# 时滞和平衡含水率直接估计法的 有效性分析

# 金森李亮

(东北林业大学林学院 哈尔滨 150040)

摘 要: 通过对不同直径落叶松枯枝含水率和环境条件的室内连续观测,分别使用 Nelson 模型和 Simard 模型作 为平衡含水率响应模型,估计可燃物时滞和平衡含水率响应函数,然后以参数估计值预测可燃物含水率,分析比较 建模样本数和平衡含水率模型不同对参数估计和含水率预测误差的影响。结果表明:1)基于 Nelson 模型的直接估 计法在建模样本数较大时(84个)结果稳健,预测误差小,方法是有效的。2)采用 Simard 模型直接估计可燃物时 滞和平衡含水率时,在建模样本数较少时,其预测效果不如 Nelson 模型,但当建模样本数较多(超过84)时2个模 型预测效果没有显著差别。

关键词: 可燃物;模型;时滞;平衡含水率 中图分类号:S762 文献标识码:A 文章编号:1001-7488(2010)02-0095-08

# Validation of the Method for Direct Estimation of Timelag and Equilibrium Moisture Content of Forest Fuel

Jin Sen Li Liang

( College of Forestry, Northeast Forestry University Harbin 150040)

Abstract: Nelson (1984) and Simard (1968) model was used as a model of equilibrium moisture content, and we estimated the equilibrium moisture content function and timelag, and then forecasted fuel moisture content using the estimated value as parameters, and finally analyzed the impact of different modeling sample size and the model of equilibrium moisture content on parameter estimation and moisture content forecast error. The results indicate that :1) Catchpole *et al.* method( When modeling sample size is 84) performs well in fuel moisture prediction. It shows Catchpole *et al.* (2001) method has a strong applicability in estimating fuel moisture from field data. At least 80 or more data are advised to be used and 30 data can also be used when error standard is not high(3%, for example).2) The predicting results based on Nelson(1984) model are better than that based on Simard model when sample size is small, but when it is over 84, the two performances are not significantly different.

Key words : fuel ; model ; timelag ; equilibrium moisture content

可燃物含水率预测是森林火险天气预报的重要 内容,也是做好火险天气预报和火行为预报的关键 (Anderson,1964;郑焕能等,1992;邸雪颖,1993;王 瑞军等,1997;胡海清,2005;Rothermel *et al.*,1986; 何忠秋等,1996;Nelson,2000;Chuvieco *et al.*, 2004)。基于时滞和平衡含水率预测可燃物含水率 是目前最经典的方法(金森等,1999;2000;刘曦等, 2007)。在该方法中,准确估计可燃物的时滞和平 衡含水率十分重要。由于传统估测方法的复杂性, Catchpole 等(2001)提出了利用野外数据直接估测 可燃物含水率的方法(以下称"直接估计法")(王会 研等 2008)。该方法基于一种半物理平衡含水率 模型,用初始含水率和环境中温、湿度值对可燃物含 水率变化进行预测,方便快捷。

Catchpole 等(2001)的直接估计法效果固然很 好,可燃物含水率预测误差在2%以内,但该方法的 有效性还没有得到全面的分析:一是方法的验证问 题,又细化为2个子问题:1)建模数据和验证数据 相同,自然提高了模型的准确率。如果采用不同于 建模数据的验证数据,模型的准确率如何目前尚不

收稿日期 2008-12-15。

清楚;2)建模样本数对参数估计和预测结果的影响 尚不清楚。这2个问题可合在一起研究。二是其他 平衡含水率对温湿度的响应函数对方法的影响还没 有研究。平衡含水率对温湿度的响应函数的选择是 该方法的重要内容(详见1.1)。目前存在4种平衡 含水率对温湿度的响应模型(Viney,1991;刘曦等, 2007)Simard(1968)模型、Van Wagner(1972)模型、 Anderson等(1978)模型、Van Wagner(1972)模型、 Anderson 等(1978)模型、Nelson(1984)模型。该方 法采用 Nelson 模型。采用其他平衡含水率响应模 型对该方法有何影响,目前也不清楚。这些问题不 解决,会影响该方法的应用,无法判断根据该方法得 到的结果的误差。为此,本文对直接估计法的有效 性进行分析。

1 研究方法

### 1.1 时滞和平衡含水率直接估计法介绍

可燃物含水率随时间的变化可用下列方程 描述:

$$dM/dt = (E - M)/\tau$$
, (1)

式中 *M* 为可燃物含水率 ,% ;*E* 为平衡含水率 ,% ;*t* 为时间 ,h ; ,为时滞 ,h。

假定时滞不随时间变化,可将方程(1)离散表 达为:

$$M(t_i) = \exp\left(\frac{\delta_i}{-\tau}\right) \left[ M_{i-1} + \frac{1}{\tau} \int_{t_{i-1}}^{t} \exp\left(\frac{t-t_{i-1}}{\tau}\right) E(t) dt \right], \quad (2)$$

$$\delta_t = t_i - t_{i-1}$$

式中 *M*(*t<sub>i</sub>*)为 *t<sub>i</sub>*时刻的含水率实测值 ,%;*M<sub>i-1</sub>*为 *t<sub>i-1</sub>*时刻的含水率实测值 ,%;δ,为野外采样时间间 隔,h;*E*(*t*)为平衡含水率与时间的函数,单位时间 间隔内为定值,%。平衡含水率与环境因子的关系 采用 Nelson 模型:

$$E = a + b \ln \Delta G = a + b \ln \left( -\frac{RT}{M} \log H \right) , \quad (3)$$

式中,*T*为温度,K;*H*为湿度,%;*R*为普适气体常量,取8.314 J·K<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>;*M*为H<sub>2</sub>O的相对分子质量,18;*a*,*b*为待估参数。将(3)代入方程(2)得到:

$$M(t_i) = \mu^2 M_{i-1} + \mu(1 - \mu) E_{i-1} +$$

$$(1 - \mu)E_i$$
, (4)

式中  $E_{i-1}$ 为  $t_{i-1}$ 时刻的平衡含水率值 ,% ; $E_i$ 为  $t_i$ 时刻的平衡含水率值 ,% 。

$$\mu = \exp[-\delta t/(2\tau)],$$
  

$$\tau = \frac{-\delta t}{2\ln\mu} \circ$$
(5)

以误差平方和 SSE =  $\sum_{i=1}^{n} (M_i - \hat{M}_i)^2$  为目标函数 ,按目标函数值最小为约束做非线性估计 ,估计出  $\mu$  和 *E* 中所含平衡含水率响应函数的参数(对于 Nelson 模型 ,为 *a* ,*b* )。其中  $M_i$  为实测含水率 ,% ;  $\hat{M}_i$  为预测含水率 ,% ; *n* 为样本数量。

1.2 可燃物含水率动态变化的测定

2008 年 3 月在东北林业大学实验林场采集兴 安落叶松(*Larix gmelinii*)枯枝(长度5 cm,直径分别 为 0.5,1.0和1.5 cm,以下简称 $D_{0.5}$ , $D_{1.0}$ , $D_{1.5}$ ),每 种尺寸样品取 10个重复,共 30个样品。所有枯枝 均末腐烂。在实验室内,1)按直径由小到大依次为 30个样品编号。2)将可燃物放入 105 °C的烘干箱 中连续烘干约8h至恒质量,用电子天平分别记录 每个样品的绝干质量(g)。3)将试验样品完全浸泡 在水中1h。4)将浸泡后的样品从水中取出,沥去 表面水分,在空气中放置至表面无水。5)每40 min 称取试验样品质量,同步测定温度、湿度,每天重复 15次。6)每进行完1天试验后,重复步骤 3)A), 5),共进行 15天。

## 1.3 数据分析

由于平衡含水率响应模型可能对结果有影响, 因此,在方法的验证上就要考虑不同的平衡含水率 模型。在现有的4种平衡含水率模型中,Simard 模 型是美国国家火险等级系统中采用的模型,研究表 明(刘曦等,2007),该模型拟合效果要比 Nelson 模 型效果好,而其他2种模型的预测效果都不如 Simard 模型和 Nelson 模型。因此,在研究平衡含水 率响应模型对方法效果的影响时,只采用 Simard 模 型和 Nelson 模型。

1.3.1 基于 Nelson 模型的直接估计法的验证 氛 一个建模数据中需要2个连续观测的可燃物含水率 数据,每天连续观测15次,能够形成14个建模数 据。为验证模型,每个可燃物样品分别取14,28, 42 56 70 84 98 和 112 个数据作建模数据,平衡含 水率模型分别用 Nelson 模型,用 Catchpole 等 (2001)方法估计出时滞和平衡含水率,分别对直径 为 $D_{0.5}$ , $D_{1.0}$ 和 $D_{1.5}$ 的10个样品的参数估计值的平 均值、最大值和最小值对建模样本数作图,观察参数 估计值随样本数的变化。对各个可燃物样品,用其 估计的参数对其余多组含水率数据按天数分别验 证,计算含水率预测的误差,计算多次验证的含水率 误差的均值和变异系数,然后计算不同直径的10个 样品含水率预测误差的均值和变异系数,用单个样 品和直径平均的均值和变异系数对建模样本数作

图 ,分析预测误差与样本数的关系和模型的稳健性。 其中,误差采用均方根误差 RMSE, RMSE =  $\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (M_i - \hat{M}_i)^2 / n}$ ,  $M_i$ 为实测含水率,%; $\hat{M}_i$ 为 $\hat{M}_i$ 为(0.03 + 0.262 6H - 0.001 04HT)

$$E = \{1.76 + 0.160 \ 1H - 0.026 \ 6Z\}$$

l<sub>21.06</sub> - 0.494 4*H* + 0.005 565*H*<sup>2</sup> - 0.000 63*HT* 式中符号意义同前。 时满

用 Simard 模型代替上述方法中的 Nelson 模型, 与上同法,分析比较建模样本数不同时含水率预测 效果的差异,并将基于2种平衡含水率模型的模拟 效果进行对比。

上述统计利用 SPSS 13.0 统计软件和 Excel 软件完成。

2 结果与分析

#### 2.1 基于 Nelson 模型的方法验证

图 1 表明,建模样本数为 14 的不同直径可燃物 的平均时滞估计值为 :1.5 h( *D*<sub>0.5</sub> ),1.6 h( *D*<sub>1.0</sub> )和 2.0 h( *D*<sub>1.5</sub> )。随建模样本数增大,同一直径可燃物 预测含水率 ,% ;变异系数  $CV = \sigma/m$  ,  $\sigma$  为含水率 预测误差的标准差 ,m 为误差的平均值 ,%。

1.3.2 基于 Simard 模型的直接估计法有效性分析 Simard 模型为:

if 
$$H < 10$$
  
if  $10 \le H < 50$ , (6)

if  $50 \leq H$ 

时滞估计值略有增加,在样本数84以后,各直径等级可燃物的时滞为:1.3~1.7h(*D*<sub>0.5</sub>),1.4~1.8h (*D*<sub>1.0</sub>)和1.5~2.4h(*D*<sub>1.5</sub>)。

图 2 表明,当建模样本数从 14 增加到 28 个以 上时,参数 *a* 的估计逐渐稳定,波动范围为 :0.27 ~ 0.34(*D*<sub>0.5</sub>),0.30 ~ 0.50(*D*<sub>1.0</sub>)和 0.34 ~ 0.55 (*D*<sub>1.5</sub>),建模样本数为 84 时,波动范围为 :0.28 ~ 0.37(*D*<sub>0.5</sub>),0.31 ~ 0.47(*D*<sub>1.0</sub>)和 0.35 ~ 0.50 (*D*<sub>1.5</sub>)。

图 3 表明,参数 b 随样本数的变化趋势与参数 a 大致相同,样本数 28 以后,估计稳定在:-0.15 ~ -0.10(D<sub>0.5</sub>), -0.22 ~ -0.13(D<sub>1.0</sub>)和 -0.25 ~ -0.1(D<sub>1.5</sub>)。



#### 图 1 不同建模样本数的时滞估计值

Fig. 1 Estimated time lag by models fitted by different sample size

枯枝直径 Diameter of dead twig:a.0.5 cm,b.1.0 cm,c.1.5 cm。下同 The same below.

中间为均值 ,上、下为最大、最小值 ,下同。 Top line : maximum ; bottom line : minimum line ; middle : mean ; the same below.





Fig. 2 Parameter *a* estimates model fitted to different sample size



#### 图 3 不同建模样本数时的参数 b 估计值

Fig. 3 Parameter b estimates model fitted to different sample size

由图 4 可见 ,3 种可燃物含水率预测误差的变 化趋势相似,建模样本数为 14 时,误差为 1.5% ( $D_{0.5}$ ) 2.5%( $D_{1.0}$ )和 2%( $D_{1.5}$ );样本数 28 时,误 差大幅下降,范围为:0.28%~0.57%( $D_{0.5}$ ), 0.44%~1.00%( $D_{1.0}$ ),0.31%~0.77%( $D_{1.5}$ ),均 在 0.1%以内。而后下降趋势趋缓,样本数 84 以 后,误差稳定在:0.20%~0.36%( $D_{0.5}$ ),0.27%~ 0.53%( $D_{1.0}$ ),0.23%~0.39%( $D_{1.5}$ )。 图 5 表明,同直径 10 个可燃物样品的误差均值 在建模样本数 14 时比较大,都超过 2%,但样本数 28 时,减至 0.4%(*D*<sub>0.5</sub>),0.58%(*D*<sub>1.0</sub>)和 0.46% (*D*<sub>1.5</sub>),而后有所减少,但趋势趋缓,当建模样本数 增至 84 时,误差均值为:0.29%(*D*<sub>0.5</sub>),0.38% (*D*<sub>1.0</sub>),0.31%(*D*<sub>1.5</sub>)。建模样本数再增加,误差变 化不大。



图 4 单个可燃物样品多次预测误差均值







Fig. 5 Mean value of prediction errors of fuels with the same diameter

图 6 表明,单个可燃物样品含水率预测误差的 变异系数变化趋势多数相同,个别有所不同(如样 品 5 和 6 )。样本数 28 时,大部分变异系数有显著 增加,波动范围为:0.4~0.56(*D*<sub>0.5</sub>),0.29~0.57 (*D*<sub>1.0</sub>) 0.31~0.65(*D*<sub>1.5</sub>),即误差分布在其均值的 0.4~0.56 倍(*D*<sub>0.5</sub>) 0.29~0.57 倍(*D*<sub>1.0</sub>) 0.31~ 0.65 倍(*D*<sub>1.5</sub>)范围内。这之后,随样本数加大 3 者 误差变异系数开始缓慢回落,逐渐接近初始值,即误 差分布更加集中,稳定度更高,见图 6。

从图 7 可见 ,3 种直径的可燃物的误差变异系

数均值在建模数据样本数 28 时最大,分别为:0.2 (*D*<sub>0.5</sub>) 0.17(*D*<sub>1.0</sub>) 0.39(*D*<sub>1.5</sub>),而后随样本数增加 而减少。结合图 4~6,当建模样本数小于 84 时,一 些可燃物样品的含水率预测误差较大,或者不同样 品之间的误差变化较大,当建模样本数为 84 时,各 可燃物的含水率预测误差稳定在 0.3% 左右,且同 样直径的不同样品之间的变化也很小,这说明建模 样本数为 84 以上时,该方法的预测很稳定。在今后 的应用中,建模数据至少要 84 个以上。

图 8 给出建模样本数为 84 时不同直径可燃物





Fig. 6 Coefficient of variance of prediction errors of single fuel sample





Fig. 7 Coefficient of variance of prediction errors of fuels with same diameter



图 8 样本数 84 时的含水率预测误差分布

Fig. 8 Distribution of fuel moisture predicting errors model fitted to data length of 84

的预测误差分布。此时,含水率预测误差小于 Catchpole等(2001)的结果(表1),尤其对于直径 0.5 cm和1.5 cm的枯枝。由误差分布图8可知,可 燃物含水率预测误差小于0.7%的频率为100% ( $D_{0.5}$ )97%( $D_{1.0}$ ),100%( $D_{1.5}$ )。可见大部分误差 在0.7%以内,只有直径1.0 cm可燃物有少部分高 于0.7%,最大可达到0.91%。误差小于0.4%的频 率为78%( $D_{0.5}$ ),60%( $D_{1.0}$ ),77%( $D_{1.5}$ )。因此, 误差在不同样品之间的分布是合理的,使用此方法 的预测结果表明,多点均值具有地区代表性,建模样 本数为14 时偏差最大,该方法有较强的适用性。

## 表 1 文献(Catchpole et al. 2001) 与本文含水率 预测误差(样本数 84) 比较

#### Tab.1 Difference of moisture predicting errors between

Catchpole et al. (2001) and this paper(Sample size of 84)

可燃物类型 Fuel type	均方根误差 RMSE/%	可燃物类型 Fuel type	均方根误差 RMSE/%
小桉树空中可燃物 Mallee aerial fuel	0.9	1	0.3
小桉树腐殖质 Mallee litter samples	1.6	2	0.4
扣子草沼泽 Buttongrass moorland	2.5	3	0.3



Fig. 9 Mean value of prediction errors of single fuel sample

2.2 基于 Simard 模型的直接估计法的有效性 分析

由图 9 知,基于 Simard 模型的含水率预测误差 和 Nelson(1984)模型有相似的变化趋势,建模样本 数为 14 时误差为  $3.0\%(D_{0.5})$ , $3.0\%(D_{1.0})$ 和  $2.5\%(D_{1.5})$ ,然后随建模样本数增加而下降(样本 数 28 时个别样本误差有小幅增大),建模样本数 84 以后,误差也开始稳定,波动范围为: $0.19\% \sim$  $0.37\%(D_{0.5})$ , $0.30\% \sim 0.67\%(D_{1.0})$ , $0.29\% \sim$  $0.42\%(D_{1.5})$ 。

图 10 表明,基于 Simard 模型的同直径可燃物 样品误差均值在建模样本数为 14 时较大,为 3.0% (*D*<sub>0.5</sub>),2.9%(*D*<sub>1.0</sub>)和 2.3%(*D*<sub>1.5</sub>)随样本数增加 而下降,样本数 84 以后,误差均值稳定在 0.28% (*D*<sub>0.5</sub>),0.39%(*D*<sub>1.0</sub>)和 0.36%(*D*<sub>1.5</sub>)。可见,样本 数量少时,基于 Simard(1968)模型的误差均值高于 Nelson 模型,样本数超过 84 以后 2 者差别不明显。

图 11 表明,基于 Simard 模型的单个可燃物样 品含水率预测误差的变异系数变化趋势多数相同, 个别有所不同(如样品 5 和 6)。建模样本数 28 时, 大部分变异系数有显著增加,波动范围为 :0.48 ~ 0.68 ( $D_{0.5}$ ), 0.51 ~ 0.71 ( $D_{1.0}$ ), 0.54 ~ 0.69 ( $D_{1.5}$ ),即误差分布在其均值的 0.48 ~ 0.68 倍 ( $D_{0.5}$ ), 0.51 ~ 0.71 倍( $D_{1.0}$ ), 0.54 ~ 0.69 倍 ( $D_{1.5}$ )范围内。这之后,随样本数加大,误差分布更 加集中,稳定度更好。

从图 12 可见,基于 Simard(1968)模型的 3 种直径的可燃物的误差变异系数均值在建模数据样本数 28 时最大,分别为:0.85(*D*<sub>0.5</sub>),1.1(*D*<sub>1.0</sub>),0.86(*D*<sub>1.5</sub>),而后随样本数增加而减少。当建模样本数小于 84 时 基于 Simard(1968)模型的变异系数均值高于 Nelson(1984)模型,超过 84 时 2 者差别不明显。



————基于 Nelson(1984)模型 Based on Simard(1984)model ;———基于 Simard(1968)模型 Based on Simard(1968)model

图 10 同直径可燃物样品多次预测误差均值 Fig. 10 Mean value of prediction errors of fuels with same diameter









—△—基于 Nelson( 1984 )模型 Based on Nelson( 1984 )model ;—▲—基于 Simard( 1968 )模型 Based on Simard( 1968 )model 图 12 同直径可燃物样品多次预测误差变异系数

Fig. 12 Coefficient of variance of prediction errors of fuels with same diameter

图 13 给出建模样本数 84 时的不同直径可燃物

的含水率预测误差分布。此时,基于 Simard 模型的

含水率预测误差小于 0.7% 的频率为 :100%(*D*<sub>0.5</sub>), 96%(*D*<sub>1.0</sub>), 100%(*D*<sub>1.5</sub>)。可知大部分误差在 0.7%以内,只有直径 1.0 cm 可燃物有少部分高于 0.7%,最大可达到 1.0%。变异系数为:0.36 (*D*<sub>0.5</sub>), 0.40(*D*<sub>1.0</sub>)和 0.41(*D*<sub>1.5</sub>),误差小于 0.4% 的频率为:89%(D<sub>0.5</sub>),67%(D<sub>1.0</sub>),66%(D<sub>1.5</sub>)。 综合上述分析,当建模样本数较少时,基于 Simard 模型的直接估计法不如基于 Nelson 模型的效果好, 但当建模样本数超过 84 时,这 2 种的预测精度和适 用性没有显著差异。



图 13 样本数 84 时的含水率预测误差分布

Fig. 13 Distribution of fuel moisture predicting errors model fitted to data length of 84

# 3 结论与讨论

本研究表明:1)基于 Nelson 模型的时滞和平衡 含水率直接估计法在建模样本数较大时(至少84 个),时滞和平衡含水率响应函数的参数估计都比 较稳健,且可燃物含水率的误差较小,说明该方法在 利用观测数据直接预测含水率时具有很强的适用 性,方法有效。但此时建模样本数要较大,建议80 个以上。在误差标准要求不高时(如3%),建模样 本数取30 左右也可适用。

2)采用 Simard 模型直接估计可燃物时滞和平 衡含水率时,在建模样本数较少时,其预测效果不如 Nelson 模型,但当建模样本数较多(超过 84)时,2 个模型预测效果没有显著差别。

需要讨论的是,本研究以方法验证为主要目的, 本研究采用简单的、单一的可燃物小枝,所得结论有 一定的理论价值。但野外可燃物结构十分复杂,持 别是可燃物的微观结构、化学组成,包括表面蜡质、 腐烂程度也影响可燃物的时滞和平衡含水率对环境 因子的响应(Van Wagner, 1969; Viney *et al.*, 1989; Anderson, 1990),这也是同一直径不同样本之间的 参数估计差异和预测误差差异的一个原因。这些对 直接估计法是否有一定的影响需要进一步研究。

2 种平衡含水率模型对照结果表明,样本容量 一定时,增加参数个数,将减小模型回归自由度,使 参数估计稳定度降低,从而影响模型预测精度,参数 个数、初始值和样本数等可能存在交互影响。这种 交互作用需要进一步研究。

#### 参考文献

- 邸雪颖. 1993. 林火预测预报. 哈尔滨:东北林业大学出版 社,159-176.
- 何忠秋,张成钢,牛永杰. 1996.森林可燃物湿度研究综述.世界林 业研究(5):26-29.
- 胡海清. 2005. 林火生态与管理. 北京: 中国林业出版社.
- 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.
- 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.
- 刘 曦,金 森.2007. 平衡含水率法预测死可燃物含水率的研究进展.林业科学 43(12):126-127.
- 刘 曦.2007.温度和湿度对可燃物平衡含水率的影响研究.东北林 业大学硕士学位论文.
- 王会研,李 亮,金 森,等.2008. 一种新的可燃物含水率预测方法 介绍.森林防火(4):11-12
- 王瑞军,于建军,郑春艳. 1997. 森林可燃物含水率预测及燃烧性等 级划分.森林防火(2):16-17.
- 郑焕能,邸雪颖,胡海清,等.1992.森林防火.哈尔滨:东北林业大学 出版社,99-100.
- Anderson H E. 1964. Mechanisms of fire spread, research progress report No. 1. United States Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper INT-8. Intermountain Research Station, Ogden, Utah 20.
- Anderson H E , Schuetle R D , Mutch R W. 1978. Timelag and equilibrium maistare content of ponder pine needles. Ogden : USDA Internt For and Range Exe Stn , 8 – 14.
- Anderson H E. 1990. Moisture diffusivity and response time in fine forest fuels. Canadian Journal of Forest Research , 20:315-325.
- Catchpole E A, Catchpole W R, Viney N R. 2001. Estimating fuel response time and predicting fuel moisture content from field data. International Journal of Wildland Fire, 10:215-222.

- Chuvieco E P , Aguado I P ,Dimitrakopoulos A P. 2004. Conversion of fuel moisture content values to ignition potential for integrated fire danger assessment. Canadian Journal of Forest Research ,34(11): 2284 - 2293.
- Nelson R M A. 1984. Method for describing equilibrium moisture content of forest fuels. Canadian Journal of Forest Research , 14:597-600.
- Nelson R M. 2000. Prediction of diurnal change in 10-hour fuel moisture content. Canadian Journal of Forest Research , 30 : 1071 – 1087.
- Rothermel R C , Wilson R A , Morris G A , et al. 1986. Modeling moisture content of fine dead wildland fuels : input to the behave fire prediction system. United States Department of Agriculture , Forest Service , Research Paper INT-359. Intermountain Research Station , Ogden , Utah , 61.
- Simard A J. 1968. The moisture content of forest fuels-1. A review of the basic concepts. Canadian Department of Forest and Rural Development, Forest Fire Research Institute, Information Report FF-X-14, Ottawa, Ontario.
- Van Wagner C E. 1969. Drying rates of some fine forest fuels. Fire Control Notes , 30(4):5-12.
- Viney N R , Hatton T J. 1989. Assessment of existing fine fuel moisture models applied to Eucalyptus litter. Australian Forestry , 52:82-93.
- Viney N R. 1991. A review of fine fuel moisture modelling. International Journal of Wildland Fire , 1 :215 - 234.

(责任编辑 朱乾坤)