

大兴安岭雷击火时空分布及预报模型

田晓瑞, 舒立福, 王明玉, 赵凤君

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林保护学重点实验室, 北京 100091)

摘要: 雷击火是中国大兴安岭地区重要火源。根据 1990—2006 年研究区内 10 个气象站日观测数据包括最高气温、最小湿度、24 h 降水、平均风速等指标计算每日 FWI 系统各指标, 分析雷击火的发生与火险指数的关系。根据各气象站与研究区质心的距离确定各气象站的权重, 计算研究区火险指数平均值。1990—2006 年大兴安岭林区共发生森林火灾 591 起, 其中雷击火 359 起, 占 60.7%。70% 的雷击火分布在 121°~125° E, 51°~53° N, 平均每起雷击火过火面积为 797.37 hm², 森林受害面积为 581.67 hm²。71.9%、2.5% 和 17.3% 的雷击火分别发生在落叶针叶林、落叶阔叶林和草地。雷击火发生在 4—9 月, 5—8 月是雷击火多发月份。1990—2006 年雷击火发生时间段整体上有延长趋势。8 月和 9 月发生的雷击火都发生在 1998—2005 年。雷击火的发生受气温与降水的影响, 月均气温高、降水量少, 雷击火次数明显多。发生雷击火日的平均可燃物湿度码 FEMC、DMC、DC 和 FWI 分别为 90.3、69.6、287.4 和 24.7。雷击火发生日各火险成分指数平均值均高于 1990—2006 年 4—9 月总体平均值。根据雷击火发生概率和每日火险指数建立了雷击火发生概率预测模型。

关键词: 大兴安岭; 雷击火; 预报模型; 森林火险

中图分类号: S762

文献标识码: A

Spatial and Temporal Distribution of Lightning Fire and Forecasting Model for Daxing'anling Region

TAN Xiaoru, SHU Lifu, WANG Mingyu, ZHAO Fengjun

(Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF,

Key Laboratory of Forest Protection State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract Lightning is an important fire source in Daxing'anling region, China (119°60'—127°02' E, 47°05'—53°56' N). The daily fire weather index (FWI) component indexes were calculated based on the observations of 10 weather stations in the study area from 1990—2006. The observations of weather station included daily maximum temperature, daily minimum humidity, precipitation in 24-hour (20:00—20:00), and average wind speed. The weights of weather stations were determined according to the distances between each weather station and the study area center (122°66'5" E, 51°01'37" N). Then the averages of FWI component indexes were calculated for the study area for analyzing its relationship with lightning fire occurrence. There were 591 wildfires in the Daxing'anling region from 1990—2006, in which 359 lightning fires accounting for 60.7 percent. 70% of lightning fires distribute in the area 121°—125° E, 51°—53° N. The average burned area of each lightning fire was 797.37 hm², and burned forest 581.67 hm². Lightning fires occurred in the deciduous conifer forest, deciduous broad-leaved forest and grassland accounted for 71.9%, 2.5% and 17.3% respectively. Lightning fires occurred in the period from April to September and mainly in May to August. June was the month with most lightning fire (105 fires) from

收稿日期: 2008-07-10

基金项目: 林业科学技术项目 (2006-70) 和国家自然科学基金项目 (30671695)

作者简介: 田晓瑞 (1971—), 男, 山东冠县人, 博士, 副研究员, 主要从事森林火灾预防技术研究。

1990—2006 which accounted for 29.7%. It was followed by July 28.3% lightning fires. During 1990—2006 the lightning fire season got longer in overall. From 1990—1998 lightning fires occurred in the period from April 24 to July 26 but in 1998—2006 lightning fire season extended to the end of September. All lightning fires occurred in August and September were the years from 1998—2005. Air temperature and precipitation influenced on lightning fire occurrence. In a higher month-average of daily maximum temperatures and less month-precipitation, lightning fires will increased significantly. Month-averages of fine fuel moisture code (FFMC), duff moisture code (DMC), drought code (DC) and FWI in dates from April to September when lightning fire occurred were 90.3, 69.6, 287.4 and 24.7 respectively which were higher than those averages from 1990—2006. A probability forecasting model of lightning fire was established on the base of lightning fire occurrence probability and daily fire weather index.

Key words lightning fire forecasting model; Daxing'anling region; fire danger

火是北方林生态系统中重要的干扰因子,是北方林更新和恢复的基本驱动力。许多物种适应火影响生境,火对北方林的空间格局分布有多方面的影响。雷击是我国大兴安岭地区引发森林火灾的主要火源。雷击火的分布首先与雷暴系统的路径有关,其次受植被状况和地形的影响,沟塘、草甸、河谷草地最容易发生雷击火。林火的空间分布模式研究有助于林火发生预报和对火在景观变化过程中的作用的理解^[1]。美国和加拿大的国家森林火险等级系统中都涉及到雷击火的预测预报模式^[2],但这些预测模型还不成熟,只是在部分地区进行了应用。NWCC(美国西北部门间合作中心)采用可燃物干燥度、雷击概率预测和雷击数量评估模型结合作为一个预测因子输入 Logistic 回归模型,预测雷击事件概率,表示实际可能发生大火的高火险概率。Stom等^[3]分析火险期平均气温和总降水量与雷击火数量的关系,建立了季节林火发生预测模型。McRae^[4]建立了预测雷击火发生的空间模型。Rorig和Ferguson^[5]基于大气湿度和稳定性变量,发展了判别美国发生干雷击的模型。Anderson等^[6]基于Lathan(USFS, NT-4401)建立的雷击点燃模型发展了一个雷击火发生预测系统,并在加拿大Saskatchewan和Manitoba省得到应用。目前对雷击的发生发展过程认识不足,雷击火预报结果还不能满足林火管理需要。我国在雷击火方面的研究较少,主要对发生雷击火的气象条件进行分析研究^[7-8]。由于目前我国对大兴安岭林区的雷击监测系统还不完善,很难获得系统的雷击监测数据,所以,本文根据每日气象资料计算森林火险指数,分析雷击火发生与森林火险指数的关系提出雷击火发生概率模型,并分析1990—2006年大兴安岭林区雷击火时空分布特点,为日常林火管理提供技术参考。

1 研究区概况

研究区域包括黑龙江省大兴安岭林区和内蒙古自治区大兴安岭林区(图1),地理坐标范围 $119^{\circ}60' \sim 127^{\circ}02' E$, $47^{\circ}05' \sim 53^{\circ}56' N$ 。大兴安岭林区森林类型主要是以落叶松为主的混交林,主要树种有落叶松(*Larix gmelinii* Rupr)、樟子松(*Pinus sylvestris* L)、白桦(*Betula papyrifera* Suk)、柞树(*Quercus mongolica* Fisch)、山杨(*Populus davidiana* Dode)和柳树(*Salix matsudana* Koilz)等针叶和阔叶树种。气候属于寒温带大陆性季风气候。土壤为寒温带森林土壤。地势起伏不大,西部、中部高,东部、北部、南部低。平均海拔573 m,最高海拔1528 m。气候属于寒温带大陆性季风气候。冬季寒冷而漫长,夏季炎热而短暂,年平均气温在 $-2^{\circ}C$ 以下,春季升温快,风速大(可达8级),干燥少雨(几无雨)。年降水量

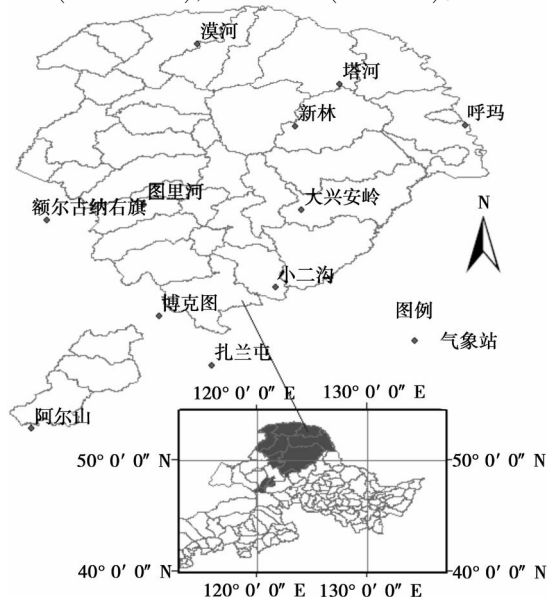


图 1 研究区及气象站分布

为 450~500 mm, 年蒸发量为 900~1000 mm。该区地处高纬度山地, 无霜期较短, 在 80~100 天之间, 年平均风速 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大风速 7~8 级, 多发生在春季, 极易引起森林火灾。

2 资料来源与研究方法

2.1 资料来源

雷击火统计数据 (1990—2006 年) 来自大兴安岭防火部门, 数据包括雷击火发生时间、地理位置、过火面积、受害森林面积等。研究区内 10 个气象站 (漠河, 塔河, 新林, 呼玛, 额尔古纳右旗, 图里河, 大兴安岭, 小二沟, 博克图, 阿尔山) 1990—2006 年日观测数据包括最高气温、最小湿度、24 h 降水、平均风速和月平均气温与降水等来自中国气象科学数据共享网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>)。

2.2 火险指数计算

根据研究区内 10 个气象站 1990—2006 年最高气温、最小湿度、24 h 降水、平均风速等观测值采用加拿大林火天气指数 (FWI) 系统方法计算各站点每日火险指数, FWI 系统是基于每天中午 4 个天气因子的连续观测记录, 输出描述成熟松林火险的多个指标^[9], 包括细小可燃物湿度码 (FFMC)、腐殖质湿度码 (DMC)、干旱码 (DC) 和火行为指标, 即初始蔓延速度 (ISI)、累积指数 (BUI) 和火天气指数 (FWI)。可燃物湿度码表示不同干燥速率的 3 类森林可燃物湿度, 随着天气变化可燃物湿度发生变化。对每类可燃物, 湿度变化都包括两个阶段——降水和大气水分引起的吸湿和干燥过程, 值越大代表可燃物含水量越低, 也就越容易燃烧。细小可燃物湿度码 (FFMC) 最高值是 101, 但其他两个湿度码, 腐殖质湿度码 (DMC) 和干旱码 (DC) 没有上限。FWI 系统所有组分都有自己的相对尺度, 值越高表示燃烧条件越严重。

可燃物湿度码 FFMC、DMC、DC 的初始值分别为 85.6 和 $15^{[10]}$ 。由于气象站分布不均匀, 所以根据各气象站与研究区质心 ($122.6655^{\circ} \text{E}$, 51.0137°N) 距离赋予不同的权重, 权重与距研究区质心距离成反比。根据各气象站的权重, 计算研究区各气象因子和火险指数的平均值。

3 结果分析

3.1 雷击火发生时间分布

1990—2006 年大兴安岭林区共发生森林火灾 591 起, 其中雷击火 359 起, 占 60.7%。1992 年雷击

火灾次数最多 (79 起), 占 22.4%。1991、1993 年分别只发生一起雷击火, 1997 年没有雷击火 (图 2)。受气候条件变化的影响, 雷击火发生数量年际间变化很大, 但 1993—2005 年基本呈现一个增加趋势。

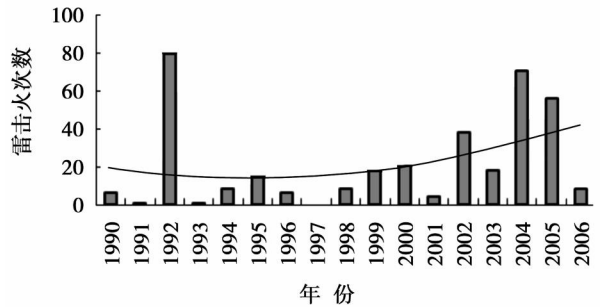


图 2 1990—2006 年雷击火发生次数

雷击火发生在 4—9 月, 5—8 月是主要发生月份, 6 月份发生雷击火最多 (共 105 起), 占 29.7%, 其次是 7 月份, 占 28.3%。1990—2006 年 4 月和 9 月份发生的雷击火分别只有 2 起和 5 起 (图 3)。1990—2006 年雷击火发生时间段整体上有延长趋势 (图 4), 1990—1996 年, 雷击火发生时间段为 4 月下旬至 7 月下旬, 但 1998—2006 年雷击火发生时间段为 4 月下旬至 9 月下旬, 所有发生在 8 月和 9 月的雷击火都是 1998—2005 年发生的。

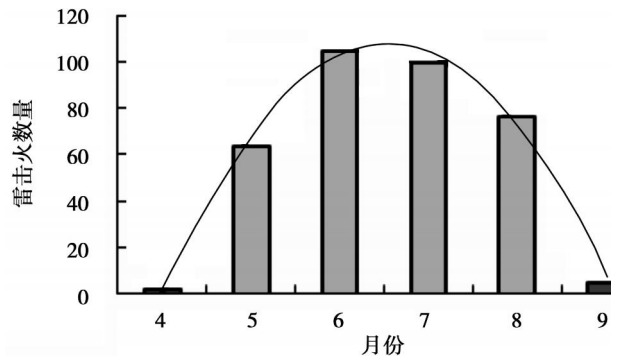


图 3 按月份统计 1990—2006 年雷击火次数

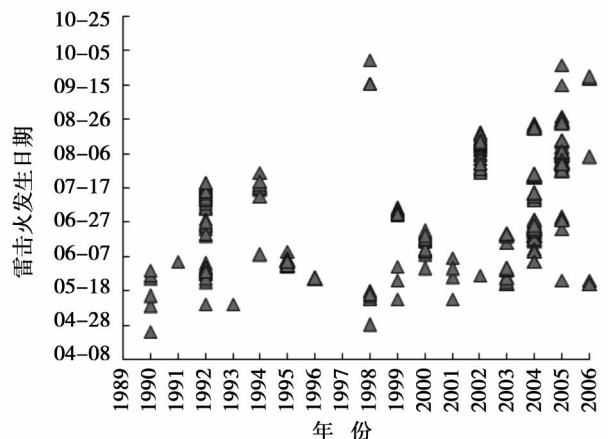


图 4 1990—2006 年大兴安岭雷击火发生日期

平均日最高气温与月累积降水量对雷击火的发生有明显影响。根据对 1990—2006 年 5 月和 6 月份发生的雷击火频次与月均温度和降水的关系分析,可以看出月均气温高、降水量少,雷击火次数明显多(图 5)。如 1992 年 5 月降水量仅 14.5 mm,比常年(33.9 mm)偏少 57%,气温偏高 1.5℃,发生雷击火 23 起。2005 年 5 月降水达到 56.4 mm,平均气温 8.7℃,仅发生 1 起雷击火。2004 年 6 月降水量只有 29.5 mm,

约为 1990—2006 年 6 月平均降水量 87.6 mm 的 1/3 雷击火显著增多。经回归分析,发现雷击火发生数量与月均气温和月降水距平值存在如下关系:

$$Y = 0.7483X_1 - 0.1854X_2 - 3.3056$$

复相关系数 $R = 0.54$

其中 X_1 ——月均气温; X_2 ——月降水距平值。显著性检验表明线性回归显著 ($F = 6.9984 > F_{0.95} = 0.0028$)。

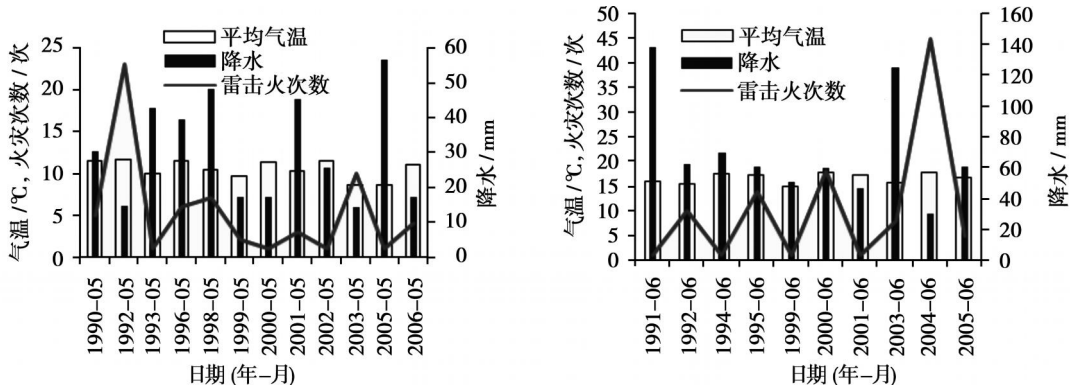


图 5 雷击火与月均气温和降水关系图

3.2 雷击火空间分布

1990—2006 年 359 起雷击火的中心点位于 122.84° E, 51.62° N。雷击火发生位置在经度和纬度方向并不呈正态分布,偏度分别为 0.417 和

-1.433。峰度分别为 -0.588 和 20.86。纬度方向的分布更集中。74% 的雷击火分布在 121°~125° E, 70% 的雷击火发生在 51°~53° N(图 6)。

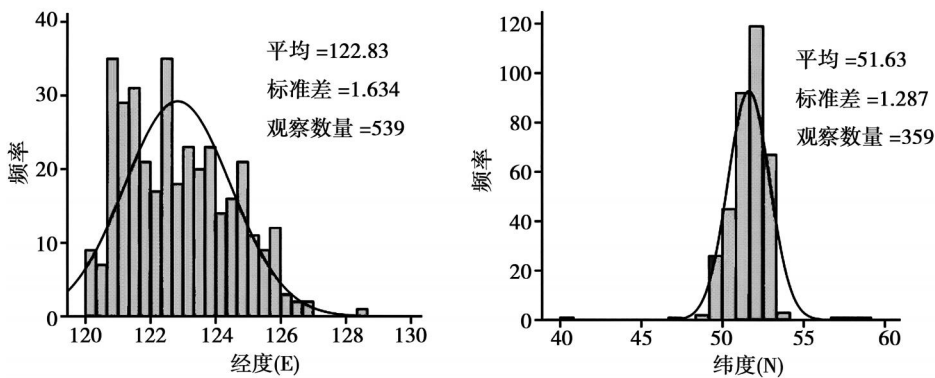


图 6 1990—2006 年大兴安岭林区雷击火坐标统计

雷击火与天气活动、可燃物性质和地形特征密切相关。雷击出现时,遇到降水少、地面温度增加、相对湿度降低和可燃物干燥的情况下,就很容易引起火灾。高纬度相对海拔高的区域是雷击火多发区。1990—2006 年发生的 359 起雷击火中,有 258 起火灾发生于落叶针叶林中(落叶松),占 71.9%。发生在落叶阔叶林和草地中分别为 9 起和 71 起,分别占 2.5% 和 19.7%,其余火灾发生在农田(1 起)

和城市用地(20 起)(图 7)。由于研究区域内落叶针叶林和落叶阔叶林所占比例分别为 91.8% 和 6.8%,单位面积上落叶针叶林和草地上的雷击火数量高于落叶阔叶林。Plummer^[11]认为任何树种树木受到雷击的概率相等。Renkin and Despain^[12]发现美国黄石公园的雷击火与海拔无关但与可燃物类型和可燃物湿度相关。大兴安岭 1990—2006 年雷击火与植被分布的关系表明,雷击火的发生与森林类

型相关性不明显。

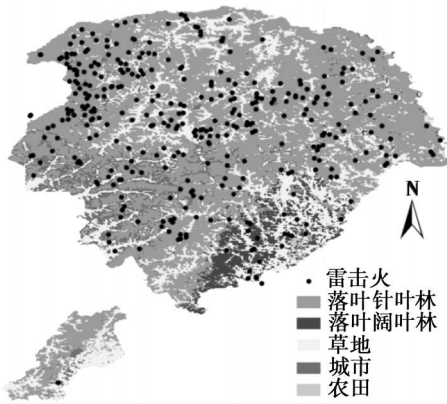


图 7 1990—2006年雷击火与植被分布

平均每起雷击火过火面积为 797.37 hm^2 , 森林受害面积为 581.67 hm^2 。1990—2006年雷击火造成的过火面积和受害森林面积分别占总过火面积和受害森林面积的 5.3% 和 8.6% 。6—8月雷击引起的过火面积分别占 1.4% 、 1.7% 和 0.8% , 但受害森林面积分别占 2.2% 、 3.7% 和 2.4% 。说明这一时段发生的雷击火以森林火烧为主。

1990—2006年雷击火分布与海拔的关系图和雷击火分布密度图分别见图 8和图 9。大兴安岭林区雷击火分布密度为 $0 \sim 113.37$ 次/万 km^2 。所有雷击火平均海拔为 719.4 m , 最高海拔 1342 m , 最低海拔 180 m , 中位数 720 m 。海拔 300 m 以下和 1064 m 以上区域发生雷击火的数量相对较少, 海拔 $300 \sim 1064 \text{ m}$ 雷击火的分布比较均匀, 雷击火发生与海拔无明显相关关系。同样, McRae^[4]发现澳大利亚首都区的雷击火与海拔、坡向、坡度或地形无关, 但 VanWagtendonk^[13]认为 Yosemite 国家公园雷击火与海拔有关。Kochubajda 等^[14]认为雷击活动活跃区域受当地湿度来源和地形的影响。

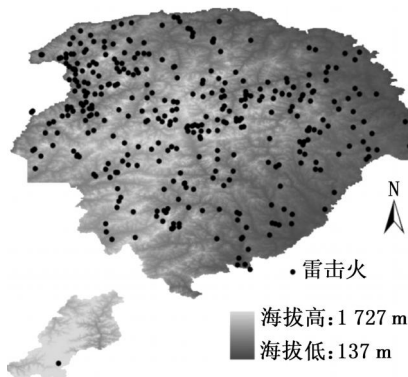


图 8 1990—2006年雷击火与海拔分布

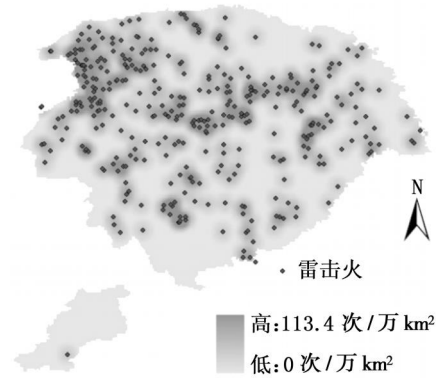


图 9 1990—2006年雷击火分布密度

3.3 雷击火发生与火险指数

加拿大火险天气指数包括三个可燃物湿度码和三个火行为指标。细小可燃物湿度码 (FEMC)、腐殖质湿度码 (DMC) 和干旱码 (DC) 分别反映短期、中期和长期的天气状况对可燃物湿度的影响。FEMC 是反映地表凋落层和其他成熟的细小可燃物 (针叶, 苔藓和直径小于 1 cm 的小枝) 湿度的数量指标。通常火开始于细小可燃物, FEMC 可以很好地指示点燃难易程度或点燃概率。DMC 和 DC 分别指示中等深度和深层紧密有机层的湿度, 时滞分别是 12 天和 52 天。火行为指标包括初始蔓延速度 (ISI)、累积指数 (BUI) 和火天气指数 (FWI)。当火天气严重时, 这些值增大。

根据对研究区 1990—2006 年 359 场雷击火发生日的火险指数, 统计分析结果见表 1。发生雷击火日平均可燃物湿度码 FEMC、DMC 和 DC 分别为 90.3 、 69.6 和 287.4 (表 1)。发生雷击火日均 FWI 为 24.7 。4—6 月雷击火发生时中短期干旱指数 FEMC 和 DMC 值比较高, FWI 和 ISI 值也比较高, 说明容易发生地表火, 且蔓延速度快。这符合大兴安岭林区森林火灾特点, 春季以地表火为主, 火蔓延速度快, 草地过火比例较大, 森林受害程度较轻。7—8 月雷击火发生时 FEMC、DMC、FWI 和 ISI 值相对较低, 但 DC 值高, 表示中小径级的可燃物湿度大, 火蔓延速度慢, 由于深层腐殖质湿度小, 容易发生地下火。这也说明 6—8 月份雷击火主要发生在腐殖质层厚的森林中, 并造成受害森林面积相对较大。

不同月份火险指数有明显差异, 表 2 列出了不同月份雷击火发生日的 FWI 各成分指数与 1990—2006 年各月总体观测值平均值的差异 (表 2)。火灾发生日各火险成分指数平均值均高于各月总体平均

值。5—8月是雷击火发生高峰时段,雷击火发生时的 FWI 各组分指数明显高于整体平均值,特别是 7 月和 8 月份雷击火发生时的 DC 值分别比平均值高 112.2 和 102.6。FFMC、DMC、DC 和 FWI 可以作为大兴安岭雷击火发生的重要参考指数,不同季节各指数的指示意义有少许差别。6—8 月份 FWI 和 DC 指数高,容易发生雷击火。

表 1 雷击火发生时各指标平均值

月份	FFMC	DMC	DC	FWI	ISI
4	89.0	47.4	72.5	24.5	12.6
5	91.1	90.1	183.0	30.1	11.3
6	91.4	92.0	260.4	27.9	9.2
7	88.9	55.4	352.3	22.6	7.9
8	90.0	47.5	331.3	19.9	7.0
9	91.2	35.7	287.7	18.4	7.5
(平均)	90.3	69.6	287.3	24.7	8.7

表 2 各月雷击火发生日火险指数平均值与总体平均值差异

月份	FFMC	DMC	DC	FWI	ISI
4	4.7	25.2	42.4	14.2	5.8
5	3.7	30.8	60.3	7.6	1.6
6	10.2	39.6	40.6	12.4	3.6
7	11.7	27.8	112.2	13.6	4.3
8	12.1	24.0	102.6	11.5	3.3
9	10.6	9.8	35.6	7.7	2.8
(平均)	8.9	34.5	104.8	12.0	3.0

天气和雷电是雷击火发生模型中最重要的因子^[15-16], Kourtz^[15]认为如果一个区域的雷击数量超过 50 次并且发生雷击前一天的 DMC 等于或大于 20 就极易发生雷击火。Podur 等^[11]在研究加拿大安大略省雷击火空间分布时也采用了这一理论假设,但也指出未来需要找到一个表示容易引起雷击火的更准确的指数值。Nash 和 Johnson^[17]认为 FFMC 是预测加拿大北方林雷击火的最适可燃物状态指标,而 Wierchow ski 等^[18]认为雷击火的发生与 FWI 系统组分日火险严重等级 (Daily Severity Rating) 相关。由于大兴安岭地区气象站密度降低,作者认为采用区域平均火险指数来预测雷击火发生更为合适。根据 1990—2006 年不同月份每日发生雷击次数与 FWI 的关系,得到如下大兴安岭林区每日雷击火发生次数概率预测模型:

$$N_i = P_i \times (FWI - \overline{FWI}_i)$$

式中, N_i ——第 i 月日发生雷击火次数;
 P_i ——第 i 月日发生雷击火概率; FWI ——第 i 月日均火险天气指数; \overline{FWI}_i ——第 i 月 FWI 平均值。 P_i 和 \overline{FWI}_i 取值见表 3。

表 3 P_i 和 \overline{FWI}_i 取值

月份	4	5	6	7	8	9
P_i	0.0327	0.1610	0.4401	0.4431	0.3121	0.4191
\overline{FWI}_i	10.3	22.5	15.5	9	8.4	10.7

4 结论与讨论

1990—2006 年大兴安岭林区雷击火发生数量年际间变化很大,但 1993—2005 年基本呈现一个增加趋势。雷击火发生在 4—9 月,5—8 月是主要发生月份,雷击火发生时间段有延长趋势。雷击火的空间分布在经度和纬度方向并不呈正态分布,纬度方向的分布更集中。

月均气温与雷击火发生数量呈正相关,月降水距平值与雷击火数量呈负相关。71.9% 的雷击火发生于针叶落叶林,另有 2.5% 和 19.7% 的雷击火分别发生在落叶阔叶林和草地。

雷击火发生时的 FWI 各组分指数明显高于总体平均值。根据 1990—2006 年不同月份每日发生雷击次数与 FWI 的关系,建立了大兴安岭林区每日雷击火发生次数概率预测模型。

多数雷击伴有显著降水,但是,简单的预测雷击活动水平不能准确地确定潜在的火发生。雷击火的发生与可燃物类型、雷击类型、地形和植被结构都有密切关系。Flannigan and Wotton^[16]对安大略省雷击火研究发现,雷击数量与雷击火存在明显的统计相关性。腐殖质适度码是一个重要的雷击火发生指标,阳性放电性质的雷击对火发生影响不大,只占雷击火总量的 5%~10%。Wotton^[19]发现中度和长松针类可燃物如斑克松 (*Pinus banksiana* Lamb.) 和小干松 (*Pinus contorta* Loud.) 的针叶的雷击点燃概率决定于可燃物湿度。短松针种类 (如道格拉斯云杉 (*Pinus douglasiana* Mast.)) 的点燃更多的是依赖于腐殖质层深度,而不是可燃物湿度。点燃后,火的蔓延速度决定于可燃物湿度。Larjvaara^[20]利用 1998—2002 雷击空间分布数据分析芬兰雷击点燃林火的概率,发现阳极雷击和阴极雷击具有相同的点燃概率。持续时间长和高密度的雷击好像比局地小尺度的雷击引起点燃的概率更小。这一研究结果与早先北美的研究结果不同,北美的研究认为点燃需要与阳极放电相关的长时间的连续流和多样化的阴极放电^[21]。我国大兴安岭林区正在完善的雷电监测系统将可以监测雷电发生的方位、强度、距离和频次,这些数据将为

未来开展雷击火的深入研究提供基础数据。

参考文献:

- [1] Podur J, Martell D L. Spatial patterns of lightning-caused forest fires in Ontario, 1976–1998 [J]. *Ecological Modelling*, 2003, 164: 1–20
- [2] Kourtz P H. Advanced information systems in Canadian forest fire control [C]. // O'Neil D. Proceedings of Australian Fire Authorities Council Conference, 1994 November 21–23, Fremantle, Western Australia, 1994: 92–109
- [3] Storm B B, Birdsall J, Alamo J. Predicting Forest Fire Occurrences with Seasonal Forecast Data [J]. Available at http://www.meteor.iastate.edu/classes/sm455/Seas_Fcst/R eports_2003/ForesFires.pdf, 2003
- [4] McDrae R D. Prediction of Areas Prone to Lightning Ignition [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 1992, 2(3): 123–130
- [5] Rorig M L, Ferguson S A. The 2000 fire season: lightning caused fires [J]. *J Appl Meteor*, 2002, 41: 786–791
- [6] Anderson K, Martell D L, Flannigan M D, *et al*. Modeling of Fire Occurrence in the Boreal Forest Region of Canada [M]. // Kasiskrke E, Stocks B J. *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. Springer-Verlag, New York, USA, 2000: 357–367
- [7] 宋志杰. 林火原理和林火预报 [M]. 北京: 气象出版社, 1989
- [8] 程邦瑜, 姚树林. 森林雷击火的预报监测 [J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(4): 115–120
- [9] Tumer J A, Lawson B D. Weather in the Canadian Forest Fire Danger Rating System: A User Guide to National Standards and Practices [R]. InfRep BC-X-177, Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre, Victoria, British Columbia, 1978
- [10] Stocks B J, Lawson B D, Alexander M E, *et al*. The Canadian Forest Fire Danger Rating System: An Overview [J]. *The Forestry Chronicle*, 1989, 65(6): 450–457
- [11] Plummer F G. Lightning in Relation to Forest Fires [R]. USDA Forest Service Government Printing Office, Washington, DC, 1912
- [12] Renkin R A, Despain D G. Fuel moisture, forest type and lightning-caused fire in Yellowstone National Park [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1992, 22: 37–45
- [13] Van Wagtenonk J W. Spatial analysis of lightning strikes in Yosemite National Park [C]. // Andrews P L, Potts D E. Proceedings of the Eleventh Conference on Fire and Forest Meteorology, Royal Meteorological Society, Boston, 1991: 605–611
- [14] Kochubajda B, Flannigan M D, Gyakum J R, *et al*. Lightning and fires in the northwest territories and responses to future climate change [J]. *Arctic*, 2006, 59(2): 211–221
- [15] Kourtz P H. A System to Predict the Occurrence of Lightning-Caused Forest Fires [R]. Forest Fire Research Institute, Canadian Forestry Service, Information Report FF-X-47, Ottawa, 1974
- [16] Kourtz P, Todd B. Predicting the Daily Occurrence of Lightning-Caused Forest Fires [R]. Petawawa National Forestry Institute, Forestry Canada, PFX-112, Petawawa, 1991
- [17] Nash C H, Johnson E A. Synoptic climatology of lightning-caused forest fires in subalpine and boreal forests [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26: 1859–1874
- [18] Wierchowski J, Heathcott M, Flannigan M D. Lightning and lightning fire, Central Cordillera, Canada [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2002, 11(1), 41–51
- [19] Wotton B M, Martell D L. A lightning fire occurrence model for Ontario [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(6): 1389–1401
- [20] Larjavaara M, Kuukivainen T, Riita H. Spatial distribution of lightning-ignited forest fires in Finland [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 208: 177–188
- [21] Latham D, Williams E. Lightning and Forest Fires [M]. // Johnson E D, Mijanishi K. *Forest Fires*. Academic Press, San Diego, CA, 2001: 375–418