

文章编号: 1000-5692(2006)04-0439-06

杉木幼林地表可燃物含水率对主要火环境因子的响应模型

张思玉^{1,2}, 蔡金榜¹, 陈细目¹

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 南京森林公安高等专科学校, 江苏 南京 210046)

摘要: 为探索地表可燃物含水率对主要火环境因子的响应机制, 于2003年和2004年的两个春季对福建省南平市原福建林学院后山的杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工幼林进行了定点观测, 以地表可燃物含水率为因变量(y), 以风速(x_1)、空气相对湿度(x_2)、空气温度(x_3)和地表温度(x_4)为自变量, 采用多项式逼近和多元回归建立了单因子多项式函数、多元线性回归模型, 并对模型的复相关系数和偏相关系数进行了 t 检验和实际验证。结果表明: 风速不适于参与模型的建立, 其余3个因子参与建立的三元线性模型 $y = 42.345 + 0.736x_2 - 1.011x_3 - 0.981x_4$ 为最佳; 模型 $y = 33.406 + 0.541x_2 - 1.538x_3$ 和 $y = 19.049 + 0.630x_2 - 1.147x_4$ 也获得了较高的精度。建议对空气相对湿度和空气温度构成的双因子响应模型进一步研究, 以便获得高效快捷的估算地表可燃物含水率的指标。表3参16

关键词: 森林保护学; 杉木幼林; 地表可燃物; 含水率; 火环境; 线性模型

中图分类号: S763.2 **文献标识码:** A

森林可燃物是林火发生和蔓延的物质基础。地表可燃物能否被引燃主要取决于含水率的高低, 而含水率又受到火环境因子特别是天气条件的制约^[1~5]。研究中, 直接测定地表可燃物含水率, 所取得的数据虽然较真实, 但并不实用, 特别是在研究与林火发生和蔓延的相互作用时, 测定值与实际值有较大的差异。因为很少有人会在林火发生时或者在林火蔓延的过程中到火灾现场去采集样本测定含水率(即使采集并测定了, 其数据也失去了时效), 更多的是人为事先调查测定。因此, 通过研究地表可燃物对主要火环境因子的响应机制, 可以通过观测主要火环境因子, 进一步探讨地表可燃物含水率对林火发生和蔓延的影响。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林是我国南方林区的主要林分之一, 特别是杉木人工幼林, 由于地表分布着大量的阳性杂草而成为森林火灾的策源地^[6~9]。所以, 研究杉木幼林地表可燃物含水率对主要火环境因子的响应机制, 对有效预防我国南方森林火灾的发生, 降低森林火灾的危害, 有着积极的促进作用。以往的研究大多偏重于地表可燃物含水率变化对林火发生和林火行为的影响, 与森林可燃物负荷量和分布之间的关系, 与气象要素和森林火险之间的关系^[10~15]等方面, 较少从地表可燃物含水率对主要火环境因子的响应机制去研究。一些研究虽然涉及到了地表可燃物含水率变化与主要气象要素之间的关系, 但更多的是使用气象台(站)的观测数据来拟合经验方程。即使是野外的, 大多是瞬时的, 不连续的, 这些数据很难真实地反映地表可燃物含水率对主要火环境因子

收稿日期: 2005-10-31; 修回日期: 2006-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30371171)

作者简介: 张思玉, 教授, 硕士生导师, 从事森林防火和生态学等研究。E-mail: siyuzhang@tom.com; siyu85878817@163.com

的响应。该研究采用定点定时的野外数据采集方法,配合可燃物含水率的测定,对地表可燃物含水率对主要火环境因子的响应模型进行研究,期望能获得以筒(易于测定的因子)代繁(可燃物含水率)的实用观测指标,为林火的预测预报及有效控制森林火灾服务。

1 研究区自然概况

研究区设在福建省南平市延平区西芹镇原福建林学院后山。该区气候属于中亚热带季风气候区,年平均气温为 $14.0\sim 19.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $1\,500\sim 1\,900\text{ mm}$,年平均空气相对湿度 $80\%\sim 85\%$,土壤为发育在花岗岩、片麻岩和页岩等成土母质上的红壤和黄红壤,土层深厚,土壤肥沃,是杉木的适宜分布区。

研究区原为果树林,砍伐后进行阶梯状整地,并于2000年种植1年生杉木幼苗,做研究时林分尚未郁闭,郁闭度为 $0.3\sim 0.4$ 。杉木幼树平均胸径为 3.9 cm ,平均高 3.56 m 。坡向以西南和西北为主,平均坡度 32° 。林下植被的植物种类较单纯,主要有盐肤木 *Rhus chinensis*, 胡枝子 *Lespedeza bicolor*, 芒萁 *Dicranopteris dichotoma*, 铁芒萁 *Dicranopteris linearis*, 五节芒 *Miscantus floridulus*, 菝葜 *Smilax china*, 蛇莓 *Duchesnea indica*, 狗脊蕨 *Woodwardia japonica* 等。

2 研究方法

2.1 样(方)地设置

通过踏查,选择3个坡向(西南、西北和东北),分上、中、下3个坡位选择有代表性的地段设置 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$ 的大样方,共9个大样方。考虑到福建春季植物萌发“返青”较早,为保证野外观测期间地表可燃物“干枯”状态的一致性,在正式调查之前,先将每个大样方内的死可燃物和活可燃物(常绿植物除外)收集收割后,分别灌木和草本均匀地平铺在每个样方中。同时,为了保证野外所取得样本的一致性和有足够的样方可供取样,又将大样方分为 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 的小样方,以后每天依次在小样方中抽取测定可燃物含水率的样本,即使连续无雨,也可供64 d取样(实际观测中,到春季防火期结束并剔除降水的天数,小样方并没有使用完)。

2.2 调查测定方法

于每天的9:00, 13:00和17:00分别使用三杯风向风速仪观测风速(x_1),使用温湿度计观测相对湿度(x_2)和空气温度(x_3),使用地面温度表观测地表温度(x_4)。下雨当天以及雨后的第2天和第3天不观测(因为距离降水只有 $1\sim 2\text{ d}$,发生火灾的危险性很小^[3]),即观测时间取两次降水的间隔大于等于 3 d 。

每次观测后,均在小样方中根据可燃物粗细不同分别取草本植物 $10\sim 50\text{ g}$,灌木 $100\sim 500\text{ g}$ 样本装入纸袋,带回实验室即刻放入干燥箱烘干至恒量(两次干质量基本相符)。

2.3 数据整理

2.3.1 可燃物含水率(y)计算

$$\text{可燃物含水率} = \frac{\text{可燃物鲜质量} - \text{可燃物烘干质量}}{\text{可燃物烘干质量}} \times 100\%$$

每个样方中分别草、灌取样的目的是便于快捷地取得烘干质量,分别称量并求出各自的含水率之后,取平均值作为该次该样方的可燃物含水率。每天随观测时间取3次样,3次平均作为当天该样方的可燃物含水率。

2.3.2 主要火环境因子 每个大样方为1个观测点,分别观测风速(x_1),相对湿度(x_2),空气温度(x_3)和地表温度(x_4)。每天观测3次,3次的平均值作为当天该观测点的观测因子值。即,每天取得9组(y, x_1, x_2, x_3, x_4)整理后的数值。

2.3.3 建立模型及筛选 使用2003年春季防火期内观测的108组数据,对多因子基于逐步回归建立多元线性模型,对于单因子则用多项式进行逼近,根据(复)相关系数初步筛选模型。并在2004年春季防火期内的调查数据(不参与建模)中随机抽取18组数据用于所选择模型的实际验证。

3 模型及检验

3.1 单因子的多项式及多因子的线性模型

对单因子而言, 使用多项式逼近是探索自变量和因变量之间相关关系非常有效的方法。作者分别对地表可燃物含水率与风速、相对湿度、空气温度和地表温度的相互关系进行多个多项式逼近, 选择相关系数最大的一个多项式进行 t 检验^[19]。分别两因子、三因子和四因子组合对地表可燃物含水率的影响进行了线性模拟, 并对复相关系数进行了 t 检验。详见表 1。

表 1 单因子多项式、多因子线性模型及其检验

Table 1 One-variable polynomials and multivariate linear regression equations and their t -test

序号	自变量	模型	(复)相关系数	t 值
(1)	x_1	经相关系数检验均不显著		
(2)	x_2	$y = 179.591 + 9.672x_2 - 0.130x_2^2 + 0.001x_3$	0.794	13.447 **
(3)	x_3	$y = -319.410 + 94.604x_3 - 7.285x_3^2 + 0.223x_3^3 - 0.003x_3^4$	0.770	12.425 **
(4)	x_4	$y = -115.307 + 40.015x_4 - 1.837x_4^2 - 0.020x_4^3 + 0.002x_4^4$	0.817	14.587 **
(5)	x_1, x_2	$y = -36.111 + 4.041x_1 + 0.962x_2$	0.673	9.323 **
(6)	x_1, x_3	$y = -106.496 + 2.684x_1 - 3.078x_3$	0.661	9.026 **
(7)	x_1, x_4	$y = 87.683 + 1.417x_1 - 2.225x_4$	0.625	8.204 **
(8)	x_2, x_3	$y = 33.406 + 0.541x_2 - 1.538x_3$	0.692	9.823 **
(9)	x_2, x_4	$y = 19.049 + 0.630x_2 - 1.147x_4$	0.710	10.331 **
(10)	x_3, x_4	$y = 106.069 - 2.06x_3 - 0.896x_4$	0.674	9.349 **
(11)	x_1, x_2, x_3	$y = 29.056 + 4.042x_1 + 0.573x_2 - 1.538x_3$	0.698	9.940 **
(12)	x_1, x_2, x_4	$y = 14.779 + 4.147x_1 + 0.661x_2 - 1.152x_4$	0.716	10.460 **
(13)	x_1, x_3, x_5	$y = 74.770 + 1.113x_1 - 2.141x_3 - 0.532x_5$	0.604	7.729 **
(14)	x_2, x_3, x_4	$y = 42.345 + 0.736x_2 - 1.011x_3 - 0.981x_4$	0.827	15.001 **
(15)	x_1, x_2, x_3, x_4	$y = 24.086 + 4.135x_1 + 0.605x_2 - 0.362x_3 - 1.016x_4$	0.717	10.540 **

说明: $t_{0.01}(106) = 2.627$; $t_{0.01}(105) = 2.628$; $t_{0.01}(104) = 2.628$; $t_{0.01}(103) = 2.629$ 。

3.2 多因子线性模型偏相关系数的 t 检验

对所选模型的相关系数进行 t 检验均很显著, 只能说明所选因子(自变量)与地表可燃物之间存在着相关关系, 至于各因子的影响大小, 还要看偏相关系数。为此, 对表 1 中的模型(5)~(15)的偏相关系数做了检验。详见表 2。

表 2 模型(5)~(15)的偏相关系数的 t 检验

Table 2 The t -test of partial correlation coefficients between each fire environment and moisture content of surface fuel in Chinese fir plantation

模型序号	风速(x_1)	相对湿度(x_2)	空气温度(x_3)	地表温度(x_4)	t_α
(5)	1.270	9.273 **			$t_{0.05}(105) = 1.985$
(6)	0.843		8.978 **		$t_{0.01}(105) = 2.628$
(7)	0.431			-8.140 **	
(8)		3.047 **	-2.634 **		
(9)		4.922 **		-3.534 **	
(10)			-3.509 **	-2.004 *	
(11)	1.306	3.207 **	-2.644 **		$t_{0.05}(104) = 1.985$
(12)	1.379	5.110 **		-3.565 **	$t_{0.01}(104) = 2.628$
(13)	0.522		-3.811 **	-1.987 *	
(14)		5.595 **	-4.241 **	-3.231 **	
(15)	1.375	3.485 **	-5.404 **	-2.377 *	$t_{0.05}(103) = 1.986$ $t_{0.01}(103) = 2.629$

3.3 模型的筛选

仅从(复)相关系数的大小看,表1中除风速与地表可燃物含水率的相关关系不显著外,其余14个模型的相关系数检验都是极显著,并且,地表温度(x_4)与含水率(y)多项式函数的相关系数达0.817,仅次于模型(14)的0.827。然而从表2可以看出, x_4 与 y 的相关程度并不比 x_2 和 x_3 密切,因为偏相关系数的 t 检验中,凡是 x_4 与 x_2 或 x_3 在模型中同时出现时, x_4 与 y 的 t 值的绝对值均没有 x_2 或 x_3 的大,说明单因子模型的稳定性较差。

另外,风速(x_1)与地表可燃物含水率(y)的偏相关系数检验结果均不显著。综合表1和表2的结果,筛选时可以排除有 x_1 的模型。因此,只有(8)(9)(10)(14)这4个模型可供选择。由于模型(10)中 x_4 只达到显著水平,没有达到极显著水平,也可以排除。因此,推荐如下3个模型进行试用并检验:

$$y = 33.406 + 0.541x_2 - 1.538x_3;$$

$$y = 19.049 + 0.630x_2 - 1.147x_4;$$

$$y = 42.345 + 0.736x_2 - 1.011x_3 - 0.981x_4。$$

3.4 模型的精度验证

为了试验模型的精度,使用从2004年观测数据中抽取的18组数据进行验算,详见表3。

表3 模型(8)(9)(14)的估计精度

Table 3 Simulation precision of three models

相对湿度 (x_2) / %	空气温度 (x_3) / °C	地表温度 (x_4) / °C	含水率 (y) / %	模型(8) 精度 / %	模型(9) 精度 / %	模型(14) 精度 / %
80	13.5	12.8	70.6	73.8	71.1	94.1
86	14.1	13.0	71.2	77.8	77.9	90.5
90	13.1	13.2	78.3	73.6	70.8	95.0
82	13.8	13.1	68.9	78.1	76.3	90.8
84	13.2	13.2	70.5	79.6	75.9	90.5
87	13.4	13.0	69.6	83.7	81.9	86.9
87	14.1	14.4	73.4	75.1	72.0	94.1
88	14.3	15.1	70.1	81.2	77.4	90.1
92	15.4	15.4	76.6	71.2	70.9	96.5
50	27.8	26.6	23.3	68.4	83.7	93.4
52	26.8	27.6	21.5	94.2	93.3	81.3
51	27.4	28.8	21.9	83.9	79.3	91.5
48	28.8	29.1	18.1	80.0	86.2	90.5
49	29.5	30.8	16.2	88.6	89.0	88.2
52	30.8	32.0	18.6	68.7	76.9	97.2
49	28.5	30.4	16.8	95.5	88.4	85.0
47	30.5	31.9	12.8	92.7	93.9	86.4
53	27.1	28.6	23.4	85.3	80.8	90.4
平均				80.6	80.3	90.7

说明: 相对误差 = $\frac{|\text{模型估计值} - \text{实测值}|}{\text{实测值}} \times 100\%$; 精度(%) = $100 - \text{相对误差}$ 。

4 结论与讨论

4.1 主要火环境因子与地表可燃物含水率

笔者所选择的4个主要火环境因子对地表可燃物含水率的影响差异很大,特别是风速因子,不仅偏相关系数均未能通过 t 检验,而且使用多项式逼近仍然找不到相关关系显著的表达式。4个主要火环境因子对地表可燃物含水率的影响程度大小,按照偏相关系数检验的结果可以排序如下:空气相对

湿度>空气温度>地表温度>风速。

这个结论和现实是吻合的。因为野外观测的风速是瞬时风速, 瞬时风速的变化很大, 而地表可燃物含水率对瞬时风速很难作出实时的响应; 地表可燃物特别细小的死地被物体内含水率是随着空气相对湿度的大小而变化的, 这是森林防火工作者的共识, 该文的结论对此作了进一步的证实; 地表可燃物对空气温度的响应不及空气相对湿度, 相对湿度影响可燃物体内水分平衡是直接的, 而温度影响可燃物体内平衡是间接的, 所以对温度的响应更复杂, 产生误差的因素更多; 地表可燃物对地表温度的响应不及空气温度, 是因为地表微环境发生作用所致, 特别是在福建的山地, 地形非常破碎, 地表的凹凸不平都会影响地表可燃物含水率。

尽管该文所选择的 4 个主要火环境因子理论上对地表可燃物含水率影响都很大, 但是, 该文的主要目的之一是为地表可燃物含水率野外测定寻找替代指标, 因此可以肯定地说, 不能选择风速作为间接估算地表可燃物的指标。

除了风速之外, 其余 3 个因子均可作为地表可燃物含水率的替代指标使用。

4.2 地表可燃物含水率对主要火环境因子的响应模型

就单因子而言, 尽管个别的回归模型可以达到较高的相关性, 但作为响应模型使用是不适当的。在建立多因子响应模型时, 最好不要把风速作为一个因子加进去。

该文所建模型经理论和实际数据检验表明, 使用空气相对湿度、空气温度和地表温度这 3 个因子共同构建响应模型效果最好。模型(14)为最佳模型。

该文只是根据经验选择了 4 个火环境因子, 是否还有其他更合适的因子, 有待进一步研究。

尽管该文给出的最佳模型是由空气相对湿度、空气温度和地表温度这 3 个自变量构成, 但是, 在今后的实践中, 应该进一步探讨由空气相对湿度和空气温度 2 个自变量构成的响应模型。因为目前观测空气相对湿度和空气温度的温湿度表不仅便于携带, 而且数据误差也小, 而观测地表温度的则是玻璃温度表, 不便携带。

参考文献:

- [1] 张思玉, 张志翔. 杉木马尾松木荷人工纯林与混交林火灾隐患的对比分析[J]. 森林防火, 2001(3): 27-30.
- [2] 张国防, 林文革, 花昆福, 等. 杉木人工林地表可燃物含水率变化规律[J]. 福建林学院学报, 2000, 20(2): 97-100.
- [3] 何忠秋. 森林可燃物含水率模型的研究[J]. 森林防火, 1995(2): 15-16.
- [4] 陈金林, 吴春林, 姜志林, 等. 栋林生态系统凋落物分解及磷素释放规律[J]. 浙江林学院学报, 2002, 19(4): 367-371.
- [5] 陈爱玲, 游水生, 林德喜. 阔叶林地在不同更新方式下土壤理化性质的变化[J]. 浙江林学院学报, 2001, 18(2): 127-130.
- [6] 郑焕能. 人工针叶林燃烧性的研究[J]. 林业科学, 1983, 19(2): 145-153.
- [7] 陈存及, 施小芳. 防火林带树种选择的研究[J]. 福建林学院学报, 1988, 8(1): 1-12.
- [8] 张国防, 欧文琳, 陈瑞炎, 等. 杉木人工林地表可燃物负荷量动态模型的研究[J]. 福建林学院学报, 2000, 20(3): 97-100.
- [9] 徐爱俊, 李清泉, 方陆明, 等. 基于 GIS 的森林火灾预报预测模型的研究与探讨[J]. 浙江林学院学报, 2002, 19(3): 285-288.
- [10] ROTHERMEL R C. Predicting behavior of the 1988 Yellowstone fire: projections versus reality [J]. *Int J Wildland Fire*, 1991, 1(1): 1-10.
- [11] PATTEN D T, CAVE G H. Fire temperatures and physical characteristics of a controlled burn in the Upper Sonoran Desert [J]. *J Range Manage*, 1984, 37: 277-280.
- [12] CATCHPOLE E A, CATCHPOLE W R. Modelling moisture damping for spread in a mixture of live and dead fuels [J]. *J Wildland Fire*, 1991, 1(2): 101-106.
- [13] BURGAN R E, ROTHERMEL R C. *Behave: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System-FUEL Subsystem* [R]. Washington: USDA, 1984.

- [14] ANDREWS M P L. Behave: *Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System-BURN Subsystem*, Part 1 [R] . Washington: USDA, 1984.
- [15] 赵玲, 李树岭, 宋庆利. 干湿气候变化对森林火灾的影响[J] . 内蒙古气象, 2004 (1): 33—35.
- [16] 洪伟. 林业试验设计技术与方法[M] . 北京: 北京科学技术出版社, 1993.

Response models on the moisture change of surface fuel to fire environment in *Cunninghamia lanceolata* young plantation

ZHANG Si-yu^{1,2}, CAI Jin-bang¹, CHEN Xi-mu¹

(1. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Nanjing Forest Police College, Nanjing 210046, Jiangsu, China)

Abstract: In the springs of 2003 and 2004, the main fire environment and the moisture content (y) of surface fuel in *Cunninghamia lanceolata* young plantation at southwest near to Fujian Forestry College, Nanping were continuously inspected and determined in order to illuminate their interrelation. In this paper, the independent variables of wind speed (x_1), air relative humidity (x_2), air temperature (x_3) and the land surface temperature (x_4), and the moisture content of surface fuel (y) are presented with the polynomial approximation. And the multivariate linear models of x_1 , x_2 , x_3 , x_4 are established by the multivariate linear regression. After that, the authors tested the significant of multiple correlation coefficients and partial correlation coefficients with t -test, and calculated also the simulation precision of the selected three models. The results show that wind speed is not proper to construct regression models with the moisture content, on the contrary, the model with x_2 , x_3 , x_4 , is best ($y=42.345+0.736x_2-1.011x_3-0.981x_4$). $y=33.406+0.541x_1-1.538x_3$ and $y=19.049+0.630x_2-1.147x_4$ are also more precision. Lastly, the authors suggest that the response models with x_2 and x_3 should have been more studied in order to find a fast, accurate index to replace the moisture content. [Ch, 3 tab. 16 ref.]

Key words: forest protection; *Cunninghamia lanceolata* young plantation; surface fuel; moisture content; fire environment; linear model