

# 林火引起空气运动的数值模拟<sup>\*</sup>

邹光源 刘公波 胡志晋

(中国气象科学研究院,北京 100081)

## 提 要

研究林火行为同空气运动的相互作用对扑灭林火十分重要. 文章建立了强温度扰动下空气运动的二维非线性准弹性模式, 模拟了林火在静稳大气、环境风垂直切变和地面风促进延烧等三种条件下引起的空气运动场、温度场的结构和演变过程, 得到了合理的结果. 文章还分析了这三种条件下空气运动和热量输送的差异以及地面回流风的特点.

关键词: 林火; 数值模拟; 准弹性模式.

## 1 引 言

研究林火的空气运动对于认识林火延烧规律, 指挥扑灭森林大火有重大的意义. 研究林火行为和空气运动的相互作用, 可以通过火场现场观测和野外点火试验进行. 现场观测受人员视野、观测设备及安装、交通条件和火区地形及火区局地环流复杂程度的限制. 目前大多数观测结果仍限于对目测资料的事后定性分析上. 点火试验可以事先布置观测网, 但仍存在与现场观测同样的技术问题. 数值模拟用于研究林火区空气运动及其与林火的相互作用. 利用已知的大气运动的物理和数学模型, 可以模拟并解释不同条件下火区周围的空气运动与林火行为的关系, 为森林防火和扑救森林大火提供一种经济、安全、快捷的研究和试验方法.

## 2 模拟林火区空气运动的二维模式

林火区热空气上升的原理与大气对流相仿, 由于热气团与环境温差产生的浮力造成垂直上升运动. 但林火与对流大气的气象要素场分布有很大不同. 很多观测表明森林大火的火线宽度大多在  $10^1 \sim 10^3 \text{m}$  量级, 火区的气温很高(一些文献估计在  $310^\circ\text{C}$  以上\*\*), 与环境气温的梯度非常大, 很多文献称之为“火锋”. 一些适用于大气对流模拟的假设(扰动量  $T', \rho', P' \ll$  背景场  $T_0, \rho_0, P_0$ ) 在林火区空气运动的模拟中不再成立. 对林火区空气运

\* 本文得到国家自然科学基金的资助.

1993-08-17 收到, 1993-11-10 收到修改稿.

\*\* 贾春松等. 论特大森林火灾区的温压风场. 1987年春季大兴安岭特大森林火灾行为调查研究报告. 1990. 2.

动的模拟在计算稳定性方面比大气对流模拟要求更高。

本文采用非静力平衡的流体动力学方程形式,不考虑水的相变。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - w \frac{\partial u}{\partial z} - c_p \theta_v \frac{\partial \pi}{\partial x} + D_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - w \frac{\partial w}{\partial z} - c_p \theta_v \frac{\partial \pi'}{\partial z} + \left(\frac{\theta_v}{\theta_s} - 1\right)g + D_w \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta}{\partial x} - w \frac{\partial \theta}{\partial z} + D_\theta \quad (3)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -u \frac{\partial q_v}{\partial x} - w \frac{\partial q_v}{\partial z} + D_{q_v} \quad (4)$$

$$\beta^2 \frac{\partial \pi}{\partial t} = -u \frac{\partial \pi}{\partial x} - w \frac{\partial \pi}{\partial z} + \frac{1}{\theta_v} \frac{R_d \pi}{c_v} \cdot \frac{d\theta_v}{dt} - \frac{R_d \pi}{c_v} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + D_\pi \quad (5)$$

$$\theta_v = \theta(1 + 0.608q_v)$$

$$\frac{d\theta_v}{dt} = (1 + 0.608q_v) \frac{d\theta}{dt} + 0.608\theta \frac{dq_v}{dt}$$

$$\pi = (p/p_0)^{\frac{K_d}{\gamma_p}}, \pi' = \pi - \pi_0, \frac{\partial \pi_0}{\partial z} = \frac{-g}{c_p \theta_s}$$

引入  $\pi'$  能够提高运动方程中  $w$  的计算精度。

方程组中采用了胡志晋、邹光源的准弹系数  $\beta^{[1]}$ 。当  $\beta = 1$  时即为完全弹性模式,本文取  $\beta = 4$ ,可以加大计算时间步长,增加稳定性。为了进一步保证  $\pi$  场的稳定性,在计算  $\pi$  时对运动场作了平滑。

上述方程中右边最后一项  $D$  为次网格湍流项,采用一阶闭合假定,其湍流系数为形变张量和理查逊数的函数。

边界条件:对垂直于侧顶边界法向速度用辐射边界;其它量的出流用迎风格式,入流用法向导数为 0;顶边界还采用海绵边界;底边界的  $w = 0$ 。

差分格式:平流用迎风格式,二阶导数用中心差。对于运动方程及连续性方程,采用时间步长分离法,含有声波的项采用短时间步长,其余项采用长时间步长。

### 3 静风背景下林火引起空气运动的模拟

在静风背景下,林火区的空气运动完全由林火驱动。

假设火线垂直于模式平面,火线宽度 100m,燃烧造成的火源处平均气温达到 300℃。将林火的燃烧分成 3 个阶段:起燃阶段、旺燃阶段和消火阶段。起燃阶段火源处气温不断升高(假定为线性增加),从常温(环境温度)升到 300℃。旺燃阶段火源处气温维持 300℃ 的高温,直到消火阶段气温开始线性下降至常温结束。假定三个阶段各历时 10min。模拟的水平范围 4km,垂直高度也取 4km,格距 100m,时间步长 1s。

图 1 是静风背景下各阶段的模拟结果。当温度增加到 166℃ 时(300s),林火驱动的空气环流已经形成。在地面及中空(2.3km)有两个强辐合区,而两个强辐合区之间的水平运动很弱(2m/s)。地面辐合区较弱,水平风速较小,最大为 8m/s。中空辐合区较强,最大风

速约 12m/s. 高层为强辐散区, 最大水平风速达 39m/s. 林火造成的强烈上升运动一直延伸到模式顶, 表明在没有背景风场的情况下林火驱动的环流不能在较低的高度上向水平方向大量输送能量. 燃烧释放的能量主要靠垂直运动输送. 垂直上升气流和两侧的补偿下沉运动以及中低空的辐合、高空辐散, 构成了林火区的环流形式, 在无背景风场的条件下这种结构是对称的.

在大型林火期间常观测到对流运动\*, 这些对流的目测形态取决于环境风场, 在静风或风力很弱时呈塔状, 并有类似于原子弹爆炸的蘑菇状烟(云)顶. 模拟的温度场呈带“帽”的塔状, 与观测一致. 高温区在低层也向周边扩展, 这是由于湍流扩散的结果, 而在高层的蘑菇顶, 则主要是水平平流辐散造成的.

在旺燃阶段(图 1b)地面辐合增强, 最大水平风速超过 10m/s, 但辐合范围有所缩小, 辐散区更接近模式顶, 辐散更强.

在消火阶段(图 1c)高层保持辐散, 中低层仍为辐合. 但流场和温度场的对称性已经破坏. 这虽然同模式的稳定性有关, 但从物理上讲林火这种强烈扰动对空气运动的作用是复杂的, 非线性的. 方程(1)、(2)中的  $c_p \theta_v \frac{\partial \pi}{\partial z}$  和  $c_p \theta_v \frac{\partial \pi}{\partial x}$ , 方程(5)中的  $\frac{R_d}{c_p} \pi \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$  都是非线性的, 而在一般大气模式中这些项中的  $\theta_v$ 、 $\pi$  都可用  $\theta_w$  和  $\pi_w$  来近似而线性化. 所以一个小的扰动(或误差)可能引起流场和温度场的显著变化. 从图可见, 左侧基本上是一个气旋性环流, 地表为辐合. 右侧则由上下两个反气旋环流组成, 地表附近的流场比较复杂, 辐合不明显.

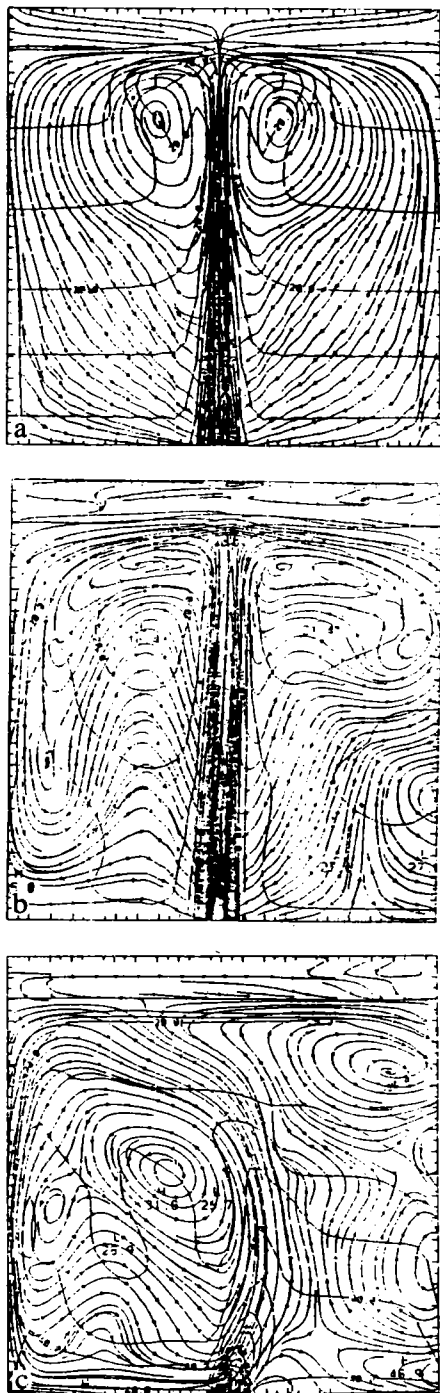


图 1 静风背景下的温度场和流场  
(a)300 秒 (b)900 秒 (c)1500 秒

\* 翁道火, 居恩德. 1987 年春季大兴安岭特大森林火灾火行为调查报告. 1990. 2.

### 4 有垂直风切变的林火区空气运动模拟

存在水平运动的环境场可以向水平方向输送燃烧释放的能量,能量输送不必完全依靠林火驱动的局地环流完成.

模拟的设计除水平风场外与静风背景下的模拟完全一致.表1为水平风场的垂直分布:

表1 水平风场的垂直分布

$\rho$ (hPa)	924	850	760	700	600	564
$u$ (m/s)	0	0	2.0	5.0	8.0	12.0

从图2可见,在起燃阶段(图2a)环流基本呈对称形态,但上升运动是倾斜的,火区两侧正、负涡的中心高度不一致,上风方(左侧)高于下风方(右侧).垂直运动中心和环流中心与静风背景下的模拟相比都明显降低.温度场仍存在“蘑菇”顶,但已变得不太清晰.到旺燃阶段(图2b),中低空的水平运动受林火强迫显著增强,地面最大风速达到12m/s(6级风),上升运动比静风背景下的模拟明显减弱,并在低层出现一对很强的上升、下沉气流,环流的对称结构已不存在.正涡中心已移到负涡中心的上空.地面辐合区仍很宽广.从温度场看,能量已经不能输送到高层,蘑菇顶已不存在,变成倾斜的“烟羽”状.到消失阶段(图2c),垂直对流和温度扰动已限于较低的高度,下风方的负涡中心也进一步降低.地面维持辐合气流.

由此可见,水平风的垂直切变会显著影响能量的输送.随着林火燃烧的增强,林火驱动的环流加强了中高空的水平运动,使得能量的水平输送更强,而垂直输送则被限制在较低的高度(旺燃阶段在2km以下,消火阶段在1.5km以下).风切变也破坏环流的对称结构,使对流倾斜,这与很多观测是一致的.

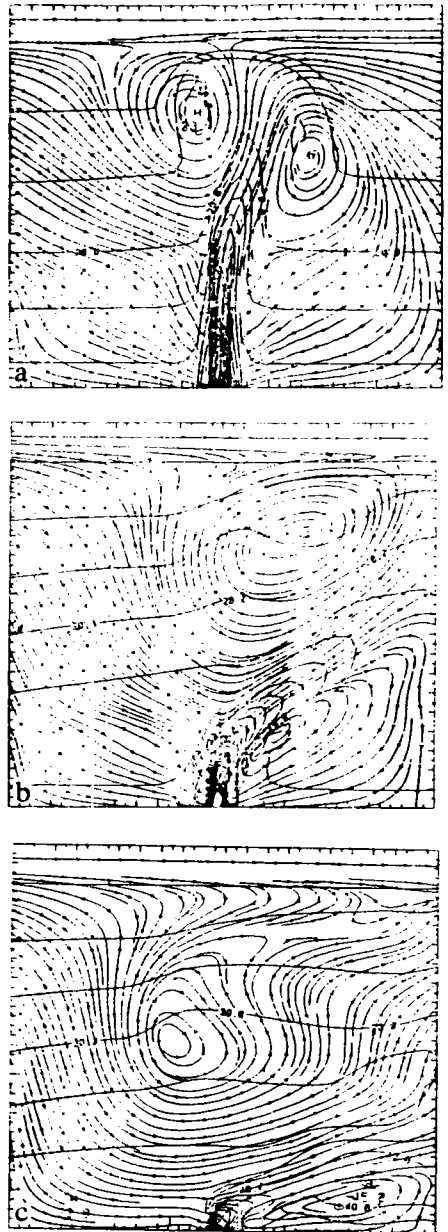


图2 风切变背景下的温度场和流场 (a)300秒 (b)900秒 (c)1500秒

## 5 林火延烧时空气运动的数值模拟

前两个模拟的火源都是静止的,只能描述短期的燃烧过程,与现实中的林火行为有很大差异.森林大火在燃烧过程中,地面的环境水平风有很重要的作用,它可以推动明火的蔓延,使大火长时间维持.

延烧火模拟的设计除地面火源和初始风场外,其它要素场与前两个模拟相同.地面火源随环境风向前运动(本例中为 $1\text{m/s}$ ),移行前方的气温线性增加直到火源移到,温度升到最高点(假定为 $300^\circ\text{C}$ ).火源采用单点火源(一个格点),代表垂直于模式平面的一条火线.当火源前方格点升温至 $300^\circ\text{C}$ 时,前方格点即成为新火源,旧火源不再有能量供给,自行消亡.模式水平范围 $10\text{km}$ ,垂直范围 $5\text{km}$ ,格距 $50\text{m}$ ,时间步长 $0.5\text{s}$ .表1为背景水平风场的垂直分布.风的垂直切变比第四节的风切变弱.

表2 背景水平风场的垂直分布

$p(\text{hPa})$	924	850	766	700	600	564	500
$u(\text{m/s})$	1	1.5	2.5	3.0	6.0	8.0	11.0

从图3可见,在起燃阶段( $300\text{s}$ ,图3a),流场和温度场分布同风切变例十分相近.在旺燃阶段( $900\text{s}$ ,图3b),基本图象也还是接近的.由于本例中模式范围已从 $4\text{km}$ 扩展为 $10\text{km}$ ,所以下方风方显示出更多的扰动:除紧接火源的负涡外还有一对正负涡,正涡偏于低层.到 $1500\text{s}$ 时,延烧例(图3c)的温度场变化较少,说明林火蔓延处于准定常状态.而风切变例(图2c)则有很大的减弱.

从图3(b)、(c)运动场和温度场可以看到火源上空狭窄的上升区内场的分布是不均匀的,从低空到模式顶存在 $4\sim 5$ 个扰动中心,这似乎表明能量向高层的传送是



图3 背景风场下林火延烧的温度场和流场  
(a)300秒 (b)900秒 (c)1500秒

一股股的,并不连续.这种垂直方向的波动成因有待进一步分析和研究.

观测表明在火线移动的前方常有回流风,在回流风区点火可以预先烧出防火道,起到以火攻火的作用.因此对移行火线前方的回流运动强度和尺度的研究对扑灭森林大火有重要的意义.

模拟显示出在火线前方地面出现回流运动(图3),回流的水平范围随时间不断减小,300s时为3.8km,900s减小到3.6km,到1500s时减小到1.8km.而2m/s以上的回流风尺度更小,从300s时的900m减小到1500s时的300m.所以以火攻火的设想尚需进一步研究.

致谢:本文在完成过程中得到了穆家修同志的支持!

### 参 考 文 献

- 1 胡志晋,邹光源.大气非静力平衡模式和弹性适应.中国科学(B辑),1991,(5):550~560.

## NUMERICAL SIMULATION OF AIR MOTION ASSOCIATED WITH FOREST FIRE

Zhou Guangyuan Liu Gongbo Hu Zhijin  
(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

A Study of the interaction between the behaviour of forest fire and associated air motion is very important for extinguishing the fire. A two-dimensional non-linear quasielastic model of air motion associated with severe temperature disturbance was developed. The structure and evolution of air motion and temperature fields associated with forest fire under three kinds of conditions were simulated, which are calm atmosphere, vertically sheared wind and spreading fire with surface wind. The results were reasonable. Differences of air motion and heat transfer under these conditions were investigated and the surface reverse wind was analyzed.

**Key words:** Forest fire; Numerical simulation; Quasielastic model.