

DOI: 10.20103/j.stxb.202309151990

张恒, 李慧, 赵鹏武. 内蒙古森林火灾发生风险及其驱动因素. 生态学报, 2024, 44(13): 5669-5683.

Zhang H, Li H, Zhao P W. Risk of forest fire occurrence in Inner Mongolia and the impact of its drivers. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5669-5683.

内蒙古森林火灾发生风险及其驱动因素

张 恒^{1,2}, 李 慧^{1,2}, 赵鹏武^{1,*}

1 内蒙古农业大学林学院, 呼和浩特 010019

2 内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 根河 022350

摘要: 森林火灾是危害森林健康的主要灾害之一, 科学预测森林火灾是预防森林火灾的重要依据。以中国新旧森林火灾政策作为分界线, 将内蒙古森林历史火灾数据分为四个阶段, 基于增强回归树模型建立内蒙古森林火灾发生模型, 预测森林火灾发生情况, 解释不同时期森林火灾和火灾风险变化的差异。预测结果表明: (1) 4 个时期建模精度 AUC 均大于 0.94, 表明 BRT 模型能够较好地预测研究区森林火灾的发生; (2) 气温日较差、日最小相对湿度、上一年春防累计降水量、上一年秋防累计降水量、上一年春防最高地表气温海拔、距火点最近公路距离被确定为影响内蒙古森林火灾发生的重要驱动因素。(3) 新旧《森林防火条例》实施前后森林火灾风险等级变化: 1981—1988 年 3 月 14 日, 中、高和极高森林火灾风险区分布在呼伦贝尔的东部, 而 2009—2020 年中、高和极高森林火灾风险区分布在呼伦贝尔南部和中部、赤峰市的西南部、锡林郭勒盟和呼和浩特市的中部、乌兰察布市和包头市的南部以及鄂尔多斯市的东部。有助于了解不同时期《森林防火条例》影响下的内蒙古森林火灾的驱动因素和火险等级的变化, 为优化森林火灾管理政策及预测预报工作提供科学依据。

关键词: 内蒙古; 森林防火政策; 火灾预测; 驱动因素; 火灾风险区划

Risk of forest fire occurrence in Inner Mongolia and the impact of its drivers

ZHANG Heng^{1,2}, LI Hui^{1,2}, ZHAO Pengwu^{1,*}

1 College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China

2 National Field Scientific Observatory of Forest Ecosystems of the Greater Hingganling Forest, Genhe 022350, China

Abstract: Forest fire is one of the major disasters that jeopardize the health of forests, and scientific prediction of forest fire is an important basis for forest fire prevention. In this study, using China's old and new forest fire policies as the dividing line, we divided the historical forest fire data of the Inner Mongolia into four periods, modeled the occurrence of forest fires based on the boosted regression tree (BRT) model, predicted the occurrence of forest fires, and explained the differences in the changes of forest fires and fire risks in different periods. The prediction results showed that: (1) the modeling accuracy area under curve (AUC) for all four periods was greater than 0.94, indicating that the BRT model was able to predict the occurrence of forest fires in the study area better; (2) The daily difference in temperature, daily minimum relative humidity, cumulative precipitation in the previous year's spring control, cumulative precipitation in the previous year's autumn control, the previous year's spring control maximum surface temperature elevation, and the distance of the closest road to the fire point were identified as important drivers affecting the occurrence of forest fires in Inner Mongolia. (3) Changes in forest fire risk levels before and after the implementation of the old and new Forest Fire Prevention Regulations were as follows: from 1981 to March 14, 1988, the medium, high, and very high forest fire risk zones were distributed in the eastern part of Hulunbeier, while from 2009 to 2020 the medium, high, and very high forest fire risk

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32060344); 内蒙古自治区科技计划项目 (2022YFSH0077); 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目 (NJYT24042)

收稿日期: 2023-09-15; 网络出版日期: 2024-04-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaopengwu12@163.com

zones were distributed in the southern and central part of Hulunbeier, the southwestern part of Chifeng City, the central Xilingol League and Hohhot, the southern Ulanqab and Baotou, and the eastern Ordos. The study helps to understand the drivers of forest fires and the changes in fire risk levels in the Inner Mongolia under the influence of the Forest Fire Prevention Regulations in different periods, and provides a scientific basis for optimizing forest fire management policies and forecasting.

Key Words: Inner Mongolia; forest fire policy; fire prediction; drivers; fire risk zoning

森林是以乔木为主体的生态系统,其物种多样性丰富,在防止水土流失、调节气候、维持碳循环等方面起着关键作用^[1-2]。近年来随着全球气候变暖,极端天气频发,导致森林火险增加,造成严重的经济损失和人员伤亡。联合国已将大面积的森林火灾列为全球 8 大自然灾害之一^[3]。近年来我国发生了多次重大火灾事件,给人民生命财产安全造成巨大危害。火灾给森林生态系统生物多样性,物种组成及生态系统结构等方面带来的影响使得火灾成为众多森林生态系统中最重要干扰因素^[4-7]。此外,火灾还影响人类生活、区域经济和环境健康^[8-11]。简而言之,现代林业的可持续发展和人类安全正受到森林火灾的严重威胁^[11-12]。因此,森林火灾作为全球环境变化的重要组成部分,已成为林业和生态研究的重点^[13-14]。

研究森林火灾驱动因素及其影响是森林火灾管理与预防的一个重要方面,可以帮助防火部门准确评估森林火灾隐患,有效实施森林防火策略。森林火灾受多种驱动因素影响复杂,因此选择合适的森林火灾驱动因素和预测模型至关重要^[9,15]。多项研究表明,森林火灾发生及其蔓延受到气象^[16-17]、植被(可燃物)^[18]、地形^[19]和人为活动^[20]等多种因素的综合影响。森林火灾发生预测采用的是数学和统计学的方式,构建出一个在森林火灾驱动因子与森林火灾发生概率之间存在着联系的预测模型,进而对森林火灾的发生进行预测^[21-22]。自 20 世纪 20 年代以来,林火的预测预报研究在全球范围内得到了迅速的发展,目前比较普遍使用的森林火灾发生预测模型有随机森林(RF)^[23]、逻辑斯蒂回归模型(LR)^[24]、地理加权逻辑斯蒂回归模型(GWLR)^[25]、Gompit 回归模型、神经网络(BP)等^[26]。国内的森林火灾发生概率预测起步较晚,且主要集中在福建、四川、云南、湖南和东北大兴安岭林区等地。何锐等^[23]采用随机森林算法,系统分析了西南地区干湿季林火发生的主要驱动因子。周庆^[27]通过使用四种模型对内蒙古大兴安岭地区进行模型预测,得出 BRT 模型是最适合内蒙古大兴安岭的林火预测模型。目前在中国北方森林开展了一些森林火灾预测模型的研究,其中大部分研究聚焦于如不同气候梯度之间森林火灾发生驱动因素的比较^[28],不同地理区之间森林火灾发生驱动因素的比较^[29]并且这些研究都会选择某一个时期内的火点数据进行建模。但有研究表明,不同时期森林防火政策与措施会对森林火灾的发生与格局产生重要影响^[30-31],比如林火管理政策的变化使美国西部森林火险增加,曾经高频次低强度的火动态发生了重大改变^[32-33]。我们发现,单纯考虑气象、植被、地形等因素,或者是气候梯度,地理区等不同区域,在火灾建模时往往会忽略火灾管理政策对森林火灾驱动因素的影响,尤其是在中国这样一个重视森林火灾管控的国家。因此,我们进一步考虑:防火政策的不同是否会改变常规时间段内火灾建模的效果,从而导致驱动因素和建模精度发生改变?

内蒙古是森林火灾频发地区之一,森林火灾多发生在春季和秋季。内蒙古森林面积达 0.25 亿 hm^2 ,居全国首位;活立木蓄积量 14.8 亿 m^3 ,居全国第 5 位;森林覆盖率达 21.03%^[34]。近几十年来,中国积极的森林防火政策导致森林火灾周期发生变化,进而导致森林结构和可燃物发生变化^[35]。1988 年 3 月 15 日,我国制定并实施了《森林防火条例》(以下简称《条例》)。此后,中国高度重视森林防火工作,加大了对森林防火治理的投入^[36]。2008 年底对条例进行了修订,并于 2009 年正式实施。新旧条例的主要区别在于旧条例预防措施较少,法律责任规定不完善,处罚较轻。新规增加了相应的法律责任,加大了对预防措施的处罚力度,包括监督管理措施,要求严格落实火源控制,加强宣传教育,加强防火工作。重视森林防火人才队伍建设,加大防火资金投入^[37]。新旧法规制定前,北方原始林区中风险区较少,旧法规修改后中风险地区显著增加^[38]。本文

利用增强回归树(BRT)森林火灾预测模型,采用1981—2020年内蒙古历史火灾数据,以中国森林火灾政策实施时间为分界线,划分为4个时期,拟解决以下具体问题:(1)BRT模型在4个不同时期的建模精度差异如何?(2)BRT模型在4个不同时期起主导作用的驱动因素是否存在差异?是否有与以往研究结论不同的重要驱动因素出现?(3)森林火灾发生概率在4个不同时期存在怎样的变化?火险等级在不同时期的变化规律如何?

1 材料与方法

1.1 研究区

内蒙古地处我国北部边疆(97°10′—126°29′E,37°20′—53°20′N)(图1),呈狭长形,由东北向西南延伸,跨越华北、东北和西北3个主要区域。内蒙古总土地面积达到118.3万km²,相当于全国土地面积的12.3%。它是一个幅员辽阔而又历史悠久的地区,区内地形复杂多样,气候条件独特,自然资源丰富,经济发展水平较低,具有明显的地域差异和民族分布特点。内蒙古大兴安岭地区是我国重要的国有林区,也是我国森林资源保护的重要地区。内蒙古大兴安岭地区的林业资源,无论从地区的经济还是社会的发展角度,其最大的价值、最大的优势、最大的潜力都是在生态。内蒙古大兴安岭是中国最大的国家自然保护区,其1067万hm²的生态功能区,占全国的3.8%,占全国的32.01%,是我国最大的国家级自然保护区。该地区的林地储量为9.41亿m³,占全国总面积的5.36%,占自治区总面积的61.62%,是国家建设“两屏三带”的重点区域。

全区地貌以高原型为主,大部分地区的海拔都在1000m以上,西部主要是平原,东部主要是以山地为主。内蒙古是一个具有独特地理位置和地形地貌特征的地区,具有明显的温带大陆性季风气候特征。春季气温骤升,多强风天气;夏季温热,降水集中;秋季气温大幅度降低,这往往导致了秋季霜冻的提前形成;冬季漫长寒冷,多寒潮天气^[39-40]。全年降水量为350—450mm,以6—8月为主,无霜期为80—150d,平均每年日照时间超过2700h。全区林地面积4394.93万hm²,占自治区面积的37.15%;森林面积2487.9万hm²(包括有林地面积和国家特别规定灌木林地面积),占林地面积的53.84%。内蒙古东部山地森林主要为次生林和人工林,主要森林类型有兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)等^[40]。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 模型

增强回归树(以下简称BRT)。该方法结合了回归树算法和Boosting方法的优点,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^[41-43]。回归树算法通过递归将数据集切割成多组易于建模的子数据集,再利用线性回归方法对子数据集进行建模;增强算法首先构造预测函数系列,然后按照一定规律将各函数序列组合成预测函数以提高弱分类算法的准确度^[44]。模型可写成M棵分类回归树相加的形式:

$$f_M(X) = \sum_{m=1}^M T_m(X, \gamma_m) \quad (1)$$

式中, $T_m(X, \gamma_m)$ 代表的是第m棵分类回归树,X代表的是气象因子预测变量, γ_m 代表的是其参数,是该决策树分裂点和叶子结点的赋值,求解 γ_m 的过程即为单棵决策树的学习过程。在构建BRT模型使用了Rstudio 4.1.3中的“gbm”包。在BRT模型中,使用R语言中的“summary”函数来获得变量相对影响的重要性(Rel.inf)。

1.2.2 森林火灾数据

森林火灾数据由内蒙古林业和草原局提供,包含了每次森林火灾发生的详细信息,包括地理位置、起火时间、火灾原因、伤亡人数等(在1990年之前,火灾发生地点由林场负责人确定,负责人通过森林中固定观测点结合森林资源分布图的综合方法识别每次火灾。1990年以后开始使用全球定位系统(GPS)记录火灾位置)。1981—2020年共记录了3631起火灾,其中115起火灾没有地理坐标信息;本文删除了没有地理位置的火灾。

本文使用的BRT模型要求目标变量为二进制,因此将已知火点赋值为1,然后使用ArcGIS 10.8在研究区

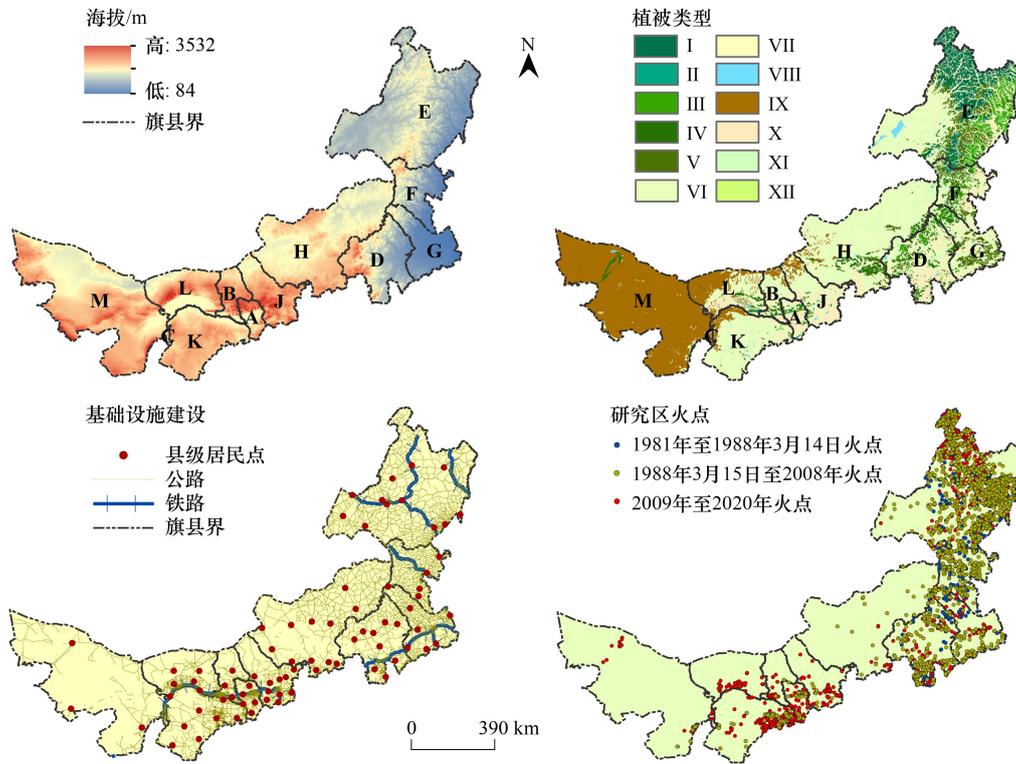


图1 研究区与地理位置图

Fig.1 Map of the study area and geographical location

A:呼和浩特市;B:包头市;C:乌海市;D:赤峰市;E:呼伦贝尔市;F:兴安盟;G:通辽市;H:锡林郭勒盟;J:乌兰察布盟;K:鄂尔多斯市;L:巴彦淖尔盟;M:阿拉善盟;I:寒温带和温带山地针叶林;II:温带针叶林;III:温带落叶阔叶林;IV:温带落叶灌丛;V:温带落叶小叶疏林;VI:草原;VII:沼泽;VIII:水域;IX:荒漠;X:栽培植物;XI:草甸;XII:草丛

域内创建随机点赋值为0^[45](为了避免数据过于离散,通常要以接近或多于火点的比例创建随机点,本研究采用火点:随机点=1:1.5^[46])。在创建随机点后,在Excel中对非火点进行随机日期赋值,以确保随机点的生成在时间上和空间上都是完全随机的^[47-48]。为了避免创建的随机点与已知火点重合或者邻近,设置任意两个随机点的最小允许距离为1km^[45]。建立随机点是要保证随机点的位置落在森林类型上,因此以全国土地利用数据为基础,提取内蒙古森林类型分布范围,在该范围内创建随机点^[49]。森林火点和随机点共同构成样本点。建模时将不同时期的样本分成70%的训练样本和30%的测试样本,重复5次样本划分,建立5个中间模型,消除样本分布对模型结果的影响。本文以中国新旧森林防火条例实施的时间为界,旨在探究从1981—2020年这40年政策实施的2个重要时间节点划分成的3个时间段和40年整体影响森林火灾发生的驱动因素的差异,因此我们将3个时间段的数据和所有数据在选择同样驱动因素的情况下以上述方法建模。

1.2.3 因子数据

(1)地形数据:DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)的GDEM V230M数字高程数据,将DEM进行空间校正拼接、剪辑、重采样等处理。使用ArcGIS 10.8软件中的Spatial Analyst工具包中的“Surface”工具提取研究区的坡度和坡向数据。根据以下公式计算坡向指数^[50]:

$$\text{Aspect index} = \cos((\theta \times 2PI)/360) \quad (2)$$

式中,Aspect index为坡向指数, θ 为坡向值(0—360度),PI为圆周率。坡向指数越大越朝阳坡。最后,用“Extract”工具来提取样本点的海拔、坡度和坡向。

(2)森林类型数据:本文从中国科学院资源环境科学与数据中心网站(<https://data.casearth.cn/en/sdo/detail/614c68e908415d75145c0d85>)下载了30m分辨率的中国土地利用现状遥感监测数据图,使用ArcGIS 10.8根

据土地利用现状图从地图中提取每个火点和随机点对应的森林类型。归一化植被指数^[45,51] (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI):火灾发生与特定时间的植被状况密切相关。我们使用了,1981—2020 年中国逐月 NDVI 数据集,该数据来源于 (<http://www.geodata.cn/data/datadetails.html?dataguid=239118756960240&docId=0>),分辨率为 5km。同样使用 ArcGIS 10.8 提取火点与随机点所对应当月 NDVI 的值。

(3)基础设施数据:基础设施数据由全国地理信息资源目录服务系统中的 1:250000 全国基础地理数据库 (<https://www.webmap.cn/commres.do?method=result25W>) 检索了距离火点最近的铁路、公路、居民点等变量。

(4)人口和社会经济数据:以县为单位的人口数据,人口密度、GDP 以及人均 GDP 从 1985—2020 年由《内蒙古统计年鉴》,1981—1985 年的数据由内蒙古统计局 (<http://tj.nmg.gov.cn/tjyw/jpsj/index.html>) 获取,上述变量具体情况参见表 1。

表 1 驱动因子概况

Table 1 Overview of driving factors

因素 Factors	变量 Variables	简写 Abbreviation	单位 Units	数据类型/分辨率 Resolution/Scale
气象数据 Meteorological data	日平均地表气温、日最高地表气温、日平均气温、日最高气温、日最低气温、日气温较差	Aveg_tem、Maxg_tem、Ave_tem、Max_tem、Min_tem、Dt_dif	℃	日尺度/0.01
	日平均相对湿度、日最高相对湿度、日最小相对湿度	Ave_hum、Max_hum、Min_hum	%	
	日照时数	Sun	h	
	日累计降水	Pre	mm	
	月平均地表气温、月最高地表气温、月平均气温、月最高气温、月最低气温、月气温较差	MAveg_tem、MMaxg_tem、MAve_tem、MMax_tem、MMin_tem、MDt_dif	℃	月尺度/0.01
	月平均相对湿度、月最高相对湿度、月最小相对湿度	MAve_hum、MMax_hum、MMin_hum	%	
	月日照时数	M_sun	h	
	月累计降水	M_pre	mm	
	年平均地表气温、年最高地表气温、年平均气温、年最高气温、年最低气温、年气温较差	YAveg_tem、YMaxg_tem、YAve_tem、YMax_tem、YMin_tem、YDt_dif	℃	年尺度/0.01
	年平均相对湿度、年最高相对湿度、年最小相对湿度	YAve_hum、YMax_hum、YMin_hum	%	
	年日照时数	Y_sun	h	
	年累计降水	Y_pre	mm	
	上一年春防平均地表气温、上一年春防最高地表气温、上一年春防平均气温、上一年春防最高气温、上一年春防最低气温、上一年春防气温较差	SAveg_tem、SMaxg_tem、SAve_tem、SMax_tem、SMin_tem、SDt_dif	℃	上一年春防尺度/0.01
	上一年春防平均相对湿度、上一年春防最高相对湿度、上一年春防最小相对湿度	SAve_hum、SMax_hum、SMin_hum	%	
	上一年春防日照时数	S_sun	h	
	上一年春防累计降水	S_pre	mm	
上一年秋防平均地表气温、上一年秋防最高地表气温、上一年秋防平均气温、上一年秋防最高气温、上一年秋防最低气温、上一年秋防气温较差	AAveg_tem、AMaxg_tem、AAve_tem、AMax_tem、AMin_tem、ADt_dif	℃	上一年秋防尺度/0.01	
上一年秋防平均相对湿度、上一年秋防最高相对湿度、上一年秋防最小相对湿度	AAve_hum、AMax_hum、SMin_hum	%		
上一年秋防日照时数	A_sun	h		

续表

因素 Factors	变量 Variables	简写 Abbreviation	单位 Units	数据类型/分辨率 Resolution/Scale
	上一年秋防累计降水	A_pre	mm	
基础设施数据 Infrastructure data	距火点最近居民点距离	D_set	km	矢量/1:250000
	距火点最近公路距离	D_roa	km	
	距火点最近铁路距离	D_rai	km	
植被数据 Vegetation data	森林	Forest	—	栅格/30m
	NDVI	NDVI	—	栅格/5km
地形数据 Topographic data	海拔	DEM	m	栅格/30 m
	坡向	Aspect	—	
	坡度	Slope	(°)	栅格/30 m
人口和社会经济数据 Demographic and socio-economic data	人口密度	Pop	—	
	人均 GDP	GDP	万元/km ²	年尺度/0.01

(5) 气象数据: 气象因素通常被认为是影响森林火灾发生的决定因素^[52]。气象数据有研究表明, 由于森林火灾往往受到前一年火灾季节的气候因素影响^[41,53]。在之前的研究中多使用一年中所有防火期气象要素的平均值作为因变量, 而没有细化一年中各个防火期的各项气象要素^[46,54]。在我们的研究中, 加入了火灾发生前一年春季防火期和秋季防火期(内蒙古全年有两个防火期, 春季防火期: 3月15日—6月15日; 秋季防火期: 9月15日—11月15日)的平均气温、平均地表气温、平均湿度、累计日照时数等指标。

除了防火期内的气候因素外, 许多火灾预测研究也考虑了火灾发生日尺度及月尺度的气象因素^[55-56]。在日尺度上, 我们选择了平均气温(°C)、最高气温(°C)、平均相对湿度(%)、平均地表气温(°C)、最高地表气温(°C)、最小相对湿度(%)、平均风速(m/s)、日照时数、累计降水(mm/24h)。在月尺度上, 我们选择了火灾发生当月及火灾发生前一个月的月平均气温(°C)、月平均相对湿度(%)、月平均地表气温(°C)、月累计日照时数、月平均降水量(mm)。见(表1)。每日气象数据来自于国家青藏高原科学数据中心(中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0), <http://data.tpdc.ac.cn/en/data/52c77e9c-df4a-4e27-8e97-d363fdfee10a/>; 温室数据共享平台, <http://data.sheshiyuanyi.com/>), 本研究以研究区116个气象站为研究对象, 使用 ArcGIS 10.8 将样本点和与其距离最近的气象站进行匹配, 并用 Spatial Join 实现样本点与气象站点的对应, 并通过 SQL Sever 数据库中的气象站点和日期与天气数据进行匹配。

1.3 模型预测准确率计算

本文采用 ROC 曲线(receiver operating characteristic curve)和 AUC(area under curve)对预测效果进行检验。AUC 作为数值可以直观的评价分类器的好坏, 值越大分类效果越好^[58]。通过约登指数公式(约登指数=敏感度值+特异性值-1)可以计算分类(cut-off point), 进而对预测概率进行分类^[58]。如果计算得到的预测概率值大于该阈值则认为会发生森林火灾, 小于该阈值)则认为不会发生森林火灾^[17,56]。

1.4 森林火灾概率图

我们使用 BRT 模型在 ArcGIS 环境中使用 Kriging 绘制了 4 个时期的火灾发生概率图(1981—1988 年 3 月 14 日(第 1 期); 1988 年 3 月 15 日—2008 年(第 2 期); 2009—2020 年(第 3 期); 1981—2020 年)。概率在 0—1 之间变化, 网格的值越大, 发生火灾的概率就越高, 在火灾发生概率图及约登指数的基础上, 绘制不同时期的火险区划图, 将其划分为五个等级^[60], 分别是: 极低火险(0<P<0.2)、低火险(0.2<P<0.4)、中火险(0.4<P<0.6)、高风险(0.6<P<0.8)和极高风险(0.8<P<1)。

2 结果与分析

2.1 森林火灾情况

本研究统计了 1981—2020 年内蒙古森林火灾发生的总次数和过火面积(图 2), 并按森林火灾发生原因

分为 3 类:人为因素(主要包括吸烟、烧纸、生产生活用火等)、自然因素(雷击火)和外界入侵因素(包括外国焚烧和其他省市的焚烧)。

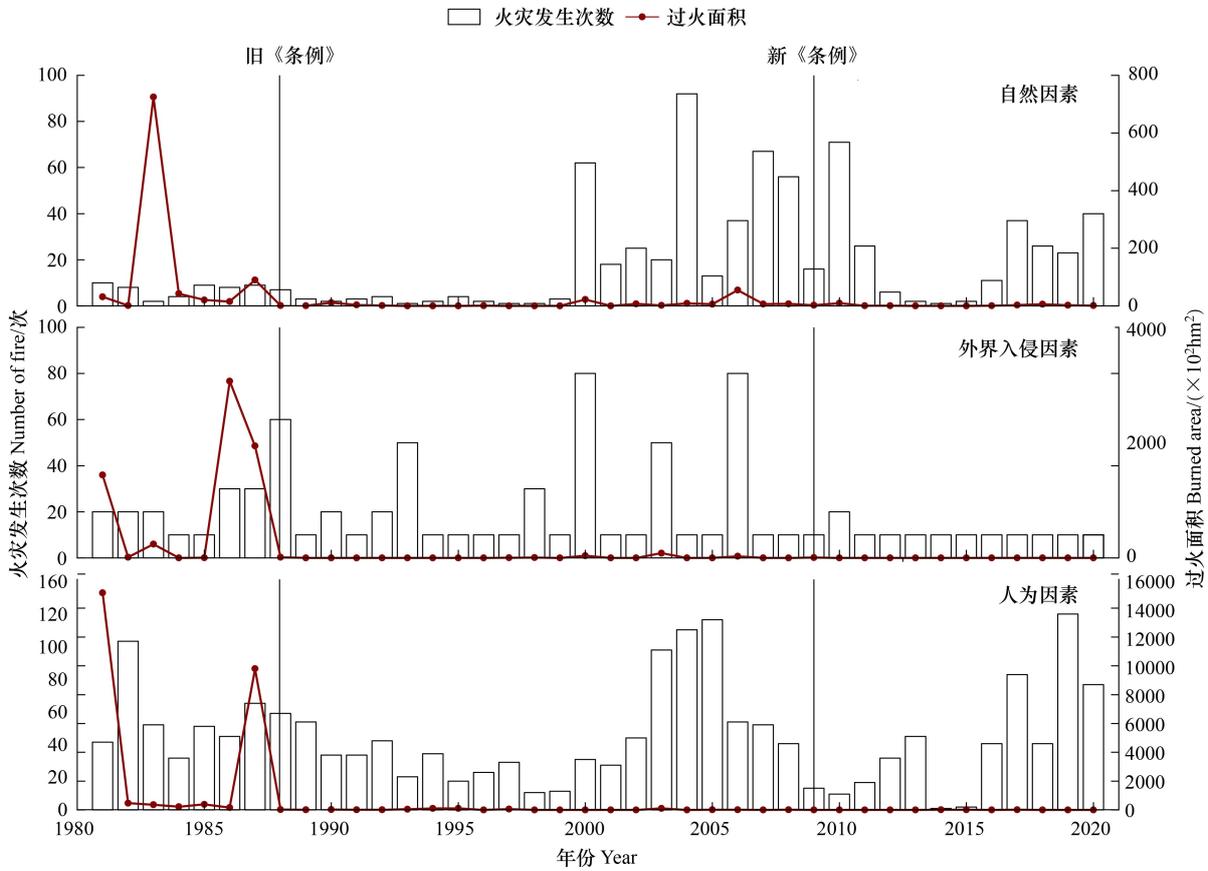


图 2 1981—2020 年不同致灾因素森林火灾发生次数及过火面积

Fig.2 Number of forest fires and area of forest fires from 1981 to 2020

图 2 显示,在 4 个不同时期里内蒙古森林火灾的主要致灾因素是人为因素。图 2 和表 2 可以看出,1988 年 3 月 15 日前的人为火灾次数多、火灾面积大;然而,在“条例”的制定和修订之后,情况有所改善。人为因素造成的森林火灾次数在 2005 年最多,2004 年最少。人为因素造成的森林火灾过火面积在 1981 年最多,2020 年最少。自然因素导致的森林火灾发生次数显著增加,从 1981—1988 年 3 月 14 日的每年 6.9 起增加到 1988 年 3 月 15 日—2008 年的 20.19 起和 2009—2020 年的 18.13 起。外界入侵因素烧入的森林火灾从 1981—1988 年 3 月 14 日的每年 1.8 起降到 1988 年 3 月 15 日—2008 年的 1.69 起和 2009—2020 年的 0.42 起。2000 年、2006 年外界入侵因素烧入的森林火灾发生的次数最多,1981 年外界入侵因素烧入的森林火灾过火面积最大。

表 2 不同时期平均每年的火灾发生次数及过火面积

Table 2 Average number of fires and fire area per year in different periods

致灾因素 Disaster-causing factors	火灾平均每年发生次数 Fires on average occurrence per year Number of fires				火灾平均每年过火面积/hm ² Fires on average annual fires fire area			
	a	b	c	d	a	b	c	d
人为因素 Human factor	61.10	53.40	44.42	51.28	3650435.70	27031.13	1690.36	675235.45
自然因素 Natural factor	6.90	20.19	21.33	18.13	127677.91	6322.93	2140.63	27063.83
外界入侵因素 External intrusion factor	1.80	1.69	0.42	1.35	1155827.70	28888.36	821.66	223982.78

(a) 1981—1988 年 3 月 14 日(第 1 期)(b) 1988 年 3 月 15 日—2008 年(第 2 期)(c) 2009—2020 年(第 3 期)(d) 1981—2020 年

2.2 驱动因素特征变量的选择

在 Rstudio 中使用“gbm”包中的“gbm.simplify”函数对 5 个训练样本进行放弃不重要变量测试,调整参数模型精度达到最高并选择保留没有在 5 个子集中没有被放弃 3 次及以下的变量(表 3)。最终 4 个时期均选出 16 个变量作为森林火灾主要驱动因子进入模型的拟合阶段。4 个时期 BRT 模型的关键参数(表 4)。

表 3 通过 BRT 模型选择四个时期的显著变量

Table 3 Significant variables for four periods were selected by the BRT model

a		b		c		d	
变量 Variable	被放弃次数 Number of waived						
Dem	0	Dem	0	Max_tem	0	Dem	0
POP	0	GDP	2	D_set	1	POP	1
Dt_dif	2	POP	0	D_Roa	0	D_set	0
D_set	0	D_set	0	Maxg_tem	1	Min_hum	0
D_rai	0	Max_tem	0	POP	0	Max_tem	0
Min_hum	0	Min_hum	0	Min_hum	1	Dt_dif	0
Max_tem	0	M_pre	1	Dem	0	D_rai	0
D_Roa	0	Sun	0	D_rai	0	Sun	2
Maxg_tem	0	D_rai	0	NDVI	0	D_Roa	0
Aspect	1	Maxg_tem	0	GDP	0	Aspect	0
NDVI	1	Aspect	0	Dt_dif	2	Maxg_tem	1
Y_pre	2	NDVI	1	Sun	0	Y_pre	1
Forest	0	D_Roa	0	M_pre	2	Forest	0
SUN	2	Slope	2	Slope	2	NDVI	1
S_pre	2	Forest	1	Forest	0	MDt_dif	2
		Dt_dif	1	YAve_hum	2	SDt_dif	2

表 4 BRT 模型的关键拟合参数

Table 4 Key fitting parameters of BRT model

参数 Parameter	a	b	c	d
家庭 Family	Bernoulli	Bernoulli	Bernoulli	Bernoulli
学习率 Learning rate	0.01	0.01	0.01	0.01
树的复杂性 Tree complexity	5	5	5	5
袋子分数 Bag fraction	0.05	0.05	0.05	0.05
树数 Number of trees	1450	2900	2300	5350

Family:即使用的方法,本研究使用二项式进行建模; Learning rate:即每一步迭代中向梯度下降方向前进的速率; Tree complexity:即迭代次数; Bag fraction:即基础学习器的深度; Number of trees:即决策树叶节点包含的最小观测树

2.3 增强回归树模型特征变量的重要性排序

从表 5 分析可得,在四个时期中主要受气象因素的影响,其次为基础设施因素。从全样本的变量排序结果(图 3)来看,气温日较差和日最小相对湿度在 4 个时期均显著。在月尺度上,火灾发生当月的平均温度、火灾发生当月降水量、月的平均温度、火灾发生当月降水量是影响火灾发生的重要变量。在气候因素中我们还发现,春秋季节防火期的一些指标在 4 个时期中对火灾发生具有显著影响,如上一年的春防累计降水量、上一年的秋防累计降水量以及上一年的春防最高地表气温;地形因素中的海拔在 4 个时期的所有模型显示对火灾发生具有显著影响;植被因素方面,NDVI 在四个时期均被认为是重要的;森林类型在后三个时期中具有显著影响;在社会经济因素方面,第一时期显示人均 GDP 和人口密度显著影响火灾;人为因素方面:4 个时期均显示距火点最近居民点距离、距火点最近公路距离、距火点最近铁路距离具有显著影响。

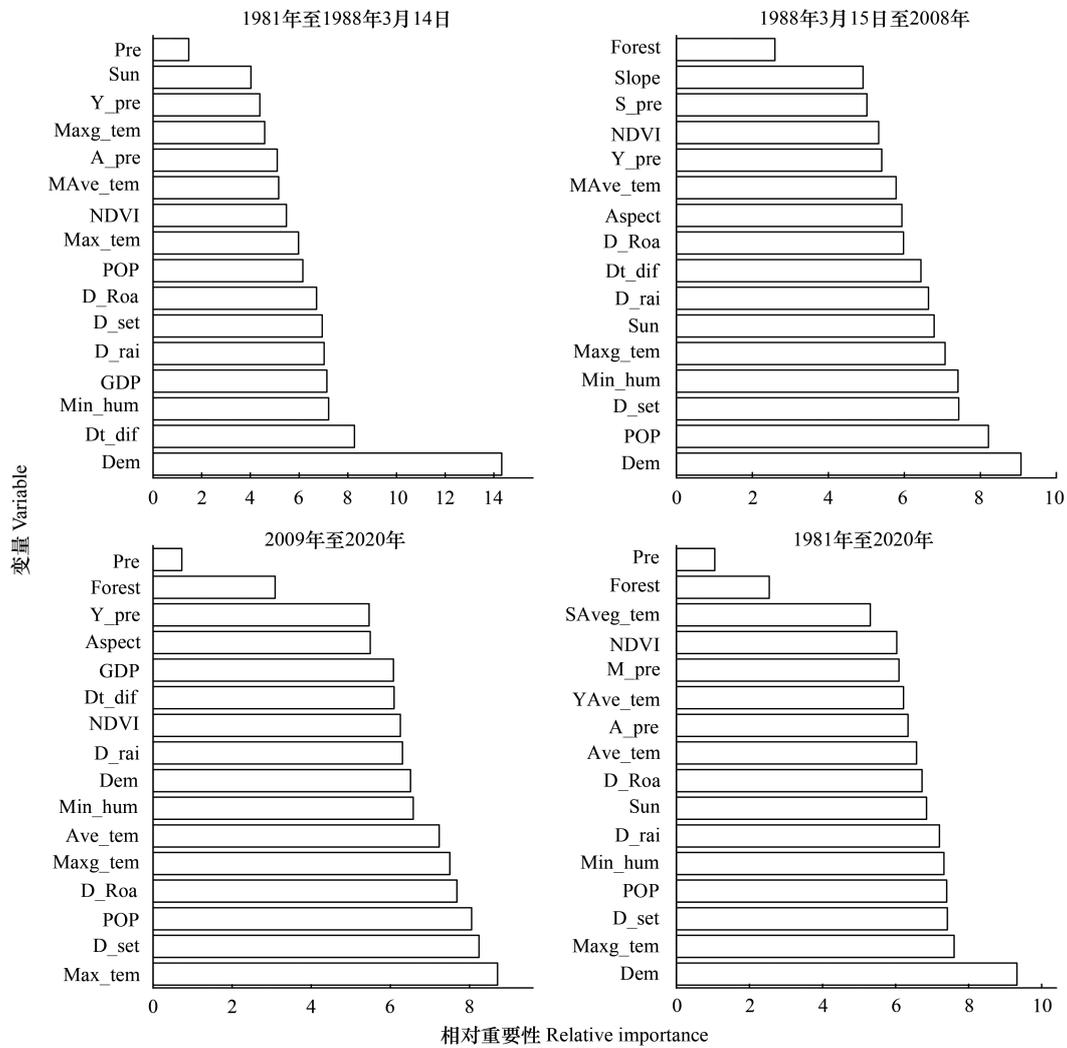


图3 影响森林火灾发生的驱动因素的重要性排序(全样本)

Fig.3 Ranking the importance of drivers influencing the occurrence of forest fires (full sample)

Pre: 日累计降水; Sun: 日照时数; Y_pre: 年累计降水; Maxg_tem: 日最高地表气温; NDVI: 归一化植被指数; Max_tem: 日最高气温; POP: 人口密度; D_Roa: 距火点最近公路距离; D_set: 距火点最近居民点距离; D_rai: 距火点最近铁路距离; GDP: 国内生产总值; Min_hum: 日最小相对湿度; Dt_dif: 日气温较差; Dem: 海拔; Forest: 森林; Slope: 坡度; S_pre: 上一年春防累计降水; MAveg_tem: 月平均地表气温; Maxg_tem: 日最高地表气温; Ave_tem: 日平均气温; SAveg_tem: 上一年春防平均地表气温; M_pre: 月累计降水; YAve_tem: 年平均气温; A_pre: 上一年秋防累计降水

表5 不同驱动因素在不同时期的占比

Table 5 Percentage of different drivers over time

因素 Factor	a	b	c	d
气象因素 Meteorological factor	46.2%	43.9%	42.3%	53.4%
基础设施因素 Infrastructure factor	20.7%	20.0%	22.2%	21.3%
植被因素 Vegetation factor	5.5%	7.9%	9.3%	8.6%
地形因素 Topographical factor	14.3%	19.9%	12.1%	9.3%
人口和社会经济因素 Demographic and socioeconomic factor	13.3%	8.2%	14.1%	7.4%

2.4 增强回归树模型的检验

我们计算了每个子样本、完整数据集的预测准确率, ROC 曲线下 AUC 的值及对应的 cut-off 值(表6)并绘制了4个不同时间的 ROC 曲线图(图4),以测试 BRT 模型在不同时期的预测能力。结果表明 BRT 模型在4个不同时期的 AUC 值均大于 0.9406, 预测准确率均大于 87.3%, 表明模型在4个不同时期的拟合均比较好。一般来

说,AUC 值均为第 1 期<第 2 期<第 3 期,第 3 期的 AUC 值略高于所有年份。

表 6 5 个随机样本数据及全样本数据拟合中的特征集

Table 6 Feature sets in the fit of 5 random sample data and full sample data

样本 Sample	时期 Period	最佳 临界值 Cut off	AUC 值 AUC price	预测准确性 Predictive accuracy of/%	
				训练数据集 Training dataset	测试数据集 Test dataset
1	a/b	0.398/0.406	0.870/0.932	86.3/85.9	83.0/86.0
	c/d	0.386/0.410	0.951/0.952	91.0/87.3	88.3/88.4
2	a/b	0.500/0.405	0.886/0.934	84.6/88.8	83.3/86.5
	c/d	0.421/0.426	0.962/0.956	91.2/89.1	89.6/89.3
3	a/b	0.415/0.382	0.861/0.922	87.1/83.8	82.9/89.4
	c/d	0.439/0.460	0.955/0.951	92.2/88.3	88.6/88.3
4	a/b	0.439/0.371	0.887/0.922	87.9/86.7	84.2/84.1
	c/d	0.343/0.405	0.970/0.933	91.3/89.2	92.2/85.5
5	a/b	0.374/0.456	0.894/0.934	84.6/89.6	84.2/86.9
	c/d	0.421/0.412	0.959/0.933	91.5/87.9	89.4/86.4
全样本 Sample	a/b	0.365/0.390	0.941/0.948	87.8/87.3	
	c/d	0.307/0.443	0.979/0.955	92.0/88.8	

完整的数据集没有被分成训练和验证子集;AUC:ROC 曲线下与坐标轴围成的面积 Area under curve

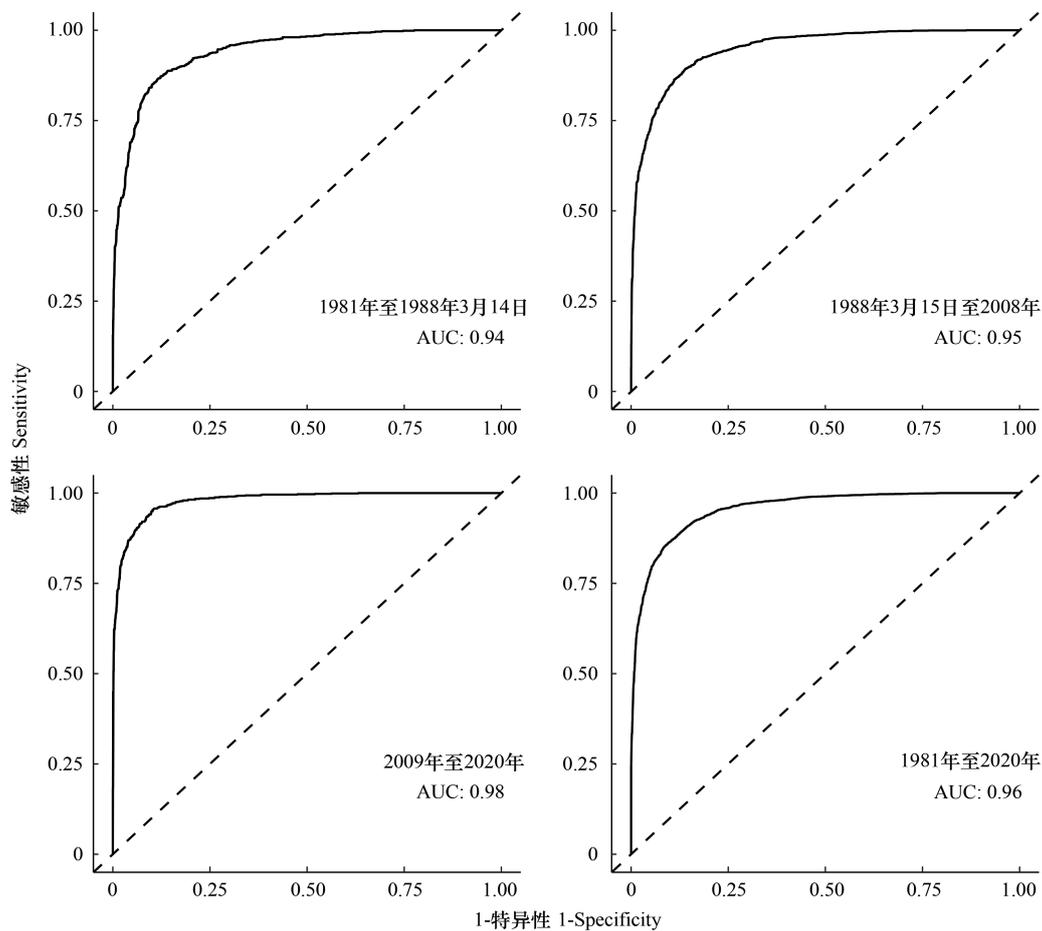


图 4 基于 4 个不同时期的完整数据集的 AUC 值

Fig.4 AUC values based on the complete data set for 4 different periods

AUC:ROC 曲线下与坐标轴围成的面积 Area under curve;AUC 作为数值可以直观的评价分类器的好坏,值越大分类效果越好

2.5 森林火灾发生概率和风险等级区划

根据 BRT 模型在四个时间段内的最终模型,我们绘制了森林火灾发生概率图和火险区划图(图 5 和图 6),以呈现其全貌。通过对各个区域进行分析发现,各时间段内森林火灾发生率存在一定差异。据结果显示,内蒙古 4 个不同时期极低、低火险区占比较高,其中呼伦贝尔的东南部和东北部是第 1 期森林火灾发生概率较高的主要区域,而第 3 期发生概率较高的地区,主要分布在通辽市的中部、呼和浩特市大部分地区、赤峰市东北部和西南部、包头市和乌兰察布市的南部、鄂尔多斯市东北部。此外,由于各城市之间人口流动频繁、经济发展水平不平衡等因素造成不同程度的区域间人员密集度差异较大,导致不同区域环境条件下居民对火灾风险认知存在显著差异,这也是引起各层次火灾发生率差别最大的原因之一。

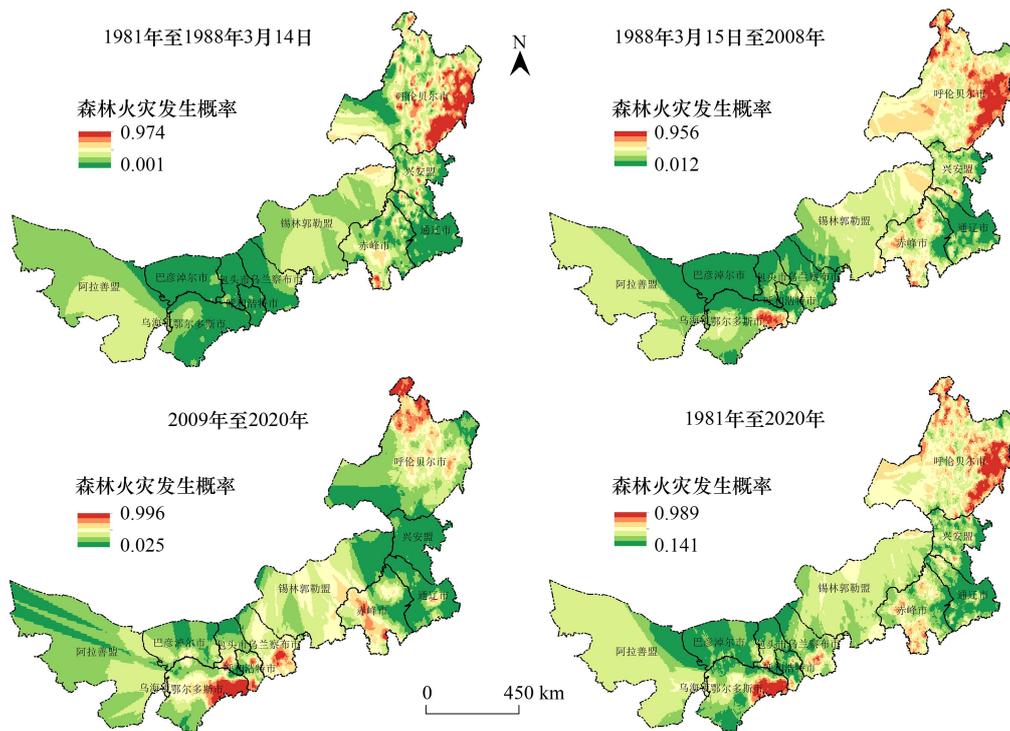


图 5 内蒙古森林火灾发生概率图

Fig.5 Probability of forest fires in Inner Mongolia

为了更好地评估模型的拟合优度,将模型的预测概率与观测值进行比较,本文还对模型残差进行了进一步的计算,并生成模型的残差图(图 7)。基于残差分析,在第 1 期,增强回归树模型在锡林郭勒盟的东北部和赤峰市南部有聚集的阴性残差(过度预测)区域;在第 2 期,增强回归树模型显示在锡林郭勒盟的东北部有阴性残差区域,其余地区出现了较小的阳性残差(预测不足)区域;在第 3 期,模型显示呼伦贝尔的东南部、南部和锡林郭勒盟的南部有部分阴性残差,其余地区出现较小的阳性残差区域;在所有年份中,模型显示呼伦贝尔市的西南部、锡林郭勒盟的中部和南部有阳性残差区域。

3 讨论

本文基于历史火灾数据,综合考虑气象、地形、植被类型等因素,利用增强回归树构建内蒙古地区四个时期森林火灾预测模型,并分析不同时期驱动因素的差异以及对火险等级区划的影响。研究发现气象因素的占比在四个时期均最高,其中气温日较差和日最小相对湿度显著影响森林火灾的发生。本文研究得到的结果与前人一样^[56,60-62]。日最小相对湿度对可燃物水含量有直接的影响,当空气中的相对湿度较低时,可燃物水含量较低,则会导致可燃物水含量较低,从而增加了火灾发生的可能性^[43]。本研究还发现上一年春防累计降水

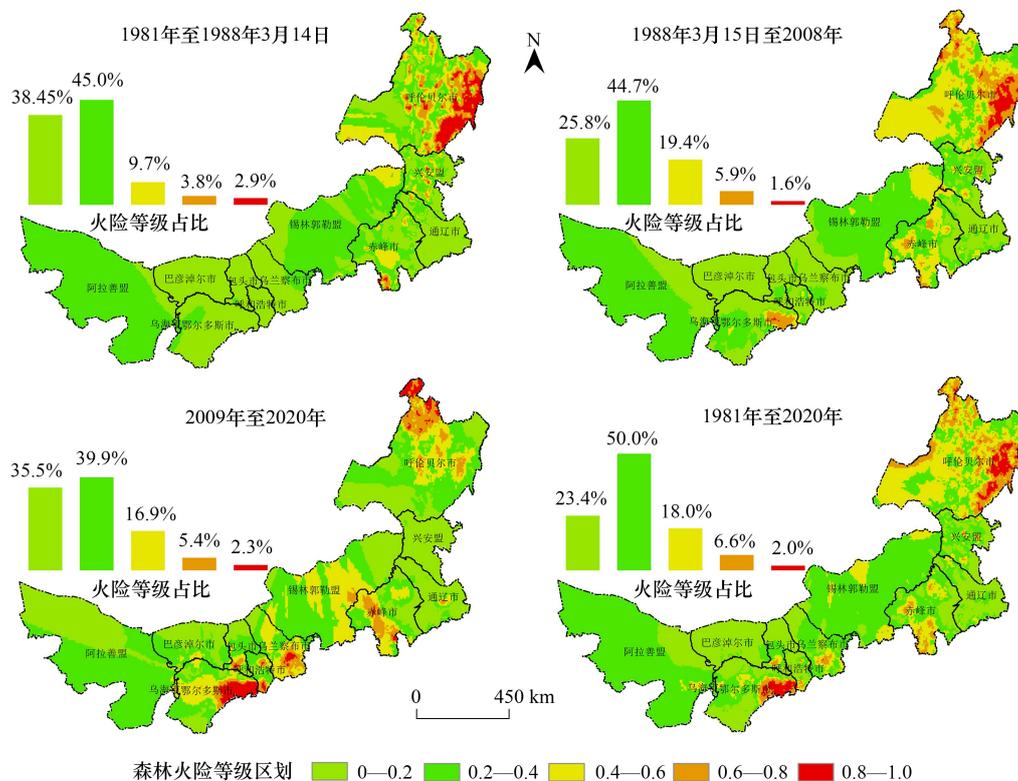


图6 内蒙古森林火险区划图

Fig.6 Map of forest fire risk zones in Inner Mongolia

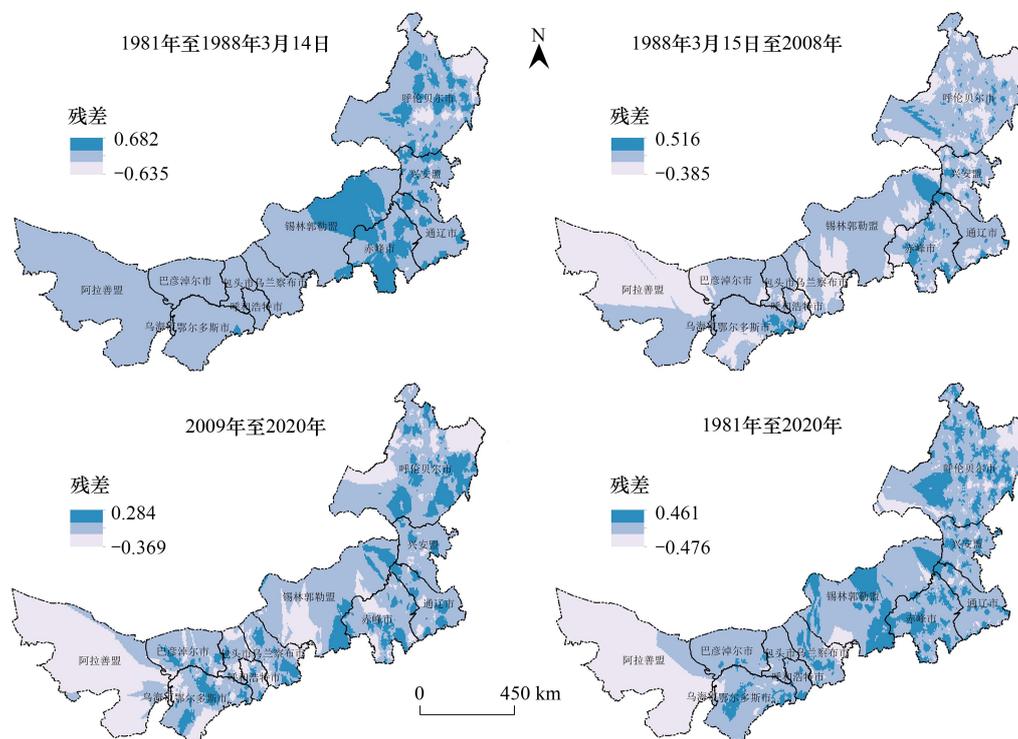


图7 内蒙古森林火残差图

Fig.7 Forest fire residuals in Inner Mongolia

量、上一年秋防累计降水量以及上一年春防最高地表气温也显著影响森林火灾的发生。Zhou 等^[38]的研究表明,火灾发生的可能性与火灾发生前一年秋季防火期间的平均日照时数和地表温度之间始终存在相关性。舒展^[63]在对大兴安岭的研究中得出:如果火灾发生所在的春季防火期或秋季防火期气温较高、相对湿度较低,森林火灾发生的次数及过火面积都会大幅度增加。

大多数森林火灾发生在低海拔地区,主要是由于那里的人类活动密集,这无疑会增加人为火灾的可能性。此外,随着海拔的增加,天气将改变植被覆盖和土壤湿度,从而降低火灾开始的可能性^[64]。但在政策制定后,人为火灾明显减少,而雷电火灾数量增加,主要发生在高海拔地区。

尽管气象、植被和地形因素对林火发生的影响很大,但人为因素和社会经济因素的影响也不能忽视。在本研究中发现,在 4 个不同时期火点距居民点、铁路越近的地区发生森林火灾的可能性就越大,这与 Guo 等^[61]的研究结果一致。同时本研究还发现,随着公路距离的增加,森林火灾发生的概率也随之增加。因为公路一般建在工业发达,森林覆盖率低的人口密集地区,这些地区,所以靠近公路附近的可燃物较多,而且破碎程度较高^[48]。另外,由于在人类活动区域之外,森林防火资源分布不集中,这意味着一旦大火发生,大火将迅速向更远的森林蔓延。由于这些因素,大火在向更远的森林蔓延时会持续更久,并且具有更大的破坏性^[46]。社会经济因素方面,人口密度越小的地区,发生火灾可能性越低^[61]。社会经济发展水平不仅决定着人们生活方式和生活习惯的转变,而且也决定了居民对于火灾风险认知水平的高低。

不同时期火灾管理政策的影响主要是人为原因引起的森林火灾,随着《条例》的制定与完善,人为原因引发的火灾显著下降,以雷击火为主要原因的自然火灾增加,这也是火灾风险区发生变化的原因之一。由内蒙古森林火灾风险等级图(图 5)分析可知,第 1 期和第 3 期的森林火灾发生概率与火灾风险等级有很大不同。第 1 期森林火灾发生概率较高的主要区域有呼伦贝尔市的东北部和东南部而第 3 期呼伦贝尔市的火灾发生概率较高区域向呼伦贝尔南部转移火险等级降低且区域缩小,锡林郭勒盟、赤峰市、通辽市、呼和浩特市、乌兰察布市以及鄂尔多斯市的火险等级变高。本研究发现森林火灾风险分布正在不断扩大,主要是由于近年来随着国家生态建设工程的实施使植被得到恢复,地表可燃物积累较快,高火灾风险等级的森林地区不断扩大。内蒙古不同地区森林火灾风险水平差异较大,为了实现对森林防火工作的科学合理规划,我们需要因地制宜进行防火规划,然后在此基础上对森林防火工作进行科学合理的规划。

4 结论

本研究基于历史火灾数据,以中国新旧《森林防火条例》为分界线,基于 BRT 模型比较了不同时期模型预测精度及驱动因素的差异。结果表明,BRT 模型适用于内蒙古的森林火灾预测模型构建,AUC 值可达到 0.93,预测准确率均大于 87.3%以上。气温日较差、日最小相对湿度、海拔、距火点最近铁路距离、上一年春防累计降水量、上一年秋防累计降水量以及上一年春防最高地表气温等指标被确定为影响内蒙古森林火灾发生的重要驱动因素。新旧《森林防火条例》改变了以人为因素为主导的驱动因素,火灾原因显示《条例》制定前森林火灾主要由人为原因导致,《条例》制定后,特别是 2008 年重新修订后,人为火源减少而雷击火成为了主要火灾原因。4 个不同时期内蒙古森林火险的分布差异较大,1981—1988 年 3 月 14 日,中、高和极高森林火灾风险区分布在呼伦贝尔的东部。2009—2020 年中、高和极高森林火灾风险区分布在呼伦贝尔南部和中部、赤峰市的西南部、锡林郭勒盟和呼和浩特市的中部、乌兰察布市和包头市的南部以及鄂尔多斯市的东部。研究表明,在政策调控的人为火灾、雷击火和过境火的共同影响下,不同时期的森林火灾发生概率和火灾风险区发生了变化。研究可为内蒙古森林火灾模型构建的不同时间序列长度选择提供参考,并为当地森林火灾防控资源有效配置提供理论支撑。预报中分时期进行研究可以得到更好的预测结果,从而为森林火灾管理政策提供指导建议。

参考文献(References):

- [1] Bergeron Y, Gauthier S, Flannigan M, Kafka V. Fire regimes at the transition between mixedwood and coniferous boreal forest in northwestern Quebec. *Ecology*, 2004, 85(7): 1916-1932.

- [2] Piao S L, Huang M T, Liu Z, Wang X H, Ciais P, Canadell J G, Wang K, Bastos A, Friedlingstein P, Houghton R A, Le Quéré C, Liu Y W, Myneni R B, Peng S S, Pongratz J, Sitch S, Yan T, Wang Y L, Zhu Z C, Wu D H, Wang T. Lower land-use emissions responsible for increased net land carbon sink during the slow warming period. *Nature Geoscience*, 2018, 11: 739-743.
- [3] 袁春明, 文定元. 林火行为研究概况. *世界林业研究*, 2000, 13(6): 27-31.
- [4] Podur J, Martell D, Csillag F. Spatial patterns of lightning-caused forest fires in Ontario, 1976—1998. *Ecological Modelling*, 2003, 164(1): 1-20.
- [5] Bond W J, Keeley J E. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(7): 387-394.
- [6] Pastro L A, Dickman C R, Letnic M. Burning for biodiversity or burning biodiversity? Prescribed burn *vs.* wildfire impacts on plants, lizards, and mammals. *Ecological Applications*, 2011, 21(8): 3238-3253.
- [7] Thom D, Seidl R. Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2016, 91(3): 760-781.
- [8] Westerling A L, Bryant B P. Climate change and wildfire in California. *Climatic Change*, 2008, 87(1): 231-249.
- [9] Hering A S, Bell C L, Genton M G. Modeling spatio-temporal wildfire ignition point patterns. *Environmental and Ecological Statistics*, 2009, 16(2): 225-250.
- [10] McKenzie D, Shankar U, Keane R E, Stavros E N, Heilman W E, Fox D G, Riebau A C. Smoke consequences of new wildfire regimes driven by climate change. *Earth's Future*, 2014, 2(2): 35-59.
- [11] 李顺, 吴志伟, 梁宇, 贺红士. 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.
- [12] 张建设, 汤亚利, 王耀铭. 浅谈现代林业生产与林业保护的关系. *农业与技术*, 2015, 35(12): 81.
- [13] Dimopoulou M, Giannikos I. Towards an integrated framework for forest fire control. *European Journal of Operational Research*, 2004, 152(2): 476-486.
- [14] Flannigan M D, Krawchuk M A, de Groot W J, Wotton B M, Gowman L M. Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18(5): 483.
- [15] Moreno M V, Chuvieco E. Characterising fire regimes in Spain from fire statistics. *International Journal of Wildland Fire*, 2013, 22(3): 296-305.
- [16] Chas-Amil M L, Prestemon J P, McClean C J, Touza J. Human-ignited wildfire patterns and responses to policy shifts. *Applied Geography*, 2015, 56: 164-176.
- [17] 梁慧玲, 林玉蕊, 杨光, 苏漳文, 王文辉, 郭福涛. 基于气象因子的随机森林算法在塔河地区林火预测中的应用. *林业科学*, 2016, 52(1): 89-98.
- [18] Liu Q, Shan Y L, Shu L F, Sun P Y, Du S. Spatial and temporal distribution of forest fire frequency and forest area burnt in Jilin Province, Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 2018, 29(5): 1233-1239.
- [19] Shen Z H. Early post-fire regeneration of a fire-prone subtropical mixed Yunnan pine forest in Southwest China: effects of pre-fire vegetation, fire severity and topographic factors. *Forest Ecology and Management*, 2015, 356:31-40.
- [20] Ager A A, Barros A M G, Day M A, Preisler H K, Spies T A, Bolte J. Analyzing fine-scale spatiotemporal drivers of wildfire in a forest landscape model. *Ecological Modelling*, 2018, 384: 87-102.
- [21] 高超, 林红蕾, 胡海清, 宋红. 我国林火发生预测模型研究进展. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 3227-3240.
- [22] 马文苑, 冯仲科, 成竺欣, 王凤阁. 山西省林火驱动因子及分布格局研究. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(9): 57-69.
- [23] 何锐, 陆恒, 晋子振, 秦艳, 杨弘毅, 刘治银, 杨广睿, 徐进滢, 龚雪, 赵求东. 基于随机森林算法的中国西南地区林火发生预测模型构建及驱动因子. *生态学报*, 2023, 43(22): 9356-9370.
- [24] Prasad V K, Badarinath K V S, Eaturu A. Biophysical and anthropogenic controls of forest fires in the Deccan Plateau, India. *Journal of Environmental Management*, 2008, 86(1): 1-13.
- [25] Rodrigues M, de la Riva J, Fotheringham S. Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression. *Applied Geography*, 2014, 48: 52-63.
- [26] 杜秋洋, 张国琛, 宋博, 郭福涛. 森林火灾预测模型研究. *亚热带资源与环境学报*, 2023, 18(01): 87-93
- [27] 周庆. 内蒙古大兴安岭森林火灾发生空间格局与驱动因素研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [28] Sun H C, Wang W J, Liu Z H, Zou X H, Zhang Z X, Ying H, Dong Y L, Yang R. The relative importance of driving factors of wildfire occurrence across climatic gradients in the Inner Mongolia, China. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108249.
- [29] Ma W Y, Feng Z K, Cheng Z X, Chen S L, Wang F G. Identifying forest fire driving factors and related impacts in China using random forest algorithm. *Forests*, 2020, 11(5): 507.
- [30] 陈岱, 舒立福, 李翔南. 美国森林火灾管理与策略. *温带林业研究*, 2020, 3(2): 12-17.
- [31] Ingalsbee T. Whither the paradigm shift? Large wildland fires and the wildfire paradox offer opportunities for a new paradigm of ecological fire management. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, 26(7): 557.
- [32] Fulé P Z, Crouse J E, Roccaforte J P, Kalies E L. Do thinning and/or burning treatments in western USA ponderosa or Jeffrey pine-dominated forests help restore natural fire behavior? *Forest Ecology and Management*, 2012, 269: 68-81.
- [33] Stephens S L, McIver J D, Boerner R E J, Fettig C J, Fontaine J B, Hartsough B R, Kennedy P L, Schwilk D W. The effects of forest fuel-reduction treatments in the United States. *BioScience*, 2012, 62(6): 549-560.

- [34] 萨如拉, 周庆, 刘鑫晔, 李靖, 于宏洲, 代海燕, 张秋良, 张恒. 1980—2015 年内蒙古森林火灾的时空动态. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2019, 43(2): 137-143.
- [35] 苗庆林, 刘耀香, 田晓瑞. 林火管理对火动态的影响. 世界林业研究, 2014, 27(4): 42-47.
- [36] Tian X R, Cui W B, Shu L F. Evaluating fire management effectiveness with a burn probability model in Daxing'anling, China. *Canadian Journal of Forest Research*, 2020, 50(7): 670-679.
- [37] 韩焕金. 新旧《森林防火条例》的解读. 法制与社会, 2009(12): 331-332.
- [38] Zhou Q, Zhang H, Wu Z W. Effects of forest fire prevention policies on probability and drivers of forest fires in the boreal forests of China during different periods. *Remote Sensing*, 2022, 14(22): 5724.
- [39] 陈晓冬. 内蒙古自治区国际道路运输管理配套技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [40] 王红梅. 内蒙古青藓科(Brachytheciaceae)植物区系及系统分类学研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2010.
- [41] Müller D, Leitão P J, Sikor T. Comparing the determinants of cropland abandonment in Albania and Romania using boosted regression trees. *Agricultural Systems*, 2013, 117: 66-77.
- [42] 顾先丽. 江西森林火点时空特征及其变化趋势[D]. 南昌: 江西师范大学, 2019.
- [43] 闫赛佳. 气候变化下不同空间尺度的江西省林火面积分布格局研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2020.
- [44] Stephens S L, Mciver J D, Boerner R E, Fettig, C J, Fontaine, J B, Hartsough, B R, Kennedy, P L, Schwilk, D W. The effects of forest fuel-reduction treatments in the United States. *BioScience*, 2012, 62: 549-560
- [45] 苏漳文, 曾爱聪, 蔡奇均, 胡海清. 基于 Gompit 回归模型的大兴安岭林火预测模型及驱动因子研究. 林业工程学报, 2019, 4(4): 135-142.
- [46] Guo F T, Su Z W, Wang G Y, Sun L, Tigabu M, Yang X J, Hu H Q. Understanding fire drivers and relative impacts in different Chinese forest ecosystems. *The Science of the Total Environment*, 2017, 605/606: 411-425.
- [47] Liu Z H, Yang J, Chang Y, Weisberg P J, He H S. 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(6): 2041-2056.
- [48] 蔡奇均, 曾爱聪, 苏漳文, 郭福涛. 基于 Logistic 回归模型的浙江省林火发生驱动因子分析. 西北农林科技大学学报, 2020, 48(2): 102-109
- [49] 马文苑. 大尺度林火驱动因子及预测模型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [50] Zhang H J, Qi P C, Guo G M. Improvement of fire danger modelling with geographically weighted logistic model. *International Journal of Wildland Fire*, 2014, 23(8): 1130.
- [51] 贾志峰, 刘鹏程, 刘宇, 吴博博, 陈丹姿, 张向飞. 气候变化和人类活动对松辽流域植被覆盖的影响. 生态环境学报, 2023(1): 1-10.
- [52] Minnich R A, Bahre C J. Wildland fire and chaparral succession along the California baja-california boundary. *International Journal of Wildland Fire*, 1995, 5(1): 13.
- [53] Littell J S, McKenzie D, Peterson D L, Westerling A L. Climate and wildfire area burned in western U.S. ecoprovinces, 1916—2003. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2009, 19(4): 1003-1021.
- [54] Guo F T, Wang G Y, Innes J L, Ma Z H, Liu A Q, Lin Y R. Comparison of six generalized linear models for occurrence of lightning-induced fires in northern Daxing'an Mountains, China. *Journal of Forestry Research*, 2016, 27(2): 379-388.
- [55] Pereira M G, Trigo R M, da Camara C C, Pereira J M C, Leite S M. Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129(1/2): 11-25.
- [56] 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.
- [57] 白海峰, 刘晓东, 牛树奎, 何亚东. 基于贝叶斯模型平均法的森林火灾预测模型构建研究——以云南省大理州为例. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 44-52.
- [58] 陈岱. 基于 Logistic 回归模型的大兴安岭林火预测研究. 林业资源管理, 2019(1): 116-122.
- [59] 诺敏, 贾瑛, 张恒. 基于随机森林模型的内蒙古草原火灾空间格局与驱动因素分析. 内蒙古林业科技, 2023, 49(1): 46-49, 64.
- [60] Chuvieco E, Cocero D, Riaño D, Martín P, Martínez-Vega J, de la Riva J, Pérez F. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(3): 322-331.
- [61] Zumbrennen T, Pezzatti G B, Menéndez P, Bugmann H, Bürgi M, Conedera M. Weather and human impacts on forest fires: 100 years of fire history in two climatic regions of Switzerland. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(12): 2188-2199.
- [62] 许沂金. 龙岩地区森林火灾的规律. 森林防火, 1986, (3): 12-16.
- [63] 舒展. 气候变化对大兴安岭塔河林业局森林火灾的影响研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [64] Guo F T, Selvalakshmi S, Lin F F, Wang G Y, Wang W H, Su Z W, Liu A Q. Geospatial information on geographical and human factors improved anthropogenic fire occurrence modeling in the Chinese boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, 46(4): 582-594.