

GIS支持下森林火场蔓延的空间模拟*

朱启疆 高峰¹⁾ 张振威²⁾

(北京师范大学资源与环境科学系 北京 100875)

摘要 林火扩展具有时间和空间特征。对火场模拟必须建立在空间背景数据库之上,即在地理信息系统和遥感技术的辅助下完成。森林火灾的发生发展有内在和外在因素的影响,内在因素包括了可燃物类型、可燃物湿度、地形,考虑这些因素形成了像元尺度植被燃烧基本历时图;外在因素主要是气候的影响,文中利用生成的植被起火概率图控制像元是否起火。在火场扩展中将 Rothermel 模型和经验模型结合使用,并考虑了坡度和风向带方向的因素的影响。最后利用迷宫算法在计算机上实现了火场在地理信息系统支持下的空间蔓延动态模拟。

关键词 林火蔓延,地理信息系统,遥感应用,计算机模拟

1 引言

森林作为陆地生态系统重要单元和地球最贴身的保护层,它的存在与破坏正日益受到人们的关注。火灾是造成森林破坏的主要方式之一。全世界森林因火灾造成的损失每年约为1%,林火多发国家可达2%—8%。近年来全球普遍变暖,诱发干旱连年,这反映了对林火蔓延模型需求的紧迫感。

利用遥感技术监测火灾,在国外起始于60年代初期的航空红外探测,对火行为发展的实质性研究要稍晚一些。初期的研究主要集中于建立自然因素与火行为关系模型^[1,2],分析林火行为特征。由于技术的限制,直到1979年 Kessel 才首次考虑了空间因素,并将空间的复杂性应用于林火扩展模拟之中。进入80年代,随着地理信息系统技术的发展,对林火行为模拟研究逐渐转向空间范围的定量模拟,在地理信息系统和遥感技术的支持下实现火场扩展的理论和经验模拟³⁾,并已取得了实质性进展,逐步走向实用化。

国内在林火行为研究中也做了不少工作,发展了森林火灾蔓延速度和强度的模型,但在空间上模拟林火行为的工作开展较晚,距离实用化还有一定的距离。本文的工作以四川省凉山州实验区为例,在植被类型、数字地形高程、森林郁闭度、森林地位级、森林龄级、水系、公路等空间背景库支持下,考虑地形坡度和风向的影响,建立了林火行为空间扩展模型,成功地对火场蔓延进行了空间模拟。

* 国家自然科学基金资助项目(项目编号为49070049)。参加本项研究工作有于芳,武乐清、陈良赞、李俊英、马东平等,在此一并致谢。

1) 高峰,博士生,工作单位为中国科学院南京地理与湖泊研究所。

2) 张振威,研究生,现工作单位为保定师范专科学校。

3) Yegang Wu *et al.* A spatially explicit process-based model for fire spread in a rocky mountain foothill landscape. CPGIS conference, 1992.

收稿日期:1994年11月21日;收到修改稿日期:1994年12月12日

2 森林火场蔓延模型

森林火场蔓延模型研究一直沿着林火燃烧温度场、热量平衡和林火燃烧特征 3 个方向发展,其中热量平衡的火场扩展模型进展最快,有希望走向实用化。

2.1 温度场的林火蔓延物理模型

火在森林中的扩展与热的传播方式有密切的关系。基于温度场的林火蔓延物理模型,根据热传导、热辐射和热对流规律,以温度场来描述火势的基本状态,用分布参数系统方法导出火势蔓延的数学模型,进而对林带一维系统的模型进行计算,它是一个分布参数的物理模型,其中各参数物理意义明确,可通过实验或参数识别法来实际确定。

2.2 林火燃烧特征的火蔓延模型

森林燃烧系统是一个复杂的动态系统。火蔓延速度、火强度和火焰长度是描述森林火场的 3 大定量指标,其中蔓延速度最为重要。我国林火专家在这 3 个指标的量化上做过不少工作,得出了一些经验和理论模型,用以计算林火蔓延速度、面积、强度以及火焰长度。

2.3 能量平衡的 Rothermel 模型

Rothermel 模型是一个半经验模型,它把物理参数(如燃料物尺度、温度等)同物理变量结合起来,产生了蔓延速度公式。本文的空间动态蔓延速度模型就是以其为基础而加以改造的。

Rothermel 模型的物理基础是火场的辐射传输过程。它应用能量平衡原理导出平均温度微分方程,其中的扩展速度作为一个参数。

取一隔离体,应用能量平衡方程,可建立微分方程:

$$\nabla \cdot q = -\left(\frac{\partial D}{\partial t}\right)$$

式中: q 为从控制体向环境的传热通量; D 为单位体积可燃物净吸热量; t 为时间。

$$D = \delta_{be} \cdot Q$$

式中: δ_{be} 为有效体积密度, Q 为单位质量可燃物净吸热量。

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -\left(\frac{\partial D}{\partial t}\right)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{\partial D}{\partial x} = v \cdot \frac{\partial D}{\partial x}$$

如果略去与主蔓延方向相垂直的侧向的热交换,积分上式并整理后得到:

$$v = \frac{I \cdot \xi \cdot (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}} \quad (1)$$

式中:

V 为林火蔓延速度(米/分); I 为火焰区反应强度(千焦耳/分·米²); ξ 为林火蔓延率(无因次); Φ_w 为风速修正系数; Φ_s 为坡度修正系数; ρ_b 为可燃物的体密度(千克/米³); ε 为有效热系数(无因次); Q_{ig} 为点燃单位质量可燃物所需的热量(千焦耳/千克)。

上述方程在实际应用中要求输入参数较多,参数间又有嵌套关系,大部分地区不具备预报这些参数的条件。本研究对上述模型进行了部分修正,加入了经验公式,使其更为实用。

尽管(1)式表达很复杂,但方程可以看作是 4 种环境参数的变量,即可燃物类型 F 、可燃物湿度 M 、风速 W 和地形坡度 T 。

$$V = f(F, M, W, T) \quad (2)$$

(2) 式中, 风速和坡度两个因子对火场蔓延的影响具有方向性。结合(1)式可以得到:

$$V_{\max} = V_{base} \times (1 + \Phi_w + \Phi_s) \quad (3)$$

式中:

V_{base} 为不受风速和坡度影响的火场蔓延速度。它是 F 和 M 及地形的变量, 比较(1)式和(3)式可得:

$$V_{base} = \frac{I_R \cdot \xi}{\rho_b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}} = f(M, F, T);$$

Φ_w 为风速对火场蔓延速度的影响(顺风方向);

Φ_s 为坡度对火场蔓延的影响(上坡方向);

V_{\max} 为火场蔓延最大速度。

由(3)式可见: 火场的扩展方向是在风和坡度综合影响下形成的火场最大蔓延速度的方向; 没有风速和坡度的影响, 火场将以 V_{base} 的速度均匀扩展。带有风速和坡度影响的情况可以用图 1 中的椭圆来描述, 椭圆长轴 O_1A 代表了 V_{\max} , 即火场蔓延主方向, 而 O_1C 和 O_1C' 代表了 V_{base} , 即火场基本扩展速度。当要确定任意方向上火场的扩展速度时 (O_1x), 可使用下面的公式(4)¹⁾:

$$V_\theta = \frac{V_{base}}{1 - \left(1 - \frac{V_{base}}{V_{\max}}\right) \cdot \cos\theta} \quad (4)$$

θ 为 O_1x 与 O_1A 间的夹角。

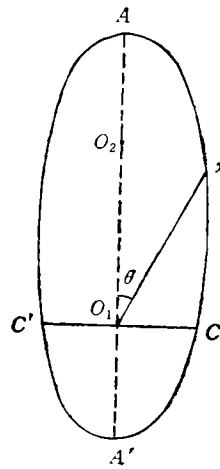


图 1 椭圆模型

Fig. 1 An ellipse model

3 火场扩展模拟

3.1 凉山州实验区概况

实验区位于西昌市附近西昌与盐源县交界处, 北纬 $27^{\circ}40'$ — $27^{\circ}46'$, 东经 102° —

1) Jianping Xu. Estimating the spread of Large fires using GIS and RS. CPGIS conference, 1992.

102°08′, 面积 101.1km²。该地区处于雅砻江和安宁河两大水系之间的磨盘山一带, 海拔最低处为 1180 米, 最高处为 2720 米, 年平均气温 14°C—18°C, 冬暖夏凉, 干湿季分明, 为典型的季风型气候, 冬半年降水量仅占全年降水量的 10% 左右, 森林以草类—云南松林, 干性栎类—云南松林为主, 林缘及疏林地多为密油枝和易干燥的禾本科及部分菊科植物。试验区植株高大, 生长密集, 含纤维多, 干枯后不易腐烂, 加之林下杂乱物堆集, 干旱季节容易着火燃烧。这里山体高大, 森林连片, 林地面积大, 一旦引燃, 不易扑灭。因此, 这里是凉山州的重点防火区域之一。

实验区的地形、气候及植被条件较为典型, 同时交通便利, 资料翔实、丰富, 是进行森林火场蔓延空间模拟研究的理想地区。

3.2 试验区背景数据库的建立

试验区背景数据基本资料有 1:5 万地形图、林相图, 以及各类调查统计资料, 由这些基本资料产生了背景数据库中的数据。

从 1:5 万地形图上清绘水系、政区界线、交通图、等高线 4 种要素, 由于研究区地形起伏剧烈, 等高线密集, 因此清绘前先将地形图在复照仪上照像放大 3 倍, 然后在放大的照像底片上清绘等高线, 采用手扶数字化方式输入高程, 利用 ARC/INFO TIN 功能生成数字地形高程, 并形成了坡度、坡向图。

从林相图上清绘出以森林小班为单位的图斑并扫描数字化, 每个图斑均按树种、龄级、郁闭度、地位级等因子, 进行统一编码、存贮, 需要时可形成各类林相专题图。

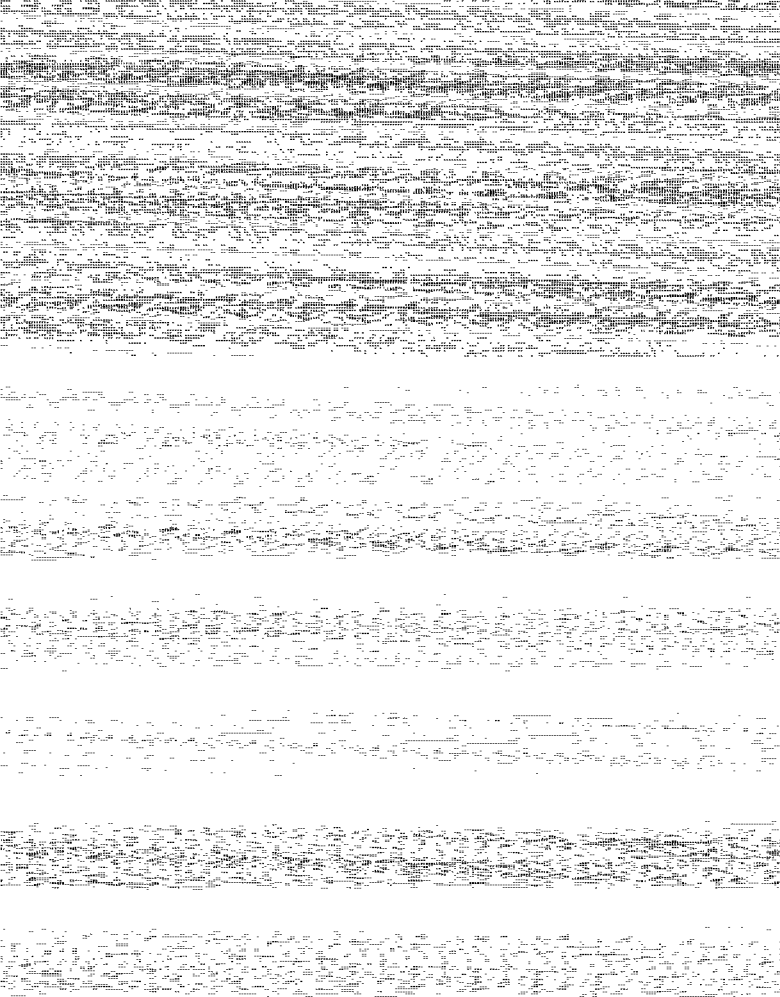
所有图件均转为栅格图像, 经过严格配准后加入背景数据库中, 最终形成图像栅格, 像元大小为 25 米 × 25 米, 图幅范围大小为 340 行 × 540 列(图版 I 图 2)。

3.3 技术路线

从前面的模型中可以看出, 火点向各个方向扩展的速度取决于 V_{base} 的大小, 以及 Φ_w 和 Φ_s 的作用。

V_{base} 是可燃物类型、可燃物湿度和地形的变量。可燃物的湿度与气候、地形有关。气候则因起火季节而异, 同一位置的可燃物在冬季可能燃烧而在夏季则不会燃烧, 这对于火场最终蔓延扩展具有较大影响。因此在计算火场空间扩展前, 需要形成一张像元燃烧可能性的概率图, 表示一旦发生火灾, 该像元点被点燃的可能性大小。起燃阈值取决于当时的季节及气象条件, 可以由以往发生火灾的经验建立起对应的关系。

植被起火概率有别于火险区划, 前者强调火点蔓延并起燃的可能性, 只与自然因素相关; 后者强调火灾发生的可能性, 除与自然因素相关外, 在很大程度上还要考虑到人类的活动影响。植被起火概率与多种自然因素相关, 如植被类型、森林郁闭度、地形(海拔高度、坡度、坡向)等。试验区内云南松是一种易燃树种, 其起燃的概率要大于灌木林地; 又如森林郁闭度愈大, 林内光线愈弱, 温度愈低, 蒸发小, 湿度大, 不易燃烧, 反之则发生火灾的可能性愈大。再看地形因素, 随着海拔高度的增加, 温度降低, 蒸发变弱, 湿度增大, 发生火灾的可能性降低, 此外阴坡和阳坡对火点起燃也有不同的影响。而河流、大公路、防护林对火场蔓延有阻滞作用。



在给定起火点的位置坐标, 起火概率阈值, 风 Φ_w 及方向, 以及模拟扩展的时间后, 系统即可以对一定时间范围内的火场扩展进行动态模拟显示, 并可按行政或林相等进行燃烧面积统计。图 5 所示是以数据流方式表示的森林火场扩展计算机模拟的技术路线。

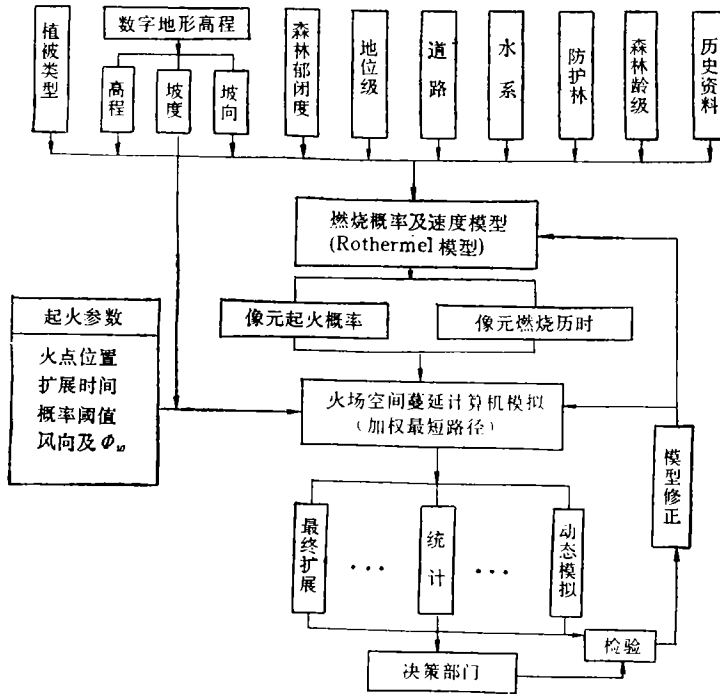


图 5 森林火场蔓延计算机模拟流程

Fig. 5 The flow chart of computer simulation for forest fire spread

下一步利用历史火灾来检验系统模拟, 利用历史资料(遥感、气象、统计等)确定风速对火场蔓延速度的影响; 确定各类因素与基本扩展速度的定量关系。我国林类差异大, 纯物理或纯经验的模型都有各自的局限性, 这种半经验的模型可以充分利用获取的空间及统计资料, 建立特定地区的相关模型, 使系统更趋实用而准确。

一旦发生火灾, 系统允许使用由遥感获取的蔓延范围作为输入进行后期蔓延模拟, 若是模拟有误时, 系统可以立即编辑调整设定新的扩展范围, 由相对准确的范围再次扩展。

3.4 计算机模拟实现

输入基本参数后, 火点向四周蔓延, 问题转变为求解带权重的最短路径问题¹⁾, 由起火点 (x_0, y_0) 经过一系列蔓延到达 (x, y) 时, 若:

$$\Sigma(t(x_0, y_0) + \dots + t(x, y)) \leq T$$

则符合这一条件的所有点的集合, 就是最终蔓延结果。

对每一个像元点计算其最短路径, 运算量非常之大。在具体解决时, 我们引用了迷宫算法, 每一点向外扩散有 8 个方向的选择, 从正东开始, 沿顺时针方向检测, 每检测到某一

1) 林业部调查规划设计院, 国家林火管理系统研制报告。1992年6月。

方向就计算累积时间 Σt , 若 Σt 小于给定的扩展蔓延时间 T , 且该方位没有走过或是原先累积时间 $> \Sigma t$, 则向此方向走一步, 并记下所走的这一步, 存放在堆栈中, 同时将累积时间修改为 Σt , 累积时间可用二维数组存放, 其初值设为零。若检测到这一步四周的 Σt 均大于 T 或大于原先的累积时间, 则退回一步重新检测下一个方向, 如此重复检测, 直至初始燃点四周的八个方位都已阻塞, 堆栈中没有像元时, 整个蔓延过程完成, 最终二维数组中所存放的累积时间均小于 T , 是满足燃烧蔓延时间 T 内的所有像元的集合。

图版 I 图 6 所示是无风时火场蔓延动态情况, 从左上角开始按顺时针方向分别表示了时间在 $T/4$ 、 $T/2$ 、 $3T/4$ 、 T 时的扩展范围。图片中的背景图是以坡向图作为亮度, 以植被类型图作为色度的合成图, 因此图中既可以表示植被信息, 又可以表现地形信息。火场扩展范围用红色表示, 红色的明亮程度表示了燃烧时间的相对长短, 暗红色起燃时间较早, 亮红色起燃时间较迟。

图版 I 图 7 所示为有较强的北风时火场动态扩展的情况。与图版 I 图 6 相比, 图 7 火场在南端和西北端蔓延较大, 而在东北端和北端蔓延较少, 这较好地反映了火场扩展受风向的影响。图版 I 图 7 中火场范围内没有燃烧的部分为燃烧概率较小的草地。由于条件所限, 本文火场动态扩展模拟的效果还有待于进一步的地面人工纵火试验来验证。

4 结论

通过以上工作, 我们得到如下认识:

1. 火场蔓延具有时间和空间的特征, 因此不仅要建立火行为 3 大定量指标的模型, 更进一步地还要建立起以地理信息系统为基础的火场空间扩展模型, 这对实际应用更为重要。

2. 火场蔓延模型的建立十分重要, 本文使用 Rothermel 模型, 并结合经验模型考虑到带方向的因素(坡度和风)和不带方向的因素的影响, 成功地进行了火场空间蔓延模拟。进一步则需要建立该地区基于林火燃烧特征的蔓延模型, 利用以往的火灾经验及资料, 研究林火蔓延速度的定量模型, 加强坡度和风对蔓延速度影响的定量分析。

3. 考虑到季节、气象等外界因素对火行为的影响, 本文形成植被起火概率图, 客观地反映了林火燃烧特征, 阈值概率由当时的外界因素而定, 阈值的不同将直接影响到火场的最终扩展, 因此, 阈值的确定将是今后进一步研究的内容。

参 考 文 献

- [1] Rothermel R. C. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. U. S. A. For. Serv. Res., 1972.
- [2] Rothermel R. C. How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fire. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-143, 1982.
- [3] Francis M. Fujioka. Estimating Wildland Fire Rate of Spread in a Spatially Nonuniform Environment. Forest sci., 1985, 31 (1).
- [4] Albert J. Simard. A General Procedure for Sampling and Analyzing Wildland Fire Spread. Forest sci., 1984, 30 (1).

- [5] Nelson, R. M. JR, C. W. Adkins, Flame Characteristics of Wild-driven Surface Fires. *Can. J. For. Res.*, 1986, **16**.
- [6] 王正非, 森林潜在火行为预测预报, *林业科技*, 1990 (2).

Spacial Spread Simulation of Forest Fire Based upon GIS

Zhu Qijiang

(*Beijing Normal University*)

Gao Feng

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences*)

Zhang Zhenwei

(*Baoding Normal College*)

Abstract It's very important for the decision division to imitate fire behavior quantitatively. Fire spread has the features of time and space. That means it must be established under space background data base and must be fulfilled by the help of GIS and RS. The occurrence and development of forest fire are influenced by some internal and external factors. Internal factors include fuel type, fuel moisture and topography. By using these factors we created the time map of fire spread in pixel. External factors are mainly attributed to the influence of climate. We determined whether the pixel would burn or not according to the map of burning probability. We used both Rothermel model and experiential model for fire spread. Meanwhile directional factors such as slope and wind were also taken into account. Finally we completed the fire spread in microcomputer based on GIS.

Key words Fire spread, Geographic information system, Computer simulation, Remote sensed application