

闪电引起森林火灾的预报

D.M.富奎 (Fuquay)

1.51 言

不同时间尺度森林火灾的预报是土地利用计划和森林火灾监测的基本部分。

本文介绍关于闪电引起森林火灾的预报的概念。起火预报模式，是以闪电点燃易燃材的物理过程为基础，在大面积场地条件上，用随机方法综合建立与触发火灾的概率相关。

森林燃料被闪电点燃，取决于许多变量和机会。建立这种闪电起火模式是假定由闪电放电引起的火灾的概念，在理论上是能够由必要而有限的物理资料来估计，特别是有关燃料和风暴特性的资料。这种模式的效用，在很大程度上取决于我们在野外环境中能否综合那些对点燃过程有很大影响的条件的能力。

分析闪电造成森林起火的因子如下：

- (1) 云—地闪电的面密度；
- (2) 风暴移动（引导层风）速度；
- (3) 降雨持续时间；
- (4) 易燃材的湿度；
- (5) 闪电的特性；
- (6) 易燃材的有效体密度。

下面把这些参数归为若干分量，以此构成闪电起火模式。图1即为模式的构思框图。首先考虑到森林燃料以及它是如何起火的；其次考虑影响起火概率的那些因子或改变这些因子的表达形式；最后考虑随时间变化的过程。因此，这种模式类似于一个从闪电风暴到森林起火的不断逼近的事件序列。

闪电起火模式仅估计在确定的条件下是可能因闪电发生的起火数目，而不包括统计上来的所有火灾概

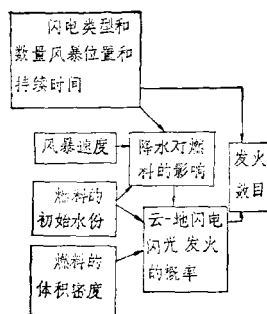


图1 闪电火灾起火模式的构思框图

率。

2. 闪电火灾的起火因子

2.1 燃料：闪电引起的火灾几乎都发生于易燃材（fine fuels）中，特别是在针叶树下落叶层以及所谓的“腐朽材”（punky wood）中。这些燃料归入美国国家火险等级规定（National Fire Danger Rating System）中1小时时滞（timelag）类中。由于在起火过程中烘热了燃料，所以燃料的水分（至少表面上的）在燃烧之前蒸发掉。单位体积燃料的热量取决于单位质量燃料的热量、单位体积燃料数量（体密度）以及燃料水分。用于模式计算的易燃材的体密度为 $0.032-0.192 \text{ 克/cm}^3$ 。表1为美国国家火险等级规定某些燃料模式的燃料体密度。

应指出，用于这种模式中的体密度，比用于火灾蔓延模式中的体密度大，因为后者的燃料体密度是相当大面积的平均值。

2.2 降雨和燃料水分：降雨对闪电起火具有重要影响，原因是它与闪电一起出现，并直接影响易燃材的

表1 美国国家火险等级规定(NFORS)某些燃料模式的体密度(据Brown1970)

	NFDRS 燃料模式	体 密 度 (克/cm ³)
苔 原	S	0.032
美国西部一年生草原	A	0.032
(热带或亚热带) 稀疏松林草原	C	0.064
美国西部长叶针叶林	U	0.064
短叶针叶林 (正常死亡)	H	0.128
短叶针叶林 (严重死亡)	G	0.128
阿拉斯加黑云杉	Q	0.128
蒿属植物草原	T	0.032
美国东部人工松林	P	0.064

水分含量。对易燃材来说，水分是影响火灾的一个主要因素。

在福斯伯格 (Fosberg, 1972) 理论中，描述了降雨是如何迅速导致易燃材水分的增加。他的理论表明，木材吸收水分是受到从表面到内部各层次输送水分速率的限制。因此，燃料的最终水分取决于燃料表面暴露于雨淋的时间，而不是降水的强度或者总降水量。此外，降水结束后，水分的丢失也是相当快的。因此在我们的模式中采用降水持续时间，而不用降水量或降水强度，并略去燃料水分的逐日转移影响(carryover effect)。用于模式中的降水持续时间也反映着闪电活动的持续期。

计算燃料的最终含水量 (FMF)：

$$FMF = FMI + (FMS - FMI) (1 - \xi e^{-t/\tau_m}) \quad (1)$$

式中：FMF 为燃料最终含水量；FMI 为燃料初始含水量；FMS 为表面湿润燃料的含水量； ξ 为依赖于 t/τ_m 的一个变量 ($\approx 76\%$)； t 为降雨持续时间； τ_m 为碎料中水分时滞。

统计降水持续时间和燃料水分需要了解风暴规模、速度和持续时间。通常以云所在高度的风速代表风暴速度。其他气象要素，如空气温度、湿度以及地面风在本模式中不予考虑。

在编制火灾起火的预报中，我们在风暴路径中考虑风暴范围 (雨区) 和闪电区这两种面积。因为从许多观测中了解到，在风暴雨区内外均有闪电。显然在雨区内部闪电起火概率比雨区外部要小。为统计这两种起火概率，需要知道雨区和雨区外干燥区的相对大小。

一个带电活动的风暴 (假定是一个圆形风暴) 沿气流移动，它的形状类似于一个带有跑道的运动场，包括闪电击发总的面积以及雨区，如图2。

雨区 (FI) 和无雨区 (FO) 面积计算如下：

$$FI = \frac{4DUS + \pi S^2}{4DUL + \pi L^2} \quad (2)$$

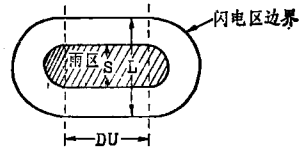


图2 闪电范围及用于起火模式的雨区示意图

而 $FO = 1 - FI$

式中：D 为闪电活动持续时间；U 为高空风速；S 为风暴范围 (雨区)；L 为闪电范围。

2.3 闪电活动：一次云—地闪电包括连续几个“回击”。“回击” (Return Strokes) 是其中一部分。闪电通道中的冲击电流，由于这种回击而产生闪光并成雷，这种云—地闪电约20%出现所谓“长续电流” (Long continuing current) 现象，它是最容易引起森林火灾的。图3上表明了对已发生火灾所观测的11次放电的连续电流持续时间。我们认为起火的概率大体上随闪电电流的持续时间线性地增加。此外图3下还表明了出现在蒙大拿12次风暴期间141次长续电流放电的持续时间的分布。在整个夏季期间，大约20%云—地放电是长续电流放电型。

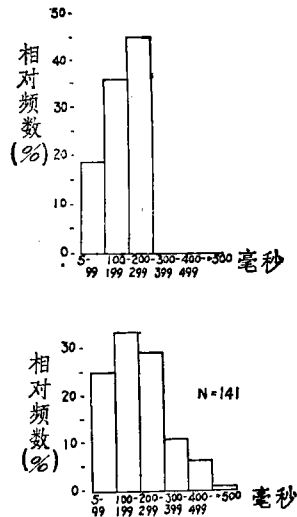


图3 引起森林燃料起火长续电流放电的持续时间 (毫秒)

闪电活动或以一个连续变量，或在美国国家火险等级规定中是一个指数值，输入到模式中。其来源可以是闪电的预报，或者是闪电的实际观测。1967年富奎指出，在雷达回波最大高度和闪电频数之间有很好的相关。随之他得出最大可能云—地闪电 (MLP) 的如下关系：

$$MLP(CG) = 700 - 185H_{max} + 12.3H_{max}^2 \quad (3)$$

式中MLP (CG) 为每天 6500 平方公里面积上最大可能云—地闪电次数; Hmax为以公里为单位的雷暴最大雷达回波高度。

选择 6500 平方公里的基地作为代表闪电 密度预报的最小面积。

表 2 中, 用于美国国家火险等级规定的闪电密度, 是通过闪电活动等级来表达的。

表 2 闪电活动等级表

闪电活动等级	雷暴日相对频率(%)	最大雷达回波高度(米)	闪电密度	
			云—地闪电次数/6500Km ² /天	包 括 范 围
1		无 雷 暴 活 动		
2	10	<8,500	20	1—25
3	35	7,900—9,700	40	10—75
4	35	9,100—11,000	80	50—150
5	20	>11,000	160	>150

2.4起火概率: 我们需要了解云—地闪电放电火灾的概率。上面已指出, 起火取决于燃料的特性、燃料中的水分以及闪电的特点。起火的基本标准是:

$$E_c \geq E_{ig} \tag{4}$$

式中 E_c 为穿过燃料体的闪电通道的能量密度; E_{ig} 为点燃一定体积易燃材所需要的能量密度。

现在我们需要一个具有能量密度 $E_c \geq E_{ig}$ 的云—地放电的概率表达式。

首先我们考虑易燃材的 E_{ig} , 据 安德逊 (Anderson, 1969) 的研究, 点燃一定量易燃材所要求的能量密度如下式:

$$E_{ig} = (\epsilon) (RHOB) (Q_{ig}) \tag{5}$$

式中 Q_{ig} 为每单位质量燃料的起火能量; RHOB 为燃料的体密度; ϵ 为效率因数, 对于易燃材而言, $\epsilon = 1$ 。上式可以由燃料水分 (FM) 和燃料体密度 (RHOB) 来表示:

$$E_{ig} = RHOB(170 + 6.20FM) \text{ 卡/cm}^3 \tag{6}$$

其次我们需要了解能充分引起起火的长续电流放电的能量密度的概率, 即:

$$P(\text{起火/长续电流}) = P(E_c \geq E_{ig}) \tag{7}$$

闪电通道中的能量密度 (E_c) 需要根据通道中的电加热、通道半径以及放电持续时间来计算, 即:

$$E_c = Q_c d / \pi r^2 \times 10^{-3} \text{ 卡/cm} \tag{8}$$

式中 Q_c 为通道能量; d 为放电持续时间 (毫秒); r 为通道半径 (cm)。

根据金氏 (King, 1962) 等人研究有关闪电电流和通道尺寸所进行的工作, 假定通道半径等于 1cm, 则有:

$$E_c = 0.034d^{1.1787} \text{ 卡/cm}^3 \tag{9}$$

有关“长续电流”持续时间的统计是取自蒙大拿西部的观测 (Fuquay, 1974)。我们应用了 β 概率分布 (Mielke和Johnson, 1974) 从而给出能预期产生一种超出 E_{ig} 的能量的连续电流的概率:

$$P(E_c > E_{ig}) = [1 + (E_{ig}/\beta)^\theta]^{-\alpha} \tag{10}$$

式中 $\alpha = 1401.647, \beta = 2822.164, \theta = 1.442$

点燃的标准就是已知的长续电流现象的有效能量大于燃料起火所需要的能量。由于消耗有效能量, 所以必定起火。我们把这称之为单位长续电流现象的起火概率。它是燃料水分和燃料体密度的函数, 由 (5) 和 (10) 式可以得到:

$$P_{ig} = \left[1 + \left(\frac{RHOB(170 + 6.20FM)}{\beta} \right)^\theta \right]^{-\alpha} \tag{11}$$

图 4 给出了作为燃料水分的函数的方程式 (11) 的三条曲线。

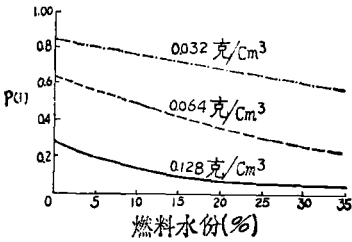


图 4 随燃料体密度和燃料水分而变化的燃料起火概率

因为闪电输入是取决于云—地放电数目而没有考虑到持续电流的存在, 所以我们必须把“单位持续电流”的概率变为“单位云—地放电”的概率。这可以通过把它乘以持续电流与云—地放电的比值来得到。对于落基山山区雷暴来说, 比值大约是 1:5。

3. 模式结构

在上面我们讨论了闪电活动等级、易燃材随降雨而变化的特性以及单位云—地放电的起火概率。图 5 是用于计算单位面积可能起火数的流程图。今对框图进行编号, 并讨论。应指出, 1、2、3、4 是输入, 15 是输出。

(1) LAL——闪电活动等级, 采用预报值或直接观测来确定。

(2) 高空风速——引导层的风速。

(3) FMI——初始燃料水分 1 小时时滞。

(4) RHOB——枯枝落叶层、下层落叶层、杂草以及可能被电击的其他易燃材的体密度。这里不采用易燃材体积的平均密度输入统计, 而用林下“抽样”体密度。

(5) 风暴大小——由经验确定的可能降水范围的直径。

(6) 降雨持续时间——风暴大小 (5) 除以高空风 (2), 给出地面某一地点的降水持续时间。

(7) FMF——燃料的最终水分。

(8) 闪电活动持续时间——在闪电和降水出现期间，由经验确定其时间。

(9) 闪电范围——可能有闪电的总面积。

(10) $P(I)_i$ ——雨中起火的概率。

(11) $P(I)_o$ ——雨区外部起火的概率。

(12) FI——有降雨的闪电区域面积。

(13) FO——不降雨的闪电区域总面积。

(14) 总合框—— $(\text{雨区}) \times (\text{雨中起火的概率}) + (\text{雨外部分}) \times (\text{雨外起火概率}) = \text{每次持续电流起火概率}$ 。

(15) 每 6500 平方公里的火灾数——每 6500 平方公里（得自 LAL）云-地放电的预计数乘以 0.2；然后再乘以任一给定的持续电流放电触发燃料的概率，所得结果就是每 6500 平方公里火灾发生的数目。

上述模式只是初步的，应随着现场使用而改善。由于缺少关于木质材 (Woody fuel) 被闪电起燃的

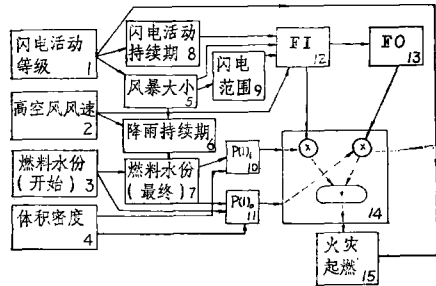


图 5 计算闪电引起森林起火的流程图
情报，模式的改进受到限制。我们将进一步试验该起火模式，并随之改善闪电定位系统和火灾位置的测量。

王敦瑞 黄朝迎 摘自《5th National Conference on fire and forest meteorology》
March 14-16, 1978 宁宁校