

# 帽儿山地区 10 种灌木生长期含水率变化及预测模型<sup>\*</sup>

金 森<sup>\*\*</sup> 颜雪娇

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘要** 通过 2010—2011 年两年的连续观测, 研究了帽儿山地区 10 种典型灌木生长期含水率的动态变化及其影响因子, 并建立了灌木含水率预测模型。结果表明: 10 种灌木生长期内的最低含水率都高于 100%。在展叶期后到落叶期之前, 大部分灌木含水率都超过 200%。其中, 瘤枝卫矛、珍珠梅和接骨木在整个生长期不易燃; 暴马丁香、东北山梅花、乌苏里绣线菊、金银忍冬、长白忍冬、栓翅卫矛和小叶鼠李在萌芽期和落叶期内可燃, 在展叶期到落叶前期不易燃。土壤含水率和日最高气温对多数(7 种)灌木的含水率有影响, 林冠干旱指数则对部分(5 种)灌木含水率有影响。所建立的线性预测模型中, 9 个模型可以解释超过 35% 的含水率变差。模型的平均绝对误差(MAE)和平均相对误差(MRE)分别为 35.9% 和 13.4%。

**关键词** 灌木 含水率 活可燃物 模型 帽儿山

**文章编号** 1001-9332(2012)12-3317-08 **中图分类号** S762 **文献标识码** A

**Dynamics and modeling of water content of ten shrub species in their growth period in Maoershshan Mountain region of Northeast China.** JIN Sen, YAN Xue-jiao (College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(12): 3317–3324.

**Abstract:** Based on the two successive years observation of the water content of ten representative shrub species in Maoershshan Mountain region of Northeast China, this paper studied the dynamics of the water content of these shrub species during their growth period and related affecting factors, with the prediction models of the shrub water content established. For the ten shrub species, their minimal water content during growth period was higher than 100%, and most of the species had a water content higher than 200% within the period from the late phase of leaf-unfolding to early phase of leaf-falling. *Euonymus verrucosus*, *Sorbaria sorbifolia*, and *Sambucus williamsii* were incombustible in their whole growth period due to the extremely high water content, while *Syringa reticulate*, *Philadelphus schrenkii*, *Euonymus verrucosus*, *Spiraea chamaedryfolia*, *Lonicera maackii*, *Lonicera rupestris*, and *Rhamnus parvifolia* were combustible only in the phases of budding and leaf-falling. Soil moisture content and daily maximum temperature had effects on the water content of most (7) of the ten shrubs, and canopy drought severity index affected the water content of 5 of the ten shrubs. The established 9 prediction models could explain more than 35% of the water content variance of the shrub species, with a mean MRE of 35.9% and a mean MAE of 13.4%.

**Key words:** shrub; water content; live combustible; model; Maoershshan Mountain.

森林可燃物含水率直接影响森林燃烧的难易程度和林火行为<sup>[1-3]</sup>。当活可燃物含水率低于一定阈值时, 遇火燃烧并成为热源; 否则, 不能燃烧, 只起热沉作用<sup>[4]</sup>。目前, 活可燃物在火险预报中的作用日益得到重视, 在美国国家火险等级系统和澳大利亚火险系统中, 对活可燃物含水率进行了预测<sup>[5-6]</sup>。国

外对活可燃物含水率的预测已有一些报道。Castro 等<sup>[7]</sup>研究了活可燃物含水率与气象变化的关系, 并建立了预测模型; Castro 等<sup>[8]</sup>和 Demmison 等<sup>[9]</sup>研究表明, 地中海地区活可燃物含水率与气象干旱指数有一定关系; Pellizzaro 等<sup>[10]</sup>用干旱指数预测活可燃物含水率; Mariano 等<sup>[11]</sup>建立了用 AVHRR 图像和气象数据预测活可燃物含水率的模型。国内相关研究开展得较少, 罗永忠等<sup>[12]</sup>研究了活可燃物含水率的日变化及季变化; 马丽华等<sup>[1]</sup>建立了基于

\* 林业公益性行业科研专项(200804002)资助。

\*\* 通讯作者。E-mail: jinsen2005@126.com

2012-01-18 收稿, 2012-09-28 接受。

时序的活可燃物含水率预测模型.

灌木是森林可燃物中的重要组分,灌木含水率的预测是森林火险预报系统和火行为预报系统的重要任务之一.灌木含水率除受环境因子影响外,还受自身生理特征的影响<sup>[7,13]</sup>,因此目前的研究远不如死可燃物含水率研究充分<sup>[12,14]</sup>.受气候变化影响,森林中夏季火日益增多,因此,研究植物生长期活灌木含水率并评价其燃烧性十分必要.本文以我国东北东部山地 10 种典型灌木为对象,研究生长期内这些灌木含水率的动态变化,并建立相应的预测模型,旨在为建立更准确的火险预报系统提供基础资料.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区域概况

研究地点位于黑龙江省尚志市境内的东北林业大学帽儿山试验林场(45°20'—45°25' N, 127°30'—127°34' E),是我国东北林区典型的次生林区,最高海拔 805 m,平均海拔 300 m.该地区属温带大陆性气候,四季变化明显,年平均气温 2.7 °C,年均最高气温 18.0 °C;年均最低气温 -12.1 °C;平均相对湿度为 71%,年均降雨量 728 mm,降雨主要集中在 7—8 月,年均蒸发量 1093.9 mm,年日照时数 2471 h,干燥度 0.7,夏季郁闭度在 0.7~0.9.地带性土壤为暗棕壤,非地带性土壤有白浆土、草甸土、沼泽土等.常见乔木树种主要有:蒙古栎(*Quercus mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidi-a*)和青楷槭(*Acer tegmentosum*)等;灌木主要有:暴马丁香(*Syringa reticulata*)、乌苏里绣线菊(*Spiraea chamaedryfolia*)、长白忍冬(*Lonicera ruprechtiana*)和珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia*)等;草本主要有:山茄子(*Anisodus acutangulus*)、和尚菜(*Adenocaulon himalaicum*)、粗茎鳞毛蕨(*Dryopteris crassirhizoma*)和东北羊角芹(*Aegopodium alpestre*)等.林场森林火灾较少.

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样品采集与含水率测定** 采样时间为 2010 年 5 月 30 日—10 月 4 日和 2011 年 4 月 26 日—9 月 20 日.选取暴马丁香、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)、瘤枝卫矛(*Euonymus verrucosus*)、乌苏里绣线菊、金银忍冬(*Lonicera maackii*)、长白忍冬、珍珠梅、栓翅卫矛(*Euonymus phellomania*)、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)、接骨木(*Sambucus williamsii*)等 10 种灌木为试验种.每种灌木选取 6 个样点,采集灌木上部的叶片以及直径<0.6 cm 的细枝<sup>[15]</sup>.取

样时间选在每天的 14:00 左右<sup>[6]</sup>,以获取当天最低含水率.每周取样一次.如有降雨,则在降雨结束至少 24 h 后再开始取样<sup>[16]</sup>.每个样本取 50 g 左右,用 JJ600Y 天平现场称量鲜质量(月初样本的叶和小枝分别称量鲜质量),将样品带回实验室内,105 °C 烘干 24 h,称干质量.按下式计算含水率,取各点平均值作为该灌木的含水率:

$$LFMC = \frac{F_m - D_m}{D_m} \times 100\% \quad (1)$$

式中:LFMC 为物种活可燃物含水率(%); $F_m$  和  $D_m$  分别为物种的鲜质量(g)和干质量(g).

每次取样时随机选 5 个点取土样,共 100 g.同法测定土壤含水率.两年共取样 38 次.

**1.2.2 气象数据采集** 气象数据由距试验地点 15 km 的帽儿山森林生态站获得,采集的气象要素:空气温度、空气湿度、日照时数、风速、降雨量和蒸发量.

### 1.3 数据处理

**1.3.1 灌木含水率动态** 利用平均值法将 10 种灌木含水率标准化,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同灌木种含水率的差异,计算含水率的最大值、最小值等,绘制其时间动态曲线,并依据含水率高低对灌木分类.

**1.3.2 影响因子分析与建模** 影响活可燃物含水率的环境因子主要有土壤因子和气象因子<sup>[8,17]</sup>,且与前期的气候积累密切相关<sup>[5,18]</sup>.影响因子有 4 类:1)采样当天的土壤含水率(%);2)采样当天的气象因子,包括日最高气温(°C)、日平均湿度(%)、日照时数(h)、风速(m·s<sup>-1</sup>);3)累加降雨量,包括 5、10、15、20、25 和 30 d 的累积降雨量(mm);4)林冠干旱指数(CDSI),该指数通过一段时间内累积降雨量蒸发量的比值计算<sup>[10]</sup>:

$$CDSI = \sum_{i=0}^n \frac{P_i}{ET_{O_i}} \quad (2)$$

式中: $i$  为总天数; $P_i$  为  $i$  天累积降雨量(mm); $ET_{O_i}$  为  $i$  天累积蒸发量(mm).

采用 Pearson 相关系数评价灌木含水率与各因子间的关系,显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ .用多元线性逐步回归法<sup>[19]</sup>建立活可燃物含水率预测模型.从采样的 38 组数据中随机抽取 30 组用来建立模型,剩余 8 组数据用于模型的验证,计算出平均绝对误差(MAE)和平均相对误差(MRE):

$$MAE = (\sum_{i=1}^n |R_i - R_j|)/n \quad (3)$$

$$MRE = \left( \sum_{i=1}^n \left| \frac{R_i - R_j}{R_i} \right| \right) / n \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $R_i$  和  $R_j$  分别为灌木含水率的实测值和预测值.

所有数据均采用 SPSS 17.0 (SPSS Inc., USA) 和 SigmaPlot 10.0 (Systat Corporation, USA) 软件进行统计分析和绘图.

## 2 结果与分析

### 2.1 10 种灌木生长期含水率的动态变化

由图 1 可见, 在 4 月下旬到 5 月中旬的灌木萌芽期内, 10 种灌木的含水率均较低, 随后逐渐增加, 到 5 月下旬植物展叶期结束时, 基本达到最大值 (平均为 328.2%). 其中, 4 月末金银忍冬含水率最低 (100.1%), 接骨木最高 (892.9%), 其余灌木平均含水率为 149.8%; 9、10 月的含水率比 5 月平均低 21.9%, 含水率距平绝对值的平均值与含水率平均值间变幅较小, 其中暴马丁香变幅最大, 为 17.9%, 小叶鼠李变幅最小, 为 8.4%. 采样结束 (落叶期) 时, 接骨木含水率 >400%, 而暴马丁香、东北山梅花、珍珠梅和瘤枝卫矛含水率在 133% ~ 276%; 长白忍冬、栓翅卫矛、乌苏里绣线菊、小叶鼠李、金银忍冬含水率在 87% ~ 132% 之间.

通常, 阔叶树发生树冠火的含水率上限在 70% ~ 130%<sup>[20~22]</sup>, 含水率 >200% 时, 灌木极不易燃烧<sup>[16]</sup>. 在整个生长期内, 10 种灌木的最低含水率都

高于 100%, 特别是在展叶期后到落叶期之前的时段, 大部分灌木含水率都超过 200%, 说明生长期这些灌木的易燃性很差. 但在萌芽期-展叶期, 一些种低于 130%, 有燃烧的可能性. 据此可将这 10 种灌木分成两类: I 类, 瘤枝卫矛、珍珠梅和接骨木. 这些灌木在整个生长期内的含水率超过 130%, 整个生长期不易燃. 其中, 瘤枝卫矛在展叶期内的含水率一直高于 130%, 难燃; 珍珠梅在展叶期到落叶前期含水率均高于 200%, 极不易燃; 接骨木在整个生长期都高于 380%, 最难燃. II 类: 暴马丁香、东北山梅花、乌苏里绣线菊、金银忍冬、长白忍冬、栓翅卫矛和小叶鼠李. 这些灌木在萌芽期和落叶期含水率在 100% ~ 130%, 可燃; 而在展叶期到落叶前期均高于 200%, 不易燃. 这些灌木从展叶期到落叶前期的变化不一致, 又可将这 7 种灌木再分成两类: 1) 暴马丁香、东北山梅花在展叶期到落叶前期期间含水率一直高于 200%, 即在生长期中极不易燃, 起较强的热沉作用. 2) 长白忍冬、乌苏里绣线菊、金银忍冬、栓翅卫矛、小叶鼠李在展叶期到落叶前期期间含水率在 200% 上下波动, 燃烧性较前 2 种灌木强, 热沉作用不显著.

试验过程中, 带有小枝的样品叶和小枝的质量比约 20 : 1. 由表 1 和表 2 可见, 不同灌木种之间的含水率的差异显著.

表 1 10 种灌木含水率的单因素方差分析

Table 1 Results of ANONA analysis for moisture content of 10 shrub species

	差平方和 Sum of square	自由度 df	均方差 Mean square	F	P
组间 Between groups	4121291.480	9	45792.276	105.339	0.000
组内 Within groups	1607515.325	370	4344.636		
总和 Total	5728806.805	379			

表 2 10 种灌木含水率差值的 LSD 多重比较

Table 2 Results of LSD multiple comparisons of moisture content of 10 shrub species

种 Species	X (%)	$X_A - 564.0$	$X_B - 225.5$	$X_C - 221.8$	$X_D - 297.2$	$X_E - 235.5$	$X_F - 199.8$	$X_G - 197.3$	$X_H - 267.1$	$X_I - 354.9$
A	266.3	-297.7*	40.8*	44.5*	-30.9*	30.8*	66.5*	59.0*	-0.8	-88.6*
B	354.9	-209.1*	129.4*	133.1*	57.7*	119.4*	155.1*	157.6*	87.8*	
C	267.1	-296.9*	41.6*	45.3*	-30.1*	31.6*	67.3*	69.7*		
D	197.3	-366.7*	-28.2	-24.5	-99.9*	-38.2*	-2.5			
E	199.8	-364.2*	-25.7	-22.0	-97.4*	-35.7*				
F	235.5	-328.5*	10.0	13.7	-61.7*					
G	297.2	-266.8*	71.7*	75.4*						
H	221.8	-342.2*	-3.7							
I	225.5	-338.5*								
J	564.0									

A: 暴马丁香 *Syringa reticulata*; B: 东北山梅花 *Philadelphus schrenkii*; C: 瘤枝卫矛 *Euonymus verrucosus*; D: 乌苏里绣线菊 *Spiraea chamaedryfolia*; E: 金银忍冬 *Lonicera maackii*; F: 长白忍冬 *Lonicera ruprechtiana*; G: 珍珠梅 *Sorbaria sorbifolia*; H: 栓翅卫矛 *Euonymus phellomania*; I: 小叶鼠李 *Rhamnus parvifolia*; J: 接骨木 *Sambucus williamsii*. X: 平均含水率 Mean moisture content. 下同 The same below.

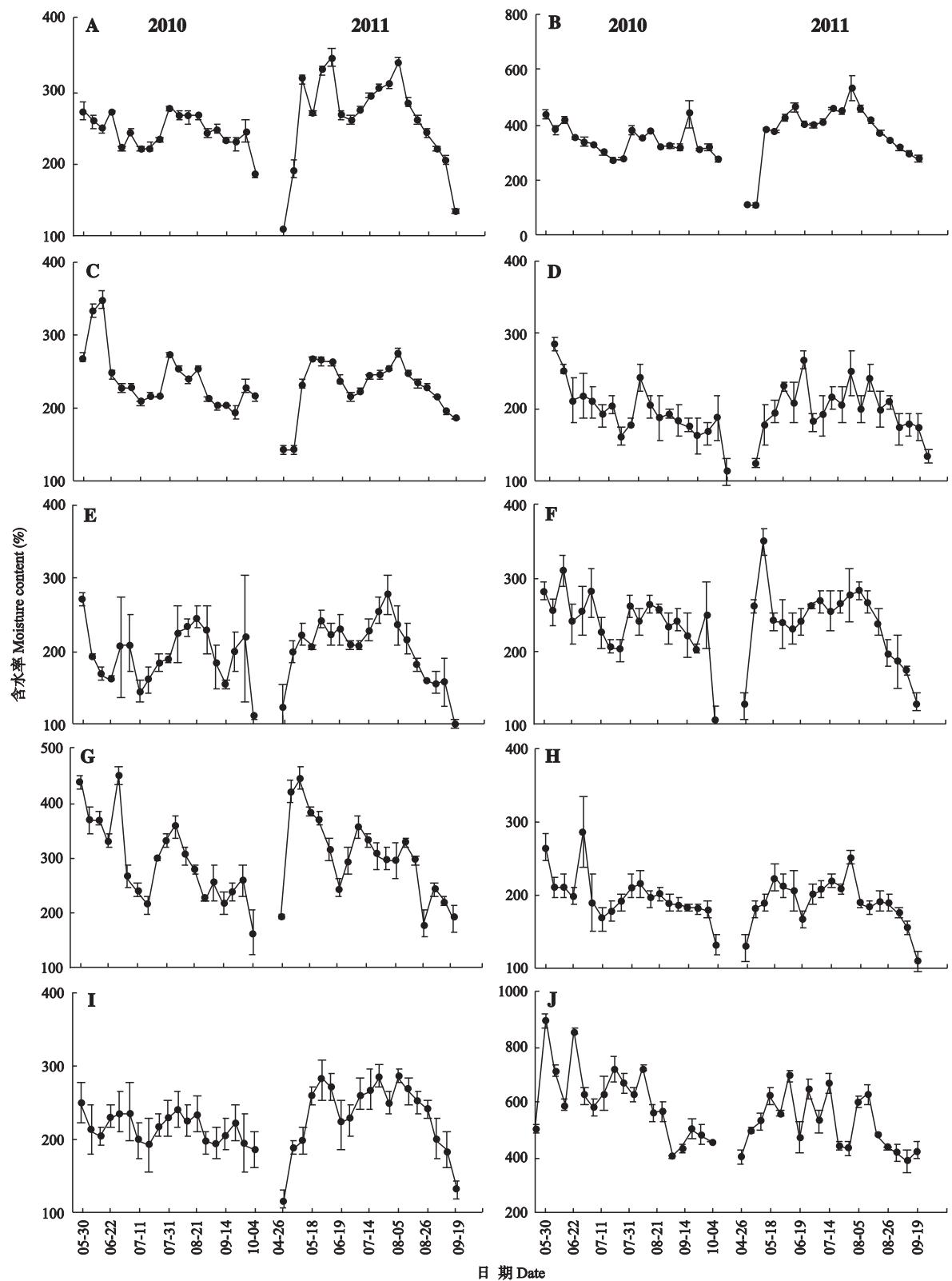


图1 试验期间物种含水率的变化

**Fig. 1** Dynamics of live fine fuel moisture content by species observed during the study period.

A:暴马丁香 *Syringa reticulata*; B:东北山梅花 *Philadelphus schrenkii*; C:瘤枝卫矛 *Euonymus verrucosus*; D:乌苏里绣线菊 *Spiraea chamaedryfolia*; E:金银忍冬 *Lonicera maackii*; F:长白忍冬 *Lonicera ruprechtiana*; G:珍珠梅 *Sorbaria sorbifolia*; H:栓翅卫矛 *Euonymus phellomania*; I:小叶鼠李 *Rhamnus parvifolia*; J:接骨木 *Sambucus williamsii*. 下同 The same below.

## 2.2 灌木含水率的影响因子

图 2 给出了 4 个环境因子在采样期间的动态变化。与历史平均水平相比, 2010—2011 年的气象条件反映了该地区同期的典型情况。表 3 给出了各影响因子与灌木可燃物含水率之间的 Pearson 相关系数, 由于日照时数、风速、5 天累积降雨量与灌木含水率相关不显著, 故未列入表中。不同灌木含水率的影响因子有所不同。土壤含水率和日最高气温对较多的灌木种含水率都有影响, 林冠干旱指数对部分灌木含水率也有影响。累加降雨量对可燃物含水率也有影响, 但不如前两个因子更普遍。

## 2.3 灌木含水率预测模型

表 4 给出了用逐步回归筛选的 10 种灌木含水率预测模型的平均绝对误差 (MAE) 在 23.6% ~ 77.3%, 平均相对误差 (MRE) 在 11.6% ~ 18.3% 之间。以 MRE < 15% 为准<sup>[23]</sup>, 暴马丁香、瘤枝卫矛、乌苏里绣线菊、金银忍冬、长白忍冬、栓翅卫矛、小叶鼠李和接骨木的预测效果最好, 东北山梅花和珍珠梅的效果次之。图 3 给出了 38 组含水率的实测值与预测值的对比。从中可见, 各灌木种的散点围绕直线

率预测模型所采用的预测因子、模型参数和误差。最后进入模型的因子有: 10 天累计降雨、日最高气温、土壤含水率和树冠干旱指数。这些模型可以解释含水率变差的 17.5% ~ 50.2%。在 10 种灌木中, 除瘤枝卫矛的模型解释的含水率变差偏低外, 其他模型都 > 35%。

10 种灌木的平均绝对误差 (MAE) 在 23.6% ~ 77.3%, 平均相对误差 (MRE) 在 11.6% ~ 18.3% 之间。以 MRE < 15% 为准<sup>[23]</sup>, 暴马丁香、瘤枝卫矛、乌苏里绣线菊、金银忍冬、长白忍冬、栓翅卫矛、小叶鼠李和接骨木的预测效果最好, 东北山梅花和珍珠梅的效果次之。图 3 给出了 38 组含水率的实测值与预测值的对比。从中可见, 各灌木种的散点围绕直线

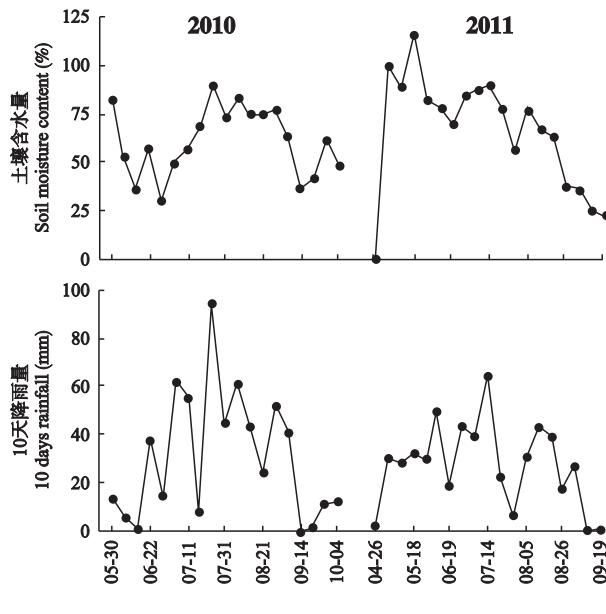


图 2 试验期间灌木含水率的影响因子

Fig. 2 Dynamics of influence factors during the study period.

表 3 灌木含水率与环境因子的 Pearson 相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients between moisture content of 10 shrubs and environmental factors

树种 Species	土壤含水率 Soil moisture content	日最高气温 Daily maximum temperature	日平均湿度 Daily average humidity	累积降雨量 Cumulative rainfall (mm)					林冠干旱指数 Canopy drought stress index
				10 d	15 d	20 d	25 d	30 d	
A	0.619 **	0.387 *	0.313	0.319	0.293	0.297	0.335 *	0.368 *	-0.460 **
B	0.297	0.383 *	0.156	0.061	0.095	0.131	0.217	0.238	-0.468 **
C	0.244	0.237	0.169	0.014	0.024	0.050	0.111	0.139	-0.364 *
D	0.493 **	0.394 *	0.154	0.223	0.308	0.217	0.263	0.196	-0.308
E	0.619 **	0.362 *	0.358 *	0.233	0.282	0.349 *	0.412 *	0.377 *	-0.269
F	0.539 **	0.521 **	0.274	0.227	0.223	0.241	0.271	0.250	-0.361 *
G	0.537 **	0.312	0.129	0.189	0.198	0.135	0.160	0.023	-0.221
H	0.391 *	0.454 **	0.230	0.153	0.191	0.216	0.298	0.264	-0.311
I	0.569 **	0.395 *	0.405 *	0.358 *	0.378 *	0.354	0.406 *	0.357 *	-0.446 **
J	0.279	0.441 **	0.209	0.359 *	0.332 *	0.270 *	0.317	0.327 *	0.188

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

表4 灌木含水率预测模型的参数和检验

Table 4 Regression coefficients and statistics of predictive models of shrub moisture content

树种 Species	含水率模型 Model of moisture	F	P	调整后决定系数 Adjusted R <sup>2</sup>	平均绝对误差 MAE (%)	平均相对误差 MRE (%)
A	$y = 161.461 + 1.471x_1$	$F_{(2,27)} = 30.247$	0.000	0.502	29.2	12.6
B	$y = 252.107 - 6.452x_1 + 5.160x_2$	$F_{(3,26)} = 9.793$	0.001	0.377	51.2	18.3
C	$y = 236.058 - 2.653x_3$	$F_{(1,28)} = 7.131$	0.012	0.175	26.7	11.6
D	$y = 140.438 + 0.819x_1$	$F_{(3,26)} = 17.021$	0.000	0.356	23.6	12.0
E	$y = 121.735 + 1.168x_1$	$F_{(1,28)} = 21.055$	0.000	0.409	26.5	13.9
F	$y = 76.108 + 4.512x_2 + 0.797x_1$	$F_{(3,26)} = 11.647$	0.000	0.423	27.4	12.7
G	$y = 163.408 + 1.949x_1$	$F_{(1,28)} = 27.702$	0.000	0.479	45.3	15.3
H	$y = -154.866 + 1.004x_1$	$F_{(1,28)} = 19.794$	0.000	0.393	26.5	12.0
I	$y = -156.341 + 1.095x_1$	$F_{(1,28)} = 25.891$	0.000	0.462	26.0	12.2
J	$y = 461.691 + 2.938x_4$	$F_{(1,28)} = 18.782$	0.000	0.380	77.3	13.1

$y$ :含水率的预测值 Predicted moisture content (%) ;  $x_1$ :土壤含水率 Soil moisture content (%) ;  $x_2$ :日最高气温 Daily maximum temperature (℃) ;  $x_3$ :林冠干旱指数 Canopy drought stress ;  $x_4$ :10天累积降水量 10 days cumulative rainfall (mm).

$Y=X$  均匀分布,表明模型的预测无偏差。但瘤枝卫矛模型中的干旱指数变化幅度和回归系数均较小,导致其预测含水率变化不大,调整后的决定系数也最小。考虑到该灌木在生长期内很难燃烧,其较小的R<sup>2</sup>值对火险预报的影响不大。事实上,低估可燃物含水率会使人为的火险增高,可能造成不必要的预防动作;高估可燃物含水率会人为地降低火险等级,造成疏忽麻痹。本研究中,暴马丁香、东北山梅花、乌苏里绣线菊、金银忍冬、长白忍冬、栓翅卫矛和小叶鼠李存在着预测含水率高于130%,而实测含水率低于130%的时刻,即灌木已可燃,但预报还认为不能燃烧。因此在使用上述模型时应加以注意。

### 3 讨 论

#### 3.1 10种灌木含水率的变化及燃烧性

10种灌木在生长期内的最低含水率都高于100%。特别是在展叶期之后至落叶期之前,大部分灌木含水率都超过200%,其中,瘤枝卫矛、珍珠梅和接骨木在整个生长期不燃;暴马丁香、东北山梅花、乌苏里绣线菊、金银忍冬、长白忍冬、栓翅卫矛和小叶鼠李7种灌木在萌芽期和落叶期可燃,在展叶期到落叶前期不易燃。

接骨木、卫矛和忍冬是重要的生物防火林带树种<sup>[24~26]</sup>。本研究表明,这3种灌木的阻火性能不同。在10种灌木中,接骨木的含水率最高,在整个生长期中平均为564.0%,可作为很好的阻燃树种,是生物防火林带中的重要下木;卫矛在整个生长期含水率都高于200%,也可作为阻火树种;而金银忍冬、长白忍冬在生长期的某些时段上可燃,因此,其阻火效果次于接骨木和卫矛。

#### 3.2 灌木含水率与环境因子的关系

本研究中,土壤含水率、日最高气温与大多数灌木含水率的相关性较好;文中建立的线性预测模型,有9个模型可以解释超过35%的含水率变差。模型的平均绝对误差(MAE)和平均相对误差(MRE)分别是35.9%和13.4%。在火险预报中具有一定的应用价值。

多数灌木含水率与日最高气温为显著正相关,这与死可燃物的研究结论不同<sup>[27~28]</sup>。因为活可燃物含水率受外界环境与自身生理调节的共同影响<sup>[17]</sup>。随着温度升高,灌木进入生长旺盛期,气孔逐渐变大,蒸腾速率增高,促进了根系对水分的吸收,使植物体内水分含量增加。但当温度过低(<10℃)或过高(>35℃)时,植物的蒸腾作用过强<sup>[29]</sup>,则上述规律不成立。本次试验期间气温在10.2~30.6℃,因此含水率与日最高气温的关系为显著正相关。

Pellizzaro等<sup>[10]</sup>研究表明,地中海地区几种灌木的含水率与林冠干旱指数之间具有强烈的相关性,其最小相关系数为0.717。本研究中,对于我国东北东部山地的典型灌木而言,部分灌木含水率与林冠干旱指数关系不大。这可能是由于两地的气候及植被条件不同造成的。

综上所述,对于东北地区东部山地,在植物展叶期后的生长期內,灌木具有较好的阻火能力,起到降低火险等级的作用;而在生长初期,部分灌木依然可燃。另外,本研究没有涵盖无叶的萌芽期以及落叶期后的枝条含水率。从文中的数据来看,这些阶段的灌木含水率应低于可燃阈值(130%)。在今后的工作中应加强这些时段的灌木含水率研究,以提供更全面、有效的森林火险预报。

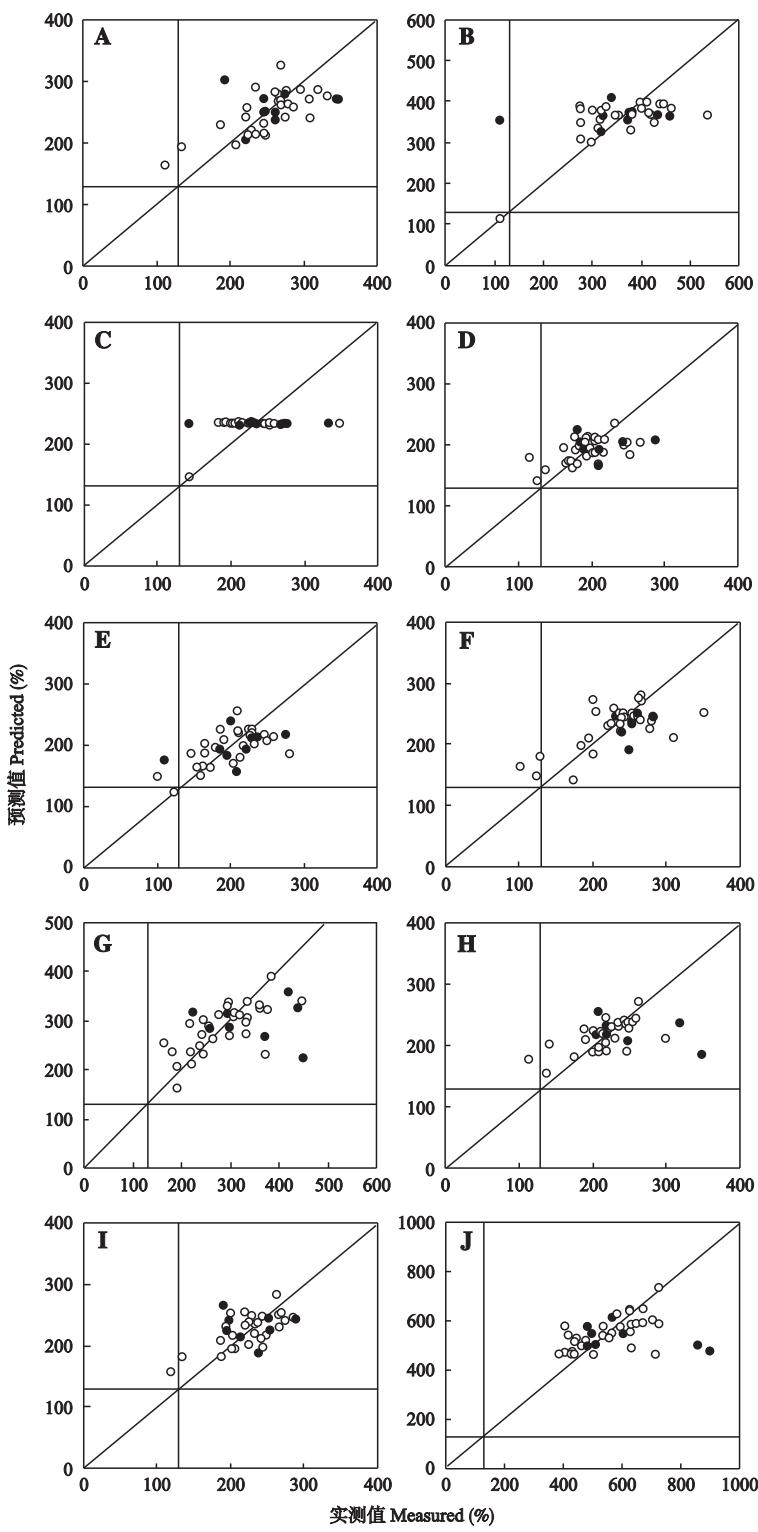


图 3 10 种灌木含水率的预测值(其中 30 个用于建模)与实测值(8 个用于验证)

Fig. 3 Measured and predicted moisture contents of 10 shrubs (30 data used for modeling, and 8 data used for validation).

## 参考文献

- [1] Ma L-H (马丽华), Li Z-S (李兆山). On the six forest active combustible plants moisture model in Daxing'an Mountains. *Journal of Jilin Forestry University* (吉林林学院学报), 1998, 14(1): 21–23 (in Chinese)

- [2] Reifnyder WE. Seasonal variation in the moisture content of the green leaves of mountain laurel. *Forest Science*, 1961, 7: 16–23
- [3] Xu L-H (徐丽华). Study on forest fuel and classification of fire disk level of stand type. *Journal of Liaoning*

- Forestry Science and Technology* (辽宁林业科技), 2001(6): 3–6 (in Chinese)
- [4] Pyne SJ, Andrews PL, Laven RD. *Introduction to Wildland Fire*. Toronto: Wiley, 1996
- [5] Shan Y-L (单延龙), Liu N-A (刘乃安), Hu H-Q (胡海清), et al. Moisture content of litter of principal fuel types in Liangshui Nature Reserve. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2005, **33**(5): 41–43 (in Chinese)
- [6] Canadian Forestry Service, Government of Canada. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35, Ottawa, Canada, 1987
- [7] Castro FX, Tudela A, Serra I, et al. Patterns of variation of *Rosmarinus officinalis* live fine fuel moisture. *Forest Fire Research and Wildland Fire Safety*, 2002, **72**: 1–9
- [8] Castro FX, Tudela A, Sebastiá MA. Modeling moisture content in shrubs to predict fire risk in Catalonia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, **116**: 49–59
- [9] Dennison PE, Roberts DA, Thorgersen SR, et al. Modeling seasonal changes in live fuel moisture and equivalent water thickness using a cumulative water balance index. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **88**: 442–452
- [10] Pellizzaro G, Cesarcio C, Duce P, et al. Relationships between seasonal patterns of live fuel moisture and meteorological drought indices for Mediterranean shrubland species. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, **16**: 232–241
- [11] Mariano G, Emilio C, Héctor N, et al. Combining AVHRR and meteorological date for estimating live fuel moisture content. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**: 3618–3627
- [12] Luo Y-Z (罗永忠), Che K-Q (车克钧), Jiang Z-R (蒋志荣). Studies on the changing pattern of forest fuel moisture. *Journal of Gansu Agricultural University* (甘肃农业大学学报), 2005, **40**(2): 239–244 (in Chinese)
- [13] Pellizzaro G, Duce P, Ventura A, et al. Seasonal variation of live moisture content and ignitability in shrubs of the Mediterranean basin. *International Journal of Wildfire Fire*, 2007, **16**: 633–641
- [14] 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
- [15] Andrews P. BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system-BURN subsystem, part 1. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-194, 1986;130
- [16] Wang Z-F (王正非), Chen D-W (陈大我), Liu Z-Q (刘自强). Discussion on ecological balance and forest fire destructive force. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学学报), 1986, **10**(1): 21–23 (in Chinese)
- [17] Zhang G-Y (张广英), Gao Y-G (高永刚), Cao X-B (曹晓波). Preliminary research on the moisture content of flammable material in Wuyin Mountain forest in Yichun City. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2007, **35**(36): 11956–11958 (in Chinese)
- [18] Baldocchi D. Measuring and modeling carbon dioxide and water vapour exchange over a temperate broadleaved forest during the 1995 summer drought. *Plant, Cell and Environment*, 1997, **20**: 1108–1122
- [19] Komarek EV. Fire ecology: Grasslands and man. Proceedings Fourth Annual Tall Timbers Fire Ecology Conference. Tall Timbers Research, Inc., Tallahassee, FL, 1965: 169–220,
- [20] Chandler P, Cheney P, Thomas L. *Fire in Forestry*. New York: Wiley, 1983
- [21] Agee JK, Wright CS, Williamson N, et al. Foliar moisture content of Pacific Northwest vegetation and its relation to wildland fire behavior. *Forest Ecology and Management*, 2002, **167**: 57–66
- [22] Van Wagner CE. Conditions for the start and spread of crown fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, **7**: 23–34
- [23] Zhang J-Q (张景群). Determination of the seasonal changes of moisture content for different species. *Forest Fire Prevention* (森林防火), 2000(2): 17–18 (in Chinese)
- [24] Zheng H-N (郑焕能). *Forest Fire Prevention*. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1992 (in Chinese)
- [25] Shan Y-L (单延龙), Hu H-Q (胡海清), Shu L-F (舒立福), et al. Ordering and sorting of fire resistance of tree leaves. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2003, **39**(1): 105–113 (in Chinese)
- [26] Bo Y-S (薄颖生), Han E-X (韩恩贤), Han G (韩刚), et al. A study on tree species selection for the fire protection forest belt in Shaanxi Province. *Journal of Northwest Forestry College* (西北林学院学报), 1997, **12**(4): 24–30 (in Chinese)
- [27] Zhang D-M (张大明), Yang C-Y (杨春雨), Zhang W-S (张维胜), et al. Research on the prediction model of relationship between combustibles moisture and meteorological factors. *Journal of Jilin Forestry Science and Technology* (吉林林业科技), 2010, **39**(3): 27–39 (in Chinese)
- [28] Wang J-Y (王金叶), Che K-J (车克钧), Fu H-E (傅辉恩), et al. Research on the relationship between combustibles moisture and meteorological factors. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology* (甘肃林业科技), 1994(2): 21–23 (in Chinese)
- [29] Wang Y-A (王衍安), Gong W-H (龚维红). *Plant and Plant Physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2002 (in Chinese)

**作者简介** 金森,男,1970年生,博士,教授。主要从事森林防火研究。E-mail: jinsen2005@126.com

**责任编辑** 李凤琴