

加拿大森林火险气候指数系统(FWI)的原理及应用

信晓颖¹, 江洪^{1,2}, 周国模¹, 余树全¹, 王永和³

(1. 浙江农林大学 国际空间生态与生态系统生态研究中心, 浙江 临安 311300; 2. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093; 3. 加拿大自然资源部 北方林业研究中心, 阿尔伯塔 埃德蒙顿)

摘要: 森林火险等级预报系统对预测预报森林火灾十分重要。加拿大森林火险等级系统(CFFDRS)是当前世界上发展最完善、应用最广泛的系统之一, 是世界上唯一能适应从区域到全球任何尺度的系统, 加拿大森林火险气候指数(FWI)系统是 CFFDRS 的重要组成部分。加拿大火险气候指数系统以时滞-平衡含水率理论为基础, 通过天气条件的变化计算可燃物含水率的变化, 然后根据不同位置或大小的可燃物含水率划分森林潜在火险等级。从 FWI 的发展状况、基本结构、程序, 以及优点和局限性作了简单的描述, 并讨论了如何在基于 FWI 技术的基础上发展中国的森林火险等级系统。图 1 表 1 参 22

关键词: 森林保护学; FWI 系统; 细小可燃物湿度码; 粗腐殖质湿度码; 干旱码; 森林防火; 综述

中图分类号: S762.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2011)02-0314-05

Canadian forest fire weather index (FWI) system: a review

XIN Xiao-ying¹, JIANG Hong^{1,2}, ZHOU Guo-mo¹, YU Shu-quan¹, WANG Yong-he³

(1. International Ecological Research Center, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. International Earth System Scientific Institute, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 3. Northern Forestry Center, Natural Resources of Canada, Edmonton, Alberta, Canada)

Abstract: To forecast forest fires, a forest fire danger rating system is important. The Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS) is currently one of the most widely used and complete systems in the world and is the only system that can adapt to any scale from regional to global levels. Within CFFDRS, the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System is the most important component. FWI, based on a theory utilizing time lag and equilibrium moisture content, calculates changes in fuel moisture according to weather conditions and then determines the potential fire danger rating by location or size of forest fuel. This study provides a simple introduction to development of the FWI system along with its basic structure and programs as well as its strengths and limitations. Developing a forest fire danger rating system for China based on FWI technology is also discussed. [Ch, 1 fig. 1 tab. 22 ref.]

Key words: forest protection; forest fire weather index(FWI) system; fine fuel moisture code (FFMC); duff moisture code (DMC); drought code (DC); forest fire control; review

森林火灾在北方森林、亚热带森林和热带雨林等世界三大主要的生物群区都是主要的灾害之一。由于森林火灾对于生物多样性保护和生态系统可持续性等重要问题的巨大影响, 以及对人类生存与生活的极大危害, 特别是 20 世纪 80 年代以来, 全球气候持续变暖, 林火有上升的趋势, 每年发生的森林火灾

收稿日期: 2010-05-10; 修回日期: 2010-09-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB422207, 2005CB422208); 国家自然科学基金资助项目(40671132); 科技部国际合作项目(200073819); 科技部数据共享平台建设项目(2006DKA32300-08); 科技基础性工作专项(2007FY110300-08); 浙江省重大科技专项(2008C13042)

作者简介: 信晓颖, 从事森林生态模型等研究。E-mail: fengxinzi-z@163.com。通信作者: 江洪, 教授, 博士生导师, 从事生态系统生态学、环境遥感、生态模型与模拟等研究。E-mail: hongjiang.china@gmail.com

都给世界各国造成了巨大的经济损失,使得对于如何预测、防治或减少森林火灾的危害成为许多学科领域共同关注的科学任务。在火灾发生的环境条件中,气候是一个至关重要的因素。燃料类型和可燃物数量对火灾发生和危害也有非常重要的作用。加拿大森林火险等级系统(CFFDRS, Canadian forest fire danger rating system)是当前世界上发展最完善、应用最广泛的系统之一^[1]。加拿大森林火险气候指数系统(FWI, fire weather index)是其重要组成部分^[2-3],该指标体系以时滞-平衡含水率理论为基础,将气象条件和可燃物含水率有机地联系起来,通过天气条件的变化计算可燃物含水率的变化,再根据不同大小或位置的可燃物含水率确定潜在火险等级。由于该系统将火险与可燃物含水率有机结合在一起,使得该系统得到了世界各国森林防火界的普遍认同,许多国家纷纷将它们进行本地化后形成了相似的火险天气系统^[4]。

1 加拿大森林火险气候指数(FWI)系统的发展概况

加拿大火险等级系统的研究最早是从 20 世纪 20 年代开始的。加拿大佩塔瓦瓦森林实验站的研究人员在安大略省的乔克河附近进行气象观测和燃料含水率的研究。在这期间并建立了一些野外试验站,主要目标是通过野外点火试验研究重要的森林可燃物类型、天气要素和可燃物含水率与火行为之间的基本关系。这些野外试验站最初只建在松树林和阔叶林,到 20 世纪 60 年代初从纽芬兰西部到不列颠哥伦比亚省以及纽芬兰北部到西北特区所覆盖的主要森林里都建立了野外试验站。20 世纪 60 年代末,加拿大的林火管理工作更加深入,对地区性的火险等级系统提出了更高的要求,希望不同地区之间能共享资源^[5-6]。根据实际需要,加拿大的林火研究人员开始从事国家火险等级系统的研究。

经过加拿大林业部的许多林火专家的努力,在 1970 年提出了加拿大 FWI,并于 1984 年进行了修订,将原来的英制气候单位变成公制气候单位。FWI 系统把天气和燃料水分以及火险指数结合起来,但是不考虑不同的森林类型。FWI 系统选择的标准森林类型是成熟的班克松 *Pinus banksiana* 和北美印第安松 *Pinus contorta*。在 1987 年, Van Wagner^[7]曾对 FWI 系统做了详细的说明。

FWI 以 3 种森林可燃物的水分含量和风对火行为的影响为基础。该系统由 6 个部分组成:3 个基本的子指数,代表可燃物湿度,包括细小可燃物湿度码(FFMC, fine fuel moisture code),粗腐殖质湿度码(DMC, duff moisture code)和干旱码(DC, drought code);2 个中间子指数,代表可燃物的扩散速率和可燃物的消耗率,即初始蔓延速度(ISI, initial spread)和累积指数(BUI, build up);1 个最终指数,代表火强烈程度,即 FWI。火险气候指数系统的组成元素由每天测量的气温、相对湿度、风速和降水量的气象数据中计算得到。

2 FWI 的基本结构

FWI 包括 6 个部分(图 1)。FWI 系统只需每天的 4 种资料:干球温度、相对湿度、空旷地 10 m 高的风速和地方标准时中午测量的 24 h 的总降水量。FWI 系统的前 3 个指标是可燃物指数,分别代表森林凋落物中不同层的湿度,包括细小可燃物湿度码、粗腐殖质湿度码和干旱码。当天的湿度码的值由当天测量的气象数据值和前一天的湿度码计算得到。每一个湿度码计算的核心是一个简单的水分指数交换模型。不同类型的森林可燃物的干燥速率都不相同,随着每天天气变化,可燃物湿度也发生变化。表 1 给出这 3 种燃料湿度码的属性。系统的后 3 个指标是火行为码,由 3 个湿度码和风速生成,分别代表了森林中的可燃物蔓延速度、有效可燃物数量和火线强度,即初始蔓延速度、累积指数和火险天气指数。

2.1 细小可燃物湿度码 FFMC

在 FWI 系统中,FFMC 代表了森林地被物中干质量为 $0.25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,厚度为 1.2 cm 的枯枝落叶和其他的已固化的细小燃料的含水率。细小可燃物大部分由死的和凋落的针状物、树叶、地衣、苔藓和其他的小的松散的碎片组成。FFMC 是代表细小可燃物的可燃性和易燃性的一个相对简单的指标。FFMC 受温度、降水、相对湿度和风速的影响,FFMC 的值随着燃料含水率的变化而变化,最小值为 0(燃料含水率为 100%),最大值为 101(可燃物的含水率为 0)。FFMC 的值越大表明火险等级越高。FFMC 的核心是一个简单的水分交换的指数模型,即: $m_o = 147.2 \times (101.0 - c_{\text{FFMC}})/(59.5 + c_{\text{FFMC}})$ 。其中 m_o 为前一天的细火燃料的含水率。

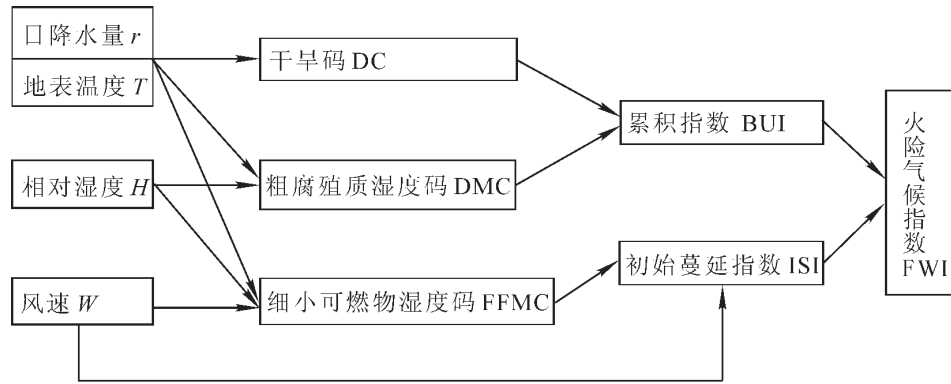


图1 森林火险气候指数(FWI)的结构图

Figure 1 Structure of the fire weather index system

表1 3种燃料湿度码的属性

Table 1 Properties of the three fuel moisture codes

码	时间差/d	水分容量/mm	需要的参量	标准的燃料厚度/cm	标准的燃料负荷/(kg·m ²)
FFMC	2~3	0.6	T, H, W, r	1.2	0.25
DMC	12	15.0	T, H, r	7.0	5.00
DC	52	100.0	T, r	18.0	25.00

说明： T 为温度， H 为相对湿度， W 为风速， r 为降水量。

2.2 粗腐殖质湿度码 DMC

DMC代表森林腐殖质上层的地表可燃物的含水率，即森林地被物最上层厚度约为7 cm，干质量为5.00 kg·m⁻²的有机物质的含水率。DMC可表明中等下层落叶层和中型木质物质的燃料消耗。在FWI系统中DMC的最小值为0(代表地表可燃物的饱和含水率为100%)，最大值没有上界(不过在所有的试验中，最大值很少超过150)。DMC模型也是一个简单的水分交换的指数模型，即： $M_0 = 20.00 + \ln[(c_{DMC} - 244.73) / -43.43]$ 。其中 M_0 表示前一天的地表可燃物的含水率。

2.3 干旱码 DC

DC是一个计算长期干旱对森林可燃物的影响的简单指数。干旱码模型跟其他的干旱模型很相似，如Keeth-Byram Drought Index^[8]和Palmer Drought Index^[9]。干旱码代表了森林地被物中干质量为25.00 kg·m⁻²，厚度为18 cm的深层可燃物和粗死木残体的含水率。对于衡量季节性干旱对森林燃料以及深层下层落叶层和大型段木的影响，干旱码是一个有用的指标。DC的最小值为0，最大值没有上界，但很少超过1000。DC模型的核心也是一个简单的指数模型^[10]。即： $Q_0 = 400 \times e^{-c_{DC}/400}$ 。其中 Q_0 表示前一天干旱码的湿度当量。

2.4 累积指数 BUI

BUI由DMC和DC计算得到，代表了可燃物的湿度等级。虽然BUI的值只是DMC和DC的加权平均值，但是BUI的计算公式是十分复杂的。在FWI系统里，BUI是一个无单位指数，相对代表了森林可燃物潜在燃烧的量。

2.5 初始蔓延指数 ISI

ISI由FFMC和风速计算得到，代表了火灾蔓延的潜在等级。在不同的森林类型中，ISI是表示火灾蔓延等级的很好指标。

2.6 火气候指数 FWI

FWI是FWI系统里的最后一个指数，由ISI和BUI计算得到。FWI是一个地区的火气候条件与可燃物含水率相结合的结果。通过划分不同的FWI数值范围，便能向人们说明火险等级。但是现在火灾管理部门依赖FWI系统中更多的指标来预测火灾，并不是单一的FWI指标^[11]。

3 FWI 的程序描述

目前, FWI 系统使用的计算机程序是来源于 1970 年 Simard 在林火研究协会写的一个程序。Engisch 和 Walker 在 1971 年简化了 Simard 的程序, 用于处理只在一种情况下一个季节的气候数据, 排除了所有不可能的限定。1975 年, Kean 持续修订了此程序, 并加入了几个新的数学公式。

输入的数据必须包括起始月份和月份的天数。例如: 如果计算的时间是从 4 月 1 日到 4 月 18 日, 那么 4 月份会有 18 d 数据, 则须输入 418。然后, 键入日常气候观测数据。顺序如下: 气温($^{\circ}\text{C}$), 相对湿度(%), 风速($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)和降水量(mm)。气温和降水量精确到第一小数位, 相对湿度和风速则须键入观测到的所有数字位。输入气候数据用法定标准单位, 但是输出数据转换为公制单位。3 个燃料湿度码的标准起始值名为 FFMC85, DMC6, C15(包含在程序中), 同时提供了任何需要的起始值以供选择。输出的数据共有 12 栏: 日期数据(月和日), 4 种气候数据, 3 个燃料湿度码(FFMC, DMC, DC), 3 种火行为指数(ISI, BUI, FWI)和日常严重性等级。

4 FWI 的优点和局限性

FWI 系统以时滞—平衡含水率理论为基础, 将气象条件和可燃物含水率有机地联系起来, 通过天气条件的变化计算可燃物含水率的变化, 然后再根据不同大小或位置的可燃物含水率确定潜在火险等级, 是火行为几个方面的一个好的指示器, 而且是用于管理的评价一般火险的最好一种方法^[11]。FWI 系统的输出结果还用来研究发展其他的模型, 如火发生模型^[12]、火灾中林冠烧焦的高度和树木的死亡率模型^[13]、森林地被物燃烧的厚度模型^[14]以及加拿大火灾发生时潜在的燃烧面积^[15]。

目前, 其他一些国家或地区采用该系统的模块或研究思想, 形成了自己的火险等级系统, 如新西兰^[16]、斐济^[17]、墨西哥^[18]、美国的阿拉斯加和佛罗里达^[19]以及欧洲的一些国家^[20]。1999 - 2003 年, 加拿大林务局和东南亚国家共同完成了东南亚森林火险系统研究项目, FWI 技术被用于该区域的火险等级系统中^[21-22]。克罗地亚、智利和美国的密歇根州也对该系统的应用进行了评估。

FWI 是根据点状天气观测结果预测火发生和火行为(如一个林火气象站)。该系统不考虑各气象站之间各气象要素的空间变化。FWI 外部模型和其他系统可以进行内插处理。可燃物和地形的空间变化是一个火管理信息难题, FWI 或其他任何火险等级系统都不容易处理, 除非利用计算机技术把该系统与地理信息系统(GIS, geographic information system)关联, 利用 GIS 存储、更新和显示对林火管理者有用的地理信息。需要强调的是, 获得足够精确和及时的火天气观测和预测信息(最突出的是预测风速)很困难, 这也是任何完全或部分依赖 FWI 的计算机决策支持系统预测火发生和潜在火行为的局限性。

5 讨论

理论上讲, 该系统的原理可以在中国推广。虽然有关参数和技术细节方面需要进行本地校准, 但该系统的火险预测方法要比国内现有的相关方法都科学和先进。因此, 在中国最好是基于 FWI 技术来发展中国的森林火险等级系统。实际上 CFFDRS 系统已经在 20 世纪 80 年代引入中国东北林区, 并促进了该地区林火管理能力的提高。遗憾的是, 该系统自引进后没有得到继续发展与应用^[1]。发展我们国家的森林火险管理系统可以分两步走: 首先可以利用地面观测的火灾发生的气候条件与用样条函数的 ANNUSPLINE 模型、逆向空间查值的 IDW 算法和空间统计的 Kriging 插值函数等 3 种方法产生的空间气象数据结合, 建立日降水量、温度、蒸发和相对湿度、风速、火燃料的湿度、地被物的湿度和干燥植被与土壤可燃物的湿度等指标, 同时采用 MODIS 遥感卫星数据生成植被叶面湿润指数, 通过集成算法和系统模型生成森林火险气候指数及其时空动态的空间数据库与 GIS 系统。然后再利用森林火险气候指数模型计算全国森林火险气候指数空间数据库(FWI)并与火燃料空间分布、森林火险灾害发生强度和空间分布格局及区域特点结合, 生成本国的森林火险空间分布的预测和预报数据库以及有关的预报信息发布系统。应该更加注重发挥参与森林火险等级系统发展的人员与科研机构的作用, 因为我们的目标是引进一个森林火险等级系统, 把它应用到辅助决策系统中, 并根据当地条件发展该系统。

参考文献:

- [1] 田晓瑞, DOUGLAS J M, 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.
TIAN Xiaorui, DOUGLAS J M, ZHANG Youhui. Assessment of forest fire danger rating systems [J]. *World For Res*, 2006, **19** (2): 39 – 46.
- [2] TURNER J A, LAWSON B D. *Weather in the Canadian Forest Fire Danger Rating System: A User Guide to National Standards and Practices* (Info Rep BC-X-177)[M]. Ottawa: Canadian Forestry Service, 1978.
- [3] 舒立福, 田晓瑞, 李红. 世界森林火灾状况综述[J]. 世界林业研究, 1998, **11** (6): 31 – 36.
SHU Lifu, TIAN Xiaorui, LI Hong. Status of international forest fire in last decade [J]. *World For Res*, 1998, **11** (6): 31 – 36
- [4] 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 – 24.
SUN Yucheng, MA Hongwei, WANG Xiuguo, et al. Primary computing ways and explanation for fire weather indexes of Canada [J]. *Forest Fire Prev*, 2003 (4): 22 – 24.
- [5] MURARO S J. *A Modular Approach to a Revised National Fire Danger Rating System: in Contributions to the Development of a National Fire Danger Rating System* (Inf Rep BC-X-37)[M]. Ottawa: Canadian Forest Service, 1968.
- [6] STOCKS B J, LAWSON B D, ALEXANDER M E, et al. The Canadian forest fire danger rating system: an overview [J]. *For Chron*, 1989, **65**: 450 – 457.
- [7] WAGNER C E Van. *The structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System* (Ont Publication No 1333)[M]. Ottawa: Canadian Forestry Service, 1987.
- [8] KEETCH J J, BYRAM G. *A Drought Index for Forest Fire Control* (Res Paper SE-38)[M]. Asheville: USDA Forest Service, 1968.
- [9] PALMER W C. The palmer drought index: when and how it was developed [J]. *Wkly Weather Crop Bull*, 1988, **75** (28): 5.
- [10] WAGNER C E Van. *The development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System* (Ont FTR-35) [M]. Ottawa: Canadian Forestry Service, 1987.
- [11] WOTTON B M. Interpreting and using outputs from the Canadian forest fire danger rating system in research applications [J]. *Environ Ecol Stat*, 2009, **16**: 107 – 131.
- [12] KOURTZ P H, TODD J B. *Predicting the Daily Occurrence of Lightning-Caused Forest Fires* (Info Report PI-X-112) [M]. Petawawa: Petawawa National Forestry Institute, 1991.
- [13] WAGNER C E Van. Height of crown scorch in forest fires [J]. *Can J For Res*, 1973, **3**: 373 – 378.
- [14] STOCKS B J. Fire behaviour in mature jack pine [J]. *Can J For Res*, 1989, **19**: 783 – 190.
- [15] FLANNIGAN M D, LOGAN K A, AMIRO B D, et al. Future area burned in Canada [J]. *Clim Change*, 2005, **72**: 1 – 16.
- [16] National Rural Fire Authority. *Fire Weather Index System Tables for New Zealand* [R]. Wellington: National Rural Fire Authority, 1993.
- [17] ALEXANDER M E. Fiji adopts Canadian system of fire danger rating [J]. *Int For Fire News*, 1989, **2** (1): 3.
- [18] LEE B S, ALEXANDER M E, HAWKES B C, et al. Information systems in support of wildland fire management decision making in Canada [J]. *Comp Electr Agric*, 2002, **37**: 185 – 198.
- [19] BRENNER J, ARVANITIS L G, BRACKETT D P, et al. *Integrating GIS, meso-scale fire weather prediction, smoke plume dispersion modeling, and the internet for enhanced open burning authorizations and wildfire response in Florida* [EB/OL]. 2010-04-08. <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc97/proc97/abstract/a612.htm>.
- [20] SAN-MIGUEL-AYANZ J, BARBOSA P, LIBERTA G, et al. *The European Forest Fire Information System: a European Strategy Towards Forest Fire Management* [R]. Washington D C: U S Dep Interior, Bur Land Manage CD-ROM, 2003.
- [21] DYMOND C C, FIELD R D, ROSWINTIARTI O, et al. Using satellite fire detection to calibrate components of the fire weather index system in Malaysia and Indonesia [J]. *Environ Manage* 2005, **35** (4): 426 – 440.
- [22] GROOT W J De, FIELD R D, BRADY M A, et al. Development of the Indonesian and Malaysian fire danger rating systems [J]. *Mitig Adapt Strat Glob Change*, 2007, **12**: 165 – 180.