃楸林和糠椴林虽然地表死可燃物累积多,但含水率大,可采取清理有效地表可燃物的营林防火措施。黑桦林和刺槐林地表死可燃物含水率虽然低,但负荷量小,应采取补植补种难燃树种等方式消除林窗,增大林内地表死可燃物含水率。

华北落叶松林和杂木林 3 种分析指标所得结果几乎一致,林分内地表死可燃物负荷量大,含水率小,具有高燃烧性,是地表火营林防火措施的重点,应及时清理林内地表死可燃物,增大林分郁闭度,抑制火灾发生和蔓延。暴马丁香林,辽东栎林,山丁子林均属于可燃物性林分,林内有一定量的死可燃物累积,含水率较低,可以根据林分的实际情况,例如林内死可燃物的累积集中程度、距离道路的远近、人的可进入性、坡度、坡向等条件,制定具有空间化的死可燃物清理措施。

3 讨论

综上所述,地表死可燃物综合属性作为森林燃烧性的评估指标,符合 18 种森林类型的实际情况,更加全面合理。地表死可燃物负荷量和含水率可以为营林防火措施的制定提供理论依据。

基于地表死可燃物综合属性,对八达岭林场 18 种主要森林类型的林分燃烧性进行等级划分(表 3),绘制林场的燃烧性等级图(图 3)。从八达岭林场林分分布情况可知,高燃烧性林分(I)和中燃烧性林分(II)分布集中,面积较大,低燃烧性林分(III)分布比较分散,面积小。在秋季防火期内,林场内的林分易着火,而且一旦发生火灾,很容易蔓延,形成高强度林火,可以造成林场较高的树木死亡率和损伤率。因此,在林场内,采取有效的营林防火措施是必要和迫切的。

本次研究只是考虑了地表死可燃物对森林燃烧性的影响,而地表死可燃物只是林分中可燃物的一部分。综合林分内的所有易燃可燃物,通过综合指标的确定,结合空间格局分布,全面评估森林燃烧性是以后的研究有待解决的。

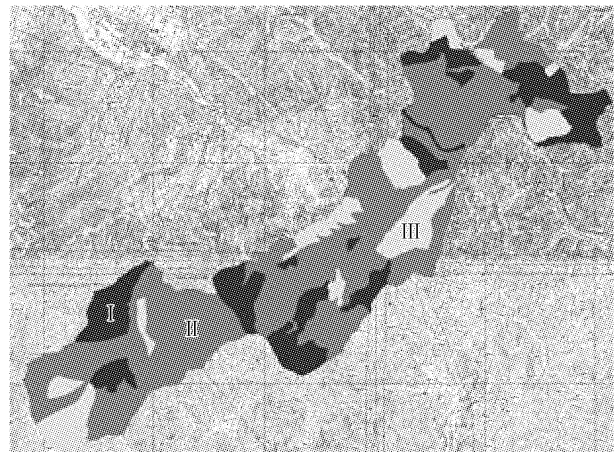


图 3 不同森林类型火险等级图

Fig. 3 Fire danger rating map of different forest types

References:

- [1] Hu H Q, Niu S K, Jin S, *et al.* Forest fire management. Beijing: China Forestry Press, 2005. 17—91.
- [2] Anna M L. Modeling backing fires in California grassland fuel. USA: University of California, Berkeley, 2001. 12—118.
- [3] Crockett J S, Engle D M. Combustion characteristics of bison (*Bison bison*) fecal pats ignited by grassland fire. *The American Midland Naturalist*, 1999, 141(1): 12—15.

- [4] Gao D C, Tian X R, Shu L F, *et al.* Forest fuel type division and combustibility in Chongqin tieshanpeng. *Fire Research*, 2005, 2:29—30.
- [5] Woodall C W, Hoiden G R, Vissage J S. Fuel mapping for the future. *Fire Management Today*, 2004, 64(2):19—21.
- [6] Cruz M G, Alexander M E, Wakimoto R H. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands. *Forest Science*, 2004, 50(5): 640—653.
- [7] Butler B W, Finney M A, Andrews P L, Albini F A. A radiation-driven model for crown fire spread. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(8): 1588—1598.
- [8] Flores J G. Modeling the spatial variability of forest fuel arrays. USA: Colorado State of University Fort Collins, Colorado, 2001. 23—184.
- [9] Tian X R, Shu L F, Yan H P, *et al.* Study on forest combustibility in Beijing area. *Fire Research*, 2004, 1:23—24.
- [10] Niu S K, Cui G F, Lei M, *et al.* Study on the forest combustibility and the fire districts in Labagoumen forest region. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(4):109—112.
- [11] Miller C, Urban D L. Connectivity of forest fuels and surface fire regimes. *Landscape Ecology*, 2000, 15:145—154.
- [12] Stevens R. Fuel loading, fuel moisture are important components of prescribed fire. *Rangelands*, 2005, 27(5):20.
- [13] Dimitrakopoulos A, Papaioannou K K. Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire Technology*, 2001, 37: 143—152.
- [14] Cruz M G, Alexander M E, Wakimoto R H. Development and testing of models for predicting crown fire of spread in conifer forest stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(7): 1626—1636.
- [15] Chandler C, Cheney P, Trabaud L, Williams D. *Fire in forest: forest fire behavior and effects*. New York: John Wiley & Sons, 1983. 26—60.
- [16] Van Wagner C E. Condition for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 1977, 7:23—34.
- [17] Pompe V, Vines R G. The influence of moisture on the combustion of leaves. *Australian forest*, 1966, 30:231—241.
- [18] Sylvester T W, Wein R W. Fuel characteristics of arctic plant species and simulated plant community flammability by Rothermel's model. *Canadian Journal of Botany*, 1981, 59:898—907.
- [19] Chuvieco E, Aguado I, Dimitrakopoulos A P. Conversion of fuel moisture content values to ignition potential for integrated fire danger assessment. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(11): 2284—2291.
- [20] Woodall C W, Charney J J, Liknes G C, Potter B E. What is the fire danger now? linking fuel inventories with atmospheric data. *Journal of Forestry*, 2005, 103(6):293—298.
- [21] Wang X L, Niu S K, Kan Z G. The primary analysis of the characteristics and flammability of main tree species in Beijing Area. *Forest Resources Management*, 2008, 4:83—88.

参考文献:

- [1] 胡海清,牛树奎,金森,等. 林火生态与管理. 北京: 中国林业出版社, 2005. 17~91.
- [4] 高成德,田晓瑞,舒立福,等. 重庆铁山坪森林可燃物类型划分及其燃烧性. *林火研究*, 2005, 2:29~30.
- [9] 田晓瑞,舒立福,阎海平,等. 北京地区森林燃烧性研究. *林火研究*, 2004, 1:23~24.
- [10] 牛树奎,崔国发,雷鸣,等. 北京喇叭沟门林区森林燃烧性及防火区研究. *北京林业大学学报*, 2000, 22(4):109~112.
- [21] 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. *林业资源管理*, 2008, 4:83~88.