

DOI:10.13332/j.1000-1522.20180326

帽儿山地区典型地表可燃物含水率动态变化及预测模型

满子源 胡海清 张运林 刘方策 李 远

(东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:【目的】可燃物含水率预测是林火预报研究的重要内容, 其中地表细小可燃物、半腐殖质和腐殖质含水率在一定程度上影响了林火垂直蔓延的持续性及地下火发生的可能性, 含水率变化主要是受天气状态和地形特征的影响, 而我国关于半腐殖质和腐殖质含水率动态变化及其预测模型的研究较少, 分析红松蒙古栎针阔混交林下的地表细小可燃物、半腐殖质和腐殖质 3 层可燃物含水率的动态变化, 对建立我国林火预报系统有指导作用。【方法】本研究对帽儿山地区红松蒙古栎典型针阔混交林下的地表细小可燃物、半腐殖质和腐殖质含水率进行每日监测, 同步监测林分内气象数据, 统计分析气象要素和 3 层可燃物含水率的相关性, 选择气象要素回归法建立 3 层可燃物类型的含水率预测模型。【结果】在整个监测期内, 地表细小可燃物含水率波动最大, 最小值为 10.99%, 最大值为 253.30%; 半腐殖质次之, 最小值为 19.21%, 最大值为 238.07%; 腐殖质含水率最稳定, 最小值为 48.45%, 最大值为 193.83%, 波动最小。地表可燃物含水率变化对气象因子的响应最敏感, 多与当日或前一日气象因子相关, 半腐殖质次之, 腐殖质含水率仅与空气温度相关; 建立 3 种可燃物含水率气象要素回归预测模型, 其中地表细小可燃物、半腐殖质和腐殖质的含水率预测模型平均绝对误差和平均相对误差分别为 22.2%、23.5%、17.1% 和 7.1%、14.8% 和 23.4%, 以 MRE 为 15% 为界限, 细小可燃物和半腐殖质含水率预测模型精度均能达到林火预报精度, 腐殖质含水率预测模型精度较差。【结论】综合分析可得, 3 层可燃物在防火期内有被引燃, 进而发展为森林火灾的可能, 在今后的林火预报工作中, 还应该注意地下可燃物, 包括半腐殖质和腐殖质含水率的预报。

关键词: 地表细小可燃物; 半腐殖质; 腐殖质; 含水率

中图分类号: S762.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2019)03-0049-09

引文格式: 满子源, 胡海清, 张运林, 等. 帽儿山地区典型地表可燃物含水率动态变化及预测模型[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(3): 49-57. Man Ziyuan, Hu Haiqing, Zhang Yunlin, et al. Dynamic change and prediction model of moisture content of surface fuel in Maoer Mountain of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(3): 49-57.

Dynamic change and prediction model of moisture content of surface fuel in Maoer Mountain of northeastern China

Man Ziyuan Hu Haiqing Zhang Yunlin Liu Fangce Li Yuan

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] The prediction of the fuel moisture content is the major part of forest fire research and the moisture content of surface fine fuel, semi-humus and humus determines the persistence of vertical fire and the probability of underground fire. The change of moisture content is mainly affected by weather conditions and topographical features, while there are few studies on the dynamic changes of moisture content of semi-humus and humus in China. Therefore, analyzing the dynamic changes of moisture content of these three layers of fuel has a guiding role in establishing China's forest fire forecasting system. [Method] The research conducted daily monitoring of surface fine fuel, semi-humus and humus moisture content under the typical coniferous and broadleaved mixed forest in Maoer Mountain of northeastern China, the meteorological data of forest were also monitored synchronously. This study also statistically analyzed

收稿日期: 2018-11-06 修回日期: 2019-01-10

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201404402)。

第一作者: 满子源, 博士生。主要研究方向: 林火生态与管理。Email: manziyuan3721@163.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号 东北林业大学林学院。

责任作者: 胡海清, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 林火生态与管理。Email: huhq-cf@nefu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

the correlations between meteorological elements and the moisture content of three layers of fuel, and the meteorological element regression method was used to establish a moisture content prediction model for three layers of fuel. [Result] During the whole monitor period, the moisture content of surface fine fuel fluctuated the most, with the minimum value of 10.99% and the maximum value was 253.30%. The semi-humus was the second, and the minimum value was 19.21% and the maximum value was 238.07%. The moisture content of humus was the most stable, and the minimum value was 48.45% and the maximum value was 193.83%. The change of moisture content of surface fuel was the most sensitive to the response of meteorological factors, mostly related to the meteorological factors on the current day or the previous day, followed by semi-humus, and the moisture content of humus was only related to air temperature. Three fuel types of regression prediction model for meteorological elements of moisture content were established. The average absolute error and the average relative error of the moisture content prediction model of surface fine fuel, semi-humus and humus were 22.2%, 23.5%, 17.1% and 7.1%, 14.8%, 23.4%, respectively. The prediction model of moisture content of fine fuel and semi-humus both can basically achieve the accuracy of forest fire prediction, while the accuracy of prediction model of moisture content of humus was bad. [Conclusion] The three layers of fuel may have a forest fire during the fire prevention period. Attention should be paid to the prediction of underground fuels, including the moisture content of semi-humus and humus, in future forest fire prevention work.

Key words: land surface fine fuel; semi-humus; humus; moisture content

随着全球气候变暖,森林火灾频繁发生,对森林生态系统的干扰作用逐渐增强,严重地破坏了森林生态系统的结构和功能,林火已然成为全球范围的自然灾害^[1-3]。为了应对如此频繁发生的森林火灾,急需提高林火预测预报能力,掌握森林火灾发生规律,降低林火对森林生态系统的损害^[4]。森林火灾的发生受多方面因素的影响,进行林火预测预报就需要充分考虑这些因素的作用,主要包括林分特征、可燃物特征、环境因素及人为活动等^[5]。其中,森林可燃物是重要的林分条件,特别是地表可燃物,从森林火灾发生到蔓延都起到十分重要的作用^[6-10]。可燃物含水率是影响可燃物燃烧难易程度的关键因素,其含水率的大小决定了可燃物被引燃的可能性,因此,可燃物含水率研究特别是可燃物含水率的预测是当前林火研究的重点。

可燃物含水率预测方法当前主要有4种,包括时滞和平衡含水率法、遥感估测法、气象要素回归法及过程模型法^[11]。其中过程模型法由于完全基于物理描述,描述过程过于复杂,很难在实际中应用^[12-13];遥感估测法主要应用于大尺度的可燃物含水率预测,但其精度往往较低,无法达到林火预测预报精度要求^[14];气象要素回归法理论简单,国内外进行了很多研究,但其完全基于统计方法,受研究地区及可燃物本身性质限制较大,外推效果不好^[15-19];时滞和平衡含水率法是基于物理过程,但其中关键参数通过实验获得,兼具物理和统计模型的优点,应用前景广^[20-21]。虽然之前已经进行了大量的可燃物含

水率研究,但是他们的研究大部分都是集中在地表死可燃物,对于地下可燃物,包括半腐殖质和腐殖质的含水率并未研究。地表和地下可燃物主要包括地表细小死可燃物、半腐殖质和腐殖质,半腐殖质和腐殖质的含水率在在一定程度上决定了林火垂直蔓延及林火阴燃发生的可能性等。地表细小死可燃物一旦被引燃,林火垂直蔓延的持续性对水平蔓延也有显著的影响,而且腐殖质含水率过低时($< 100\%$)^[22],极易发生阴燃,阴燃对森林生态系统损害极大。因此,研究可燃物含水率动态变化及预测模型不仅包括地表细小死可燃物含水率,还应包括半腐殖质和腐殖质含水率^[23-26]。

3种不同的类型可燃物含水率变化情况主要是通过时滞表征的。可燃物时滞是指可燃物含水率对气象因子的响应有一定的滞后性,当可燃物失去初始含水率和平衡含水率差的 $1 - e^{-1}$ 时的水分所需要的时间称为时滞^[27],根据时滞将可燃物类型划分为1、10、100和1 000 h时滞可燃物,本文研究对象地表细小死可燃物、半腐殖质和腐殖质分别对应的为1、10、100和1 000 h可燃物。

红松蒙古栎(*Pinus koraiensis-Quercus mongolica*)针阔混交林是我国东北地区最重要的典型森林群落,而且蒙古栎作为重要的伴生树种,叶片面积大且呈蜷缩状,极易被引燃^[28-29],红松松针也十分易燃,研究红松蒙古栎混交林中地上可燃物含水率动态变化及预测模型具有重要意义。因此,以红松蒙古栎针阔混交林中地表细小死可燃物、半腐殖质及腐殖质

为研究对象,分析3层可燃物含水率每日动态变化,建立含水率预测模型,为我国林火预报研究提供基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于帽儿山老爷岭森林生态系统定位站(45°20'N、127°30'E),平均海拔为300 m,境内最高海拔为805 m。该地区属于典型温带大陆季风性气候,全年平均气温为2.8℃,平均降雨量为720 mm,平均蒸发量约为1100 mm。研究区地带性土壤为暗棕壤,是在阔叶红松混交林下形成的,地表细小凋落物厚度约为3~6 cm。现有植被主要包括蒙古栎、白桦(*Betula platyphylla*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、红松、黄檗(*Phellodendron amurense*)及兴安落叶松(*Larix gmelinii*)等。

1.2 数据获取

于2016-04-10至2016-06-08(春季防火期)进行地表可燃物含水率监测实验,共计60 d。一般认为每日14:00为当日可燃物含水率最低时刻^[30],因此每日14:00进行采样。在红松蒙古栎样地中设置20 m×20 m的样方,在样方中随机设置3个样点,每个点分层采集可燃物。地表可燃物由上至下依次为细小死可燃物、半腐殖质和腐殖质,其中细小死可燃物主要指枯枝落叶等,腐殖质为黑色或褐色的有机物质,半腐殖质为介于细小死可燃物和腐殖质之间的物质。

本研究采用对破坏性的方法采集不同层可燃物。每日14:00,将每个样点的地表死可燃物、半腐殖质和腐殖质分别装入信封中,若遇降雨天气,则用纸将可燃物表面的自由水擦干,再放入信封,并在信封外面套入封口袋。采集可燃物后,迅速称可燃物鲜质量与信封质量之和为 W_H ,3层可燃物采集的质量分别约为20、60和100 g左右。将当日所有可燃物样品带回实验室在105℃下烘干至恒质量,称可燃物干质量与信封质量之和为 W_D 。称量单个信封湿质量和干质量,并分别记为 W_1 和 W_2 。野外称量时,使用预先制定的折叠板平铺在地面,将遮风挡板打开避免风速对称量的影响。

在红松蒙古栎针阔混交林中架设HOBO小型便携式气象站,获取林内气象数据。采集的气象因子包括空气温度(T)、空气相对湿度(H)、风速(W)、降雨量(R)等。气象数据监测开始时间与样品采集时间相同,为每日14:00,采集间隔为1 h。

1.3 研究方法

1.3.1 地表可燃物含水率动态变化研究

每日地表可燃物含水率通过计算3个样点的可燃物含水率算数平均值得到,每个样点的可燃物含

水率计算方法如式(1)所示:

$$M = \frac{(W_H - W_1) - (W_D - W_2)}{W_D - W_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: M 为可燃物含水率(%); W_H 为可燃物湿质量和信封质量(g); W_D 为可燃物干质量和信封质量(g); W_1 为信封湿质量(g); W_2 为信封干质量(g)。

利用单因素方差分析法分析3层可燃物含水率之间差异,并统计可燃物含水率基本特征,包括最大值、最小值、平均值及最大、最小变幅等。分别以细小死可燃物、半腐殖质和腐殖质的每日含水率为纵坐标,以采样日期为横坐标,得到可燃物含水率每日动态变化折线图。比较3层可燃物在相同天气条件下,可燃物含水率动态变化的差异。

1.3.2 可燃物含水率影响因子研究

由于可燃物特别是半腐殖质和腐殖质对气象要素的响应有一定的滞后性^[31],因此不能仅以当日或者前1日气象数据进行含水率变化进行分析。本研究用 n ($n=1\sim5$)天前的气象数据分析含水率变化受哪些气象因子的驱动^[32]。其中,空气温度、相对湿度和风速分别计算 n 天前当日的平均值,降雨计算 n 天前降雨之和,例如 T_3 表示3天前的当日平均温度, W_2 表示2天前当日平均风速, R_5 表示5天前降雨量之和。分别对3层可燃物含水率与上述选择的气象因子进行Pearson相关性分析,得到可燃物含水率与气象因子之间的相关性。

1.3.3 可燃物含水率预测模型

本研究选择气象要素回归法进行地表可燃物含水率预测。分析气象要素对可燃物含水率的影响,通过统计方法,建立气象要素及可燃物含水率之间的预测模型,称为气象要素回归法。

根据1.3.2中Pearson相关性分析得到对可燃物含水率有显著影响的因子,选择逐步回归的方法,以式(2)为方程形式,可燃物含水率为因变量,气象因子为自变量建立多元线性方程。监测实验共进行了60 d,选择80%的监测数据进行建模,剩余20%数据进行模型精度检验。

$$M = \sum_{i=0}^n X_i b_i \quad (2)$$

式中: M 为可燃物含水率(%); X_i ($i=1,2,\dots,n$)为前 i 天的气象因子变量, b_i 为待估参数。

1.3.4 预测模型精度检验

得到可燃物含水率预测模型后,将未参与建模的12组数据代入方程,得到预测可燃物含水率,根据式(3)和(4)计算模型的平均绝对误差MAE和平均相对误差MRE。最后以实测值为横坐标、预测值

为纵坐标, 绘制实测预测对比图。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i,j=1}^n |M_i - M_j| \tag{3}$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i,j=1}^n \left| \frac{M_i - M_j}{M_i} \right| \times 100\% \tag{4}$$

式中: M_i 表示活可燃物含水率实测值(%), M_j 表示可燃物含水率预测值(%)。

上述数据统计均在 Excel 2016、SPSS 18.0 和 Statistica 10.0 中进行的; 所有图例都是通过 Sigmaplot

实现。

2 结果与分析

2.1 监测期气象要素动态变化分析

图 1 给出了监测期内 14:00 时的气象要素动态变化情况, 可以看出, 在整个监测期间, 空气温度变化范围- 2.99 ~ 20.91 ℃, 相对湿度变化范围为 35% ~ 100%。空气温度和相对湿度波动较大, 但是空气温度持续上升, 空气温度和相对湿度波动正好相反, 空气温度最大时, 相对湿度最低。

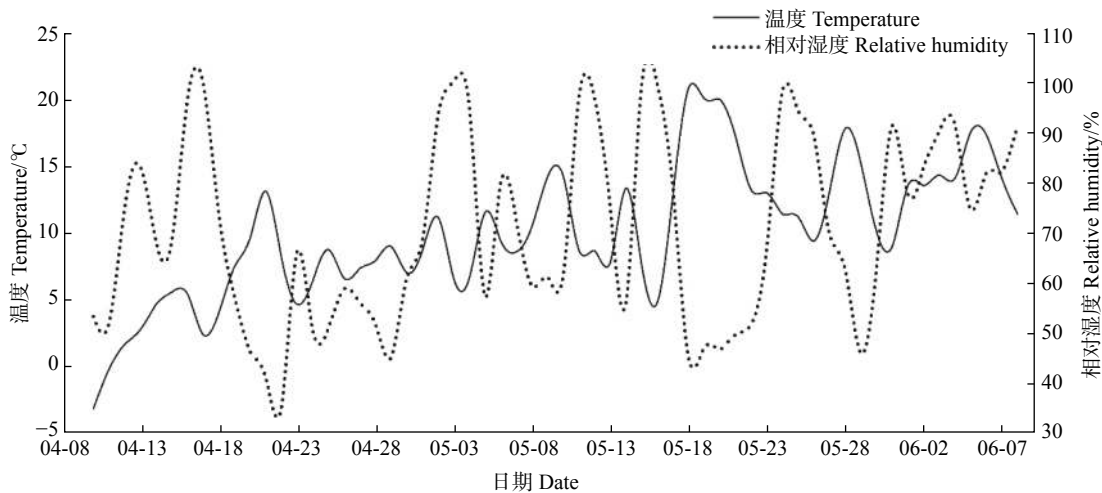


图 1 监测期间温湿度动态变化

Fig. 1 Dynamic of air temperature and relative humidity during the monitoring periods

2.2 地表可燃物含水率动态变化分析

表 1 给出 3 层地表可燃物含水率的单因素方差

分析, 可以看出, 在整个防火监测期, 3 层可燃物含水率差异极显著($P < 0.01$)。

表 1 单因素方差分析

Tab. 1 Results of ANONA analysis

项目 Item	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	平均值平方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
组间 Among groups	13.678	2	6.839	27.244	0.000
组内 Within group	44.432	177	0.251		
总计 Total	58.110	179			

表 2 给出了 3 层地表可燃物含水率在春季防火期内的统计特征。可以看出, 在整个监测期间, 细小可燃物含水率最小值为 10.99%, 最大值为 253.30%, 含水率变化区间最大; 半腐殖质含水率最小值为 19.21%, 最大值为 238.07%, 变化区间次之; 腐殖质

含水率最小值为 48.45%, 最大值为 193.83%, 变化区间最小。地表细小可燃物含水率单日最大变幅为 173.57%, 高于半腐殖质 107.80%, 腐殖质含水率单日最大变幅最小, 仅为 84.10%, 腐殖质含水率出现大的波动是在 4 月 18 日, 这是因为前几日有较大降

表 2 地表可燃物含水率统计特征

Tab. 2 Statistical characteristics of moisture content of surface fuel

%

可燃物类型 Fuel type	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Average value	单日最大变幅 Maximum value of daily range	单日最小变幅 Minimum value of daily range
细小可燃物 Fine fuel	10.99	253.30	68.40	173.57	0.26
半腐殖质 Semi-humus	19.21	238.07	132.47	107.80	1.08
腐殖质 Humus	48.45	193.83	81.97	84.10	0.59

雨,使其含水率急剧增加。

图 2 给出 3 层可燃物类型在整个监测期间含水率动态变化折线图,可以看出,不同层可燃物含水率动态变化折线具有明显的分界线,地表细小可燃

物含水率最大,半腐殖质次之,腐殖质含水率最低。整个监测期内,细小可燃物含水率波动最大,半腐殖质含水率波动较小,腐殖质含水率变化较稳定,波动最小。

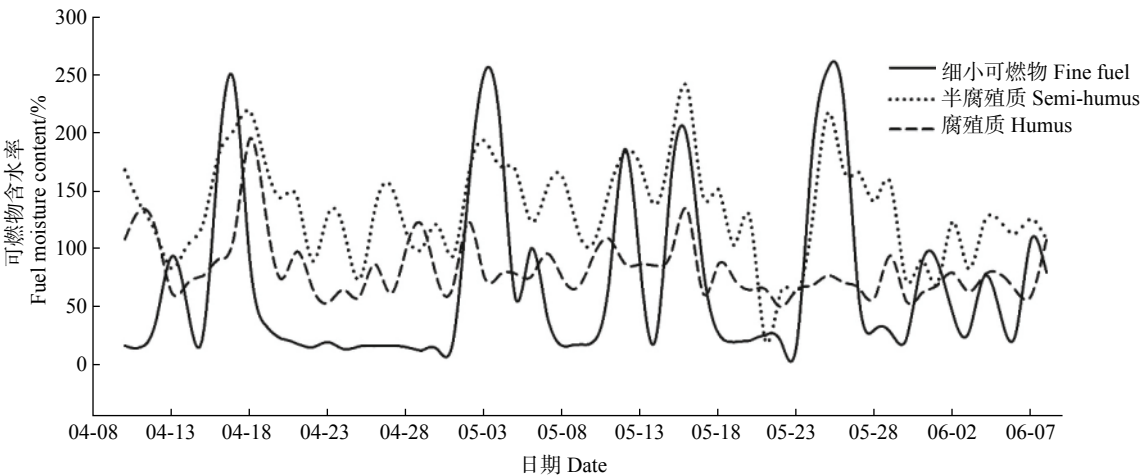


图 2 监测期间地表可燃物含水率动态变化

Fig. 2 Dynamic of surface fuel moisture content during the monitoring period

2.3 可燃物含水率影响因子分析

表 3 给出 3 层可燃物含水率与影响因子之间的相关系数。可以看出,在整个监测期间,对于空气温

度,3 层可燃物类型对日最高温度都呈显著负相关关系,细小可燃物仅与当日最高温度呈极显著负相关,半腐殖质对温度有一定的滞后,还与前 1 日平均温

表 3 可燃物含水率与影响因子相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between moisture content of fuels and impact factors

影响因子 Impact factor	细小可燃物 Fine fuel	半腐殖质 Semi-humus	腐殖质 Humus	影响因子 Impact factor	细小可燃物 Fine fuel	半腐殖质 Semi-humus	腐殖质 Humus
$T_{\max}$	-0.435**	-0.381**	-0.378**	$W_{\max}$	-0.068	0.237	0.141
$T_{\min}$	0.173	-0.174	-0.348**	$W_{\min}$	-0.079	0.054	0.019
T	-0.218	-0.305	-0.403**	W	-0.073	0.203	0.051
T_5	0.144	-0.070	-0.237	W_5	-0.138	-0.146	-0.095
T_4	0.081	-0.190	-0.275*	W_4	-0.273*	-0.082	-0.100
T_3	0.068	-0.252	-0.366**	W_3	-0.290*	-0.219	-0.087
T_2	0.061	-0.245	-0.389**	W_2	-0.238	0.007	-0.109
T_1	-0.045	-0.302*	-0.410**	W_1	-0.148	0.165	0.008
$H_{\max}$	0.477*	0.310*	0.112	$R_{\max}$	0.484**	0.228	0.035
$H_{\min}$	0.823**	0.417**	0.103	$R_{\min}$	-	-	-
H	0.800**	0.385**	0.104	R	0.714**	0.433*	0.150
H_5	0.133	0.004	0.022	R_5	0.119	0.059	0.001
H_4	0.011	0.149	0.016	R_4	0.002	0.261*	0.064
H_3	0.004	0.253	0.006	R_3	0.076	0.295*	0.024
H_2	0.178	0.317*	0.073	R_2	0.162	0.317*	0.111
H_1	0.606*	0.513**	0.171	R_1	0.647**	0.618**	0.243

注: $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 和 T 分别表示当日最高温度、最低温度和14:00的温度, T_n 表示 n 天前的平均温度; $H_{\max}$ 、 $H_{\min}$ 和 H 分别表示当日最高相对湿度、最低相对湿度和14:00的相对湿度, H_n 表示 n 天前的平均相对湿度; $W_{\max}$ 、 $W_{\min}$ 和 W 分别表示当日最大风速、最小风速和14:00的风速, W_n 表示 n 天前的平均风速; $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ 和 R 分别表示当日最大降雨量、最小降雨量和14:00的降雨量, R_n 表示 n 天前的累积降雨量。 Notes: $T_{\max}$, $T_{\min}$ and T represent the highest, lowest and 14:00 temperature of the day, respectively, and T_n represents the average temperature before n days. $H_{\max}$, $H_{\min}$ and H represent the highest, lowest and 14:00 relative humidity of the day, respectively, and H_n represents the average relative humidity before n days. $W_{\max}$, $W_{\min}$ and W represent the highest, lowest and 14:00 wind speed of the day, respectively, and W_n represents the average wind speed before n days. $R_{\max}$, $R_{\min}$ and R represent the highest, lowest and 14:00 rainfall of the day, respectively, and R_n represents the average rainfall before n days.

度负相关,腐殖质含水率对温度的滞后性最明显,前 4、3、2、1 日的当日平均温度对其均有显著影响,且随着日期与采样日期接近,影响效果增加;对于相对湿度,细小可燃物含水率与当日最高、最低、平均及前 1 日平均呈现显著正相关关系,有一定的滞后性,半腐殖质对相对湿度的响应与细小可燃物相似,但滞后性更明显,与 2 d 前的平均相对湿度也显著相关,相对湿度对腐殖质含水率没有影响;对于风速,前 4 日和前 3 日风速与细小可燃物含水率呈显著负相关关系,对半腐殖质和腐殖质都没有影响;对于降雨,细小可燃物含水率受当日最大降雨、平均降雨及前 1 日平均降雨极显著影响,且随着降雨量增加,含水率增大,相较于细小可燃物,半腐殖质对降雨的响应有一定的滞后性,主要受当日、前 4、3、2、1 日的降雨量影响,呈显著正相关关系,降雨量对腐殖质含水率没有影响。

2.4 可燃物含水率预测模型

根据 2.2 的 Pearson 相关性分析,得到对不同可燃物类型有显著相关的影响因子包括当日平均湿度、前 1 日降雨、当日最大降雨量、当日降雨量、前 1 日平均温度及当日平均温度,以可燃物含水率为因变量,有显著的因子作为自变量,选择逐步回归的方法建立 3 层可燃物含水率预测模型。表 4 给出 3 层可燃物含水率预测模型中选择的气象因子。3 层含水率预测模型平均绝对误差 MAE 变化范围为 17.1%~23.5%;平均相对误差变化区间为 7.1%~23.4%。

图 3 给出 3 层可燃物含水率 60 组数据的实测

值和预测值 1:1 对比图。可以看出,地表细小可燃物含水率和半腐殖质含水率预测值和实测值都均匀地分布在 1:1 线附近,腐殖质含水率实测值和预测值分布情况较差。对于细小可燃物,当含水率较高时,分布均匀性较差,但一般认为当含水率超过 35% 时,其被引燃的可能性较低,因此即使预测效果较差,但对林火预测预报影响较小;对于半腐殖质,虽然较为均匀地分布在 1:1 线周围,当其含水率较低时(<100%),1:1 线上方数据较多,预测值高于实测值,含水率较大时,预测值低于实测值;腐殖质预测结果与半腐殖质相似。

3 结论与讨论

本文研究对象均为死可燃物,可燃物含水率研究表明,死可燃物含水率动态变化主要与气象因子、可燃物特征及理化性质相关^[32-33],虽然本研究仅在一个防火期内监测了红松蒙古栎混交林中地表 3 层可燃物含水率动态变化情况,但通过数据分析,可以得到春季防火期内 3 层可燃物含水率变化情况,气象因子对不同层可燃物含水率的影响,并建立相应的含水率预测模型。本研究得到以下结论:

(1) 3 层可燃物类型在整个防火期内含水率差异极显著,且地表细小可燃物含水率变化范围及波动最大,半腐殖质含水率次之,腐殖质含水率变化范围及波动最小。细小可燃物含水率在整个监测期间最小值为 10.99%,含水率低于 35% 的占全部天数的一半以上,一般认为当细小可燃物含水率低于 35% 时,能够被引燃^[34],因此监测期间,细小可燃物被引

表 4 可燃物含水率预测模型参数及误差

Tab. 4 Parameters of prediction model of fuel moisture content and errors

可燃物类型 Fuel type	预测模型 Prediction model	F	P	R ²	MAE/%	MRE/%
细小可燃物 Fine fuel	$Y = -24.605 + 1.670H_{min} + 774.016R_1 + 28.634R_{max}$	65.74	0.000	0.805	22.2	7.1
半腐殖质 Semi-humus	$Y = 138.057 + 605.625R_1 + 363.571R + 388.547R_4 - 2.77T_1$	17.51	0.000	0.584	23.5	14.8
腐殖质 Humus	$Y = 102.551 - 1.966T$	6.987	0.011	0.113	17.1	23.4

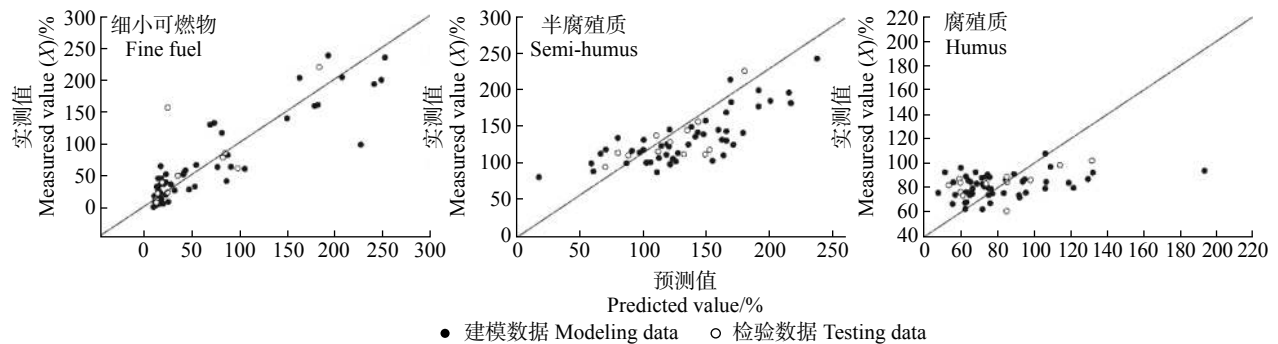


图 3 实测值和预测值 1:1 对比图

Fig. 3 Comparison of measured value and predicted value through 1:1 line

燃的可能性很大。半腐殖质可燃物最低含水率仅为19.21%，一旦上层可燃物被引燃，极易发生垂直燃烧。研究认为当腐殖质含水率超过100%时^[22]，较难发生地下火，而监测期间腐殖质含水率低于100%的天数占82%，极有可能发生地下火，而地下火持续时间长、蔓延速度慢且没有烟气，很难被发现，对整个森林生态系统的危害极大，因此腐殖质含水率的变化及预测模型也应该提高关注。

(2) 3层可燃物类型含水率对气象因子的响应都不同。其中，地表细小可燃物含水率对气象因子反应最为敏感，其含水率变化主要受当日最高温度、当日最大相对湿度、最低相对湿度、当日平均相对湿度、当日降雨量、当日最大降雨量、前3日和4日的平均风速决定的。半腐殖质含水率对气象因子的反应次之，其含水率变化除了与当日温湿度、降雨有影响外，还与前几日的气象因子有显著关系。腐殖质含水率较稳定，其含水率变化受前4、3、2、1日及当日空气温度的影响，与相对湿度、风速及降雨都不显著相关。

3层可燃物含水率变化与影响因素之间的关系出现不同的结果，可能有多方面的原因。首先，3层可燃物类型所处位置不同，由上到下依次为细小可燃物、半腐殖质和腐殖质。处于上层的可燃物，能够更及时、直观地接受气象因子对其的影响，特别是处于表层的细小可燃物，即时的气象因子就能影响其可燃物含水率，而处于下层的可燃物，则不仅与即时气象因子相关，前几日的气象因子对其影响也是显著的，而且随着距表层距离越大，这种滞后性越明显。其次，3层可燃物自身结构、特性不同所致。细小可燃物与半腐殖质和腐殖质相比，更容易进行水分扩散，水分子活动更活跃^[35]。在本研究中，空气温度对腐殖质含水率变化有显著影响，其他气象因子并未出现显著的影响结果，这可能是因为腐殖质含水率动态变化对环境因子的响应最差，而在监测期间，未出现持续时间的高湿或大雨天气，本文气象因子选择至前5日，腐殖质含水率变化可能还未对其做出响应，若增大气象因子的研究区间，可能会对腐殖质含水率变化有显著影响。

(3) 地表可燃物、半腐殖质和腐殖质的含水率预测模型的平均绝对误差分别为22.2%、23.5%和17.1%，平均相对误差分别为7.1%、14.8%和23.4%。以平均相对误差MRE=15%为界限^[36]，地表可燃物和半腐殖质含水率的预测模型效果都很好，腐殖质预测效果较差。腐殖质含水率预测模型预测精度较低，可能是由于气象因子选择的距离采样日期过近导致，因为腐殖质含水率动态变化对气象因子的响应

较慢，因此若选择的气象因子能够再向前推移更多的时间作为建立预测模型的因子，其预测模型精度可能会显著提高。

综上，对于林分内垂直的3层森林可燃物而言，其在防火期内都有被引燃的可能性，地表细小可燃物一旦被引燃，极易发生垂直蔓延及地下火，对森林生态系统的危害极大。因此在今后的林火预报工作中，还应该注意地下可燃物，包括半腐殖质和腐殖质含水率的预报。本文进行可燃物含水率预测研究，仅选择了气象要素回归法，在以后的研究中，还应该选择多种方法进行可燃物含水率预测模型建立，特别是基于物理过程的直接估计法，包括Simard^[20]和Nelson^[21]预测模型，多种方法进行比较，找到不同层可燃物含水率最适合的预测模型，为提高林火预报提供指导。

参 考 文 献

- [1] 白尚斌, 张晓丽. 林火预测预报研究综述[J]. 森林防火, 2008(2): 22-25.
Bai S B, Zhang X L. Forest fire forecast research[J]. Forest Fire Prevention, 2008(2): 22-25.
- [2] 舒立福, 田晓瑞, 寇晓军. 林火研究综述 (I): 研究热点与进展[J]. 世界林业研究, 2003, 16(3): 37-40.
Shu L F, Tian X R, Kou X J. The focus and progress on forest fire research[J]. World Forestry Research, 2003, 16(3): 37-40.
- [3] 王刚, 毕湘虹, 骆介禹, 等. 大兴安岭几种主要可燃物化学组成与燃烧性[J]. 森林防火, 1996(1): 22-24.
Wang G, Bi X H, Luo J Y, et al. The chemical composition and combustibility of typical fuels in Daxing'an Mountain[J]. Forest Fire Prevention, 1996(1): 22-24.
- [4] 张运林, 张恒, 金森. 基于 Logistic 回归的烟头点燃红松松针概率研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(9): 45-51.
Zhang Y L, Zhang H, Jin S. Study on probability of *Pinus koraiensis* needles fire lighted by burning cigarette end based on Logistic regression[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(9): 45-51.
- [5] 郑焕能, 居恩德. 林火管理[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1988: 15-18.
Zheng H N, Ju E D. Forest fire management [M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1988: 15-18.
- [6] 周润青. 大兴安岭南部主要森林类型可燃物负荷量及其潜在地表火行为研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Zhou J Q. Research on forest fuel loadings and potential surface fire behavior of major forest types in southern Daxing'an Mountains[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [7] 牛树奎, 王叁, 贺庆棠, 等. 北京山区主要针叶林可燃物空间连续性研究: 可燃物垂直连续性与树冠火发生[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(3): 1-7.
Niu S K, Wang S, He Q T, et al. Spatial continuity of fuels in major coniferous forests in Beijing mountainous area: fuel vertical continuity and crown fire occurrence[J]. Journal of Beijing

- Forestry University, 2012, 34(3): 1-7.
- [8] 吴志伟, 贺红士, 梁宇, 等. 丰林自然保护区森林可燃物模型的建立[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1503-1510.
- Wu Z W, He H S, Liang Y, et al. Establishment of standard forest fuel models for Fenglin Natural Reserve, Heilongjiang Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(6): 1503-1510.
- [9] 王舜尧, 金森. 基于热重分析的南昌地区8种可燃物的热解动力学及燃烧性排序[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(11): 94-98.
- Wang S R, Jin S. Study on pyrolysis kinetics and combustibility ordering of 8 kinds of fuels in Nanchang area based on Thermogravimetric analysis[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(11): 94-98.
- [10] 高国平, 王忠友. 森林可燃物研究综述[J]. 辽宁林业科技, 1998(4): 34-37.
- Gao G P, Wang Z Y. Study on forest fuel[J]. Journal of Liaoning Forestry Science & Technology, 1998(4): 34-37.
- [11] 刘曦, 金森. 湿度对可燃物时滞和平衡含水率的影响[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(5): 44-46.
- Liu X, Jin S. Effect of humidity on timelag and equilibrium moisture content of forest fuels[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2007, 35(5): 44-46.
- [12] Byram G M, Jemison G M. Solar radiation and forest fuel moisture[J]. Journal of Agricultural Research, 1943, 67(4): 149-176.
- [13] Catchpole E A, Catchpole W R, Viney N R, et al. Estimating fuel response time and predicting fuel moisture content from field data[J]. International Journal of Wildland Fire, 2001, 10(2): 215-222.
- [14] Toomey M, Vierling L A. Multispectral remote sensing of landscape level foliar moisture: techn[J]. Revue Canadienne De Recherche Forestière, 2005, 35(5): 1087-1097.
- [15] 张恒, 金森, 邸雪颖. 基于 FWI 湿度码的塔河林业局地表凋落物含水率预测[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2049-2055.
- Zhang H, Jin S, Di X Y. Prediction of litter moisture content in Tahe Forestry Bureau of Northeast China based on FWI moisture codes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 2049-2055.
- [16] 刘昕, 邸雪颖. 三种方法对森林地表可燃物含水率的预测评价[J]. 森林工程, 2013, 29(2): 8-13.
- Liu X, Di X Y. Evaluation of three prediction methods on forest surface fuel moisture[J]. Forest Engineering, 2013, 29(2): 8-13.
- [17] 高开通, 刘鹏举, 唐小明. 森林资源小班火险天气等级预报方法研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(4): 61-66.
- Gao K T, Liu P J, Tang X M. Forecasting forest fire risk grade of forest subcompartment[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(4): 61-66.
- [18] 宋雨, 胡海清, 孙龙, 等. 大兴安岭不同坡位地表可燃物含水率的动态变化与建模[J]. 森林工程, 2017, 33(5): 1-7.
- Song Y, Hu H Q, Sun L, et al. Dynamic change and modeling of moisture content of surface fuel in different slope positions of Daxing'anling[J]. Forest Engineering, 2017, 33(5): 1-7.
- [19] 李海洋, 胡海清, 孙龙. 我国森林死可燃物含水率与气象和土壤因子关系模型研究[J]. 森林工程, 2016, 32(3): 1-6.
- Li H Y, Hu H Q, Sun L. Research on relational models of moisture content of dead forest fuel with meteorological factors and soil factors in China[J]. Forest Engineering, 2016, 32(3): 1-6.
- [20] Simard A. The moisture content of forest fuels-I: a review of the basis concepts[R]. Ottawa: CDFRD Forest Fire Research Institute Information Report FF-X-14, 1968.
- [21] Nelson R M J. Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(7): 1071-1087.
- [22] 者香. 泥炭粒径、含水率和无机物含量对阴燃蔓延速率影响的实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- Zhe X. Experimental study on the influence of particle size, moisture content on the spreading rate of peat smoldering[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [23] Chuvieco E, Cocero D, David Riaño, et al. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(3): 322-331.
- [24] Bowyer P, Danson F M. Sensitivity of spectral reflectance to variation in live fuel moisture content at leaf and canopy level[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(3): 297-308.
- [25] Matthews S. Effect of drying temperature on fuel moisture content measurements[J]. International Journal of Wildland Fire, 2010, 19(6): 800.
- [26] Kreye J K, Kobziar L N, Zipperer W C. Effects of fuel load and moisture content on fire behaviour and heating in masticated litter-dominated fuels[J]. International Journal of Wildland Fire, 2013, 22(4): 440-445.
- [27] 胡海清, 牛树奎, 金森, 等. 林火生态与管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 31-37.
- Hu H Q, Niu S K, Jin S, et al. Fire ecology and management[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 31-37.
- [28] 张运林, 孙萍, 胡海清, 等. 风速对不同结构红松针叶床层失水系数影响的室内模拟研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(3): 57-64.
- Zhang Y L, Sun P, Hu H Q, et al. Laboratory study of the effects of wind speed on drying coefficient of fuelbeds composed of Korean pine needles with varied structure[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(3): 57-64.
- [29] 张运林, 孙萍, 胡海清, 等. 风速对蒙古栎阔叶床层两个重要失水时间的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(4): 65-71.
- Zhang Y L, Sun P, Hu H Q, et al. Effects of wind speed on two key drying times of fuelbeds composed of Mongolian oak leaves[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(4): 65-71.
- [30] 周勇. 昆明典型可燃物含水率预测模型研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- Zhou Y. Study on fuel moisture content prediction of fuels in

- typical stands, Kunming[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [31] 张恒. 大兴安岭地表死可燃物含水率预测的影响因素 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- Zhang H. Influencing factors of dead surface fuel moisture prediction in Great Xing'an region [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [32] 金森, 陈鹏宇. 樟子松针叶床层结构对失水过程中含水率参数的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(4): 114–120.
- Jin S, Chen P Y. Effects of structure features of fuelbed composed of scots pine needles on equilibrium moisture content parameters during desorption process[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(4): 114–120.
- [33] 马壮, 李亮, 金森. 直接估计法在帽儿山林场白桦林可燃物含水率的适用性分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(11): 54–58.
- Ma Z, Li L, Jin S. Applicability analysis method in water Mao'ershan Birch forest fuel rate estimated directly[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(11): 54–58.
- [34] 于宏洲, 金森, 邸雪颖. 以时为步长的塔河林业局白桦林地地表死可燃物含水率预测方法[J]. 林业科学, 2013, 49(12): 108–113.
- Yu H Z, Jin S, Di X Y. Models for predicting the hourly fuel moisture content on the forest floor of Birch stands in Tahe Forestry Bureau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(12): 108–113.
- [35] Anderson H E. Moisture diffusivity and response time in fine forest fuels[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1990, 20(3): 315–325.
- [36] Jolly W M, Hadlow A M. A comparison of two methods for estimating conifer live foliar moisture content[J]. International Journal of Wildland Fire, 2011, 21(2): 180–185.

(责任编辑 赵 勃
责任编辑 臧润国)