

大兴安岭人为火发生影响因素及气候变化下的趋势

李 顺^{1,2} 吴志伟^{1*} 梁 宇¹ 贺红士^{3,4}

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³东北师范大学, 长春 130000; ⁴美国密苏里大学, 哥伦比亚 65211)

摘 要 我国重要的北方针叶林地区大兴安岭是林火高发地区. 受气候变暖影响, 该地区林火发生频率将会发生显著变化. 模拟人为火的发生分布与影响因素之间的关系、加强气候变化下人为火的发生分布预测, 对于林火管理和减少森林碳损失具有重要作用. 本文采用点格局分析方法, 基于大兴安岭 1967—2006 年的火烧数据, 建立人为火空间分布与影响因素之间的关系模型. 该模型以林火发生次数为因变量, 选取非生物因子(年均温和降水量、坡度、坡向和海拔)、生物因子(植被类型)和人为活动因子(距离道路距离、距离居民点距离、道路密度)共 9 个因子为自变量, 并采用 RCP 2.6 和 RCP 8.5 气候情景数据代替当前气候情景预测 2050 年大兴安岭人为火的空间分布状况. 结果表明: 点格局模型能够较好地模拟人为火发生分布与空间变量的关系, 可以预测未来气候下人为火的发生概率. 其中, 气候因子对人为火的发生具有明显的控制作用. 植被类型、海拔和人为活动等因子对人为火的发生也具有重要影响. 林火发生预测结果表明, 未来气候变化下, 南部地区的林火发生概率将进一步增加, 北部和沿主要道路干线附近将成为新的人为火高发区. 与当前相比, 2050 年大兴安岭人为火的发生概率将增加 72.2%~166.7%. 在未来气候情景下, 人为火的发生更多受气候和人为活动因素的控制.

关键词 人为火; 北方森林; 空间点格局分析; 气候变化; 大兴安岭

Drivers of human-caused fire occurrence and its variation trend under climate change in the Great Xing'an Mountains, Northeast China. LI Shun^{1,2}, WU Zhi-wei^{1*}, LIANG Yu¹, HE Hong-shi^{3,4} (¹*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;* ²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;* ³*Northeast Normal University, Changchun 130000, China;* ⁴*University of Missouri, Columbia 65211, MO, USA*).

Abstract: The Great Xing'an Mountains are an important boreal forest region in China with high frequency of fire occurrences. With climate change, this region may have a substantial change in fire frequency. Building the relationship between spatial pattern of human-caused fire occurrence and its influencing factors, and predicting the spatial patterns of human-caused fires under climate change scenarios are important for fire management and carbon balance in boreal forests. We employed a spatial point pattern model to explore the relationship between the spatial pattern of human-caused fire occurrence and its influencing factors based on a database of historical fire records (1967–2006) in the Great Xing'an Mountains. The fire occurrence time was used as dependent variable. Nine abiotic (annual temperature and precipitation, elevation, aspect, and slope), biotic (vegetation type), and human factors (distance to the nearest road, road density, and distance to the nearest settlement) were selected as explanatory variables. We substituted the climate scenario data (RCP 2.6 and RCP 8.5) for the current climate data to predict the future spatial patterns of human-caused fire occurrence in 2050. Our results showed that the point pattern progress (PPP) model was an effective tool to predict the future relationship between fire occurrence and its spatial covariates. The climatic variables might significantly affect human-caused fire occurrence, while vegetation type, elevation and human variables were important predictors of human-caused fire oc-

本文由国家自然科学基金项目(41371199, 31570462, 31300404)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41371199, 31570462, 31300404).

2016-07-21 Received, 2016-11-04 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuzhiwei@iae.ac.cn

currence. The human-caused fire occurrence probability was expected to increase in the south of the area, and the north and the area along the main roads would also become areas with high human-caused fire occurrence. The human-caused fire occurrence would increase by 72.2% under the RCP 2.6 scenario and by 166.7% under the RCP 8.5 scenario in 2050. Under climate change scenarios, the spatial patterns of human-caused fires were mainly influenced by the climate and human factors.

Key words: human-caused fire; boreal forest; spatial point pattern analysis; climate change; Great Xing'an Mountains.

北方森林(boreal forests)地处北半球中高纬度地区(45° — 70° N),是受气候变化影响最显著的地区之一^[1].全球气候变暖导致北方森林地区的林火状况进一步加剧,影响森林的更新和演替.同时,由于北方森林蕴含巨大的碳储量,使得其对调节全球的碳平衡具有重要作用.现有研究表明,受气候变暖的影响,北方林火发生的频率和火烧面积将大幅度增加^[2-5].例如,加拿大北方森林每年的火烧面积将增加 74%~118%^[6],火烧频率将增加 140%^[7].美国北方森林到 21 世纪末,火烧发生概率也将增加 70%~210%^[8].

大兴安岭地区作为我国重要的北方森林,是林火的高发地区,人为火在该地区占有相当大的比重.研究表明,1972—2006 年,整个大兴安岭地区年平均发生人为火的次数为 54 次,占总火灾次数的 67.5%,年均人为火过火面积 16187.05 hm^2 ,占总过火面积的 88.9%^[9].大面积人为火的发生,不仅给我国森林资源造成巨大损失,同时也进一步加剧我国北方针叶林的碳排放量.近年来由于气候变暖,我国北方森林的火烧频率也可能大幅度增加^[9-10].因此,对未来气候下我国北方森林人为火发生的预测,不仅是林火管理的需要,也是探讨林火对森林碳储量影响的基础.

林火的发生格局受到多种因素的影响,在不同空间尺度下,影响林火发生的因素不同.气候因素主要在大的空间尺度上对林火发生产生影响,而在景观尺度上,林火发生更多受地形、植被类型、人为活动和可燃物等因子的影响^[11].大尺度影响下的气候因子一直以来是林火影响因素研究的重点,但景观尺度下与林火相关的研究较少.近年来,国外学者从多重空间尺度对林火的影响因子展开研究^[12-14],尤其是景观尺度影响下的地形、植被和人为活动因子有了进一步深入研究.这些研究有助于进一步理解林火发生机制及其对未来环境变化的响应.然而,目前我国对林火影响因子的研究也多集中在气候/气象因子上,缺乏多重空间尺度下林火影响因素的研究.

目前,国内外学者对气候变化下林火预测开展了较为系统的研究,但在林火影响因子研究中,大部分学者根据气候与林火之间的关系模型^[3,15-19]预测气候变暖下的林火状况,主要包括:1) 采用统计方法建立林火与气象因子之间的时空预测模型,预测未来林火发生趋势^[3,15,18];2) 采用气候模型与森林火险预报模型耦合的方法对气候变化下的火险趋势进行预测^[16-17,19].然而,气候因素主要在大的区域尺度上对林火发生产生影响,在景观尺度上,林火发生还受到植被、地形和人类活动等局部因子的影响^[11].若不考虑局部因子的作用,只基于林火与气候因子关系预测气候变暖下的林火发生分布可能存在较大的不确定性.

对于林火发生的影响因素研究,国内外学者基本上综合气候、植被、地形和人为活动因素对林火发生的交互作用,并建立了林火发生与各个林火影响因子之间的相关关系,但根据这些关系对未来气候变暖下林火发生预测的研究很少^[20-23].此外,目前国内的预测结果往往局限于某些林区^[18,24],缺乏从大的区域尺度上对我国北方森林气候变暖下的林火发生进行预测,同时也缺少对未来气候变暖下的林火发生分布进行空间制图.为进一步确立空间明晰的大兴安岭人为火的发生状况,本文采用空间点格局方法(spatial point pattern),综合气候、植被、地形和人为活动因子对林火发生的影响,建立人为火发生与各个林火影响因子之间的关系,再根据该关系模型预测气候变暖下的人为火发生概率.本文主要研究目标包括:1) 根据大兴安岭历史人为火的数据和林火影响因子(气候、植被、地形和人类活动),建立林火发生概率与空间变量之间的相关关系.通过 R “spatstat”分析工具中的空间点过程模拟(SPP)得以实现.2) 假设其他因子(植被、地形和人为活动)不变的前提下,采用美国地球物理流体动力学实验室(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL)耦合气候变化模型,预测未来气候变暖下,大兴安岭人为火的空间分布,并进一步分析气候变暖对大兴安

岭人为火的长期影响.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

大兴安岭位于中国东北地区 (50° — 53° N, 121° — 127° E), 面积 $8.46 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1). 研究区主要为黑龙江大兴安岭 10 个林业局, 包括内蒙古跃进林场. 全区地形西北—东南走向, 地势西高东低, 属浅山丘陵地带. 该地区为寒温带大陆性季风气候, 冬季受蒙古西伯利亚高压影响, 寒冷漫长, 春秋季节多大风、干旱天气, 气温升高快, 因此也是林火的高发期^[12]. 该区年均温为 $-6 \sim 1^{\circ}\text{C}$, 年降水量 240 ~ 442 mm. 大兴安岭植被类型为寒温带针叶林, 以兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 为优势树种. 此外, 还有樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、红皮云杉 (*Picea koraiensis*) 等针叶树种, 主要分布在湿润、温凉地带. 阔叶树种以白桦 (*Betula platyphylla*)、山杨 (*Populus davidiana*)、钻天柳 (*Chosenia arbutifolia*) 为主, 主要生长在阳坡、排水良好的地带^[25]. 偃松 (*Pinus pumila*) 主要分布在海拔较高的地带, 对当地生态系统的维持具有重要作用^[26].

大兴安岭是我国森林火灾高发地区, 年平均火灾发生次数为 80 次, 年均过火面积达 $18.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[9], 火烧轮回期为 30 ~ 120 年. 由于该区属于半湿润地区, 火险期主要集中在每年的 4—9 月. 该区主要火源由人为火造成, 加上林区地广人稀、交通不便, 火灾扑救困难. 同时由于植被易燃, 气候干旱, 多山地地形, 极易形成雷击火. 受气候变化影响, 大兴安岭林火次数和火灾强度有增加趋势^[27].

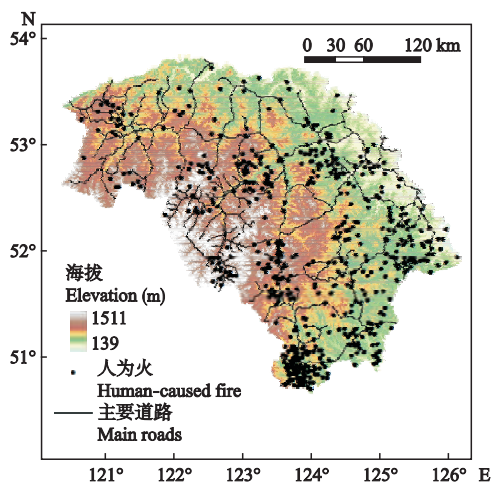


图 1 研究区人为火点分布及主要道路

Fig.1 Distribution of human-caused fire points and roadway coverage in the study area.

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 林火数据 林火数据来源于大兴安岭林业局森林防火办公室, 为研究区 1967—2006 年火烧记录, 包括火点坐标、发生和扑灭时间、火烧面积、火烧等级、起火原因. 从中提取人为火点坐标 (共获得 845 个火点), 并采用 ArcGIS 软件进行空间数据化. 为避免火点之间存在空间自相关性, 删除重复点和欧式距离小于 2 km 的火点, 最终得到 544 个人为火点, 作为点格局分析的因变量.

1.2.2 林火因子数据 气候因子不仅通过可燃物湿度对林火发生产生影响, 同时也是气候变化的重要指标^[28]. 气候因子主要在大尺度上对林火发生产生影响. 本文当前气候背景下的气象数据来源于 WorldClim 网站 (<http://www.worldclim.org/CMIP5>), 为 1950—2000 年间多年平均气温和降水量 (TIF 格式), 分辨率为 $30'' \times 30''$.

地形因子主要在景观尺度上对林火发生产生影响^[18-19]. 地形因子 (坡度、海拔、坡向等) 通过影响局部地区的降水、气温、太阳辐射和风速等微气候, 对林火的发生和蔓延产生间接作用. 本文地形数据来源于国家地球系统科学数据共享平台 (<http://www2.geodata.cn/>), 为分辨率 90 m 的数字高程模型 (DEM). 将提取的各个坡向根据光照强度分为阴坡 (NE、NW、N 和 E), 阳坡 (SW、SE、S 和 W) 和平地 (坡度为 0°)^[5].

人为活动也是林火发生的重要因子. 人为活动主要通过距离道路、居民点距离和道路密度等指标反映人为生产性和生活性用火对林火发生的影响, 国内外学者研究也显示, 人为基础设施等因素 (道路、居民点) 对人为火的发生有显著影响^[13-24]. 因此, 本文采用的人为活动数据为黑龙江省 1 : 5 万道路图和 1 : 10 万居民点图, 来源于国家地球系统科学数据共享平台 (<http://www2.geodata.cn/>). 通过 ArcGIS 空间分析模块, 得到研究区每一点到道路和居民点的最近距离图和道路密度 (每平方公里的道路长度) 图.

植被是可燃物的表现形式, 也是林火发生和蔓延的主要载体. 不同林型由于可燃物结构和性质的差异, 易燃程度和林火蔓延速度不同. 本研究根据大兴安岭 2000 年林相图, 将植被类型分为针叶林、阔叶林、混交林和草地 4 个类别.

本文所有气候因子、地形因子、植被因子和人类活动因子全部转化成像元大小为 1 km 的栅格图, 投影为 Beijing1954. 该部分数据作为点格局分析中的

自变量.

1.2.3 气候变化数据 未来气候变化的预估主要是基于温室气体排放情景.目前广泛采用的是 SRES (special report on emissions scenarios) 排放情景^[29].但是 SRES 情景没有考虑应对气候变化的各种政策对未来排放的影响.为强化排放情景对气候变化的参考作用,并在更大范围内研究潜在气候变化和不确定性,本文采用 4 种“典型浓度目标”(representative concentration pathways, RCPs)^[30-31]情景,分别为 RCP 8.5、RCP 6、RCP 4.5 及 RCP 2.6,代表温室气体排放情景由高到低的水平^[32].

为预测气候变暖对大兴安岭人为火的长期影响,以 2050 年作为参考年份,从 4 种情景中选择 RCP 2.6 和 RCP 8.5 情景,分别代表气候变暖高和低的趋势.对于气候变暖情景数据,从 WorldClim 网站(<http://www.worldclim.org/CMIP5>)选择美国地球物理流体动力学实验室(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL)耦合气候变化模型(GFDL-CM3)预测的 RCP 2.6 和 RCP 8.5 情景下的年均温度、降水数据,该数据为分辨率 30"×30"的栅格图.温度和降水数据为 2050 年预测值(2041—2060 年平均值).本研究假设气候变化背景下,温度和降水呈线性变化,按照获取 GFDL 模型中 2050 年气温和降水的年平均数据,用以预测大兴安岭气候变暖下人为火的发生趋势.

1.3 研究方法

1.3.1 人为火发生关键因子的确定 选取的人为火控制因子主要包括植被类型、地形(海拔、坡度和坡向)、人为活动因子(距离道路和居民点最近距离、道路密度)和气候因子(气温、降水).对于类型变量(植被类型和坡向)则通过比较每种类型林火发生次数的观测值和预测值,判断该类型是否更易于发生火灾.观测值是该类型变量实际的林火发生次数,用百分比代替,即观测值=各类型林火发生次数/林火发生的总次数;预测值是火点不受任何变量影响,呈完全空间随机模式(complete spatial randomness, CSR)下的分布,其火点分布与某类型变量占总面积的百分比有关,用百分比代替,预测值=总的火灾次数×(某类型变量面积/总面积).若某个类别观测值高于预测值,说明在该类别上更倾向发生火灾.

对于空间连续变量,采用潜变量作图法揭示空间变量对火点分布的影响^[5,33-34].首先将人为火点作为空间随机点(CSR)数据模拟,通过潜变量作图能够反映哪些空间变量可以作为潜在变量入选模

型,该图通过皮尔逊残差对空间连续变量进行作图,若 CSR 能够正确模拟林火发生,则皮尔逊残差接近于 0;若累积皮尔逊残差大于 2 倍的标准误,表明该区间的变量内,林火发生概率显著高于空间随机条件下的林火发生概率.

1.3.2 人为火发生预测模型的构建 为建立林火发生与空间变量之间的关系,采用 R 软件统计包“Spatstat”中的空间点格局(SPP)分析实现^[35].空间点格局过程(泊松分布、高斯分布等)可用 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示,也可通过空间条件函数 $\lambda(u; x)$ 或空间密度函数 $\lambda(u)$ 来实现.

林火发生在空间上具有泊松分布特点^[36],因此林火发生与林火因子的关系可采用泊松分布(Poisson point process, PPP)来拟合.在实际应用中,广泛采用对数线性回归模型对 PPP 进行拟合,林火发生与林火因子的关系定义如下:

$$\lambda(u) = \exp(\theta_0 + \theta_1 \cdot V_1 + \dots + \theta_n \cdot V_n)$$

式中: $\lambda(u)$ 为空间点 u 的密度,表示单位面积人为火的发生概率; V_1, \dots, V_n 是林火发生空间控制因子,本文选取的空间变量因子如表 1 所示; θ 为每个控制因子的参数向量($\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n$),反映林火发生概率在区域的空间变化趋势或者对某个控制因子的依赖程度 θ 通过 R 软件的 ppm() 函数估算而得^[35].

将人为火的数据随机划分为训练数据(70%)和验证数据(30%),其中,训练数据用于 PPP 建模,验证数据用于对模型结果进行检验.为反映空间变量对林火发生的非线性过程影响,本研究将所有空

表 1 林火的空间变量因子

Table 1 Spatial covariate factors of forest fire

变量 Variable	单位 Unit
年均温度 Mean annual temperature	℃
年均降水 Mean annual precipitation	mm
降水的平方 Square of precipitation	mm
海拔 Elevation	m
海拔的平方 Square of elevation	m
坡度 Slope	°
坡度的平方 Square of slope	°
距离最近道路的距离 Distance to nearest road	m
距离最近道路距离的平方 Square of distance to nearest road	m
道路密度 Road density	km · km ⁻²
道路密度的平方 Square of road density	km · km ⁻²
距离居民点距离 Distance to nearest settlement	m
距离居民点距离的平方 Square of distance to nearest settlement	m
坡向 Aspect	
植被类型 Vegetation type	

间变量的二次项变换形式也参与到模型拟合中^[37].

在模型构建过程中,采用 AIC 标准来确定最佳模型,AIC 越小,说明模型拟合越好.在确定最佳模型过程中,AIC 可对空间变量进行筛选,确立哪些变量因子用于建型,并确立这些因子的参数,即确立各个因子对林火发生的贡献^[37].

将验证数据代入模型中进行验证.模型验证方法主要采用资源选择函数(resource selection functions,RSF),通过比较模型预测数据和验证数据来反映模型的模拟情况^[38].将模型预测的结果按林火密度大小分为 9 个等级,比较每个等级林火密度的预测值(该部分模型模拟的均值)和观测值(验证数据落在该部分的均值),通过线性回归和卡方检验验证模型拟合结果,若线性回归结果的斜率接近于 1,截距接近 0,且 R^2 值较高,说明拟合结果比较好.

1.3.3 气候变暖下人为火的变化趋势 根据人为火发生预测模型,将历史气候数据替换成未来气候数据,预测气候变暖对人为火发生的长期影响.气候变暖对人为火的影响可用如下公式表示:

$$\Delta Fire_{cha} = Fire_{fut} - Fire_{cur}$$

式中: $Fire_{fut}$ 和 $Fire_{cur}$ 分别代表未来和当前的人为火的发生概率; $\Delta Fire_{cha}$ 代表当前和未来不同气候情境下林火状况的差异性,用于量化气候变暖对人为火发生的影响.最终得到 RCP 2.6 和 RCP 8.5 情景下,2050 年人为火的发生分布图和 50 年内人为火分布的变化趋势.

2 结果与分析

2.1 空间变量对人为火发生的影响

通过比较各个坡向人为火发生概率的观测值和理论值发现,阳坡更易发生火灾,但坡向对人为火的发生影响不显著($\chi^2 = 0.473$, $df = 2$, $P = 0.421$,图 2a).对于植被类型变量,根据卡方检验,植被类型对人为火的发生具有显著影响($\chi^2 = 41.89$, $df = 7$, $P = 1.09 \times 10^{-6}$,图 2b).每平方公里阔叶林、混交林、针叶林和草地发生的人为火次数分别为 3.6×10^{-3} 、 1.8×10^{-2} 、 3.2×10^{-3} 和 3.9×10^{-3} .阔叶林、混交林和针叶林实际发生的人为火所占比例较大,但由于阔叶林和针叶林区所占总面积的比例也较大,相比之下,所占面积较少的混交林区更易发生人为火.

由潜变量作图可知,海拔在 500~700 m 之间,累积皮尔逊残差显著性高,此海拔区间内人为火的火烧概率明显高于其他地区(图 3a),人为火的海拔分布与人类活动范围密切相关,可能原因是该海拔

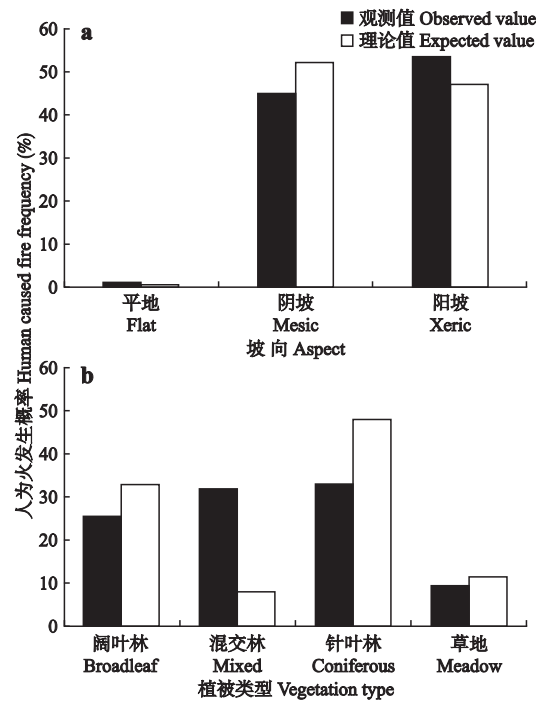


图2 人为火发生概率观测值和理论值

Fig.2 Proportion of observed value and expected value for human-caused fire occurrences.

a) 坡向 Aspect; b) 植被类型 Vegetation type.

区间内人为活动较为频繁.当距道路距离在 5.5 km 左右时,皮尔逊残差波动较大,此范围内人为火的发生概率明显高于其他地区(图 3b),说明该区域范围内人为活动频繁,人为火的概率明显增加;小于 5.5 km 时,虽然人类活动频繁,但距离道路近,火烧容易被发现,所以火烧概率并不高,大于 5.5 km 区域超出了日常活动范围,受人类活动影响小,因此火烧概率也不高.当距离居民点 25 km 以内时,人为火的发生概率高于其他地区(图 3c),说明此范围也是人类活动频率较高区域.

2.2 模型拟合结果与验证

根据 AIC 标准选择模型中的变量及其拟合系数(表 2),结果表明,在气候因子中,年均温度对人为火的发生具有显著影响,降水对人为火的发生为非线性作用(表 1).在地形因子中,海拔对人为火的发生具有显著影响,而坡向和坡度对人为火的发生影响不显著.在人类活动因子中,距离道路和居民点距离是影响人为火发生的显著因子,道路密度对人为火的发生主要表现为非线性作用.植被类型因子中,针叶林和混交林是影响人为火发生的主要因子,而其他类型因子的影响较弱.

将 30% 的数据代入建立的模型中验证.根据 RSF 方法,将模型模拟的预测值与观测值通过线性

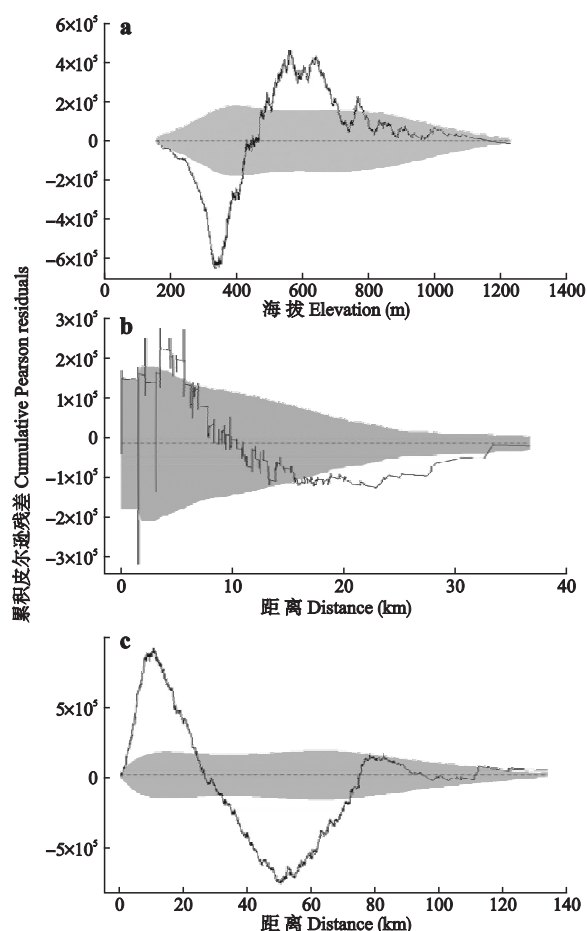


图3 潜变量的累积皮尔逊残差

Fig.3 Cumulative Pearson residuals of lurking variable.

a) 海拔 Elevation; b) 距道路最近距离 Distance to nearest road; c) 距居民点最近距离 Distance to nearest settlement.

表2 根据 AIC 标准选择的模型参数及其系数

Table 2 Selected predictor variables and coefficients based on AIC criterion

参数变量 Variable	拟合系数 Fitted coefficient
截距 Intercept	-66.91
温度 Temperature	0.447
降水 Precipitation	0.18
降水的平方 Square of precipitation	-1.65×10^{-4}
海拔 Elevation	0.0114
海拔的平方 Square of elevation	-8.14×10^{-6}
距离最近道路的距离 Distance to nearest road	-8.07×10^{-5}
距离最近道路距离的平方 Square of distance to nearest road	3.21×10^{-9}
道路密度的平方 Square of road density	4.45×10^{-9}
距离居民点距离 Distance to nearest settlement	-2.90×10^{-5}
距离居民点距离的平方 Square of distance to nearest settlement	2.04×10^{-10}
混交林 Mixed forest	-0.314
针叶林 Coniferous forest	-0.257

拟合办法对模型结果进行验证,结果显示,线性拟合

的斜率为 0.97,接近于 1;截距为 0.56,接近于 0;线性拟合的 R^2 值为 0.91.根据卡方拟合优度的检验,人为火发生的预测值和观测值拟合结果为: $\chi^2 = 7.77$, $df = 8$, $P = 0.46$.说明 PPP 模型可较好地拟合人为火发生与空间变量之间的关系,该模型可以用来预测气候变化下人为火的发生概率.

2.3 未来气候变化下人为火的发生趋势

根据以上模型拟合结果,得到当前和未来情景下(2050 年)人为火的发生概率图(图 4、5).在 GFDL-CM3 模型中,未来气候情景下大兴安岭的年均温度和降水量都有所增加.在 RCP 2.6 情景下,气温和降水增加缓慢;RCP 8.5 情景下,气温和降水量增加迅速.温度和降水量的增加基本沿纬度呈梯度分布,尤其在大兴安岭北部地区,气温和降水量增加最为显著.根据模型拟合结果,温度与林火发生呈正相关,对林火发生概率的增加有促进作用,而降水量则与林火发生呈负相关,降低林火的发生概率.未来气候变暖下,林火的增加与否,主要取决于气候因子中气温和降水量的相互作用.气温和降水量对人为火发生概率影响的具体量化指标主要通过 PPP 模型模拟的参数得到(表 2).其中,气温对林火发生主要表现为线性正相关,降水量主要为非线性相关.因此,某一地区人为火的发生概率是否增加,主要取决于该地区气温和降水量的增长幅度.若某一地区气温升高对林火发生增加的作用不及降水量增加导致林火发生减少的作用,则该地区未来气候条件下,主要表现为林火发生概率减少,反之亦然.因此,这也导致气候变暖下林火发生概率在空间分布上具有明显的变异性,如有些地区林火发生概率急剧增加,而有些地区则表现出无变化甚至下降的趋势^[39].

通过 PPP 模型模拟得到,当前情景下大兴安岭地区人为火的发生概率在 $0 \sim 1.49$ 次 $\cdot 1000 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,平均发生概率为 0.18 次 $\cdot 1000 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 4a);南部为人为火的高发地区,火灾发生概率由北往南逐渐增多.在 RCP 2.6 情景下,2050 年人为火的发生概率在 $0 \sim 3.83$ 次 $\cdot 1000 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,平均发生概率为 0.31 次 $\cdot 1000 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 4b);该情景下人为火的发生与当前气候背景相比,南部仍然是火灾高发区,北部地区和沿主要道路干线附近地区成为新的人为火高发区.在 RCP 8.5 情景下,人为火的发生概率在 $0 \sim 5.8$ 次 $\cdot 1000 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,平均发生概率为 0.48 次 $\cdot 1000 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 4c).其分布模式与 RCP 2.6 情景下概率的分布基本一致,北部地区和道路附近的人为火的发生密度有进一步扩大趋势.

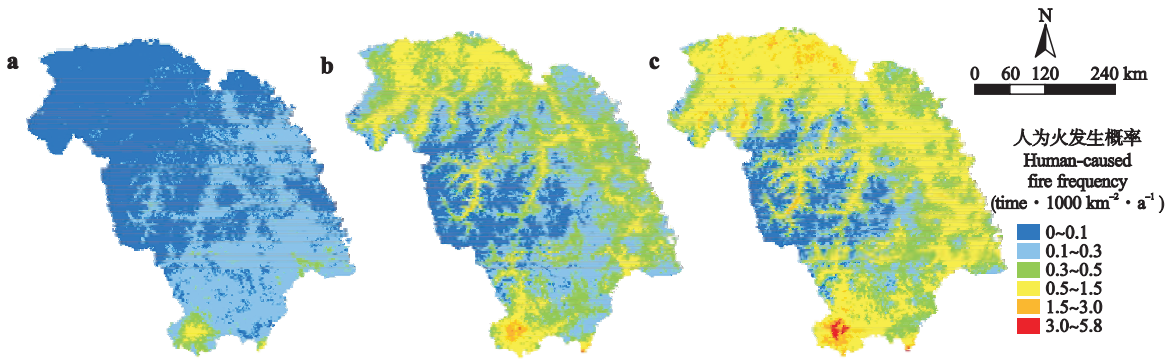


图 4 人为火发生概率的空间分布
Fig.4 Spatial patterns of human-caused fire occurrence probability.
a) 当前情景 Current; b) RCP 2.6; c) RCP 8.5.

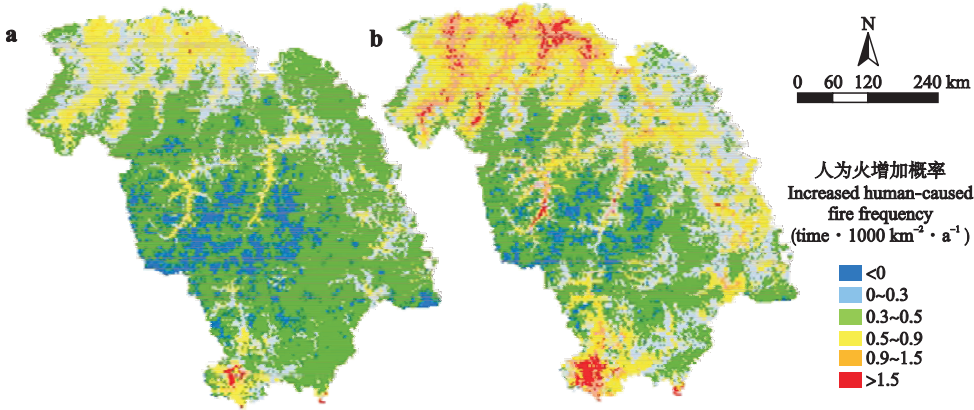


图 5 人为火增加的概率
Fig.5 Increased human-caused fire frequency.
a) RCP 2.6; b) RCP 8.5.

将气候变化背景下人为火的发生概率与当前气候背景下的人为火发生概率相减,得到 2050 年人为火发生概率的增减情况.在 RCP 2.6 情景下,概率增加范围在 $-0.22 \sim 3.11$ 次 $\cdot 1000\text{ km}^{-2}$.增长较快的地区主要集中在南部林场,其次为大兴安岭北部沿道路附近地区;但在海拔较高的中部地区,人为火的发生概率出现减少情况,减少的面积占整个研究区面积的 10.1%,平均减少概率为 $0.023 \cdot 1000\text{ km}^{-2}$ (图 5).在 RCP 8.5 情景下,概率增加范围在 $-0.028 \sim 5.22$ 次 $\cdot 1000\text{ km}^{-2}$.与 RCP 2.6 情景下的分布模式相比,南部林场和北部沿道路主干附近地区的林火有进一步增大趋势.出现负增长的地区明显减少,占总面积的 0.1%.

未来气候下,人为火的发生概率在整体上呈现增长趋势.但在不同气候情景下,增加的强度有所不同.在低排放浓度 RCP 2.6 情景下,人为火发生概率的增长相对较慢,到 2050 年人为火的概率增长了 72.2%;在高排放浓度 RCP 8.5 情景下,人为火发生

概率增长较快,增长率为 166.7%.

3 讨 论

与当前气候背景相比,2050 年人为火的发生概率整体呈现增长趋势.在 RCP 8.5 情景下,人为火发生概率增加了 166.7%,RCP 2.6 情景下,增长率为 72.2%.说明气候变暖幅度越大,林火发生增加的概率也越大.未来气候情景下,人为火发生概率与气温增加有较大的相关关系,气温增幅较大的地区往往是林火发生概率较高的地区.南部地区由于气温偏高,将持续保持较高的人为火发生概率.北部地区和沿主要交通线附近,由于气温增幅大,人类活动加强,将成为新的人为火高发区.这表明在气候变暖下,人为活动因子对林火发生贡献显著,该结论与 Yang 等^[8]对美国塔霍湖盆地野火发生概率的影响因素研究相似.

从人为火发生的变化图中可以看到,并非所有地区的人为火发生概率都呈增长趋势.海拔较高的

中部地区,人为火的发生概率有所下降(图 5)。通过对比大兴安岭地区当前和未来气候情景下的数据发现,高海拔地区气温增加幅度相较其他地区慢,降水量却高于同纬度其他地区,因此可能人为火发生频率偏低^[40]。此外,海拔高的地区人为活动因子受限,导致该地区人为火的发生概率有可能出现负增长。

从模型模拟的结果看,气候因子对人为火的发生具有明显控制作用。Wu 等^[20]对大兴安岭地区林火发生因子的相对重要性研究也表明,气候因子对林火发生起决定性作用。此外,植被类型、海拔和人为活动因子对人为火的发生也具有重要影响。地形因子中,对人为火起主要作用的因子是海拔,500~700 m 海拔地区的人为火发生概率大于其他地区。有研究表明,地形对林火发生有一定影响,尤其是在较为干旱的阳坡、山脊和海拔较低地区,林火发生较为频繁^[21]。但在本研究中,坡度和坡向对人为火发生的影响并不显著,主要原因在于地形因子对林火的影响也取决于不同坡向气候条件的差异,而在区域尺度下地形的影响作用有限^[21]。距离道路和居民点距离对人为火的发生有显著影响,在距离道路 5.5 km、距离居民点 25 km 处,人为火发生概率较高,道路附近人为火发生概率明显偏高。该结果与刘志华等^[22]和郭福涛等^[24]对大兴安岭部分林业局林火发生影响因素的研究结果类似,说明人为基础设施的分布对人为火的发生有重要影响。

本文综合考虑了气候因子和其他局部因子的影响,减少了未来气候下大兴安岭人为火预测的不确定性,但仍然存在一定局限性。除气候因子外,植被类型和人为活动因子在长时间尺度上具有一定变化。受数据条件限制,植被和人为活动数据采用的都是同一个时期的数据。为获得未来气候下更精确的林火预测、减少林火预测的不确定性,需要结合植被、人为活动因子的动态研究^[3]。

参考文献

- [1] Jia B-R (贾丙瑞), Zhou G-S (周广胜). Advance in the studies of the response of boreal forest to climate change. *Advanced in Earth Science* (地球科学进展), 2009, **24**(6): 668-674 (in Chinese)
- [2] Flannigan M, Stocks B, Turetsky M, et al. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, 2009, **15**: 549-560
- [3] Balshi M, McGuire A, Duffy P, et al. Assessing the response of area burned to changing climate in western boreal North America using a multivariate adaptive regression splines (MARS) approach. *Global Change Biology*, 2009, **15**: 1-23
- [4] Tian X-R (田晓瑞), Dai X (代 玄), Wang M-Y (王明玉), et al. Forest fire risk assessment for China under different climate scenarios. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(3): 769-776 (in Chinese)
- [5] Liu ZH, Yang J, Chang Y, et al. Spatial patterns and drivers of fire occurrence and its future trend under climate change in a boreal forest of Northeast China. *Global Change Biology*, 2012, **18**: 2041-2056
- [6] Flannigan M, Logan K, Amiro B, et al. Future area burned in Canada. *Climatic Change*, 2005, **72**: 1-16
- [7] Wotton B, Nock C, Flannigan M. Forest fire occurrence and climate change in Canada. *International Journal of Wildland Fire*, 2010, **19**: 253-271
- [8] Yang J, Weisberg J, Dilts TE, et al. Predicting wildfire occurrence distribution with spatial point process models and its uncertainty assessment: A case study in the Lake Tahoe Basin, USA. *International Journal of Wildfire*, 2015, **24**: 380-390
- [9] Wang M-Y (王明玉). Characteristic of Forest Fire Response and Trend under the Scenarios of Climate Change in China. PhD Thesis. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009 (in Chinese)
- [10] Sun L (孙 龙), Wang Q-X (王千雪), Wei S-J (魏书精), et al. Response characteristics and prospect of forest fire disasters in the context of climate change in China. *Journal of Catastrophology* (灾害学), 2014, **29**(1): 12-17 (in Chinese)
- [11] Parisien A, Moritz A. Environmental controls on the distribution of wildfire at multiple spatial scales. *Ecological Monographs*, 2009, **79**: 127-154
- [12] Gralewicz NJ, Nelson TA, Wulder MA. Factors influencing national scale wildfire susceptibility in Canada. *Forest Ecology and Management*, 2012, **375**: 20-29
- [13] Todd H, Volker R, Susan S, et al. Human and biophysical influences on fire occurrence in the United States. *Ecological Applications*, 2013, **23**: 565-582
- [14] Liu ZH, Wimberly C. Climatic and landscape influences on fire regimes from 1984 to 2010 in the Western United States. *PLoS One*, 2015, **10**(10): e140839
- [15] Zhang W (张伟), Wang F (王 峰), Guo Y-F (郭艳芬), et al. Weather model level of forest fire danger based on Logistic regression. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2013, **41**(12): 121-122 (in Chinese)
- [16] Tymstra C, Flannigan M, Armitage O, et al. Impact of climate change on area burned in Alberta's boreal forest. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, **16**: 153-160
- [17] Erickson MJ, Charney JJ, Colle BA, et al. Development of a fire weather index using meteorological observations within the Northeast United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2016, **55**: 389-402
- [18] Liang H-L (梁惠玲), Lin Y-R (林玉蕊), Yang G (杨 光), et al. Application of random forest algorithm

- on the forest fire prediction in Tahe Area based on meteorological factors. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2016, **61**(1): 89–99 (in Chinese)
- [19] Yang G (杨光), Shu L-F (舒立福), Di X-Y (邸雪颖). Prediction on the changes of forest fire danger rating in Great Xing'an Mountain region of Northeast China in the 21st century under effects of climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(12): 3236–3242 (in Chinese)
- [20] Wu ZW, He HS, Yang J, et al. Relative effects of climatic and local factors on fire occurrence in boreal forest landscapes of northeastern China. *Science of the Total Environment*, 2014, **493**: 472–480
- [21] William T, Flatley W, Lafon D, et al. Climatic and topography controls on patterns of fire in the southern and central Appalachian Mountains, USA. *Landscape Ecology*, 2011, **26**: 195–209
- [22] Liu Z-H (刘志华), Yang J (杨健), He H-S (贺红士), et al. Spatial point analysis of occurrence and its influence factor in Huzhong forest area of the Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(6): 1669–1677 (in Chinese)
- [23] Guo FT, Innes JL, Wang GY, et al. Historic distribution and driving factors of human-caused fires in the Chinese boreal forest between 1972 and 2005. *Journal of Plant Ecology*, 2015, **8**: 480–490
- [24] Guo F-T (郭福涛), Su Z-W (苏漳文), Wang G-Y (王光玉), et al. Prediction model of human-caused fire occurrence in the boreal forest of northern China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(7): 2009–2106 (in Chinese)
- [25] Xu H-C (徐化成). The Da Xing'an Mountain Forest in China. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- [26] Zhou Y-L (周以良). Vegetation in Northeast China. Beijing: Science Press, 1991 (in Chinese)
- [27] Zhao F-J (赵凤君). Study on the Impacts of Climate Change on Forest Fires in Inner Mongolia Daxing'anling Forest Region. PhD Thesis. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2007 (in Chinese)
- [28] Scholze M, Knorr W, Arnell NW, et al. A climate-change risk analysis for world ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, **103**: 13116–13120
- [29] Moss R, Edmonds J, Hibbard K, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 2009, **463**: 747–756
- [30] Van Vuuren P, Edmonds A, Kainuma M, et al. A special issue on the RCPs. *Climatic Change*, 2011, **109**: 1–4
- [31] Van Vuuren P, Edmonds A, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 2011, **109**: 5–31
- [32] Wang S-W (王绍武), Luo Y (罗勇), Zhao Z-C (赵宗慈), et al. New generation of scenarios of greenhouse gas emission. *Advances in Climate Change Research* (气候变化研究进展), 2012, **8**(4): 305–307 (in Chinese)
- [33] Baddeley A, Turner R, Moller J, et al. Residual analysis for spatial point processes. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 2005, **67**: 617–651
- [34] Yang J, He HS, Shifley S, et al. Spatial patterns of modern period human-caused fire occurrence in the Missouri Ozark Highlands. *Forest Science*, 2007, **53**: 1–15
- [35] Baddeley A, Turner R. Spatstat: An R package for analyzing spatial point patterns. *Journal of Statistical Software*, 2005, **12**: 1–42
- [36] Baddeley A, Turner R. Practical maximum pseudo likelihood for spatial point patterns. *Australian and New Zealand Journal of Statistics*, 2000, **42**: 283–322
- [37] Sun L (孙龙), Shang Z-C (尚喆超), Hu H-Q (胡海清). Application of a Poisson regression model and a negative binomial regression model in the forest fire forecasting. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2012, **57**(48): 126–129 (in Chinese)
- [38] Johnson C, Nielsen S, Merrill E, et al. Resource selection functions based on use-availability data: Theoretical motivation and evaluation methods. *Journal of Wildlife Management*, 2006, **70**: 347–357
- [39] Flannigan M, Krawchuk M, William G, et al. Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, **18**: 483–507
- [40] Chen L-G (陈立光). Impact of Climate Change on Fire Regime in Heilongjiang Province. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013 (in Chinese)

作者简介 李顺,女,1991年生,硕士研究生.主要从事林火干扰生态学研究. E-mail: lishun1991@foxmail.com

责任编辑 杨弘

李顺,吴志伟,梁宇,等.大兴安岭人为火发生影响因素及气候变化下的趋势.应用生态学报,2017,28(1):210–218

Li S, Wu Z-W, Liang Y, et al. Drivers of human-caused fire occurrence and its variation trend under climate change in the Great Xing'an Mountains, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(1): 210–218 (in Chinese)