

DOI: 10.5846/stxb201901030022

顾先丽, 吴志伟, 张宇婧, 闫赛佳, 付婧婧, 杜林翰. 气候变化背景下江西省林火空间预测. 生态学报, 2020, 40(2): 667-677.

Gu X L, Wu Z W, Zhang Y J, Yan S J, Fu J J, Du L H. Prediction research of the forest fire in Jiangxi province in the background of climate change. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 667-677.

气候变化背景下江西省林火空间预测

顾先丽^{1,2}, 吴志伟^{1,*}, 张宇婧^{1,2}, 闫赛佳^{1,2}, 付婧婧^{1,2}, 杜林翰^{1,2}

1 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022

2 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022

摘要: 林火是森林生态系统中重要的干扰因子之一, 深刻地影响森林景观结构和功能。在全球气候化背景下, 揭示气候变化对林火空间分布格局的影响, 可为林火管理和防火资源分配提供科学指导。因此, 基于江西省 2001—2015 年 MODIS 火影像数据 (MCD14ML) 和年均气温、年均降水量、植被、地形、人口密度、距道路距离、距居民点距离 7 个因子数据, 利用增强回归树模型: (1) 分析林火发生影响因子的相对重要性及其边际效应; (2) 将 GFDL-CM3 和 GISS-E2-R 气候变化模式中的年均气温和年均降水量作为未来的气象数据, 在 3 个温室气体排放量情景 (RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5) 下, 对 2050 年 (2041—2060 的平均值) 和 2070 年 (2061—2080 的平均值) 江西省林火分布进行预测, 生成林火发生概率图。并采用受试者工作特征 (ROC 曲线) 和混淆矩阵评估模型预测的精度。研究结果表明: (1) 年均气温和海拔与江西省林火发生的相关性较强, 年均降水量、居民点距离、人口密度、道路距离与林火发生的相关性较弱, 但是与林火发生密切相关的如降水、风速等也应重点关注; (2) 训练数据 (70%) 和验证数据 (30%) 的 AUC 值 (ROC 曲线下面积值) 均为 0.736, 混淆矩阵对火点预测的正确率为 67.8%, 表明模型能够较好地预测研究区林火的发生; (3) 在 RCP8.5 排放情景中林火发生的增幅最明显, 其增幅较大的区域由赣南向赣北移动; (4) 未来 2050 年和 2070 年林火发生与当前气候 (2001—2015 年) 下相比, 赣州市、鹰潭市的增幅较为明显, 其他区域不明显。江西省各林业管理部门要加强林火高发区及潜在发生区的森林监测和管理, 加大防火宣传力度, 提升民众的森林防火意识。

关键词: 林火; 气候变化; 相对重要性; 增强回归树模型; 空间预测

Prediction research of the forest fire in Jiangxi province in the background of climate change

GU Xianli^{1,2}, WU Zhiwei^{1,*}, ZHANG Yujing^{1,2}, YAN Saijia^{1,2}, FU Jingjing^{1,2}, DU Linhan^{1,2}

1 Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

2 School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

Abstract: Forest fire is one of the most important disturbances in forest ecosystems, which significantly alters forest landscape structure and function worldwide. The spatial patterns of forest fire occurrence are closely associated with climate change. Researches have shown that fire frequency and burned area could substantially increase with prolonged growing seasons in warming climate scenarios. Revealing influences of climate change on the spatial distribution patterns of forest fires can provide scientific guidance for formulating feasible forest and fire management strategies. Therefore, based on the MODIS fire image (MCD14ML) data and 7 climatic (annual average temperature and precipitation), vegetation (forest type), topography (elevation) and human activities (population density and distances to the nearest roads and settlements) data from 2001 to 2005 in Jiangxi province, this study used the Boosted Regression Tree (BRT) model to: (1) quantify relationships, i.e., relative importance, marginal and incorporative effects, between fire occurrence and the explanatory variables; (2) project and generate fire occurrence maps under current (2001—2015) and two GCMs' (GFDL-CM3 and

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31571462, 41861041); 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ160275)

收稿日期: 2019-01-03; **网络出版日期:** 2019-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuzhiwei@jxnu.edu.cn

GISS-E2-R) future climate RCPs scenarios (RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5) in 2050 and 2070. We evaluated the performance of the BRT model using the area under curve (AUC) of a receiver operating characteristic curve (ROC). An alternative method to evaluate models was achieved by comparing the observed with the predicted fire occurrence with confusion matrixes method. The results showed that: (1) the annual temperature and altitude strongly correlated with the occurrence of forest fire in Jiangxi province, and the annual precipitation, distance to the residential areas, population density, and distance to roads had weaker correlations with the occurrence of forest fires; (2) the AUC values both of the training data (70%) and verification data (30%) were 0.736. The accuracy of the confusion matrix in predicting fire occurrence was 67.8%. The model evaluation results indicated that the BRT model fitted well and could be used to predict forest fire occurrence in future climate scenarios in the study area; (3) the increasing in forest fire occurrence was the highest under the future climate scenario of RCP8.5; (4) fires would increase significantly in the cities of Ganzhou and Yingtan under future climate scenarios in both 2050 and 2070 compared with current climate scenarios (2001—2005). Forest and fire managers in Jiangxi province should strengthen their monitoring and management of forests in areas with high occurrence of forest fires based on the results from this study. And then they should strengthen public's awareness of fire prevention especially in southern Jiangxi province.

Key Words: forest fire; climate change; relative importance; boosted regression tree model; spatial prediction

林火是森林生态系统中重要的干扰因子之一^[1],严重影响森林景观结构和功能^[2-7]。研究表明,在全球气候变暖背景下随着植被生长季的延长和人类活动的加剧,林火发生的频率和面积将显著增加。如 Flannigan 等^[8]基于大气环流模型(General Circulation Models, GCMs)对加拿大林火进行预测,结果表明到 2100 年加拿大大部分地区呈火险增加趋势,火烧面积将增加 74%—118%。火烧频率和面积的增加,将更加显著地影响森林景观结构和功能。因此,预测气候变化背景下林火发生的趋势深受国内外学者的关注^[9-11]。

我国学者对林火预测也开展了研究。例如,郭海峰等^[12]基于 2005—2015 年气象数据预测了湖南省森林火险等级。梁慧玲等^[13]基于随机森林算法对福建省林火进行了预测。常禹等^[14]以呼中林区为例,应用证据权重法估测了林火发生的可能性。从国内的研究文献来看,林火预测更多是直接考虑其与气候因子之间的统计关系,而对气候、植被、地形和人类活动等因子的共同作用研究有待加强。而且,越来越多的研究表明气候虽然是引起林火发生的主导因素,但人类活动等因子也起着重要的作用^[15-16]。相比人口稀少的北方针叶林区,这在人口稠密的南方常绿阔叶林区更为明显^[17]。因此,综合考虑气候、植被、地形、人类活动等因子的作用有助于提升林火预测的精度。

而且,我国林火预测研究多集中在大兴安岭等北方针叶林区^[18],南方阔叶林区的研究相对较少。在北方寒温带针叶林区(如大兴安岭地区),森林植被空间连续性高(如集中成片分布)、人口密度低,林火多为面积较大的雷击火;在南方亚热带常绿阔叶林区,由于森林分布较散、林区人口密度高、道路网络发达,多为面积较小的人为火^[19]。虽然亚热带常绿阔叶林区火烧面积通常较小^[20],但是林火发生频率高,且大多分布在人口密集的区域,对社会经济(农田、房屋烧毁)以及空气质量等的影响较大。因此,开展亚热带常绿阔叶林区林火预测研究,对我国南方林区林火的预防与管理具有重要的意义。

江西省是我国亚热带常绿阔叶林典型区。1950—2010 年江西省共发生林火 41846 次,面积约 98 万 hm^2 ,分别位列全国第 8、9 位^[21]。江西是首批被列入国家生态文明试验区的省份之一,要打造美丽中国“江西样板”,到 2020 年实现全省森林覆盖率稳定在 63%。增强林火管理,减少火灾导致的森林损失非常重要。为此,本研究以江西省为例,(1)利用增强回归树模型建立林火与气候、植被、地形、人类活动等因子间的关系;(2)分析各因子的相对贡献率及其边际效应;(3)并利用未来气候情景数据预测林火发生的时空趋势。为制定切实可行的未来林火管理策略和资源分配方案提供科学指导。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

江西省位于长江中下游南岸($24^{\circ}07'—29^{\circ}09'N$, $114^{\circ}02'—117^{\circ}97'E$)。境内东、西、南三面环山,北部较为

平坦,中部以丘陵为主。属中亚热带温暖湿润气候,年均温为 16.4—19.8℃,年均降水量为 1340—1930 mm。据 2017 年中国统计年鉴数据显示,到 2016 年底,江西省森林面积共 1001.81 万 hm^2 ,森林覆盖率为 60.01%,居全国第二。主要植被类型有针叶林、常绿阔叶林、针阔混交林、常绿落叶阔叶混交林、竹林、矮林和灌丛等。设区市森林覆盖率由大到小依次是赣州市(76.24%)、吉安市(67.61%)、萍乡市(66.02%)、景德镇市(65.07%)、抚州市(64.54%)、上饶市(61.67%)、鹰潭市(57.38%)、宜春市(56.97%)、新余市(56.49%)、九江市(54.92%)、南昌市(21.96%)。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 林火数据

时空明晰的森林火灾统计数据通常不易获取、数据的完整性有限。而利用遥感观测获得的火灾影像(如 MODIS 火影像),具有时空覆盖范围广且可全球免费共享的优势。中等分辨率成像光谱仪(MODIS)火影像数据被认为是用于表征大空间尺度火情的可靠数据源^[22-23],其具有饱和温度较高、影像波段多、时间分辨率高等优势^[24]。因此,本文的江西省 2001—2015 年林火数据采用 MODIS 动态火影像数据—MCD14ML。该影像是 MODIS 的 L3 级,空间分辨率为 1 km 的全球每月火灾影像,记录了火烧时间、经纬度坐标、可信度等信息。可信度分为 3 个等级:低 0—30%,中 30%—80%,高 80%—100%。

为最大限度地减少火灾探测中的误报等不确定性,本研究只选取了可信度>80%的火。采用 ArcGIS 对预先处理的影像的像元进行二值化处理(0 代表未发生火灾,1 代表发生火灾),与江西省行政区图和植被覆盖图叠加,提取不同区市和不同植被类型上的火点。

1.2.2 因子数据

地形:海拔、坡度和坡向是与火灾发生有关的 3 个主要地形因子^[25]。鉴于本研究分析的是 1 km 空间分辨率下的火灾,所以仅选用高程作为地形因子。从美国国家海洋和大气管理局(NOAA, <https://www.ngdc.noaa.gov/>)下载得到数字高程模型(DEM)数据。

植被类型:从中国寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)下载得到 2001 年中国植被覆盖图(空间分辨率为 1 km,共 17 个分类系统)。本文研究的对象是森林火点,因此提取了 5 个森林类型:常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林。

人类活动:距离道路距离、距居民点距离和人口密度是影响林火发生的显著因子^[26]。从美国哥伦比亚大学地球研究所国际地球科学信息网络中心(<http://sedac.ciesin.columbia.edu>)下载了 1980 年至 2010 年期间的全球道路数据集(gROADSv1)。从全球农村城市测绘项目(GRUMPv1)中获得 2000 年代的居民点和人口密度数据。采用 ArcGIS 计算每个像元到最近道路和居民点的欧几里德距离,得到道路距离和居民点距离的图层。

气象数据:温度和降水是评估林火发生的主要因子。从我国旱区寒区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)获得了 2001—2015 年江西省气温和降水数据。采用 ArcGIS 计算 15 年的年均气温和降水量,并将其采样为空间分辨率为 1 km 的网格,作为当前气候背景下的气象数据。从 WorldClim 网站(<http://worldclim.org/>)获得了未来年均气温和降水的 GCMs 气候数据。本研究选择 GFDL-CM3(美国地球物理流体动力学实验室)和 GISS-E2-R(NASA 戈达德空间研究所)2 种气候变化模式代表未来气候状况。每种模式选择了 3 个浓度的温室气体排放量情景(RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5)。以 2050 年(2041—2060 的平均值)和 2070 年(2061—2080 的平均值)为预测年。

1.3 研究方法

1.3.1 增强回归树模型构建

本研究利用增强回归树(Boosted Regression Tree, BRT)模型建立林火与气候、植被、地形、和人类活动等因子之间的关系;预测未来(2050 年和 2070 年)林火变化的趋势。增强回归树模型是一种用于拟合统计模型的集成方法。该方法结合了回归树算法和 Boosting 方法的优点^[27],能适应复杂的非线性关系,并自动处理因子变量之间的交互效应,可以提高模型的稳定性和精度。BRT 模型采用的是机器分类回归算法,与其他常

用的机器学习方法(如 Random Forest, 随机森林)算法类似。目前 BRT 方法主要被应用到林火发生^[28]、火后森林更新等^[29]方面。

将 2001—2015 年共 5702 个 1 km 空间像元是否发生林火作为因变量(0 代表未发生火灾,1 代表发生火灾),以因子数据为自变量。参考 Elith 等^[30]人开发的 R 语言脚本,本研究使用 R 语言中的“gbm”软件包构建 BRT 模型。采用 70% 的样本数据构建模型,30% 的数据进行模型验证。

1.3.2 模型校验

使用受试者工作特征 ROC (Receiver Operating Characteristic) 评估 BRT 模型的拟合效果。通过绘制概率阈值的灵敏度与特异性获得 ROC 曲线^[31],计算出曲线下面积 (AUC) 的值。AUC 取值范围为 0—1, 0.5 表示低精度, 0.7—0.9 表示合理精度, 高于 0.9 表示特别高精度^[32]。

同时采用混淆矩阵评估模型预测的准确性。构建观察值与预测值的 2×2 个分类矩阵表,利用约登指数 (敏感性+特异性-1) 确定林火发生概率的最佳界值,从而将概率值转换为 0—1 二分数数据^[33]。概率值大于等于最佳界值,则将概率编码为“1”并将其视为林火发生,否则,概率编码为“0”视为没有林火发生。本研究应用 R 软件中的“ROCR”包计算 AUC 和最佳界值。

2 结果与分析

2.1 模型验证结果

最终 BRT 模型经过 1600 次迭代运算达到最优(表 1)。训练数据 (70%) 和验证数据 (30%) 的 AUC 值都为 0.736 (图 1),最佳界值为 0.0618。训练数据预测的总体正确率为 70.1% (表 2)。混淆矩阵分析得出火点、非火点预测的正确率都为 67.8% (表 2)。这两种验证结果均表明模型有合理的拟合效果,能够很好地预测研究区林火的发生。

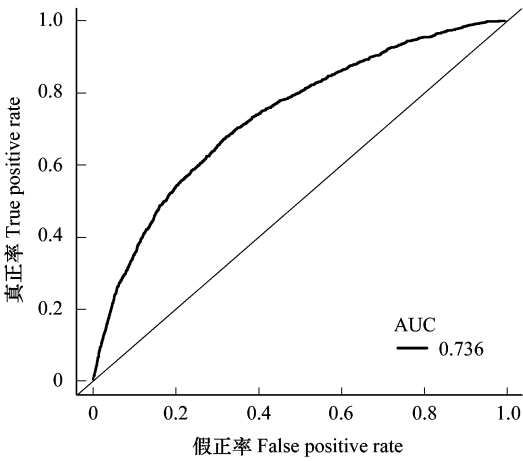


图 1 BRT 模型的 ROC 曲线
Fig.1 ROC curve of BRT model

表 1 BRT 模型的关键拟合参数
Table 1 Key fitting parameters of final BRT model

参数 Parameters	值 Value	参数 Parameters	值 Value
Family	Bernoulli	袋子分数 Bag fraction	0.5
学习率 Learning rate	0.05	树数 Number of trees	1600
树的复杂性 Tree complexity	5		

表 2 基于混淆矩阵的训练和验证数据集的模型分类准确性评估结果
Table 2 Results of model classification accuracy assessment for training and validation datasets based on the confusion matrixes

	预测 Predicted							
	训练数据集 Training dataset				验证数据集 Validation dataset			
	火 Fire	0	1	正确率 Percentage correct	火 Fire	0	1	正确率 Percentage correct
观测值 Observed	0	32943	14726	69.1%	0	13803	6545	67.8%
	1	543	2787	83.7%	1	442	932	67.8%
总预测正确率 Overall Percentage				70.1%				67.8%

2.2 因子与林火的关系

林火发生的最大贡献因子为年均气温(贡献率为 21.19%),其余因子贡献率依次是海拔(20.14%)、年均降水量(16.23%)、居民点距离(15.56%)、人口密度(13.44%)、道路距离(10.54%)、林型(2.90%)(图 2)。

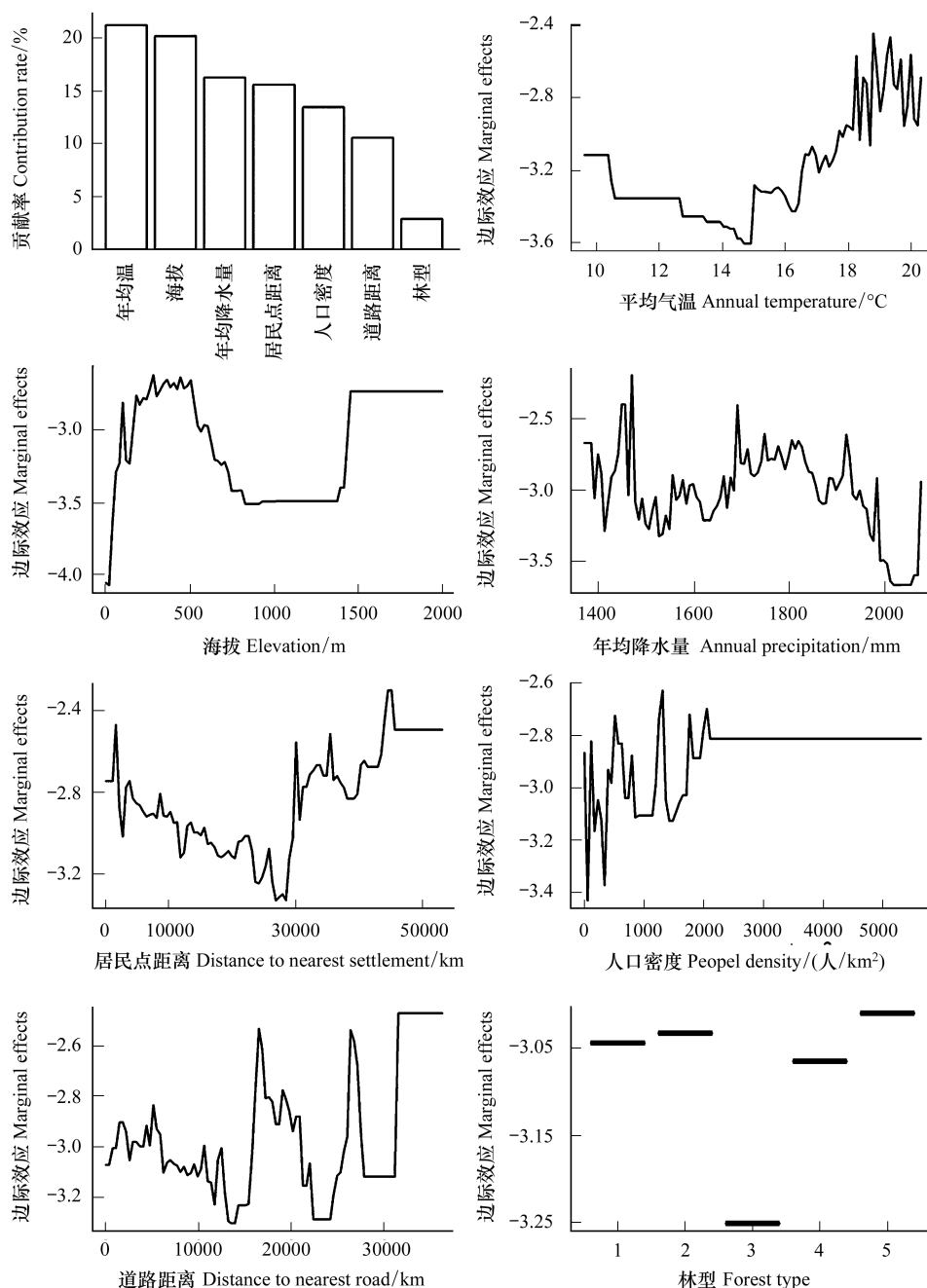


图 2 因子变量的相对重要性(%)和边际效应对火灾发生概率的影响

Fig.2 Relative importance (%) and marginal effects of explanatory variables on fire occurrence probability

1:常绿针叶林;2:常绿阔叶林;3:落叶针叶林;4:落叶阔叶林;5:混交林

年均温小于 15℃时林火较少发生,但在 15℃—21℃时林火增加趋势明显。林火随着年均降水量的增加总体上呈下降的趋势,尤其当降水量超过 2000 mm 时更为明显。海拔低于 500 m 时林火发生较多,超过 500 m 时则呈急剧下降的趋势。距离居民点 0—30 km 范围内,随着距离的增加林火呈现下降的趋势。人口密度

与林火在总体上具有较高的相关性。在人口密度为 0—2000 人/km²时,两者的相关性呈上升趋势,但当超过 2000 人/km²以上时影响较弱。距离道路 0—14 km 范围内,随着道路距离的增加林火呈下降趋势。混交林内林火发生概率最高。

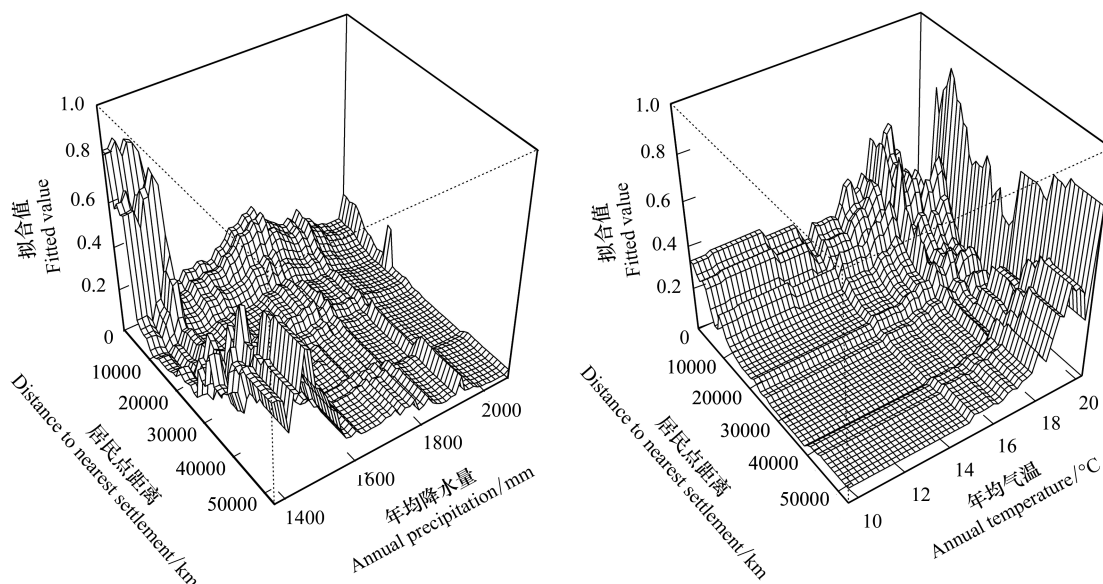


图3 解释变量的综合效应

Fig.3 Incorporative effects of explanatory variables

通过综合效应(图3)分析发现,居民点距离与年均降水量和年平均气温存在明显的交互关系。比如在居民点低于 10 km、年均降水量 1400—1600 mm、年均温度在 18—20℃ 之间的空间像元具有较高的林火发生概率。

2.3 当前气候条件下林火空间分布

2001—2015 年江西省共发生森林火点 5702 个(1-km 像元),呈南多北少分布格局。火点较多的是赣州市(38.9%)、吉安市(23.1%)、抚州市(13.2%);较少的是新余市(1.1%)、鹰潭市(1.0%)、南昌市(0.1%)。林火发生密度高的区域主要分布在赣州市西南部、吉安市西北部和抚州市南部。

BRT 模型预测的当前气候下林火发生的概率范围为 0.0007—0.9070。低概率(< 0.0618)的像元为 65.7%,中概率(0.0618—0.5)的像元为 34.1%,高概率(≥ 0.5)的像元为 0.2%。BRT 模型预测林火发生的空间分布(图 4b)与 MODIS 遥感观察到的基本一致(图 4a)。

2.4 未来气候变化下林火空间分布预测

未来气候情景下林火发生的概率值普遍高于当前气候情景。在 GFDL-CM3 中(图 5),排放浓度越高,林火发生概率越大;2050 年林火发生概率略高于 2070 年。在 GISS-E2-R 下,2050 年林火的发生概率随着浓度的增加,呈先减少后增加的趋势,到 2070 年则是随着浓度增加而增加。高林火发生区域由江西省南部扩展延伸到东北部,这在 GFDL-CM3 下较为显著。从两种模式的增幅变化情况来看,RCP8.5 排放情景中林火发生的增幅最明显,其增幅较大的区域由赣南向赣北移动。在 GFDL-CM3 中,2050 年和 2070 年林火增幅较大的区域主要集中在赣州市,而在 2070 年 RCP8.5 情景下,赣州市的增幅减小,东北部的上饶市、鹰潭市的增幅增大;在 GISS-E2-R 中(图 6),RCP2.6 情景下,增幅较大的主要位于九江市、抚州市和赣州市,RCP4.5、RCP8.5 情景下,增幅明显的区域由抚州市扩展到鹰潭市,2050 年和 2070 年变化不明显。

3 讨论

增强回归树模型预测的总体正确率为 67.8%,这与其他学者采用逻辑斯蒂回归模型预测的正确率相似。

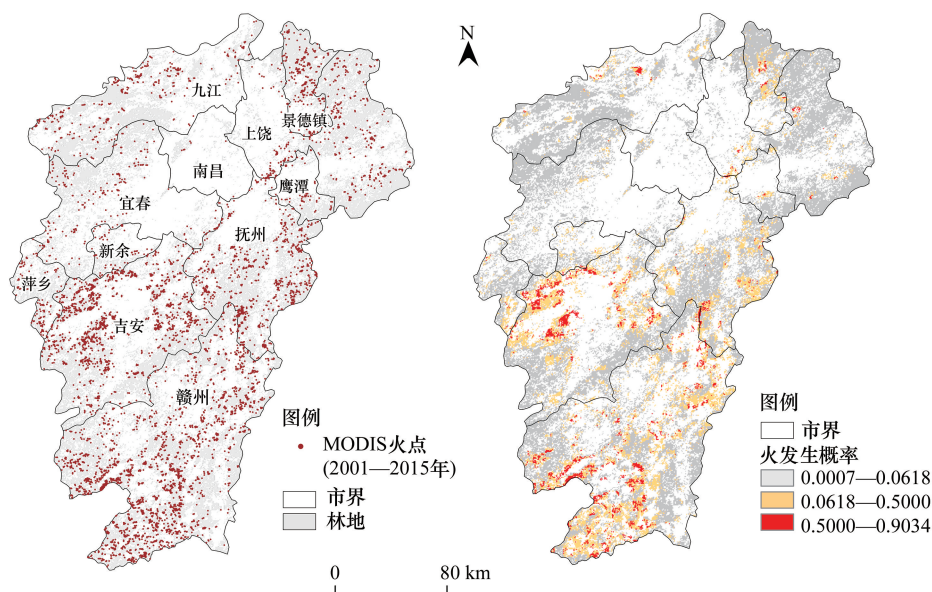


图 4 MODIS 观测到的火灾 (2001—2015 年) 和 BRT 模型预测当前气候下的火灾空间分布

Fig.4 Spatial distribution of MODIS observed active fires (2001—2015) and BRT model predicted fires under current climate

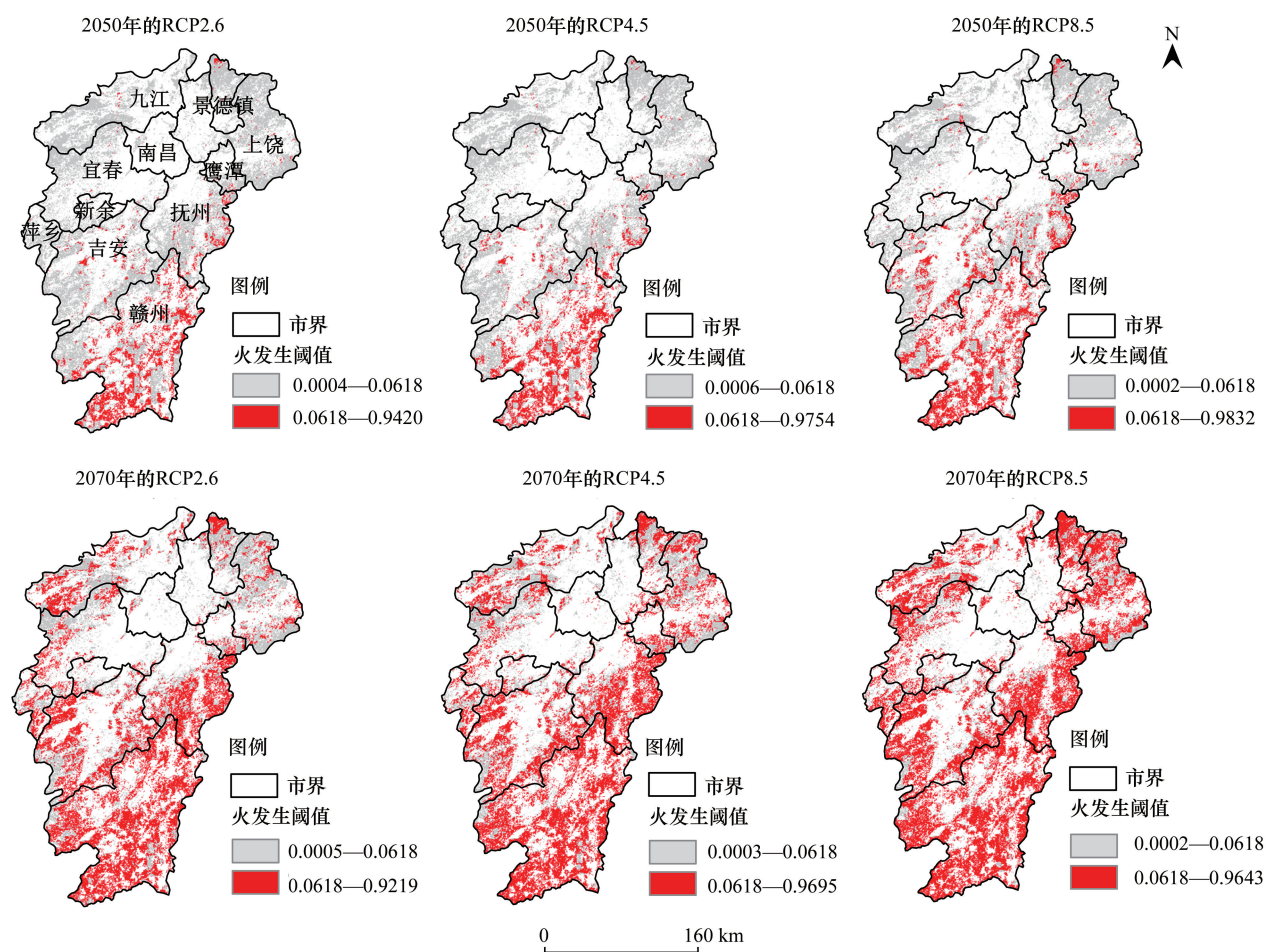


图 5 2050 年和 2070 年 GFDL-CM3 情景下预测的林火发生概率

Fig.5 Predicted fire occurrence probability under GFDL-CM3 scenarios in years 2050 and 2070

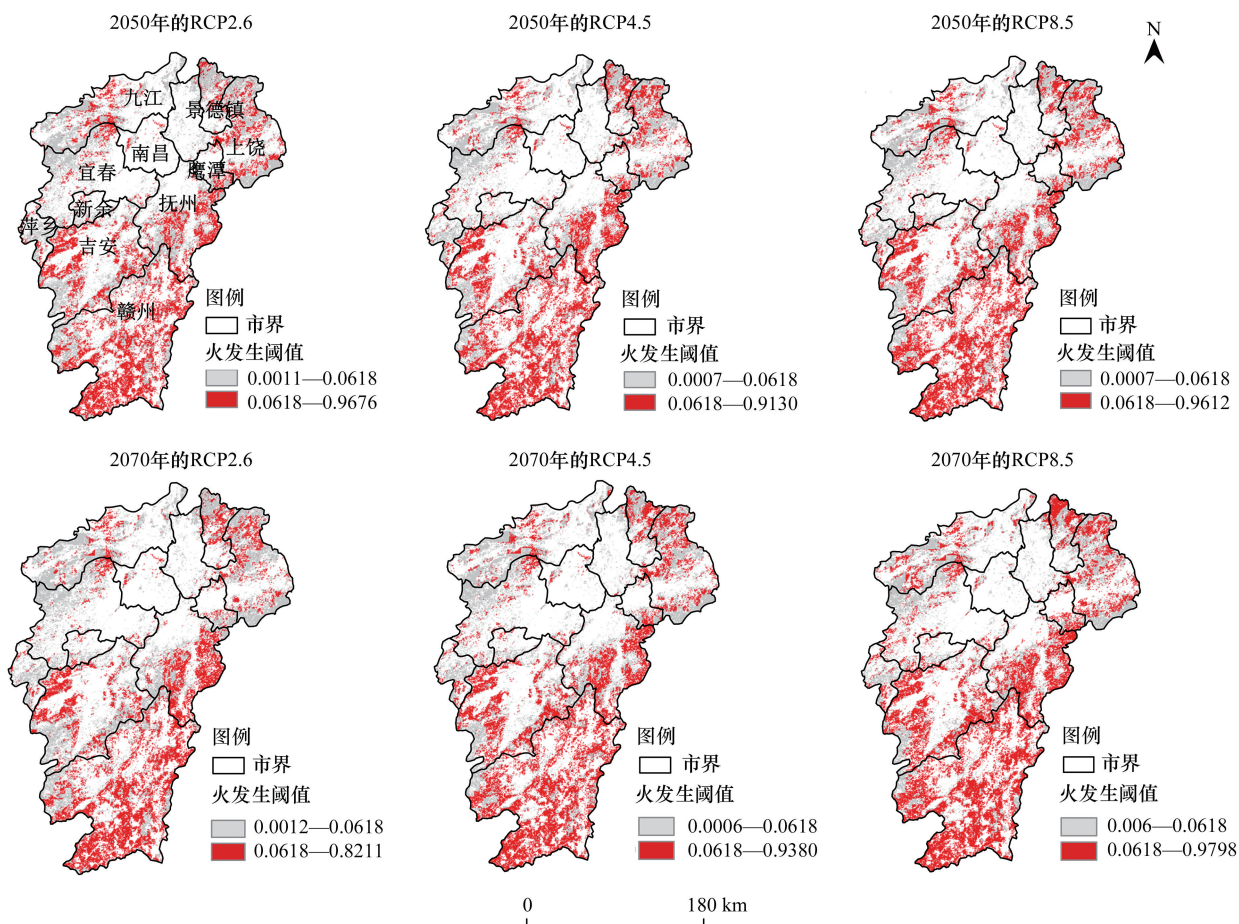


图6 2050年和2070年GISS-E2-R情景下预测的林火发生概率

Fig.6 Predicted fire occurrence probability under GISS-E2-R scenarios in years 2050 and 2070

例如, Bisquert M 等^[34]利用 MODIS 数据预测加利西亚森林火灾危险性, 精确度为 65%—70%。Natalie Arndt 等^[35]利用模型评估奥地利的森林火险, 验证数据集的正确率为 63.0%。杨夏捷等^[36]结合气候、植被、地形及人口和社会经济数据, 对福建南部地区主要森林城市进行森林火险等级划分, 通过验证得到模型的预测准确率为 74.0%。增强回归树模型被广泛应用于世界其他地区林火的研究中, 如新西兰^[37]、美国加利福尼亚州^[38]、西班牙等地^[39], 研究结果均表明模型能较好的识别林火发生的关键因子及预测林火的空间分布。

本研究表明, 年均气温和海拔与林火的发生表现出较强的相关性, 而年均降水量、居民点距离、人口密度、道路距离与林火发生的相关性较弱, 植被类型作用不明显。在年均温 15—19℃ 时, 林火呈上升趋势。这是由于温度的增加, 会直接影响林内的相对湿度, 加速可燃物内部水分的蒸发^[40], 从而提高了着火的可能性。海拔对火灾的发生有显著影响^[41], 在低海拔地区, 人类活动较集中, 易形成火源而引发火灾^[42]; 在高海拔地区则相反。年均降水量对林火的影响总体上呈下降趋势(负相关)^[43]。降水量越大, 植物含水量增多, 地表可燃物湿度大^[44], 不易引发林火。距居民点和道路距离越远, 受人为干预因素影响越小, 可达性弱, 森林火灾发现晚, 不能及时进行扑救, 越易造成较大的危害^[45-46]。人口密度与林火在总体上呈正相关。在林区人口密度越大, 林火发生的次数越多^[47-48]。总体来看, 在江西省这样的省域尺度上, 气候是控制林火发生的主导因素; 地形和人类活动因子的贡献率仅次于气候; 植被类型的贡献率最低。本研究采用的气候因子为温度和降水。风速、空气相对湿度等因子亦是影响林火发生时空格局的直接因子, 将风速等因子纳入林火预测是今后的重要研究方向。

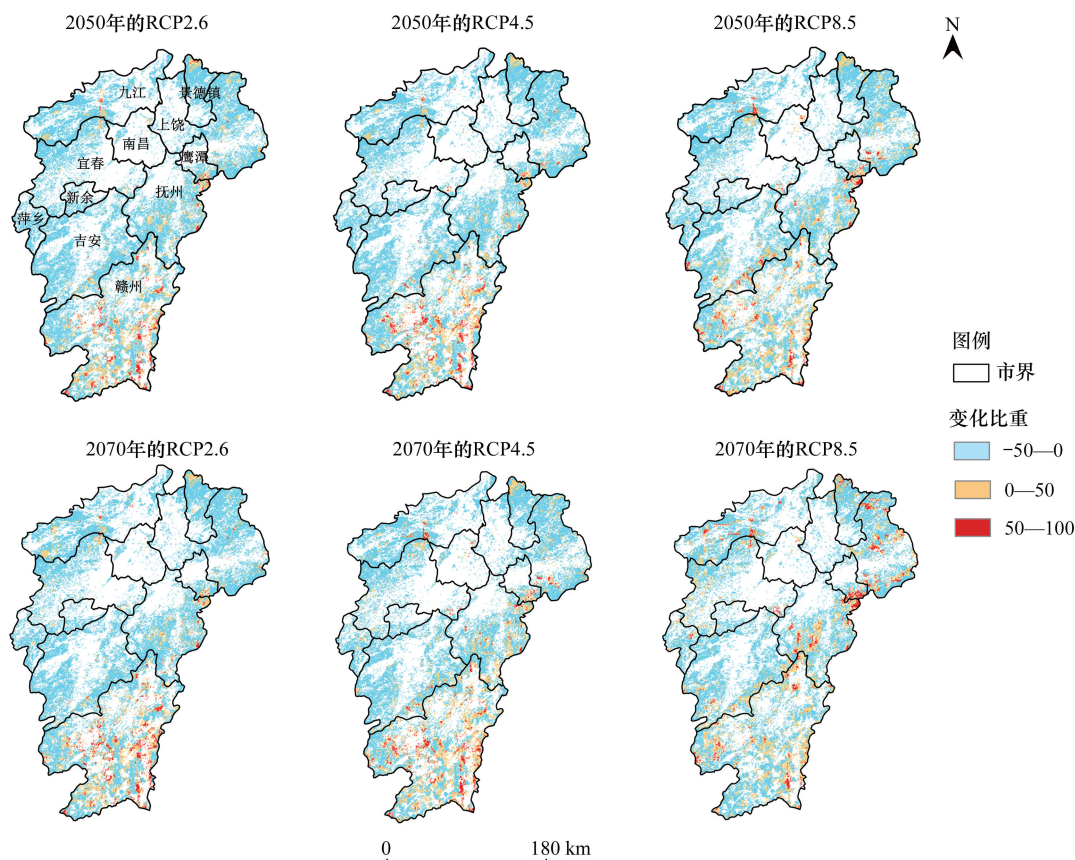


图7 2050年和2070年GFDL-CM3的未来和当前气候情景之间火灾发生概率的相对变化

Fig.7 Relative changes in fire occurrence probability between future and current climate scenarios for the GFDL-CM3 in years 2050 and 2070

气候因素是预测林火发生的重要因子^[49]。预测得出江西省各地区未来林火发生的变化状况各不相同。在江西南部地区,将继续保持较高的林火发生概率,北部地区随着气候的变化,林火发生增加趋势明显。在RCP8.5情景下,林火发生的概率值最高,且GFDL-CM3模型预测林火发生的概率值高于GISS-E2-R模型。这是由于RCP8.5是高浓度排放情景,升温趋势高于RCP2.6和RCP4.5情景。温度升高,可燃物蒸发量增大,会导致火险升高。这与其他相关研究一致^[50]。两种模式下的温度均升高,GISS-E2-R的降水量减少,GFDL-CM3的降水量增加。由于降水量的变化有季节差异,冬弱春夏强^[51],而江西省林火的发生多集中在冬季,所以降水的变化对林火的发生影响较小,主要依赖于温度的升高。

林火发生概率的空间预测对林火管理有重要的指导意义。本文研究结果表明在未来气候情景下,江西省南部森林火灾的发生概率较高。因此,林业管理部门应将防火重点放在该区域。首先,加强高火险区域监测^[52]及森林可燃物管理^[53],从源头上解决林火安全问题;其次,合理调控扑救资源配置,及时发现火情,快速灭火,降低林火的危害;最后,要加大对当地民众的防火宣传教育,树立森林资源可持续发展的理念。

4 结论

本研究根据江西省历史林火和环境因子数据,利用增强回归树模型,揭示了各因子对林火空间分布的影响,并结合未来气候情景,预测林火未来分布变化。结果表明,气象因子中的年均温对林火的贡献率最大,且在未来气候变化的影响下,高排放RCP8.5情景中林火发生增幅最为明显,其增幅较大的区域由赣南向赣北移动。

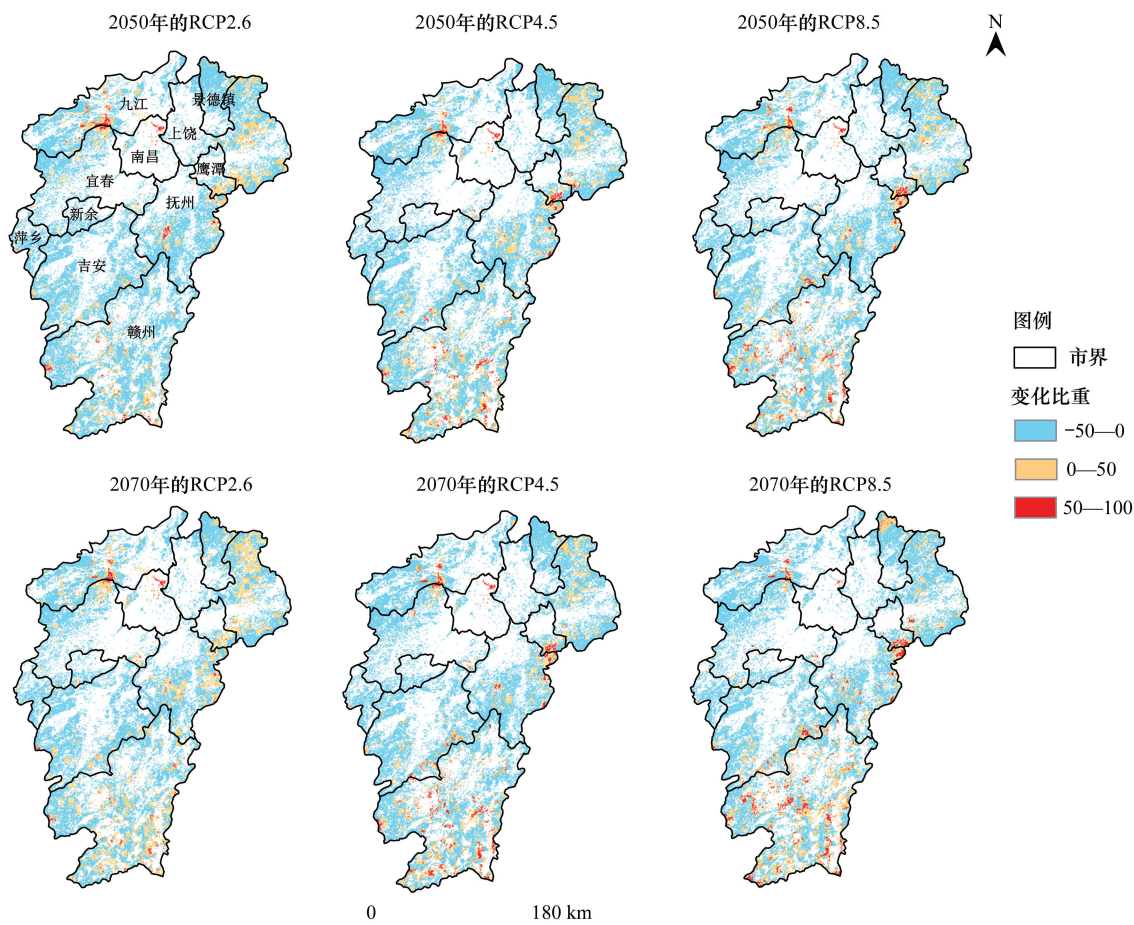


图8 2050年和2070年GISS-E2-R的未来和当前气候情景之间火灾发生的相对变化

Fig.8 Relative changes in fire occurrence between future and current climate scenarios for the GISS-E2-R in years 2050 and 2070

参考文献 (References):

- [1] 胡海清, 魏书精, 魏书威, 孙龙. 气候变暖背景下火干扰对森林生态系统碳循环的影响. 灾害学, 2012, 27(4): 37-41.
- [2] 杨达, 吴志伟, 梁宇, 贺红士. 火干扰对森林碳库影响的量化研究进展. 世界林业研究, 2015, 28(1): 37-42.
- [3] 宋利臣, 何平平, 崔晓阳. 重度林火对大兴安岭土壤生境因子的影响. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1809-1814.
- [4] 杨健, 孔健健, 刘波. 林火干扰对北方针叶林林下植被的影响. 植物生态学报, 2013, 37(5): 474-480.
- [5] 韩春兰, 邵帅, 王秋兵, 李甄, 孙仲秀, 毛伟伟. 兴安落叶松林火干扰后土壤有机碳含量变化. 生态学报, 2015, 35(9): 3023-3033.
- [6] 罗旭, 贺红士, 梁宇, 吴志伟, 黄超, 张庆龙. 林火干扰对大兴安岭主要林分类型地上生物量预测的影响模拟研究. 生态学报, 2016, 36(4): 1104-1114.
- [7] 孙龙燕, 李士美, 李伟, 郭绍霞. 林火对植物根围丛枝菌根真菌多样性的影响. 生态学报, 2016, 36(10): 2833-2841.
- [8] Flannigan M D, Logan K A, Amiro B D, Skinner W R, Stocks B J. Future area burned in Canada. Climatic Change, 2005, 72(1/2): 1-16.
- [9] Spracklen D V, Mickley L J, Logan J A, Hudman R C, Yevich R, Flannigan M D, Westerling A L. Impacts of climate change from 2000 to 2050 on wildfire activity and carbonaceous aerosol concentrations in the western United States. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114(D20): D20301.
- [10] Wotton B M, Nock C A, Flannigan M D. Forest fire occurrence and climate change in Canada. International Journal of Wildland Fire, 2010, 19(3): 253-271.
- [11] Flannigan M, Stocks B, Turetsky M, Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. Global Change Biology, 2009, 15(3): 549-560.
- [12] 郭海峰, 禹伟. 湖南省森林火险天气等级预测模型研究. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(12): 44-47, 67-67.
- [13] 梁慧玲, 郭福涛, 苏漳文, 王文辉, 林芳芳, 林玉蕊. 基于随机森林算法的福建省林火发生主要气象因子分析. 火灾科学, 2015, 24(4): 191-200.
- [14] 常禹, 冷文芳, 贺红士, 刘滨凡. 应用证据权重法估测林火发生的可能性——以呼中林区为例. 林业科学, 2010, 46(2): 103-109.

- [15] Ruffault J, Mouillot F. Contribution of human and biophysical factors to the spatial distribution of forest fire ignitions and large wildfires in a French Mediterranean region. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, 26(6): 498-508.
- [16] Narayanaraj G, Wimberly M C. Influences of forest roads on the spatial patterns of human- and lightning-caused wildfire ignitions. *Applied Geography*, 2012, 32(2): 878-888.
- [17] 田晓瑞, 赵凤君, 舒立福, 苗庆林, 王明玉. 1961—2010 年中国植被区的气候与林火动态变化. *应用生态学报*, 2014, 25(11): 3279-3286.
- [18] 李顺, 吴志伟, 梁宇, 贺红土. 北方森林林火发生驱动因子及其变化趋势研究进展. *世界林业研究*, 2017, 30(2): 41-45.
- [19] 苏漳文, 刘爱琴, 郭福涛, 梁慧玲, 王文辉, 林芳芳. 福建林火发生的驱动因子及空间格局分析. *自然灾害学报*, 2016, 25(2): 110-119.
- [20] 郭福涛, 苏漳文, 王光玉, 王强, 孙龙, 杨婷婷. 我国北方针叶林人为火发生的预测模型. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 2099-2106.
- [21] 苏立娟, 何友均, 陈绍志. 1950—2010 年中国森林火灾时空特征及风险分析. *林业科学*, 2015, 51(1): 88-96.
- [22] Chuvieco E, Giglio L, Justice C. Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from earth observation data. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1488-1502.
- [23] Hantson S, Padilla M, Corti D, Chuvieco E. Strengths and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131: 152-159.
- [24] 高懋芳, 覃志豪, 刘三超. MODIS 数据在林火监测中的应用研究. *国土资源遥感*, 2005, 17(2): 60-63.
- [25] Hawbaker T J, Radeloff V C, Stewart S I, Hammer R B, Keuler N S, Clayton M K. Human and biophysical influences on fire occurrence in the United States. *Ecological Applications*, 2013, 23(3): 565-582.
- [26] 刘志华, 杨健, 贺红土, 常禹. 黑龙江大兴安岭呼中林区火烧点格局分析及影响因素. *生态学报*, 2011, 31(6): 1669-1677.
- [27] 尹才, 刘森, 孙凤云, 李春林, 象伟宁. 基于增强回归树的流域非点源污染影响因子分析. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 911-919.
- [28] Argañaraz J P, Gaviera Pizarro G, Zak M, Landi M A, Bellis L M. Human and biophysical drivers of fires in Semiarid Chaco mountains of Central Argentina. *Science of the Total Environment*, 2015, 520: 1-12.
- [29] 蔡文华, 杨健, 刘志华, 胡远满, 柳生吉, 荆国志, 赵增福. 黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子. *生态学报*, 2012, 32(11): 3303-3312.
- [30] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802-813.
- [31] 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.
- [32] Guo F T, Zhang L J, Jin S, Tigabu M, Su Z W, Wang W H. Modeling anthropogenic fire occurrence in the boreal forest of China using logistic regression and random forests. *Forests*, 2016, 7(11): 250.
- [33] Catry F X, Rego F C, Bação F L, Moreira F. Modeling and mapping wildfire ignition risk in Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18(8): 921-931.
- [34] Bisquert M, Caselles E, Sánchez J M, Caselles V. Application of artificial neural networks and logistic regression to the prediction of forest fire danger in Galicia using MODIS data. *International Journal of Wildland Fire*, 2012, 21(8): 1025-1029.
- [35] Arndt N, Vacik H, Koch V, Arpacı A, Gossow H. Modeling human-caused forest fire ignition for assessing forest fire danger in Austria. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 2013, 6(5): 315-325.
- [36] 杨夏捷, 苏漳文, 田超, 靳全峰, 郭福涛. 基于 ArcGIS 的福建南部地区林火管理资源分布优化. *生态学杂志*, 2017, 36(4): 1142-1149.
- [37] Perry G L W, Wilmshurst J M, McGlone M S, Napier A. Reconstructing spatial vulnerability to forest loss by fire in pre-historic New Zealand. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(10): 1029-1041.
- [38] Parisien M A, Moritz M A. Environmental controls on the distribution of wildfire at multiple spatial scales. *Ecological Monographs*, 2009, 79(1): 127-154.
- [39] Viedma O, Quesada J, Torres I, De Santis A, Moreno J M. Fire severity in a large fire in a *Pinus pinaster* forest is highly predictable from burning conditions, stand structure, and topography. *Ecosystems*, 2015, 18(2): 237-250.
- [40] 潘登, 郁培义, 吴强. 基于气象因子的随机森林算法在湘中丘陵区林火预测中的应用. *西北林学院学报*, 2018, 33(3): 169-177.
- [41] 李晓炜, 赵刚, 于秀波, 于强. 不同区域森林火灾对生态因子的响应及其概率模型. *生态学报*, 2013, 33(4): 1219-1229.
- [42] Guo F T, Su Z W, Wang G Y, Sun L, Lin F F, Liu A Q. Wildfire ignition in the forests of southeast China: identifying drivers and spatial distribution to predict wildfire likelihood. *Applied Geography*, 2016, 66: 12-21.
- [43] 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.
- [44] 李兴华, 武文杰, 张存厚, 郭瑞清. 气候变化对内蒙古东北部森林草原火灾的影响. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(11): 114-119.
- [45] 谭三清, 张贵, 刘大鹏. 基于灰色关联度分析的森林火灾危害程度及相关因子研究. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(4): 135-138.
- [46] 谢绍锋, 肖化顺, 储蓉, 付春风. 基于泰森多边形的广州市林火空间分布规律研究. *西北林学院学报*, 2018, 33(3): 178-185.
- [47] 银洁琼, 张贵. 湖南省森林火灾应急资源规模测度指标体系研究. *湖南林业科技*, 2012, 39(3): 30-32, 37-37.
- [48] 黄宝华, 孙治军, 周利霞, 史淑一, 马玉强. 一种森林火险预报方法研究——以山东省为例. *地理信息世界*, 2012, 10(3): 40-46.
- [49] Dlamini W M. A bayesian belief network analysis of factors influencing wildfire occurrence in Swaziland. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(2): 199-208.
- [50] 孙龙, 王千雪, 魏书精, 胡海清, 关岛, 陈祥伟. 气候变化背景下我国森林火灾灾害的响应特征及展望. *灾害学*, 2014, 29(1): 12-17.
- [51] 程雪蓉, 任立良, 杨肖丽, 刘士军, 童瑞, 周萌. CMIP5 多模式对中国及各分区气温和降水时空特征的预估. *水文*, 2016, 36(4): 37-43.
- [52] 吴志伟, 贺红土, 梁宇, 罗旭, 蔡龙炎. 基于 FARSITE 模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征. *生态学报*, 2012, 32(19): 6176-6186.
- [53] 贺红土, 常禹, 胡远满, 刘志华. 森林可燃物及其管理的研究进展与展望. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 741-752.