

以小时为步长的大兴安岭兴安落叶松林地表可燃物含水率预测模型*

于宏洲 金 森** 邸雪颖

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘 要 应用时滞平衡含水率法(包括 Nelson 和 Simard 两种)及气象要素回归法,以小时为步长对大兴安岭地区阳坡上部落叶松林下地表细小死可燃物进行动态含水率测定,分析了不同郁闭度林分的预测误差.结果表明:以小时为步长的可燃物含水率预测方法适用于大兴安岭地区的典型落叶松林分,Simard 法预测平均绝对误差为 1.1%,平均相对误差为 8.5%,低于 Nelson 法和传统的气象要素回归法,接近同类研究的误差范围;同一坡度、坡位上,不同郁闭度下的可燃物含水率变化差异较大,使用以小时为步长的可燃物含水率预测方法,应根据不同地区林分和地点选择合适的平衡含水率模型,或建立基于林分的可燃物含水率模型.

关键词 兴安落叶松 以小时为步长 平衡含水率 气象要素回归 大兴安岭

文章编号 1001-9332(2013)06-1565-07 **中图分类号** S762 **文献标识码** A

Prediction models for ground surface fuels moisture content of *Larix gmelinii* stand in Daxing'anling of China based on one-hour time step. YU Hong-zhou, JIN Sen, DI Xue-ying (College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(6): 1565–1571.

Abstract: By using the equilibrium moisture content-time lag methods of Nelson and Simard and the meteorological element regression method, this paper studied the dynamics of the moisture content of ground surface fine dead fuels under a *Larix gmelinii* stand on the sunny slope in Daxing'anling with a time interval of one hour, established the corresponding prediction models, and analyzed the prediction errors under different understory densities. The results showed that the prediction methods of the fuels moisture content based on one-hour time step were applicable for the typical *Larix gmelinii* stand in Daxing'anling. The mean absolute error and the mean relative error of Simard method was 1.1% and 8.5%, respectively, being lower than those of Nelson method and meteorological element regression method, and close to those of similar studies. On the same slopes and slope positions, the fuel moisture content varied with different understory densities, and thus, it would be necessary to select the appropriate equilibrium moisture content model for specific regional stand and position, or establish the fuel moisture content model based on specific stand when the dynamics of fuel moisture content would be investigated with a time interval of one hour.

Key words: *Larix gmelinii*; one-hour time step; equilibrium moisture content; meteorological element regression; Daxinganling.

森林火灾多为地表火,直接影响地表可燃物着火难易程度和林火行为的重要因子是细小死可燃物的含水率^[1-3].在森林火险天气预报和火行为预报中,往往需要不同时刻的可燃物含水率数据^[1-6],可燃物含水率预测的时间尺度越短越好^[4,7].以往受

气象观测等条件限制,含水率预测主要以日为步长进行,尚不能满足小时间尺度火行为预报的需要.有关学者对此问题已有关关注并开展了一系列研究.Nelson^[4,8]在建立可燃物含水率预测模型时,考虑到时间步长的影响.何忠秋等^[9]使用相对湿度法^[10]对不同步长的可燃物含水率进行了预测,采样时间步长为 2 h. Nelson^[4]建立了以小时为步长、基于过程的 10 h 时滞的北美黄松枝条含水率预测模型,认为

* 林业公益性行业科研专项(201204508)资助.

** 通讯作者. E-mail: jinsen2005@126.com

2012-09-24 收稿,2013-03-18 接受.

无法获取准确的气象数据导致预测精度不够,且过程模型过于复杂. Catchpole 等^[11]在 Nelson^[4]模型基础上建立了直接利用野外数据通过时滞和平衡含水率来预测可燃物含水率的方法. 曲智林等^[12]建立了无降雨条件下枯死椴木以小时为步长的含水率预测统计模型. 金森和李亮^[7]在实验室内使用直接估计法对兴安落叶松凋落物进行以小时为步长的连续观测,获得了较好的预测效果. 以小时为步长的可燃物含水率预测模型将提供火险和火行为预报的实时性,但以往的工作多以室内试验为主或以可燃物湿度棒为研究对象,只有 Catchpole 等^[11]的研究以野外细小可燃物为研究对象. 目前对该类模型的适用性评价尚未开展,对不同类型可燃物的相应预测模型还没有建立,我国还没有开展以野外可燃物为对象的相关工作. 因此,建立一套适合我国各地区的、以小时为步长的含水率预测模型,对提高森林火险预报及火行为预报的准确性具有重要意义.

黑龙江省大兴安岭地区是我国面积最大、火灾最严重的国有林区,提高该区含水率预测的准确性对于促进森林防火工作意义重大. 本研究以该地区典型植被兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 林为研究对象,研究以小时为步长的含水率预测方法在该林分的适用性和精度,以期获得一套最有效的预测方法.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于大兴安岭塔河林业局盘古林场(52°41′57.1″ N, 123°51′56.5″ E),属寒温带大陆性季风气候,且山地气候特征明显. 因受西伯利亚寒流影响,该区冬季寒冷而漫长,年均气温-5℃,极端最高气温35.2℃;天气变化较剧烈,常出现高温低湿及大风天气,春秋两季是林火的高发期. 地貌为大兴安岭石质中低山山地,以丘陵、低山和少量中山为主,地带性土壤类型为棕色针叶林土. 研究区典型的植被类型是以兴安落叶松为优势的寒温带针叶林^[13],主要林分类型为兴安落叶松-樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)-白桦 (*Betula platyphylla*) 混交林、樟子松林、白桦林和山杨 (*Populus davidiana*) 林,还有少量的红皮云杉 (*Picea koraiensis*) 林.

1.2 可燃物含水率的测定

在9—10月(秋季森林防火期),选取3种不同郁闭度的阳坡上坡位(火险等级高)兴安落叶松林分,林分主要树种为落叶松,组成比例超过9成,混有少量白桦. 样地平均胸径6.1 cm,平均树高20 m.

表 1 样地信息
Table 1 Information of sampling plots

编号 No.	采样位置 Sampling location	海拔 Elevation (m)	郁闭度 Canopy density
1	无遮荫样地 Non-shaded plot	534	0
2	半遮荫样地 Semi-shaded plot	540	0.2
3	林荫下样地 High-shaded plot	536	0.6

林下地表多以凋落松针覆盖,伴有白桦落叶,比例为9:1,林分信息参见表1. 每处样地的观测点选择在地表凋落物分布较均匀处,保证观测点的郁闭度接近样地总体郁闭度.

在样地架设便携式气象站(CCAT-YD),每隔1 h记录1次空气温度、相对湿度、风速、风向和气压等信息. 用尼龙网(18目,1 mm)加衬于5#塑料方筛(265 mm×205 mm×85 mm)的底部及四壁,上方加盖粗眼尼龙网(8目,2.5 mm),以防止样品因凋落或增加而发生质量变化. 使用电子天平(JJ600Y)称量方筛的初始质量后,采集同样大小的地表凋落层样块置入方筛中. 采集时尽量保持凋落层原有结构,然后将方筛放置于取样点,以保持其周围的环境结构. 因为在山中夜间试验难度大,所以仅在每日9:00—16:00每隔1 h称量一次方筛质量,持续10 d,共收集80组数据. 最后将方筛中可燃物装于塑料袋中带回实验室,放入干燥箱中105℃持续烘干24 h直至恒量,称其干质量.

可燃物含水率计算公式如下:

$$M = (W_h - W_d) / W_h \times 100\% \tag{1}$$

式中: M 为可燃物含水率(%); W_h 为可燃物湿质量(g); W_d 为可燃物干质量(g).

使用野外调查数据分别计算各个采样点每一时刻的含水率,将它们与气象数据(温度、湿度)共同分组后进行数据检测. 因为含水率高于35%时可燃物很难燃烧,研究意义不大^[14]. 因此,本文剔除高于35%的含水率数据及部分因测量失误产生的错误数据,其中,无遮荫样地剔除12个,半遮荫样地剔除13个,林荫下样地剔除17个.

1.3 建立可燃物含水率预测模型

目前,以小时为步长的可燃物含水率预测方法,主要有过程模型、时滞平衡含水率法和气象要素回归法^[15-17]. 其中,过程模型由于结构过于复杂而难以应用^[18-20],所以本文只选用时滞平衡含水率法和气象要素回归法对以小时为步长的可燃物含水率进行预测. 时滞平衡含水率法采用直接估计

法^[7,11,21-24]进行参数估计,分别使用 Nelson^[8]和 Simard^[25]两种平衡含水率模型,上述3种方法以下分别简称为 Simard 法、Nelson 法和气象要素回归法。

Nelson 平衡含水率模型^[8]为:

$$E=\alpha+\beta\ln\Delta G=\alpha+\beta\ln(-RT/m\ln H) \tag{2}$$

式中: R 为普适气体常量,其值为 $8.314\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$; T 为环境温度(K); H 为相对湿度(%); m 为 H_2O 相对分子质量,其值为 $18\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; α 、 β 为待估计参数. 具体参数估计法请见文献^[7].

Simard 平衡含水率模型^[25]为:

$$E=\begin{cases} 0.03+0.2626H-0.00104HT & (H<10) \\ 1.76+0.1601H-0.0266T & (10\leq H<50) \\ 21.06-0.4944H+0.005565H^2-0.00063HT & (H\geq 50) \end{cases} \tag{3}$$

气象要素回归法采用多元线性模型,用逐步回归法进行参数估计,以筛选出影响最大的因素。

$$M=\sum_{i=1}^n X_i b_i \tag{4}$$

式中: X_i 为采用的气象变量,包括前1h和当前时刻的温度($^{\circ}\text{C}$)、湿度(%)、风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、降雨量(mm)等; b_i 为待估计参数。

上述3个模型均采用 n-fold 交叉验证来检验模型精度^[7]. 即每次取1个数据作为验证数据,用其余的 $n-1$ 个数据建模,共进行 n 次参数估计,平均绝对误差(MAE)和平均相对误差(MRE)按下式计算:

$$MAE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n |M_i-\hat{M}_i| \tag{5}$$

$$MRE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \frac{|M_i-\hat{M}_i|}{M_i} \tag{6}$$

式中: M_i 为含水率实测值(%); $\hat{M}_i$ 为可燃物含水率预测值(%). 本研究中,无遮荫样地、半遮荫样地、林荫下样地的 n 值分别为68、67、63。

参数估计用 STATISTICA 8.0 软件编程实现^[26].

2 结果与分析

2.1 地表可燃物含水率动态变化

9:00—16:00,研究区可燃物含水率的变化趋势类似于相对湿度,总体上呈周期性变化. 当相对湿度高于一定程度且温度较低时,可燃物含水率明显高于其他情况,由于高于35%的含水率没有研究价值^[14],在图中以缺失数据断线显示(图1). 无遮荫样地的可燃物含水率明显低于半遮样地和林荫下样地,林荫下样地含水率总体高于半遮荫样地;林荫下样地与无遮荫样地的平均差距达3%. 说明地表细小可燃物含水率具有较强的异质性,与林分郁闭度有关,进而与局部接受的太阳辐射量有关。

2.2 以小时为步长的可燃物含水率预测模型

气象要素回归法经逐步回归筛选后的最终可燃物含水率预测模型为:

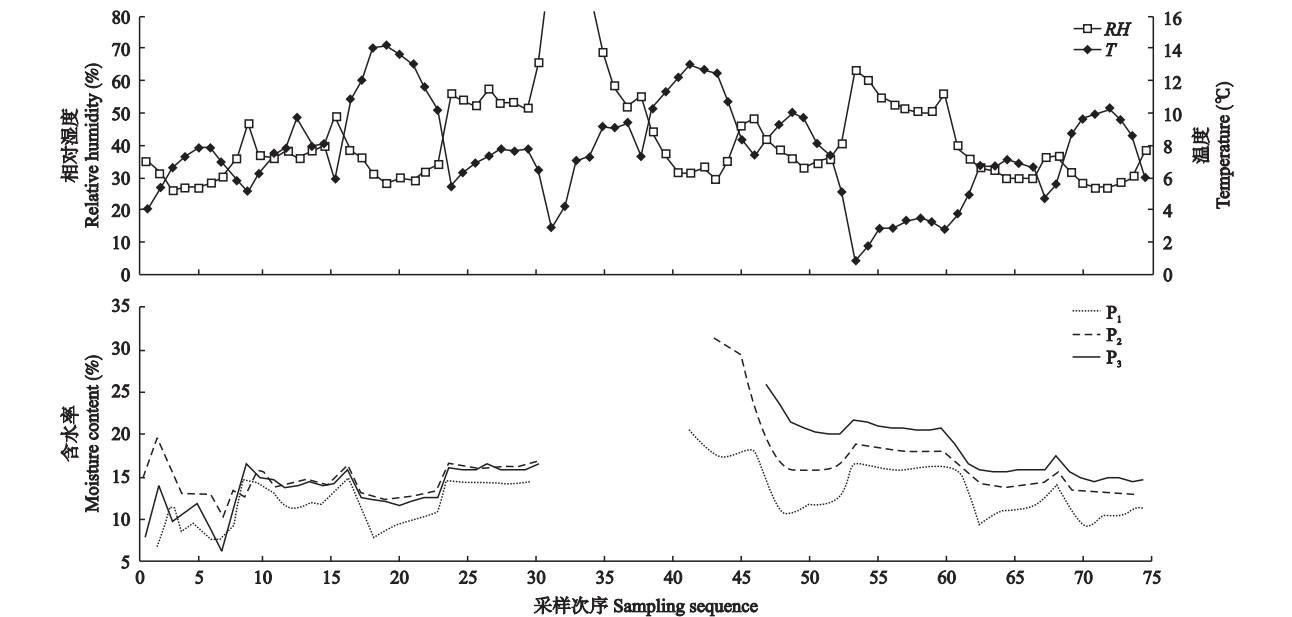


图1 研究区实测相对湿度、温度和可燃物含水率的动态

Fig.1 Dynamics of measured relative humidity, temperature and fuel moisture contents in the study area.

RH:相对湿度 Relative humidity; T:温度 Temperature; P₁:无遮荫样地 Non-shaded plot; P₂:半遮荫样地 Semi-shaded plot; P₃:林荫下样地 High-shaded plot. 下同 The same below.

表 2 3 种模型的估计参数
Table 2 Estimated parameters from three models

模型 Model	参数 Parameter	无遮荫样地 Non-shaded plot	半遮荫样地 Semi-shaded plot	林荫下样地 High-shaded plot
Nelson 法	α	0.441	0.354	0.502
Nelson method	β	-0.066	-0.044	-0.074
	τ	2.374	3.182	3.053
	τ	6.003	8.303	10.186
Simard 法	R^2	0.848	0.824	0.841
Simard method	R^2	0.848	0.824	0.841
气象要素回归法	b_0	-0.470	-0.338	0.472
Meteorological element regression method	b_1	-0.003	-0.007	-0.010
	b_2	0.030	-0.033	-0.176
	b_3	0.004	0.009	0.009
	b_4	0.195	0.190	0.367
	R^2	0.431	0.145	0.373

$$M(t_i) = b_0 + b_1 T_i + b_2 H_i + b_3 T_{i-1} + b_4 H_{i-1} \tag{7}$$

式中： $b_0 \sim b_4$ 均为待估计参数。

由表 2 可以看出,在 3 个样地中,Nelson 模型的参数 α 最小值为 0.354,最大值为 0.502,平均值为 0.432; β 最小值为-0.074,最大值为-0.045,平均值为-0.062;时滞 τ 最小值为 2.38 h,最大值为 3.18 h,平均值为 2.87 h。 β 值可直接反映平衡含水率对温湿度的敏感性^[8,27]。由此可得,研究区半遮荫样地可燃物持水能力强于其他位置的可燃物,但不同样地的可燃物时滞变化不大。

由 Simard 法估计的可燃物时滞变化大于 Nelson 法。Simard 模型中,无遮荫样地可燃物的时滞最小(约 6 h),林荫下样地可燃物的时滞最大,达 10 h,两个样地时滞极值相差 2 倍左右。Simard 和 Nelson 模型所得时滞不同是因为时滞的估计与可燃物平衡含水率的估计相互影响,采用不同的平衡含水率模型,其估计的平衡含水率不同^[28],因此,时滞也有所差异。两模型所得时滞对于不同样地可燃物的变化趋势一致,均表现为林荫下样地>半遮荫样地>无遮荫样地,说明无遮荫样地的可燃物干燥速度快于林荫下可燃物。

对于 MAE 和 MRE 两种误差,不同样地可燃物含水率的预测结果精度最高的模型均是 Simard 模型,精度最低的均是 Nelson 模型,气象要素回归模型的精度比较接近 Simard 模型(图 2)。MAE 中,Simard 法对无遮荫样地的可燃物含水率误差最小(1.1%),然后依次是林荫下样地和半遮荫样地;气象要素回归法对无遮荫样地的可燃物含水率误差最小(1.8%),然后依次是半遮荫样地和林荫下样地,这两种方法的精度都较高;Nelson 法对不同样地可燃物含水率的 MAE 在 3.7%~7.1%,误差较大。

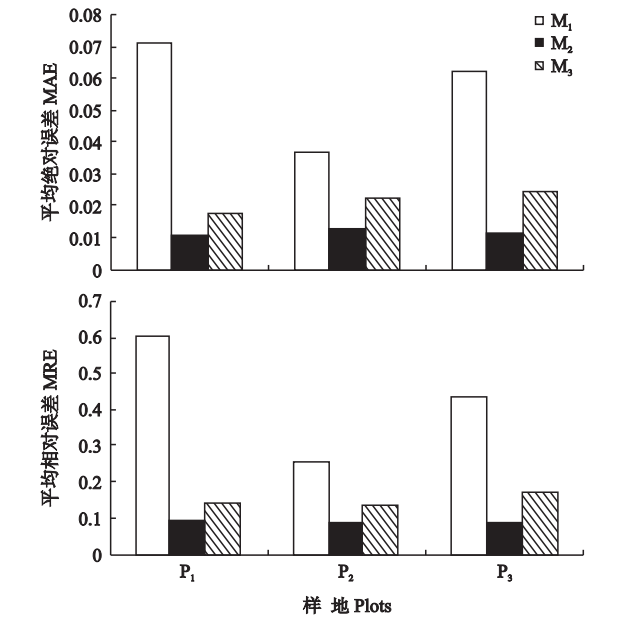


图 2 3 种模型的误差对比
Fig. 2 Comparison of errors in the three models.
M₁: Nelson 模型 Nelson model; M₂: Simard 模型 Simard model; M₃: 气象要素回归模型 Meteorological element regression model.

MRE 中,Simard 法对半遮荫样地的可燃物含水率误差最小(8.5%);Nelson 法对无遮荫样地的可燃物含水率误差最大,MRE 值高达 60.7%。可见,Simard 法对可燃物含水率的预测效果最好,Nelson 法的预测效果最差。Simard 法与气象要素回归法在不同郁闭度林分中的误差差异不大,而 Nelson 法的误差差异较大,表明前两种方法对兴安落叶松林可燃物含水率的预测结果比较稳定。

3 种方法都能准确预测 3 种样地可燃物含水率的变化趋势:Nelson 法的预测结果均高于实测值,其中,半遮荫样地可燃物的预测值较接近实测值,在无遮荫样地和林荫下样地的预测结果则偏高;气象要素回归法对于不同位置可燃物含水率的预测结果变化较平稳,少有大幅波动;Simard 法对 3 种样地可燃物含水率的预测结果最接近实测值,变化波动性略大于实测值,预测结果最好(图 3)。

对于无遮荫样地,Simard 法很好地反映了可燃物含水率的日间变化趋势,气象要素回归法的误差虽然与 Simard 法较接近,但对变化趋势的模拟不如 Simard 法。在半遮荫样地,可燃物含水率变化较稳定,少有大幅波动,预测结果与实测结果变化情况较接近;Simard 法的预测效果最好,气象要素回归法和 Nelson 法相对较差。林荫下样地可燃物含水率的波动最激烈,气象要素回归法和 Nelson 法的预测结果都较接近实测值,总体预测精度较高。

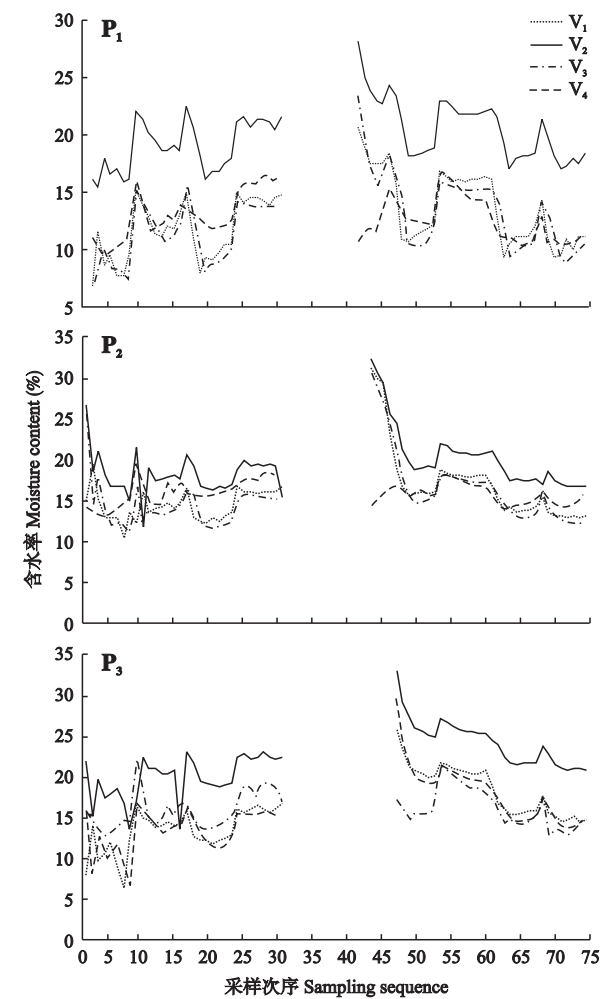


图3 不同样地实测值与模型预测值的对比

Fig.3 Comparison of measured and predictive values in different plots.

V₁:实测值 Measured value; V₂: Nelson 模型预测值 Predictive value of Nelson model; V₃: Simard 模型预测值 Predictive value of Simard model; V₄:气象要素回归模型预测值 Predictive value of meteorological element regression model.

Nelson 法虽然精度最差,但在 3 种样地中均与实际值保持常距,可能是由于模型的地域适用性所致.理论上,在 Nelson 模型中加入修正常数可以令其更接近实测值,这一点有待进一步研究.

3 讨 论

采用以小时为步长的时滞平衡含水率法及气象要素回归法,预测兴安落叶松地表死可燃物含水率的误差差别较大.其中,采用 Simard 模型的时滞平衡含水率预测法精度最高,MAE 在 1.1% ~ 1.2%,完全能满足林火行为预测需要^[20,29].气象要素回归模型次之,MAE 在 2% 左右,基本满足火险预报和火行为预报需要.采用 Nelson 模型的时滞平衡含水率法精度最差,MAE 在 3.7% ~ 7.1%,不能满足火险

预报需要.说明以小时为步长的可燃物含水率预测方法可应用于大兴安岭地区典型落叶松林分,其中,Simard 法对可燃物含水率的预测精度高于传统的气象要素回归法.

Catchpole 等^[11]构建的模型在桉树丛和澳大利亚桉树林中应用的 MAE 和 MRE 分别是 0.8% ~ 19% 和 1.9% ~ 2.4%,使用 Matthews^[18]提出过程模型的误差分别为 1.3% 和 9.4%,与本研究结果相似,说明了以小时为步长的可燃物含水率预测方法的有效性. Catchpole 等^[11]认为,Simard 平衡含水率模型是基于加拿大北方的树种木材所建立,可能不适合于澳大利亚的树种^[30],因此,其选择了基于物理过程的 Nelson 平衡含水率模型,从而得到了较好的结果.但本研究中,Simard 法的结果优于 Nelson 法.从理论上讲,Simard 模型基于失水过程的统计数据^[31],不适用于吸水过程,且由于以木材为研究对象,普适性较差^[19]. Simard 模型在本研究中效果最好,与本研究地域与 Simard 模型建模数据来源地有相似的气候条件和林分条件有较大关系,但其外推性尚需验证. Catchpole 等^[11]和金森等^[23]采用 Nelson 模型预测了野外和室内可燃物的含水率,其精度都很高.作为半物理模型,Nelson 模型理论上的外推能力最强,适用性较广.但本研究结果与之相反,对于多个样地,Nelson 模型的精度都最差.表明该模型并不完全适用所有种类的可燃物,还需要研究其他物理性的平衡含水率模型.上述结果间接反映出 Catchpole 等^[11]选择 Nelson 模型而不用 Simard 模型的原因(尽管其文献中没有给出 Simard 法的误差).同时也说明在不同地区如果采用以小时为步长的可燃物含水率预测方法,应针对林分和地区选择合适的平衡含水率模型.

尽管本研究区存在着合适的以小时为步长的可燃物含水率预测方法,但这些方法的外推性和普适性如何尚不清楚,今后应进一步研究各模型的适用性及外推能力.此外,在大兴安岭地区,春秋两季均是林火高发季节,而此次研究仅观测了秋季数据,数据量不足以代表所有季节的情况,今后将补充研究春季各林分细小可燃物含水率变化规律^[32].

本研究样地为火险等级高的阳坡上部,对于火险预报而言,这是最合适的采样地点.本研究结果表明,在同一坡度、坡位上,不同郁闭度下的可燃物含水率变化差异较大.本文仅考虑了郁闭度对可燃物含水率的影响,可以推断,对于不同坡度、坡向、坡位和林分组成,其林下也会存在较大的可燃物含水率

差异.为了更好地进行林火行为预测,应充分考虑这种含水率的异质性.因此,开展不同环境条件的可燃物含水率预测研究,或建立基于林分的可燃物含水率模型^[33]更重要.这也是今后应重点开展的工作.

参考文献

- [1] Rothermel RC, Wilson RA, Morris GA, *et al.* Modeling Moisture Content of Fine Dead Wildland Fuels: Input to the BEHAVE Fire Prediction System. USDA Forest Service Research Paper INT-359. Ogden, UT: Intermountain Research Station, Forest Service, United States Department of Agriculture, 1986
- [2] Di X-Y (邸雪颖). Forest Fire Forecast and Prediction. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1993 (in Chinese)
- [3] He Z-Q (何忠秋), Zhang C-G (张成钢), Niu Y-J (牛永杰). A review of research in the moisture of forest flammable matter. *World Forestry Research* (世界林业研究), 1996(5): 26–30 (in Chinese)
- [4] Nelson RM. Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, **30**: 1071–1087
- [5] Chuvieco E, Aguado I, Dimitrakopoulos AP. Conversion of fuel moisture content values to ignition potential for integrated fire danger assessment. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, **34**: 2284–2293
- [6] Hu H-Q (胡海清). Forest Fire Ecology and Management. Beijing: China Forestry Press, 2005 (in Chinese)
- [7] Jin S (金 森), Li L (李 亮). Validation of the method for direct estimation of timelag and equilibrium moisture content of forest fuel. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2010, **46**(2): 95–102 (in Chinese)
- [8] Nelson RM. A method for describing equilibrium moisture content of forest fuels. *Canadian Journal of Forest Research*, 1984, **14**: 597–600
- [9] He Z-Q (何忠秋), Li C-S (李长胜), Zhang C-G (张成钢), *et al.* Research of forest fuel moisture model. *Forest Fire Prevention* (森林防火), 1995(2): 15–20 (in Chinese)
- [10] Fosberg MA, Deeming JE. Derivation of the 1- and 10-hour Timelag Fuel Moisture Calculations for Fire-danger Rating. USDA Forest Service Research Note RM-207. Fort Collins, CO: Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, United States Department of Agriculture, 1971
- [11] Catchpole EA, Catchpole WR, Viney NR, *et al.* Estimating fuel response time and predicting fuel moisture content from field data. *International Journal of Wildland Fire*, 2001, **10**: 215–222
- [12] Qu Z-L (曲智林), Li Y-Y (李昱烨), Min Y-Y (闵盈盈). Real-time prediction model of forest fuel moisture. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2010, **38**(6): 66–71 (in Chinese)
- [13] Liu Z-H (刘志华), Chang Y (常 禹), Chen H-W (陈宏伟), *et al.* Spatial pattern of land surface dead combustible fuel load in Huzhong forest area in Great Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(3): 487–493 (in Chinese)
- [14] Luke RH, McArthur AG. Bushfires in Australia. Canberra: Australian Government Publishing Service, 1978
- [15] Weise DR, Fujioka FM, Nelson RM. A comparison of three models of 1-h time lag fuel moisture in Hawaii. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **133**: 28–39
- [16] Anderson HE, Schuetle RD, Mutch RW. Timelag and Equilibrium Moisture Content of Ponderosa Pine Needles. Ogden, UT: Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, United States Department of Agriculture, 1978
- [17] Murano SL, Russell RN, Lawson BD. Development of Diurnal Adjustments Table for the Fine Fuel Moisture Code. Canadian Forestry Service, Information Report BC-X-35. Columbia: Pacific Forest Research Centre, 1969
- [18] Matthews S. A process-based model of fine fuel moisture. *International Journal of Wildland Fire*, 2006, **15**: 155–168
- [19] Matthews S, McCaw WL. A next-generation fuel moisture model for fire behaviour prediction. *Forest Ecology and Management*, 2006, **234**: S91
- [20] Matthews S, Gould J, McCaw L. Simple models for predicting dead fuel moisture in eucalyptus forests. *International Journal of Wildland Fire*, 2010, **19**: 459–467
- [21] Wang H-Y (王会研), Li L (李 亮), Jin S (金 森), *et al.* Introduce a new kind prediction method of fuel moisture. *Forest fire prevention* (森林防火), 2008(4): 11–12 (in Chinese)
- [22] Jin S, Chen PY. 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*, 2012, **21**: 418–427
- [23] Jin S (金 森), Li L (李 亮), Zhao Y-J (赵玉晶). 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* (林业科学), 2011, **47**(6): 114–121 (in Chinese)
- [24] Chen P-Y (陈鹏宇). Error Analysis of Direct Estimate

Method to Moisture Content of Maoershan Forestry Farm Surface Dead Fuel. Master Thesis. Harbin: Northeast Forestry University, 2011 (in Chinese)

[25] Simard AJ. The Moisture Content of Forest Fuels. I. A Review of the Basis Concepts. CDFRD Forest Fire Research Institute Information Report FF-X-14, Ottawa, ON: Canadian Department of Forest and Rural Development, Forest Fire Research Institute, 1968

[26] Lawson DB, Armitage OB, Hoskins WD. Diurnal Variation on the Fine Fuel Moisture Code: Tables and Computer Source Code. FRDA Report 245, SSN 0835-752. Victoria, BC: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, 1996

[27] Jin S (金 森), Chen P-Y (陈鹏宇). Effects of structure features of fuelbed composed of Scots pine needles on equilibrium moisture content parameters during desorption process. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2011, **47**(4): 114-120 (in Chinese)

[28] Liu X (刘 曦), Jin S (金 森). Development of dead forest fuel moisture prediction based on equilibrium moisture content. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2007, **43**(12): 126-133 (in Chinese)

[29] Trevitt ACF. Weather parameters and fuel moisture content; Standards for fire model inputs. Proceedings of the Conference on Bushfire Modelling and Fire Danger Rating Systems, Canberra, 1988: 11-12

[30] Deeming JE, Burgan RE, Cohen JD. The Nation Fire Danger Rating System. Washington DC: Forest Service, United States Department of Agriculture, 1978

[31] Anderson HE. Predicting Equilibrium Moisture Content of Some Foliar Forest Litter in the Northern Rocky Mountains. USDA Forest Service Research Paper INT-429. Ogden, UT: Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, United States Department of Agriculture, 1990

[32] Wang H-Y (王会研), Li L (李 亮), Liu Y (刘 一), *et al.* Suitability of Canadian forest fire danger rating system in Tahe Forestry Bureau, Heilongjiang Province. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2008, **36**(11): 45-47 (in Chinese)

[33] Wotton BM, Beverly JL. Stand-specific litter moisture content calibrations for the Canadian Fine Fuel Moisture Code. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, **16**: 463-472

作者简介 于宏洲,男,1983 年生,博士研究生.主要从事森林防火与 GIS 研究. E-mail: yhz-163@163.com

责任编辑 杨 弘
