#### DOI: 10.5846/stxb201402140257

郭福涛,苏漳文,马祥庆,宋禹辉,孙龙,胡海清,杨婷婷.大兴安岭塔河地区雷击火发生驱动因子综合分析.生态学报,2015,35(19): - . Guo F T, Su Z W, Ma X Q, Song Y H, Sun L, Hu H Q, Yang T T.Climatic and non-climatic factors driving lightning-induced fire in Tahe, Daxing'an mountain.Acta Ecologica Sinica,2015,35(19): - .

### 大兴安岭塔河地区雷击火发生驱动因子综合分析

郭福涛<sup>1</sup>,苏漳文<sup>1</sup>,马祥庆<sup>1</sup>,宋禹辉<sup>1</sup>,孙 龙<sup>2</sup>,胡海清<sup>2,\*</sup>,杨婷婷<sup>1</sup> 1 福建农林大学,福州 350002 2 东北林业大学林学院,哈尔滨 150040

摘要:森林火灾是一个全球性问题,对森林资源和温室气体排放有重要影响,并严重影响人们生命财产安全。林火主要分为人 为火(人为活动引起)和雷击火(雷电引起)两大类。在我国北方针叶林带,雷击火主要集中在黑龙江大兴安岭和内蒙古呼伦贝 尔盟地区。大兴安岭塔河地区位于我国北方针叶林带,是森林火灾的重灾区。其中雷击火所占比例大约 1/3 以上。目前针对 当地雷击火与影响因子的研究主要集中于气象因子,非气象因子(森林可燃物和地形特征)的研究受数据条件和技术手段限制 研究报道较少。本研究数据包含三部分,林火数据,气象数据和地理植被数据。林火数据包含 1974—2009 年间林火发生经纬 度坐标,时间和面积等。气象数据主要包括每日尺度的最低气温,最高气温,平均风速,平均相对湿度等因子。根据加拿大火险 天气指标系统计算出了出了细小可燃物湿度码(FFMC),干燥可燃物湿度码(DMC)和干旱码(DC)也没用于本研究。此外,本 文基于 1:10 万塔河地区数字化林相图提取了海拔、坡度、坡向、森林类型、优势树种、龄级等因子用于决策因子分析。本研究数 据分析过程主要应用 AreGIS10.0 中的空间分析工具和 SPSS19.0 的逻辑斯蒂回归模型完成。研究结果显示"日最低气温","最 大风速"和"最小相对湿度"三个气象因子及火险天气指标系统(FWI)中细小可燃物湿度码(FFMC)干旱码(DC)与雷击火发生 概率显著相关(P<0.05),模型整体拟合水平 R2(Cox & Snell)=0.326。在非气象因子与雷击火发生的逻辑斯蒂模型检验中, "地被物盖度"和"龄级"均在 P=0.05 水平上与雷击火发生显著相关,其模型的整体拟合水平 R2 (Cox & Snell)为0.15。本研究 结论表明在分析雷击火发生的决策因子时,应该综合考虑气象、可燃物和林分因素。

## Climatic and non-climatic factors driving lightning-induced fire in Tahe, Daxing' an mountain

GUO Futao<sup>1</sup>, SU Zhangwen<sup>1</sup>, MA Xiangqing<sup>1</sup>, SONG Yuhui<sup>1</sup>, SUN Long<sup>2</sup>, HU Haiqing<sup>2,\*</sup>, YANG Tingting<sup>1</sup> 1 Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Faculty of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: Forest fires are a global issue due to their significant degradation of forest reserves and greenhouse gas emissions, as well as loss of human lives and livelihoods. Forest fires are mostly caused by nature (lightning-induced fires) and human activities (anthropogenic fires). Lightning-induced fires in China mostly occur in boreal forest, namely the Daxing' an Mountains of Heilongjiang province and Hulunbeier of Inner Mongolia. Lightning-induced fires have focused primarily on climatic factors, and studies of non-climatic factors such as forest fuel and terrain features are relatively rare, due to a lack of spatial data sets and spatial analysis technology. Thus, the aim of this study was to identify the key climatic and non-climatic factors driving lightning-induced fires in the Tahe area using fire occurrence and metrological data along with digital

收稿日期:2014-02-14; 网络出版日期:2014-12-04

基金项目:黑龙江省科技计划(GA09B201-06);国家科技支撑项目(2011BAD37B0104)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: huhq@nefu.edu.cn

forest maps in conjunction with logistic regression models and spatial analysis.

Fire occurrence data included location, time, and area burned of lightning-induced fires in the Tahe region, Daxing'an Mountains, 1974—2009. Meteorological data were daily minimum temperature, daily maximum temperature, maximum wind speed, 24 hour precipitation, average air pressure, average wind speed, average relative humidity, sunshine hours, and minimum relative humidity. In addition, we calculated the Fine Fuel Moisture Code (FFMC), Duff Moisture Code (DMC) and Drought Code (DC) according to the Canadian forest Fire Weather Index (FWI). In this study, 1:100,000 digital geographic and forest maps of the Tahe region were used to extract elevation, slope, aspect, depth of humus layer, litter cover, forest type, management regime, dominant tree, age class and canopy data in order to determine the factors driving lightning-induced fire occurrence in the study area.

A logistic regression model was developed to examine the relationship between lighting-induced fire, and climatic and non-climate factors. The spatial distribution of lighting-induce fires was analyzed using ArcGIS10.0. Three climate factors (Daily minimum temperature, maximum wind speed and minimum relative humidity) and two fuel indices (FFMC and DC) were significantly associated with lightning-induced fires (p < 0.05), and the goodness-of-fit of the model was R<sup>2</sup> = 0.326. Moreover, litter cover and tree age class were significantly related to the occurrence of lightning-induced fires, albeit with low R<sup>2</sup>(0.15). A map of fire likelihood was created using Kriging interpolation in ArcGIS, and the spatial coordinates of lightning-induced fires (1974—2005) along with the same number of random control points., This identified four high lightning-induced fire-risk regions in our study area, which are located in the middle and South of the Tahe area. In conclusion, the results from this study provide evidence that the consideration of not only climatic, but also fuel and non-climatic factors, is critical for understanding and predicting the occurrence of lightning-induced fires in the Tahe area.

Key Words: Daxing'an Mountain; Tahe area; Lightning-induced fire; Climatic factors; Logistic regression; Driving factors

森林火灾是一个全球性问题,对森林储量和温室气体排放都有显著的影响<sup>[1]</sup>,同时林火也是导致森林资源和人生命财产损失的主要因素。每年有大约 45,000 次森林火灾发生在欧洲<sup>[2]</sup>,10,000 次发生在加拿大<sup>[3]</sup>,12.9 万起发生在美国且过火林地面积高达 170 多万公顷。我国每年也会发生大约 10,000 次火灾,年均过火面积为 820,000hm<sup>2[4]</sup>。林火按其火源类型可主要分为天然火和人为火,天然火中以雷击火为主。美国 2007—2011 年均由雷击引起的森林火灾大约占到总森林火灾的 63%,为 14,200 次<sup>[5]</sup>。在加拿大,雷击火占总林火的近 1/3,而过火面积则可达到 90%<sup>[6]</sup>。据统计,我国的雷击火主要发生在北方针叶林带即黑龙江的 大兴安岭、内蒙古的呼伦贝尔林区和新疆的阿尔泰山地区<sup>[7]</sup>,大兴安岭林区雷击火占该地区森林火灾总次数的 38%<sup>[8,9]</sup>。

目前关于森林雷击火的研究主要分为雷击火成因机制和雷击火预测预报两大部分。通过对气象、地形、 可燃物等可能影响雷击火发生的因子进行分析,判别选择对雷击火发生有重要影响的决策因子,并以决策因 子为基础,运用数学统计方法,建立雷击火发生预测预报模型。国外关于雷击火影响因子的研究已开展多年 并取得了很多成果<sup>[10-16]</sup>,这些研究所选的初始影响因子不尽相同,所得的结论也有一定差异。有研究主要运 用加拿大火险天气指标系统(FWI)中反应可燃物干湿程度的指标如干旱码(DC)等为分析的初始参考因 子<sup>[10]</sup>;还有研究主要考虑可燃物含水率和森林类型<sup>[11]</sup>,以及气象因子<sup>[12]</sup>;此外,部分研究证实了海拔、坡度 对雷击火的显著影响<sup>[17]</sup>,然而也有研究得出了相反的结论<sup>[18]</sup>。可见研究区域不同,选择的初始参考因子不 同,研究结论也可能有较大差异,因此在研究雷击火发生的初始因子选择上应尽量涵盖气象、地形、森林类型 等多个方面。

目前国内学者针对大兴安岭地区雷击火的研究通常分为时空格局分析<sup>[8,19-21]</sup>和决策因子分析<sup>[22-25]</sup>两个 方向进行。在关于雷击火影响因素(决策因子)分析中,大多以气象因子为主要探讨对象<sup>[7,26-27]</sup>。然而,综合 国内外相关研究表明,雷击火的发生除了受气象因素影响外,森林可燃物(林型、优势树种、植被郁闭度等)和 区域地理地形因素(坡度、坡向、海拔等)都是研究中尤其是初始影响因素分析中应该加以考虑的<sup>[14,15,28-30]</sup>。 本文应用 ArcGIS10.3 和 Spss19.0 对林火数据与气象和非气象因子(可燃物和地形信息)分别进行分析,探求 对雷击火发生的关键因子,研究结论对深入了解我国北方针叶林雷击火发生规律和特性具有重要的意义。

#### 1 研究地区与研究方法

#### 1.1 研究区概况

本文研究地位于我国北方针叶林带,隶属于黑龙江 大兴安岭塔河地区,地处东经 123°—125°,北纬 52°— 53°。属寒温带大陆性气候,由于受大陆和海洋高、低及 季风交替的影响,气候变化显著,冬季漫长干燥而寒冷, 夏季短暂而湿热,春季多大风而少雨,秋季降急剧,霜冻 来的早,塔河县年平均气温-2.4 ℃,平均无霜期 98 d, 年平均降水量 463.2 mm,主要集中在 7、8 月份,年日照 时数 2015—2865 h。该地区森林覆盖率为 81%;蓄积量 5340 万立方米,主要树种有樟子松、落叶松、白桦、杨树 等 10 余种。

该地区也是森林火灾高发区,林火类型包括人为火和雷击火,整体上人为火和雷击火比例相当,但雷击火的年均过火面积高于人为火。雷击火主要发生在 5—8 月间,大面积雷击火多集中在 7、8 月。3、4、10 月仅有个别林火。本研究统计表明 1974—2008 年,塔河县过火面积 563,709 hm<sup>2</sup>, 年均 16,106 hm<sup>2</sup>. 1988 年后,该



Fig.1 Sketch map of the study area

区总过火面积呈微弱的下降趋势,但由雷击火引发的过火面积则呈上升趋势。1990年后,雷击火引发的过火 面积明显高于人为火和不明火引发的过火面积,1990年后雷击火引发的过火面积是 1990前的 7.4 倍. 1.2 数据来源

本文数据来源包括三部分,分别为林火数据,气象数据和矢量化林相图数据。林火数据来源于大兴安岭 地区塔河县森林防火办公室。数据包括 1974—2009 年塔河地区林火发生情况数据(起火地理坐标、起火原 因、发生时间、过火面积等)。

气象数据采用雷击火发生的当天气象数据,来源于中国气象数据共享网络(http:// cdc.cma.gov.cn/)。 数据包括塔河气象站(国家标准气象站号 50246)1965—2012 年的每日气象数据,一共包含极大风速(m/s)等 22 个气象因子,本文对气象数据进行了预处理,去除了缺失或不完整的气象因子,剩余气象因子包括,日最低 气温(℃),日最高气温(℃),24 小时降水量(mm),平均风速(m/s),平均气温(℃),平均水汽压(hPa),平均 相对湿度(%),平均气温(℃),日照时数(hour),最大风速(m/s),最小相对湿度(%)共11 个气象因子。

此外,根据研究区域每日气象数据,利用加拿大森林火险天气指标系统(FWI)<sup>[31]</sup>计算反映可燃物干湿程度的指标,分别为细小可燃物湿度码(FFMC)、腐殖质湿度码(DMC)、干旱码(DC)。

研究中所需基础地理地形图和矢量化林相图等数据来源于东北林业大学森林经理教研室。1:10万的基础地理图和矢量化林相图数据库分别建于 2000 和 2003 年。其中林相图数据库精确到小班,记录的小班内属性主要包括坡度、坡向、腐质层厚度、地被物盖度、林型、经营措施、优势树种、龄级和郁闭度等。

1.3 数据处理

**1.3.1** 二项逻辑斯蒂回归模型(Logistic regression model)

如果令二项分类应变量 Y=1(有雷击火发生)的概率为 P,则有 Y=0(无雷击火发生)的概率为(1-P)。

35 卷

有 ln  $\frac{p}{1-p}$  = logit(p) =  $\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n$  这种 P 与自变量之间(气象因素+林分信息)的回归关系式就是

Logistic 回归模型。

将 P 变换为 ln[P/(1-P)]称为 Logit 变换,记为 Logit(P),所以也称为 Logit 模型。Logit 变换使得在[0,
1]范围取值的 P 变换到(-∞, +∞),当 P 趋向于 0, Logit(P)趋向于-∞,当 P 趋向于 1, Logit(P)趋向于+∞。

雷击火的概率预报模型可表示为:

$$P = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)]} = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}}$$

式中,P为雷击火发生概率; $\beta_1 \cdots \beta_n$ 为各自变量相关系数; $X_1 \cdots X_n$ 为影响雷击火发生的各自变量。逻辑斯蒂 模型已被广泛应用于林火发生概率的预测预报<sup>[32-34]</sup>。

1.3.2 随机对照样点的创建

本文应用二项逻辑斯蒂回归模型进行关键因子分析和雷击火空间分布形势预测,由1.3.1 可知,建模的 数据结构要求火点和非火点同时对比存在,本文对照样点分为两部分:第一部分用来分析雷击火发生与气象 因子和可燃物干燥指数的关系。按1:1 随机选取与雷击火发生次数相同的对照样点(没有雷击火发生),并 提取对应的当日气象数据和由 FWI 系统计算的 FFMC、DMC 和 DC 进行逻辑斯蒂模型拟合分析。

第二部分分析雷击火与非气象因素的相关性。本文应用 ArcGIS 的随机点创建功能,按照火点与随机点 1:1 的比例分别创建随机点。随机点创建数量目前国内外并无明确标准和方法。国际上有学者按照研究区 域平均林火发生次数来创建随机点<sup>[35]</sup>,也有以随机点之间距离为约束条件来选取随机点的<sup>[36]</sup>。通常情况 下,为了防止数据结构过度离散,随机点选取通常要接近于或者略多于雷击火点。通过随机点坐标,反向确定 各点对应的林班内属性值。

1.3.3 林相图数据属性转化

应用 ArcGIS10.0 对林相图中的字符型变量进行属性转换用以进行回归模型分析。包括坡向、林型、经营 措施和林下优势树种,在给字符型因子附数值型属性值时,以整数形式并以1为计数间隔(Table1)。这些被 赋予的属性数值虽是人为定值,但它们的差异真实反应了相对应的字符型属性变量的差异,因此在实际模型 运算中,变量的显著性水平能有效的说明该因子是否对雷击火有显著影响。此外,坡度级、地被物盖度、龄级 和郁闭度也是本文考虑的因子,但由于其本身以数值型记录因此不需要进行属性转换。

#### 2 结果与分析

2.1 随机点创建及属性值数据库建立

本文应用二项逻辑斯蒂回归模型进行关键因子分析和雷击火空间分布形势预测,由1.3.1 可知,建模的 数据结构要求火点和非火点同时对比存在。表2为"火点+对照点"与气象因子的基本统计描述。应用 AreGIS 的随机点创建功能,按照火点与随机点1:1 的比例创建随机点(图2),并运用网格相减计算方法确保 随机点与雷击火点在空间上无重叠现象。通过所创建随机点的坐标,反向确定各点对应的林班内属性值(非 气象因子)。应用 AreGIS 将"火点+随机点"图层与矢量化林相图进行叠加运算,合并各图层属性,表3为"火 点+随机点"与非气象因子的基本统计描述。

2.2 模型拟合结果

#### 2.2.1 自变量多重共线性检验

多重共线性(Multicollinearity)是指线性回归模型中的解释变量之间由于存在精确相关关系或高度相关 关系。多重共线性会导致变量的显著性检验失去意义及模型的预测功能失效等后果。因此,在使用多个自变 量来检验其与因变量之间的相关性时,要首先对自变量进行多重共线性检验,排除有显著共线性的因子。本 文运用方差膨胀因子(the variance inflation factor, *VIF*)诊断法进行共线性检验。方差膨胀因子表达式为: *VIF*; = 1 1 - R<sub>i</sub><sup>2</sup>。其中 R<sub>i</sub><sup>2</sup>为自变量 X<sub>i</sub> 对其余自变量作回归分析的复相关系数。当 VIF 很大时,一般以 VIF=5 为标 准,大于 5 值表明自变量间存在多重共线性,需要去掉相应的自变量。目前已有研究采用此种办法进行林火 相关因子研究<sup>[37]</sup>。本文在建模分析之前,对所选用的两类自变量因子(气象和林分信息)分别进行了多重共 线性检验,检验结果表明个别气象因子之间存在显著共线性,去除后最终"24 小时降水","平均本站气压", "平均风速","平均相对湿度""日照时数","日最低气温","最大风速","最小相对湿度",FFMC,DMC 和 DC 共 11 个变量进入模型拟合阶段。而非气象因子之间不存在多重共线性,因此可以全部应用于模型拟合分析。

	Table 1         The conversion of attribute value of stock map				
林型: 属性赋值 Forest type: Attribute value	坡向: 属性赋值 Aspect: Attribute value	坡度: 属性赋值 Gradient: Attribute value	优势树种;属性赋值 Dominant tree; Attribute value	经营措施: 属性赋值 Management measures: Attribute value	腐殖质厚度: 属性赋值 The depth of humus: Attribute value
坡地-樟子松,杜鹃-樟子松 (Land-Pinus sylvestris var, Rhododendron simsii Planch-Pinus sylvestris var):1	无坡向:0	平:0 0°—15°	白桦 (Betula platyphylla):1	封山育林:1	薄:1
杜鹃-白桦, 草类-白桦 (Rhododendron simsii Planch- Betula platyphylla, Grass- Betula platyphylla);2	东:1	缓:1 15°—30°	落叶松 (Larix gmellini.):2	抚育间伐:2	中:2
坡地-落叶松,草类-落叶松 (Land-Larix gmellini, Grass- Larix gmellini):3	东北:2	斜:2 30°—45°	樟子松 (Pinus sylvestris var.):3	更新造林:3	厚:3
杜香-落叶松,杜鹃-落叶松 (Ledum palustre L. var. dilatatum Wahl- Larix gmellini, Rhododendron simsii Planch- Larix gmellini):4	东南:3	急:3 45°—60°	柳树(Salix babylonic.):4	林分改造:4	
杜鹃-山杨, 草类-山杨 (Rhododendron simsii Planch- Populus davidiana Dode, Grass- Populus davidiana Dode):5	JL:4	陡:4 60°—75°	山杨(Populus davidiana Dode.) :5	主伐利用:5	
河洼-杨树, 河洼-柳树 (Swamp- populus, Swamp- Salix babylonic):6	南:5	险:5 75°—90°	杨树(populus.):6	补充主伐:6	
偃松-落叶松 (Pinus-Larix gmellini):7 杜香藓落(Ledum palustre):8	西:6 西北:7 西志 8		云杉 (Picea asperata mast.):7 柞树 (Quercus mongolica Fisch):8	促进更新:7	
	四用:0				

#### 表1 林相图属性转化属性表

#### 表 2 雷击火、气象因子及 FWI 指数模型变量的基本统计

Table 2	The descriptive statistic of	variables of Lightni	ng-caused fire, climate	e factors and FWI i	ndex
模型变量	样本数	极小值	极大值	均值	标准差
Variables of model	Ν	Minimum	Maximum	Mean	Standard Error
着火次数 Fire number	235	0	1	0.50	0.50
20—20 时降水量 20—20 precipitation	235	0	481	9.65	39.56

6

模型变量

Variables of model

标准差

Standard Error

续表					
模型变量	样本数	极小值	极大值	均值	标准差
Variables of model	Ν	Minimum	Maximum	Mean	Standard Error
平均本站气压	235	0/73	0016	9661.81	65.46
Average air pressure	255	7775	<i>))</i> 10	2001.01	05.40
平均风速	235	3	93	29.14	13.55
Average wind speed	200	U U	20		10100
平均气温	235	-21.3	28.3	11.38	89.72
Average temperature					
平均水汽压	235	6	220	88.30	52.17
Average water pressure					
平均相对湿度	235	22	97	59.61	15.65
T BZ n+**					
口 炽 时 釵 Sunshine hours	235	0	148	83.36	41.70
日最低气泪					
Daily minimum temperature	235	-31.2	21.0	24.17	89.04
日最高气温					
Daily maximum temperature	235	-13.7	37.3	201.46	97.66
最大风速				<b>63</b> 04	
Maximum wind speed	235	2.5	14.8	63.01	22.98
最小相对湿度	225	0	02	20.00	15 (2)
Minimum relative humidity	235	0	93	30.08	15.62
细小可做物湿度码 FFMC	235	14.82	03 60	70.05	13 35
细小可 Min / 迎 / 可 FF MC	235	14.82	93.00	79.05	15.55
腐殖质湿度码 DMC	235	0.54	113.17	25.73	19.56
	200	0.0 .		20.70	17100
干旱码 DC	235	78.83	653.73	377.46	100.93

FFMC: Fine Fuel Moisture; DMC: Duff Moisture Code; DC: Drought Code

# 表 3 雷击火与非气象因子模型变量的基本统计Table 3 The descriptive statistic of model of Lightning-caused fire and non-climate factors样本数极小值极大值均值NMinimumMaximumMean235010.51

火点和随机点	235	0	1	0.51	0.501	
Fire and random point	200	Ũ	-	0.01	0.001	
坡度级(赋值)	235	0	4	0.96	0 761	
Slope (Given value)	255	0	Ţ	0.90	0.701	
坡向 (赋值)	234	0	8	4 19	2 369	
Aspect (Given value)	254	0	0	4.19	2.507	
腐质层厚度(cm)	235	1	3	1.86	0.405	
The depth of humus layer	255	1	5	1.00	0.405	
地被物盖度/%	225	15	00	52 11	15 794	
Coverage of litter	255	15	90	55.11	15.764	
林型(赋值)	225	1	10	2.09	1 496	
Forest type (Given value)	255	1	10	5.08	1.400	
经营措施(赋值)	225	1	6	1 59	1.065	
Management measure (Given value)	255	1	0	1.56	1.005	
优势树种(赋值)	225	1	G	1.60	0.784	
Dominant tree (Given value)	255	1	0	1.09	0.764	
龄级 (Year)	225	0	Q	2.46	1 560	
Tree age	255	0	0	5.40	1.309	
郁闭度/%	225	0	1	0.50	0.184	
Canopy	255	0	1	0.50	0.184	

#### 2.2.2 气象因子对雷击火的决策影响

本文对 1974—2009 年间雷击火和对照火点与对应 的当日气象因子进行逻辑斯蒂回归分析,模型的全变量 拟合结果显示,模型整体拟合结果  $R^2$ (Cox & Snell)为 0.333,模型参数拟合结果显示"日最低气温","最小相 对湿度",FFMC和DC与雷击火发生之间有显著相关性 (P<0.05),而其它自变量因子在全模型中(含有所有自 变量的逻辑斯蒂模型)与雷击火发生之间并未表现出 显著相关(表4)。此外,本文应用向后逐步回归法,将 不显著变量逐一从全模型中剔除,最后得到最优模型 (剔除不显著自变量的逻辑斯蒂模型),模型整体拟合 度指标 R<sup>2</sup>(Cox & Snell)为 0.326,最优模型中"日最低 气温","最大风速","最小相对湿度",FFMC和 DC -雷击火发生有显著相关性且均在 P<0.001 水平上显著 相关(表5)。

#### 2.2.3 非气象因子对雷击火的决策影响

本文对 1:1 创建随机点的数据进行二元逻辑斯蒂 回归拟合,模型的全变量拟合结果显示,模型整体拟合 Fig.2 Lightning-caused fire and 1:1 random points (non - fire 结果 R<sup>2</sup>(Cox & Snell)为 0.175,模型参数拟合结果显示 points) "地被物盖度"(P=0.041)和"龄级"(P=0.007)与雷击





火发生之间有显著相关性,而其它自变量因子在全模型中(含有所有自变量的逻辑斯蒂模型)与雷击火发生 之间并未表现出显著相关(表 6)。此外,本文应用向后逐步回归法,将不显著变量逐一从全模型中剔除,最后 得到最优模型(剔除不显著自变量的逻辑斯蒂模型),模型整体拟合度指标 R<sup>2</sup>(Cox & Snell)为 0.15,最优模型 中仍然是"地被物盖度"和"龄级"两个因子与雷击火发生有显著相关性(表7)。

Table 4         Parameter estimation of	f the full logistic re	gression model ( climate	e factors+FWI index)	
各自变量因子 Variable factors	估值系数 Estimate	标准误差 Std. Error	Wald 卡方值	显著水平 Pr(> z )
常量 Constant	-13.378	17.476	0.586	0.444
2020 时降水量 20—20 precipitation	0.005	0.003	2.152	0.142
平均本站气压 Average air pressure	0.001	0.002	0.397	0.529
平均风速 Average wind speed	-0.005	0.011	0.181	0.671
平均相对湿度 Average relative humidity	-0.007	0.013	0.306	0.580
日照时数 Sunshine hours	-0.002	0.003	0.356	0.551
日最低气温 Daily minimum temperature	0.007	0.002	17.967	< 0.0001
最大风速 Maximum wind speed	-0.010	0.006	3.004	0.083
最小相对湿度 Minimum relative humidity	-0.046	0.014	10.766	0.001
细小可燃物湿度码 FFMC	0.046	0.016	8.171	0.004
腐殖质湿度码 DMC	0.008	0.007	1.373	0.241
干旱码 DC	0.003	0.001	5.249	0.022

表 4 逻辑斯蒂全模型参数拟合(气象因子+FWI 指数)

	(* * * * * ; _	· · · ·	•
氏			▲ ▲ .
与			_ • • <del>*</del>
著	<ul> <li>✓</li> <li>● 火点</li> <li>▲ 随机点</li> </ul>		

なり 別称中国	百义主之 4 刻 而 [天王]		- xx /	
Table 5   Parameter estimation	of the "best" logistic r	egression model (clim	ate factors+FWI index	)
各自变量因子 Variable factors	估值系数 Estimate	标准误差 Std. Error	Wald 卡方值	显著水平 Pr(> z )
常量 Constant	-2.893	1.375	4.427	0.035
日最低气温 Daily minimum temperature	0.006	0.001	22.994	< 0.0001
最大风速 Maximum wind speed	-0.010	0.004	5.335	0.021
最小相对湿度 Minimum relative humidity	-0.050	0.011	19.878	< 0.0001
细小可燃物湿度码 FFMC	0.043	0.014	9.793	0.002

0.001

11.664

型拟合(气象因于+FWI 打	l 指致)
型拟合(气象因于+FWI 打	l 指致)

	表 6	逻辑斯蒂全模型参数	<b>拟合</b> (非气象因子)	
Table 6	Parameter estim	ation of the full logistic	c regression model (	non-climate factors)
		估值系数	标准误差	

0.004

各自变量因子 Variable factors	估值系数 Estimate	标准误差 Std. Error	Wald 卡方值	显著水平 Pr(> z )
常量 Constant	-0.366	1.220	0.090	0.764
海拔 Elevation/m	0.001	0.001	0.011	0.917
坡度级(赋值)Slope (Given value)	0.226	0.210	1.164	0.281
坡向 (赋值)Aspect (Given value)	0.035	0.058	0.366	0.545
腐质层厚度 The depth of humus layer/cm	-0.253	0.392	0.416	0.519
地被物盖度 Coverage of litter/%	0.018	0.009	4.176	0.041
林型(赋值)Forest type (Given value)	0.065	0.110	0.348	0.555
经营措施(赋值)Management measure (Given value)	-0.092	0.159	0.335	0.563
优势树种(赋值)Dominant tree (Given value)	-0.147	0.197	0.556	0.456
龄级 (Year)Age class	-0.330	0.124	7.082	0.008
郁闭度 Canopy/%	1.602	0.878	3.330	0.068

表 7 逻辑斯蒂最优模型的参数拟合(非气象因子)

Table 7	Parameter estimation of the "best" log	gistic regression model	(non-climate factors)	
各自变量因子 Variable factors	估值系数 Estimate	标准误差 Std. Error	Wald 卡方值	显著水平 Pr(> z )
常量 Constant	-0.239	0.575	0.173	0.678
地被物盖度 Coverage of litter/%	0.019	0.009	4.843	0.028
龄级 Age class/Year	-0.214	0.088	5.904	0.015

#### 2.3 研究区域雷击火概率分布

本文根据 1974—2005 年塔河地区雷击火空间坐标结合按照 1:1 比例随机创建的非林火对照点,运用克 里格插值方法对该地区雷击火空间概率分布进行了描述(图3)。根据插值结果,可以直观判断,该地区有大 概四个雷击火高发区/高火险区,分别位于塔河行政区划的中带和南部(图中圈画部分)。

#### 3 结论与讨论

本文应用应用 ArcGIS10.0 和 SPSS19.0 等工具,结合研究地矢量化林相图,通过图层叠加计算,属性转换, 逻辑斯蒂回归模型运算等一系列手段,分别分析了气象因素、可燃物指数和林分特征(非气象因素)对雷击火 发生的影响。研究结果显示"日最低气温","最大风速"和"最小相对湿度"三个气象因子及 FFMC, DC 两个 反应可燃物干湿程度的指标与雷击火发生概率显著相关。气象因子与雷击火的最优逻辑斯蒂模型拟合 R<sup>2</sup> (Cox & Snell)为0.326。在非气象因子与雷击火发生的逻辑斯蒂模型检验中,虽然"地被物盖度"和"龄级"均 在 P=0.05 水平上与雷击火发生显著相关,但其模型的整体拟合水平 R<sup>2</sup>(Cox & Snell) 仅为 0.15,说明林分特

干旱码 DC

0.001

征对雷击火发生的解释程度还不是很高,因此结合气象 因素的综合分析是非常必要的。

目前关于林火与影响因子的空间分析研究,主要有 网格取点和随机取点两种方式。网格取点是指对研究 区域进行网格化,规定网格大小。每一个网格代表一个 火点或对应的非火点(随机点),如果网格面积大,如5 km\*5km,那么坡向,林型等这类因子将不具备唯一 性,没有办法考虑进模型拟合中,若栅格面积小(1Km\* 1Km 或更小)则会出现"非火点"与"火点"比例严重失 衡现象,会导致模型拟合的偏差,从而无法判断影响因 子。因此在火点和非火点比例失衡的情况下,随机取点 是一个比较好的选择。

此外,国外一些学者研究表明,雷击/闪电次数对雷 击火发生有显著影响<sup>[16,28]</sup>,本文研究区域位于大兴安 岭区域内,该区域从 2006 年开始引入雷击检测设备,但 研究组目前仅收集到 2007—2008 年间大兴安岭地区雷 击数据。根据郭福涛<sup>[38]</sup>对大兴安岭地区 2007—2008 两年的雷击次数空间分研究表明,该时间区域内雷击频 率高发区主要集中在北部和南部,塔河境内相对较少。 由于雷击频率数据的缺陷,本文没有将累年的雷击/闪 电次数与雷击火发生次数进行逻辑斯蒂模型拟合,这是 本研究的一个不足,在未来的研究中,应当更多收集这 方面数据,与之前的各因子相结合,为该地区雷击火发 生的决策因子分析提供更全面综合的支撑。



图 3 研究区域人为火发生概率克里格插值结果 Fig. 3 The Kriging interpolation of possibility of Lightningcaused fire in the study area

#### 参考文献(References):

- [1] Chuvieco E, Giglio L, Justice C. Global characterization of fire activity: towards defining fire regimes from earth observation data. Global Change Biology, 2008, 14(7): 1488-1502.
- [2] Lasaponara R, Santulli A, Telesca L. Time-clustering analysis of forest-fire sequences in southern Italy. Chaos, Solutions & Fractals, 2005, 24 (1): 139-149.
- [3] Girardin M P, Ali A A, Carcaillet C, Gauthier S, Hély C, Goff H L, Terrier A, Bergeron Y. Fire in managed forests of eastern Canada: Risks and options. Forest Ecology and Management, 2013, 294: 238-249.
- [4] 王明玉. 气候变化背景下中国林火响应特征及趋势 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [5] NIFC [National Interagency Fire Center]. Urban-wild-land and wildland fire statistics. National Interagency Fire Center, Boise, Idaho, USA, 2004.
- [6] Kourtz P H, Todd J B. Predicting the daily occurrence of lightning-caused forest fires. Forestry Canada, Information Report PI-X-112, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario, 1992.
- [7] 田晓瑞, 舒立福, 赵凤君, 王明玉. 大兴安岭雷击火发生条件分析. 林业科学, 2012, 48(7): 98-103.
- [8] 倪长虹,邸雪颖.黑龙江省大兴安岭雷击火发生规律.东北林业大学学报,2009,37(1):55-57,75-75.
- [9] 高永刚, 顾红, 张广英. 大兴安岭雷击火综合指标研究. 中国农学通报, 2010, 26(6): 87-92.
- [10] Flannigan M D, Wotton B M. Lightning-ignited forest fires in northwestern Ontario. Canadian Journal of Forestry Research, 1991, 21 (3): 277-287.
- [11] Renkin R A, Despain D G. Fuel moisture, forest type, and lightning-caused fire in Yellowstone National Park. Canadian Journal of Forestry Research, 1992, 22(1): 37-45.

[12]	Nash C H, Johnson E A. Synoptic climatology of lightning-caused forest fires in subalpine and boreal forests. Canadian Journal of Forestry Research
	1996, 26(10): 1859-1874.

- [13] Podur J, Martell D L, Csillag F. Spatial patterns of lightning-caused forest fires in Ontario 1976—1998. Ecological Modelling, 2003, 164(1): 1-20.
- [14] Wotton B M, Martell D L. A lightning fire occurrence model for Ontario. Canadian Journal of Forestry Research, 2005, 35(6): 1389-1401.
- [15] Krawchuk M A, Cumming S G, Flannigan M D, Wein R W. Biotic and abiotic regulation of lightning fire initiation in the mixedwood boreal forest. Ecology, 2006, 87(2): 458-468.
- [16] Krawchuk M A, Cumming S G, Flannigan M D. Predicted changes in fire weather suggest increases in lightning fire initiation and future area burned in the mixedwood boreal forest. Climatic Change, 2009, 92(1/2): 83-97.
- [17] Castedo-Dorado F, Rodríguez-Pérez J R, Marcos-Menendez J L, Álvarez-Taboada M F. Modelling the probability of lightning-induced forest fire occurrence in the province of León (NW Spain). Forest Systems, 2011, 20(1): 95-107.
- [18] McRae R H D. Prediction of areas prone to lightning ignition. International Journal of Wildland Fire, 1992, 2(3): 123-130.
- [19] 赵俊卉, 亢新刚, 郭广猛, 董斌, 周梅. 基于 LIS/OTD 格点数据的中国东北地区雷击火时空分布. 生态学杂志, 2009, 28(4): 715-720.
- [20] 郭福涛, 胡海清, 张金辉. 塔河地区林火时空分布格局与影响因素. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 204-208.
- [21] 杜春英,李帅,刘丹,李秀芬,于成龙.大兴安岭地区森林雷击火发生的时空分布.自然灾害学报,2010,19(3):72-76.
- [22] 王明玉, 舒立福, 田晓瑞, 史军. 林火在空间上的波动性及其对全球变化的响应(II). 火灾科学, 2003, 12(3): 171-176.
- [23] 赵凤君,王明玉,舒立福,王春乙.气候变化对林火动态的影响研究进展.气候变化研究进展,2009,5(1):50-55.
- [24] 郭福涛, 胡海清, 马志海, 张扬. 不同模型对拟合大兴安岭林火发生与气象因素关系的适用性. 应用生态学报, 2010, 21(1): 159-164.
- [25] 魏书精, 胡海清, 孙龙. 气候变化对我国林火发生规律的影响. 森林防火, 2011, (1): 30-34.
- [26] 于建龙,刘乃安.我国大兴安岭地区森林雷击火发生的火险天气等级研究.火灾科学,2010,19(3):131-137.
- [27] 邸雪颖, 李永福, 孙建, 杨光. 黑龙江省大兴安岭地区塔河县森林火险天气指标动态. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1240-1246.
- [28] Díaz-Avalos C, Peterson D L, Alvarado E, Ferguson S A, Besag J E. Space time modelling of lightning-caused ignitions in the Blue Mountains, Oregon. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31(9): 1579-1593.
- [29] Anderson K. A model to predict Lightning-caused fire occurrences. International Journal of Wildland Fire, 2002, 11(4): 163-172.
- [30] Wierzchowski J, Heathcott M, Flannigan M D. Lightning and lightning fire, central cordillera, Canada. International Journal of Wildland Fire, 2002, 11(1): 41-51.
- [31] Wotton B M. Interpreting and using outputs from the Canadian forest ire anger rating system in research applications. Environ Ecol Stat, 2009, 16: 107-131.
- [32] Andrews P L, Loftsgaarden D O, Bradshaw L S. Evaluation of fire danger rating indexes using logistic regression and percentile analysis. International Journal of Wildland Fire, 2003, 12(2): 213-226.
- [33] Martínez J, Vega-Garcia C, Chuvieco E. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. Journal of Environmental Management, 2009, 90: 1241-1252.
- [34] Chang Y, Zhu Z L, Bu R C, Chen H W, Feng Y T, Li Y H, Hu Y M, Wang Z C. Predicting fire occurrence patterns with logistic regression in Heilongjiang Province, China. Landscape Ecology, 2013, 28(10): 1989-2004.
- [35] Martell D L, Bevilacqua E, Stocks B J. Modelling seasonal variation in daily people-caused forest fire occurrence. Canadian Journal of Forest Research, 1989, 19(12): 1555-1563.
- [36] Vasconcelos M J P de, Sllva S, Tome M, Alvim M, Perelra J M C. Spatial prediction of fire ignition probabilities: Comparing logistic regression and neural networks. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2001, 67(1): 73-81.
- [37] Littell J S, McKenzie D, Peterson D L, Westerling A L. Climate and wildfire area burned in western U. S. A ecoprovinces, 1916-2003. Ecological Applications, 2009, 19(4): 1003-1021.
- [38] 郭福涛. 基于空间分析和模型理论的大兴安岭地区林火分布与预测模型研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.