

李煜姗, 章开美, 凌婷, 等, 2019. 井冈山森林火险等级划分及预报模型构建[J]. 气象与减灾研究, 42(2): 119-126.

Li Yushan, Zhang Kaimei, Ling Ting, et al, 2019. Grades classification and prediction model construction of forest fire alarm danger in Jinggang mountain[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 42(2): 119-126.

井冈山森林火险等级划分及预报模型构建

李煜姗¹, 章开美¹, 凌婷¹, 汪如良¹, 鲍颖²

1. 江西省气象服务中心, 江西 南昌 330096

2. 江西省森林防火预警监测信息中心, 江西 南昌 330038

摘要: 森林火灾严重威胁生态安全和国民经济, 由于不同林地的气候以及可燃物存在差异, 森林火险具有明显的区域性特征。因此, 在考虑气象因子的基础上, 将可燃物含水率引入小区域的森林火险指数的计算, 对建立更精确的小区域森林火险等级标准和预报模型具有重要意义。本研究系统地分析了 2013—2016 年井冈山地区森林可燃物含水率与气象因子的分布频率及因子间的相互关系。通过主成分分析方法对所有因子进行降维处理, 获得火险因子得分方程, 并计算出 2013—2016 年井冈山地区逐日森林火险指数, 进而构建火险等级划分和森林火险等级预报模型。结果表明: 井冈山森林火险等级划分为 5 类, 分别为低(火险值 ≤ 0.024)、较低($0.024 < \text{火险值} \leq 0.067$)、高($0.067 < \text{火险值} \leq 0.167$)、较高($0.167 < \text{火险值} \leq 0.232$)、极高(火险值 > 0.232)。基于 BP 神经网络模型构建了井冈山森林火险等级预报模型, 预测精度可达 96.4%。并利用 2013—2017 年卫星监测到的井冈山地区热源地数据对模型进行检验, 预报准确率高达 92.3%, 表明该火险等级标准和预报模型能够满足井冈山地区日常防火业务需求。

关键词: 森林火险, 等级划分, 预报模型, 山区

中图分类号: S762.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2019)02-0119-08

doi: 10.12013/qxyjzjy2019-019

Grades Classification and Prediction Model Construction of Forest Fire Alarm in Jinggang Mountain

Li Yushan¹, Zhang Kaimei¹, Ling Ting¹, Wang Ruliang¹, Bao Ying²

1. Jiangxi Provincial Meteorological Service Center, Nanchang 330096, China

2. Jiangxi Provincial Forest Fire Warning and Monitoring Information Center, Nanchang 330038, China

Abstract: Forest fire seriously threatens the ecosystem safety and economy in China, which is characterized by regional features due to the regional variation of climate and wildland fuels. The current standard grades and prediction models of forest fire danger focuses only on meteorological factors, thus introducing the moisture of wildland fuel to the model is meaningful. The distribution frequency of the meteorological factors and the wildland fuel moisture contents in Jinggang mountain during 2013 – 2016 were analyzed, and their relationships were also discussed. Based on dimension reduction of those factors using the principal component analysis, the scoring equation and values of forest fire danger in Jinggang mountain were obtained, and the values were classified into five grades as follows: low (value ≤ 0.024), relatively low ($0.024 < \text{value} \leq 0.067$), high ($0.067 < \text{value} \leq 0.167$), relatively high ($0.167 < \text{value} \leq 0.232$), very high (value > 0.232). Furthermore, the prediction model of forest fire danger grade was built using the Back Propagation (BP) Neural Network, and the prediction accuracy reached

收稿日期: 2018-11-29; 修订日期: 2019-04-24.

基金项目: 2017 年中国气象局山洪地质灾害防治气象保障工程项目“生态环境监测评估能力建设”; 2017 年江西省气象服务中心自筹经费科研项目“江西省针叶林火险等级预报模型研究”。

作者简介: 李煜姗, 助理工程师, 硕士, 主要从事气象灾害及气象服务研究, E-mail: liyushan529@163.com.

96.4%。This prediction model can directly output the grade after inputting the value of each factor, the prediction results of 13 hotspots showed that this model and forest fire danger grade can meet the needs of daily prevention of forest fire in Jinggang mountain.

Key words: forest fire risk; classification; prediction model; mountain area

0 引言

森林火灾是破坏森林最主要的自然灾害,也是当今世界最严重的突发性公共事件之一。森林火灾的频繁发生,不仅威胁林业可持续发展,也对人民的生命财产以及国家生态安全产生重要影响。20世纪80年代至21世纪初,受全球气候变化和区域极端天气以及人类活动的共同影响,我国森林火灾呈高发态势。1988—2010年全国森林火灾造成林蓄积损失总计 $2.18 \times 10^7 \text{ m}^3$,年均伤亡214人,经济损失难以估量(苏立娟等,2015)。但随着各种监测、预报技术的迅猛发展,2010年后林火发生频次不断降低。2011—2016年全国年均发生森林火灾3686次,比2001—2010年下降61%,且特别重大火灾次数显著下降,仅在2014年发生一次(国家统计局,2017)。虽然目前我国林火发生呈好转趋势,但仍存在火灾风险压力大,区域性特征明显等问题(苏立娟等,2015),各森林火灾发生频繁的区域亟需一套行之有效的森林火险等级和预报模型。

森林火险预报作为林火预防的主要技术手段,可分为火险气象等级预报、林火发生预报以及火行为预报。我国关于森林火险预报的研究起步较晚,初期只是基于美国、澳大利亚、加拿大等国家的预报模型与我国国情相结合。全国森林火险天气等级(中华人民共和国林业部,1996)中计算森林火险天气指数时,选用了日最高气温、日最小相对湿度、连续无降水日数、最大风速和植被覆盖度等5个因子进行表征,但忽略了各类森林植被和凋落物含水状况对森林火灾发生的潜在影响(Torres et al,2018),而森林植被和凋落物含水状况在不同区域内往往存在明显差异。随着气象与预报技术的飞速发展,全国各地相继研究出适合小区域的火险预报模型。张洪涛等(2003)考虑了森林植被效应的中- γ 尺度三维准静力平衡大气-土壤耦合模式,对神农架各气象要素场进行了数值模拟实验,并在此基础上构建出高分辨率的森林火险等级分布状态。3S技术的引入也使得林火监测预报取得了较大的进步,覃先林等(2008)将MODIS数据反演得到的可燃物状态指数与ArcGIS平台计算得到的背景指数综合考虑,

利用计算得出的火险指数对全国森林火险等级进行了划分。付桂琴等(2013)则利用卫星监测的土壤水分以及热源点数据对河北省原有的森林火险气象等级预报模型进行改进,使得中度等级以上火险的预报准确率达98.8%。但是目前关于森林火险等级预报的方法很多都集中在查表计算火险指标数值,再根据综合得分结果进行预报(张学艺等,2006;何泽能等,2013),这种权值打分法使森林火险指标取值存在较严重的阶跃现象,往往差异微小的数据会计算出差距较大的火险等级,预报误差较大。BP神经网络是一种前馈传递的网络模型,能够实现对状态复杂、难以准确建模的曲线进行拟合,具有模型清晰、结构简单、计算量小等优点,是目前使用最广泛的神经网络模型之一(王敏等,2013),在预报分析中,BP神经网络的应用前景很好(陈媛等,2007;林志强等,2014)。林志强等(2014)研究指出,基于BP神经网络算法模拟西藏林区气象、数值预报资料与火险等级之间的耦合关系不仅可直接输出日火险等级,且具有极高的准确率,不足的是忽视了可燃物含水状况对火险指数的影响。因此,有必要在森林气象火险因子的基础上,引入小区域内各种可燃物的含水率,共同推导森林火险指数,建立适用于小区域的火险等级。同时,利用BP神经网络模拟气象和可燃物含水率等火险因子与火险等级之间的耦合关系,构建适用于小区域的森林火险等级预报模型。

江西是我国林业大省,森林覆盖率达60.01%,居全国第二(国家统计局,2017;李柏贞等,2018),其中井冈山作为江西代表性的亚热带山地林区,森林覆盖率达81.2%。井冈山发生火灾不仅会破坏森林资源,还会对整个区域内的生态平衡产生不利影响。因此建立适用于井冈山地区的森林火险等级划分标准和预报模型对于预防森林火灾的发生,减少火灾造成的经济损失和保护森林生态系统具有重要意义。文中拟利用因子分析(主成分)等数据统计方法,对2013—2016年的日值气象数据以及林业部门提供的林业数据进行综合分析,建立井冈山森林火险等级划分标准,并利用BP神经网络算法构建森林火险等级预报模型,旨在为井冈山森林防火业务应用提供支持。

1 资料和方法

1.1 站点概况

井冈山地处湘东赣西边界(113°49′—114°23′E, 26°27′—26°49′N),平均海拔 381.5 m,属亚热带季风性气候,年平均气温 14.2 °C,年平均降雨量 1 856.3 mm,雨季集中在 5—7 月。井冈山森林资源丰富,森林面积达 1.27×10^5 hm²,以用材林为主,覆盖面积为 4.68×10^4 hm²,还包括其他材用林 7 000 hm²,防护林 2.13×10^4 hm²,活立木蓄积量 8.04×10^6 m³。

1.2 火险因子选取及数据来源

参考“全国森林火险天气等级”(中华人民共和国林业部,1996)和“森林火险气象等级”(中国气象局,2016)选取日最高气温、日平均相对湿度、日平均风速、日降水量(20—20 时)、连续无降水日数等因子作为气象火险因子。2013—2016 年井冈山气象资料由江西省气象信息中心提供。森林可燃物包括优势树种可燃物和凋落物等,因此选取可燃物湿度棒含水率和 0—2 cm 凋落物含水率作为可燃物含水率火险因子,2013—2016 年井冈山可燃物含水率资料和 2013—2017 年卫星监测热源点数据由江西省森林防火预警监测信息中心提供。文中将基于气象火险因子和可燃物火险因子计算森林火险指数,划分井冈山森林火险等级和构建火险等级预报模型。

1.3 火险等级分类

在森林火险等级的影响因子中,由于各指标的量纲不同,导致变量的分散程度大。故需要对原始数据进行归一化处理以消除由于数据量纲不同而带来的影响,提高计算精度。归一化处理公式:

$$X_i^* = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

其中, i 为变量编号, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (样本总数), X_i^* 为归一化后变量值, X_i 为归一化前变量值, X_{\min} 为归一化前变量最小值, X_{\max} 为归一化前变量最大值。

采用降维的方法(因子分析)对各森林火险因子进行主成分提取,根据各成分对总变异的贡献率的大小,将众多的原始变量综合成较少的几个因子,并利用各变量在各因子中的载荷,计算因子得分:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (2)$$

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_n] \quad (3)$$

$$F = A^T X \quad (4)$$

其中, X 为变量, x_n 为第 n 个变量, A 为因子载荷,

a_n 为第 n 个变量在该因子中的载荷系数, F 为因子得分。

对森林火险因子的主成分,根据各因子中各变量的载荷系数值,确定各因子对火险的贡献,得到各因子的得分函数,再计算森林火险指数。其计算式(曹珊珊,2014):

$$S = \sum_{i=1}^n F_i P_i \quad (5)$$

其中, S 为森林火险指数值, n 为提取的因子个数, F_i 为第 i 个因子的得分值, P_i 为第 i 个因子的方差贡献率。

参考王晓云等(2001)的方法,将计算得出的 2013—2016 年森林火险指数值(逐日)组成的集合按照 1 级(低)15%、2 级(较低)20%、3 级(高)45%、4 级(较高)15%及 5 级(极高)5%的比例划分为 5 个火险等级。

1.4 模型构建

BP 神经网络采用 3 层网络结构,以影响森林火险的 7 个因子作为输入神经元,相应火险等级为输出神经元,即输入层神经元数量为 7,输出层神经元数量为 1,隐含层数量计算式为

$$l = \sqrt{n + m} + a \quad (6)$$

其中, n 为输入层神经元个数, m 为输出层神经元个数, a 为 1—10 的常数,文中隐含层数量设为 8。输入层到隐含层和隐含层到输出层的传递函数分别为 S 型正切函数(tansig)和纯线性函数(purelin),具体结构见图 1。其中样本数据中训练数据、验证数据和测试数据分别占比 70%、15%和 15%。网络训练参数设定 Levenberg-Marquardt BP 作为误差

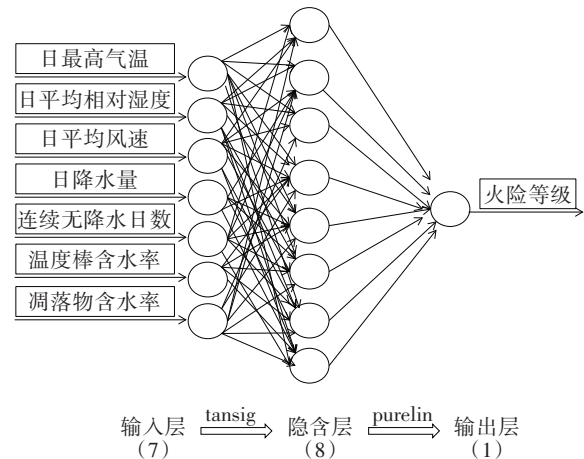


图 1 BP 神经网络结构

Fig. 1 Structure of BP neural network

修正的训练函数(trainlm),最大训练次数为100,训练目标为0.001。

2 森林火险因子间的相关关系

图2分别显示了2013—2016年井冈山地表0—2 cm凋落物和优势树种湿度棒的含水率频率分布。0—2 cm凋落物含水率(样本数为1 218)在0.14—2.64 g/g范围内均有分布,但主要分布于

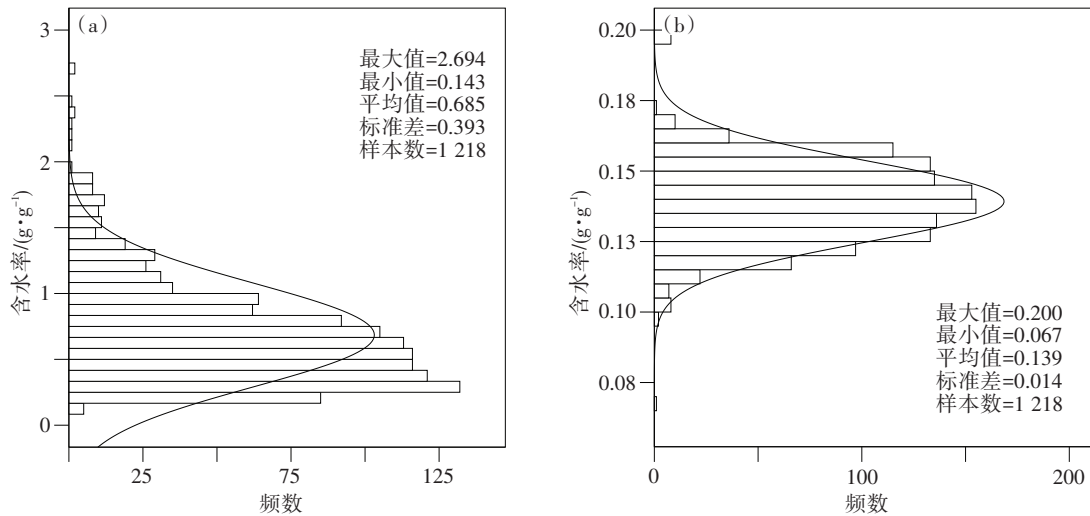


图2 2013—2016年井冈山地表0—2 cm凋落物(a)和优势树种湿度棒(b)的含水率分布频数

Fig. 2 Water distribution rate of 0—2 cm litter (a) and dominant tree species humidity bar (b) in Jinggang Mountain during 2013—2016

图3分别显示了2013—2016年井冈山日最高气温、日均相对湿度、日均风速、日降水量和连续无降水日数的分布频率,其样本数均为1 461个。日最高气温主要分布在 $-3.4\text{—}33.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15\text{—}31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数相对较多,说明井冈山温度较高日数偏多。日均相对湿度为 $37\%\text{—}100\%$,其分布频次随空气相对湿度的升高而升高,说明井冈山森林水汽充沛,有利于减少林火的发生。日均风速为 $0\text{—}4.7\text{ m/s}$,且分布频次随着风速的增强而呈先升高后降低的正态分布趋势,峰值出现在 $0.5\text{—}0.6\text{ m/s}$ 范围内。日降水量在 $0\text{—}131.1\text{ mm}$ 范围内均有分布,但分布频次随着日降水量的升高而逐渐降低。连续无降水日数在 $0\text{—}21\text{ d}$ 内均有分布,其分布规律与日降水量一致。日降水量和连续无降水日数分布频次说明井冈山虽然年降雨的天数不多,但很少出现连续多日无降水情况,这也有利于减少林火的发生。

表1给出了所有森林火险因子进行相关分析结果。分析发现,0—2 cm凋落物含水率和可燃物湿度棒含水率均与降水量、空气相对湿度呈显著正相

关,与连续无降水日数呈负相关。当空气湿度高于可燃物(0—2 cm凋落物和可燃物湿度棒)含水率时,空气相对湿度越大,可燃物吸收的水分越多,含水率增加。当空气湿度低于可燃物含水率时,空气湿度越大,可燃物水分蒸发越慢,其含水率下降速率也随之变慢(胡海清等,2016)。同时,空气温度也会影响地表凋落物与可燃物湿度棒含水率,且对地表凋落物含水率的影响更明显,温度越高,可燃物水分蒸发越快,含水率越低(闵盈盈,2012)。风则会通过降低空气湿度,加速可燃物表面水分蒸发而降低凋落物与可燃物湿度棒含水率。

0.2—1.0 g/g,其约占总数的82.2%,说明井冈山0—2 cm凋落物长期处于相对干燥的状态,这将有利于森林火险的发生。湿度棒含水率呈正态分布,1 218个湿度棒含水率在 $0.07\text{—}0.20\text{ g/g}$ 范围内均有分布,但主要集中在 $0.12\text{—}0.16\text{ g/g}$,占比为86.7%,说明井冈山的优势树木长期处于湿度适中的状态。

关,与连续无降水日数呈负相关。当空气湿度高于可燃物(0—2 cm凋落物和可燃物湿度棒)含水率时,空气相对湿度越大,可燃物吸收的水分越多,含水率增加。当空气湿度低于可燃物含水率时,空气湿度越大,可燃物水分蒸发越慢,其含水率下降速率也随之变慢(胡海清等,2016)。同时,空气温度也会影响地表凋落物与可燃物湿度棒含水率,且对地表凋落物含水率的影响更明显,温度越高,可燃物水分蒸发越快,含水率越低(闵盈盈,2012)。风则会通过降低空气湿度,加速可燃物表面水分蒸发而降低凋落物与可燃物湿度棒含水率。

3 森林火险指数和等级划分

采用因子分析方法提取主成分,能将较多的原始变量综合成较少的综合指标,表2给出了7个森林火险因子的主成分分析结果。分析可见,第1—3个公因子累积携带了原始信息量的67.3%,可以解释变量的大部分信息。而其余公因子的特征值均小于1,表明其所携带的信息量小于平均一个原始变

量的信息量。因此,只需提取公因子 1—3 即可实现对森林火险指数的较好解释。表 3 为各森林火险因子的得分系数矩阵,根据 1.3 节中的式(4)、(5)即可得到因子的得分函数和森林火险指数值。将 2013—2016 年森林火险指数值(逐日)组成的集合

划分为 5 个等级,用作井冈山森林火险等级标准,从弱至强依次为:1 级(低)、2 级(较低)、3 级(高)、4 级(较高)、5 级(极高),且赋予了不同火险等级不同的颜色来表征(表 4)。

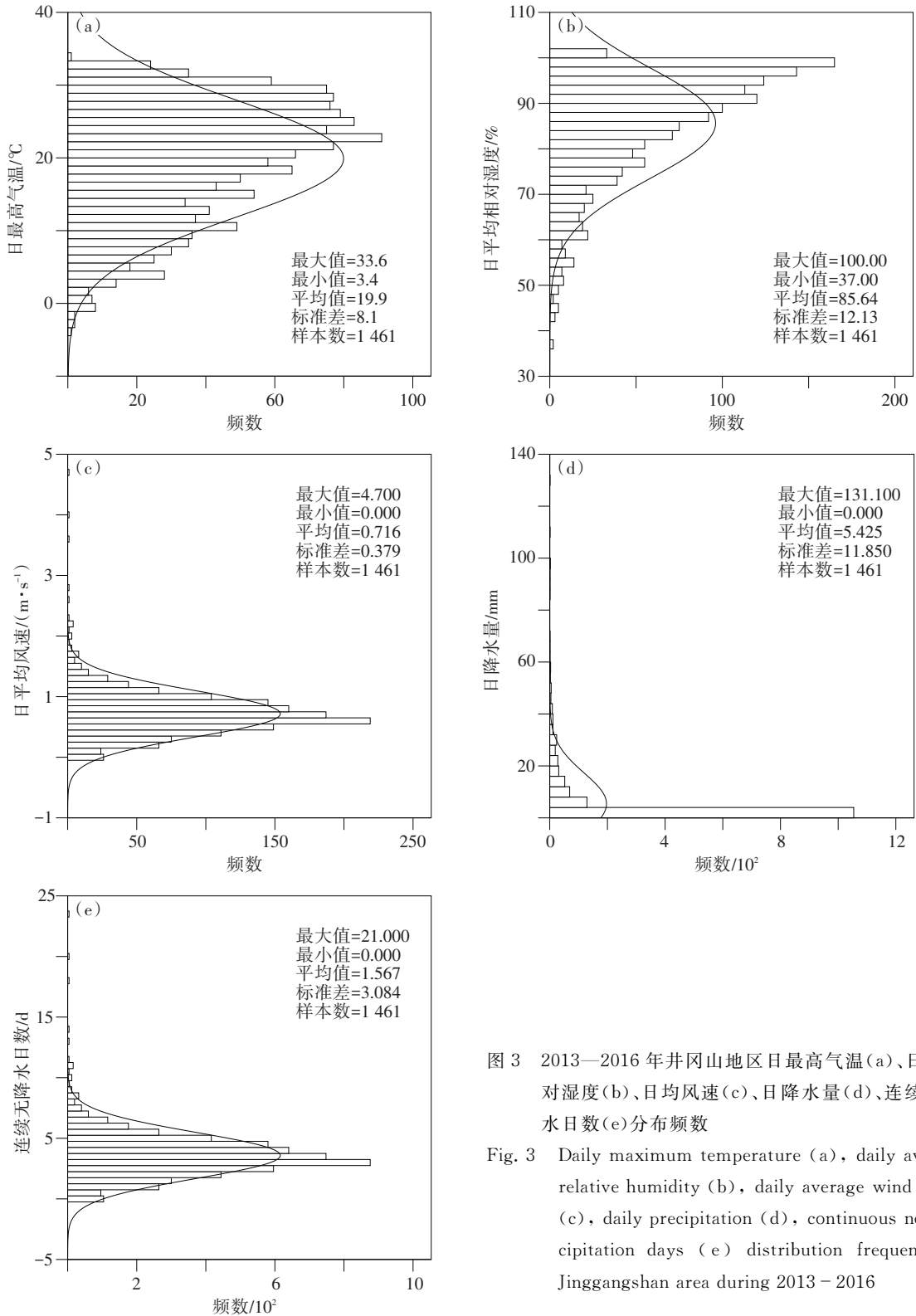


图 3 2013—2016 年井冈山地区日最高气温(a)、日均相对湿度(b)、日均风速(c)、日降水量(d)、连续无降水日数(e)分布频数

Fig. 3 Daily maximum temperature (a), daily average relative humidity (b), daily average wind speed (c), daily precipitation (d), continuous no precipitation days (e) distribution frequency in Jinggangshan area during 2013 - 2016

表1 森林火险因子间相关系数
Table 1 Correlation analysis of fire risk factors

森林火险因子	0—2 cm 凋落物含水率	可燃物湿度棒含水率	日最高气温	日均相对湿度	日均风速	日降水量	连续无降水日数
0—2 cm 凋落物含水率	1.00						
可燃物湿度棒含水率	-0.05	1.00					
日最高气温	-0.14**	-0.02	1.00				
日均相对湿度	0.16***	0.53***	-0.07	1.00			
日均风速	-0.09*	-0.36***	0.15**	-0.13**	1.00		
日降水量	0.04	0.13**	0.07	0.32***	0.19***	1.00	
连续无降水日数	-0.08*	-0.49***	-0.13**	-0.60***	0.12**	-0.25***	1.00

注：*、**、***分别表示在0.05、0.01、0.001水平上有显著相关。

表2 森林火险因子主成分的特征值和方差贡献率
Table 2 Characteristic values and variance contribution rates of all components

成分	初始特征值		
	合计	方差/%	累积/%
1	20.28	32.60	32.6
2	1.42	20.30	52.9
3	1.01	14.40	67.3
4	0.91	13.00	80.2
5	0.61	8.67	88.9
6	0.44	6.32	95.2
7	0.33	4.76	100.0

表3 森林火险因子得分系数矩阵
Table 3 Scoring coefficients of all factors in principal components

森林火险因子	成分		
	1	2	3
0—2 cm 凋落物含水率/%	-0.023	0.117	-0.633
可燃物湿度棒含水率/%	-0.352	0.190	-0.067
日最高气温/℃	0.019	0.023	0.619
日平均相对湿度/%	-0.370	-0.100	0.001
日平均风速/(m·s ⁻¹)	0.158	-0.601	0.062
日降水量/mm	-0.170	-0.633	-0.167
连续无降水日数/d	0.350	0.043	-0.117

表4 森林火险等级划分和描述
Table 4 Grade classification and description of forest fire risks

级别	名称	火险指数	危险程度	表征颜色
1	低火险	≤0.024	低	绿
2	较低火险	(0.024,0.067]	较低	蓝
3	较高火险	(0.067,0.167]	高	黄
4	高火险	(0.167,0.232]	较高	橙
5	极高火险	>0.232	极高	红

4 森林火险等级预报模型构建

以2013—2016年各森林火险因子逐日值为输入神经元,相应的森林火险等级为输出神经元,利用BP神经网络构建森林火险等级预报模型。图4给

出了模型对数据集的网络训练结果。分析发现,在迭代次数达到11次时模型预测结果达到最优,森林火险等级的预测结果准确率达96.4%,可实现井冈山森林火险等级的精准预测。

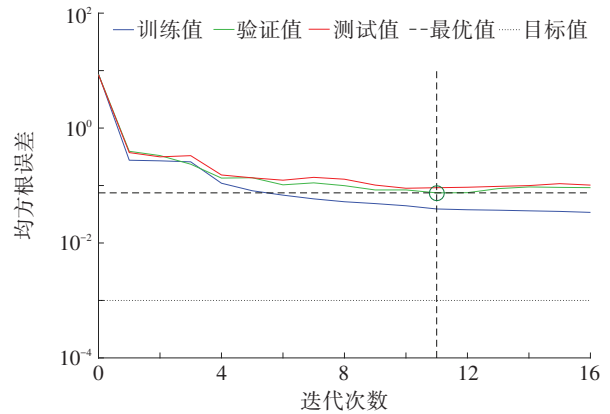


图4 井冈山森林火险等级BP神经网络模型训练结果
Fig. 4 Training results of forest fire danger level in Jinggang mountain in BP neural network model

为了检测模型的预测性能是否满足要求,随机抽取2013—2017年防火期内卫星监测井冈山地区热源点数据进行检验。将13条热源点数据所对应的天气实况和可燃物含水率值带入训练好的网格中进行模拟(表5)。结果表明,13条记录中有12条达

表5 2013—2017年井冈山地区13次森林火险预报模型模拟结果
Table 5 Simulation results of 13 forest fire risk prediction models in Jinggangshan area from 2013 to 2017

日期	火险等级	日期	火险等级
2013年12月	4级	2015年1月	3级
2013年12月	4级	2015年1月	3级
2014年1月	5级	2015年2月	4级
2014年1月	5级	2016年2月	5级
2014年1月	5级	2016年2月	3级
2014年12月	3级	2017年3月	3级
2015年1月	2级		

到了3级火险及以上,其中有7条达到了4级或以上,仅有1条为2级火险。若参考森林火险气象等级预报标准,按三级及以上发布预报而言,这13条热源点数据将有12条会被及时预报,模型预测精度达92.3%。郭海峰等(2016)认为模型计算得到的火险等级落入三级较高火险及以上的等级层次里,则表明模型预测效果较好。上述结果表明该模型可满足井冈山地区森林防火日常业务需求。

5 结束语

文中综合考虑了可燃物含水率和气象因子等森林火险因素,建立了适用于井冈山地区的森林火险等级划分标准和森林火险等级预报模型。利用BP神经网络构建的森林火险等级预报模型,可通过输入森林火险因子值而直接输出森林火险等级,省略了查找火险等级表的过程,在使用过程中更加便捷。经验证,该预报模型结合火险等级划分标准具有较高的预报精度,可实现对井冈山森林火险等级的综合性预报,能够满足实际业务要求。文中将井冈山作为一个整体进行分析和模型构建,但井冈山地形多变,不同区域气候条件有所差异(付超等,2017),这不仅影响了森林植被的分布和生长,还会影响局部地区的可燃物载量,进而对局部地区的火险等级产生影响。因此,引入地形因子,是构建精细化森林火险等级预测模型的必要条件。地形因子主要包括海拔、坡度、坡向等因子,这些因子均可以通过数字高程模型(DEM)来获取,将海拔、坡度、坡向引入森林火险等级预报模型可实现对森林不同区域的火险等级进行精确预报。但是,森林火险如何区划,地形因子、气象因子和可燃物因素如何相互对应是限制精细化森林火险等级预报模型构建的主要重点和难点,今后将对其进行深入研究。此外,下一步还可通过引入可燃物含水率预报模型对该模型进行进一步优化。

参考文献 (References)

曹姗姗, 2014. 小尺度森林火险等级预报模型研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院. Cao S S. 2014. Small-scale forest fire danger rating prediction model[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry. (in Chinese)

陈媛, 陈江民, 毛紫阳, 等, 2007. 天气雷达反射率基数据质量控制的几种算法[J]. 气象与减灾研究, 30(3):48-51. Chen Y, Chen J M, Mao Z Y, et al, 2007. Algorithms on quality control of weather radar reflectivity base-data[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 30(3):48-51. (in Chinese)

付超, 湛芸, 单九生, 2017. 地形因子对降水的影响研究综述[J]. 气象与减灾研究, 40(4):318-324. Fu C, Shen Y, Shan J S, 2017. A review of the effects of terrain factors on precipitation[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 40(4):318-324. (in Chinese)

付桂琴, 张文宗, 赵春雷, 等, 2013. 河北省森林火险预报模式的改进及应用[J]. 干旱气象, 31(3):579-583. Fu G Q, Zhang W Z, Zhao C L, et al, 2013. Improvement and application of forest fire-danger forecast model in Hebei province[J]. Arid Meteor, 31(3):579-583. (in Chinese)

国家统计局, 2017. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社. National Bureau of Statistics. 2017. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press. (in Chinese)

郭海峰, 禹伟, 2016. 湖南省森林火险天气等级预测模型研究[J]. 中南林业科技大学学报, 36(12):44-47. Guo H F, Yu W, 2016. Study weather grade prediction model of forest-fire risk in Hunan province [J]. J Central South Uni Forestry Technol, 36(12):44-47. (in Chinese)

何泽能, 唐晓萍, 谭炳全, 2013. 森林火险气象条件及等级预报初探——以重庆市沙坪坝区为例[J]. 灾害学, 28(2):46-50. He Z N, Tang X P, Tan B Q, 2013. Study on meteorological condition and forecast of forest fire danger grading: a case study in Shapingba District of Chongqing [J]. J Catastr, 28(2):46-50. (in Chinese)

胡海清, 陆昕, 孙龙, 等, 2016. 气温和空气相对湿度对森林地表细小死可燃物平衡含水率和时滞的影响[J]. 植物生态学报, 40(3):221-235. Hu H Q, Lu X, Sun L, et al, 2016. Effects of air temperature and relative humidity on equilibrium moisture content and time-lag of forest land surface dead fine fuels[J]. Chin J Plant Ecol, 40(3):221-235. (in Chinese)

中华人民共和国林业部, 1996. 全国森林火险天气等级(LY/T 1172-95)[S]. 北京: 中国标准出版社. Ministry of Forestry of the PRC, 1996. National forest fire risk grade(LY/T 1172-95) [S]. Beijing: China Standard Press. (in Chinese)

林志强, 罗布次仁, 罗文红, 等, 2014. 西藏林区森林火险等级中短期预报方法[J]. 中国农学通报, 30(1):93-97. Lin Z Q, Luo Z C R, Luo W H, et al, 2014. Short and mid-term prediction method of forest fire weather danger classification over Tibetan forest[J]. Chin Agric Bull, 30(1):93-97. (in Chinese)

李柏贞, 汪金福, 王怀清, 等, 2018. 江西省森林和植被碳汇价值研究[J]. 气象与减灾研究, 41(3):207-211. Li B Z, Wang J F, Wang H Q, et al, 2018. Study on the carbon sink value of forest and vegetation in Jiangxi province[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 41(3):207-211. (in Chinese)

闵盈盈, 2012. 对可燃物的湿度模型及其影响因子的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 28(4):451-454. Min Y Y, 2012. Humidity of fuel model and its impact factors[J]. J Harbin Uni Commer (Nat Sci Edition), 28(4):451-454. (in Chinese)

中国气象局, 2016. 森林火险气象等级(QX/T 77-2007)[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2016. Meteorological grade of forest fire risk(QX/T 77-2007) [S]. Beijing: Meteorological Press. (in Chinese)

- 覃先林,张子辉,李增元,等,2008.国家级森林火险等级预报方法研究[J].遥感技术与应用,23(5):500-504. Qin X L, Zhang Z H, Li Z Y, et al, 2008. Study of the prediction method of national forest fire risk grade[J]. Remot Sens Technol Appl, 23(5):500-504.(in Chinese)
- 苏立娟,何友均,陈绍志,2015.1950—2010年中国森林火灾时空特征及风险分析[J].林业科学,51(1):89-96. Su L J, He Y J, Chen S Z, 2015. Temporal and spatial characteristics and risk analysis of forest fires in China from 1950 to 2010[J]. Sci Silva Sin, 51(1):89-96.(in Chinese)
- Torres F, Romeiro J, Santos A, et al, 2018. Fire danger index efficiency as a function of fuel moisture and fire behavior[J]. Sci Total Environ, 631-632:1304-1310.
- 王敏,邹滨,郭宇,等,2013.基于BP人工神经网络的城市PM2.5浓度空间预测[J].环境污染与防治,35(9):63-66. Wang M, Zhou B, Guo Y, et al, 2013. BP artificial neural network-based analysis of spatial variability of urban PM 2.5 concentration[J]. Environ Pollut Control, 35(9):63-66.(in Chinese)
- 王晓云,潘莉卿,李炬,等,2001.北京城近郊区火险气象等级预报方法[J].气象科技,29(4):51-54. Wang X Y, Pan L Q, Li J, et al, 2001. Prediction method of the meteorological grade of forest fire risk in the suburb of Beijing[J]. Meteorol Sci Technol, 29(4):51-54.(in Chinese)
- 张洪涛,祝昌汉,张尚印,等,2003.森林火险等级分布模拟——中小尺度动力学模式[J].自然灾害学报,12(1):56-62. Zhang H T, Zhu C H, Zhang S Y, et al, 2003. Simulation of forest fire grade distribution by using three dimensional air: soil coupling model[J]. J Nat Disaster, 12(1):56-62.(in Chinese)
- 张学艺,李凤霞,2006.宁夏森林火险天气等级预报方法的研究[J].宁夏农林科技,(2):7-8. Zhang X Y, Li F X, 2006. Study of the prediction method of the forest fire risk grade in Ningxia province[J]. Ningxia J A&F Sci Technol, (2):7-8.(in Chinese)