

基于 GIS 与 RS 的山东森林火险因子及火险区划*

黄宝华^{1,2,3,4} 张 华^{1**} 孙治军⁴ 周利霞⁵

(¹中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003; ²烟台市地理信息中心, 山东烟台 264003; ³中国科学院大学, 北京 100049; ⁴中国农业大学(烟台), 山东烟台 264670; ⁵烟台市自然博物馆, 山东烟台 264000)

摘 要 森林火灾是山东森林地区严重的环境问题之一。本研究采用山东 2001—2010 年 MOD14A1 每日 1 km 温度异常/火 L3 级产品与地形、植被、天气、人为和可访问性数据, 分析评估了火灾发生原因; 收集了林火发生/未发生相关的 15 个解释变量的空间数据, 利用二项 Logistic 回归模型估计了解释变量的函数与林火存在的概率。结果表明, 高火险区域主要集中在黄河三角洲、鲁西北平原, 包括德州、菏泽、济宁、枣庄南部、临沂东南部; 中火险主要在聊城、滨州、济南北部、淄博北部、潍坊东部、泰安、日照和青岛大部分地区(包括蒙山林区、沂山林区、五莲山林区、徂徕山林区、尼山林区、泰莱林区); 低火险主要集中在济南南部、淄博南部、莱芜、青岛南部和胶东半岛(包括济南林区、崂山林区、鲁山林区、昆崙山林区、牙山林区)。Logistic 回归结果表明, 影响火灾发生的因素依次是年均温度、CTI、TPI、人口密度、植被类型、年降水量、植被盖度、距道路距离、坡向、距居民地距离、农民纯收入指数、坡度、年平均相对湿度、DEM、年蒸发量。其中前 7 个 EXP(B) 都>1, 对森林火灾发生的与否贡献较大。这些结果作为战略规划工具来更好预测森林火灾, 也可作为一种战术指南帮助森林管理人员设计区域防火措施。

关键词 人为因素; 可访问性因素; 火险; 二项 Logistic 回归

中图分类号 S718.5 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2015)5-1464-09

Forest fire danger factors and their division in Shandong based on GIS and RS. HUANG Bao-hua^{1,2,3,4}, ZHANG Hua^{1**}, SUN Zhi-jun⁴, ZHOU Li-xia⁵ (¹Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China; ²Geographic Information Center of Yantai City, Yantai 264003, Shandong, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴China Agricultural University (Yantai), Yantai 264670, Shandong, China; ⁵Yantai Museum of Natural History, Yantai 264000, Shandong, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(5): 1464-1472.

Abstract: Forest fire is one of the serious environmental problems in Shandong forest areas. MOD14A1 daily temperature anomaly/fire L3 level products of 2001-2010 and topography, vegetation, weather, anthropogenic and accessibility data in Shandong were used to evaluate fire causes. The spatial data of 15 variables that relate to forest fire/no fire were collected, and the functions of these variables and fire probability were estimated by using binomial Logistic regression model. that high fire risk areas are mainly concentrated in Yellow River delta, Shandong northwest plain, include Heze, Jinan, Zaozhuang south, Linyi southeast; moderate fire risk areas are mainly concentrated in Liaocheng, Binzhou south, Jinan north, Zibo northwest, Weifang east, Taian, Rizhao and Qingdao most areas (including Meng mountain forest region, Yi mountain forest region, Wulian mountain forest region, Culai mountain forest region, Ni mountain forest region, Tailai mountain forest region); Low fire risk areas mainly concentrated in Jinan south, Zibo south, Laiwu, Qingdao south and Shandong peninsula (including Jinan mountain forest area, Tai lai mountain forest area, Laoshan mountain forest area, Lu mountain forest area, Kunyu mountain forest region, Ya mountain forest region). Logistic regression results showed that factors influencing the fires were in order of annual average temperature, CTI, TPI, popula-

* 烟台市科技发展计划项目(2009163 2013ZH084)资助。

** 通讯作者 E-mail: hzhang@yic.ac.cn

收稿日期: 2014-10-10 接受日期: 2015-01-17

tion density, vegetation type, annual precipitation, vegetation coverage, distance from the road, aspect, distance from the residents, farmers' net income index, slope, annual average relative humidity, DEM, annual evaporation. The EXP (B) values of the top seven factors were greater than 1, having great contributions to forest fires. These results can be used as a strategic planning tool to better predict forest fire, and also be used as a tactical guide to help forest management personnel for fire protection area design.

Key words: anthropogenic factor; accessibility factors; fire danger; binomial Logistic regression.

DOI:10.13292/j.1000-4890.20150311.038

森林火灾(简称“林火”) 在生物群落生态动力学系统中起着关键作用,是生物多样性丧失、养分循环中断的主要威胁(Neary *et al.*, 1996); 林火不同程度影响森林物种组成和树龄分布(Hough *et al.*, 1943); 火灾造成烧毁、未燃森林交错分布,使整个区域呈现复杂景观异质性,影响火灾后续空间持续蔓延、火灾频率、周期、大小、强度、严重性和季节性(Wastl *et al.*, 2013); 植被火灾也是温室气体排放主要原因之一(Crutzen *et al.*, 1990; Murdiyarto *et al.*, 2004)。因此,合理评估森林火险,林火发生受各种气候和植被尺度的限制,要充分考虑影响火灾事件发生的各种因素和火的出现对人类生命财产和生态系统的潜在影响。除气候、植被和地形因素外,人为因素在林火事件中也起着重要作用(Perry *et al.*, 1998; Chas-Amil *et al.*, 2013; Hu *et al.*, 2014),使火灾风险预测难度增大。区域火险评估的主要问题是确定这些因素何种程度上影响火灾发生,特别在经济发达区域,由于土地利用变化、森林转换和分散的速率正在加快,人为火灾的范围和数量越来越大(Roberts, 2000)。景观生态学的挑战性的任务之一是建立预测模型来帮助量化火灾发生,其中对导致火灾发生和火动态特征的自然和人类环境之间相互作用是主要研究问题之一,人口快速增长和干扰是对这一事件的高度威胁(Viegas, 1998)。

随着空间信息技术发展,特别是遥感以多时段、多光谱、全天候和重复观测等特点在动态火灾探测、火灾后火烧迹地面积估算及生态系统燃烧方面得到广泛应用。考虑到山东地区林火造成的影响和潜在的损失,对火灾发生事件空间密度和时间演化研究是十分重要的。本研究分析山东火灾的主要空间因素,采用山东 2001—2010 年 MOD14A1 每日 1 km 温度异常/火 L3 级产品与地形、植被、气候、人为和可访问性数据相关联,统计分析其关系,评估林火与社会经济因素等潜在原因,利用二项 Logistic 回归建立一个统计预测模型,解释山东不同地理、气候和人文梯度下的火灾发生模式。利用遥感(RS)和地理信

息系统(GIS)分析问题(Hussin, 2008; Giriraj *et al.*, 2010; 黄宝华等, 2014; 范明虎等, 2014)有助于森林管理者和科研人员建立森林火灾减灾策略和研究区易燃植被管理。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

山东省地势复杂,中部为隆起山地,东部和南部为和缓起伏丘陵区,北部和西北部为平坦黄河冲积平原,是华北大平原一部分。鲁西北、胶东一带为平原,鲁东南、胶东为低山丘陵。区域内两大高峰为泰山(1524 m)和蒙山(1145 m),其余大部为平原。山东省植被类型主要以一年两熟旱季作物为主,约占 65%左右。其次是温带、亚热带落叶灌丛、矮林生存性较大,主要分布于鲁东和鲁中山区,占 20%; 温带常绿针叶林主要分布于鲁北地区,占 4.5%; 温带草甸主要分布于渤海湾沿海一带,占 4%; 温带、亚热带落叶阔叶林占 3%,主要分布于鲁中山区一带。山东经济发达,人口 9579 万人,居全国第二,人口密度 579 人·km⁻²,人口密度大。

1.2 研究方法

MODIS 数据产品: MOD03: 即 MODIS 数据地理定位文件; MOD12: 陆地 3 级标准数据产品,内容为土地覆盖/土地覆盖变化,1 km 季节的,生物地球化学循环,土地覆盖变化,3 级数据产品; MOD14: 陆地 2 级标准数据产品,内容为热异常-火灾和生物量燃烧,空间分辨率 1 km,确定火灾发生的位置、火灾等级以及暗火与燃烧比; MOD15: 陆地 3 级标准数据产品,内容为叶面积指数和光合有效辐射,空间分辨率 1 km,每天的及旬、月合成产品; MOD44: 陆地 3 级标准数据产品,内容为植被覆盖转换,250 m,季度、年度,判定植被覆盖转换的发生和类型; GTOPO 30 DEM 数据; 2000 年中国土地覆盖数据; 2000—2010 累年年平均气温、累年年平均相对湿度、累年年平均降水量、累年年平均蒸发量等气象数据; 1 km 人口密度数据; 农民纯收入指数(利用 2010 年山东省年

鉴);居民地、道路矢量数据。

2 结果与分析

2.1 山东火点频次与火险因子关系

气象要素+植被条件(可燃物)+火源→林火发生预报。根据林火发生的 3 个条件,综合考虑气象因素、可燃物状况和火源条件来预报林火发生的可能性。

2.2 地形参数

过去几年火行为模型已将火灾与可燃物、天气和地形相互作用下的蔓延结合。火势蔓延归因于火线强度及燃烧能量释放速率,地形通过影响可燃物类型和水分间接影响林火强度和传播,Kushla 等(1997)评估地形属性对森林野火影响。用 5 种不同的地形参数作为林火的诱发因素,包括 DEM、坡度、坡向和地形湿度指数和地形位置指数。

高程与风行为是和火倾向有关的一个重要自然地理因素,火在上坡比下坡传播速度快。山东火点主要集中在海拔 200 m 以下,随海拔的升高,火点频次减少。主要是户外人口主要在低海拔区域活动,增加火灾发生频率(图 1);坡度是海拔和险峻地形变化率指标,坡度影响火势蔓延速度和方向,通常火速度上坡比下坡快,因此陡峭斜坡火速度更快。山东火点主要集中在平地,其次为坡度<25°以下。户外人口在平缓地区滞留时间长,增加火灾发生频率(图 2);由于太阳的直晒,南面获得更多热量,土壤和植被干燥。南坡相比较于北坡,可燃物干燥且密度低。南坡上通常温度更高,风更强,湿度较低和较低可燃物湿度。山东火点主要集中在南面,其次为西坡和东坡,北坡最少(图 3)。

地形湿度指数(CTI)是一个上游面积和坡度的函数,是一个由海拔差异控制受到横向流影响的区

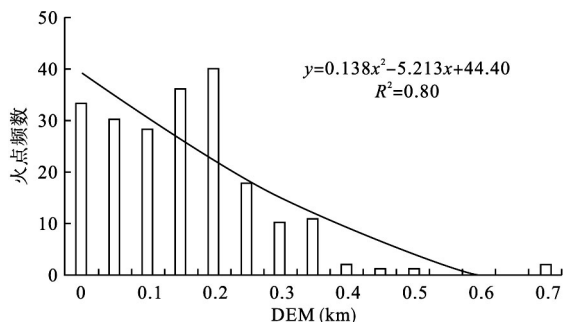


图 1 DEM 与火点频次关系
Fig. 1 Relationships between DEM and fire frequency

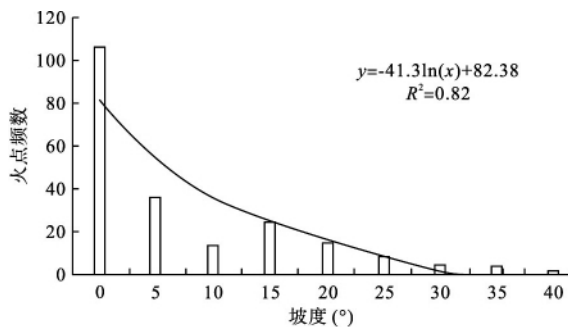


图 2 坡度与火点频次关系
Fig. 2 Relationships between slope and fire frequency

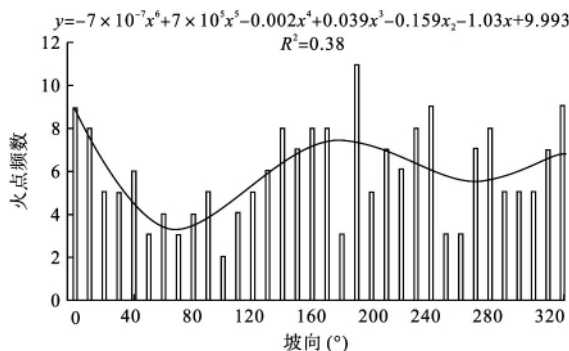


图 3 坡向与火点频次关系
Fig. 3 Relationships between aspect and fire frequency

域水空间分布。地形湿度指数复合地形属性,由集雨面积(A)和山坡坡度(tanβ)计算:

$$W = \ln(A/\tan\beta) \quad (1)$$

式中 β 为斜坡角度和 A 是上坡地区单元轮廓宽度。指数实质上是测量坡度上任一点的积聚水趋势。地形湿度指数显示高潜力的土壤水分(高值)区和枯竭区(低值),因此高 CTI 值发生火灾概率低。山东火点频次随地形湿度指数的升高而下降,且主要集中在-14 值以下(图 4)。

TPI 由 DEM 计算为一个单元高程值与邻近单元周围的平均标高之间差异,正值表示该单元比周围高,负值意味着低。

$$TPI = e - \sum_{i=1}^8 e_i/8 \quad (2)$$

基于 TPI 和斜率 4 类已经得出,峡谷底部: TPI ≤ -8; 缓坡: -8 < TPI ≤ 8, 坡度 < 6°; 陡坡: -8 < TPI ≤ 8, 坡度 ≥ 6°; 山脊线: TPI ≥ 8。山东火点主要集中在陡坡,以下依次为山脊和峡谷底部(图 5)。

2.3 植被参数

本研究,采用植被类型和平均植被覆盖度 2 个不同的植被参数,一些植被类型比其他更易燃,植被

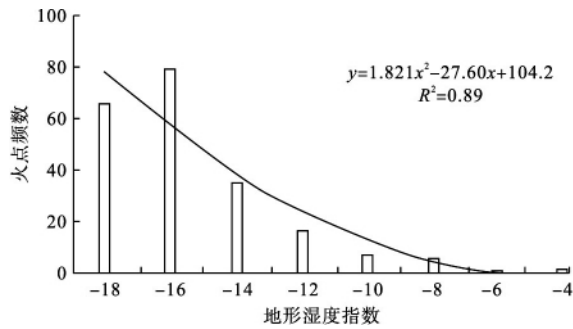


图4 CTI与火点频次关系
Fig.4 Relationships between CTI and fire frequency

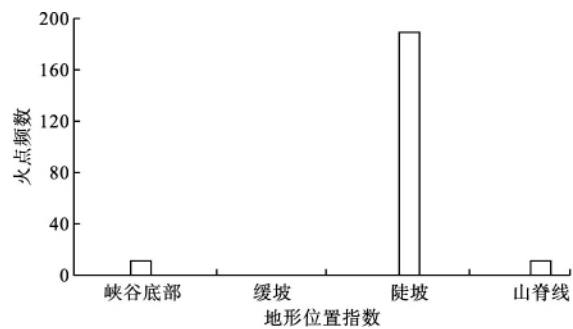


图5 TPI与火点频次关系
Fig.5 Relationships between TPI and fire frequency

覆盖度通过影响下垫面细小可燃物湿度来影响火险。

可燃物种类的不同,着火的难易程度也不同。山东主要包括绿针叶林、落叶针叶林、混交林、落叶阔叶林、稀疏灌木林、郁闭灌木林、有林草地、稀树林地、农业与自然植被镶嵌体共9类森林植被,易燃性依次降低。着火频次依次为常绿针叶林、落叶阔叶林和郁闭灌木林(图6)。

植被覆盖度低,可燃物数量少,不易燃烧;植被覆盖度高,表面温度降低,土壤水分不易蒸发,地表可燃物湿度高不易燃烧。山东火点主要集中在

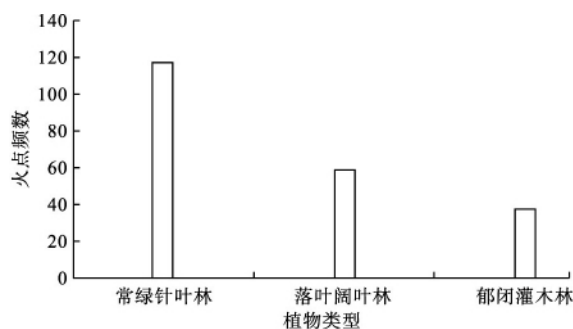


图6 植被类型与火点频次关系
Fig.6 Relationships between vegetation types and fire frequency

0.4~0.6, >0.6以上基本不发生火灾(图7)。

2.4 气候参数

气候在点火和传播中扮演着重要的角色,通过影响可燃物水分含量来提供火焰传播的条件或自然(即闪电)点火来源。本研究采用累年年平均温度(图8)、累年年平均相对湿度(图9)、累年年降水量(图10)、累年蒸发量(图11)4个不同子集参数预测地区层面火灾。

高温促进生物质快速干燥,特别是干草、枯叶、

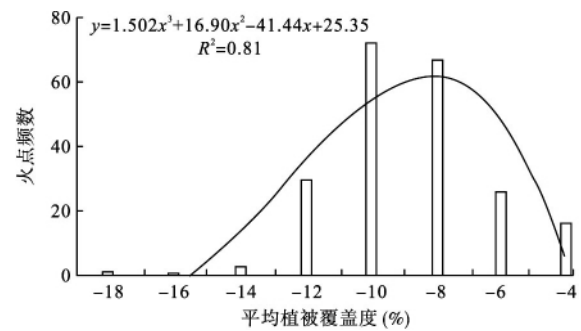


图7 平均植被覆盖度与火点频次关系
Fig.7 Relationships between average vegetation coverage and fire frequency

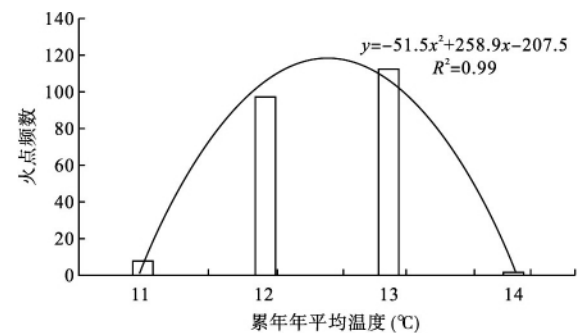


图8 累年年平均气温与火点频次关系
Fig.8 Relationships between annual average temperature and fire frequency

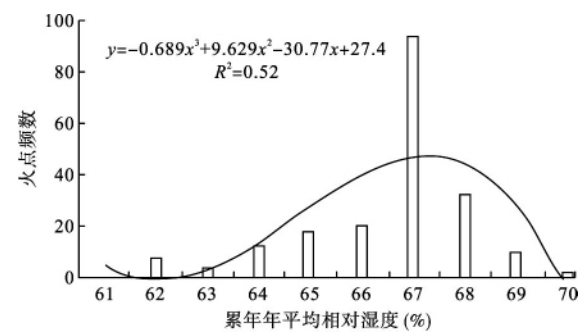


图9 累年年平均相对湿度与火点频次关系
Fig.9 Relationships between annual average relative humidity and fire frequency

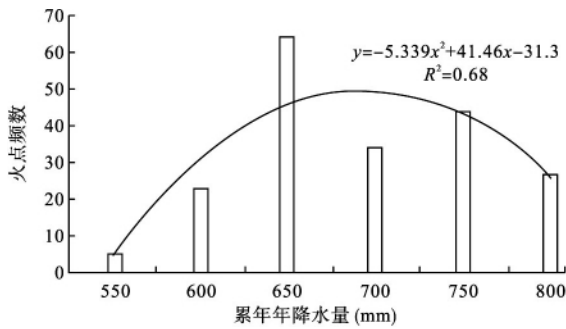


图10 累年年降水量与火点频次关系
Fig. 10 Relationships between annual precipitation and fire frequency

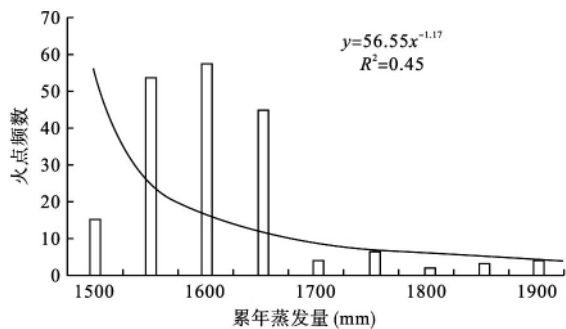


图11 累年蒸发量与火点频次关系
Fig. 11 Relationships between annual evaporation and fire frequency

针叶树和小树。高温下可燃物预热时间短比冷温度下可燃物燃烧迅速,是火灾的一个很好的指标。山东火点主要集中在年平均温度在 $12 \sim 13 \text{ }^{\circ}\text{C}$,高于 $13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 主要在夏季,由于空气湿度大,植被湿度高,不易发生火灾。低温在冬季,由于地表湿度大,不易发生火灾;相对湿度的大小直接影响到可燃物含水量的变化,累年年平均相对湿度范围为 $52 \sim 81$,火点主要集中在 $62 \sim 69$,相对湿度高火点频次减少是因为高相对湿度影响细小可燃物湿度,使其不易燃烧;降水含量是负数指标,抑制火灾。山东火点主要集中在降水量 $550 \sim 800 \text{ mm}$;蒸发量与降水量从2个反方面影响着地表的干燥程度。山东火点主要集中在蒸发量 $1500 \sim 1950 \text{ mm}$ 。

2.5 人为因素

研究区农村人口主要以农业(包括土地清理为目的烧毁的农业)、果树种植业等为主。由于经济的快速发展,林区人类活动日以频繁,导致林区火灾的增加。人为火源主要包括烧荒、炼山造林、烧牧场、烧隔离带等生产性用火和野外吸烟、取暖做饭、上坟烧纸、小孩玩火等非生产性用火。由于大多数

的人口居住在农村地区,采用用于表征人为影响的人口密度、农民人口素质(农民纯收入指数)结合作为林火诱发因素来分析人为因素在林火中的作用。

一定范围内人口密度越高越依赖周围森林资源,城市地区高密度人口($>1500 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-1}$)与低人口密度区($<300 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-1}$)呈现相同特征,即接触森林机会较少,导致森林火灾发生率小。山东火点主要集中在人口密度为 $300 \sim 700$ (图12);研究表明,林区户外工作主要为农民,其素质对林火的发生起至关重要作用,其素质与人均纯收入呈正比关系(图13)。因此,以农民人均纯收入指数((农民人均纯收入-全省农民人均纯收入)/全省农民人均纯收入)作为农民素质衡量标准。山东火点主要集中在农民纯收入指数0以下,其次为 $0 \sim 0.5$, 0.5 以上火灾发生频次少。

2.6 可访问性因素

人为火是林火发生主要原因,是最为活跃林火致灾因子。据资料统计,山东96%以上林火均是人为因素引起的,如吸烟、烧荒和上坟烧纸等。林火一般发生在居民点、道路这些人类活动频繁区域的周围。本研究,从可访问性因素主要从距居民点、道路

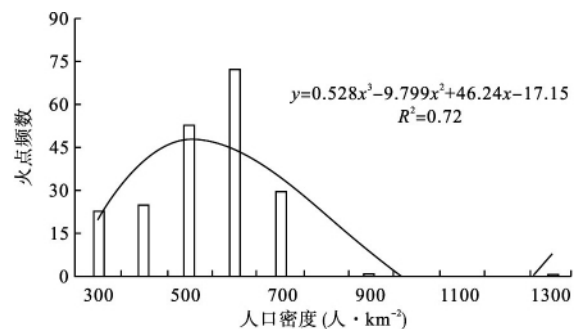


图12 人口密度与火点频次关系
Fig. 12 Relationships between population density and fire frequency

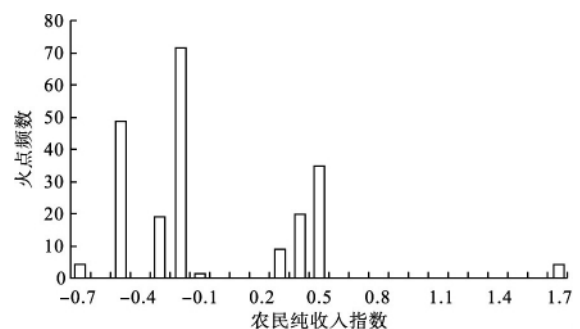


图13 农民纯收入指数与火点频次关系
Fig. 13 Relationships between farmers' net income index and fire frequency

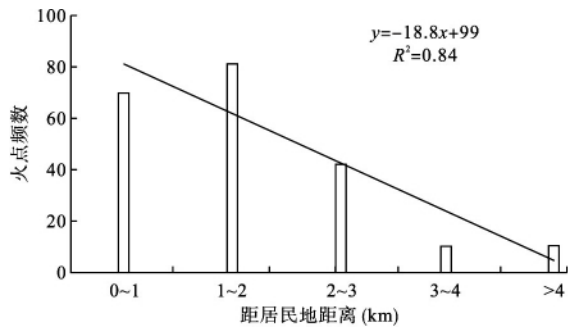


图 14 距居民地距离与火点频次关系
Fig. 14 Relationships between distance from residents and fire frequency

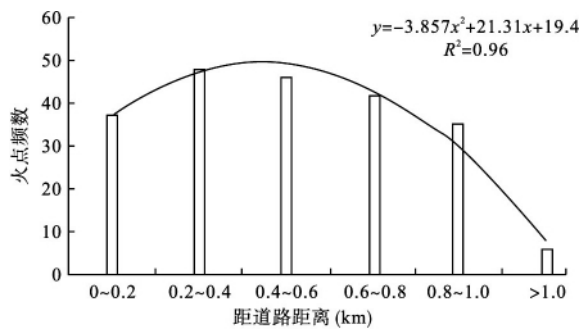


图 15 距道路距离与火点频次关系
Fig. 15 Relationships between distance from road and fire frequency

距离两方面进行分析(图 14、图 15)。

居民点周围一定范围内是林区人民活动主要区域,人为火源较多。利用 ArcGIS 缓冲区分析以居民点矢量数据为基础,以距居民点距离小于 1、1~2、2~3、3~4、>4 km 为标准建立居民点缓冲区,统计分析不同缓冲区内林火发生次数。山东火点频次主要集中在距离居民地 1~3 km 范围内;道路是表征人类活动对火险影响的重要因子,是人为火发生潜在路线。利用 ArcGIS 缓冲区分析以道路矢量数据为基础,以距离道路距离小于 0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1、>1 km 为标准建立不同道路缓冲

表 1 逻辑回归分析建模中参数值域范围

Table 1 Logistic regression analysis modeling parameter range

序号	因素	值域范围	序号	因素	值域范围
1	高程 (DEM)	-122 ~ 1521	9	累年蒸发量 (mm)	1432.58 ~ 1990.71
2	坡度 (Slope)	0 ~ 58.51	10	植被类型	0 ~ 9
3	坡向 (Aspect)	-1 ~ 359.90	11	平均植被覆盖度	0 ~ 0.79
4	地形湿度地形指数 (CTI)	-18.76 ~ 27.90	12	人口密度 (人·km ⁻²)	77 ~ 55537
5	地形位置指数 (TPI)	-120.90 ~ 161.16	13	农民纯收入指数	-0.604 ~ 1.764
6	累年年平均温度 (°C)	5.96 ~ 14.89	14	距居民地距离 (km)	0 ~ 4
7	累年年平均相对湿度 (%)	52 ~ 80	15	距道路距离 (km)	0 ~ 1
8	累年年降水量 (mm)	473.47 ~ 1042.94			

区。山东林火均发生在距离道路 1 km 以内,占总数的 97%,与道路距离加大,林火发生次数变小。

2.7 Logistic 统计分析

2.7.1 Logistic 回归模型

林火发生/不发生为应变量互斥二项分类,它同时有许多自变量可能对结果产生影响,且这种影响不一定是线性的,可采用二项 Logistic 回归进行分析(邓欧等,2012)。Logistic 回归是一种用于多因素的曲线模型,特别适用于子应变量为多项分类的数据。在预测林火发生/不发生情况下,将 MOD14A1 每日 1 km 温度异常/火 L3 级产品与地形、植被、气候、人为和可访问性等变量数据结合进行解释与统计分析。采用二项 Logistic 回归模型对山东森林火险建模,其分布响应的概率可以在数学上解释变量函数。回归分析中林火发生/不发生作为因变量和其他作为自变量,多个自变量逻辑回归模型表示火灾发生概率 p :

$$Z = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = B_0 + B_1X_1 + \dots + B_kX_k \quad (3)$$

$$p = \frac{e^z}{1+e^z} \quad (4)$$

式中 B_0, B_1, \dots, B_p 系数; X_1, X_2, \dots, X_p 为独立变量; e 为自然对数。采用最大似然方法估计逻辑回归模型的参数。在逻辑回归框架下评估解释变量所有可能组合。利用向前逐步逻辑回归的预测变量 P 为 0.1 进入和 $P > 0.15$ 去除来选择最好模型独立变量子集。排除最后一步分析变量 > 0.05 的值,未添加更多的解释变量。结果变量在山东各个地区的林火发生/不发生分别编码为 1 和 0,这些变量作为因变量。然后其余地形、植被、气候、人为和可访问性变量在逻辑回归框架作为独立解释变量。Wald 统计是评估模型的一个重要标准,Wald 统计是常用的测试独立变量逻辑回归系数的显著性。利用 ArcGIS 将表 1 数据进行重分类。

表2 方程中的变量
Table 2 Variables in the equations

模型变量	回归系数 <i>B</i>	标准误差	Wals 检验值	自由度	显著性	回归系数的 指数函数 $\text{Exp}(B)$
DEM X_1	-0.173	0.013	166.485	1	0.000	0.841
坡向 X_2	-0.035	0.016	5.117	1	0.024	0.965
坡度 X_3	-0.119	0.013	90.013	1	0.000	0.888
CTI X_4	0.075	0.017	20.454	1	0.000	1.078
TPI X_5	0.072	0.010	56.817	1	0.000	1.075
累年年平均温度 X_6	0.128	0.014	86.399	1	0.000	1.137
累年年平均相对湿度 X_7	-0.154	0.017	84.854	1	0.000	0.857
累年年降水量 X_8	0.036	0.012	9.447	1	0.002	1.036
年平均蒸发量 X_9	-0.182	0.019	96.232	1	0.000	0.834
植被类型 X_{10}	0.062	0.015	18.395	1	0.000	1.064
平均植被覆盖度 X_{11}	0.026	0.012	4.826	1	0.028	1.026
人口密度 X_{12}	0.068	0.010	45.814	1	0.000	1.070
农民纯收入指数 X_{13}	-0.065	0.008	59.286	1	0.000	0.937
距居民地距离 X_{14}	-0.044	0.023	3.685	1	0.050	0.957
距道路距离 X_{15}	-0.030	0.008	13.357	1	0.000	0.971
常数项	-4.050	0.196	427.953	1	0.000	0.017

2.7.2 山东林火风险模型 在0.05的显著性水平上,各林火影响因子相应的显著性值均<0.05,顺利通过Wald检验(表2)。EXP(*B*)表示林火发生品频数与不发生频数之比。即林火因子每增加一个等级,森林火灾发生变化情况。逻辑回归框架结果表明,在山东不同地区,影响火灾发生依次是累年年平均温度、CTI、TPI、人口密度、植被类型、累年年降水量、平均植被覆盖度、距道路距离、坡向、距居民地距离、农民纯收入指数、坡度、累年平均相对湿度、DEM、累年蒸发量。其中前7个EXP(*B*)都>1,对森林火灾发生的与否贡献较大。因子中累年平均温度影响着植被干燥程度,进而影响点燃程度;CTI和TPI从地形上影响着植被湿度;人口密度表明人类活动对森林火灾的影响;不同植被类型,不同易燃性,对火险有着直接的影响。说明了森林火灾发生3个必须具备的条件的重要性,物质基础——可燃物(包括树木、草灌等植物);重要条件——火险天气;主导因素——火源。DEM与TPI表明了火灾发生的位置情况,平均植被覆盖度调节下垫面可燃物湿度来影响火险。根据表1建立山东林火风险预测模型(设其值为*Z*):

$$Z = -4.05 - 0.73X_1 - 0.035X_2 - 0.119X_3 + 0.075X_4 + 0.072X_5 + 0.128X_6 - 0.164X_7 + 0.036X_8 - 0.182X_9 + 0.062X_{10} + 0.026X_{11} + 0.068X_{12} - 0.065X_{13} - 0.044X_{14} - 0.03X_{15} \quad (5)$$

将*Z*带入公式(2)得到火险概率,根据计算得

到的森林火险概率值,按照概率等间距方法将山东省分为无火险区、低火险区、中火险区、高火险区和极高火险区5类森林火险区(图16、图17)。由图16可知,高火险区域主要集中在黄河三角洲、鲁西北平原,包括德州、菏泽、济宁、枣庄南部、临沂东南部;中火险主要在聊城、滨州、济南北部、淄博北部、潍坊东部、泰安、日照和青岛大部分地区(包括蒙

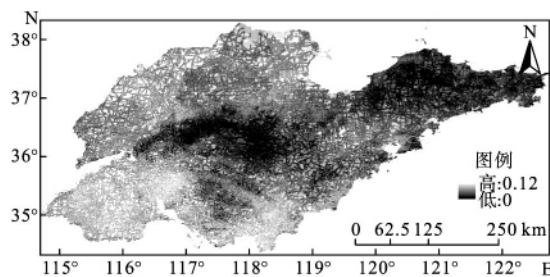


图16 山东火险概率示意图
Fig. 16 Fire probability in Shandong

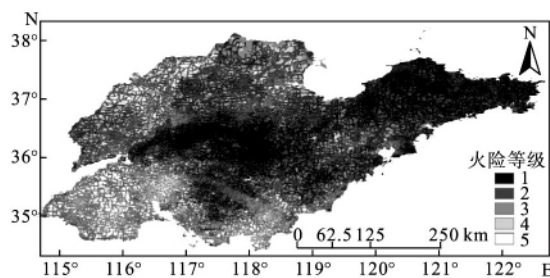


图17 山东火险区划等级示意图
Fig. 17 Fire danger division rate in Shandong

山林区、沂山林区、五莲山林区、徂徕山林区、尼山林区、泰莱林区); 低火险主要集中在济南南部、淄博南部、莱芜、青岛南部和胶东半岛(包括济南林区、崂山林区、鲁山林区、昆崙山林区、牙山林区)。

3 结论与讨论

采用山东 2001—2010 年 MOD14A1 每日 1 km 温度异常/火 L3 级产品与地形、植被、天气、人为和可访问性数据相结合分析评估火灾的发生原因。地形参数主要从火点的位置分布、接受日晒量、火灾蔓延情况和火点位置分析; 植被参数从着火的难易程度可燃物种类、影响下垫面可燃物湿度的平均植被覆盖度分析; 气候参数从影响可燃物湿度的温度、降水量和蒸发量分析; 人为参数从人为火源, 即人口密度和能反映从事户外运动主要人口的农民素质的农民纯收入指数分析; 可访问性因素主要从离居民地和道路远近来分析。

山东火点主要集中在海拔 200 m, 坡度 $<25^\circ$ 以下, 坡向在 150~240, 即南和西南方向之间, 地形湿度指数(CTI) 在-14 以下和陡坡。植被类型不同着火频次不同, 依次为常绿针叶林、落叶阔叶林和郁闭灌木林。火点发生在中等植被覆盖度值间。累年年平均温度在 12~13 $^\circ\text{C}$, 累年年平均相对湿度 62~69, 累年年降水量 550~800 mm, 累年蒸发量 1500~1950 mm 是气象因素中的火点频发区间。人口密度在 300~700 是林火发生高发区。农民纯收入指数与林火呈现较好的相关性, 主要在 0.5 以下。随居民地和道路距离的增大, 林火发生频次减小。

通过空间采样构建的林火分布和林火影响因子间的 Logistic 林火风险模型拟合效果较好, 顺利通过模型检验。经图层运算得到森林火险概率分布图的基础上, 按照概率等间距方法将山东省分为无火险区、低火险区、中火险区、高火险区和极高火险区 5 类森林火险区。山东森林火险地域分布明显, 高火险区域主要集中在黄河三角洲、鲁西北平原, 包括德州、菏泽、济宁、枣庄南部、临沂东南部; 中火险主要在聊城、滨州、济南北部、淄博北部、潍坊东部、泰安、日照和青岛大部分地区(包括蒙山林区、沂山林区、五莲山林区、徂徕山林区、尼山林区、泰莱林区); 低火险主要集中在济南南部、淄博南部、莱芜、青岛南部和胶东半岛(包括济南林区、崂山林区、鲁山林区、昆崙山林区、牙山林区)。

Logistic 回归得出的定量结果提供了山东森林

地区的风险优先级。然而, 由于数据的差距和随后的建模方法的局限性, 火概率风险模型的质量依赖于用来创建它的数据的质量。结合与其他生物物理和社会经济变量相关的火灾统计数据集, 在 Logistic 回归框架下提供研究区域最佳预测森林火灾风险。鉴于潜在解释变量相关的限制, 模型的结果仍然是有意义的, 因为之前其他研究者报道过这些诱发火灾的因素。过去传统方法森林消防是隔离带和指导方针, 例如, 林业部门在国家的不同易发生火灾地区采用 5~10 m 宽隔离带, 隔离带内的所有植被均被砍伐干净。但这些实践在人口压力低是成功的, 而现在不再有效。

现有的林业人力资源与造成森林退化的人类干扰(大多数是由于森林火灾) 是不呈比例的。因此, 集约管理以防止、检测和抑制森林火灾是必需的。开发有效的消防管理策略, 森林管理者和环境科学家需要利用各种生物物理和社会经济参数, 可以帮助预测火灾和实施必要的缓解策略。评估一定区域内的潜在火险需要潜在火险环境, 即生物物理信息和天气条件。本研究表明, 火险因子可以用来评估决定火灾风险的植被敏感性; 遥感数据的空间信息结合 GIS 和统计模型, 允许消防管理者和业务人员预测何时何地最有可能发生森林火灾; 当地林业部门可以采用其数据库和模型, 并结合不同类型的信息评估潜在的火灾风险。

参考文献

- 邓 欧, 李亦秋, 冯仲科, 等. 2012. 基于空间 Logistic 的黑龙江省林火风险模型与火险区划. 农业工程学报, 28(8): 200-204.
- 范明虎, 樊 红, 李新广. 2014. 一种适用于林火预测的并行计算模型. 武汉大学学报: 工学版, 47(1): 135-140.
- 黄宝华, 孙治军, 张 华. 2014. 潜在森林火险评估方法研究——以山东省为例. 灾害学, 29(4): 116-121.
- Chas-Amil ML, Touza J, García-Martínez E. 2013. Forest fires in the wildland-urban interface: A spatial analysis of forest fragmentation and human impacts. *Applied Geography*, 43: 127-137.
- Wastl C, Schunk C, Lüpkea M, et al. 2013. Large-scale weather types, forest fire danger, and wildfire occurrence in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168: 15-25.
- Crutzen PJ, Andreae MO. 1990. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*, 250: 1669-1678.
- Giriraj A, Babar S, Jentsch A, et al. 2010. Tracking fires in India using advanced along track scanning radiometer (A)

- ATSR data. *Remote Sensing* ,**2**: 591–610.
- Hough AF ,Forbes RD. 1943. The ecology and silvics of forests in the high plateaus of Pennsylvania. *Ecological Monographs* ,**13**: 299–320.
- Hu TY ,Zhou GS. 2014. Drivers of lightning- and human-caused fire regimes in the Great Xing' an Mountains. *Forest Ecology and Management* ,**329**: 49–58.
- Hussin YA ,Matakala M ,Zagdaa N. 2008. The applications of remote sensing and GIS in modeling forest fire hazard in Mongolia// The International Archives of the Photogrammetry , Remote Sensing and Spatial Information Sciences , Vol. XXXVII. (Part B8. Beijing) : 289–294.
- Kushla JD ,Ripple WJ. 1997. The role of terrain in a fire mosaic of a temperate coniferous forest. *Forest Ecology and Management* ,**95**: 97–107.
- Murdiyarsa D ,Lebel L ,Gintings AN , et al. 2004. Policy responses to complex environmental problems: Insights from a science-policy activity on transboundary haze from vegetation fires in Southeast Asia. *Agriculture , Ecosystems and Environment* ,**104**: 47–56.
- Neary DG ,Overby SA ,Gottfried GJ , et al. 1996. Nutrients in fire dominated ecosystems. General Technical Report RM-289// US Department of Agriculture , Forest Service , Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station ,Fort Collins ,CO: 107–117.
- Perry GLW. 1998. Current approaches to modeling the spread of wild land fire: A review. *Progress in Physical Geography* ,**22**: 222–245.
- Roberts SJ. 2000. Tropical fire ecology. *Progress in Physical Geography* ,**24**: 281–288.
- Viegas DX. 1998. Forest fire propagation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* ,**356**: 2907–2928.
-
- 作者简介 黄宝华 ,男 ,1977 年生 ,博士研究生 ,工程师 ,研究方向为 GIS 与遥感应用。E-mail: huangbaohua78@126.com
责任编辑 王 伟
-