

LINHUOWEIHAIMOXINGGOUJIAN YU LINHUOWEIHAIYUCE



林火危害模型构建与 林火危害预测

曲智林 编著



东北林业大学出版社

林火危害模型构建 与林火危害预测

曲智林 编著



东北林业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

林火危害模型构建与林火危害预测/曲智林编著. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2008. 7

ISBN 978-7-81131-130-3

I. 林… II. 曲… III. ①森林火—建立模型 ②森林火—预测
IV. S762.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 118428 号

责任编辑: 王巍

封面设计: 彭宇



林火危害模型构建与林火危害预测

Linhuowehaimoxinggoujian Yu Linhuowehaiyuce

曲智林 编著

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

黑龙江省教育厅印刷厂印装

开本 880 × 1230 1/32 印张 5.25 字数 130 千字

2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 978-7-81131-130-3

S · 490 定价: 16.00 元

前 言

林火科学是一门综合科学，林火预测预报是林火科学的重要组成部分；林火预测预报研究从 20 世纪 20 年代迄今，已有 80 余年的历史。林火行为预测预报是通过建立林火行为预测预报模型来实现的，构建林火行为模型来模拟现实中林火发展过程是我们研究林火行为的重要手段。而林火危害是林火发生、发展的结果，因此预测林火危害程度对于预防林火发生、实施林火扑救具有重要的意义。

长期以来，我国的林火行为建模研究发展较为缓慢，尤其是林火危害程度预测方面的研究，只是在一些科研院校开展了一些零散的工作，尚未形成规模和体系，在林火危害模型构建方面的研究还有很长的路要走。为了让更多的人了解林火危害模型构建的思想、方法和原则，作者将近几年在该领域研究工作的成果编著成书。本书共分八章，为了完整地理解本书的建模思想，在第一章主要叙述了林火行为和林火预测预报的概念；第二章为数学模型的基本概念与类型以及林火行为建模的基本理论与原则；第三章介绍了林火危害与林火危害模型的概念；第四章介绍了构建林火危害模型所用到的主要数学知识；第五章介绍了林地过火面积预测模型的构建方法；第六章介绍了林火初始面积模型的构建方法；第七章介绍了长期潜在林火初始面积模型的构建方法；第八章为黑龙江省森林火灾危害等级预报系统的研制方法。

编著本书的目的是将作者多年来在林火危害模型构建方面的研究成果介绍给广大读者，希望有更多的对该领域感兴趣的人士参与研究。由于作者水平有限，难免存在缺点和不当之处，敬请读者批评指正。

作 者

2008 年 5 月

目 录

1	林火行为与林火行为预测	(1)
1.1	林火行为	(1)
1.2	林火行为的影响因子	(13)
1.3	林火行为预报	(21)
2	数学模型的基本概念和类型	(24)
2.1	基本概念	(24)
2.2	模型建立的方法与步骤	(27)
2.3	林火行为建模的基本原则和理论	(28)
3	林火危害及其林火危害模型	(32)
3.1	火烈度	(32)
3.2	森林过火面积模型	(34)
3.3	林火初始面积模型	(35)
4	林火危害模型的数学理论	(36)
4.1	多元回归分析理论	(36)
4.2	神经网络概述	(44)
5	林地过火面积预测模型的构建	(50)
5.1	数据分析与处理	(50)
5.2	林火面积等级和单气象因子的关系	(51)
5.3	模型的构建和模型参数估算	(59)
5.4	模型检验	(62)
6	林火初始面积模型的构建	(64)
6.1	基于微分方程的林火初始面积模型	(64)
6.2	基于神经网络的林火初始面积模型	(68)
7	长期潜在林火初始面积模型的构建	(81)
7.1	春季防火期各月份气象因子长期变化特点	(81)

7.2	春季防火期各月份潜在林火初始面积变化特点	(102)
7.3	春季防火期潜在林火初始面积与气象因子的关系	(108)
7.4	春季防火初期潜在林火初始面积与冬季气象因子的关系	(109)
7.5	春季防火期各月份潜在林火初始面积的关系	(115)
7.6	模拟检验	(118)
8	黑龙江省森林火灾危害等级预报系统简述	(120)
8.1	地理信息系统简述	(120)
8.2	黑龙江省森林火灾危害等级预报系统简述	(125)
附录 A	春季防火期各月份林火初始面积与气象因子的关系	(130)
附录 B	黑龙江省森林火灾危害等级预报系统设计程序 ...	(144)

1 林火行为与林火行为预测

森林火灾发生后必然造成各种危害,包括林木的损失、大气污染、野生动植物的减少以及居民财产的损失等等。林火危害是林火发生、发展的必然结果,林火危害程度的大小受林火行为的影响,因此了解林火危害规律就必须要了解林火行为特性。

1.1 林火行为

林火行为是森林燃烧环的重要成分,受可燃物类型、火环境和火源条件的制约和控制。火在其发生和发展过程中,在可燃物、地形、天气条件的影响下,表现出各种各样的行为特性。林火的外在表现是极其复杂的,但也有其内在的规律性。掌握林火行为的规律性,可为预测林火发生、蔓延的特征和发展动向,以及森林防火、灭火、用火的决策提供科学依据。

林火行为 (forest fire behavior) 是指森林可燃物被点燃开始到发生发展直至熄灭的整个过程中所表现出的各种现象和特征。火行为主要包括林火蔓延、林火强度、林火种类和林火烈度等。既包括火的特征 (火强度、火蔓延速度、火焰高度和长度、火持续时间),也包括火灾发展过程中的火场变化 (火场面积、火场周长、高强度火特征)、火的种类及火灾的后果。

在外界火源条件下,开始燃烧,需要有一段时间的能量聚积,使燃烧能量趋向平衡,经过蔓延扩展过程,才能达到稳定的蔓延速度。由于可燃物的不同和环境条件的变化,火的蔓延速度也随之加快或减缓,林火行为也多种多样。

1.1.1 林火蔓延

林火蔓延是林火行为的一个重要指标。林火蔓延包括火场上各个方向上的蔓延速度、火场形状的变化、火场面积的扩展速度、火场周长的增长速度等。

1.1.1.1 林火蔓延的初始状态和火场形状

森林着火之后，火就会向四周蔓延扩展。林火蔓延是依赖热传导、热对流和热辐射进行的。一场火灾发生后，其蔓延速度不同；由于可燃物的状况、热能释放速度、地形、天气状况的影响，表现出各种各样的火蔓延特征。

在火蔓延过程中，火场形状的变化取决于地形（坡度）变化及其复杂性和风速大小的影响。这种影响表现在几个方面：平地无风、平地有风、坡地和山地。

（1）典型蔓延的火场模型：假定在均匀一致的可燃物条件、恒定的风速情况下，林火蔓延形成的火场形状呈近似椭圆形。火发生后，向四周蔓延形成火场。火场的各个部位风向、火蔓延方向和速度不一致，表现出不同的特征。火的引燃地点为起火点，燃烧过后形成过火区；正在燃烧的带状区域成为火线；火顺风蔓延的火场部位为火头，是火场发展的主要部位。火蔓延方向和风向一致，顺风火蔓延速度快，不易控制；火逆风蔓延的部位为火尾，火蔓延方向和风向相反；逆风火蔓延速度慢，易于控制。在侧风条件下蔓延的部位为火翼或火侧，火蔓延方向和风向不一致；侧风火的蔓延速度居中，也是控制火的重要部位（见图1-1）。

（2）平地无风条件下的蔓延：当一根火柴落到均匀的可燃物床层上，在无风条件下，由于火柴火焰的热能使火焰四周的可燃物被加热，发生热分解反应，逸出可燃性气体和蒸汽，呈有焰燃烧，继而火焰开始转移。火焰的基部由引燃点向可燃物床层深处推进。

初始时，火的蔓延全部依靠火焰与未燃可燃物间的直接接触。随着火烧面积扩大与加深，火焰的辐射预热火头前方的可燃物，缩短了引燃时间，加长了火焰。与此同时，火焰上方空气被加热而抬

升,使四周空气从火基部吸入,火焰发生向内倾斜,这种情况将持续 2~3 min。由于对流作用,火焰以更快速度向四周蔓延。

从引燃的瞬间到引燃面完全烧掉的时间,为一个加速期。在此期间内,燃烧所需空气,从火焰周围提供,吸入空气速度随着燃烧面积增加呈线性地增加。在重型可燃物中,这一周期未了吸入空气速度达 10~15 m/min。

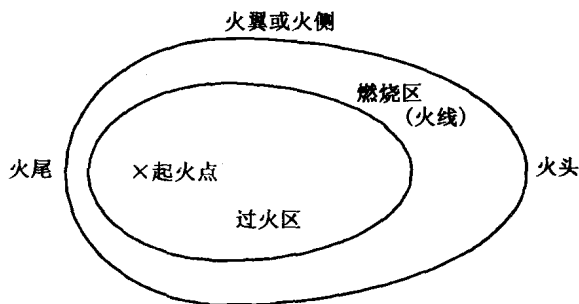


图 1-1 典型蔓延火场模型

当最初引燃的可燃物烧完后,火焰呈轮胎状,时间为 10~15 min。此时可以从火焰外围和内圈吸取空气,加大了空气过量系数,降低火焰温度,进而降低火焰长度和向前蔓延速度,火作为一条火线向前推进。由于向四周的蔓延速度相等,所以火场的形状近似为圆形。

(3) 平地有风条件下的蔓延:当在风场的作用下,火发展情况将与上述情况不同(见图 1-2),火经第一个加速期(图 1-2a)后立即进入第二个加速期(图 1-2b)。风增加了燃烧区内空气过量系数,使火焰温度降低,但火焰被风吹后发生倾斜,不仅加大了火焰长度,加剧了辐射和对流传热作用,使燃烧得更加旺盛。

风是影响火场形状的主要因素。在地形平坦而风向较稳定时,火蔓延形状为椭圆形(图 1-2a);风速较大时呈长椭圆形(图 1-2b);当风向不稳定,呈一定角度($30^{\circ}\sim 40^{\circ}$)摆动时,火蔓延多呈扇形(图 1-2c);当风向改变时,原来的火翼有可能变为火头,火场面积扩大,椭圆形火场的长轴方向发生改变(1-2d)。

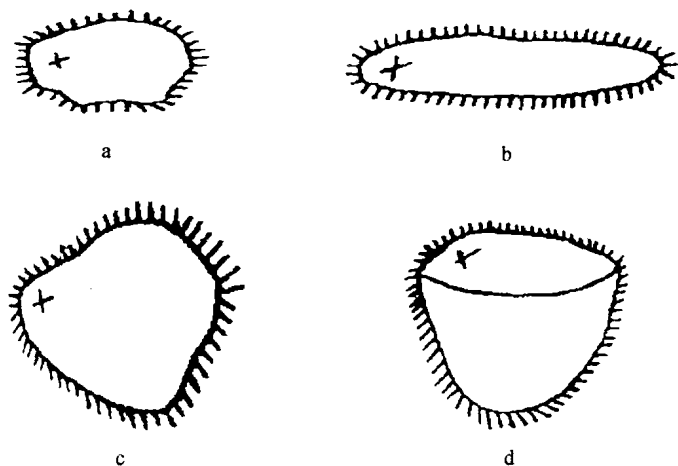


图 1-2 平地有风条件下的火场形状

(4) 山地条件下的蔓延：当遇到地形起伏时，火在谷地间蔓延缓慢，而在山的侧脊蔓延快，形成“V”形状（图 1-3a）。当火场较大且山地地形较复杂时，火场的形状复杂，多呈鸡爪形（图 1-3b）。

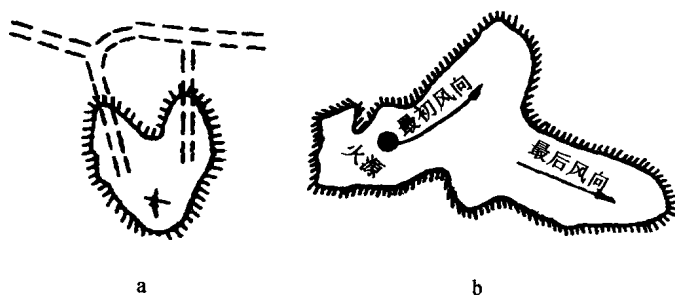


图 1-3 山地条件下的火场形状

1.1.1.2 林火的蔓延速度

蔓延速度（rate of spread）是指火线在单位时间内向前移动的距离，单位是 m/s ， m/min ， ft/min ， km/h 等。由于火场部位的不

同, 风向与火蔓延的方向不一致, 所以火场上各个方向上的蔓延速度也是不同的。这种蔓延速度的差异, 形成了火场复杂的形状。

可燃物的类型、含水量和负荷、环境的相对湿度、气温和风速、地形的斜坡等等因素均对林火蔓延有强烈的影响。

早在 1946 年, 丰斯第一个提出林火蔓延的数学模型, 描述轻型细小可燃物床层中前沿火的蔓延状况。1961 年, 美国国家科学部 (National Science Foundation) 向华盛顿州立大学和北方林火实验室提供了大量投资, 进行野地可燃物中林火蔓延机理的深入研究。建造了燃烧试验室, 研究了火的化学 (可燃物各组成贡献)、火的物理学 (颗粒大小、孔隙度等)、空气动力学 (气温、相对湿度、自由燃烧、强制燃烧等)、地形 (斜坡) 等因素, 及其对林火发展的影响。从实验室中所得数据, 经数学上处理, 得出许多定量关系式。1964 年, 所得的数学关系式拿到野外去验证, 并将其中某些关系式作了一些修正, 从而发展于林火蔓延模型。1972 年, 罗逊迈尔在美国农业部林务局的内部山脉森林和牧场试验站研究文集 INT-115 中, 比较完善地提出了林火蔓延模型。

根据林火蔓延的数学模型, 可预测一个林火经过一定时间 (时间的长短取决于环境条件的恒定, 可燃物的均匀性) 后的火行为, 从而为林火管理部门提供了决策的依据。下面介绍澳大利亚、加拿大、美国和我国的林火蔓延模型。

(1) 澳大利亚林火蔓延模型:

1960 年以来, 麦克阿瑟 (McArthur, A. G.)、诺布尔 (Noble, L. R.)、巴雷 (Bary, G. A. V.) 和吉尔 (Gill, A. M.) 等人, 经过一系列的研究和改进, 形成了草地火蔓延速度指标, 即

$$R = 0.13F \quad (1-1)$$

当 $M < 18.8\%$ 时, 有

$$F = 3.35We^{-0.897M+0.0403V}$$

当 $18.8\% \leq M \leq 30\%$ 时, 有

$$F = 0.29We^{(-1.686+0.0403V) \times (30-M)}$$

式中: R ——火蔓延速度, km/h;

- F ——火蔓延指标, 无量纲;
 W ——可燃物负荷量, t/hm^2
 M ——可燃物含水率, %;
 V ——距地面 10 m 高处的平均风速, m/min ;
 e ——自然对数。

(2) 王正非林火蔓延模型:

王正非通过对林火蔓延规律的研究, 得出林火蔓延速度模型:

$$R = R_0 K_w K_s / \cos \theta \quad (1-2)$$

$$R = \frac{I_0 l}{H(W_0 - W_r)}$$

式中: R ——林火蔓延速度, m/min ;

R_0 ——水平无风时火的初始蔓延速度, m/min ;

K_w ——风速修正系数, 无量纲 (表 1-1);

K_s ——可燃物配置格局修正系数 (表 1-1);

θ ——地面平均坡度, ($^\circ$);

I_0 ——无风时的火强度, kW/m^2 ;

l ——开始着火点到火头前沿间的距离, m ;

H ——可燃物热值, J/g ;

W_0 ——燃烧前可燃物质量, g/m^2 ;

W_r ——燃烧后余下的可燃物质量, g/m^2 。

表 1-1 风速修正系数 K_w

风速/ (m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
K_w	1.2	1.4	1.7	2.0	2.4	2.9	3.3	4.1	5.0	6.0	7.1	8.5

表 1-2 可燃物配置格局修正系数 K_s

可燃物类型	K_s
枯枝落叶厚度 0~4 cm	1
枯枝落叶厚度 4~9 cm	0.7~0.9
枯草地	1.5~1.8

(3) 加拿大劳森和斯托克斯的林火蔓延模型:

林火蔓延速度是依据加拿大林火天气指标中的初始蔓延指标 (*ISI*) 得来的, 针对加拿大的 16 个可燃类型, 在同一天气条件下, 每个可燃物类型都有一个特定的 *ISI*。

当 $ISI \leq 20$ 时, 有

$$R = 0.0788 \times ISI^{1.888} \quad (1-3)$$

当 $ISI \geq 20$ 时, 有

$$R = 85 \times [1 - e^{-0.378 \times (ISI - 12)}] \quad (1-4)$$

(4) 罗森迈尔 (Rothermel) 林火蔓延模型:

1972 年, 罗森迈尔 (Rothermel) 通过在实验室和野外的实验研究, 提出了完整的林火蔓延模型。在 1981 年, 对 1972 年的林火蔓延模型作了某些补充。罗逊迈尔林火蔓延模型中的基本假定是: ①野外的可燃物是较均匀, 即这种可燃物复合体内没有直径大于 8 cm 的颗粒, 所以, 它是直径小于 8 cm 的各种级别的混合物; ②应用了“似稳态” (Quasi-steadystate) 的概念, 从宏观上看, 火的蔓延达到一个恒定的速度, 只要可燃物的颗粒大小、床层的配置、环境因子和地理因子保持不变的话, 似稳态是可以存在的。

罗逊迈尔林火蔓延模型公式如下:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \varepsilon_0 Q_{ig}} \quad (1-5)$$

式中: R ——火蔓延速度, ft/min;

I_R ——反应强度, Btu/(ft² · min);

ξ ——传播通量比率, 量纲为 1;

Φ_w ——风速系数, 量纲为 1;

Φ_s ——坡度系数, 量纲为 1;

ρ_b ——可燃物容积密度, lb/ft³;

ε_0 ——有效加热系数, 量纲为 1;

Q_{ig} ——预引燃热量, Btu/lb。

(上述计量单位与我国法定计量单位换算因数: 1 ft = 0.304 8 m, 1 Btu = 1.055 kJ, 1 lb = 0.454 kg, 以下同, 编者注)。

1.1.1.3 火场面积和周长的动态描述

林火发生以后,火向四周以不同的速度蔓延,由于受到风向风速和地形的影响,各个方向上的火的蔓延速度是不同的,实际中火场的形状是非常复杂的。由于总体上,火场的蔓延形状是进行椭圆形,因此现在大多是采用双椭圆形的方法来描述火场的蔓延动态。火场蔓延的影响因素主要是风速、火蔓延的时间,火场的动态描述主要是看面积和周长的变化。

(1) 安德烈的林火蔓延双椭圆形数学模型:

1983年,安德烈提出了风对林火蔓延影响的双椭圆形数学模型(图1-4)。

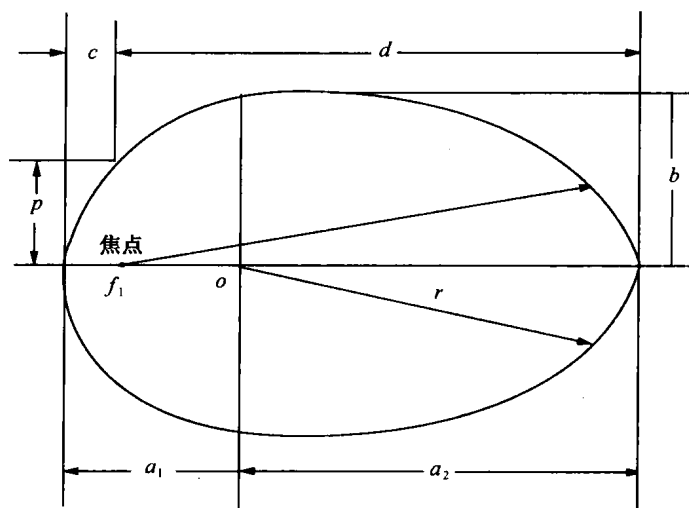


图1-4 林火蔓延的双椭圆模型

图中各参数的定义如下: a_1 为火尾部半椭圆主轴; a_2 为火前沿半椭圆主轴; b 为副轴,火翼上侧风火蔓延的最大距离; c 为主轴上逆风火蔓延的距离; p 为尾部半椭圆的正焦距,代表在原点方向上侧风火的距离。作者根据该数学模型,提出这些参数与风速间关系式:

$$c = 0.492e^{-0.1845U}$$

$$\begin{aligned}
 p &= 0.542e^{-0.1483U} \\
 a_1 &= 2.052 \times (88U)^{-0.3} \\
 a_2 &= d + c - a_1 \\
 b &= 0.534e^{-0.1147U}
 \end{aligned}$$

式中: U ——火焰半高处的风速, m/h 。

这些方程提供了双椭圆形火场形状定量描述, 可以利用上述火场形状参数去计算火场的面积和周边:

$$A = \frac{\pi b d^2}{2} (a_1 + a_2) \quad (1-6)$$

$$P = \frac{\pi k_1 d}{2} (a_1 + b) + \frac{\pi k_2 d}{2} (a_2 + b) \quad (1-7)$$

式中:

$$k_1 = 1 + \frac{1 + M_1^2}{4}; M_1 = \frac{a_1 + b}{a_1 + b}; k_2 = 1 + \frac{1 + M_2^2}{4}; M_2 = \frac{a_2 + b}{a_2 + b}$$

(2) 前苏联阿莫索夫的林火蔓延面积公式:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\pi}{2} \left(\frac{V_1 t + V_2 t}{2} \right) + \frac{\pi}{2} \left(\frac{V_2 t + V_3 t}{2} \right) \\
 &= [(V_1 + V_2)^2 + (V_2 + V_3)^2] \quad (1-8)
 \end{aligned}$$

式中: A ——火场面积, m^2 ;

V_1 、 V_2 、 V_3 ——分别为顺风火、侧风火、逆风火的蔓延速度, m/min ;

t ——火发生后的时间, min 。

(3) 加拿大的火行为计算公式:

$$A = \pi (V + M) U t^2 / 2 \quad (1-9)$$

$$P = \pi \left(\frac{V + W}{2} + U \right) K t \quad (1-10)$$

两式中: A ——火场面积, m^2 ;

P ——火场的周长, m ;

V 、 U 、 W ——分别是顺风、侧风、逆风火的蔓延速度, m/min ;

t ——火发生后的时间, min;

K ——基于 $(V + W)/2U$ 的常数。

1.1.2 林火强度

森林可燃物燃烧时火的热量释放速度称为林火强度, 简称火强度。火强度是林火行为重要标志之一。火强度变化幅度一般为 $20 \sim 100\,000 \text{ kW/m}$, 常将火划分为不同的火强度等级: $350 \sim 750 \text{ kW/m}$ 为低强度火; $750 \sim 3\,500 \text{ kW/m}$ 为中等强度火; $> 3\,500 \text{ kW/m}$ 为高强度火。

1.1.2.1 火焰特征

火焰特征, 即火焰的热量传递状况, 与林火强度的大小关系密切。除了可燃物的影响外, 火焰的状况主要受到风速和坡度的影响。当在平坦地面上无风条件下, 火焰向上, 两侧的空气向火焰流动形成对流, 前面的可燃物受热的能量主要来自于火焰的辐射热, 火蔓延速度较慢。当有风的情况下, 火焰在风的吹动下向前倾斜, 加强了火焰向前方的热辐射, 快速加热可燃物, 火蔓延的速度较快。在坡地上无风的条件下, 火加热前面可燃物的方式与平地上有风的情况下相似, 所以在坡地上火蔓延较快。如果坡地上的火有风吹动, 火焰会直接点燃前面的可燃物, 快速蔓延。

1.1.2.2 林火强度指标

林火强度可以表示为辐射强度 [表示热辐射作用的发射速度, 单位为 $\text{J}/(\text{cm}^2/\text{s})$], 对流强度 (表示热对流作用传递出去的热流, 单位为 kW/m^2), 反应强度 (IR , 单位活性燃烧面上热量释放速度, 单位为 kW/m^2), 火线强度 [I , 为火头前沿单位长度上热量释放速度, 单位为 kW/m 或 $\text{Btu}/(\text{ft}/\text{s})$]。

以下主要讨论火线强度。

早在 20 世纪 50 年代, 美国的物理学家勃兰姆 (Baram, 1954) 提出了火线强度的计算公式:

$$I = HWR \quad (1-11)$$

式中: I ——火线强度, Btu/ (ft/s);

H ——可燃物的热值, Btu/lb;

W ——有效可燃物负荷量, lb/ft²;

R ——火的蔓延速度, ft/s。

1983 年, 昌特莱尔将上式换算成当时公制单位的火强度公式:

$$I = 0.007 \quad HWR \quad (1-12)$$

式中: I ——单位为 kW/m;

H ——单位为 cal/g (1 cal = 4.18 J, 编者注);

W ——单位为 t/hm²;

R ——单位为 m/min。

1982 年, 亚历山德尔 (Alexander, M. E.) 提出了现行公制单位的火强度公式 (1-13)。该式与 1954 年的勃兰姆提出的公式相同, 即

$$I = HWR \quad (1-13)$$

式中: I ——单位为 kW/m;

H ——单位为 kJ/kg;

W ——单位为 kg/m²;

R ——单位为 m/s。

可燃物热值变化幅度约为 $\pm 10\%$, 通常把它以看做一个定值。可燃物消耗量变化幅度约为 10 倍左右。蔓延速度由于多种原因, 变化幅度较大, 约为 100 倍。这样, 火线强度变化幅度约为 1 000 倍。

用火焰长度 (或高度) 估测林火强度是一种常用的方法。1954 年, 勃兰姆提出利用火线强度计算火焰长度的公式 (1-14) 和利用火焰长度计算火线强度的公式 (1-15), 即

$$L_f = 0.45 \quad I^{0.46} \quad (1-14)$$

$$I = 5.67 \quad L_f^{2.17} \quad (1-15)$$

式中: I ——火线强度, Btu/ (ft/s);

L_f ——火焰长度, ft。

1980 年, 罗逊迈尔等人将 (1-14) 和 (1-15) 改写为公制