

丰林自然保护区森林可燃物模型的建立*

吴志伟¹ 贺红士^{1**} 梁宇¹ 罗旭¹ 蔡龙炎¹ 龙静²

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110164; ² 广西师范学院资源与环境科学学院, 南宁 530001)

摘要 从潜在林火行为的角度出发,依据可燃物的关键参数,利用系统聚类方法在丰林自然保护区建立标准森林可燃物模型。结果表明:丰林自然保护区可建立3个标准可燃物模型,代表性植被类型分别为阔叶红松林(模型 FL-I)、云冷杉林(模型 FL-II)和杨桦林(模型 FL-III)。依据可燃物的林分结构与组成、地表覆盖类型、水平与垂直连续性等,本研究建立的 FL-I、FL-II 和 FL-III 模型与加拿大 CFBPS 可燃物分类系统中的 C-5、C-2 和 D-1 模型相似。3个标准可燃物模型的地表和垂直结构特征,可为野外工作者判定可燃物模型提供帮助。

关键词 森林可燃物 可燃物模型 林火行为 丰林自然保护区

文章编号 1001-9332(2012)06-1503-08 中图分类号 S762.1 文献标识码 A

Establishment of standard forest fuel models for Fenglin Natural Reserve, Heilongjiang Province, China. WU Zhi-wei¹, HE Hong-shi¹, LIANG Yu¹, LUO Xu¹, CAI Long-yan¹, LONG Jing² (¹State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110164, China; ²College of Resources and Environmental Science, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2012 23(6): 1503-1510.

Abstract: From the viewpoint of forest fire behavior, and based on the key parameters of fuels, three standard forest fuel models for the forests differed significantly in fuel characteristics and local environmental conditions in Fenglin Natural Reserve were established by using hierarchical cluster analysis. The three models were FL-I, FL-II, and FL-III for the broadleaved-Korean pine forest, spruce-fir forest, and poplar-birch forest, the representative forest types in the Reserve, respectively. According to the forest structure and composition, land cover type, and horizontal and vertical continuity, the three models FL-I, FL-II, and FL-III were similar to the models C-5, C-2, and D-1 in Canada CFBPS fuel classification system, respectively. The forest ground features and the horizontal and vertical characteristics of the three models established in this paper could help the investigators to identify the fuel types in fuel inventory.

Key words: forest fuel; fuel model; forest fire behavior; Fengling Natural Reserve.

森林可燃物、气象和地形是影响林火发生和林火行为的主要因子,其中森林可燃物是人类唯一能够掌控的林火因子^[1-2]。森林可燃物调查、分类和描述等对火险界定、林火行为预测和林火效应评估至关重要。可燃物的性质、大小、紧密度、载量、湿度、化学性质和空间分布格局等特性皆会影响林火的发生、强度和蔓延速度等。因此,制定科学合理的林火管理策略必须对森林可燃物有一个全面、系统的了

解^[3-5]。

森林可燃物在结构和分布上有巨大的时空变异性。在时间上,即使是同一林型的不同演替阶段,可燃物类型也会不同,长期的演替过程造成了森林可燃物的时间复杂性^[6];在空间上,不同林型、环境条件、自然干扰(风或火)或人为干扰(采伐或造林)的作用可形成不同的可燃物类型,这些因子间错综复杂的相互作用,造成了森林可燃物的空间复杂性^[7]。由于森林可燃物在层次、形态、数量和理化特征上的巨大时空变异性,难以对其全面描述,建立标准的森林可燃物分类体系并预测其潜在林火行为成

* 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX2-YW-444)和国家自然科学基金项目(41071120)资助。

** 通讯作者。E-mail: heh@missouri.edu
2011-09-04 收稿, 2012-03-21 接受。

为国际上森林可燃物研究的焦点^[4]。标准森林可燃物类型实际上是一套描述可燃物的标准参数或属性,将这些参数输入林火行为模拟模型,可以预测林火类型、蔓延速度与强度,管理和决策部门可以据此来确定反应时间和扑救措施。

美国^[8]、加拿大^[9]和澳大利亚^[10]等国家都完成了森林可燃物模型的建立,在林火管理中发挥了重要作用。目前,美国主要有 2 个林火模拟系统,即国家火险等级系统(national fire danger rating system, NFDRS)^[11]和火行为与可燃物模拟系统(fire behavior prediction and fuel model system, BEHAVE)^[12]。NFDRS 将可燃物分为草地、灌木、森林和采伐迹地 4 个类型组,在 4 个类型组内划分了 20 个可燃物模型,每个模型都具有不同的可燃物床特征。BEHAVE 在 NFDRS 的基础上,将原有的 20 个可燃物模型进一步整合为 13 个可燃物模型。近 10 年来,美国可燃物分类得到了进一步发展。如 Sandberg 等^[13]建立了可燃物特征分类系统(fuel characterization classification system, FCCS),将可燃物划分为 6 个可燃物床(树冠、灌木、低矮植被、木质残体、枯枝落叶和半腐殖质等),在每个可燃物床内又划分 2 个或 2 个以上可燃物模型。Scott 和 Burgan^[14]在 BEHAVE 的基础上划分了 43 个标准可燃物模型,该系统共涵盖 7 个类型组,分别为草地类组、草-灌类组、灌木类组、草-灌-乔木类组、枯枝-落叶-乔木类组、采伐(风倒)遗弃物类组和不可燃区,每个类组内又根据可燃物载量、高度和盖度等参数划分了若干个可燃物模型。加拿大森林火险等级系统(CFFDRS)包括 2 个主要子系统,即加拿大火险天气指标系统(FWI)和加拿大林火行为预报系统(CFFBP),其中,FWI 只采用 1 种可燃物模型进行火险预报,CFFBP 系统包括 5 个类型组(针叶林、阔叶林、混交林、采伐迹地和草地)共 16 个可燃物模型^[9]。澳大利亚火险等级预报系统较多,但应用最广泛的是 McArthur^[15-16]于 20 世纪 60 年代建立的 McArthur 森林火险等级预报系统和 McArthur 草地火险等级预报系统。澳大利亚的火险等级系统仅有 3 个可燃物模型,即草地、桉树林和石楠树丛/灌木模型。林火研究人员通过对美国北方林火实验室可燃物分类系统进行简化和修改,形成了适合地中海气候的 Prometheus 分类系统,包括 7 个可燃物模型。欧洲一些国家也建立了可燃物分类系统,如 Dimitrakopoulos^[17]参考 Prometheus 分类系统建立了 7 个希腊可燃物模型。Harvey 等^[18]在瑞士划分了 6 个可燃物模型,并编制了可燃物模型图。葡萄

牙^[19]和英国^[20]的森林火险等级系统正在建立中。中国的森林可燃物分类研究也有进展,但目前还缺乏统一的规范,只在个别地区的小尺度上进行了一些探讨^[21-24],大尺度乃至国家尺度的可燃物分类工作还没有开展,研究水平落后于发达国家,限制了我国林火模拟系统的开发和应用^[25-26]。

小兴安岭丰林自然保护区自然资源丰富、植被群落类型复杂多样,是我国目前最典型和保存最完整的原生阔叶红松混交林分布区之一,也是中国和亚洲东北部具代表性的温带原始红松针阔叶混交林区。但是,由于长期以来受外界干扰(人为或自然)较少,单纯依赖自然演替和更新,保护区龄组老化日趋严峻,林内地表可燃物载量较高,极易引发森林火灾。因此,本研究在分析丰林自然保护区森林可燃物特性的基础上,参照国际上主要可燃物分类标准,建立丰林自然保护区标准可燃物模型,并借助计算机模型预测,分析了其火行为特征,以辅助林火管理和决策。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

丰林自然保护区(48°02′—48°12′ N, 128°58′—129°15′ E)位于小兴安岭南坡中段北缘,地处黑龙江省伊春市五营林业局境内,总面积 18165.4 hm²,森林覆盖率 95%。保护区地形平缓,属低山丘陵地形,呈孤岛状,三面环水,海拔在 285~688 m。境内主要有汤旺河、丰林河和平原河等 9 条河流,以及季节性流水的小溪,纵贯全区,构成一个完整的水系。受东亚海洋气流及西伯利亚寒流的双重影响,具有大陆性及季风气候相结合的特点,气候严寒,总体上冬季漫长寒冷、夏季短促湿润。年均气温 -0.5℃,极端最高气温 34.9℃,极端最低气温 -44.5℃,年均降水量 640.5 mm。土壤主要是发育在阔叶红松林下的地带性土壤——暗棕色森林土,成土母质以花岗岩和片麻岩的风化物为主。

保护区植被类型多样,属长白山植物区系小兴安岭亚区,地带性植被为温带针阔叶混交林。针叶树种有红松(*Pinus koraiensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、云杉(*Picea jezoensis*)和兴安落叶松(*Larix gmelinii*)等;阔叶树有椴树(*Tilia amurensis*)、枫桦(*Betula costata*)、水曲柳(*Fraxinus mandhurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、胡桃楸(*Juqlans mandshurica*)、榆树(*Ulmus* spp.)、色木槭(*Acer mono*)、柞树(*Quercus mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)和山

杨(*Populus davidiana*) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查 2009 和 2010 年在丰林自然保护区设置 52 块 20 m×20 m 的典型代表样地. 在每个样地内, 记录地理位置(经纬度)、海拔(m)、坡度(°)、坡向(东、南、西、北、东北、西北、西南和东南)和坡位(上、中和下)等立地条件以及样地郁闭度、胸径(cm)、树高(m)和枝下高(m)等林分调查因子. 在 20 m×20 m 样方内 28 m 对角线上的 7、14 和 21 m 处分别设置 1 m×1 m 和 2 m×2 m 小样方各 3 块, 用于调查地表死可燃物、草本和灌木层(图 1). 在 1 m×1 m 小样方内, 测量草本的高度和盖度, 并收割全部草本, 称其湿质量并取样装袋; 在 2 m×2 m 小样方内, 测量灌木的高度和盖度, 并收割全部灌木, 称其湿质量并取样装袋; 在 1 m×1 m 小样方内, 收集不同滞时的地表死可燃物和半腐殖, 野外称其湿质量并取样装袋. 可燃物分类标准: 1 h 时滞可燃物为直径(D) ≤ 0.64 cm 的小枝、树叶以及枯死杂草; 10 h 时滞可燃物为 0.64 cm < D < 2.54 cm 的枝条; 100 h 时滞可燃物为 2.54 cm < D < 7.62 cm 的粗枝^[27-28].

1.2.2 室内分析 将野外取回的样品放入烘箱内, 在 105 °C 下连续烘干 24 ~ 48 h 至恒量, 用电子秤称量, 计算样方内不同可燃物的含水率. 可燃物含水率 = (可燃物湿质量 - 可燃物干质量) / 可燃物干质量 × 100%. 根据样方内不同可燃物的含水率, 推算出样方内各类型可燃物干质量.

1.2.3 可燃物类型划分 采用系统聚类分析(hierarchical cluster analysis)方法划分可燃物类型, 聚类变量包括半腐殖层厚度和载量、凋落物厚度和载量、草本和灌木的高度、盖度和载量以及 1、10 和 100 h 时

滞地表死可燃物载量. 聚类分析的基本思想是根据一批野外调查样品的多个观测变量, 识别能度量样品之间相似程度的关键变量, 以这些关键变量为分类依据, 把不同的可燃物类型一一区分出来^[28]. 系统聚类分析采用欧几里得距离(Euclidean distances)为相似性衡量尺度, 依据华氏方法(Ward's method)进行聚类. 聚类之前, 所有变量值均标准化为 Z 分值. 采用 Kruskal-Wallis 方法检验聚类变量的差异性, 差异显著性水平设为 $\alpha = 0.05$. 通过系统聚类分析划分出若干个可燃物类型后, 将同一类型内所有样品的可燃物参数取平均值并赋予相应的可燃物类型, 从而得到若干个可燃物类型及其属性.

采用 Behave Plus 5.0 软件模拟在极易发生(湿度低)、易发生(湿度中)和可能发生(湿度高) 3 个森林火情下各个可燃物类型的潜在林火行为(表 1). 模型输出变量为蔓延速度($m \cdot min^{-1}$)、单位面积热值($J \cdot m^{-2}$)、火线强度($kW \cdot m^{-1}$)和火焰长度(m). 将各可燃物类型的潜在林火行为进行比较, 将林火行为一致或相似的可燃物类型再次合并, 形成最终的丰林自然保护区标准可燃物模型.

2 结果与分析

2.1 可燃物类型的划分

丰林保护区主要针叶林为冷杉林、云冷杉林和云冷杉-红松林, 差异性体现在凋落物厚度、载量和灌木高度; 阔叶林主要为白桦林、山杨林、山杨-白桦林、柞树林、枫-桦林和椴树林, 差异性体现在凋落物厚度和载量、半腐殖层厚度和载量、1 h 和 100 h 时滞载量、灌木高度、草本高度、盖度和载量; 主要混交林为阔叶红松混交林(针阔混交之针叶优势)和红松阔叶混交林(针阔混交之阔叶优势), 差异性体现在凋落物载量, 其他参数差异不显著(表 2).

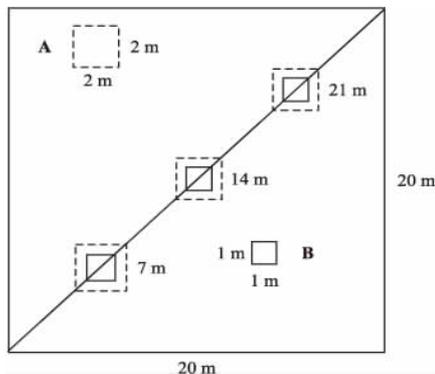


图 1 样地布局图

Fig. 1 Plot layout diagram.

A: 灌木层调查 Shrub layer survey; B: 草本和枯枝落叶层调查 Herbaceous, litter layer survey.

表 1 低、中和高可燃物湿度情景值

Table 1 Fuel moisture content values for the low, mode-rate and high scenarios (%)

可燃物 Fuels	可燃物湿度情景 Fuel moisture content scenarios		
	低 Low	中 Moderate	高 High
1 h 时滞可燃物 1 h time-lag fuel	3	8	12
10 h 时滞可燃物 10 h time-lag fuel	4	9	13
100 h 时滞可燃物 100 h time-lag fuel	5	10	14
活草本可燃物 Live herbaceous	70	120	120
活木本可燃物 Live woody	70	120	170

表 2 可燃物参数 Kruskal-Wallis 检验

Table 2 Kruskal-Wallis significance values for fuel characteristics

变量 Variable	针叶林 Coniferous forest	阔叶林 Broad-leaved forest	针阔混交林 Mixed coniferous-broadleaf forest
凋落物厚度 Litter depth	0.000**	0.043*	0.379
凋落物载量 Litter loading	0.000**	0.043*	0.006*
半腐殖层厚度 Duff depth	0.036*	0.000**	0.161
半腐殖层载量 Duff loading	0.631	0.000**	0.938
1 h 时滞载量 1 h time-lag loading	0.917	0.000**	0.977
10 h 时滞载量 10 h time-lag loading	0.058	0.149	0.760
100 h 时滞载量 100 h time-lag loading	0.235	0.014*	0.669
灌木高度 Shrub height	0.276	0.000**	0.569
灌木盖度 Shrub cover	0.002**	0.152	0.525
灌木载量 Shrub loading	0.534	0.060	0.070
草本高度 Herbaceous height	0.769	0.001**	0.483
草本盖度 Herbaceous cover	0.186	0.010**	0.776
草本载量 Herbaceous loading	0.758	0.028*	0.925

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

以差异显著的可燃物参数为关键变量进行聚类分析,结果表明,针叶林可划分两个类型,即云冷杉-红松林为一类(C-1),冷杉林和云冷杉林为一类(C-2);阔叶林可划分为两个类型,即柞树林为一类(B-1),白桦林、山杨林、白桦-山杨林、枫-桦林和椴树林为一类(B-2);针阔混交林可划分为两个类型,即阔叶红松混交林为一类(M-1),红松阔叶混交林为一类(M-2)(图2)。

2.2 可燃物模型特征及其潜在火行为

利用 Behave Plus 5.0 林火行为模拟系统,计算了6种可燃物类型分别在低、中和高3个森林火情下的潜在林火行为(表3)。结果表明,M-1、M-2和C-13个可燃物的潜在林火行为基本一致,重新归并为一类(FL-I);C-2潜在林火行为明显低于其他类型,单独划分为一类(FL-II);B-1和B-2虽然聚类分析差异较大,但二者的潜在林火行为基本一致,重新归并为一类(FL-III)。

2.2.1 可燃物模型 FL-I 特征及潜在林火行为

FL-I 模型以红松为优势的群落类型为代表,包括柞树红松林、椴树红松林、枫桦红松林、云冷杉红松林混生有红松物种的混交林,构成了区域代表性的顶

表 3 各可燃物类型林火行为的对比

Table 3 Comparison of fire behavior among forest fuel types

湿度 Moisture	可燃物类型 Fuel type	蔓延速度 Rate of spread ($m \cdot min^{-1}$)	单位面积 热值 Heat per unit area ($J \cdot m^{-2}$)	火线强度 Fire line intensity ($kW \cdot m^{-1}$)	火焰长度 Flame length (m)
低 Low	M-1	50.8	9258	7831	4.8
	M-2	57.3	7306	6978	4.5
	C-1	58.5	6998	6823	4.5
	C-2	49.4	3094	2549	2.9
	B-1	69.2	5696	6571	4.4
	B-2	69.4	6807	7873	4.8
中 Moderate	M-1	18.7	8491	2643	2.9
	M-2	20.0	6562	2191	2.7
	C-1	19.4	5945	1923	2.5
	C-2	27.2	2650	1203	2.0
	B-1	23.0	5066	1946	2.5
	B-2	21.8	5947	2161	2.6
高 High	M-1	6.2	7328	753	1.6
	M-2	6.4	5555	593	1.5
	C-1	6.3	5084	532	1.4
	C-2	7.6	1873	238	1.0
	B-1	6.7	4231	474	1.3
	B-2	6.3	4978	525	1.4

和级群落。该类可燃物在丰林自然保护区分布广泛,约占林地面积的83.0%。从地形来看,该类可燃物的海拔、坡度和坡向分布范围均很大,其中,海拔主要分布在300~550 m,坡度主要分布在 5° ~ 25° 的缓坡,坡位主要为中上坡,各坡向均有分布。

该类可燃物长期以来受外界干扰(人为或自然)较少,单纯依赖自然演替、更新,龄组老化严峻,林分郁闭度高(0.7~0.9)、径级大(平均44 cm)。林下灌木主要有兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、毛榛子(*Corylus mandshurica*)和石蚕叶绣线菊(*Spiraea chamaedryfolia*)等,高2 m左右,盖度约0.5。林下草本植物较少,以羊胡子苔草(*Carex callitrichos*)和凸脉苔草(*C. lanceolata*)等为主,盖度较低。

在该类可燃物地表,针叶和阔叶凋落物均有分布,水平连续性较高;但乔木层高,梯子可燃物较少,其垂直连续性较差,表现为树冠与地表分离;枯落层以针叶为主,并混有阔叶,枯落层厚度适中,粗木质残体适中。1、10、100 h 时滞地表可燃物载量分别为(3.08 ± 0.13)、(0.76 ± 0.08)和(0.85 ± 0.18) $t \cdot hm^{-2}$,草本和灌木(0~0.64 cm)载量分别为(0.19 ± 0.03)和(0.32 ± 0.03) $t \cdot hm^{-2}$ 。因立地条件较干燥,该类可燃物多发生强烈的地表火,地下暗火可深达30 cm左右,在极端干旱的天气条件下,借助

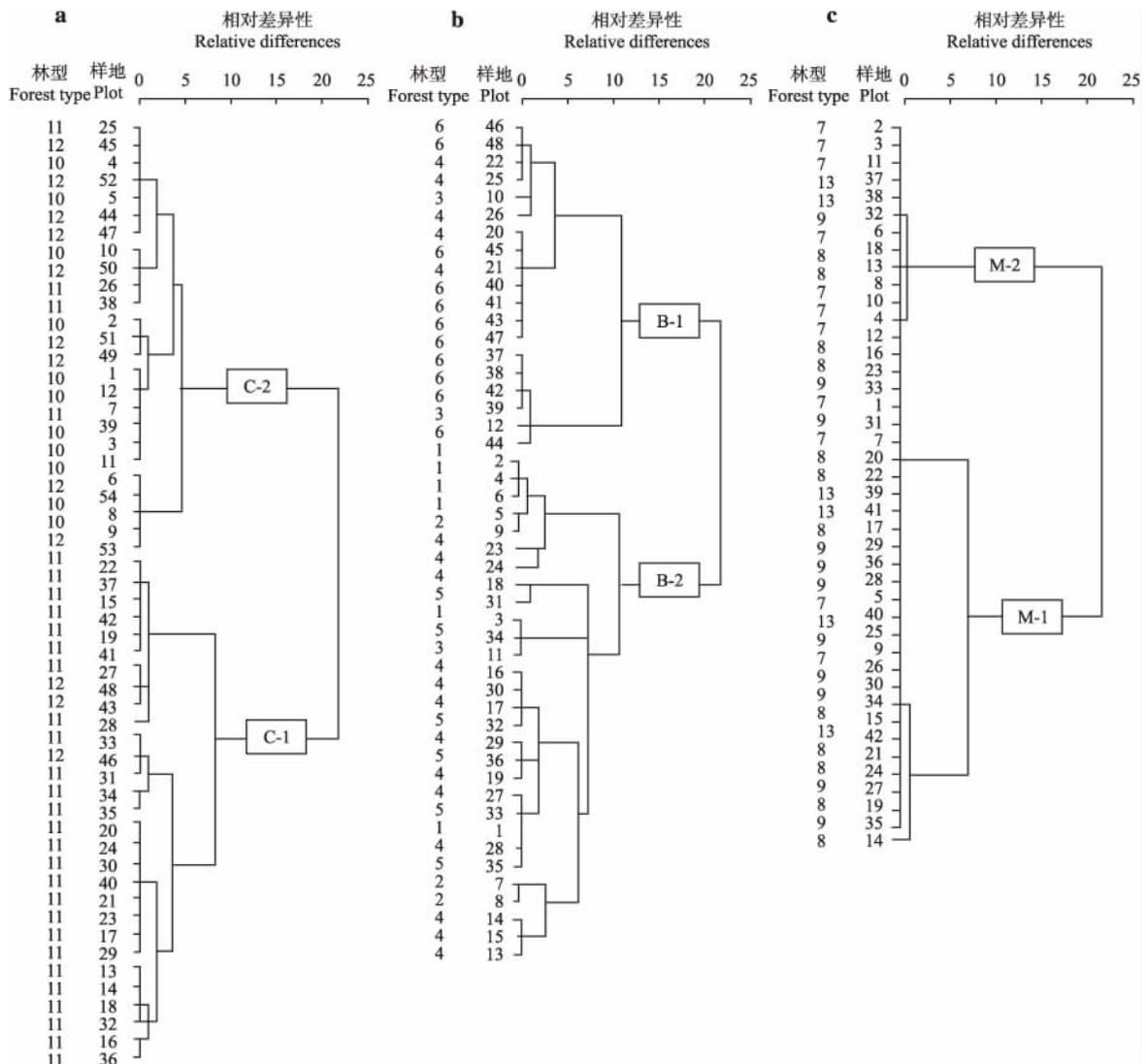


图 2 可燃物类型聚类结果

Fig. 2 Hierarchical cluster analysis results for fuel.

a) 针叶林 Coniferous forest; b) 阔叶林 Broad-leaved forest; c) 针阔混交林 Mixed broadleaved-conifer forest. 林型 Forest type: 1) 白桦林 *Betula platyphylla* forest; 2) 椴树林 *Tilia amurensis* forest; 3) 枫桦林 *Betula costata* forest; 4) 白桦-山杨林 *Betula platyphylla*-*Populus davidiana* forest; 5) 山杨林 *Populus davidiana* forest; 6) 柞树林 *Quercus mongolica* forest; 7) 云、冷杉-红松阔叶混交林 *Picea jezoensis*-*Abies nephrolepis*-*Pinus koraiensis* broadleaved mixed forest; 8) 椴树-红松林 *Tilia amurensis*-*Pinus koraiensis* forest; 9) 枫桦-红松林 *Betula costata*-*Pinus koraiensis* forest; 10) 冷杉林 *Abies nephrolepis* forest; 11) 云、冷杉-红松林 *Picea jezoensis*-*Abies nephrolepis*-*Pinus koraiensis* forest; 12) 云、冷杉林 *Picea jezoensis*-*Abies nephrolepis* forest; 13) 柞树-红松林 *Quercus mongolica*-*Pinus koraiensis* forest.

风的作用有可能发生树冠火和飞火, 容易造成极大危害的森林火灾.

2.2.2 可燃物模型 FL-II 特征及潜在林火行为

FL-II 模型以云冷杉林群落类型为代表, 是丰林自然保护区隐域性顶极群落. 该类可燃物在丰林自然保护区分布面积 2143 hm², 约占林地面积的 12.1%. 从地形来看, 该类可燃物的海拔、坡度和坡向分布空间范围较集中, 主要分布在海拔 300~400 m、坡度<5°的窄沟、小溪旁等沟谷湿地地带, 坡向不明显, 坡位主要位于下坡.

从林分结构特征来看, 与 FL-I 模型类似, FL-

II 模型受外界干扰(人为的或自然的)较少, 单纯依赖自然演替、更新, 林龄以成熟林和过熟林为主, 龄组老化严峻. 林分郁闭度大(0.7~1.0), 林木径级适中. 该类可燃物林下有少量的灌木, 如稠李(*Padus asiatica*)、蓝靛果忍冬(*Lonicera edulis*)等, 高约 1 m, 灌木盖度非常低. 林下多为藓类植物、蕨类植物和少量的耐阴性小草本植物, 只有林隙处有阳性禾本科和莎草科杂草, 草本盖度较高.

该类可燃物地表以针叶为主, 水平连续性差; 乔木层较高, 灌木矮小及形成梯子可燃物的幼树较少, 其垂直连续性也较差, 表现为树冠与地表分离; 枯落

层以针叶为主,枯落层厚度较薄,粗木质残体较低. 1、10、100 h 时滞地表可燃物载量分别为 (1.43 ± 0.20) 、 (0.40 ± 0.06) 和 $(0.21 \pm 0.12) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 草本和灌木 ($0 \sim 0.64 \text{ cm}$) 载量分别为 (0.28 ± 0.04) 和 $(0.24 \pm 0.05) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. 因立地条件潮湿或水湿, 一般情况下该类可燃物难以引燃, 不易发生森林火灾; 但在极干旱的气象条件下, 也能发生火灾, 且借助风的作用有可能发生树冠火, 燃烧强度大, 容易造成极大危害的森林火灾.

2.2.3 可燃物模型 FL-III 特征及潜在林火行为
FL-III 模型以次生群落类型为代表, 主要包括柞树林、白桦林、山杨林以及软、硬阔叶林和阔叶混交林, 森林面积和蓄积分别占 7.6% 和 3.0%. 该类可燃物的海拔、坡度和坡位分布范围较集中, 海拔主要分布在 250 ~ 350 m, 坡度以 $5^\circ \sim 16^\circ$ 为主, 坡向分布不明显, 坡位主要为中上坡.

该类可燃物是受采伐和火灾等干扰而形成的次生林, 林龄以幼林龄和中林龄为主. 林分郁闭度高 ($0.7 \sim 0.9$), 但林木径级小, 林下灌木发达, 盖度较高, 以毛榛 (*Corylus mandshurica*) 为主, 混生有卫矛 (*Euonymus alatus*)、绢毛绣线菊 (*Spiraea sericea*)、刺五加 (*Acanthopanax senticosus*)、东北山梅花 (*Philadelphus schrenkii*)、忍冬 (*Lonicera Japonica*) 等, 层高约 2 m, 盖度 50% 以上. 林下草本主要有凸脉苔草 (*C. lanceolata*)、蕨类 (*Pteridophyta*), 并主要混生有蚊子草 (*Filipendula palmata*) 和宽叶山蒿 (*Artemisia stolonifera*) 等, 高达 0.6 m 左右, 草本盖度适中.

该类可燃物地表以阔叶为主, 水平连续性高; 乔木层高, 但林下灌木高大及形成梯子可燃物的幼树多, 故其垂直连续性较好; 枯落层以阔叶为主, 枯落层厚度较厚, 粗木质残体较高. 1、10、100 h 时滞地表可燃物载量分别为 (3.60 ± 0.20) 、 (1.03 ± 0.12) 和 $(0.48 \pm 0.14) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 草本和灌木 ($0 \sim 0.64 \text{ cm}$) 载量分别为 (0.14 ± 0.02) 和 $(0.38 \pm 0.05) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. 该类可燃物立地条件较干燥, 地表阔叶多, 常引起地表火蔓延, 在极干旱的气象条件下, 可能发生火灾, 且借助风的作用有可能发生树冠火, 但燃烧强度比以针叶树为主的 FL-I 模型低.

2.3 可燃物模型与 CFBPS 模型对比

加拿大林火行为预测系统 (CFBPS) 整合了加拿大许多地区的可燃物分类系统, 在该分类系统下的每一个可燃物类型都具有稳定的林火行为, 是国际上具有代表性的几个可燃物分类系统之一. CFFBP 主要从可燃物结构与组成、地面与阶梯层、地表覆盖与有机层 3 个层次来定性描述可燃物模型, 没有具体提供各可燃物模型参数的数量值. 本研究建立的 3 个可燃物模型分别与 CFBPS 中的 C-2、C-5 和 D-1 相似 (图 3). 本研究从 3 个层次来定性比较可燃物模型: 1) C-2 和 FL-I: 林分适当开阔或浓密, 物种以红松或白松为主, 林龄结构以成熟林为主; 林下草本

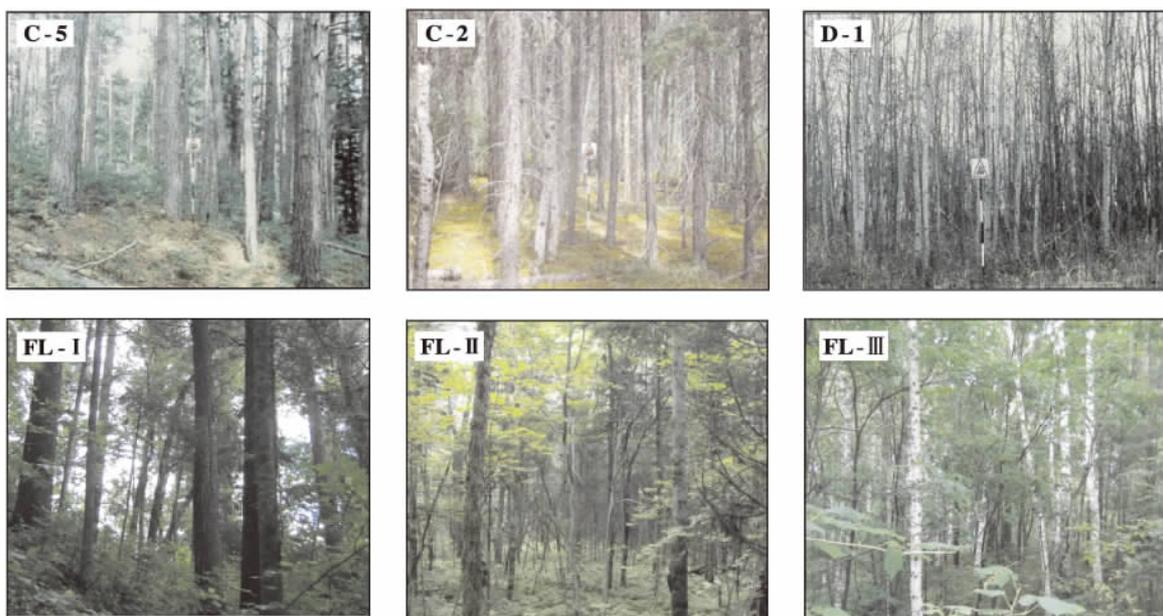


图 3 丰林自然保护区可燃物模型 (FL-I、FL-II、FL-III) 与 CFBPS (C-5、C-2、D-1) 模型对比

Fig. 3 Comparison of fuel models between Fenglin Natural Reserve (FL-I, FL-II, FL-III) and CFBPS (C-5, C-2, D-1).

和灌木分布适中,但乔木层较高,林木径级较大,林冠与地表分离;地表以针叶为主,混有一些阔叶树叶,水平连续性较好。2) C-5 和 FL-II: 林分开阔或适中,物种以云、冷杉为主,林龄以近成熟或成熟林为主;林木枝丫较多,且附有大量的苔藓等,林冠与地表连续性适中;林下草本发达,盖度 80%,高度在 1 m 左右,但灌木较少,盖度低;地表覆盖大量的地衣和苔藓。3) D-1 和 FL-III: 林分适当开阔,物种以山杨属阔叶林为主,林龄以幼龄林和中林龄为主,处于未成熟期;林分内有大量的幼树和小树生长,林冠与地表连续性较高;草本适中,灌木较发达,盖度较高;地表覆盖以阔叶为主,水平连续性较强,但紧密度较松散,且随季节性变化较明显。

3 讨 论

森林可燃物结构和组成影响林火发生与蔓延,是构成林火行为的主体。本研究从林火行为的角度出发,依据森林可燃物的关键参数,利用系统聚类方法划分了 3 个标准可燃物模型,研究结果有助于丰林自然保护区森林可燃物类型野外识别、火险评估和可燃物管理。野外调查人员可将野外实地观测到的可燃物结构和组成等特征与本研究划分的可燃物模型进行对比分析,快速识别其类型,缩减工作时间和资金投入。可燃物模型还可用于确定最优的可燃物处理空间位置、优化可燃物处理强度和比较不同可燃物处理方式对潜在林火行为的影响。

目前,中国还没有一套通用的国家和区域尺度的可燃物模型,本研究可为国内其他地区乃至国家尺度标准可燃物模型的建立提供示范。但本研究在标准可燃物模型建立过程中存在不少需要改进的地方,主要体现在: 1) 森林可燃物载量的测定可能受到采样时间和植被演替阶段的影响,如草本和灌木的载量因季节不同而差异明显,同一林型不同龄组间也存在差异^[29-31]。本研究建立的可燃物模型为静态的可燃物模型,今后应考虑可燃物模型的动态性,即划分动态模型,以适宜不同季节、植被不同演替阶段和防火期的林火管理需要。2) 受空间可达到性影响,本研究的野外实测样地数量较少,且空间分布较集中,主要分布在可到达的道路和居民点附近。然而,森林可燃物特性具有巨大的空间变异性,本研究野外采样还有大片区域未曾到达,今后应扩大野外调查范围,以反映森林可燃物的空间变异性。同时,应获取更多的野外实测样本数据,通过大量的样本数据更精确地反映区域森林可燃物的特性和空间分

布特征。3) 森林可燃物空间分布图的编制。森林可燃物空间分布图对野外调查、营林用火、火灾扑救和制定可燃物管理策略具有十分重要的意义。Keane 等^[4]指出,估测与模拟林火行为的时空分布格局是林火和可燃物管理的基础,今后应综合遥感、GIS 和环境梯度模型等在丰林自然保护区进行森林可燃物类型的空间制图。4) 潜在林火行为模拟。本研究设定 3 个森林火情等级,并模拟了其潜在的林火行为,具有一定的指导意义。但林火蔓延除了受可燃物的影响外,还受地形、气象和人为活动的影响。今后应在潜在林火行为模拟方面进一步深入研究,模拟林火行为的空间蔓延特征,并探索其最优的管理方式。

致谢 野外数据收集得到丰林自然保护区李淑华、宋国华和王全波,以及中国科学院沈阳应用生态研究所李晓娜、贺伟、邓华卫和刘晓梅等的帮助,一并感谢。

参考文献

- [1] Rothermel RC. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wild land Fuels. USDA: Forest Service General Technical Report INT-115, 1972
- [2] Carlson JD, Burgan RE. Review of users' needs in operational fire danger estimation: The Oklahoma example. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**: 1601-1620
- [3] Burgan RE. Concepts and Interpreted Examples in Advanced Fuel Modeling. USDA: Forest Service General Technical Report INT-238, 1987
- [4] Keane RE, Burgan R, van Wagtenonk J. Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. *International Journal of Wildland Fire*, 2001, **10**: 301-319
- [5] Fernandes PM. Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal. *Forest Ecology and Management*, 2001, **144**: 67-74
- [6] McKenzie D, Raymond CL, Kellogg LKB, et al. Mapping fuels at multiple scales: Landscape application of the fuel characteristic classification system. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, **37**: 2421-2437
- [7] Riccardi CL, Ottmar RD, Sandberg DV, et al. The fuelbed: A key element of the fuel characteristic classification system. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, **37**: 2394-2412
- [8] Albini FA. Spot Fire Distance from Burning Trees: A Predictive Model. Washington: USDA Forest Service General Technical Report INT-56, 1979
- [9] Forestry Canada Fire Danger Group. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Edmonton: Canada Forest Service Report ST-X-3, 1992
- [10] Cheney P, Sullivan A. Grass fires: Fuel, Weather and Fire Behavior. Collingwood, Australia: Commonwealth

- Scientific and Industrial Research Organization, 1997
- [11] Cohen JD, Deeming JE. The National Fire Danger Rating System: Basic Equations. Report No. PSW-82. Berkeley, CA: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1982
- [12] Anderson HE. Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior. Washington DC: USDA Forest Service General Technical Report INT-122, 1982
- [13] Sandberg DV, Ottmar RD, Cushon GH. Characterizing fuels in the 21st century. *International Journal of Wildland Fire*, 2001, **10**: 381-384
- [14] Scott JH, Burgan RE. Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model. Washington DC: USDA Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-153, 2005
- [15] McArthur AG. Weather and Grassland Fire Behavior. Canberra: Australian Forestry and Timber Bureau Leaflet, No. 100, 1966
- [16] McArthur AG. Fire Behaviour in Eucalypt Forests. Canberra: Australian Forestry and Timber Bureau Leaflet, No. 107, 1967
- [17] Dimitrakopoulos AP. Mediterranean fuel models and potential fire behavior in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 2002, **11**: 127-130
- [18] Harvey S, Rütgerssegger M, Allgöwer B. Fuel models for Switzerland (Swiss National Park). Zurich: Report No. BBW Nr. 94. 0177. EC. EV5VCT-0570, Department of Geography, 1997
- [19] Fernandes P, Lu A, Loureiro C, et al. Fuel modelling and fire hazard assessment based on data from the Portuguese National Forest Inventory. *Forest Ecology and Management*, 2006, **234**: 229
- [20] Kitchen K, Marmo P, Legg C, et al. Developing a fire danger rating system for the United Kingdom. *Forest Ecology and Management*, 2006, **234**: S21
- [21] Zheng H-N (郑焕能), Hu H-Q (胡海清). Forest fuel types in eastern mountains of Northeast China. *Forest Fire Prevention* (森林防火), 1990(4): 10-13 (in Chinese)
- [22] Tian X-R (田晓瑞), Dai X-A (戴兴安), Wang M-Y (王明玉), et al. Study on the fuel types classification of forests in Beijing. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2006, **42**(11): 76-80 (in Chinese)
- [23] Hu H-Q (胡海清), Zhang Z (张喆), Wu X-W (吴学伟). Type classification of forest fuel in Tahe Forestry Bureau based on remote sensing. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2007, **35**(7): 20-26 (in Chinese)
- [24] Zhang M (张敏), Liu D-M (刘东明). Fire behavior model and situation of *Larix olgensis* combustibles in forest zone of Changbai Mountain. *Journal of Natural Disasters* (自然灾害学报), 2007, **16**(2): 127-132 (in Chinese)
- [25] Yuan C-M (袁春明), Wen D-Y (文定元). Current status and prospect of the study on classification and modeling of forest fuel. *World Forestry Research* (世界林业研究), 2001, **14**(2): 29-33 (in Chinese)
- [26] Jin S (金森). A review on estimating forest fuel loads by remote sensing imagery. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2006, **42**(12): 63-67 (in Chinese)
- [27] Reich IM, Imndquist JE, Bravo VA. Spatial models for estimating fuel loads in the Black Hills, South Dakom, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 2004, **13**: 119-129
- [28] Shan Y-L (单延龙), Guan S (关山), Liao G-X (廖光焯). Surface fuel loads of principal fuel types in Changbai Mountain Forest Region. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2006, **34**(6): 35-36 (in Chinese)
- [29] Qu Z-L (胡智林), Hu H-Q (胡海清). A prediction model for forest fire-burnt area based on meteorological factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(12): 2705-2709 (in Chinese)
- [30] Li J-W (李建微), Chen C-C (陈崇成), Yu Q-Z (於其之), et al. Forest fire spread modeling and 3D visualization in virtual forest landscape. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(5): 838-842 (in Chinese)
- [31] Guo F-T (郭福涛), Hu H-Q (胡海清), Ma Z-H (马志海), et al. Applicability of different models in simulating the relationships between forest fire occurrence and weather factors in Daxing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(1): 159-164 (in Chinese)

作者简介 吴志伟 男,1982年生,博士.主要从事森林景观生态学研究. E-mail: sanbei82@163.com

责任编辑 杨弘
