

森林火险气象指数及其构建方法回顾

牛若芸^{1,2} 翟盘茂³ 孙明华²

(1. 兰州大学大气科学学院, 730000; 2. 国家气象中心; 3. 中国气象局)

提 要: 森林火灾是威胁地球生态的主要灾害之一。为实现对林区起火可能性大小、火灾强度、火灾蔓延速度以及火灾扑救难易程度进行评估和预测, 国内外专家学者利用森林火灾与气象条件之间的关系研制了诸多森林火险气象指数的构建方法。作者对近十年来国内外森林火险气象指数的研究工作进行回顾和总结, 得出广泛应用的火险指数可以归纳为指数查对法、综合指标法和统计回归法等3种类型, 究其原理和使用效果, 各有优缺点。在实际使用过程中, 需要结合我国的气候和环境特点进行适用性修正和完善。

关键词: 森林火险 森林火险气象指数 构建方法

Review of Forest Fire Danger Weather Indexes and Their Calculation Methods

Niu Ruoyun^{1,2} Zhai Panmao³ Sun Minghua²

(1. College of Atmospheric Sciences of Lanzhou University, 730000;
2. National Meteorological Center; 3. China Meteorological Administration)

Abstract: Forest fire is a kind of disaster, which often damages the ecosystem on the earth. Based on the relationship between forest fire and weather conditions, many kinds of forest fire danger weather indexes are developed to estimate and predict the possibility of ignition, fire intensity and spread, as well as the difficulty of wildfires control. Through reviewing and summarizing various study results, it can be included that the methods for calculating forest fire danger weather index conclude mainly three kinds, i. e. index verification check method, synthesis index method, and statistic regression method. In light of the theory and

收稿日期: 2006年6月9日; 修定稿日期: 2006年9月18日

the applied effect, any method has its own strong point and defect comparing with others, so when it were used in China, the real calculation method should be modified and improved according to local climatic and environmental characteristics everywhere.

Key Words: forest fire forest fire danger weather index calculation method

引言

森林是地球生态系统的主要组成部分,是人类赖以生存的基础资源,起着保护水资源和调节生态平衡的重要作用,然而森林每年都会遭受到不同程度的火灾侵袭。森林火灾不仅会破坏林中植被覆盖度和碳元素的储备量,改变大气成分,严重时还将导致林中植被结构和生物物种的改变,对社会经济、人类的身体健康和生命安全也会产生不良影响^[1]。

目前,在气候变暖的背景下,陆地地表干旱化加重,森林火灾多发期加长,高森林火险区域增大。这些变化特点在北半球中高纬度地区最为明显。加拿大北部地区 20 世纪 70 年代以来发生的森林火灾明显增加;美国西北部地区 20 世纪 90 年代的年平均森林火灾面积较 70 年代增加了一倍;欧洲森林火灾的发生状况也大体类似^[1]。研究指出,在一定的地理条件下,森林火灾的发生与气象条件关系密切。气温持续偏高、降水偏少、空气干燥等都是发生森林火灾的有利气象条件,风速和风向则对火灾的蔓延速度和传播方向有着重大影响。

本文旨在对国内外森林火险气象指数的研究工作归纳总结,分析其优缺点,为进一步改进我国森林火险气象火险指数,提高森林火险气象预警业务水平,提升防火减灾能力提供科学参考。

1 森林火险气象指数的基本定义

森林火险,即森林火灾危险度,是对某林区起火的可能性大小、火灾的蔓延速度以

及人类控制火灾的难易程度的总体评价^[2]。森林火险反映的是一种大范围的、潜在的危险度。其量值的高低通常可用数值的方式,即森林火险指数直观地表达。

在可能引起区域性火险高低的诸多因子中,气象条件一直被认为是最主要的因素之一。首先,气象条件可对森林中可燃物的易燃特性产生很大影响,高温、低湿、多风的气象条件会使森林中可燃物的含水率明显降低、易燃性显著增大。重大、特大森林火灾通常都发生在长期干旱的气候背景下。其次,风速和风向直接决定了火灾的传播方向、蔓延速度和扑灭的难易程度。

森林火险气象指数就是根据森林火险与气象条件的关系,通过经验或数学拟合得出的结果,以判定某林区起火的可能性、火灾强度、火灾蔓延速度以及人类控制火情的难易程度。一般地,森林火险指数越高,表示发生火灾的可能性就越大、火灾也越易蔓延,火情也越难以控制。

2 森林火险气象指数的研究进展

早在 20 世纪 20 年代,气象和林业专家就开始研究森林火险气象指数。1928 年,加拿大的 Wright 简单地将空气相对湿度作为火险指数进行森林火险气象等级预报^[3]。1949 年,前苏联的 Nesterov 通过中午的气温与温度露点差的融合构建了一个双要素火险气象指数(即 NI 指数^[4,5])。1965 年, Zhdanko 又提出了 ZHI 指数^[6]。1968 年,美国的 Keetch 和 Byram 根据林地土壤水分耗散原理研制出了半经验半理论的 KBDI 指数计算方法^[7]。1967 年澳大利亚的 McArthur 在进行了 800 多次野外点火试验

后总结出了 McArthur 火险尺^[8], 之后, Noble 等人又以此为基础给出了森林火险指数 (FFDI: Forest Fire Danger Index) 的计算式^[9,10], 2002 年 McRae 又提出了 FFDI 的简化公式^[11]。此外, 还有 Langholz 和 Schmidtayer 的 Angstrom 指数^[12] (1993 年) 等。我国是从 20 世纪 50 年代开始森林火险指数的研究, 主要是在前苏联、美国、加拿大等国的成果基础上, 结合我国的实际情况进行的。1980 年代以后, 国内森林火险气象指数的研究发展较快。1996 年肖飞利用干旱度指数 SDI 作为小兴安岭的森林火险气象指数^[13]。1998 年国家气象中心结合美国洛杉矶林业试验站布龙-戴维斯方案, 利用特大火灾历史数据库验证研制出了国家级的森林火险气象指数^[14], 目前该指数仍在国家气象中心日常预报业务中使用。郑海青^[15]、李兴华^[16]等人分别提出了福建省和内蒙古的森林火险气象指数的计算方法。张映堂^[17]、李春燕^[18]、覃先林^[19]、王瑞军^[20]等人还利用气象条件与林中可燃物含水量的关系相继建立了我国西南林区、东北林区的森林火险气象指数的预报模型。

随着科学技术水平的发展和防火工作的实际需求, 人们对森林火险状况的描述也越来越细致, 森林火险气象指数的表现形式也由单一指数向多指数、体系化发展。其中最具有代表性的是加拿大的森林火险气象指数 (FWI) 系统^[21,22]。该系统由 6 个部分组成, 前 3 个部分计算了可燃物湿度码 FPMC (Fine Fuel Moisture Code)、枯落物下层湿度码 DMC (Duff Moisture Code) 和干旱码 DC (Drought Code), 分别反映了 3 种不同变干速度的可燃物的含水率, 其余的 3 个部分依次为初始蔓延指数 ISI (Initial Spread Index)、可燃物总量指数 BUI (Buildup Index) 及火险气象指数 FWI (Fire Weather Index)。

3 森林火险气象指数的主要构建方法

在森林火险气象指数研究的早期, 由于缺乏相应的仪器设备, 人们往往是根据天气的阴晴、风力的等级以及空气的干燥程度估测森林火险高低程度。迄今, 国内外学者已从不同的角度研制出了多种森林火险气象指数, 其构建方法大致可归纳为 3 种, 分别为指数查对法、综合指标法和统计回归法。

3.1 指数查对法

所谓指数查对法就是先选取与高森林火险密切相关的气象因子, 如气温 (T)、降水 (r)、风速 (v)、相对湿度 (u) 等, 再确定各单因子所对应的火险指数 $I_T(T)$ 、 $I_r(r)$ 、 $I_v(v)$ 、 $I_u(u)$, 最后将各因子对应的火险指数求和得到总的森林火险气象指数 I 。

$$I = I_T(T) + I_r(r) + I_v(v) + I_u(u) \cdots \quad (1)$$

这是目前研制森林火险气象指数最为常用的方法之一, 国家气象中心中短期森林火险气象指数^[14]和国家气候中心长期森林火险气象指数^[23]均采用了这种方法。这种方法通常是根据经验和试验结果总结得出的, 其优点在于计算简单, 便于推广, 有较好的实用价值。却也存在一定的缺陷和不足, 比如使用这种方法计算森林火险气象指数时往往对前期气候条件的作用考虑的不充分, 掺杂了一定的人为主观因素。

国家气象中心结合布龙-戴维斯方案 (公式 (2)), 利用特大火灾历史数据库反复验证研制出了修正的布龙-戴维斯方案 (公式 (3)), 将他们加权平均并经地表状况及降水量系数订正后得出在日常业务中使用的森林火险气象指数 (简称为 I_{NMC} , 公式 (4))。

$$U = I_v(v) + I_T(T) + I_F(F) + I_m(m) \quad (2)$$

$$U' = I'_v(v) + I'_T(T) + I'_f(f) + I'_m(m) \quad (3)$$

$$I_{\text{NMC}} = (AU + BU') \times C_r \times C_r \quad (4)$$

式(2)和(3)中的 v 为14时风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), T 为14时气温($^{\circ}\text{C}$), F 为可燃物湿度+14时相对湿度 $\times 0.25$ (%), f 为14时相对湿度(%), m 为连续无雨日数

(d), $I_v(v)$ 、 \dots 、 $I_m(m)$ 分别表示各单因子所对应的火险指数, 由已制定好的查算表(表1、表2)得出。 C_r 为地表状况修正系数, 取值范围为0~1; C_r 为降水量修正系数, 当日有降水取值为0, 当日无降水取值为1。权重系数 A 和 B 分别为0.3和0.7; I_{NMC} 为最终计算出的森林火险气象指数。

表1 布龙-戴维斯火险气象因子及其指数查对表

风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$I(v)$	气温/ $^{\circ}\text{C}$	$I(T)$	相对湿度/%	$I(f)$	连续无雨日数/d	$I(m)$
0~0.9	5	15~19	0	>75	0	0	0
1.0~2.9	15	20~23	3	40~75	5	1	5
3.0~5.9	25	24~28	6	25~39	10	2	10
6.0~10.9	30	29~32	9	15~24	15	3~5	15
≥ 11	35	33~37	12	8~14	20	6~8	20
		>38	15	0~7	25	>8	25

表2 修正后的布龙-戴维斯火险气象因子及其指数查对表

风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$I(v)$	气温/ $^{\circ}\text{C}$	$I(T)$	相对湿度/%	$I(f)$	连续无雨日数/d	$I(m)$
0~1.5	3.846	<5	0	>70	0	0	0
1.6~3.4	7.692	5~10	4.61	60~70	3.076	1	7.692
3.5~5.5	11.538	11~15	6.1	50~59	6.153	2	11.538
5.6~8.0	15.384	16~20	9.23	40~49	9.23	3	19.23
8.1~10.8	19.236	21~25	12.5	30~40	12.307	4	23.076
10.9~13.9	23.076	>25	15.384	<30	15.384	5	26.923
14.0~17.2	26.923					6	30.7
>17.2	30.9					7	34.615
						>8	38

3.2 综合指标法

综合指标法是直接对多个气象因子(如气温 T 、降水 r 、风速 v 、相对湿度 u 、……)融合而建立的复合型森林火险指数

$$I = f(T, r, v, u, \dots) \quad (5)$$

综合指标法也是构建森林火险气象指数的常用方法之一, 不仅计算简单, 便于推广, 而且能将多个气象因子有机的组织起来, 能充分体现前期天气气候条件的累积贡献。这种方法在国外更为常用, 前文提到的 NI 指数、 ZhI 指数、 $KBDI$ 指数和 $FFDI$ 指数均采用此方法构造。

3.2.1 NI 、 MNI 和 ZhI 指数

$Nesterov$ (NI) 指数、修正的 $Nesterov$ (MNI) 指数和 $Zhdanko$ (ZhI) 指数都是在俄罗斯发展起来并得到广泛认可的森林火险气象指数^[4,6,24]。

NI 指数是对中午的气温(T)稳定大于 0°C 期间 T ($^{\circ}\text{C}$)与温度露点差 d ($^{\circ}\text{C}$)乘积的累计, 具体计算公式如下:

$$G = \sum T \times d \quad (6)$$

当日降水量 R 大于3.0mm时, G 重置为0。

ZhI 指数在计算过程中采用了循环迭代的方式:

$$Zh(N) = (Zh(N-1) + d) \times K(N) \quad (7)$$

其中 d 是温度露点差($^{\circ}\text{C}$), $K(N)$ 是

取值为 0~1 之间的权重系数,用来控制降水量对指数的削减率,当第 N 天没有出现降水时 $K(N)$ 为 1,当降水量等于或超过 20mm 时, $K(N)$ 为 0 (表 3)。

表 3 日降水量 R 与比例系数 K 的对应关系

R/mm	K
0	1.0
0.1~0.9	0.8
1.0~2.9	0.6
3.0~5.9	0.4
6.0~14.9	0.2
15.0~19.9	0.1
≥ 20.0	0

MNI 指数借鉴了 ZhI 指数的循环迭代思想,引入了权重系数 $K(N)$,对 NI 指数的计算过程做了改进,其计算方程如下:

$$MNI(N) = (MNI(N-1) + T \times d) \times K(N) \quad (8)$$

3.2.2 KBDI 指数

$KBDI$ 指数实际上是根据土壤水分耗散原理计算的森林土壤水分累计亏损量^[7]。 $KBDI$ 指数值在 0~800 之间变化,它随着土壤水分蒸发蒸腾量的增加而增加,又随着净降水量的增加而减小。

$$Q_n = Q_{n-1} + dQ_n - r_n \quad (9)$$

式中: Q_n 为森林土壤水分累计亏损量(in),也即 $KBDI$ 指数; r_n 为净降水量(in)。并设定土壤水分的日蒸发蒸腾量 dQ_n 仅为日最高气温 T (°C) 和年平均降水量 R (in) 的函数:

$$dQ_n = \{[800 - Q_{n-1}][0.968\exp(0.0486T) - 8.30]/[1 + 10.88\exp(-0.04409R)]\} \times 10^{-3} \quad (10)$$

3.2.3 FFDI 指数

Noble 等人依据 McArthur (1967 年) 火险尺^[8] 给出了 $FFDI$ 的计算公式如下^[9,10]:

$$FFDI = 1.275D^{0.987} \times \exp(0.0338T - 0.0345H + 0.0234V) \quad (11)$$

其中 T 为气温 (°C), H 为相对湿度 (%), V 为 10m 处平均风速 ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$), D 是干旱因子:

$$D = [0.191(I + 104)(N + 1)^{1.5}] / [3.52(N + 1)^{1.5} + R - 1] \quad (12)$$

其中 I 为 $KBDI$ 指数, N 为连续未出现降水的日数 (d), R 为最近时段的降水量 (mm)。

3.3 统计回归法

统计回归法是选用历史资料,如气象因子、森林中可燃物含水率或湿度、林火发生的地点、时间、次数、火源等通过统计回归的数学方法探索林火发生发展的规律、建立数学模型,再利用该数学模型计算火险指数。这种方法根据因变量和自变量的不同又可划分为两类:

其一是选用气象因子作为自变量,可燃物含水率或湿度作为因变量建立回归方程。

森林中可燃物的含水率是影响林火发生的一个直接因素。可燃物含水率的大小,特别是细小可燃物含水率的大小决定了森林燃烧的难易程度。而可燃物含水率又是多种气象要素共同作用的结果。统计回归法正是从这个角度出发,研究气象条件与森林火险之间的关系的。我国已有学者依据这个原理,对东北、西南重点林区进行了一些实验和研究,并已取得了一定的研究成果^[17-20, 25-26]。表 4 是王瑞君等人建立的东北林区 7 种不同类型的细小可燃物含水率回归模型^[25]:

式中 Y 为细小可燃物含水率, X_1 为林内气温 (°C), X_2 为林内相对湿度 (%), X_3 为林内风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), X_4 为可燃物表面温度 (°C), X_5 为林内降雨量 (mm), X_6 为林内蒸发量 (mm), X_7 雨后天数 (d)。

由于测定可燃物的含水率需在不同森林可燃物类型中,采用不同可燃物种类和规格的测湿棒来进行,还需长期对枯枝落叶、倒木等死可燃物的含水量,草本、灌木、乔木

等活可燃物的含水量进行定点观测。而我国幅员辽阔，森林可燃物类型较复杂，这种方

法在推广使用过程中存在一定的困难。

表 4 各类型细小可燃物含水率模型

可燃物种类	模型	复相关系数
草甸	$Y=-24.3088+0.9791X_1+0.6024X_2-0.126X_4+15.3769X_5$	0.867
采伐迹地	$Y=31.2168-0.2637X_1-0.0486X_3-1.2012X_4+7.3946X_5-0.3619X_6-0.4724X_7$	0.913
樟子松林	$Y=18.9265-0.1545X_1+0.9643X_2+12.5509X_5-5.3684X_6$	0.894
平地落叶松林	$Y=16.6348-0.1142X_1+0.3566X_2+12.7801X_5-3.8314X_6$	0.81129
白桦林	$Y=18.0281-1.0218X_1+0.3877X_2+0.8098X_4+17.9576X_5-0.5546X_6-0.7898X_7$	0.838
坡地落叶松林	$Y=23.9979-0.29435X_1+0.3409X_2-0.2891X_4+21.0806X_5-1.7483X_7$	0.895
樟-落混交林	$Y=26.4962-0.2473X_1+0.1792X_2-0.8782X_4+25.8594X_5$	0.826

其二是选用气象因子作为自变量，直接用森林火灾发生次数作为因变量建立回归方程。神农架森林火灾发生率长期预报模型就是用此方法建立的^[27]。

4 森林火险气象等级的划分

为对森林火险气象指数所指示的森林火险的高低程度有一个更直观、明了的描述，人们又将森林火险气象指数划分为等级。目前，国际上通常将森林火险气象指数由低到高划分为 5 个等级。表 5 给出了中国气象局和国家林业局联合制定的森林火险气象等级划分标准及所对应的 I_{NMC} 取值范围。

表 5 森林火险气象等级划分标准

等级	危险程度	易燃程度	蔓延程度	I_{NMC}
一	没有危险	不能燃烧	不能蔓延	0~22
二	低度危险	难以燃烧	难以蔓延	23~43
三	中度危险	较易燃烧	较易蔓延	44~61
四	高度危险	容易燃烧	容易蔓延	62~75
五	极度危险	极易燃烧	极易蔓延	76~100

5 结 语

综上所述，森林火险气象指数的构建方法有多种，其中指数查对法、综合指标法和统计回归法是较为常用的 3 种，究其原理和使用效果，各有优缺点。指数查对法计算简单，便于推广，有较好的实用价值，但往往

对前期气候条件的作用考虑的不充分；综合指标法不仅计算简单，便于推广，而且能将多个气象因子有机地组织起来，能充分体现前期天气气候条件的累积贡献；统计回归法由于需长期在森林中进行观测，加之我国幅员辽阔，森林可燃物类型较复杂，使得这种方法在推广使用过程中存在一定的困难。在实际使用过程中，需要结合我国的气候环境特点对这些方法进行适用性研究，并加以修正和完善。

与发达国家相比，我国对森林火险气象指数的研究起步较晚，但发展很快。1999 年，中国气象局和国家林业局联合启动了国家级森林火险逐日预报业务，有力地推动了中国森林火险气象指数研究工作的跨越式发展。但事实上，目前适用于全国范围内的森林火险气象指数较少，还有许多科学问题急需探讨。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of IPCC [M]. New York, Cambridge Univ. Press, 2001; 1032.
- [2] Deeming J E, Lancaster J W, Fosberg M A, et al. The National Fire-Danger Rating System [R]. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, 1972; 165.
- [3] 舒立福, 张小罗, 戴兴安等. 林火研究综述 (II) - 林火预测预报 [J]. 世界林业研究, 2003, 16 (4);

- 34-37.
- [4] Nesterov V G. Forest fire potential and methods of its determination [M]. Moscow, Goslesbumizdat Publ. House, 1949.
- [5] Sherstyukov B G. Index of forest fire [M]. Year-book of weather, climate and ecology of Moscow. Moscow, Moscow State Univ. Publ., 2002; 83-84.
- [6] Zhdanko V A. Scientific basis of development of regional scales and their importance for forest fire management [M]. In: Melekhov I S (Ed.) Contemporary Problems of Forest Protection from Fire and Firefighting. Moscow, Lesnaya Promyshlennost Publ., 1965; 53-86.
- [7] Keetch J J, Byram G M. A drought index for forest fire control [C]. U. S. D. A. Forest Service Research Paper SE-38. 1968; 1-33.
- [8] McArthur A G. Fire behaviour in eucalypt forests [R]. Commonwealth of Australia Forest and Timber Bureau Leaflet, 1967; 107.
- [9] Noble I R, Bary G A V, Gill A M. McArthur's fire-danger meters expressed as equations [J]. Australian Journal of Ecology, 1980; 201-203.
- [10] Hoffmann W A, Schroeder W, Jackson R B. Regional feedbacks among fire, climate, and tropical deforestation [J]. J. Geophys. Res., 2003, 108 (D23), 4721, doi: 10. 1029/2003JD003494.
- [11] McRae R. Re-engineering Fire Danger Index [R]. ACT Emergency Services Bureau, 2002.
- [12] Langholz H, Schmidtmayer E. Meteorologische Verfahren zur Abschätzung des Waldbrandrisikos [M]. AFZ, 1993; 394-396.
- [13] 肖飞, 金希蕾, 张学龙. 森林大火潜在危险和可燃物干旱度研究 [J]. 灾害学, 1996, 11 (4): 54-57.
- [14] 王建捷, 李纪曼, 胡江凯等. 数值天气预报业务系统简介 [R]. 北京. 国家气象中心编印, 2003, 273-276.
- [15] 郑海青, 陈敬平, 张星等. 福建省森林火险天气等级预报系统 [J]. 中国农业气象, 2001, 22 (3): 37-43.
- [16] 李兴华, 李云鹏, 杨丽萍等. 内蒙古森林草原火险等级短期预报方法及系统开发 [J]. 气象, 2003, 29 (增刊): 79-82.
- [17] 张映堂, 霍义强. 滇中地区森林火险等级预报方法的研究 [J]. 林业科学, 1995, 31 (3): 239-246.
- [18] 李春燕. 森林可燃物含水率与火险等级关系的研究 [J]. 云南林业调查规划, 1994 (4): 37-42.
- [19] 覃先林, 张子辉, 易浩若等. 一种预测森林可燃物含水率的方法 [J]. 火灾科学, 2001, 10 (3): 159-162.
- [20] 王瑞君, 李帅, 刘春生等. 短期森林火险等级模型的建立 [J]. 气象, 2003, 29 (增刊): 66-73.
- [21] Fosberg M A. Weather in wildland fire management; the fire weather index [C]. In: the Conference on Sierra Nevada Meteorology, South Lake Tahoe, NV. 1978; 1-4.
- [22] Turner J A, Lawson B D. Weather in the Canadian Forest Fire Danger Rating System [R]. Environment Canada, Pacific Forest Research Centre. 1978; 1-40.
- [23] 刘海波, 宋文玲, 赵振国. 森林火险气候预测业务系统 [J]. 气象, 2003, 29 (增刊): 83-86.
- [24] Groisman P Y, Knight R W, Heim R R, et al. Contemporary Climate Changes in High Latitudes of the Northern Hemisphere Cause an Increasing Potential Forest Fire Danger [C]. In: the 5th AMS Symposium on Fire and Forest Meteorology joint with 2nd International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress, Orlando, Florida. 2003; 6-13.
- [25] 王瑞君, 于建军, 郑春艳等. 森林可燃物含水率预测及燃烧性等级划分 [J]. 森林防火, 1997, 53 (2): 16-17.
- [26] 王金叶, 车克均, 傅辉恩等. 可燃物含水率与气象要素相关性研究 [J]. 甘肃林业科技, 1994 (2): 21-23.
- [27] 杨贤为, 张强. 神农架森林火灾发生率长期预报 [J]. 气象, 1995, 21 (12): 42-44.