

不同距离气象数据对细小可燃物含水率预测模型精度的影响

张 恒^{1,2}, 孙子健², 张运林¹, 金 森¹, 王玉霞²

(1. 东北林业大学 林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: 为研究不同距离气象数据对细小可燃物含水率预测模型精度的影响, 对 2010 年春、秋季防火期大兴安岭地区塔河县盘古林场的樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 林、兴安落叶松 *Larix gmelinii* 林和白桦 *Betula platyphylla* 林等 3 种林分下细小可燃物含水率进行连续的观测, 同时采集试验期内的气象数据构建细小可燃物含水率预测模型。结果表明: 利用盘古气象站数据构建的气象因子中, 日降水量(R)和前 n d 降水量之和(R_m), 以及前 n d 平均相对湿度(H_m)($n=1\sim2$)显著正相关, 春季和秋季分别与日最高气温($T_{\max}$)和连旱天数(d)显著负相关; 利用距离实验地较近的盘古气象站的气象数据所建模型精度优于距离较远的塔河模型, 模型的平均绝对误差(E_{MA})和平均相对误差(E_{MR})分别降低了 2.7%和 22.6%($P<0.01$)。从细小可燃物的异质性和模型的精度来看, 在建模气象数据的采集中, 应重视气象因子时间和空间尺度的选取, 以确保模型精度。图 3 表 4 参 28

关键词: 森林保护学; 大兴安岭; 气象数据; 预测模型; 细小可燃物; 含水率; 精度验证

中图分类号: S762.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2018)03-0529-08

Distance of meteorological data from test site and fine fule forecast model accuracy

ZHANG Heng^{1,2}, SUN Zijian², ZHANG Yunlin¹, JIN Sen¹, WANG Yuxia²

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 2. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, Inner Mongolia, China)

Abstract: To determine the influence of meteorological data at different distances from a research site on the accuracy of a prediction model for water content of fine fuels, a model was established and tested in the spring and autumn of 2010. Continuous observations were conducted on the moisture content of fine fuels in *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, *Larix gmelinii*, and *Betula platyphylla* stands in the Pangu Forest Farm of Tahe County, Da Xingan Ling Prefecture and compared to meteorological data such as precipitation (R), total precipitation for n d (R_m), average relative humidity (H_m), daily maximum temperature ($T_{\max}$), and drought days (d). Results indicated that for meteorological factors in spring and autumn, R was positively correlated with R_m and H_m ($n = 1-2$), but negatively correlated with $T_{\max}$ and d . The model using the meteorological data of the Pangu Meteorological Station was more accurate than the Tahe Model which was further away having a significantly lower mean absolute error (E_{MA}) of 2.7% and mean relative error (E_{MR}) of 22.6% ($P<0.01$). From the heterogeneity of the fuels and the accuracy of the model, attention should be paid to the selection of time and the spatial scale of the meteorological factors when modeling meteorological data collection so as to ensure model accuracy. [Ch, 3 fig, 4 tab, 28 ref.]

Key words: forest protection; Da Xingan Ling Region; meteorological data; forecast methods; fine fuel; water content; model accuracy

收稿日期: 2017-07-05; 修回日期: 2017-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31370656); 内蒙古农业大学博士启动资金项目(BJ2013D-7)

作者简介: 张恒, 讲师, 博士, 从事林火生态与管理等研究。E-mail: zhangheng_nefu@126.com。通信作者: 王玉霞, 副教授, 博士, 从事林火生态与管理等研究。E-mail: wyx4307113@139.com

森林火灾突发性强、破坏性大,严重影响森林生态系统的平衡^[1]。地表细小可燃物的含水率作为林火预报的重要因子决定着林火发生的可能性及一系列的火行为^[2-3],因此,掌握林火发生和发展的变化首先需精确掌握细小可燃物含水率的变化^[4],地表细小可燃物含水率的研究对于火险预报意义重大^[5-6]。目前,细小可燃物含水率预测的气象要素回归法简单实用,通过分析各种气象因子(降水量、风速、气温和湿度等),建立相应的含水率预测模型,小尺度范围内的预测精度高^[7-9]。20 世纪 20 年代,国外学者^[10-12]就建立过有关气象要素回归法的含水率预测模型,中国学者^[13-17]也建立了若干森林细小可燃物含水率气象要素预测模型。细小可燃物含水率预测模型获取气象数据主要有以下几种方法:①历史资料。主要来自各地市气候中心编制的气象资料,数据类别比较单一。②实时和整编汇总历史气象数据。主要来自各气象台站的观测数据及中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),气象数据类别完整,包括逐年、逐月和逐日数据^[18]。③手持小型气象站或在样地内设置便携式移动气象站,进行短期监测。其中方法一和方法二得到的气象数据大部分都从林外架设的气象台站获取的,而林内小气候与外界差异很大,在一定程度上对含水率预测精度造成影响;虽然方法三得到的是林内气象数据,但进行长期监测不现实,实际中很难开展。获取气象数据的位置与细小可燃物含水率监测点距离远近对模型精度影响和误差具体有多大,对未来开展气象要素回归法进行含水率预测研究意义重大^[17]。为解决以上问题,本研究以大兴安岭盘古和塔河的细小可燃物含水率为研究对象,分析不同距离气象要素对细小可燃物含水率预测模型精度的影响。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

盘古林场位于大兴安岭塔河林业局(52°41′57.1″N, 123°51′56.5″E),塔河气象站距离盘古气象站为 96 km,实验样地与盘古气象站距离不到 10 km。寒温带大陆性季风气候。年均气温为-5.0℃,年降水量为 350~500 mm,降水集中于 7~8 月,相对湿度为 70%~75%,常出现高温低湿及大风天气。植被类型是以兴安落叶松 *Larix gmelinii* 为优势的寒温带针叶林^[19-20],主要林分类型为樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*-兴安落叶松-白桦 *Betula platyphylla* 混交林,樟子松林和白桦林,还有少量的红皮云杉 *Picea koraiensis* 林。春秋两季为森林防火多发期^[17]。

1.2 细小可燃物含水率和气象因子监测

野外观测日期为 2010 年 5 月 29 日至 6 月 27 日(春季森林防火期)和 9 月 23 日至 10 月 13 日(秋季森林防火期),共 50 d。在盘古林场阳坡选白桦林、樟子松林和兴安落叶松林等 3 种林型,样地基本情况见表 1。

表 1 样地信息

Table 1 Information of sampling plots

林型	树种组成	坡位	坡向	坡度/(°)	平均胸径/cm	平均树高/m	郁闭度	海拔/m
樟子松林	樟子松	上坡	阳坡	30	18.5	27.5	0.5	534
兴安落叶松林	落叶松 9:白桦 1	中坡	阳坡	38	10.2	14.5	0.5	491
白桦林	白桦 9:落叶松 1	中坡	阳坡	25	17.9	9.0	0.7	506

1.2.1 细小可燃物含水率监测 在每个样地内,在林中空地和树冠下细小可燃物分布较均匀处设置样筐,分别挖取 20.0 cm × 20.0 cm 小样方 1 个·点⁻¹。由于可燃物层密度是影响火行为的一个重要因素,测量并计算可燃物厚度、质量和体积,并最终得到可燃物密度(表 2),然后保持其自然状态,分别放入样筐中,再放回原位,保持可燃物的原始状态。使用 5 号塑料方筛(265.0 mm × 205.0 mm × 85.0 mm),在其底部及四壁用尼龙网(18 目, 1.0 mm)加衬,上方加盖粗眼尼龙网(8 目, 2.5 mm),并在盛装样品后使用尼龙扎绳固定,以防止新凋落的树木叶片进入到容器内,也避免容器内的样品因风或小型动物的活动而变化。样筐上挂上号牌,号牌上记录样地与样点编号,以免重复观测时发生混淆。使用塑料容器而没有使用金属容器的原因是,金属容器长期处在潮湿环境中会发生锈变而影响质量。每日 14:00 (误差<10 min),按同样的样地顺序称量样筐 2 个·样地⁻¹的质量并记录,记做湿质量。称量时小心取出

容器，不破坏容器中可燃物和周围可燃物的结构。为了便于在野外称量，选用便携式电子天平[美国双杰(G&G)生产的JJ600Y型]，称量时使用预先制作的折叠板在地表水平展开，安置并校准天平后在板盒内进行称量，以排除风的干扰。

1.2.2 气象数据采集

气象数据由塔河林业局气象站和盘古林场气象观测站获得，包括 2010 年 5 月 24 日至 6 月 27 日(春季森林防火期)和 9 月 18 日-10 月 13 日(秋季森林防火期)，共 60 d，于采样前 5 日起采集气象数据。采集气象要素包括日每小时平均气温(T)，相对湿度(H)和风速(W)，以及日降水量(R)和前 n d 降水量之和(R_m)。

1.3 数据处理与分析

采用 Pearson 法对气象因子和细小可燃物含水率进行相关性分析，并作 Duncan 差异显著性检验，采用配对 t 检验比较不同对照的精度差异。利用 SPSS 18.0 软件进行统计分析和建模，利用 SigmaPlot 12.5 软件绘图。

1.3.1 细小可燃物含水率计算

细小可燃物含水率计算公式：

$$M=(m_H-m_D)/m_D \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中： M 为细小可燃物含水率(%)； m_H 为细小可燃物湿质量(g)； m_D 为细小可燃物干质量(g)。采用 2 个不同郁闭度含水率的算术平均值作为该样地当日 14:00 时采样方法的含水率，春季数据共 30 d(组)，秋季数据 20 d(组)。

1.3.2 气象数据处理 整理塔河林业局气象站和盘古林场气象站提供的气象数据：前 $n(n=1\sim 5)$ d 气象因子(累积量)、 n d 前当日气象因子(当日量)等，其中前 n d 气象因子和 n d 前当日气象因子以采样当日 0:00 为基准。将前几天气象因子设为 a ，几天前当日气象因子设为 b ，均以下标表示，其后数字代表 n 值，如 4 d 前当日平均气温记为 T_{i4} ，前 3 d 降水量之和记为 R_{a3} ，前 2 d 平均相对湿度记为 H_{a2} ，连旱天数记为 d 。

1.3.3 不同距离气象数据对模型精度的误差 根据 Pearson 相关性分析确定对细小可燃物含水率有显著影响的因子，剔除实验中的异常数据后，以每个样地的细小可燃物含水率或全部的含水率(以下称混合数据)为因变量，以气象要素为自变量通过逐步回归方法建立多元线性方程。具体形式为：

$$M=\sum_{i=1}^n X_i b_i \quad (2)$$

式(2)中： M 为细小可燃物含水率(%)； X_i 为所选用的气象因子； b_i 为待估计参数，采用混合数据建模的目的是确定该方法能否提高模型精度。采用 n -Fold 交叉验证法^[21]计算模型精度^[22]对于某样地的 n 个含水率数据，用 $n-1$ 个含水率和气象要素进行逐步回归，建立多元线性模型，然后用剩余的一个数据验证，计算误差，重复 n 次。计算平均误差，对不同对照的误差进行显著性检验(配对 t 检验)，显著性水平为 $\alpha=0.05$ ^[23]，误差按式(3)和式(4)计算。

$$\text{平均绝对误差}(E_{MA})=1/n \sum_{i=1}^n |M_i - \hat{M}_i|; \quad (3)$$

$$\text{平均相对误差}(E_{MR})=1/n \sum_{i=1}^n \frac{|M_i - \hat{M}_i|}{M_i} \quad (4)$$

式(3)和式(4)中： M_i 为细小含水率实测值(%)， $\hat{M}_i$ 为细小可燃物含水率预测值(%)， n 为样本数。绘制利用不同数据建模进行比较分析的混合模型实测值与预测值的 1:1 线，用以研究预测效果。

2 结果与分析

2.1 细小可燃物含水率与气象因子的相关关系

图 1 给出了 3 个林型采样细小可燃物含水率和实验地不同距离的盘古和塔河气象站提供的有显著关

表 2 3 种林型下可燃物床层结构的量化

Table 2 Quantification of bed structure of combustible materials under three forest types

林型	可燃物厚度/cm	可燃物质量/g	体积密度/(g·cm ⁻³)	密实度
樟子松林	3.2	35.0	1.56	0.04
兴安落叶松林	3.0	40.0	1.90	0.05
白桦林	3.8	20.0	0.75	0.03

系的气象因子之间的 Pearson 相关系数。结果表明：不同距离的气象因子与不同林型细小可燃物含水率的影响因子相关性存在差异。利用盘古气象站数据构建的气象因子中日降水量(R)和 R_{a1} ，以及平均相对湿度(H_{a1})($n=1\sim 2$)显著正相关。另外，春季和秋季分别与日最高气温(T_{max})和连旱天数(d)呈显著负相关， $n(n=1\sim 5)$ d 前当日气象因子对细小可燃物含水率也有影响，但不如前 3 类因子更普遍，利用塔河气象站数据构建的气象因子中与细小可燃物含水率相关性较强的都是与湿度相关的因子(H_{a1} 和 H_{a2})，气温和风速与含水率相关性较差。因此，在进行含水率预测时，只需采用湿度和降水量 2 个变量即可。

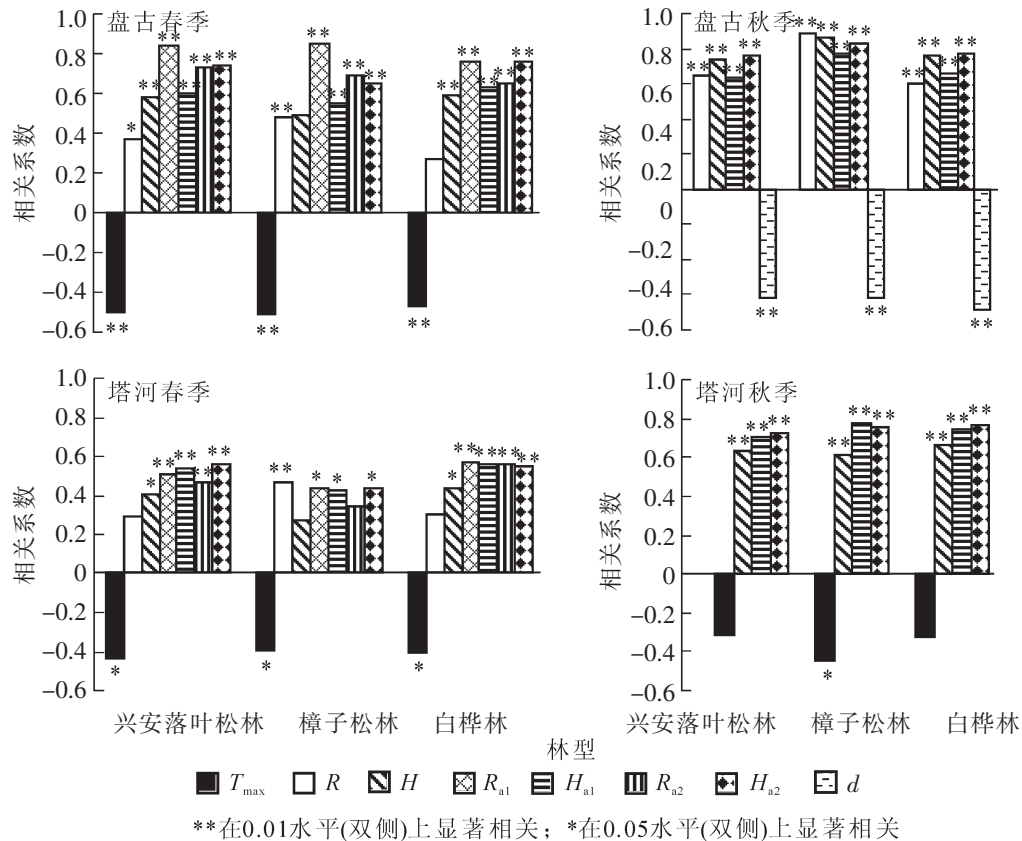


图 1 细小可燃物含水率与气象因子相关性分析

Figure 1 Correlation analysis between moisture content and meteorological factors

2.2 不同距离气象要素对细小可燃物含水率预测模型构建

通过多元线性逐步回归筛选出不同气象数据构建细小可燃物含水率预测模型所采用的预测因子以及模型参数(表 3, 表 4)，盘古模型日降水量(R)和 R_{a1} ，前 1 d 降水量和 R_{a1} 以及前 2 d 平均相对湿度 H_{a2} 是影响细小可燃物含水率变化最重要的因子，塔河模型采样前 1 d 的降水量和湿度为主要影响因子。

2.3 不同距离气象数据对预测模型精度的影响

由图 2 可知：采用盘古气象数据建模的 8 个含水率的平均相对误差(E_{MR})为 42.0%，平均绝对误差(E_{MA})为 9.4%，而采用塔河气象数据建模的 E_{MR} 和 E_{MA} 分别为 64.6%和 12.1%。利用盘古气象数据建模的 2 种误差都要低于塔河数据。另外，全部数据混合建模的误差还要高于某些单独建模的误差，并没有改善模型的精度。主要原因是不同采样地的细小可燃物含水率对不同气象因素的响应不同。

对不同气象数据建模的 2 种误差进行 t 检验结果表明：盘古模型的 E_{MA} ($n=8$, $t=-4.155$, $P<0.01$), E_{MR} ($n=8$, $t=-4.258$, $P<0.01$) 极显著低于塔河模型；对于春季 2 种气象模型 t 检验的结果表明：盘古模型与塔河模型的 E_{MA} ($n=4$, $t=-2.707$, $P=0.073$) 差异不显著，而 E_{MR} 差异显著 ($n=4$, $t=-3.387$, $P<0.05$)。秋季盘古模型的 E_{MA} 显著低于塔河模型 ($n=4$, $t=-3.274$, $P<0.05$)， E_{MR} 极显著低于塔河模型 ($n=4$, $t=-8.151$, $P<0.01$)。总体上，2 种误差变化趋势基本一致。3 个林型在春季和秋季，盘古模型的 2 种误差都要显著低于塔河模型。这表明利用盘古气象数据进行预测的效果更好。总体来说，利用不同距离的气象数据建模对模型精度的影响很大，距离试验地较近的盘古气象数据模型的预测效果最好，而塔河模型

表 3 盘古细小可燃物含水率预测模型

Table 3 Prediction model of moisture content of fine fuel in Pangu								
林型	季节	常数	R/mm	R_{al}/mm	$H_{a2}/\%$	调整后 R^2	F	P
落叶松林	春季	-30.694		0.874	4.248	0.692	33.623	0.000
	秋季	4.329	0.877			0.491	36.703	0.000
樟子松林	春季	9.402		1.206		0.680	103.876	0.000
	秋季	8.819	0.496			0.575	16.018	0.001
白桦林	春季	-288.878		0.989	5.227	0.625	25.192	0.000
	秋季	7.374	0.974			0.558	15.634	0.001
混合林	春季	-186.267		0.997	3.416	0.626	75.639	0.000
	秋季	6.841		0.783		0.659	56.336	0.000

表 4 塔河细小可燃物含水率预测模型

Table 4 Prediction model of moisture content of fine fuel in Tahe							
林型	季节	常数	R_{al}/mm	$H_{a2}/\%$	调整后 R^2	F	P
落叶松林	春季	30.761	0.763		0.273	11.877	0.002
	秋季	-111.063		1.862	0.581	18.610	0.000
樟子松林	春季	-163.059		3.051	0.109	4.564	0.042
	秋季	-69.645	0.301	1.220	0.742	28.343	0.000
白桦林	春季	26.981	1.104		0.389	19.458	0.000
	秋季	-127.662		2.172	0.654	11.406	0.003
混合林	春季	-117.487	0.593	2.318	0.278	18.168	0.000
	秋季	-107.072		1.826	0.439	47.168	0.000

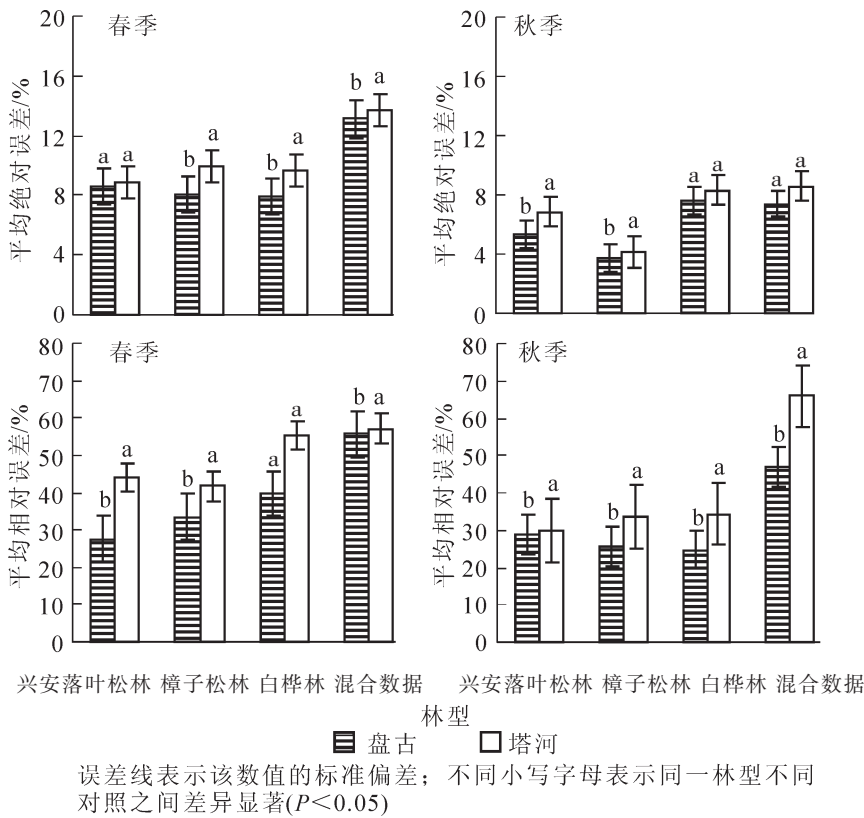


图 2 2 种气象数据模型误差对比

Figure 2 Comparison of errors in the two meteorological models

的误差较大,预测效果不好。

由图3可知:盘古春季细小可燃物含水率显然比塔河春季更加靠近1:1线,塔河数据在含水率高于90%段离散程度加大,且存在较低实测值而预测偏高的情况,相对来说,秋季盘古和塔河数据点偏离程度相差不大,盘古模型相对于塔河模型实测细小可燃物含水率高于50%的样点较多,预测偏高。这表明:盘古气象数据所建模型的预测精度更高。

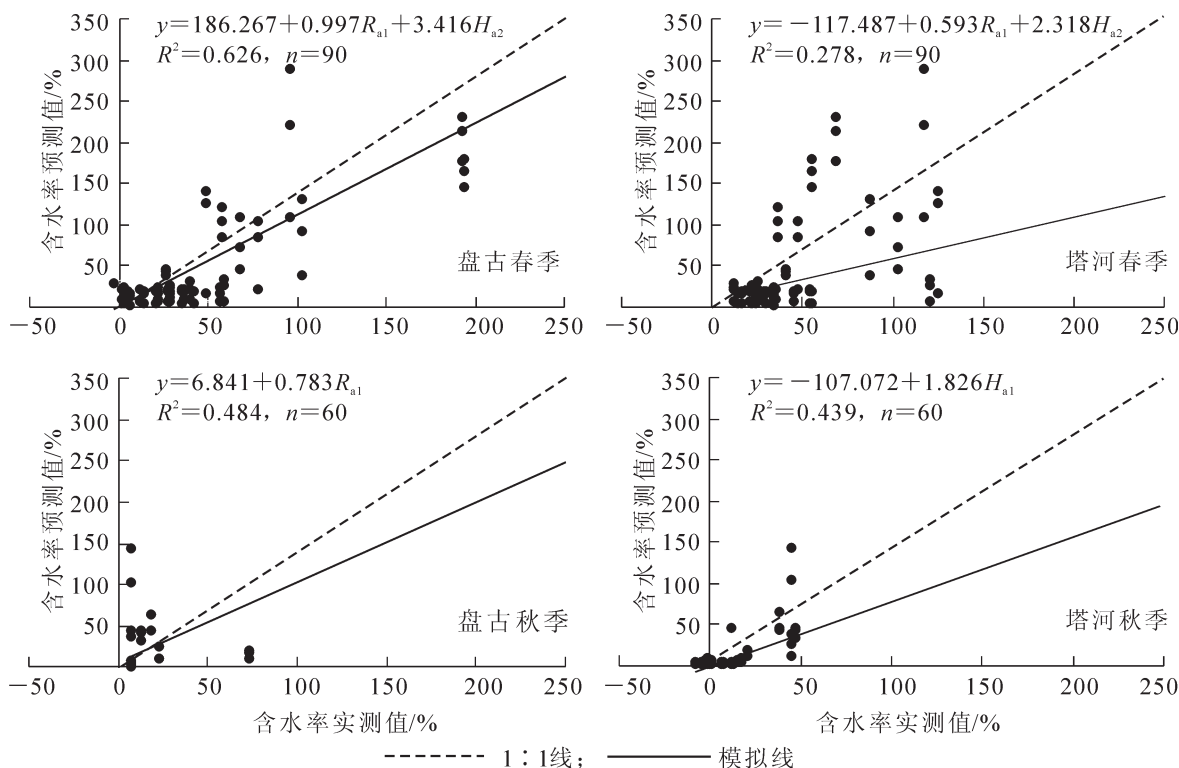


图3 不同气象数据模型细小可燃物含水率实测值与预测值对照

Figure 3 Comparison of measured and predictive values by meteorological data of different methods

3 结论与讨论

本研究使用距离试验地不同的气象数据建立的细小可燃物含水率预测模型的精度差异明显。塔河气象站与盘古气象站距离为96 km,从气象距离角度划分,100 km左右属于中尺度距离。实验样地与盘古气象站的距离不到10 km。小气候与大气候之间有着密切的关系,任一地点的各个气象要素值,总是由大气候背景与小气候叠加而成的。细小可燃物含水率与前几日降水量(R)和 R_{a1} 以及前几日平均相对湿度 H_{a1} 关系最为密切。小气候的变化能够更直接地作用于可燃物本身,但受地理等条件影响,细小可燃物含水率对气象要素的响应有一定滞后,甚至不符,宏观的天气状况与微观的细小可燃物含水率变化存在一定的偏差。从研究结果来看,小尺度盘古气象数据更能反映细小可燃物含水率变化的真实情况,预测效果也更好。

不同距离的气象数据对模型精度的影响有显著的差异,利用模型外推进一步表明气象要素回归法外推误差与距离不完全成正比,可能和局域林分的特点有很大关联。在多大范围内可建立一个较为通用的气象模型还需要更深一步的研究^[24]。若将本研究结果外推至全国其他地区的细小可燃物含水率预测模型中,由于森林生态系统的异质性和复杂性,还要充分考虑到不同的地形条件和林分条件。

气象要素回归法对数据的要求高,所以气象因子选取时应充分考虑物理因素对准确性的影响^[25]。本研究虽满足此类研究的精度要求,但也存在一定的局限性:①本研究的气象条件属于既无干旱少雨也无潮湿多雨的中等条件,因此,所反映的细小可燃物含水率动态只是平均水平^[17],需开展更为全面的气象要素影响下的研究。②地形、小气候等自然因素对气象要素存在一定的干扰,使得不同距离气象数据结合细小可燃物含水率数据进行建模存在一定差异^[26]。③细小可燃物含水率预测的时间尺度越小,模型的

精度越高^[27-28]。因此, 今后, 应进一步开展更为精确和多种尺度的相关研究, 以完善细小可燃物含水率预测模型的精度。

4 参考文献

- [1] 薛家翠, 望胜玲, 曾祥福, 等. 鄂西林地可燃物含水率及火险等级的气象预报研究[J]. 华中农业大学学报, 2006, **25**(6): 679 – 682.
XUE Jiacy, WANG Shengling, ZENG Xiangfu, *et al.* Meteorological prediction of the forest fuel moisture and fire danger ratings [J]. *J Huazhong Agric Univ*, 2006, **25**(6): 679 – 682.
- [2] 胡海清, 陆昕, 孙龙, 等. 大兴安岭典型林分地表死可燃物含水率动态变化及预测模型[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(7): 2212 – 2224.
HU Haiqing, LU Xin, SUN Long, *et al.* Dynamics and prediction models of ground surface dead fuel moisture content for typical stands in Great Xing'an Mountains, Northeast China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(7): 2212 – 2224.
- [3] 姜旭. 章古台樟子松人工林死可燃物含水率的研究[J]. 辽宁林业科技, 2016(4): 32 – 33.
JIANG Xu. Study on *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation dead fuel moisture in Zhanggutai [J]. *J Liaoning For Sci Technol*, 2016(4): 32 – 33.
- [4] 王栋. 森林可燃物含水率与森林火灾危险性的研究[J]. 林业科学研究, 1992, **5**(5): 548 – 553.
WANG Dong. Study on the relation between the moisture content of forest inflammable material and forest fire danger [J]. *For Res*, 1992, **5**(5): 548 – 553.
- [5] 邸雪颖, 王宏良, 姚树人. 林火预测预报[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1993: 159.
- [6] 金森, 李绪尧, 李有祥. 几种细小可燃物失水过程中含水率的变化规律[J]. 东北林业大学学报, 2000, **28**(1): 35 – 38.
JIN Sen, LI Xuyao, LI Youxiang. Desorption processes of four fine fuels [J]. *J Northeast For Univ*, 2000, **28**(1): 35 – 38.
- [7] 刘昕, 邸雪颖. 3 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 – 20.
LIU Xin, DI Xueying. Evaluation of three prediction methods on forest surface fuel moisture [J]. *For Eng*, 2013, **29**(2): 8 – 20.
- [8] 王得祥, 徐钊, 张景群, 等. 细小可燃物含水率与气象因子关系的研究[J]. 西北林学院学报, 1996, **11**(1): 35 – 39.
WANG Dexiang, XU Zhao, ZHANG Jingqun, *et al.* Relationships between climatic factors and water content of fine fuels [J]. *J Northwest For Coll*, 1996, **11**(1): 35 – 39.
- [9] 刘曦, 金森. 平衡含水率法预测死可燃物含水率的研究进展[J]. 林业科学, 2007, **43**(12): 126 – 133.
LIU Xi, JIN Sen. Development of dead forest fuel moisture prediction based on equilibrium moisture content [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43**(12): 126 – 133.
- [10] WEIDMAN R H. Relation of weather forecasts to the prediction of dangerous forest fire conditions [J]. *Mon Weather Rev*, 1923, **51**(11): 563 – 564.
- [11] RUIZ GONZÁLEZ A D, VEGA HIDALGO J A, ÁLVAREZ GONZÁLEZ J G. Construction of empirical models for predicting *Pinus* sp. dead fine fuel moisture in NW Spain (I): response to changes in temperature and relative humidity [J]. *Int J Wildland Fire*, 2009, **18**(1): 71 – 83.
- [12] GISBORNE H T. Using weather forecasts for prediction forest fire danger [J]. *Mon Weather Rev*, 1925, **53**(2): 58.
- [13] MATTHEWS S, GOULD J, McCAW L. Simple models for predicting dead fuel moisture in eucalyptus forests [J]. *Int J Wildland Fire*, 2010, **19**(4): 459 – 467.
- [14] 杜秀文, 李茹秀, 王英杰. 几种森林类型可燃物含水率与气象因子关系的分析[J]. 东北林业大学学报, 1988, **16**(3): 87 – 90.
DU Xiwen, LI Ruxiu, WANG Yingjie. The relationship between climatic factors and water content of combustible substances in forests [J]. *J Northeast For Univ*, 1988, **16**(3): 87 – 90.
- [15] 张国防, 林文革, 花昆福, 等. 杉木人工林地表易燃物含水率变化规律[J]. 福建林学院学报, 2000, **20**(1): 76 – 78.
ZHANG Guofang, LIN Wenge, HUA Kunfu, *et al.* Study on the moisture change of surface easy fuel of Chinese fir

- plantation [J]. *J Fujian Coll For*, 2000, **20**(1): 76 – 78.
- [16] 覃先林, 张子辉, 易浩若, 等. 一种预测森林可燃物含水率的方法[J]. 火灾科学, 2001, **10**(3): 159 – 162.
QIN Xianlin, ZHANG Zihui, YI Haoruo, *et al.* A methodology to predict the moisture of forest fuels [J]. *Fire Saf Sci*, 2001, **10**(3): 159 – 162.
- [17] 张恒, 金森, 邸雪颖. 大兴安岭森林凋落物含水率的季节动态与预测[J]. 林业科学研究, 2014, **27**(5): 683 – 688.
ZHANG Heng, JIN Sen, DI Xueying. Seasonal dynamics and prediction of forest litter moisture in Daxing'anling Region [J]. *For Res*, 2014, **27**(5): 683 – 688.
- [18] 杨光. 气候变化对中国北方针叶林森林火灾的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010: 14.
YANG Guang. *The Impact of Climate Change on Forest Fire in China's Boreal Forest* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010: 14.
- [19] 薛煜, 王会岩, 张世萍. 落叶松人工林内可燃物载量、含水率与森林燃烧性关系的研究[J]. 森林防火, 1996(4): 21 – 23.
XUE Yu, WANG Huiyan, ZHANG Shiping. Study on relationship between fuel load, water content and forest combustibility in *Larix gmelinii* plantation [J]. *For Fire Prev*, 1996(4): 21 – 23.
- [20] 刘志华, 常禹, 陈宏伟. 基于遥感、地理信息系统和人工神经网络的呼中林区森林蓄积量估测[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(9): 1891 – 1896.
LIU Zhihua, CHANG Yu, CHEN Hongwei. Estimation of forest volume in Huzhong forest area based on RS, GIS and ANN [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19**(9): 1891 – 1896.
- [21] 金森, 李亮. 时滞和平衡含水率直接估计法的有效性分析[J]. 林业科学, 2010, **46**(2): 95 – 102.
JIN Sen, LI Liang. Validation of the method for direct estimation of time lag and equilibrium moisture content of forest fuel [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **46**(2): 95 – 102.
- [22] 李世友, 张凯, 杨清, 等. 华山松林细小可燃物层燃烧初始蔓延速度的初步研究[J]. 福建林业科技, 2009, **36**(1): 58 – 61.
LI Shiyu, ZHANG Kai, YANG Qing, *et al.* Preliminary study on initial burning spread speed of fine combustible layer in *Pinus armandis* forest [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2009, **36**(1): 58 – 61.
- [23] 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 Heng, JIN Sen, DI Xueying. Prediction of litter moisture content in Tahe Forestry Bureau of Northeast China based on FWI moisture codes [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(7): 2049 – 2055.
- [24] 张恒, 金森, 张运林, 等. 气象法预测盘古林场可燃物含水率的外推精度[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, **36**(12): 61 – 67.
ZHANG Heng, JIN Sen, ZHANG Yunlin, *et al.* Meteorological elements regression method is used to predict Pangu Forest Farm extrapolation accuracy analysis of fuel moisture content [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2016, **36**(12): 61 – 67.
- [25] 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 Haiyang, HU Haiqing, SUN Long. Research on relational models of moisture content of dead forest fuel with meteorological factors and soil factors in China [J]. *For Eng*, 2016, **32**(3): 1 – 6.
- [26] 陆昕, 胡海清, 孙龙, 等. 大兴安岭地表细小死可燃物含水率预测模型[J]. 东北林业大学学报, 2016, **44**(7): 84 – 90.
LU Xin, HU Haiqing, SUN Long, *et al.* Prediction models of fine dead fuels moisture content for typical stand in Daxing'an Mountains [J]. *J Northeast For Univ*, 2016, **44**(7): 84 – 90.
- [27] CHUVIECO E, AGUADO I, DIMITRAKOPOULOS A P. Conversion of fuel moisture content values to ignition potential for integrated fire danger assessment [J]. *Can J For Res*, 2004, **34**(11): 2284 – 2293.
- [28] FOSBERG M A, DEEMING J E. *Derivation of the One-and Ten-Hour Timelag Fuel Moisture Calculations for Fire-Danger rating* [R]. New York: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1971.