

# 美国国家火险等级系统原理及应用

韩焱红, 苗蕾, 赵鲁强, 杨晓丹, 吴昊\*

中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

**摘要** 介绍了美国国家火险等级系统(NFDRS)的发展历程、原理方法、系统结构,指出系统通过考虑不同类型可燃物对火灾发生的贡献,基于燃烧原理和点烧实验建立物理模型,计算输出全面的防火指标,其思路方法适用于气候复杂、植被类型多样的中国。对系统中值得借鉴的可燃物含水率计算、防火指标计算等关键技术进行重点分析,并结合中国火险等级预报业务现状对系统的本地化改进和业务化应用进行了展望。

**关键词** 火险等级系统;防火指标;火险天气;可燃物含水率

森林火灾的发生会严重破坏自然环境和生态平衡,甚至造成森林资源和生命财产等方面的损失。随着中国生态文明建设的不断推进,森林火灾的防御和控制也受到越来越多的重视。1999年,国家林业局与中国气象局正式开展合作,联合启动了全国森林火险气象预报业务;除上海、香港、澳门、台湾外,全国30个省(区、市)气象局先后开展了省级森林火险预报业务。目前,中国在业务中应用的森林火险预报方法主要是从气象因素的角度研究和探讨林火发生规律,根据气象条件与林火统计关系建立适用于当地的森林火险气象预报系统<sup>[1-7]</sup>。而林火的发生发展不仅受气象条件影响,还需要综合考虑可燃物、地形、火源等多方面因素,基于燃烧机理建立适用于全国的火险等级预报系

统可以更好地模拟火灾发生发展特征,为林火防控工作提供统一、规范的防火指标和客观的预测结果。

在发达国家的森林火灾预警和管控工作中,森林火险预报系统已成为指导林火防控工作的有力工具,并逐渐向提高预测预警精度、加快信息传递速度和便于应用的方向发展。美国国家火险等级系统(NFDRS)和加拿大森林火险等级系统(CFFDRS)是目前世界上最先进、应用最广泛的火险系统。CFFDRS是在大量点烧实验的基础上建立的经验性模型,根据站点气象观测结果预测火险天气、火发生和火行为<sup>[8-11]</sup>,系统更适用于森林可燃物分布均匀、林区面积较小的地区。NFDRS是综合考虑气象、可燃物和地形等因素的影响,基于燃烧

收稿日期:2018-03-28;修回日期:2019-02-25

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406034)

作者简介:韩焱红,工程师,研究方向为应用气象学,电子信箱:hanyh@cma.gov.cn;吴昊(通信作者),高级工程师,研究方向为应用气象学,电子信箱:wuhao@cma.gov.cn

引用格式:韩焱红,苗蕾,赵鲁强,等.美国国家火险等级系统原理及应用[J].科技导报,2019,37(20):76-83;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2019.20.008

原理和点烧实验建立的物理模型<sup>[12-14]</sup>,考虑了不同类型可燃物对火灾发生的贡献,计算输出包括火发生指标、燃烧指标、火负荷指标等全面的防火指标,更适用于中国这样幅员辽阔、森林植被类型多样、气候复杂的国家<sup>[15]</sup>。

本文介绍美国国家火险等级系统的发展历程、原理方法、系统结构,对系统中值得借鉴的关键技术进行重点分析,结合中国火险等级预报业务现状展望系统的本地化改进和业务化应用。

## 1 美国森林火险系统发展历程

### 1.1 起步阶段

美国森林火险预报研究始于20世纪初。1910年,美国华盛顿州东北部、爱达荷州北部和蒙大拿州西部地区相继发生了毁灭性的森林大火,300万亩林地被吞噬,78名消防员牺牲。此次大火在美国森林火灾研究和森林消防法规体系建设中具有标志性的意义,唤起了政府部门对火险研究的重视<sup>[16]</sup>。

1911年美国林务局在爱德华州北部建立了林业试验站,以此来满足开展森林火灾研究的需求。1925年,美国开始系统性开展林火预报研究工作,其中代表人物Harry Gisborne取得了一系列开创性的研究成果<sup>[17]</sup>:研制出由4个直径为1.27 cm的黄松木枝条组装的可燃物湿度棒,通过烘干的方法测量其含水量,从而估测可燃物湿度,该方法仍然作为细小可燃物湿度的标准测量方法延续至今;采用相对湿度、可燃物湿度、风速等作为影响因子,研制出用于实际火险等级预报的火险尺,并先后在美国多地开展应用和改进。

### 1.2 发展阶段

20世纪50年代后期,美国全国共有8个火险等级区域模型<sup>[16]</sup>,各地的火险等级计算方法有所不同。为了进一步规范全国防火指标,促进各地联合开展森林火灾扑救、林火防控管理等工作,在1958年的美国气象年会上,专家学者提出了建立适用于全国的火险等级系统的需求<sup>[13]</sup>。

1968年,美国农业部(USDA)林务局组织成立

了由气象学家Schroeder带领的国家火险等级系统研发应用团队,正式开展基于物理机理的火险等级系统研究,并针对系统的功能、应用特点等制定了一系列目标<sup>[13]</sup>。在此之前,来自蒙大拿州米苏拉火灾实验室的Rothermel把数学和物理学方法结合起来应用在林火实验上,建立了可以量化地描述火灾蔓延和火灾强度的Rothermel火蔓延模型,为国家森林火险等级系统的建立提供了重要的理论基础<sup>[17]</sup>。

1972年,以Deeming为代表的专家研发了第一代美国国家火险等级系统(NFDRS)。系统根据火险天气、地形条件、植被状况等因素,采用诺模图<sup>[18]</sup>等方式,人工计算蔓延组分、能量释放组分、点燃组分以及火发生指标、燃烧指标、火负荷指标。1975年,基于美国农业部柯林斯堡计算机中心(FCCC)建立的美国国家林火信息管理系统(AFFIRMS),进一步实现了NFDRS的自动化计算<sup>[19]</sup>。

1978年,系统从可燃物类型、火源类型、坡度等级、季节变化等方面进行了改进<sup>[13]</sup>;1988年,系统再次进行修正,通过增加了Keetch-Byram干旱指数(KBDI)、季节码和绿度因子等要素的输入,进一步提高了火险等级预报的准确性<sup>[13]</sup>。

目前,NFDRS在天气信息管理系统(WIMS)、Fire Weather Plus and Weather Pro、Fire Family Plus等系统的支撑下,实现了数据传输、自动计算和产品释用<sup>[18]</sup>。用户可以在美国国家跨部门消防中心(NIFC)、美国国家林业局(USFS)、美国国家海洋和大气局(NOAA)等部门网站查询过去、当前以及未来一段时间内的火险等级、可燃物湿度、KBDI干旱指数、火行为要素、防火指标等一系列火险评估产品。

## 2 NFDRS原理与方法

NFDRS是综合考虑气象、可燃物和地形等因素的影响,基于燃烧原理和点烧实验建立的物理模型。NFDRS认为可燃物的状态包括可燃物含水率、可燃物载量、厚度、密度及其他理化性质是评估火险等级的重要基础。系统基于平衡含水率方法

建立可燃物模型,计算可燃物含水率;根据可燃物含水率对火行为的贡献,采用Rothermel火蔓延模型计算火行为特征要素;在此基础上,计算并输出表征火灾发生可能性、火灾控制难易程度和火险等级的一系列防火指标。

为使系统可广泛应用于美国各地,根据美国森林资源分布情况,NFDRS选取了具有代表性的20个可燃物类型(表1),每个类型都有一套相应的物理参数,包括可燃物表面积体积比、可燃物载量、可燃物床层高度、熄灭含水率、发热量等,从而建立20个可燃物模型,为火蔓延模型提供火行为参数。

表1 美国国家火险等级系统可燃物类型  
Table 1 Fuel types in NFDRS

可燃物类型编号	描述
1	一年生草本植物
2	多年生草本植物
3	茅草或芦苇
4	林冠稀疏草地
5	南方灌木
6	灌木蒿丛林
7	成熟的榲树林
8	灌木丛
9	落叶阔叶林
10	南方种植园
11	常绿阔叶林
12	美国西部长针叶林
13	重度砍伐过的林地
14	中度砍伐过的林地
15	轻度砍伐过的林地
16	美国东南部浅沼泽地
17	浓密短针松林
18	浓密短针松林(正常死亡)
19	浓密短针松林(大量死亡)
20	阿拉斯加黑云杉

另外,考虑到不同气候条件下,可燃物的生长特性也有所不同,NFDRS将美国划分为4个气候区(表2),以表示不同的干旱程度。系统根据温度、纬度、水分对植物生长期的影响,对各气候区的可燃物生长周期和初始含水率等参数进行设定。不同地区应用NFDRS时,可根据当地的可燃物类型和所属的气候区进行可燃物参数和气候类型参数

的设置,同时通过调整季节码和绿度因子等参数使系统计算结果更好地反映当地条件和火险状况。

表2 美国国家火险等级系统气候类型  
Table 2 Climate classes in NFDRS

气候类型编号	描述
1	干旱、半干旱
2	半湿润(夏季雨量不足)
3	半湿润(全年雨量充沛)、湿润
4	潮湿

## 2.1 可燃物含水率的计算

可燃物含水率是研究和预测林火能否发生并蔓延成灾的重要因子,也是决定林火蔓延速度、能量释放和扑火难易程度的重要因子。NFDRS中将可燃物分为两大类型:活可燃物和死可燃物。活可燃物包括草本可燃物和木本可燃物,死可燃物按照含水率对环境因子的响应速率将分为1时、10时、100时、1000时时滞死可燃物。

### 2.1.1 死可燃物含水率

死可燃物含水率变化仅受温度、相对湿度等气象条件的影响。NFDRS以平衡含水率方法为理论基础,采用统计模型计算死可燃物含水率。平衡含水率是指在一定的温度、湿度条件下,某一可燃物无限长时间放置后可燃物的含水率;时滞则定义为可燃物含水率与初始含水率的差值达到初始含水率与平衡含水率之间差值的 $(1-e^{-1})$ 所需的时间<sup>[19-20]</sup>。NFDRS将温度27℃、相对湿度20%条件下的时滞定义为标准时滞。在温度、湿度恒定的条件下,死可燃物的含水率变化可用下式描述

$$M = E + (M_0 - E)e^{-t/\tau} \quad (1)$$

式中, $E$ 为平衡含水率, $t$ 为时间, $\tau$ 为时滞, $M_0$ 为可燃物初始含水率, $M$ 为 $t$ 时刻的可燃物含水率。如果确定了死可燃物的时滞和平衡含水率,根据式(1)即可预测任意时刻的可燃物含水率。由于数据采集限制,实际应用中常采用式(1)的离散形式进行计算<sup>[21]</sup>。NFDRS中采用Fosberg等<sup>[22]</sup>基于可燃物含水率的历史记录建立的统计模型,根据平衡含水率分别计算1时、10时、100时、1000时时滞死可燃物含水率。

1时时滞死可燃物为直径小于0.6 cm的枯枝以及枯草、苔藓、地衣、落叶等林内上层可燃物<sup>[6]</sup>。其含水率计算方法参考式(2),式中 $M_1$ 为1时时滞死可燃物含水率, $E$ 为平衡含水率。

$$M_1 = 1.03E \quad (2)$$

10时时滞死可燃物为直径在0.6~2.5 cm的枯枝<sup>[6]</sup>。其含水率计算方法参考式(3),式中 $M_{10}$ 为10时时滞死可燃物含水率, $E$ 为平衡含水率。

$$M_{10} = 1.28E \quad (3)$$

100时时滞死可燃物为直径在2.5~7.6 cm的枯枝<sup>[6]</sup>。其含水率计算方法是首先分别利用日最高气温、最低相对湿度和最低气温、最高相对湿度计算得到最小平衡含水率 $E_{\min}$ 和最大平衡含水率 $E_{\max}$ ;然后根据式(4)计算得到加权平均平衡含水率 $\bar{E}$ ,式中 $n$ 为日长(白天持续时间);再利用加权平均平衡含水率 $\bar{E}$ 和24小时内的降雨时长 $p_d$ ,根据式(5)计算平衡含水率24小时边界条件 $D_{24}$ ;在此基础上,利用边界条件 $D_{24}$ 和前一日的100时时滞死可燃物含水率 $M_{y100}$ ,根据式(6)计算当日100时时滞死可燃物含水率 $M_{100}$ 。

$$\bar{E} = [(n)E_{\min} + (24 - n)E_{\max}] / 24 \quad (4)$$

$$D_{24} = [(24 - p_d)\bar{E} + (0.5p_d + 41)p_d] / 24 \quad (5)$$

$$M_{100} = M_{y100} + (D_{24} - M_{y100})(1 - 0.87e^{-0.24}) \quad (6)$$

1000时时滞死可燃物为直径在7.6~20.3 cm的枯枝<sup>[6]</sup>。其含水率计算形式与100时时滞死可燃物含水率的计算形式相同,可燃物含水率都是日长、日最高最低气温、日最大最小相对湿度和降水时长的函数,但1000时时滞死可燃物含水率的边界条件采用的是7天平均边界条件而非24小时边界条件。具体计算方法参考式(7),式中 $M_{1000}$ 为1000时时滞死可燃物含水率, $M_{y1000}$ 为前一日的1000时时滞死可燃物含水率, $D_{168}$ 为过去7天(168小时)的平均边界条件。

$$M_{1000} = M_{y1000} + (M_{y1000} - D_{168})(1 - 0.82e^{-0.168}) \quad (7)$$

### 2.1.2 活可燃物含水率

活可燃物含水率变化受气象条件影响较小,主要与植物生长过程有关。由于活可燃物在不同生长阶段其含水率对环境的响应有所不同,NFDRS

中针对草本可燃物含水率和木本可燃物含水率的计算分别按照5个阶段和4个阶段进行。

#### 1) 草本可燃物含水率。

(1) 返青前期。系统假设处于返青前期的草本可燃物可全部返青,该阶段的草本可燃物含水率( $M_{hb}$ )近似等于1时时滞死可燃物含水率( $M_1$ )。

$$M_{hb} = M_1 \quad (8)$$

(2) 返青期。返青期的草本可燃物含水率是在1时时滞死可燃物含水率的基础上逐渐增长的,其范围为30%~250%。为了使系统广泛适用于美国不同地区,系统中活可燃物的返青期长度按照干旱到潮湿4个等级的气候类型由7天线性增长到28天。其计算方法参考式(9)

$$M_{hb} = M_1 + gu[(a_h + b_h X_{1000}) - M_1] \quad (9)$$

式中, $M_{hb}$ 、 $M_1$ 的含义同上, $gu$ 为已过去的返青期占整个返青期长度的比例, $a_h$ 和 $b_h$ 为一年生或多年生草本可燃物含水率的计算参数, $X_{1000}$ 是根据1000时时滞死可燃物含水率的24小时变化以及日平均气温推算得到的活可燃物含水率。

(3) 生长期。返青期结束后,植物进入正常生长阶段,即式(9)中 $gu=1$ 。该阶段可燃物含水率的变化范围为120%~250%,计算方法参考式(10),式中各变量含义同上。

$$M_{hb} = a_h + b_h X_{1000} \quad (10)$$

(4) 过渡期。草本植物在生长期结束后,活可燃物含水率逐渐减少并在30%~120%之间变化,并采用式(10)进行计算。

(5) 干枯期。当草本可燃物含水率下降到30%以下时,植物进入干枯期,此时,一年生草本可燃物含水率可按照1时时滞死可燃物含水率计算;多年生草本可燃物含水率则参考式(10)计算。

#### 2) 木本可燃物含水率。

(1) 返青前期。系统假定木本灌木植物在返青前期处于休眠状态,其可燃物含水率保持不变。返青前期的可燃物含水率按照干旱到潮湿4个等级的气候类型分别定义为50%、60%、70%和80%。

(2) 返青期。返青期的木本可燃物含水率是在返青前期可燃物含水率的基础上逐渐增加,其计算方法参考式(11),式中 $M_w$ 为木本可燃物含水率,

$M_{w0}$ 为返青前期木本可燃物含水率,为已过去的返青期占整个返青期长度的比例, $a_w$ 和 $b_w$ 为木本可燃物含水率的计算参数, $gu$ 和 $M_{1000}$ 意义同上。

$$M_w = M_{w0} + gu[(a_w + b_w M_{1000}) - M_{w0}] \quad (11)$$

(3) 生长期。返青期结束后,植物进入正常生长阶段,即 $gu=1$ 。该阶段可燃物含水率不能超过200%,计算方法参考式(12),式中各变量含义同上。

$$M_w = a_w + b_w M_{1000} \quad (12)$$

(4) 干枯期。木本可燃物生长期结束后再次进入休眠状态即干枯期,其可燃物含水率与返青前期可燃物含水率相同。

## 2.2 防火指标的计算

NFDRS采用能量释放组分(ERC)、蔓延组分(SC)、点燃组分(IC)等要素描述火行为特征。其中,ERC描述火头在单位面积上潜在的能量释放,SC描述火头向前蔓延的速率,二者都是基于Rothermel林火蔓延模型计算得到,IC描述火发生的难易程度,是由点燃概率和蔓延组分计算得到。Rothermel模型<sup>[23]</sup>是以林火实验为依据、以燃烧物理学为理论基础,基于能量守恒定律建立的研究燃烧蔓延的热力和动力模型,是NFDRS模拟火行为特征的重要理论基础。根据上述火行为要素,NFDRS计算并输出综合评估火险、火灾发生、控火难易程度的3个防火指标:燃烧指标、火发生指标和火负荷指标。

由于NFDRS中各物理量的单位均采用的是英制单位,为保持其方法计算式的一致性,文章中未进行单位转换。在各指标的计算式中,采用的长度单位为英尺(ft),热量单位为英热(Btu),质量单位为磅(lb),时间单位为分钟(min)或秒(s)。

### 2.2.1 燃烧指标

燃烧指标(BI)是评估控制火灾难易程度的一个重要依据<sup>[24]</sup>。BI与火线长度有关,在数值上等于10倍的火线长度( $F_1$ )。而火线长度可采用Byram公式<sup>[13]</sup>进行推算

$$F_1 = j \cdot I^{0.46} \quad (13)$$

式中, $F_1$ 为火线长度(ft); $I$ 为火线强度即单位火线

长度( $\text{Btu} \cdot \text{ft}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ),表示单位时间内释放的热量; $j$ 为经过数学推导得到的计算参数,数值为0.45、单位为 $\text{ft}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Btu}^{-1}$ 。

由于火线强度是蔓延速度和单位面积热量的函数,因此NFDRS中火焰长度可由蔓延组分和能量释放组分获得,具体计算式如下

$$F_1 = j \cdot [(SC/60)(25ERC)]^{0.46} \quad (14)$$

式中, $F_1$ 和 $j$ 含义同上;SC和ERC分别表示采用Rothermel林火蔓延模型计算得到的蔓延组分和能量释放组分。

蔓延组分(SC)表示的是林火蔓延的快慢,其在数值上等于理想状况下的蔓延速率 $R^{[25]}$ 。Rothermel模型以均匀可燃物为基础,将活可燃物、1时、10时和100时时滞死可燃物在火蔓延过程中作为能量的供给和点燃对象,采用体表面积权重反映不同类型可燃物对蔓延的影响,根据林火的热传导方程推导出林火蔓延速率<sup>[26]</sup>。具体计算式为

$$R = \frac{I_r \xi (1 + \phi_w + \phi_s)}{P_b \varepsilon Q_{ig}} \quad (15)$$

式中, $R$ 为林火蔓延速率,ft/min; $I_r$ 为火焰区反应强度, $\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{min})$ ; $\xi$ 为传播的热通量与反应强度之比(无因次量); $\phi_w$ 为风速因子(无因次量); $\phi_s$ 为坡度因子(无因次量); $P_b$ 为可燃物层的体积密度, $\text{lb}/\text{ft}^3$ ; $\varepsilon$ 为有效能量(无因次量); $Q_{ig}$ 为引燃热量即烧前预热量, $\text{Btu}/\text{lb}$ 。

能量释放组分(ERC)反映的是燃烧阶段单位面积释放的总能量,与可燃物燃烧的时间和反应的剧烈程度有关。在Rothermel模型中,各类型可燃物都参与了能量释放组分的计算,并采用可燃物载量作为权重因子来强调不同类型在能量释放过程中的作用。具体计算式为

$$ERC = k I_{rc} T_r \quad (16)$$

式中, $k$ 为经过数学推导的尺度因子,数值为0.04,单位为 $\text{ft}^2/\text{Btu}$ ; $I_{rc}$ 为基于可燃物载量的加权火焰区反应强度, $\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{min})$ ; $T_r$ 为燃烧持续时间,min。

### 2.2.2 火发生指标

火发生指标表示的是在一个相当均匀的面积上可能发生的火灾次数<sup>[24]</sup>。NFDRS中火发生指标

分为雷击火发生指标( $LOI$ )和人为火发生指标( $MCOI$ ),二者都是基于点燃组分( $IC$ )计算得到的。其中, $LOI$ 是根据点燃组分和闪电风险计算的每日可能发生的闪电引发林火的次数; $MCOI$ 是根据点燃组分和人为风险计算的每日可能发生的人为引发的林火次数,其计算式如下

$$LOI = IC \cdot R_l \quad (17)$$

$$MCOI = IC \cdot R_{mc} \quad (18)$$

式中, $IC$ 为点燃组分; $R_l$ 、 $R_{mc}$ 分别为基于经验模型得到的闪电风险和人为风险,用户可根据当地林火发生规律进行调整。

点燃组分表示的是林火发生的难易程度,它与可燃物类型和可燃物的理化性质有关,是由点燃概率( $P(I)$ )和蔓延组分( $SC$ )以及最大可能蔓延组分( $SC_{max}$ )得到的,具体计算式如下

$$IC = 0.1P(I) \cdot SC_n^{0.5} \quad (19)$$

$$SC_n = 100(SC/SC_{max}) \quad (20)$$

式中, $P(I)$ 表示火源落到可燃物上引发火灾发生的概率,体现火源是否有足够的能量导致起火,其数值范围为0~100; $SC$ 为基于 Rothermel 模型计算的当日蔓延组分; $SC_{max}$ 为当全部火形成可预报火时可燃物模型的蔓延组分; $SC_n$ 为归一化的蔓延组分。

### 2.2.3 火负荷指标

火负荷指标( $FLI$ )是 NFDRS 设计的最终目标,可以计算出接近出现最高火险的时间和火险等级,用于评估总的潜在火灾控制工作的困难程度,指导防火扑火行动计划<sup>[24]</sup>。火负荷指标( $FLI$ )是根据燃烧指标和火发生指标,采用式(21)计算得到。

$$FLI = \sqrt{BI^2 + (MCOI + LOI)^2} / 1.41 \quad (21)$$

式中, $BI$ 、 $MCOI$ 、 $LOI$ 的含义同上,其数值范围都在0~100,参数1.41是用于限制 $FLI$ 最大值为100的标准化因子。

## 3 NFDRS 系统结构

基于上述方法建立的美国国家火险等级系统由输入数据、可燃物湿度计算、火行为要素计算输出、防火指标计算输出等几部分组成,其系统结构

如图1所示,其中虚线箭头表示1988年系统改进增加的内容。

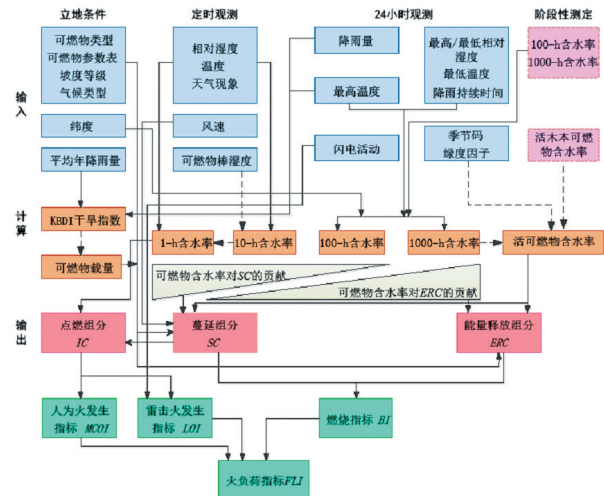


图1 美国国家火险等级系统NFDRS系统结构

Fig. 1 System structure of NFDRS

## 4 NFDRS 系统应用展望

NFDRS 虽然系统结构复杂,但技术路线十分清晰,具有广泛的适用性。系统采用基于物理机理的 Rothermel 模型描述林火蔓延状态、预测火行为要素,可以客观地模拟火险发生、发展的特征,为决策部门做好火险预报预警工作提供科学的预测结果。此外,系统包含了丰富全面的可燃物类型,可以更好地满足森林植被种类多样地区的火险预测需求<sup>[14]</sup>。但实际发生的林火十分复杂,简单的模型并不能完整地描述林火的复杂机理,同时, Rothermel 模型是基于点烧实验得到的物理参数,而受经费、资源等多方面限制,大部分国家、地区都无法充分开展野外点烧实验,在一定程度上影响模型的模拟效果。

整体来看,美国国家火险等级系统 NFDRS 可以很好地预测林火发生、火行为等火险综合指标,为森林火灾防控工作提供全面的指标参考和工作指导。NFDRS 考虑的可燃物类型多样、气候条件复杂,这与中国的森林资源情况和气候条件特征十分相似,其系统框架、可燃物类型的划分、可燃物含

水率的计算、火行为要素和防火指标的计算等都值得中国借鉴。但在借鉴的同时,还需要根据中国林情、植被类型、气候特征、人口资源分布等因素进行大量的本地化改进工作。

气象要素的变化直接影响可燃物湿度的变化和森林火灾发生的可能性,因此,火险天气的监测和预报是火险等级系统的重要支撑。随着地面气象站、气象雷达、卫星的发展和应用,中国已建立了地基、空基、天基相结合,种类齐全、布局合理的气象观测体系。同时,近年来中国数值天气预报水平也得到了迅猛发展,可以实现短、中、长期气象预报和气候预测,预报空间分辨率和准确性也在不断提高。如何在精细化气象预报和地面观测、遥感观测等多源气象监测的基础上,建立适用于中国的国家火险等级系统,满足中国森林火险预报预警和森林防火工作的迫切需求,是当前中国林业、气象部门亟需开展的重要工作。

### 参考文献(References)

- [1] 曾伟, 刘祥凤, 杨龙光. 森林火险预报研究进展[J]. 中国林副特产, 2013(1): 82-84.
- [2] 吕学东, 顾清源, 谌贵珣. 四川省森林火险预报系统[J]. 高原山地气象研究, 2006, 26(3): 23-25.
- [3] 傅泽强, 王玉彬, 王长根. 内蒙古干草原春季火险预报模型的研究[J]. 应用气象学报, 2001, 12(2): 202-209.
- [4] 徐虹, 杨晓鹏, 朱勇, 等. 基于RS和GIS的云南省森林火险预报研究[J]. 福建林业科技, 2007, 34(2): 85-88.
- [5] 付桂琴, 张文宗, 赵春雷, 等. 河北省森林火险预报模式的改进及应用[J]. 干旱气象, 2013, 31(3): 579-583.
- [6] 赵瑶, 舒立福, 杨征夺, 等. 西南林区森林火灾火险预报模型评价研究[J]. 林业机械与木工设备, 2017, 45(5): 15-21.
- [7] 任敏, 钱玉萍. 安徽省森林火灾与火险预报对比分析[J]. 气象, 1996, 22(6): 46-48.
- [8] Stocks B J, 王正非. 加拿大森林火险等级系统概述[J]. 林业科技, 1990(3): 27-30.
- [9] 孙玉成, 马洪伟, 王秀国, 等. 加拿大火险天气指标(FWI)计算的初始化方法和解释[J]. 森林防火, 2003(4): 22.
- [10] 信晓颖, 江洪, 周国模, 等. 加拿大森林火险气候指数系统(FWI)的原理及应用[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(2): 314-318.
- [11] 罗光裕. 加拿大林火行为预报系统进展[J]. 森林防火, 1994(1): 44-46.
- [12] Cohen J D, Deeming J E. The national fire-danger rating system: Basic equations[EB/OL]. (1985-03-01) [2018-03-01]. [https://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw\\_gtr082/psw\\_gtr082.pdf](https://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr082/psw_gtr082.pdf).
- [13] Bradshaw L S, Deeming J E, Burgan R E, et al. The 1978 National Fire-Danger Rating System: Technical Documentation [EB/OL]. (1983-07-01) [2018-03-01]. [https://www.fs.fed.us/rm/pubs\\_int/int\\_gtr169.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr169.pdf).
- [14] 田晓瑞, Douglas J Mcrae, 张有慧. 森林火险等级预报系统评述[J]. 世界林业研究, 2006, 19(2): 39-46.
- [15] 王新岩, 金森. 美国国家火险等级系统中火险系统的原理与方法[J]. 森林防火, 2010(1): 58-62.
- [16] Graham R T, Jain T B, Graham K L, et al. One-hundred years of wildfire research: A Legacy of the Priest River, Deception Creek, and Boise Basin Experimental Forests of Idaho[J]. Electra, 2014, 101(8): 48-55.
- [17] Hardy C E. Fire danger rating in the United States of America: An evolution since 1916[J]. International Journal of Wildland Fire, 2007, 16(2): 217-231.
- [18] Burgan, Cohen, Deeming. Manually calculating fire-danger ratings-1978 national fire-danger rating system[M]. Ogden: Department of Agriculture, 1977: 158-165.
- [19] Paul Schlobohm, Jim Brain. Gaining an Understanding of the National Fire Danger Rating System[R]. Idaho: NIFC, 2002.
- [20] 金森, 姜文娟, 孙玉英. 用时滞和平衡含水率准确预测可燃物含水率的理论算法[J]. 森林防火, 2000(4): 12-14.
- [21] 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): 2.
- [22] Fosberg M A, Deeming J E. Derivation of the 1 and 10 hour timelag fuel moisture calculations for fire danger rating[R]. Fort Collins: USDA Forest Service, 1971.
- [23] Rothermel. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels[R]. Ogden: USDA Forest Service, 1972.
- [24] 赵凤君, 舒立福. 林火气象与预测预警[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [25] 单延龙, 舒立福, 王洪伟, 等. Rothermel火蔓延模型特征参数的解析[J]. 森林防火, 2003(1): 22-25.
- [26] 苗双喜, 黄杨, 张波, 等. 基于Rothermel模型的森林火灾模拟算法的改进[J]. 地理信息世界, 2012, 10(6): 14-21.

## Principle of the US national fire danger rating system and its application prospect

HAN Yanhong, MIAO Lei, ZHAO Luqiang, YANG Xiaodan, WU Hao\*

Public Meteorological Service Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081

**Abstract** Absorbing the advanced experience of forest fire warning and control in the world, establishing the fire risk rating system based on combustion mechanism can further improve the comprehensive ability of forest fire prevention and control in China and reduce the loss of forest resources. Based on National Fire Danger Rating System (NFDRS), the paper introduces the development history, technical method and system structure, argues that NFDRS is a physical model based on combustion mechanism and experiments, considers the contribution of different fuels to fire, calculates and provides comprehensive indexes to facilitate the planning of fire control activities. The structure and method of NFDRS are applicable to China with complex climate and diverse vegetation types. Therefore, the paper discusses the key technologies in the system, such as the calculation of moisture content of combustible and the calculation of fire protection index. By considering the current situation of forest fire prevention in China, the paper proposes the introduction of NFDRS into forest fire management and fire control strategy in China in order to provide references for establishing national fire danger system in China.

**Keywords** fire danger rating system; fire index; fire weather; fuel moisture ●



(责任编辑 傅雪)