

# 基于 FWI 湿度码的塔河林业局地表凋落物含水率预测<sup>\*</sup>

张 恒 金 森<sup>\*\*</sup> 邱雪颖

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘要** 加拿大火险天气指标系统(FWI)是目前世界上应用最广的火险天气系统, 其可燃物含水率预测方法成为一种重要的研究方法。本文以黑龙江省大兴安岭地区塔河林业局典型林分为研究对象, 通过野外地表凋落物含水率的连续观测, 分析了凋落物含水率与 FWI 系统 3 个湿度码[细小可燃物湿度码(FFMC)、枯落物下层湿度码(DMC)、干旱码(DC)]之间的关系。结果表明: 对于研究地区 8 个样地单独取样的地表凋落物, 用 FWI 系统的湿度码 FFMC 所建立的线性预测方程的平均绝对误差和平均相对误差分别为 14.9% 和 70.7%, 低于气象要素回归模型, 说明采用 FWI 湿度码来预测地表凋落物含水率具有一定优势, 可用于预测可燃物含水率, 但这种优势是有限的。今后应加强对 FWI 系统在我国应用的修正工作, 特别是雨后可燃物湿度码的修正。

**关键词** 可燃物含水率 加拿大火险天气指标系统 塔河 凋落物

**文章编号** 1001-9332(2014)07-2049-07 **中图分类号** S762 **文献标识码** A

**Prediction of litter moisture content in Tahe Forestry Bureau of Northeast China based on FWI moisture codes.** ZHANG Heng, JIN Sen, DI Xue-ying (College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2014, 25(7): 2049–2055.

**Abstract:** Canadian fire weather index system (FWI) is the most widely used fire weather index system in the world. Its fuel moisture prediction is also a very important research method. In this paper, litter moisture contents of typical forest types in Tahe Forestry Bureau of Northeast China were successively observed and the relationships between FWI codes (fine fuel moisture code FFMC, duff moisture code DMC and drought code DC) and fuel moisture were analyzed. Results showed that the mean absolute error and the mean relative error of models established using FWI moisture code FFMC was 14.9% and 70.7%, respectively, being lower than those of meteorological elements regression model, which indicated that FWI codes had some advantage in predicting litter moisture contents and could be used to predict fuel moisture contents. But the advantage was limited, and further calibration was still needed, especially in modification of FWI codes after rainfall.

**Key words:** fuel moisture; Canadian fire weather index system (FWI); Tahe; litter.

加拿大火险天气指标系统(FWI)根据不同深度可燃物的含水率, 而非简单依据单纯的天气状况来进行火险分级, 其火险更能反映可燃物的干湿程度, 预报更科学准确。特别是其可燃物含水率的预测采用基于时滞和平衡含水率原理的半物理方法, 具有较强的适用性。该系统是目前世界上应用最广的火险天气系统, 不仅在加拿大使用, 印度尼西亚、阿根

廷等一些国家也在使用。该系统的含水率预测方法也成为一种重要的可燃物含水率预测方法<sup>[1-2]</sup>。

在外推使用 FWI 时, 需要进行一定修正。一般通过建立当地观测的可燃物含水率与 FWI 系统湿度码之间的新关系来实现<sup>[3-7]</sup>, 也有对 FWI 中的 FFMC 算法进行修正<sup>[8]</sup>, 还有对整个 FWI 系统中的湿度码算法进行系统修正<sup>[9]</sup>。无论是简单修正还是复杂修正, 最终目的要使 FWI 系统的湿度码能更好地反映当地可燃物含水率的变化。

FWI 系统在我国的应用主要集中在以下几方

\* 林业公益性行业科研专项(201204508)资助。

\*\* 通讯作者。E-mail: jinsen2005@126.com

2014-01-14 收稿, 2014-04-23 接受。

面对 FWI 系统的适用性评价研究<sup>[9-14]</sup>;用 FWI 系统指标作为工具来分析某地区的火险变化和火行为等<sup>[15-21]</sup>;以 FWI 系统的指标作为火险和火行为的替代指标,研究气候变化对我国一些地区林火的影响<sup>[13,22-26]</sup>.在 FWI 的适用性评价研究中,Stocks 和 Lynham<sup>[11]</sup>从中、加两个地区气象条件相似性上论证了 FWI 系统在黑龙江省大兴安岭地区的适用性;王明玉<sup>[13]</sup>和田晓瑞等<sup>[14]</sup>则从 FWI 等级划分与林火发生情况的匹配性上来分析该系统的适用性.目前,我国对 FWI 系统指标与本地含水率的关系研究很少.王会研等<sup>[12]</sup>虽然分析了 FWI 系统的指标与用预测模型计算所得塔河地区可燃物含水率的关系,但缺乏实测数据基础.因此,开展 FWI 系统指标与我国特定地区可燃物含水率的关系研究十分必要.本文以黑龙江省大兴安岭地区塔河林业局典型林分作为研究对象,分析其可燃物含水率与 FWI 系统指标之间的关系,以期明确用 FWI 系统指标预测这些可燃物含水率的精度和外推能力,以及该方法与其他预测方法的异同.本研究一方面可以提供更准确的可燃物含水率测定方法,为火险预报和火行为预报服务;另一方面有助于更好地理解林火发生与可燃物含水率的关系,为更科学地评价、修正和使用 FWI 服务.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究地区位于黑龙江省大兴安岭地区塔河林业局盘古林场(50°10'—53°33' N, 121°12'—127°00' E).属寒温带季风气候,年均气温-2~4 °C,最低气温-52.3 °C,最高气温39.0 °C.年降水量350~500 mm,降水集中于7—8月.积雪期达5个月,林内雪深可达30~50 cm.土壤以棕色针叶林土和暗棕壤为主.山势比较平缓,海拔在300~1400 m,15°以内的缓坡占80%以上.该区植被属于寒带针叶林区森

林类型,主要林分有落叶松(*Larix gmelinii*)林、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林、白桦(*Betula platyphylla*)林和云杉(*Picea koraiensis*)林.该区为我国森林火灾损失严重区域.

### 1.2 研究方法

**1.2.1 可燃物含水率的连续观测** 2010 年春秋两个防火期内(5月29日—7月10日,9月23日—10月13日),在盘古林场的3个兴安落叶松林和1个白桦林内各设置1个样地(表1).每个样地内,在林中空地和树冠下分别放置1个20 cm×20 cm×3 cm 金属筐,共8个样筐,筐底部和四周用金属网围住.按 Catchpole 等<sup>[27]</sup>提出的方法,取与筐长宽相同、厚度为1 cm的地表凋落物块,取样中尽量保持其结构不变,放入筐中,然后放回取样处,筐中凋落物表面与筐外凋落物表面相平,用塑料网覆盖筐口,以防凋落物进入筐中.每天中午将筐取出,塑料网上如有凋落物,将其拂去,称量筐和可燃物的鲜质量.试验结束后,将筐及筐中凋落物带回实验室.将筐中可燃物取出放入烘箱105 °C下连续烘干24 h,称其干质量以及筐的质量.按下式计算不同时刻的可燃物含水率.

$$M_i = (W_{hi} - W_d) / W_d \times 100\% \quad (1)$$

式中: $M_i$ 为第*i*天可燃物含水率(%); $W_{hi}$ 为第*i*天可燃物鲜质量(g); $W_d$ 为可燃物干质量(g).

**1.2.2 气象数据收集** 气象数据由盘古林场气象站提供,时间为2010年1月1日到10月13日,包括每日14:00的温度、湿度、风速、降雨量等.

### 1.3 数据分析

**1.3.1 FWI 指标的计算** 根据 FWI 系统的计算方法<sup>[28]</sup>,计算研究期间 FWI 系统的6个指标,初始条件和3个湿度码的初始值按文献[29]计算.

**1.3.2 可燃物含水率预测模型的建立与比较** 剔除试验中的异常数据后,以每个样地每个采样筐的可燃物含水率数据和全部样筐的含水率数据(以下称

表1 样地信息

Table 1 Characteristics of sample plots

编号 No.	林型 Forest type	树种组成 Species composition	平均胸径 Average DBH (cm)	平均树高 Average tree height (m)	郁闭度 Canopy density	坡向 Exposure	坡度 Slope (°)	坡位 Location	海拔 Altitude (m)
1	落叶松 Larch	纯林 Pure forest	12.3	10.1	0.8	阳坡 Sunny slope	0	坡下 Lower slope	429
2	白桦 Birch	白桦9:落叶松1 Birch 9:Larch 1	16.4	20.2	0.3	阴坡 Shady slope	30	坡中 Middle slope	388
3	落叶松 Larch	纯林 Pure forest	15.8	20.1	0.2	阴坡 Shady slope	10	坡下 Lower slope	385
4	落叶松 Larch	纯林 Pure forest	8.1	7.0	0.2	半阳坡 Semi sunny slope	0	平地 Flat	326

“混合数据”)为因变量, 分别以 FWI 系统的 3 个湿度码和气象要素(当天、前一天、前两天的温度、湿度、风速和降水量)为自变量, 通过逐步回归方法建立多元线性方程。两类模型分别为 FWI 回归模型和气象要素直接回归模型, 具体形式为:

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

式中:  $M$  为可燃物含水率(%) ;  $X_i (i=1, 2, \dots, n)$  为变量, 对于 FWI 系统,  $X_i$  分别为细小可燃物湿度码(FFMC)、枯落物下层湿度码(DMC)、干旱码(DC), 对于气象要素而言,  $X_i$  分别为当天、前一天和前两天的温度(℃)、湿度(%)、风速( $m \cdot s^{-1}$ )、降水量(mm)等;  $b_i$  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。

采用交叉验证的方法计算模型精度, 即对于某个样地的  $n$  个含水率数据, 用  $n-1$  个含水率和 FWI 湿度码或气象要素进行逐步回归, 建立多元线性模型, 然后用剩余的 1 个数据验证, 计算误差, 重复  $n$  次, 计算平均误差。误差按下式计算:

平均绝对误差:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - \hat{M}_i| \quad (3)$$

平均相对误差:

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|M_i - \hat{M}_i|}{M_i} \quad (4)$$

式中:  $M_i$  为可燃物含水率实测值(%) ;  $\hat{M}_i$  为可燃物含水率预测值(%)。

**1.3.3 可燃物含水率预测模型外推能力分析** FWI 的含水率预测方法是基于时滞和平衡含水率的半物理方法, 理论上讲, 其外推能力应比单纯的气象要素回归法好。为检验其外推能力, 8 个样筐的可燃物含水率系列, 对于每个系列的数据分别用 FWI 湿度码和气象要素按上述方法建模后, 再用其他 7 个含水

率系列来检验该模型的预测精度, 以评价两类模型的外推能力。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区可燃物含水率动态和气象条件

由表 2 可以看出, 试验期间的可燃物含水率在 2% ~ 228%, 覆盖了研究地区可燃物含水率的可能范围, 25% 和 75% 的分位数反映了研究地区可燃物含水率在防火期内多数比较干燥, 有 1/4(<10%) 的时间很干燥。与历史平均水平相比, 2010 年的气象要素和湿度码也反映了研究地区同期的典型天气条件。

### 2.2 可燃物含水率预测模型

**2.2.1 单个样地的样筐含水率数据建模** 由每个样筐的可燃物含水率数据单独建模时交叉验证的误差情况可见, 采用 FWI 湿度码建模的 8 个含水率系列的平均绝对误差(MAE) 为 14.9%, 平均相对误差(MRE) 为 70.7%, 而直接用气象要素逐步回归的模型的平均 MAE 和 MRE 分别为 18.9% 和 108.2% (表 3)。8 个系列中只有一个系列的 FWI 模型 MAE 比气象要素直接回归法略大。对两种模型的两种误差的  $t$  检验的结果表明: FWI 模型的 MAE 均值虽比气象要素回归法小, 但两者差异不显著 ( $n=8, t=-1.46, P<0.178$ ), 前类模型的 MRE 显著低于后者 ( $n=8, t=-3.18, P<0.0003$ )。8 个含水率系列的全部数据所建立的两种模型的预测变量和参数(表 4、表 5)与交叉验证所建模型相似, 对于 FWI 湿度码模型, 所用最多的预测变量是细小可燃物湿度码(FFMC), 少数模型加入了干旱码(DC); 对于气象要素回归模型, 湿度和降雨量是影响可燃物含水率的最重要因子, 主要是前一天和前两天的湿度和降雨量。

表 2 可燃物含水率和气象要素、FWI 湿度码的统计特征

Table 2 Fuel moisture content and statistical characteristics of meteorological elements and FWI moisture code

统计量 Statistic	含水率 Fuel moisture (%)	温度 Temperature (℃)	湿度 Humidity (%)	风速 Wind speed ( $m \cdot s^{-1}$ )	降雨量 Precipitation (mm)	细小可燃物 湿度码 FFMC	枯落物 下层湿度码 DMC	干旱码 DC
均值 Mean	33.4	23	32	5.1	0.8	87.2	50.1	279.3
中位数 Median	18.7	25	29	4.7	0	90.3	45.4	280.1
标准差 Standard deviation	37.7	9	14	1.8	2.0	9.1	20.4	40.3
样本数 Sample number	396	396	396	396	396	396	396	396
最小值 Minimum	2.1	2	13	2.5	0	28.0	6.5	183.5
最大值 Maximum	228.0	38	91	11.0	12.3	96.8	91.7	353.7
25% 百分位 25th percentile	10.4	13	23	3.8	0	83.2	35.0	258.2
75% 百分位 75th percentile	42.8	30	35	6.2	0.7	92.9	67.8	304.7

表3 各样筐数据两种方法单独建模的交叉验证误差

Table 3 Errors of two types of models established by data of sampling baskets using a cross validation method (%)

样地 Sample plot	FWI 回归模型		气象要素回归模型	
	FWI regression model		Meteorological elements regression model	
	平均绝对 误差 MAE	平均相对 误差 MRE	平均绝对 误差 MAE	平均相对 误差 MRE
林中空地样地 1 Plot 1 in open forest	12.6	74.6	12.5	73.4
林中空地样地 2 Plot 2 in open forest	17.6	74.7	24.1	135.7
林中空地样地 3 Plot 3 in open forest	16.7	73.1	21.9	127.7
林中空地样地 4 Plot 4 in open forest	18.3	72.4	25.2	134.7
树冠下样地 1 Plot 1 under canopy	7.3	50.8	7.7	50.5
树冠下样地 2 Plot 2 under canopy	17.4	74.3	22.9	131.9
树冠下样地 3 Plot 3 under canopy	17.6	74.7	24.1	135.7
树冠下样地 4 Plot 4 under canopy	11.8	70.9	13.1	75.8
平均 Mean	14.9	70.7	18.9	108.2

表4 各样筐全部数据 FWI 湿度码回归建模参数

Table 4 Parameters of models of sampling baskets established by FWI codes based on all data pooled

样地 Sample plot	常数 Constant	细小可燃物 湿度码 FFMC	枯落物下层 湿度码 DMC	干旱码 DC	调整后 R <sup>2</sup> Adjusted R <sup>2</sup>	F	显著性 Significance
	256.44	-2.48		0.15	0.614	47.64	0.000
林中空地样地 1 Plot 1 in open forest	329.26	-3.48			0.547	62.47	0.000
林中空地样地 2 Plot 2 in open forest	241.88	-2.89		0.16	0.780	98.72	0.000
林中空地样地 3 Plot 3 in open forest	249.54	-2.55			0.417	35.28	0.000
林中空地样地 4 Plot 4 in open forest	367.97	-3.82			0.679	111.14	0.000
树冠下样地 1 Plot 1 under canopy	274.04	-2.79			0.308	23.72	0.000
树冠下样地 2 Plot 2 under canopy	182.58	-1.70			0.120	7.13	0.011
树冠下样地 3 Plot 3 under canopy	90.11	-0.75	-0.188	0.06	0.100	2.49	0.046

表5 各样筐全部数据气象要素回归建模参数

Table 5 Parameters of models of sampling baskets established by meteorological elements based on all data pooled

样地 Sample plot	常数 Constant	当日湿度 Current humidity (%)	前一天湿度 Humidity 1 day before (%)	前一天 降雨量 Precipitation 1 day before (mm)	前两天 降雨量 Precipitation 2 days before (mm)	调整后 R <sup>2</sup> Adjusted R <sup>2</sup>	F	显著性 Significance
	13.34	0.733		6.082		0.181	6.10	0.005
林中空地样地 1 Plot 1 in open forest	25.51	1.433			5.958	0.324	13.22	0.000
林中空地样地 2 Plot 2 in open forest	27.65	0.690	0.853	6.975		0.687	41.23	0.000
林中空地样地 3 Plot 3 in open forest	4.74		0.847		3.425	0.262	9.51	0.000
林中空地样地 4 Plot 4 in open forest	-34.40	1.173	0.706	8.359	3.975	0.580	18.94	0.000
树冠下样地 1 Plot 1 under canopy	4.34	0.813				0.061	4.31	0.043
树冠下样地 2 Plot 2 under canopy	5.92	0.862				0.147	8.75	0.005
树冠下样地 3 Plot 3 under canopy	2.99	0.930				0.368	24.27	0.000

**2.2.2 全数据建模** 从 8 个样筐可燃物含水率的全部数据建模时交叉验证的误差(表6)以及两个模型的变量和检验情况(表7)可见,全部数据混合建模并没有改善模型的精度,比单独建模的平均误差还有所增加. 对于 FWI 回归模型,混合建模的 MAE 和 MRE 均大于所有单独建立的模型.

由图1可以看出,两种模型的左上部均是预测偏高区域,右边含水率实测值>100%的是预测偏低区域,其余部分是误差范围内的区域. 整体上看,两种模型对高含水率的预测偏低,对于低含水率预测偏高,对于 25% ~ 50% 的含水率预测精度较好. 用全部数据建模(图2)时,分样地建模所表现出来的高含水率段的预测得到显著改善,虽然低含水率段仍偏高,但数量显著下降.

## 2.3 外推分析

由各样筐可燃物含水率单独建立的两类模型的外推误差情况可见(表8),FWI 回归模型外推的 MAE 和 MRE 分别是 21.8% 和 102.7%,显著大于其自身模型的交叉验证误差(MAE:n=8,t=4.22,

表 6 全部数据所建两类模型的交叉验证误差

Table 6 Errors of two types of models established on all data pooled (%)

FWI 回归模型		气象要素回归模型	
FWI regression model	Meteorological element regression model	平均绝对误差 MAE	平均相对误差 MRE
19.9	129.2	21.5	122.9

$P < 0.0008$ ; MRE:  $n = 8$ ,  $t = -5.24$ ,  $P < 0.0005$ ); 气象

表 7 全部数据所建两类模型的参数和统计检验

Table 7 Parameters and statistical test of two types of models established on all data pooled

方法 Method	常数 Constant	FFMC	当日湿度 Current humidity (%)	前一天湿度 Humidity 1 day before (%)	前两天降雨量 Precipitation 1 day before (mm)	前两天降雨量 Precipitation 2 days before (mm)	调整后 $R^2$ Adjusted $R^2$	F	显著性 Significance
FWI 回归法 FWI regression model	279.39	2.818					0.462	340.46	0.000
气象要素回归法 Meteorological element regression method	-17.85		0.882	0.548	5.58	2.044	0.390	61.44	0.000

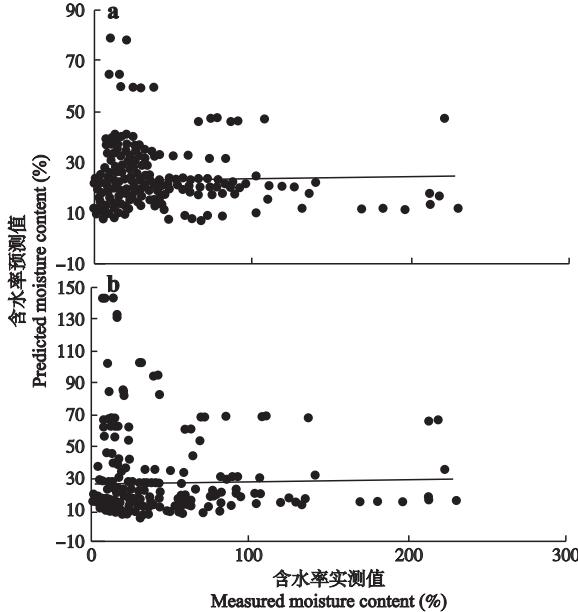


图 1 基于各样筐含水率两种方法预测值和实测值

Fig. 1 Predicted and measured moisture values with each sampling basket data by two methods.

a) FWI; b) 气象要素回归法 Meteorological element regression method.  
下同 The same below.

### 3 讨论

对于研究地区的落叶松和白桦林 8 个单独取样的地表凋落物,用 FWI 系统的湿度码,主要是 FFMC 所建立的线性预测方程的平均绝对误差(MAE)为 14.9%,平均相对误差(MRE)为 70.7%。虽然 MAE

要素直接回归的模型外推的 MAE 和 MRE 分别是 24.7% 和 132.6%,MAE 显著大于其自身模型的交叉验证误差( $n = 8$ ,  $t = 2.36$ ,  $P < 0.033$ ),而 MRE 则差异不显著( $n = 8$ ,  $t = 1.58$ ,  $P < 0.137$ )。FWI 回归模型外推误差显著低于气象要素回归法的外推误差(MAE: $n = 8$ ,  $t = -3.395$ ,  $P < 0.004$ ; MRE:  $n = 8$ ,  $t = -3.23$ ,  $P < 0.006$ )。这表明,作为半物理的 FWI 回归模型,其外推时也有误差增加的趋势,但与单纯的统计型的气象要素回归模型相比,其外推误差较小。

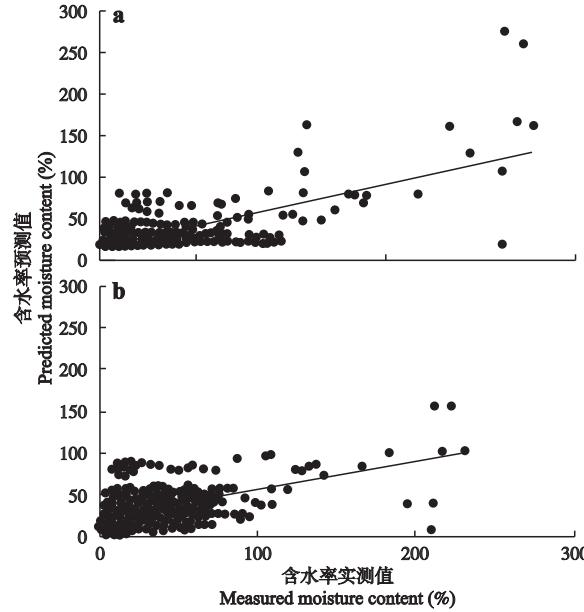


图 2 全部可燃物含水率数据两种方法的预测值和实测值

Fig. 2 Predicted and measured moisture values with all data pooled by two methods.

与用气象要素通过直接回归所建立的含水率预测模型的 MAE 在统计上差异不显著,但 8 个含水率系列中 7 个的 FWI 回归模型的 MAE 都比气象要素直接回归模型小,且 MRE 显著小于后者。这表明,用 FWI 的湿度码来预测可燃物含水率比气象要素直接回归法好。同时,FWI 回归模型的外推误差显著低于气象要素直接回归模型。这表明,对于本研究区而言,采

表 8 各样筐可燃物含水率单独建立模型的外推误差

Table 8 Extrapolation errors of models established on data of each sampling basket

样地 Sample plot	FWI 回归模型 FWI regression model		气象要素回归模型 Meteorological element regression model	
	平均绝对 误差 MAE (%)	平均相对 误差 MRE (%)	平均绝对 误差 MAE (%)	平均相对 误差 MRE (%)
林中空地样地 1 Plot 1 in open forest	24.6	127.3	24.5	124.1
林中空地样地 2 Plot 2 in open forest	20.0	99.1	24.6	144.2
林中空地样地 3 Plot 3 in open forest	20.2	73.1	24.5	133.8
林中空地样地 4 Plot 4 in open forest	19.9	102.1	24.8	156.4
树冠下样地 1 Plot 1 under canopy	24.8	99.6	24.7	97.7
树冠下样地 2 Plot 2 under canopy	20.1	98.7	24.6	141.0
树冠下样地 3 Plot 3 under canopy	20.0	99.1	24.6	144.2
树冠下样地 4 Plot 4 under canopy	24.5	122.5	24.5	119.6
平均 Mean	21.8	102.7	24.7	132.6

用 FWI 湿度码来预测地表凋落物含水率较气象要素直接回归法具有一定优势, 可用于预测可燃物含水率, 但这种优势是有限的。

两类模型的 MAE 差异不显著, 但 MRE 差异显著。从图 1 可以看出, 在低含水率段的高估部分和高含水率段的低估部分是两类模型误差的主要来源, 导致两类模型的 MAE 差异不显著。FWI 模型中预测值与实测值的比例即相对误差显著低于气象要素回归模型, 特别是在低含水率部分, 后者的高估程度明显超过前者, 导致两类模型的 MRE 差异显著。

采用全部数据混合建模并没有比分组建模效果好, 其主要原因是同样气象条件下不同采样地的含水率不同, 增加了含水率的变化幅度, 导致模型精度下降。

采用相同的 FWI 模型预测形式, Simard 等<sup>[5]</sup> 的凋落物含水率预测误差是 27.7%; Chrosciewicz<sup>[7]</sup> 对于 Jack 松林下凋落物含水率预测的误差为 16% ~ 18%, 对于林中空地的误差为 81% ~ 91%; Aguado 等<sup>[30]</sup> 预测的凋落物含水率的误差为 8.1% ~ 17.1%。本文所用的样本数与上述研究相近, 可燃物含水率采样方法也比较相似, 都是非破坏性采样, 采用 FWI 指标建立的可燃物含水率预测模型的精度与这些研究比较接近。表明采用 FWI 方法预测地表凋落物的 MAE 多数在 10% ~ 30%。从本研究结果可以看出, FWI 方法虽然比气象要素直接回归法的

精度略高一些, 但对于火险等级划分而言, 这些精度的差异没有太多的实际价值, 因为火险等级划分对可燃物含水率的预测精度要求不是很高, 两类模型的精度基本都能满足。但如果进行火行为预报和分析, 则两类模型的精度显然不够, 这样, 用 FWI 系统的一些指标, 如湿度码、FWI 等来分析未来的火行为, 会产生很大的不确定性。从本文的两类模型精度对比来看, 由于 FWI 系统的指标与可燃物含水率的关系对比通过简单多元线性回归所建立的气象要素与可燃物含水率的关系并没有太多优势, 且后者的关系比较简单, 说明根据这种简单的气象要素与林火发生的关系来分析气候变化对未来火险等的影响, 其产生的不确定性可能不比根据 FWI 指标与林火之间的关系所开展的研究更大。

尽管研究地区 FWI 系统的湿度码与可燃物含水率关系密切, 较气象要素回归法略好, 但所建立模型的预测精度并不是很高, 因此, 今后应加强对 FWI 系统在我国应用的修正工作。在对 FWI 进行修正后的基础上, 再重新研究气候变化对未来火险状况和林火发生情况的影响, 将会深化对此问题的理解。建立本文这种 FFMC 的简单线性回归是最简单的修正工作。对本文预测和实测含水率及相应的气象及 FWI 湿度码进行对比分析发现, 误差较大的多是降雨发生后含水率较高时期的数据。Aguado 等<sup>[30]</sup> 指出, 气象站数据的不足是产生误差的重要原因。对于本研究的数据而言, 所用气象站与调查样地具有一定距离, 受距离、地形和林冠遮挡等影响, 气象站记录的降雨与可燃物含水率采样处的降雨有所差异, 甚至当气象数据上有较大降雨记录时, 会出现某个可燃物采样处可能没有发生降雨或很小降雨降落到采样筐上的现象, 导致该处可燃物含水率很低, 这是误差增加的重要原因。因此, 下一步的修正应集中在雨后可燃物湿度码的修正上。

## 参考文献

- [1] Otway SG, Bork EW, Anderson KR, et al. Relating changes in duff moisture to the Canadian Forest Fire Weather Index System in *Populus tremuloides* stands in Elk Island Nation Park. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 37: 1987–1998
- [2] 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)
- [3] Simard AJ, Main WA. Comparing methods of predicting Jack pine slash moisture. *Canadian Journal of Forest Research*, 1982, 12: 793–802

- [4] Chrosciewicz Z. Prediction of forest-floor moisture content under diverse Jack pine canopy conditions. *Canadian Journal of Forest Research*, 1983, **19**: 1483–1487
- [5] Simard AJ, Eenigenburg JE, Blank RW. Predicting fuel moisture in jack pine slash: A test of two systems. *Canadian Journal of Forest Research*, 1984, **14**: 68–76
- [6] Trowbridge R, Feller MC. Relationships between the moisture content of fine woody fuels in lodgepole pine slash and the fine fuel moisture code of the Canadian Forest Fire Weather Index System. *Canadian Journal of Forest Research*, 1988, **18**: 132–135
- [7] Chrosciewicz Z. Prediction of forest-floor moisture content on Jack pine cutovers. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, **19**: 239–243
- [8] Groot WJ, Wardati, Wang YH. Calibrating the fine fuel moisture code for grass ignition potential in Sumatra, Indonesia. *International Journal of Wildland Fire*, 2005, **14**: 161–168
- [9] Wotton BK, Stocks BM, Martell DL. An index for tracking sheltered forest floor moisture within the Canadian Forest Fire Weather Index System. *International Journal of Wildland Fire*, 2005, **14**: 169–182
- [10] Jin J-Z (金继忠), Han S-T (韩树庭), Zhou W (周薇). Canadian forest fire danger rating system in the trial of the Daxing'anling Forest Region. *Forest Fire Prevention* (森林防火), 1986(3): 20–24 (in Chinese)
- [11] Stocks BJ, Lynham TJ. Suitability of the Canadian Forest Fire Danger Rating System for use in the Daxing'anling Forestry Management Bureau, Heilongjiang Province, China. Report to the Ontario Ministry of Natural Resources, JIAPRO Study Group, Ontario, 1986
- [12] 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)
- [13] Wang M-Y (王明玉). Characteristics of Forest Fire Response and Trend under the Scenarios of Climate Change in China. PhD Thesis. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009 (in Chinese)
- [14] Tian X-R (田晓瑞), McRae DJ, Shu L-F (舒立福), et al. Changes of forest fire danger and the evaluation of the FWI system application in the Daxing'anling Region. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), **46**(5): 127–132 (in Chinese)
- [15] Tian X-R (田晓瑞), Shu L-F (舒立福), Wang M-Y (王明玉). Comparative study on the spring forest fire in Beijing area in the past two years. *Fire Safety Science* (火灾科学), 2006, **15**(3): 150–158 (in Chinese)
- [16] Tian X-R (田晓瑞), Shu L-F (舒立福), Wang M-Y (王明玉), et al. Spatial and temporal distribution of lightning fire and forecasting model for Daxing'anling Region. *Forest Research* (林业科学研究), 2009, **22**(1): 14–20 (in Chinese)
- [17] Yu J-L (于建龙), Liu N-A (刘乃安). Fire risk grade of Daxing'anling Region the forest lightning fire occurrence. *Fire Safety Science* (火灾科学), 2010, **19**(3): 131–137 (in Chinese)
- [18] Tian X-R (田晓瑞), Wang M-Y (王明玉), Yin L (殷丽), et al. Fire behavior and consumption of fuel loadings in spring season in southern Daxing'anling Mountains. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2010, **45**(3): 90–95 (in Chinese)
- [19] Tian X-R (田晓瑞), Zhao F-J (赵凤君), Shu L-F (舒立福), et al. Hotspots from satellite monitoring and forest fire weather index analysis for southwest China. *Forest Research* (林业科学研究), 2010, **23**(4): 47–53 (in Chinese)
- [20] Li Y-F (李永福). Study on the Dynamics of Forest Fire Weather in Tahe County of Great Xing'an Mountains Region. Master Thesis. Harbin: Northeast Forestry University, 2011 (in Chinese)
- [21] Tian X-R, Douglas JM, Jin JZ, et al. Wildfires and the Canadian Forest Fire Weather Index system for the Daxing'anling region of China. *International Journal of Wildland Fire*, 2011, **20**: 963–973
- [22] Zhao F-J (赵凤君), Shu L-F (舒立福), Tian X-R (田晓瑞), et al. The changes of forest fuel dryness conditions under global warming in Inner Mongolia Daxing'anling forest region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(4): 1914–1920 (in Chinese)
- [23] Yang G (杨光). The Impact of Climate Change on Forest Fire in China's Boreal Forest. PhD Thesis. Harbin: Northeast Forestry University, 2010 (in Chinese)
- [24] Xin X-Y (信晓颖). Study on the Impacts of Climate Change on Forest Fires and the Evaluation of the FWI System Application in the Zhejiang Province. Master Thesis. Lin'an: Zhejiang A&F University, 2011 (in Chinese)
- [25] Tian X-R (田晓瑞), Shu L-F (舒立福), Zhao F-J (赵凤君), et al. Forest fire danger changes for southwest China under future scenarios. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2012, **48**(1): 121–125 (in Chinese)
- [26] Yang G (杨光), Shu L-F (舒立福), Di X-Y (邸雪颖), et al. Prediction on the changes of forest fire danger rating in Great Xing'an Mountain region of Northeast China in the 21st century under effects of climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(12): 3236–3242 (in Chinese)
- [27] 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
- [28] Van Wagner CE. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service, Technical Report. Ottawa: Canadian Forestry Service, 1987
- [29] Sun Y-C (孙玉成), Ma H-W (马洪伟), Wang X-G (王秀国), et al. Canadian forest fire danger rating system (FWI) initialization method and explain the calculation. *Forest Fire Prevention* (森林防火), 2003(4): 12–13 (in Chinese)
- [30] Aguado I, Chuvieco E, Boren R, et al. Estimation of dead fuel moisture content from meteorological data in Mediterranean areas. Applications in fire danger assessment. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, **16**: 390–397

**作者简介** 张 恒,男,1983年生,博士研究生。主要从事可燃物含水率预测模型研究。E-mail: zhangheng\_nefu@126.com

**责任编辑** 杨 弘