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

胡海清¹ 陆 昕¹ 孙 龙^{1*} 曲智林² 梁 宇¹ 李海洋¹

¹东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; ²东北林业大学理学院, 哈尔滨 150040

摘 要 以落叶松(*Larix gmelinii*)叶片、白桦(*Betula platyphylla*)叶片、落叶松-白桦叶片混合物为例, 初步研究了气温和空气相对湿度对地表细小死可燃物平衡含水率和时滞的影响, 对这3种可燃物在不同气温、不同空气相对湿度条件下(共20个温湿度组合)失水过程中的含水率进行了测定。通过统计软件建立了相应条件下3种类型可燃物含水率时间动态方程, 并利用此方程估算了3种可燃物平衡含水率和时滞, 同时用估算值分别建立了3种可燃物的平衡含水率-气温模型、平衡含水率-湿度模型、时滞-气温模型、时滞-湿度模型等4种模型。并用已知的4个可燃物平衡含水率模型拟合了该研究得到的平衡含水率数据, 其中, 用Van Wanger模型得到的平均绝对误差和均方根误差均不超过0.01, 拟合效果最好; Nelson模型的拟合效果最差。对气温和空气相对湿度对3种可燃物平衡含水率和时滞的影响的研究结果表明: 气温和空气相对湿度对3种可燃物的平衡含水率和时滞有显著影响, 气温与平衡含水率和时滞呈负相关关系, 而空气相对湿度与二者均呈正相关关系。其中, 时滞-湿度模型高估了可燃物的时滞。该研究具有一定的局限性与不确定性, 在未来的工作中, 应选择在更宽的可燃物类型范围内, 结合更全面的因子进行研究。

关键词 平衡含水率; 含水率; 细小死可燃物; 空气相对湿度; 气温; 时滞

引用格式: 胡海清, 陆昕, 孙龙, 曲智林, 梁宇, 李海洋 (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. 植物生态学报, 40, 221–235. doi: 10.17521/cjpe.2015.0243

Effects of air temperature and relative humidity on equilibrium moisture content and time-lag of forest land surface dead fine fuels

HU Hai-Qing¹, LU Xin¹, SUN Long^{1*}, QU Zhi-Lin², LIANG Yu¹, and LI Hai-Yang¹

¹College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; and ²College of Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract

Aims This study was conducted to determine the effects of air temperature and relative humidity on the equilibrium moisture content (*EMC*) and time-lag of forest dead fine fuels by taking *Larix gmelinii* leaves, *Betula platyphylla* leaves and mixture of *L. gmelinii* and *B. platyphylla* leaves as examples.

Methods Measurements were made on moisture content of fuels under different air temperature and humidity conditions (a total of 20 temperature by relative humidity combinations). Equations describing the dynamics of moisture content of fine-grain fuels in three types of forests were developed and the *EMC* and time-lag were estimated. The moisture-time mode, *EMC*-temperature and *EMC*-relative humidity models, time-lag-temperature and time-lag-relative humidity models for fine-grain fuels were also established.

Important findings Data were fit by four *EMC* models. The Van Wanger model gave the best fit with small errors (both mean absolute error (*MAE*) and root mean square error (*RMAE*) within 0.01); the performance of Nelson model was worst. Further analysis revealed that both air temperature and relative humidity significantly affected *EMC* and time-lag. Air temperature was negatively correlated with *EMC* and time-lag, whereas relative humidity was positively correlated with *EMC* and time-lag. Using the time-lag-relative humidity model overestimated the time-lag. There are some uncertainties and limitations remaining in the current analysis, and further research is needed on both desorption and absorption processes of fine fuels, with broader range of fuel types and more influencing factors.

收稿日期Received: 2015-06-26 接受日期Accepted: 2015-11-27

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: sunlong365@126.com)

Key words equilibrium moisture content; moisture content; dead fine fuel; relative humidity; air temperature; time-lag

Citation: Hu HQ, Lu X, Sun L, Qu ZL, Liang Y, Li HY (2016). Effects of air temperature and relative humidity on equilibrium moisture content and time-lag of forest land surface dead fine fuels. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 221–235. doi: 10.17521/cjpe.2015.0243

林火是影响森林生态系统平衡的重要因素,是人类活动与森林内众多因素综合作用的结果。森林可燃物是林火发生的首要条件(田甜和邸雪颖, 2013)。林火多为地表火,森林地表死可燃物含水率直接影响着可燃物燃烧的难易程度,间接影响了林火的强度和蔓延速度。地表死可燃物含水率是预测林火发生、林火行为、能量释放、估计火险大小的重要指标,是计算森林火险等级的基础。如何准确和有效地对森林地表死可燃物含水率进行预测显得尤为重要(单延龙等, 2005)。

可燃物含水率预测是森林火险预报的重要内容,对可燃物含水率预测的研究最早开始于20世纪40年代。Byram和Jemison (1943)最先研究了太阳辐射对森林可燃物含水率的影响。近年来,对可燃物含水率预测模型的研究逐渐多了起来。Catchpole等(2001)进行了直接估测法的研究;Toomey和Vierling (2005)研究了遥感技术在可燃物含水率预测中的应用;Pellizzaro等(2006)研究了气候变化对可燃物含水率的影响。当前可燃物含水率预测的方法主要包括以下4种:基于平衡含水率的方法、气象要素回归法、遥感估测法、基于过程模型的方法。在这4种方法中,基于平衡含水率的预测方法应用最广,是相对经典的一种方法,在美国、加拿大等国家已广泛应用,且预测效果较好(Viney, 1991)。而我国近些年开展的基于此方法的火险预测预报研究较少,还没开展系统的研究工作,仅有很少的研究人员完成了一定的研究工作。金森等(1999)对时滞和平衡含水率直接估计法的计算方法进行了探讨,并对其有效性进行了分析(金森等, 2011, Jin & Chen, 2012)。基于平衡含水率的预测方法也将随着越来越精细的野外气象数据而在小尺度上显现更高的预测精度。影响可燃物平衡含水率和时滞的因素主要有气温、空气相对湿度、可燃物大小和剖面结构等。在可燃物失水过程中,当空气的温湿度都不发生变化的情况下,将可燃物在这种环境中搁置无限长的时间,可燃物中的水分会达到一个恒定值。这时,可燃物内在的水分压力与空气中水分压力相同,不存在水分

交换,对应的水分扩散停止。此时,我们将可燃物的含水率称之为平衡含水率(EMC)。在这种地表细小可燃物与空气之间交换水汽的过程中,当空气的温湿度发生变化时,地表细小可燃物的平衡含水率值与自身的含水率都会随之变化,但含水率要变化到平衡含水率的相同值则需要耗费一定的时间,这种滞后的情况称之为时滞,它是用来衡量可燃物含水率变化速率的量。气温和空气相对湿度是影响平衡含水率和时滞的最重要的两个因子。在野外森林可燃物含水率的预测中,要根据平衡含水率对环境因子的响应函数来计算不同温湿度条件下的平衡含水率。

在当前的相关研究中,关于环境因子(气温和空气相对湿度)对平衡含水率的影响模型函数主要有以下4个:Simard (1968)根据一些木材的平衡含水率数据,通过回归建立了平衡含水率模型;van Wagner (1972)根据实验室数据建立了可燃物在失水和吸水过程中的平衡含水率模型,即Van Wagner平衡含水率模型;Anderson等(1978)在Van Wagner模型的基础上,根据西部黄松(*Pinus ponderosa*)的数据重新建立了Anderson平衡含水率模型;Nelson (1984)根据可燃物水分变化的热力学原理建立了平衡含水率的半物理模型。

森林地表可燃物含水率的变化包括失水和吸水两个过程,对于林火管理工作而言,失水过程更重要一些。了解地表可燃物的失水速率,可以判断雨后经过多长时间可燃物含水率才能降到可燃燃烧的阈值,也可预测雨后可燃物含水率的变化情况,为林火行为预报提供参数(Matthews *et al.*, 2007)。本研究对落叶松(*Larix gmelinii*)叶片、白桦(*Betula platyphylla*)叶片、落叶松-白桦叶片混合物等3种类型地表细小死可燃物在不同气温、不同空气相对湿度条件下失水过程中的含水率进行测定,分别估测了平衡含水率和时滞。通过对气温和空气相对湿度两种因素对平衡含水率和时滞的影响进行分析,为进一步提高森林地表死可燃物含水率预报的准确程度提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

大兴安岭地区是我国重点森林火险区。落叶松和白桦是大兴安岭林区重要的针叶和阔叶树种。本研究实验样品采自大兴安岭地区漠河县西林吉林业局(地理坐标为 121.19°–123.27° E, 52.28°–53.28° N)的落叶松-白桦混交林。

1.2 实验步骤

(1) 2014年9月采集新凋落的落叶松叶片和白桦叶片, 选择完整的叶片作为实验样品。将部分落叶松叶片与白桦叶片随机混合到一起, 作为落叶松-白桦叶片混合物。样品采集后带回实验室。

(2) 将3种类型可燃物分别放入烘箱中, 在105℃条件下连续烘干24 h, 用电子天平称量, 记录每个样品的干质量。

(3) 将烘干后的样品完全浸泡在水中, 持续24 h至样品饱和。

(4) 将浸泡后的样品从水中拿出, 移去样品表面水分, 并在空气中放置一段时间。用电子天平称量, 记录每个样品的湿质量。

(5) 将样品放入四周和底部有网孔的塑料筐内。记录装有样品的塑料筐的质量。

(6) 对2011年大兴安岭落叶松-白桦混交林内气象观测数据(2010.01.01–2010.10.27)进行分析, 选择本实验中合适的气温和空气相对湿度梯度。

(7) 根据步骤(6)的结果设置人工气候箱的气温和空气相对湿度条件。气温设置为5℃、10℃、15℃、20℃、25℃ 5个梯度; 空气相对湿度设置为20%、40%、60%、80% 4个梯度。将气温和空气相对湿度两两进行组合, 共20个温湿度组合。

(8) 将装有样品的容器分别放入设置好温湿度条件的人工气候箱内, 每2 h称量一次, 记录实验数据。直至根据前后两次称量结果计算出的含水率的差值小于1%。

(9) 每做完1组实验后, 重新浸泡样品至饱和, 重复步骤(4)和(8)。

每种类型可燃物设置3次重复。保持3次重复实验的样品质量基本一致。

1.3 数据分析

1.3.1 可燃物平衡含水率和时滞的估计

根据Viney和Catchpole (1991)、金森等(2000)、Byram和Nelson (2015)的方法, 在气温和空气相对湿

度不变的条件下, 可燃物含水率可满足以下方程:

$$M_t = M_e + (M_0 - M_e)e^{-kt} \quad (1)$$

式中, M_t 为可燃物含水率(单位: $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); M_e 为可燃物平衡含水率(单位: $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); M_0 为可燃物初始含水率(单位: $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); k 为时滞的倒数; t 为时间(单位: h)。

Simard平衡含水率模型为:

$$E = \begin{cases} 0.03 + 0.2626H - 0.00104HT & H < 10 \\ 1.76 + 0.1601H - 0.0266T & 10 \leq H < 50 \\ 21.06 - 0.4944H + 0.005565H^2 - 0.00063HT & H \geq 50 \end{cases} \quad (2)$$

式中: E 为可燃物平衡含水率; T 为气温(℃); H 为空气相对湿度(%)

Van Wanger平衡含水率模型为:

$$E_d = 0.942H^{0.679} + 0.000499e^{0.1H} + 0.18(21.2 - (T + 273.15)) (1 - e^{-0.115H}) \quad (3)$$

$$E_w = 0.618H^{0.753} + 0.000454e^{0.1H} + 0.18(21.2 - (T + 273.15)) (1 - e^{-0.115H}) \quad (4)$$

式中: E_d 和 E_w 分别为失水过程和吸水过程中可燃物平衡含水率; T 为气温(℃); H 为空气相对湿度(%)。

Anderson平衡含水率模型为:

$$E_d = 1.651H^{0.493} + 0.0001972e^{0.092H} + 0.101(23.9 - (T + 273.15)) \quad (5)$$

$$E_w = 0.891H^{0.612} + 0.0002341e^{0.112H} + 0.101(23.9 - (T + 273.15)) \quad (6)$$

式中: E_d 和 E_w 分别为失水过程和吸水过程中可燃物平衡含水率; T 为气温(℃); H 为空气相对湿度(%)。

Nelson平衡含水率模型为:

$$E = \alpha + \beta \ln \Delta G = \alpha + \beta(-R(T + 273.15)/m \ln H) \quad (7)$$

式中: E 为可燃物平衡含水率, R 为普适气体常量, 其值为 $8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$; T 为气温(℃); H 为空气相对湿度(%); m 为 H_2O 相对分子质量, 其值为 $18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; α 、 β 为待估参数。

在气温和空气相对湿度对平衡含水率的影响数据分析中, 借鉴以上4个重要的气象要素模型, 通过统计软件SPSS 18.0和STATISTICA 10.0对实验数据进行分析。对模型决定系数 R^2 值进行比较, 最终筛选出适合本实验数据的模型, 分析气温和空气相对湿度对平衡含水率的综合作用。分别建立可燃物平衡含水率和时滞随气温、空气相对湿度变化模型。

1.3.2 模拟误差的计算

对建立的平衡含水率-气温、空气相对湿度变化

模型,按下式计算模拟误差,以确定模型参数的有效性。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - \hat{M}_i| \quad (8)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|M_i - \hat{M}_i|}{M_i} \quad (9)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - \hat{M}_i)^2 \right)^{0.5} \quad (10)$$

式中: MAE 为平均绝对误差; M_i 为可燃物含水率实测值(%); $\hat{M}_i$ 为可燃物含水率预测值(%); MRE 为平均相对误差; $RMSE$ 为均方根误差。

2 结果和分析

2.1 可燃物含水率的时间变化

根据实验所测得数据,通过方程(1),得到可燃物含水率动态方程(附表1)和可燃物含水率在失水过程中的变化对比曲线(图1)。从图1可以观察到落叶松叶片、白桦叶片和落叶松-白桦叶片混合物含水率在失水过程中的变化趋势。3种类型可燃物含水率失水过程的大致趋势为:在开始的时候,变化剧烈,下降速度比较快;随后下降速度降低,逐渐趋于平缓状态,最后到达平衡。参数 k 可以表征可燃物含水率的变化速率。每种可燃物的 k 值是不同的。通过图1和附表1可知,在相同气温下,随着空气相对湿度的增加,3种可燃物的 k 值逐渐减少,说明随着空气相对湿度的升高,可燃物含水率下降的速率逐渐降低;而在相同空气相对湿度的条件下,可燃物的 k 值会随着气温的增高而增高,同样表示可燃物含水率下降的速率随气温的增高而增高。在各种组合条件下,3种可燃物 k 值的均值相比较,落叶松叶片>落叶松-白桦叶片混合物>白桦叶片。说明在相同环境条件下,3种可燃物含水率从饱和状态减小到平衡含水率的速率,即为落叶松叶片>落叶松-白桦叶片混合物>白桦叶片。

2.2 气温对平衡含水率的影响

通过对实验数据分析,我们得到不同气温、不同空气相对湿度条件下,3种可燃物的平衡含水率。在相同湿度、不同气温条件下,3种可燃物平衡含水率在4个空气相对湿度梯度下,总体趋势都是随着气温的升高而降低,平衡含水率和气温呈负相关关系。可能是由于当空气相对湿度不变、温度升高(降

低)时,可燃物内在水分蒸发得快(慢),向空气中扩散的水分含量增加(减小),可燃物内在的水分压力与空气中水分压力达到相同状态的值会减小(增加),故可燃物平衡含水率降低(升高)。

对于同一类型的可燃物来说,在相同空气相对湿度条件下,白桦叶片在气温5℃和25℃条件之间的平衡含水率差异显著($p < 0.05$)(附表2)。在空气相对湿度为80%时,3种可燃物平衡含水率在气温5℃和25℃条件之间差异达到最大。其中,落叶松叶片、白桦叶片和落叶松-白桦叶片混合物的差异分别为17.82%、21.68%和20.53%;在空气相对湿度为20%时,差异最小,3种可燃物的差异分别为5.17%、6.67%和5.36%。

通过统计软件对实验数据进行回归分析,确定了3种类型可燃物平衡含水率在不同空气相对湿度条件下随气温变化的方程为:

$$y = a_0x^3 + a_1x^2 + a_2x + a_3 \quad (11)$$

式中: y 为可燃物平衡含水率(%), x 为空气温度(℃), a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为参数。具体结果及决定系数见表1。

从平衡含水率-气温方程可以看出,平衡含水率与气温成三次函数关系,3种可燃物的平衡含水率-气温变化方程的决定系数 R^2 分别介于0.999 6–0.999 9、0.987 5–0.996 8、0.980 7–0.999 8之间。

图2给出了3种可燃物在相同空气相对湿度、不同气温条件下,用上述方程计算的可燃物平衡含水率预测值和由含水率数据估测的平衡含水率值的对比。从图2可以看出,拟合出来的平衡含水率预测值和估测值相差不大,拟合效果较好。

2.3 空气相对湿度对平衡含水率的影响

在相同气温、不同空气相对湿度条件下,3种可燃物平衡含水率在空气相对湿度5个梯度之间,总体变化趋势都是随着空气相对湿度的升高而增加。当可燃物处于气温不变、空气相对湿度升高条件下时,空气中的水分含量升高,可燃物内部向空气中扩散水分的值会减少。所以,可燃物内在的水分压力与空气中水分压力达到相同状态的值会增加,即可燃物平衡含水率值会升高。其中,落叶松叶片的平衡含水率在湿度20%–60%之间差异显著($p < 0.05$),在20%–80%、40%–80%之间差异极显著($p < 0.01$);白桦叶片和落叶松-白桦叶片混合物的平衡含水率在湿度20%–80%、40%–80%之间差异极显著($p < 0.01$)(附表3)。在每个气温梯度下,同一类型可

图1 不同类型可燃物含水率在不同气温、不同空气相对湿度条件下的变化曲线。A, 落叶松叶片。B, 白桦叶片。C, 落叶松-白桦叶片混合物。a、b、c、d表示空气相对湿度分别为20%、40%、60%、80%。

Fig. 1 Curves of dynamics of moisture content in different fuels under different air temperature and relative humidity. A, *Larix gmelinii* leaves. B, *Betula platyphylla* leaves. C, Mixture of *L. gmelinii* and *B. platyphylla* leaves. a, b, c, and d show relative humidity of 20%, 40%, 60%, 80%, respectively.

表1 不同空气相对湿度下平衡含水率-气温变化方程及决定系数

Table 1 Equations of equilibrium moisture content (EMC) versus air temperature and coefficient of determination under different relative humidity

可燃物类型 Fuel type	相对湿度 Relative humidity (%)	平衡含水率随气温变化方程 Equations of EMC versus air temperature	决定系数 Coefficient of determination (R^2)
落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves	20	$y = (0.3933e - 5)x^3 - (0.2141e + 3)x^2 + 0.7909x + 0.0781$	0.966 6
	40	$y = -(0.2787e + 4)x^3 + 0.0014x^2 - 0.0253x + 0.2305$	0.994 7
	60	$y = (0.3800e - 4)x^3 + 0.0159x^2 - 0.0018x + 0.1707$	0.990 1
	80	$y = (0.1347e - 4)x^3 - (0.7339e + 3)x^2 + 0.0026x + 0.3091$	0.999 9
白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves	20	$y = -(0.6667e + 6)x^3 + (0.8943e - 4)x^2 - 0.0055x + 0.1337$	0.988 9
	40	$y = -(0.5733e + 5)x^3 + (0.4414e - 4)x^2 - 0.0145x + 0.2243$	0.993 9
	60	$y = (0.8633e - 4)x^3 - 0.0037x^2 + 0.0357x + 0.1594$	0.987 5
	80	$y = (0.2026e - 4)x^3 - 0.0012x^2 + 0.0087x + 0.3316$	0.996 8
落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves	20	$y = (0.7733e - 5)x^3 - (0.2829e + 3)x^2 - (0.1876e + 3)x + 0.1024$	0.999 8
	40	$y = (0.6733e - 5)x^3 - (0.1881e + 3)x^2 - 0.0046x + 0.1736$	0.980 7
	60	$y = (0.3513e - 4)x^3 - 0.0012x^2 + (0.7709e - 3)x + 0.2628$	0.988 9
	80	$y = (0.1679e - 4)x^3 - (0.5594e + 3)x^2 - 0.0065x + 0.3746$	0.999 8

图2 平衡含水率-气温模型预测的平衡含水率值和由含水率数据估测的平衡含水率值对比。A, 落叶松叶片。B, 白桦叶片。C, 落叶松-白桦叶片混合物。
Fig. 2 Comparison between equilibrium moisture content (EMC) predicted by EMC-air temperature model and that of measurements. A, *Larix gmelinii* leaves. B, *Betula platyphylla* leaves. C, Mixture of *L. gmelinii* and *B. platyphylla* leaves.

燃物平衡含水率会随着空气相对湿度的变化而产生差异, 这种差异会随着气温的升高而降低。在气温为5 ℃时, 落叶松叶片、白桦叶片和落叶松-白桦叶片混合物平衡含水率在湿度20%和80%之间的差异分别为22.93%、24.03%和23.47%; 在气温为25 ℃时, 差异最小, 分别为10.28%、9.01%和8.30%。

对实验数据进行回归分析, 通过统计软件确定了3种类型可燃物平衡含水率在不同气温条件下, 随空气相对湿度变化的方程为:

$$y = ax^b + c \tag{12}$$

式中: y 为可燃物平衡含水率(%), x 为空气相对湿度(%), a 、 b 、 c 为参数。具体结果及决定系数见表2。

由3种可燃物平衡含水率-湿度方程可以看出, 平衡含水率与空气相对湿度的变化关系符合幂函数的关系, 其系数 a 均为正数, 说明在相同气温条件下, 可燃物平衡含水率随空气相对湿度的增大而增大。

由表2可知, 在5、10、15、20 ℃ 4个气温梯度下, 参数 a 均为白桦叶片大于落叶松叶片, 这说明空气相对湿度对白桦叶片平衡含水率的影响要大于落叶松叶片。通过实验数据可知, 在相同条件下, 白桦叶片的平衡含水率要高于落叶松叶片。而在气温为25 ℃的条件下, 参数 a 为白桦叶片小于落叶松叶片, 并且对于两种可燃物来说, 参数 a 在气温为25 ℃时

表2 不同气温下, 平衡含水率-湿度变化方程及决定系数
Table 2 Equations of equilibrium moisture content (EMC) versus relative humidity and coefficient of determination under different air temperature

气温 Air temperature (°C)	落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves	决定系数 Coefficient of determination (R^2)	白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves	决定系数 Coefficient of determination (R^2)	落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves	决定系数 Coefficient of determination (R^2)
5	$y = 0.3670x^{1.5427} + 0.0456$	0.999 9	$y = 0.3918x^{1.6392} + 0.0791$	0.998 3	$y = 0.3843x^{1.6237} + 0.0649$	0.997 2
10	$y = 0.3652x^{2.2000} + 0.0561$	0.987 7	$y = 0.3914x^{1.5672} + 0.0464$	0.978 2	$y = 0.3092x^{1.6848} + 0.0579$	0.999 0
15	$y = 0.3182x^{2.1564} + 0.3458$	0.986 6	$y = 0.4901x^{3.9617} + 0.0708$	0.999 7	$y = 0.3526x^{3.9870} + 0.0641$	0.998 6
20	$y = 0.3536x^{4.5456} + 0.0487$	0.990 6	$y = 0.4191x^{5.0574} + 0.0568$	0.992 8	$y = 0.2442x^{3.9114} + 0.5126$	0.986 4
25	$y = 0.2315x^{3.6433} + 0.0245$	0.999 7	$y = 0.2010x^{3.5001} + 0.0406$	0.999 0	$y = 0.1941x^{3.7051} + 0.0401$	0.998 6

图3 平衡含水率-湿度模型预测的平衡含水率值和由含水率数据估测的平衡含水率值对比。A, 落叶松叶片。B, 白桦叶片。C, 落叶松-白桦叶片混合物。
Fig. 3 Comparison between equilibrium moisture content (EMC) predicted by EMC-relative humidity model and that of measurements. A, *Larix gmelinii* leaves. B, *Betula platyphylla* leaves. C, Mixture of *L. gmelinii* and *B. platyphylla* leaves.

均小于其他气温条件下, 说明在25 °C条件下, 空气相对湿度对可燃物的影响变得不明显。

图3给出了3种可燃物在相同空气相对湿度、不同气温条件下, 用平衡含水率-湿度变化方程计算的可燃物平衡含水率预测值和由含水率数据估测的平衡含水率值的对比, 从中可以看出, 拟合出来的平衡含水率预测值和估测值相差不大, 拟合效果较好。

2.4 气温和空气相对湿度对平衡含水率的影响

在不同气温、不同空气相对湿度条件下, 用Simard平衡含水率模型、Van Wanger平衡含水率模型、Anderson平衡含水率模型以及Nelson平衡含水率模型等4种模型对实验数据进行拟合, 结果见表3-6。

图4给出了用上述4种模型拟合3种可燃物平衡含水率的3种误差直方图。对于Van Wanger模型来说, 拟合出来的3种可燃物平衡含水率绝对误差、相对误差和均方根误差的均值, 分别为0.000 35、0.003 95、0.001 55; 0.000 5、0.004 05、0.002 24;

0.000 44、0.004 47、0.001 95。最大值分别为: 0.001 01、0.014 38、0.004 52; 0.001 85、0.015 37、0.008 27; 0.001 47、0.012 75、0.006 59。结果表明, 3种可燃物表征个体拟合效果的绝对误差的均值均小于0.01, 表征整体拟合效果的均方根误差的均值也均小于0.01。说明在本研究中, Van Wanger模型模拟气温、空气相对湿度对平衡含水率影响的效果最好。同时, 拟合出来的Van Wanger模型的决定系数 R^2 介于0.975 1-0.988 8之间, 为最优模型, 平均可解释总变差的98.09%。Simard模型和Anderson模型的拟合效果稍差一些。

与其他3种模型相比, Nelson模型拟合的3种可燃物平衡含水率的绝对误差、相对误差和均方根误差值最大, 同时其决定系数 R^2 仅介于0.488 7-0.553 5之间, 远远低于其他3种模型, 拟合效果最差。Nelson模型是充分考虑了可燃物自身的热量传递、水分在可燃物中的运动情况得到的一种平衡含水率模型。可燃物自身的水分会受到光照、辐射的

表3 Simard平衡含水率模型

Table 3 Simard equilibrium moisture content (EMC) model

可燃物类型 Fuel type	相对湿度 Relative humidity (%)	平衡含水率随气温、相对湿度变化的方程 Equations of EMC versus air temperature and relative humidity	决定系数 Coefficient of determination (R^2)
落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves	$10 < H < 50$ $H \geq 50$	$E = 1.075569 + 0.1226H - 0.003633T$ $E = 0.76452 - 1.37034H + 1.838824H^2 - 0.01221HT$	0.895 3 0.982 1
白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves	$10 < H < 50$ $H \geq 50$	$E = 1.336947 + 0.1186H - 0.004472T$ $E = 0.940213 - 1.70177H + 2.218485H^2 - 0.015047HT$	0.913 6 0.956 1
落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves	$10 < H < 50$ $H \geq 5$	$E = 1.182743 + 0.1266H - 0.003966T$ $E = 0.871213 - 1.53921H + 2.024026H^2 - 0.013797HT$	0.906 1 0.965 3

E , 细小可燃物平衡含水率; H , 空气相对湿度(%); T , 气温($^{\circ}\text{C}$)。

E , equilibrium moisture content of fine fuels; H , relative humidity (%); T , air temperature ($^{\circ}\text{C}$).

表4 Van Wanger平衡含水率模型

Table 4 Van Wanger equilibrium moisture content (EMC) model

可燃物类型 Fuel type	平衡含水率随气温、相对湿度变化方程 Equations of EMC versus air temperature and relative humidity	决定系数 Coefficient of determination (R^2)
落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves	$E_d = -44.9323H^{0.001095} + 44.86805e^{0.073957H} + 0.147607(33.97835 - T)(1 - e^{-0.08471H})$	0.988 8
白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves	$E_d = -26.3152H^{-0.00478} + 26.71372e^{0.137453H} + 0.062646(12.75931 + T)(1 - e^{-0.258312H})$	0.975 1
落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves	$E_d = -18.9629H^{-0.00775} + 19.39976e^{0.171261H} + 0.065635(5.407862 + T)(1 - e^{-0.223153H})$	0.978 8

E_d , 失水过程中细小可燃物平衡含水率; H , 空气相对湿度(%); T , 气温($^{\circ}\text{C}$)。

E_d , equilibrium moisture content of fine fuels during water loss process; H , relative humidity (%); T , air temperature ($^{\circ}\text{C}$).

表5 Anderson平衡含水率模型

Table 5 Anderson equilibrium moisture content (EMC) model

可燃物类型 Fuel type	平衡含水率随气温、相对湿度变化方程 Equations of EMC versus air temperature and relative humidity	决定系数 Coefficient of determination (R^2)
落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves	$E_d = 1.31779H^{-0.051049} + 0.329983e^{0.866517H} + 0.006145(0.117326 - T)$	0.938 7
白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves	$E_d = 0.757326H^{1.462077} + 2.306681e^{-0.23901H} - 0.007577(2.06381 + T)$	0.917 8
落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves	$E_d = 1.971964H^{-0.00503} + 0.33744e^{2.343505H} - 0.006854(0.244327 + T)$	0.906 8

E_d , 失水过程中细小可燃物平衡含水率; H , 空气相对湿度(%); T , 气温($^{\circ}\text{C}$)。

E_d , equilibrium moisture content of fine fuels during water loss process; H , relative humidity (%); T , air temperature ($^{\circ}\text{C}$).

表6 Nelson平衡含水率模型

Table 6 Nelson equilibrium moisture content (EMC) model

可燃物类型 Fuel type	平衡含水率随气温、相对湿度变化方程 Equations of EMC versus air temperature and relative humidity	决定系数 Coefficient of determination (R^2)
落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves	$E = 0.217687 - 0.000873(-8.3147/18\text{Log}H)$	0.557 9
白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves	$E = 0.245242 - 0.000926(-8.3147/18\text{Log}H)$	0.488 7
落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves	$E = 0.197390 - 0.012316(-8.3147/18\text{Log}H)$	0.553 5

E , 细小可燃物平衡含水率; H , 空气相对湿度(%); T , 气温($^{\circ}\text{C}$)。

E , equilibrium moisture content of fine fuels; H , relative humidity (%); T , air temperature ($^{\circ}\text{C}$).

影响, 而本研究并未考虑光照条件对含水率的影响, 热辐射对可燃物含水率的影响可以忽略不计, 所以 Nelson模型对本研究的数据拟合效果最差, 不适用于本研究。

2.5 气温和空气相对湿度对时滞的影响

可燃物时滞 τ 和 k 值满足关系 $\tau = 1/k$, 据此可以

得到在不同气温、不同空气相对湿度条件下3种可燃物时滞数据。表7给出了不同气温、不同空气相对湿度条件下3种可燃物的时滞。落叶松叶片时滞的均值为10.47 h, 最小值为4.92 h, 最大值为22.03 h, 标准偏差为4.90 h, 变异系数为0.468。白桦叶片时滞的均值为12.88 h, 最小值为5.22 h, 最大值为28.01 h, 标准

图4 4种模型拟合3种细小可燃物平衡含水率的3种误差的分布。A, 落叶松叶片; B, 白桦叶片; C, 落叶松-白桦叶片混合物。
Fig. 4 Distributions of errors in modeled equilibrium moisture content (EMC) of fine fuels. A, *Larix gmelinii* leaves. B, *Betula platyphylla* leaves. C, Mixture of *L. gmelinii* and *B. platyphylla* leaves. MAE, mean absolute error; MRE, mean relative error; RMSE, root mean square error.

表7 不同气温、不同空气相对湿度条件下可燃物时滞(h)
Table 7 Time-lag of fuels under different air temperature and relative humidity (h)

可燃物类型 Fuel type	相对湿度 Relative humidity (%)	气温 Air temperature (°C)				
		5	10	15	20	25
落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves	20	10.43	8.74	6.38	4.92	4.23
	40	12.33	11.64	8.03	5.50	4.68
	60	15.24	14.86	9.65	8.09	6.20
	80	22.03	18.55	15.43	13.16	9.40
白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves	20	12.61	10.27	7.92	5.22	3.64
	40	15.31	12.18	8.78	5.84	5.19
	60	21.10	15.85	11.82	10.09	7.20
	80	28.01	22.83	19.59	14.47	9.22
落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves	20	11.47	9.59	8.15	5.19	4.35
	40	14.75	10.62	9.11	6.38	4.90
	60	19.08	15.50	11.75	8.52	7.96
	80	24.04	20.08	18.28	14.39	10.24

偏差为6.25 h, 变异系数为0.528。落叶松-白桦叶片混合物时滞的均值为12.27 h, 最小值为4.35 h, 最大值为24.04 h, 标准偏差为5.70 h, 变异系数为0.471。

由表7可看出, 在相同空气相对湿度条件下, 3种可燃物时滞在4个湿度梯度内, 总体的趋势都是随着气温的升高而降低。这是由于当空气相对湿度不变、温度升高时, 可燃物内在水分向空气中扩散(蒸发)的速率增加, 即达到平衡含水率的时间会相应地减少。其中, 落叶松叶片时滞在气温为5–25 °C、10–25 °C之间差异显著; 白桦叶片和落叶松-白桦叶片混合物时滞在气温为5–20 °C、5–25 °C、10–25 °C之间差异显著($p < 0.05$)(附表4)。由表7可以看出, 3

种可燃物的时滞在空气相对湿度为80%的时候, 随气温的升高降低的幅度最大: 落叶松叶片、白桦叶片、落叶松-白桦叶片混合物的时滞变化范围分别为12.63 h、19.34 h和13.68 h。3种可燃物受气温影响程度与空气相对湿度相同, 也为白桦叶片>落叶松-白桦叶片混合物>落叶松叶片。

在相同气温条件下, 3种可燃物的时滞在5个气温梯度内总体的趋势均为随着空气相对湿度的升高而增大。这是由于当可燃物处于气温不变、空气相对湿度升高的条件下, 因平衡含水率的升高, 可燃物内在的水分达到更高平衡值的时间也会相应地增加, 即可燃物的时滞会增加。由不同空气相对湿度

条件下时滞差异性分析结果可知, 3种可燃物时滞
在60%–80%湿度条件之间差异显著($p < 0.05$), 在
20%–80%湿度条件下差异极显著($p < 0.01$)(附表5)。
在气温为5 °C的时候, 3种可燃物时滞随空气相对湿
度的变化最为明显, 其变化范围分别为: 11.60 h、
15.40 h和13.16 h。

经过回归分析, 并对各种模型进行比较后, 确
定了3种类型可燃物时滞在不同空气相对湿度条件
下随气温变化的方程为:

$$y = b_0x^3 + b_1x^2 + b_2x + b_3 \tag{13}$$

式中: y 为可燃物时滞(h), x 为气温(°C), b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 为参数。具体结果及决定系数见表8。

在不同气温条件下, 可燃物时滞随空气相对湿
度变化的方程为:

$$y = a\ln(x) + b \tag{14}$$

式中: y 为可燃物时滞(h), x 为空气相对湿度(%), a 、 b
为参数。具体结果及决定系数见表9。

从3种可燃物时滞-湿度方程可以看出, 在空气

表8 不同空气相对湿度下, 时滞-气温变化方程及决定系数

Table 8 Equations of time-lag versus temperature and coefficient of determination under different relative humidity

可燃物类型 Fuel type	空气相对湿度 Relative humidity (%)	时滞随气温变化方程 Equations of time-lag versus air temperature	决定系数 Coefficient of determination (R^2)
落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves	20	$y = (0.9600e - 3)x^3 - 0.0349x^2 - 0.0066x + 11.2399$	0.998 5
	40	$y = 0.0031x^3 - 0.1365x^2 + 1.3218x + 8.7975$	0.996 6
	60	$y = 0.0029x^3 - 0.1332x^2 + 1.2189x + 12.2780$	0.966 4
	80	$y = -0.0012x^3 + 0.0561x^2 - 1.3631x + 27.6359$	0.995 6
白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves	20	$y = (0.7533e - 3)x^3 - 0.0306x^2 - 0.1156x + 13.8320$	0.999 1
	40	$y = 0.0017x^3 - 0.0613x^2 + 0.0108x + 16.5599$	0.999 8
	60	$y = -0.0016x^3 + 0.0915x^2 - 2.2090x + 30.1219$	0.997 5
	80	$y = -0.0014x^3 + 0.5634x^2 - 1.5598x + 34.4934$	0.997 9
落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves	20	$y = 0.0011x^3 - 0.0488x^2 + 0.2400x + 11.2699$	0.987 4
	40	$y = -(0.9133e + 3)x^3 + 0.0528x^2 - 1.3674x + 20.2920$	0.990 4
	60	$y = 0.0036x^3 - 0.1468x^2 + 1.0602x + 17.0516$	0.998 0
	80	$y = -0.0016x^3 + 0.0656x^2 - 1.4069x + 329.5488$	0.995 3

表9 不同气温下, 时滞-湿度变化方程及决定系数

Table 9 Equations of time-lag versus relative humidity and coefficient of determination under different temperature

可燃物类型 Fuel type	气温 Air temperature (°C)	时滞随相对湿度变化方程 Equations of time-lag versus relative humidity	决定系数 Coefficient of determination (R^2)
落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves	5	$y = 7.5029\ln x + 21.1219$	0.787 6
	10	$y = 6.8015\ln x + 18.9909$	0.937 7
	15	$y = 5.7026\ln x + 14.5197$	0.757 8
	20	$y = 5.3324\ln x + 12.2630$	0.728 1
	25	$y = 3.3324\ln x + 8.84310$	0.733 7
白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves	5	$y = 10.5346\ln x + 27.423$	0.860 8
	10	$y = 8.2426\ln x + 21.9998$	0.800 2
	15	$y = 7.3834\ln x + 18.0445$	0.698 1
	20	$y = 6.3568\ln x + 14.0853$	0.791 6
	25	$y = 3.8974\ln x + 9.48770$	0.934 5
落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves	5	$y = 8.6887\ln x + 24.4157$	0.918 8
	10	$y = 7.6462\ln x + 20.4986$	0.841 9
	15	$y = 6.4491\ln x + 12.0780$	0.720 9
	20	$y = 5.8443\ln x + 13.3826$	0.739 4
	25	$y = 4.1722\ln x + 10.2602$	0.830 1

相对湿度相同的条件下, 3种可燃物的时滞与气温成三次函数关系, 并且随气温的升高而降低。 R^2 分别介于 0.966 4–0.998 5、0.997 5–0.999 8、0.987 4–0.998 0 之间。在相同气温的条件下, 时滞与空气相对湿度的关系为对数函数关系, 时滞随空气相对湿度的升高而升高。决定系数 R^2 分别介于 0.728 1–0.937 7、0.698 1–0.934 5、0.720 9–0.918 8 之间。

由表9可知, 在4个气温梯度下, 系数 a 均为白桦叶片大于落叶松叶片, 而落叶松-白桦叶片混合物的系数 a 介于两者之间, 说明在各个气温下, 空气相对湿度对白桦叶片时滞的影响最大, 这与实际测得的数据相符。对3组方程进行组间比较, 系数 a 随着气温的升高而降低, 说明随着气温的升高, 空气相对湿度对3种可燃物时滞的影响逐渐减弱。

图5、6给出了3种可燃物在不同气温、不同空气相对湿度条件下, 用上述两个方程计算的可燃物时滞值和由实验所得含水率数据估测的时滞值的对比。从图5中可以看见, 在使用时滞-气温模型时, 3种可燃物时滞模型的预测值和通过含水率数据估测的值相差不大; 而在使用时滞-湿度模型时, 落叶松叶片和白桦叶片时滞被低估(图6)。

3 结论和讨论

对落叶松叶片、白桦叶片、落叶松-白桦叶片混合物等3种类型地表细小死可燃物在室内测定的含水率随时间动态变化进行分析, 得到3种可燃物含水率时间动态方程, 其变化趋势均符合指数方程的

形式。此动态方程只是描述了3种可燃物在特定温、湿度条件下含水率的动态, 当外界环境条件发生变化时, 平衡含水率和时滞及其动态变化也会发生相应的变化。

气温和空气相对湿度对可燃物平衡含水率和时滞影响的研究表明: 平衡含水率和时滞与气温呈负相关关系, 与空气相对湿度呈正相关关系。同时, 仅在气温或者空气相对湿度变化幅度较大时, 两者才会对平衡含水率和时滞产生显著影响, 据此可以分别建立平衡含水率和时滞与气温、空气相对湿度的估计模型。在使用时滞-湿度模型时, 落叶松叶片和白桦叶片时滞被低估, 而其他模型的模拟效果较好。由落叶松叶片和白桦叶片的研究结果发现2种可燃物的3次重复之间, 平衡含水率和时滞存在一定差异, 这可能是由于不同凋落物年龄、分解程度和密度的不同而导致的。而落叶松-白桦叶片混合物各个重复之间亦存在差异, 这可能是由于各重复样品中的可燃物组成成分比例不同造成的。对国外的4种平衡含水率模型进行验证, 找到适合本研究数据的平衡含水率模型。其中Van Wanger模型拟合效果最好, Nelson模型拟合效果最差。本研究所选取的样本为大兴安岭地区的几种代表树种, 虽然拟合出了多种方程, 但是方程会受到地域的限制, 在未来的研究中还需进一步验证其普适性。

一般将直径小于0.6 cm的枯枝落叶定义为1 h时滞可燃物。而在本研究中, 由于受到可燃物载量、排列方式的影响, 3种可燃物的时滞均大于1 h。在以

图5 时滞-气温模型预测的时滞值和由含水率数据估测的时滞值对比。A, 落叶松叶片; B, 白桦叶片; C, 落叶松-白桦叶片混合物。

Fig. 5 Comparison between fuel time-lag predicted by time-lag-air-temperature model and that of measurements. A, *Larix gmelinii* leaves. B, *Betula platyphylla* leaves. C, Mixture of *L. gmelinii* and *B. platyphylla* leaves.

图6 时滞-湿度模型预测的时滞值和由含水率数据估测的时滞值对比。A, 落叶松叶片。B, 白桦叶片。C, 落叶松-白桦叶片混合物。

Fig. 6 Comparison between fuel time-lag predicted by time-lag-relative humidity model and that of measurements. A, *Larix gmelinii* leaves. B, *Betula platyphylla* leaves. C, Mixture of *L. gmelinii* and *B. platyphylla* leaves.

往对18种可燃物失水过程的研究中, 只有2种可燃物的时滞小于1 h (Anderson, 1990a)。这与本研究的结果相似。这可能是由于进行可燃物失水实验时, 对可燃物预先加湿会产生较长的时滞。可燃物平衡含水率主要受到气温和空气相对湿度的影响 (Cordeiro *et al.*, 2006), 而影响可燃物时滞的因素还有很多, 相对复杂。其他因素有可燃物的大小、结构、载量、排列方式等 (Nelson & Hiers, 2008)。有研究结果 (Anderson, 1990b) 表明, 时滞与可燃物表面积比、床层高度、压缩比等物理性质的关系可以建立幂函数形式的方程。

作为初步研究, 本实验在很多方面具有一定的局限性, 在未来工作中, 还需要在以下几个方面开展研究: (1) 本研究所选择的可燃物类型范围较窄, 对大兴安岭其他典型类型可燃物的含水率也应做进一步研究。受客观条件所限, 本实验在设计时只挑选了细小可燃物中比较重要的一类——叶片进行研究, 在以后的工作中将对其他类型细小可燃物, 如不同时滞的小枝、树皮等进行实验, 并结合本次研究的结果, 进一步综合分析气温和空气相对湿度对细小可燃物平衡含水率和时滞的影响。(2) 本研究仅考虑了气温和空气相对湿度等对细小死可燃物平衡含水率、时滞的影响, 在未来的研究中, 还应结合风速等气象因子, 可燃物结构、载量等可燃物物理性质, 研究各种因子对平衡含水率和时滞的作用。(3) 本研究只针对可燃物在失水过程的含水率变化, 在

未来的工作中, 应同时结合吸水过程中的相关问题进行研究。(4) 本研究是在实验室环境中对可燃物含水率变化进行模拟, 由于人工气候箱在工作中处于封闭状态, 可能会产生小气候现象, 对结果产生一定影响, 实验结果在自然环境中的应用具有一定局限性, 未来应在自然环境中进行研究, 以提高研究结果的普适性。

基金项目 国家林业公益性行业科研专项 (2014-04402) 和中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2572014AA22)。

参考文献

- Anderson HE (1990a). Moisture diffusivity and response time in fine forest fuels. *Canadian Journal of Forest Research*, 20, 315–325.
- Anderson HE (1990b). Predicting equilibrium moisture content of some foliar forest litter in the northern Rocky Mountains. Washington D.C., USA. <http://www.fs.fed.us>. Cited: 2015-05-15.
- Anderson HE, Schuette RD, Mutch RW (1978). Timelag and equilibrium moisture content of ponderosa pine needles. Washington D.C., USA. <http://www.fs.fed.us>. Cited: 2015-04-20.
- Byram GM, Jemison GM (1943). Solar radiation and forest fuel moisture. *Journal of Agricultural Research*, 67, 147–176.
- Byram GM, Nelson RM Jr (2015). An analysis of the drying process in forest fuel material. Washington D.C., USA. <http://www.fs.fed.us>. Cited: 2015-04-10.
- Catchpole EA, Catchpole WR, Viney NR, McCaw WL, Marsden-Smedley JB (2001). Estimating fuel response time and

- predicting fuel moisture content from field data. *International Journal of Wildland Fire*, 10, 215–222.
- Cordeiro DS, Raghavan GSV, Oliveira WP (2006). Equilibrium moisture content models for *Maytenus ilicifolia* leaves. *Biosystems Engineering*, 94, 221–228.
- Jin S, Chen PY (2012). Modelling drying processes of fuelbeds of Scots pine needles with initial moisture content above the fibre saturation point by two-phase models. *International Journal of Wildland Fire*, 21, 418–427.
- Jin S, Jiang WJ, Sun YY (1999). The theoretical algorithm of predicting fuel moisture with time-lag and equilibrium moisture content. *Forest Fire Prevention*, (4), 12–14. (in Chinese) [金森, 姜文娟, 孙玉英 (1999). 用时滞和平衡含水率准确预测可燃物含水率的理论算法. 森林防火, (4), 12–14.]
- Jin S, Li L, Zhao YJ (2011). Analysis on robustness and extrapolation errors of modeling fuel moisture content of dead twigs of larch by direct estimation from observed data. *Scientia Silvae Sinicae*, 47(6), 114–121. (in Chinese with English abstract) [金森, 李亮, 赵玉晶 (2011). 用直接估计法预测落叶松枯枝含水率的稳定性和外推误差分析. 林业科学, 47(6), 114–121.]
- Jin S, Li XY, Li YX (2000). Desorption processes of four fine fuels. *Journal of Northeast Forestry University*, 28(1), 35–38. (in Chinese with English abstract) [金森, 李绪尧, 李有祥 (2000). 几种细小可燃物失水过程中含水率的变化规律. 东北林业大学学报, 28(1), 35–38.]
- Matthews S, McCaw WL, Neal JE, Smith RH (2007). Testing a process-based fine fuel moisture model in two forest types. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 23–35.
- Nelson RM Jr (1984). A method for describing equilibrium moisture content of forest fuels. *Canadian Journal of Forest Research*, 14, 597–600.
- Nelson RM Jr, Hiers JK (2008). The influence of fuelbed properties on moisture drying rates and timelags of longleaf pine litter. *Canadian Journal of Forest Research*, 38, 2394–2404.
- Pellizzaro G, Cesaraccio C, Duce P, Ventura A, Zara P (2006). Influence of seasonal weather variations and vegetative cycle on live moisture content and ignitability in Mediterranean maquis species. *Forest Ecology and Management*, 234(Suppl.), S111.
- Shan YL, Liu NA, Hu HQ, Zhang QC (2005). Moisture content of litter of principal fuel types in Liangshui Nature Reserve. *Journal of Northeast Forestry University*, 33(5), 41–43. (in Chinese with English abstract) [单延龙, 刘乃安, 胡海清, 张启昌 (2005). 凉水自然保护区主要可燃物类型凋落物层的含水率. 东北林业大学学报, 33(5), 41–43.]
- Simard AJ (1968). The moisture content of forest fuels-I: A review of the basic concepts. Ottawa, Ontario, Canada, <http://www.nrcan.gc.ca/forests>. Cited: 2015-04-01.
- Tian T, Di XY (2013). Research review on change mechanism and impact factors of forest surface fuel moisture. *Forest Engineering*, 29(2), 21–25. (in Chinese with English abstract) [田甜, 邸雪颖 (2013). 森林地表可燃物含水率变化机理及影响因子研究概述. 森林工程, 29(2), 21–25.]
- Toomey M, Vierling LA (2005). Multispectral remote sensing of landscape level foliar moisture: Techniques and applications for forest ecosystem monitoring. *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 1087–1097.
- van Wagner CE (1972). Equilibrium moisture contents of some fine forest fuels in eastern Canada. Chalk, Ontario, Canada. <http://www.nrcan.gc.ca/forests>. Cited: 2015-03-17.
- Viney NR (1991). A review of fine fuel moisture modelling. *International Journal of Wildland Fire*, 1, 215–234.
- Viney NR, Catchpole EA (1991). Estimating fuel moisture response times from field observations. *International Journal of Wildland Fire*, 1, 211–214.

责任编辑: 赵 平 责任编辑: 王 薇

附表1 不同气温、不同空气相对湿度条件下可燃物含水率动态方程

Appendix table 1 Equations of moisture content dynamics of fuels under different air temperature and relative humidity

气温 Air tempe- rature (°C)	相对湿度 Relative humi- dity (%)	落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves	决定 系数 Coefficient of determi- nation (R^2)	白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves	决定 系数 Coefficient of determi- nation (R^2)	落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves	决定 系数 Coefficient of determi- nation (R^2)
5	20	$y = 0.0763 + 0.7502\exp(-0.0959t)$	0.994 1	$y = 0.1090 + 0.6817\exp(-0.0793t)$	0.994 3	$y = 0.0954 + 0.7567\exp(-0.0872t)$	0.997 2
	40	$y = 0.1346 + 0.7134\exp(-0.0811t)$	0.994 9	$y = 0.1612 + 0.6449\exp(-0.0653t)$	0.990 6	$y = 0.1453 + 0.6858\exp(-0.0678t)$	0.988 7
	60	$y = 0.2127 + 0.6171\exp(-0.0656t)$	0.996 7	$y = 0.2537 + 0.5559\exp(-0.0474t)$	0.989 9	$y = 0.2388 + 0.5515\exp(-0.0524t)$	0.984 7
	80	$y = 0.3056 + 0.5030\exp(-0.0454t)$	0.983 6	$y = 0.3493 + 0.4769\exp(-0.0357t)$	0.991 8	$y = 0.3304 + 0.5058\exp(-0.0416t)$	0.995 3
10	20	$y = 0.0723 + 0.7777\exp(-0.1144t)$	0.996 3	$y = 0.0843 + 0.7230\exp(-0.0974t)$	0.997 2	$y = 0.0796 + 0.7726\exp(-0.1043t)$	0.995 5
	40	$y = 0.0916 + 0.7293\exp(-0.0859t)$	0.990 4	$y = 0.1210 + 0.6995\exp(-0.0821t)$	0.998 3	$y = 0.1209 + 0.7302\exp(-0.0942t)$	0.997 3
	60	$y = 0.1854 + 0.6218\exp(-0.0673t)$	0.985 9	$y = 0.2403 + 0.5778\exp(-0.0631t)$	0.987 4	$y = 0.1916 + 0.6068\exp(-0.0645t)$	0.976 2
	80	$y = 0.2766 + 0.5367\exp(-0.0539t)$	0.992 9	$y = 0.3163 + 0.4952\exp(-0.0438t)$	0.977 1	$y = 0.2693 + 0.5429\exp(-0.0498t)$	0.993 4
15	20	$y = 0.0495 + 0.7928\exp(-0.1567t)$	0.992 2	$y = 0.0731 + 0.7392\exp(-0.1262t)$	0.996 9	$y = 0.0625 + 0.7660\exp(-0.1227t)$	0.994 2
	40	$y = 0.0667 + 0.7667\exp(-0.1246t)$	0.997 1	$y = 0.0815 + 0.7332\exp(-0.1139t)$	0.998 1	$y = 0.0766 + 0.7684\exp(-0.1098t)$	0.994 6
	60	$y = 0.1501 + 0.6801\exp(-0.1036t)$	0.995 9	$y = 0.1366 + 0.6214\exp(-0.0846t)$	0.994 6	$y = 0.1086 + 0.6858\exp(-0.0851t)$	0.994 7
	80	$y = 0.2284 + 0.6192\exp(-0.0648t)$	0.996 8	$y = 0.2731 + 0.4999\exp(-0.0510t)$	0.990 1	$y = 0.2092 + 0.6259\exp(-0.0547t)$	0.994 3
20	20	$y = 0.0435 + 0.7602\exp(-0.2031t)$	0.985 5	$y = 0.0515 + 0.7774\exp(-0.1917t)$	0.978 3	$y = 0.0470 + 0.7741\exp(-0.1928t)$	0.979 3
	40	$y = 0.0621 + 0.7208\exp(-0.1818t)$	0.992 9	$y = 0.0682 + 0.7349\exp(-0.1711t)$	0.992 2	$y = 0.0655 + 0.7504\exp(-0.1567t)$	0.989 5
	60	$y = 0.0806 + 0.7157\exp(-0.1236t)$	0.994 1	$y = 0.0863 + 0.6989\exp(-0.0991t)$	0.996 2	$y = 0.0810 + 0.7189\exp(-0.1174t)$	0.998 3
	80	$y = 0.1774 + 0.6130\exp(-0.0760t)$	0.991 2	$y = 0.1927 + 0.6004\exp(-0.0691t)$	0.986 3	$y = 0.1539 + 0.6745\exp(-0.0695t)$	0.995 8
25	20	$y = 0.0246 + 0.7845\exp(-0.2366t)$	0.981 4	$y = 0.0424 + 0.7462\exp(-0.2749t)$	0.976 2	$y = 0.0418 + 0.7459\exp(-0.2298t)$	0.997 1
	40	$y = 0.0338 + 0.7880\exp(-0.2139t)$	0.993 7	$y = 0.0470 + 0.7328\exp(-0.1925t)$	0.993 8	$y = 0.0446 + 0.7779\exp(-0.2039t)$	0.982 9
	60	$y = 0.0601 + 0.7739\exp(-0.1612t)$	0.987 5	$y = 0.0752 + 0.7267\exp(-0.1389t)$	0.996 9	$y = 0.0703 + 0.7309\exp(-0.1257t)$	0.994 8
	80	$y = 0.1274 + 0.6767\exp(-0.1064t)$	0.997 1	$y = 0.1325 + 0.6731\exp(-0.1085t)$	0.996 2	$y = 0.1248 + 0.6735\exp(-0.0977t)$	0.997 0

附表2 不同气温条件下,平衡含水率差异性分析

Appendix table 2 Significance level of equilibrium moisture content (EMC) under different air temperature

气温 Air temperature	落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves					白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves					落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves				
	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C
5 °C	1.00	0.719	0.399	0.166	0.070	1.00	0.724	0.314	0.103	0.044*	1.00	0.597	0.202	0.089	0.055
10 °C	—	1.00	0.619	0.284	0.120	—	1.00	0.511	0.089	0.120	—	1.00	0.374	0.152	0.084
15 °C	—	—	1.00	0.543	0.237	—	—	1.00	0.488	0.235	—	—	1.00	0.525	0.296
20 °C	—	—	—	1.00	0.466	—	—	—	1.00	0.528	—	—	—	1.00	0.606
25 °C	—	—	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

附表3 不同空气相对湿度条件下,平衡含水率差异性分析

Appendix table 3 Significance level of equilibrium moisture content (EMC) under different relative humidity

相对湿度 Relative humidity	落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves				白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves				落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves			
	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%
20%	1.00	0.269	0.026*	0.001**	1.00	0.343	0.060	0.002**	1.00	0.263	0.068	0.004**
40%	—	1.00	0.105	0.004**	—	1.00	0.182	0.008**	—	1.00	0.245	0.016*
60%	—	—	1.00	0.087	—	—	1.00	0.124	—	—	1.00	0.150
80%	—	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—	1.00

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

附表4 不同气温条件下, 时滞差异性分析
Appendix table 4 Significance level of time-lag under different air temperature

气温 Air temperature	落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves					白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves					落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves				
	5 ℃	10 ℃	15 ℃	20 ℃	25 ℃	5 ℃	10 ℃	15 ℃	20 ℃	25 ℃	5 ℃	10 ℃	15 ℃	20 ℃	25 ℃
5 ℃	1.00	0.653	0.161	0.066	0.019*	1.00	0.401	0.146	0.042*	0.012*	1.00	0.439	0.172	0.043*	0.014*
10 ℃	—	1.00	0.262	0.098	0.023*	—	1.00	0.429	0.119	0.025*	—	1.00	0.498	0.131	0.041*
15 ℃	—	—	1.00	0.500	0.153	—	—	1.00	0.396	0.098	—	—	1.00	0.336	0.112
20 ℃	—	—	—	1.00	0.449	—	—	—	1.00	0.334	—	—	—	1.00	0.502
25 ℃	—	—	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

附表5 不同空气相对湿度条件下, 时滞差异性分析
Appendix table 5 Significance level of time-lag under different relative humidity

相对湿度 Relative humidity	落叶松叶片 <i>Larix gmelinii</i> leaves				白桦叶片 <i>Betula platyphylla</i> leaves				落叶松-白桦叶片混合物 Mixture of <i>L. gmelinii</i> and <i>B. platyphylla</i> leaves			
	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%
20%	1.00	0.463	0.111	0.007**	1.00	0.560	0.108	0.017*	1.00	0.538	0.086	0.007**
40%	—	1.00	0.350	0.121	—	1.00	0.259	0.204	—	1.00	0.228	0.195
60%	—	—	1.00	0.026*	—	—	1.00	0.038*	—	—	1.00	0.023*
80%	—	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—	1.00

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

植物生态学报官网
唯一投稿网址

微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布

微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览