

林火气象 与预测预警

Forest Fire Weather And
Forecasting And Early Warning

赵凤君 舒立福 等◎编著

中国林业出版社

林火气象 与预测预警

Forest Fire Weather And
Forecasting And Early Warning

赵凤君 舒立福 等◎编著

中国林业出版社

内容简介

全书共分十一章, 主要介绍林火气象、林火预测预警、气候变化对林火的影响、林火对气象环境的影响等内容。

本书可作为有关森林防扑火专业方向的本科生、研究生的教学参考书, 也可作为各级扑火指挥员和扑火队员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

林火气象与预测预警 / 赵凤君, 舒立福著. — 北京:
中国林业出版社, 2014.12
ISBN 978-7-5038-7793-3

I. ①林… II. ①赵… ②舒… III. ①森林火-农业气象
②森林火-预测 IV. ①S16 ②S762.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 295536 号

中国林业出版社·生态保护出版中心
责任编辑: 刘家玲

出版 中国林业出版社(100009 北京西城区德内大街刘海胡同7号)
<http://lycb.forestry.gov.cn> 电话:(010)83143519
发行 中国林业出版社
印刷 中国农业出版社印刷厂
版次 2014年12月第1版
印次 2014年12月第1次
开本 889mm×1194mm 1/32
印张 8.5
字数 260千字
定价 48.00元

《林火气象与预测预警》

编委会

主 编：赵凤君 舒立福

副主编：王明玉 田晓瑞

编 者：刘晓东 田晓瑞 王明玉 舒立福

周汝良 文东新 王秋华 杨 光

单延龙 赵凤君

前言

PREFACE

气象条件与森林火灾的发生密切相关，林火气象就是林火与气象的相互作用和相互影响。气象是指天气现象，或者指大气中所发生的一切物理过程和物理现象。研究大气物理过程和物理现象的科学，称气象学。在森林可燃物和火源具备的情况下，森林能否着火，着火后能否成灾，主要取决于气象条件。防火季节（防火期）是指具备了发生森林火灾的火险天气的季节。火险天气就是有利于发生森林火灾的气象条件，如气温高、降水少、相对湿度低、风大、干旱等。因此，可以根据气象条件的变化预测预警森林火灾发生的可能性，以便做好防扑火准备。

林火预测预警是指依据一些客观要素，针对森林火灾发生、蔓延的有关趋势，采用一定的数理方法所作出的预测。林火预报是在天气预报的基础上进行的，天气预报的准确性直接影响林火预报的准确性。但林火预报有其本身的特点，要充分估计到地形、可燃物的干湿程度、可燃物类型特点以及火源等。所以天气预报不能代替林火预报，一般林火预报由气象站（局）结合林业部门共同进行。有条件的地方，可以设立气象观测站点，专门进行林火预测预警。

伴随着以计算机为代表的高新技术迅猛发展，在世界范围内，森林火险预测预报系统的应用已成为越来越多的有林国家林火管理的有力工具。国内外许许多多的林火研究工作者们不辞千辛万苦，从试验室到现场观测都做了大量的工作。他们通过不同的途径和方法，摸索到许多规律性的东西，获得许多有实用价值的宝贵经验，取得了可喜的成绩。林火预测预警的研究和应用在西方发达国家要比中国早至少30年。我国目前林火预报无

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

论是从研究角度还是从应用角度都与美国、加拿大等国有很大差距。

森林资源的持续稳定发展是世界各国关注的焦点,防御和控制森林火灾也受到各国的普遍重视。森林火灾的发生受到自然因素和社会因素的广泛影响,随着森林中人类活动的增加,森林火灾发生的危险性提高。林火的发生与干旱严重程度和持续时间有关,遭受过火灾的森林,对于干旱更加敏感。反复火烧,必然导致植物群落组成发生变化,向旱生群落方向发展。在全球气候变化的大背景下,森林火灾发生的危险性增加,表现为林火发生的地理分布区扩大,森林火险期延长。

从世界各国林火预测预警研究来看,都是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。随着人们对森林防火重要性认识的不断提高,林火预测预警业务系统也将逐步健全和完善。为更好地开展我国的林火研究工作,特别是林火预测预警,有必要吸取世界各主要国家森林火险等级系统研究的方法和特点。

本书是在为研究生多年授课讲义的基础上,查阅国内外最新研究成果及相关资料编写而成的。由林业公益性行业专项(201204507)、国家科技支撑课题(2011BAD32B05、2013BAC09B02、2012BAC19B02)资助出版。本书立足于扑火实际、通俗易懂、便于操作的原则,分别就林火气象、林火预测预警、气候变化对林火的影响、林火对气象环境的影响等内容进行了阐释。

各章编写人员如下:第一章由舒立福、单延龙编写;第二章由舒立福、王明玉编写;第三章由舒立福、田晓瑞编写;第四章由赵凤君、舒立福、单延龙编写;第五章由周汝良、文东新编写;第六章由赵凤君、田晓瑞、杨光编写;第七章由王明玉、杨光编写;第八章由赵凤君、舒立福、刘晓东编写;第九章由赵凤君、王明玉、刘晓东编写;第十章由赵凤君、田晓瑞、王秋华编写;第十一章由赵凤君、舒立福、王秋华编写。全书由赵凤君、舒立福负责统稿。

由于时间仓促,水平有限,本书的内容还不尽完善,一些观点方法难免存在错误和不足,恳请广大读者批评指正。

编者
2014年9月

目 录

第一章 林火行为 / 1

第一节 林火行为表述 / 1

第二节 特殊火行为 / 11

第三节 可燃物能量 / 16

第二章 林火气象 / 23

第一节 大气对林火的影响 / 23

第二节 气象要素对林火的影响 / 33

第三章 林火天气 / 45

第一节 气团与锋对林火的影响 / 45

第二节 气压系统对林火的影响 / 52

第三节 高空和地面天气形势对林火的影响 / 60

第四章 林火气候 / 73

第一节 气候对林火的影响 / 73

第二节 林火发生的季节 / 81

第三节 林火的时间分布及林火的气候地理分布 / 86

第五章 林火预测预警 / 89

第一节 林火预测预警类型 / 89

第二节 林火预测预警因子 / 92

第三节 林火预测预警方法 / 101

第六章 国内林火预测预警方法 / 109

第一节 早期预测预警方法 / 109

第二节 近期研制的林火预测预警方法 / 118

第三节 火发生与火行为预测预警 / 153

第七章 国外林火预测预警方法 / 161

第一节 火险预测预警 / 161

第二节 火险及火行为预测预警 / 164

第三节 林火预测预警系统 / 170

第八章 林火对大气和土壤的影响 / 181

第一节 林火对天气气候的影响 / 181

第二节 林火对土壤的影响 / 187

第三节 林火碳释放 / 189

第九章 气候变化对林火的影响 / 197

第一节 全球变暖背景下的气候异常 / 197

第二节 气候变化对林火的影响 / 202

第三节 气候异常与森林大火 / 208

第十章 林火气象站与观测 / 217

第一节 林火气象观测仪器设备 / 217

第二节 林火气象站 / 222

第三节 林火气象要素观测与调查 / 228

第十一章 森林火灾与林业碳汇 / 237

第一节 气候变化与我国林火发生趋势 / 237

第二节 森林火灾与碳排放 / 242

第三节 气候变化与林火防控对策 / 246

参考文献 / 249

第一章

林火行为



第一节 林火行为表述

林火行为是指林火的燃烧特性，即森林在从着火开始直至熄灭的整个过程中所表现出的各种特性。表征林火行为的指标主要有：林火种类、火蔓延速度、火强度、火焰高度、飞火、火旋风、火爆等。其中火蔓延速度、火强度和火焰高度是衡量林火行为的三个主要指标。

一、森林可燃物的燃烧

森林通过燃烧将由光合作用（同化作用）贮存的能量快速释放，并产生大量的烟尘、水气、灰分、木炭、二氧化碳（ CO_2 ）以及其他化学物质。氧气（ O_2 ）和温度是森林可燃物能否发生燃烧的

重要指标。

1. 氧气

氧气是森林燃烧过程中不可缺少的要素之一。正常条件下,空气中约含21%的氧气。通常情况下,燃烧1kg木材需 $3.2 \sim 4.0\text{m}^3$ 的空气,亦即需要纯氧 $0.6 \sim 0.8\text{m}^3$ 。众所周知,常温下氧化作用非常缓慢,而燃烧可以在高温作用下促使氧活化,这种活化氧很容易与可燃物进行化学反应。因此,在燃烧过程中,必须有足够的氧气。经验证明,空气中氧的含量减少到14%~18%时,燃烧就会停止。

在燃烧过程中,由于氧气供给程度不同,会产生两种不同情况的燃烧。

(1) 完全燃烧

燃烧后生成的产物不能再次燃烧,如二氧化碳、灰分、水蒸气等。完全燃烧能释放较多的热量^①。可用下式表示:



(2) 不完全燃烧

燃烧后生成的产物能再次燃烧,如一氧化碳、木炭等。不完全燃烧放出的热量较少。可用下式表示:



不完全燃烧放出的热量只有完全燃烧放出热量的 $\frac{1}{3.56}$ 。

2. 一定温度

森林燃烧需要有一定的温度。一定的温度不仅促使氧变为活化氧,并能使可燃物溢出可燃气体。当外界对可燃物进行加温时,起初温度上升缓慢,仅有大量水蒸气蒸发;当可燃性气体开始挥发且出现冒烟现象时的温度称为引火点;随后,可燃物升温加快,并伴随大量可燃性气体溢出;随着温度的进一步升高,可燃气体燃烧的火焰就会出现;火焰出现时的温度,称为燃点。

^① 1cal=4.184J,下同。

各种可燃物的燃点差异很大，一般干枯杂草的燃点为 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，木材的燃点在 $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ 之间，要达到这样高的温度，需要有外界火源。一旦可燃物达到燃点，就不再需要外界火源，依靠自身释放的热量就可以继续燃烧。

二、森林燃烧过程

森林燃烧过程，一般可划分为三个阶段。

1. 预热阶段

在外界火源的作用下，可燃物温度逐渐上升，其速度非常缓慢，随着水蒸气不断蒸发，产生大量的烟，部分可燃性气体挥发。此时可燃物处于收缩而干燥的点燃前状态，即为预热阶段。

2. 气体燃烧阶段

随着温度继续上升，愈来愈多的挥发可燃性气体被点燃，可燃物一旦达到燃点，温度便迅速上升，又使可燃性气体大量挥发，燃烧呈现黄红色火焰，并产生二氧化碳和水蒸气。

3. 木炭燃烧阶段

木炭燃烧即固体燃烧，是表面炭粒子燃烧，是由表及里地逐层燃烧，亦称表面燃烧。一般看不见火焰，但温度较高，最后剩下灰分，燃烧结束。

在森林的燃烧过程中，很容易看到这三个阶段。首先看到燃烧区内的树叶、杂草预热卷曲干燥，然后出现火焰，最后木炭燃烧。

三、林火行为表述

森林燃烧的火行为，是指从着火、发展、蔓延，直至减弱和熄灭这一系列燃烧过程中所呈现出来的燃烧特性。林火行为表现为火头蔓延速度的快慢、火场范围（周长或面积）的扩大、火强度增大及其他一些极端林火行为现象的发生，如飞火、火蔓延方向突变、火爆（三维空间的）等。国内外林火研究人员多年来致力于林火行

为特征的描述,在火场范围(周长或面积)、火焰特征、火强度、火头的蔓延速度等方面取得了一些显著的进展,其中火强度、火焰高度和火蔓延速度是林火行为的三大指标。

1. 火场形状

无风时火场的形状呈圆形,当有风时火场的形状呈椭圆形,长轴的方向顺着风的方向。1983年,安德森提出了风对林火蔓延影响的双椭圆形数学模型。

$$\text{面积: } S=1/2\pi bd^2(a_1+a_2)$$

$$\text{周长: } P=1/2\pi k_1 d(a_1+b)+1/2\pi k_2 d(a_2+b)$$

$$k_n=1+0.25M_n^2$$

$$M_n=(a_n-b)/(a_n+b)$$

式中: a_1 ——火尾部半椭圆主轴;

a_2 ——火前沿半椭圆主轴;

b ——副轴,火翼蔓延的最大距离;

d ——轴的比例,背火蔓延距离。

无风时可燃性挥发气体和燃烧产物垂直地上升,各边火焰产生的热量互不影响。但在有风的情况下,燃烧情况会发生很多变化:首先,下风边热量会被吹到上风边,使上风边燃烧得更加剧烈;其次,风会增加燃烧区内的空气,使火焰温度降低;同时,火焰被风吹后火焰长度增加,会加剧辐射和对流传热作用,使燃烧更加旺盛。

2. 火焰

森林可燃物在燃烧时产生的火焰,是燃烧过程中出现的微小而为数众多的炽热碳粒和三原子气体的热辐射现象。火焰发光的强弱与可燃物种类、空气氧供应量大小、可燃气体和空气的混合情况、燃烧温度和压力等有关。

(1) 火焰颜色

森林可燃物在燃烧空间中如果能得到足够的氧气,便能产生三原子气体,如二氧化碳(CO_2)和水(H_2O)。二氧化碳和水会发出

红橙光和红外线。如果燃烧时供氧不充分,局部缺氧区就会形成自由碳,它和部分灰粒一起在高温作用下,发出红光和红外线(表1-1)。

表1-1 不同温度下火焰的颜色和辐射强度

火焰温度 [℃]	火焰颜色	辐射强度 [W/m^2]
<400	暗	<41 000
500	略带红色	70 000
700	暗红色	180 000
900	樱桃红色	320 000
1000	鲜亮樱桃红色	530 000
1100	橙黄色	700 000
1200	鲜亮橙黄色	1000 000
1300	白色	960 000
>1500	耀眼白色	2 000 000

(2) 火焰形状

初始燃烧时,火的蔓延依靠火焰与可燃物直接接触。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。当最初引燃的可燃物烧完后,火焰呈轮胎状。无风燃烧时火焰是向上的,有风时或在坡地上时火焰会倾斜,增加对地面的热对流和热辐射,火的蔓延速度加快。

火焰长度可用下式算出:

$$F_L = 0.45 \times I^{0.46}$$

式中: F_L ——火焰长度, m;

I ——火线强度, kW/m。

(3) 火焰高度

火焰高度是林火行为中较易观测的指标。火焰高度指垂直于地

面的连续的火焰高度。根据火焰高度可以计算出火线强度，其计算式为：

$$I_L = 2.58h^{2.17}$$

式中： I_L ——火线强度，kW/m；

h ——火焰高度，m。

火焰高度愈高，火线强度就愈大，对树木的损害能力就愈强。

计算平均火焰高度用下式：

$$H = a (I_L / 250)^{0.5}$$

式中： H ——火焰高度，m；

I_L ——火线强度，kW/m；

a ——可燃物类型常数。草原或连续型植被的 $a=1$ 。

以上两公式因可燃物的种类、数量、结构、蔓延速度而不同，仅是近似值的计算公式。

3. 火强度

火强度是表征林火行为的重要指标之一，森林可燃物燃烧时的热量释放速度称为林火强度，火强度变化幅度为20~100000kW/m，相差5000倍。有些林火专家认为，当火强度超过4000kW/m时，林内所有生物都会被烧死，只有火强度小于4000kW/m时，林火才有生态学意义。森林火灾的火强度变化很大，一般将火强度分为：低强度火，火强度在750kW/m以下；中强度火，火强度在750~3500kW/m；高强度火，火强度高于3500kW/m。火强度包括火线强度和发热强度。

(1) 火线强度

火线强度是指在单位时间内单位火线长度上向前推进发出的热量。一般火线强度的计算采用勃兰姆（Byram）公式：

$$I_L = mcv$$

式中： I_L ——火线强度，kJ/(m·s)；

m ——单位面积内的可燃物质量，kg/m²；

c ——可燃物的平均发热量，kJ/kg；

v ——火线前进速度, m/s。

(2) 发热强度

发热强度是指单位面积上单位时间发出的热量。其计算公式为:

$$I_s = mc/t$$

式中: I_s ——发热强度, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

m ——单位面积内可燃物的质量, kg/m^2 ;

c ——可燃物平均发热量, kJ/kg ;

t ——燃烧持续时间, s。

(3) 火缘火的强度

火的外界边缘火的强度称为火缘火的强度。火缘火的强度可用下式大致推算出来。

$$I = HWR/600$$

式中: H ——可燃物的低燃烧热, kJ/kg ;

W ——单位面积林地上可燃物质量, t/hm^2 ;

R ——火头向前蔓延的速度, m/min 。

对生长着的活可燃物来说, 按50%含水率来计算其低燃烧热更为精确。虽然应用每种可燃物的实际含水率及其在复合可燃物中所占的比例来计算才能达到精度, 但在大多数情况下可采用低燃烧热的平均值来计算火缘火的强度。

4. 火蔓延速度

火蔓延速度指单位时间火的蔓延扩展距离。林火的蔓延速度可在野外用简便方法直接测量得到, 测量时应注意林火发展达到稳定后进行测量才有意义。林火的蔓延速度也可从经验方法或林火蔓延数学模型中获得。用经验方法需基于大量实测资料, 并把各种变数分类, 将数据制作成图表的形式使用。林火的蔓延速度通常包括线速度、面积速度和周长速度。

(1) 火线蔓延速度

火线蔓延速度以单位时间内火线向前推进的距离来表示, 即火线向前推进的速度。在英美的文献中多采用这种方法。由于火的

各边的蔓延速度不等，它包括火头前进的速度、火翼前进的速度和火尾前进的速度。一般以距离除以时间来计算，单位为m/min或km/h。不同可燃物类型，其蔓延速度有很大的不同（见表1-2）。

表1-2 可燃物类型与火蔓延速度的关系

可燃物类型	火潜在的蔓延速度
针叶林，具有枯落物层，死倒木少	低
针叶林，有大量死倒木和采伐剩余物	中等
针叶林，林下有灌丛或草类	高
草地，草本植物连续分布	极高

（2）面积蔓延速度

面积蔓延速度即火场面积除以时间，得出单位时间内的燃烧面积，以m²/min或hm²/h来表示。根据前苏联H.B.奥弗斯扬尼柯夫计算，顺风火头蔓延的速度与面积和周长关系，可用下式计算：

$$S=kt^n$$

式中： S ——林火面积，公顷（hm²）；

k ——该级林分自然火险系数；

t ——火灾燃烧持续时间，小时（h）；

n ——该级自然火险林分的火灾程度和火险季节（春、夏、秋）系数，无量纲。

不同火险期发生林火面积计算公式见表1-3。

表1-3 不同火险期发生林火面积计算公式

全年	$S=4.21t^{1.97}$
春	$S=3.04t^{1.53}$
夏、秋、冬	$S=1.99t^{1.39}$

(3) 周长蔓延速度

周长蔓延速度以单位时间内火烧周边增加来表示, 单位为 m/min 或 km/h。如, 前苏联文献中常用一昼夜内火场周边增加表示蔓延速度:

$$R=P/T$$

式中: R ——蔓延速度, km/24h;

P ——周边长, km。

T ——林火持续时间在一昼夜(24小时)所占的比例。

例如: 林火持续时间为3小时, 则: $T=\frac{3}{24}$ 。

此时, 若周边长 $P=2\text{km}$, 则: $R=\frac{2\text{km}}{\frac{3\text{小时}}{24\text{小时}}}=\frac{2\text{km}\times 24\text{小时}}{3\text{小时}}$
 $=16\text{km}/24\text{h}$ 。

简化的近似估算式为:

$$C=3vt$$

式中: C ——火场周长, m;

v ——顺风火头蔓延速度, m/min;

t ——火灾持续时间, min。

林火周长的增长速度, 火头、火翼、火尾增长速度不同。在风速 $3\sim 5\text{m/s}$ 的情况下, 火场周长各部分占周长总长的百分率分别为: 顺风火头50%, 侧方40% (20%+20%), 逆风火头10%; 无风时其百分率为: 顺风火头25%, 侧方50%, 逆风火头25%。

5. 影响火行为因素

森林可燃物的性质、空气因子、地形和温度因子等直接影响到森林燃烧时的火行为。

(1) 可燃物

可燃物包括活可燃物和死可燃物, 随植被的生长不断积累。人们可以通过采伐、清理采伐现场, 或其他土地管理活动来减少可燃物