

# 虚拟森林景观中林火蔓延模型及三维可视化表达<sup>\*</sup>

李建微<sup>1</sup> 陈崇成<sup>1\*\*</sup> 於其之<sup>2</sup> 潘志庚<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 福州大学福建省空间信息工程研究中心, 数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350002;

<sup>2</sup> 浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

**【摘要】** 传统上的林火模拟通常只选用一种林火模型, 用一个简单的椭圆预测林火蔓延时火场各个位置的情况, 与现实火灾蔓延状况相差甚远, 而且以往的林火蔓延是基于二维可视化表达, 表达信息有限. 本系统采用现今运用最广泛的 Rothermel 模型, 利用 Huygen 原理, 并以改进的粒子系统方法三维模拟在不同的风速、坡度下林火在火场不同位置的扩散行为. 采用该方法模拟林火扩散行为, 不仅能实时显示受灾面积、火势蔓延的方向、火势大小, 且能给人以真实感. 并将该方法成功地应用于福建漳浦林区.

**关键词** 虚拟森林景观 林火蔓延 林火模型 粒子系统 三维可视化

**文章编号** 1001-9332(2005)05-0838-05 **中图分类号** S127, S762 **文献标识码** A

**Forest fire spread modeling and 3D visualization in virtual forest landscape.** LI Jianwei<sup>1</sup>, CHEN Chongcheng<sup>1</sup>, YU Qizhi<sup>2</sup>, PAN Zhigeng<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Data Mining Information Sharing of Education Ministry, Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China; <sup>2</sup>State Key Lab. of CADCG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2005, 16(5): 838~842.

The traditional method for simulating the behaviors of forest fire is to use a single ellipse to represent all of the fire points in fire scene, which has many disadvantages, *e. g.*, the simulated result is quite different to the real situation, and it is mainly based on 2D. As a result, the represented information is limited. In this paper, the most widely used Rothermel fire spreading model and the principal of Huygen were adopted to simulate the behaviors of forest fire in different position and wind direction, and the results were shown by pseudo-particle system in 3D, which could not only get the area of fire suffering, the direction of fire spreading and the size of fire, but also provide realistic simulation to observers. The method has been successfully applied to Zhangpu forest in Fujian Province.

**Key words** Virtual forest landscape, Forest fire spreading, Forest fire model, Particle system, 3D visualization.

## 1 引言

林火蔓延是一个多相、多组分可燃物在各种气象条件(温度、湿度、风向、风力等)和地形影响下燃烧和运动的极其复杂的现象<sup>[7,15,16,26]</sup>, 至今还没有一种模型能完全模拟林火行为的每个方面<sup>[6]</sup>. 自从1946年 W. R. Fons 首先提出林火蔓延的数学模型以来, 世界上出现了许多防火模型, 其中, 以 Rothermel 模型最成熟, 运用最广泛.

目前, 计算机模拟表达火势蔓延模型成为该学科的主要研究方向<sup>[5,20,28]</sup>. 以往国内对于森林火灾的研究, 基本上利用经验公式和经典模型. 而经验公式只是对传统的一些采集数据进行数学拟合, 或用线性拟合, 或用指数拟合等<sup>[3]</sup>. 利用计算机模拟火势蔓延模型在国外运用比较广泛, 加拿大、美国、法国、德国、澳大利亚等国在 20 世纪 70 年代就开始利用计算机相关系统研究森林火灾<sup>[19]</sup>. 最常用的方法

是将模拟场景分成规则的网格, 离散的模拟火势增长的过程<sup>[4,10,11]</sup>. Kourtz 和 O'Regan<sup>[13]</sup>曾用此方法在一个含有 8 个相邻的像元的正方形栅格上模拟计算火势蔓延的时间. 不管是传统的数学方法和一些二维的计算机可视化表达, 在其结果表达方面, 也只能用一些表格、火势蔓延曲线、蔓延面积平面图等二维的可视化表达方法. 虽然能给人直观的感觉, 但是表达的信息有限. 随着计算机技术的飞速发展, 尤其是计算机图形和虚拟现实技术的发展, 使得三维表达真实感事物成为可能. 利用三维真实感图形表达不仅能实时显示受灾面积、火势蔓延的方向、火势大小, 而且能给人真实的感觉和可视化.

火焰的模拟和自然界其他流动性的物体(如水、云、烟、雾等)的模拟一向是图形学中最具有挑战性

<sup>\*</sup> 国家重大基础研究发展规划项目(2002CCC01900)和教育部优秀青年教师奖励计划资助项目.

<sup>\*\*</sup> 通讯联系人.

2004-09-10 收稿, 2004-12-31 接受.

的问题之一.火焰自身没有固定的几何外型,传统的曲线、曲面对构建良好的火焰模型没有什么作用<sup>[22]</sup>.目前对火焰的模拟主要有纹理综合、粒子系统和基于物理的模拟等方法<sup>[8,15,21]</sup>.纹理综合缺乏交互性,而基于物理的模拟需要消耗大量的计算.粒子系统在火焰模拟时具有既要满足计算机的实时绘制要求,又要考虑火焰的形状,满足一定的动力学原理(在风向、坡向影响下火的行为),而且要比接近现实的火焰行为等优点,因此比较适合本模型的模拟.本系统在构建大场景虚拟森林景观的基础上,以福建漳浦林区为实验区,采用 Rothermel 模型,利用改进的粒子系统模拟林火在风速、坡向等各种影响因素变化下的发展蔓延的整个过程,并将火灾模拟的成果成功运用于森林灭火演练.

## 2 构建原理与方法

### 2.1 林火蔓延模型原理

林火通常划分为地表火、树冠火和地下火 3 种类型.本文主要讨论地表火的林火行为<sup>[9]</sup>.

林火行为的特征可分为火蔓延状况特征量和火场状况特征量两大类<sup>[3]</sup>.火蔓延状况特征包括火蔓延速度、火焰高度等;火场状况特征量则包括火场面积、周边界长和长宽比等.到目前为止,还没有一种数学模型能完全模拟火势的各种行为<sup>[2]</sup>.但是一个地区森林火灾发生又是有一定规律性的.这与该地区的植被、气候和地形密切相关.而林火蔓延的方向与可燃物种类、分布、含水率、风速和风向、坡度以及火头蔓延速率大小有关<sup>[27]</sup>.林火蔓延的方向及速率直接影响到火势蔓延的形状,在大部分情况下,火灾蔓延的形状近似椭圆<sup>[23]</sup>.基于此原理,可以假设点火源扩展火场为椭圆形,椭圆长轴方向为最大火蔓延速度方向,而点火源就是椭圆的一个焦点<sup>[5]</sup>.只要知道林火蔓延的速度及方向就可以简单模拟林火蔓延的形状(图 1).国内外许多研究者对此提出了许多改进方法,并将其成果应用于现实,如美国 USDA 利用 Huygen 原理开发的 FARSITE<sup>[21]</sup>及国内蒋礼、阳柳等利用并行理论的自相似原则模拟林火蔓延形状等<sup>[11]</sup>.

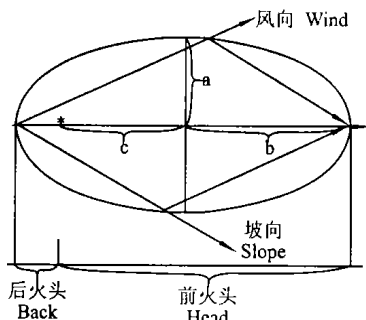


图 1 简单火势蔓延周边形状示意图

Fig.1 Borderline of simple forest-fire spread.

\* 火源 Ignition fire-point; a)短轴 Short axis of the ellipse; b)长轴 Long axis of the ellipse; c)椭圆焦点到椭圆中心的距离 Distance from focus to center of the ellipse.

### 2.2 模型算法实现

国内外有关火灾蔓延的模型很多,但均有一定的局限性.而基于能量守恒定律的半经验 Rothermel 模型抽象程度较高,几乎涵盖了能影响燃烧的所有因素;模型的输入参数不仅有影响权值大的风速及坡度,而且燃料的许多性质如燃料承载量(共 5 级)<sup>[18,25]</sup>、燃料表面积与体积比(共 5 级)、燃料湿度(共 5 级)、燃料床高度、粒子密度、矿物含量<sup>[14]</sup>、燃料单位体积需要最小热量<sup>[17]</sup>等都被考虑到,是现有国内外运用最广的模型,如著名的 FARSITE 系统等.实践证明,该模型比较成熟,也比较接近现实.为此,本系统的火灾蔓延模型主要采用 Rothermel 模型<sup>[24]</sup>(应用于表面火行为)

$$R = \frac{IR\zeta(1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \epsilon \Phi_{ig}} \quad (1)$$

式中,  $R$  为林火蔓延速度( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $IR$  为火焰反应强度 [ $\text{kJ} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ];  $\zeta$  为林火传播速率(无因次);  $\Phi_s$  为坡度修正系数;  $\Phi_w$  为风速修正系数;  $\rho_b$  为可燃物的密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $\epsilon$  为有效加热数(无因次);  $\Phi_{ig}$  为点燃单位质量的可燃物所需的热量( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); 风的修正系数( $\Phi_w$ )公式:

$$\Phi_w = C(3.281U)^B \left| \frac{\epsilon}{\epsilon_{OP}} \right|^{-E} \quad (2)$$

$$C = 7.47 \exp(-0.133\sigma^{0.55}) \quad (3)$$

$$B = 0.02526\sigma^{0.54} \quad (4)$$

$$E = 0.715 \exp(-3.59 \times 10^4 \sigma) \quad (5)$$

$$\epsilon_{OP} = 3.348\sigma^{-0.8189} \quad (6)$$

式中,  $\sigma$  为燃料的表面积与体积之比,  $U$  为风速坡度的修正系数:

$$\Phi_s = 5.275\sigma^{-0.3}(\tan \varphi)^2 \quad (7)$$

假设火势扩散模型只是一个简单的椭圆, Anderson<sup>[2]</sup>曾计算出椭圆的长轴和短轴的比(LB):

$$LB = 0.936 \exp(0.2566U) + 0.461 \exp(-0.1548U) - 0.397 \quad (8)$$

而前火头与后火头的比值公式为<sup>[1]</sup>:

$$HB = (LB + (LB^2 - 1)/LB - (LB^2 - 1))0.5 \quad (9)$$

根据以上两个公式可以求出与椭圆尺寸相关的  $a$  ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $b$  ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )及  $c$  ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )值<sup>[2]</sup>:

$$a = 0.5(R + R/HB)/(LB) \quad (10)$$

$$b = (R + R/HB)/2.0 \quad (11)$$

$$c = b - R/HB \quad (12)$$

## 3 林火模型的构建及过火过程

### 3.1 林火蔓延模型的实现

只用椭圆表示火势蔓延边界的方法与现实火灾蔓延的情况相差较远,而且也不能准确反映不同位置风速、坡度及其他因素对蔓延模型的影响.如将 Huygen 原理应用于火灾蔓延模型周边的计算可克服这些缺点<sup>[26]</sup>(图 2).图 2 中给定一个很短的时间作为火灾初期的蔓延时间.在这段时间里产生的蔓延周边上选取几个点作为初始点(每个点则可以作

为一个火势蔓延的起始点), 然后选取一定的步长(时间段)作为下次蔓延的时间. 利用 Rothermel 模型计算出这些初始点林火蔓延速度, 则可计算出在此时间步长后林火蔓延的位置. 最后将这些点用曲线连接, 以得出该段时间火势蔓延的新边界. 计算下一个时间段蔓延边界只需重复以上步骤.

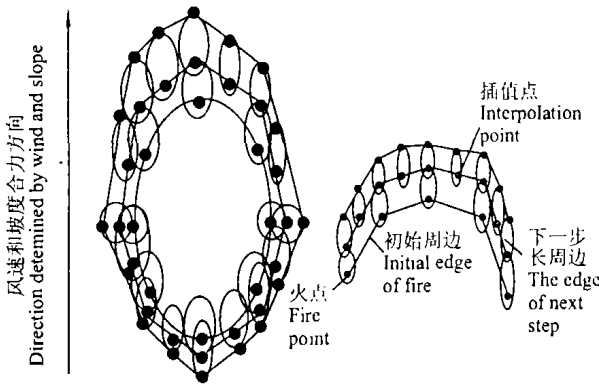


图2 Huygen 原理的火灾蔓延过程示意图  
Fig.2 Process of forest fire spread in the principle of Huygen.

根据这一思想可以比较准确实现火势蔓延模型, 具体实现过程如下:

首先, 在风速及坡度等影响因素下计算出此时火灾蔓延的速度, 由于初始时间很短, 可以近似认为此时蔓延边界为一圆形, 以准确选取几个点作为初始采样点.

其次, 选定步长(步长一旦选定, 只要输入蔓延时间, 就可以计算出时间段数即火灾蔓延的圈数), 计算下次蔓延点的位置, 下一时间段蔓延点的方法确定步骤: 1) 计算风的向量、坡度及其合力矢量的大小和方向; 2) 计算在无风下采样点的蔓延矢量方向及大小; 3) 判断采样点在风向量、坡度合力矢量下的位置(图3); 4) 将计算后的点按一定顺序写入链表; 5) 进入下一循环.

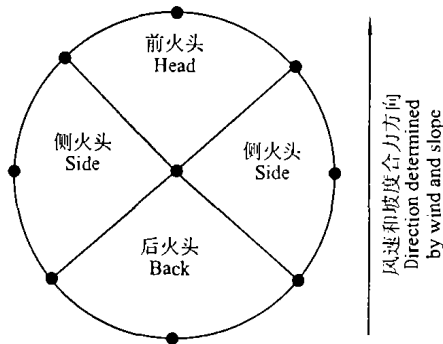


图3 在一定风速、坡度下火场的划分  
Fig.3 Partition of fire-field under some speed of wind and some degree of slope.

此过程中步骤3: 判断采样点在风向量、坡度合力矢量下的位置的确定是模拟的核心. 通常情况下, 由于火灾蔓延周边是封闭的, 其周边不同点在风速

和坡度影响下的蔓延速度也不相同. 为了精确表达蔓延结果, 理论上必须对所有点进行分析, 但这在现实中是不可行的. 因此在能满足一定精度要求的情况下, 根据风速与坡度合力的矢量方向对火灾蔓延周边进行划分(图3), 前火头的蔓延方向与风速和坡度的合力方向 $<45^\circ$ , 在此范围上的点是所有蔓延周边上蔓延速度最快的点, 所以选取椭圆的长轴上离此点最远的点作为在这时间段上火灾蔓延的结果. 在前火头上的点是蔓延最快的点, 随着火势的蔓延, 在前火头的蔓延周边也变长. 为了保证精度要求, 必须在一定时间内, 在此区域上以某种插值方法插入几个采样点. 而侧火头部分上的点由于蔓延方向和合力的方向在 $90^\circ$ 之间, 风速和坡度对火势蔓延的方向的影响不大, 此处的点可以忽略风速和坡度的影响. 而尾火头上蔓延方向和合力的方向 $<45^\circ$ , 风速和坡度对火灾蔓延速度有负面影响, 需选取椭圆的长轴上离此点最近的点作为在这时间段上火灾蔓延的结果.

最后根据得到的蔓延的周边计算出受灾面积, 进而在三维虚拟景观上对地形进行纹理替换. 在地形之上利用改进的粒子系统, 作出动态火的效果.

### 3.2 林火真实感模拟过程

采用一种改进的粒子系统对林火焰运动和造型进行模拟<sup>[12, 29]</sup>. 该粒子系统的原理是: 给图元指定动态的、具有 Alpha 通道的纹理图片或噪声纹理. 这些图片是某个动态自然现象过程的整体反映. 对于每一帧(或每几帧), 按照时间顺序更换纹理. 这样, 只需要一个单一的图元(四边形或三角形或其他), 就可以实现某些粒子系统用成百上千的图元才能表达出来的景象. 该粒子系统是一种纹理映射和传统粒子系统的发展, 它的各个图元采用了纹理映射的方法, 而又拥有粒子系统的一些优点, 这些图元也遵守一定动力学原理, 如火势行为受一定的重力、风向和浮力等因素的影响. 这种方法实现的火焰和烟雾方法简单、运行速度和显示速度快、逼真度高, 比较适合用于森林火灾系统.

实现该粒子系统的关键有两点: 1) 视角跟随的 BillBoard 图元绘制方法. 由于一个图元的表现力有限, 所以要依靠 BillBoard 技术使其具有动态的视角特性. 2) 具有动态连续特性的 alpha 通道纹理图片组或噪声图片(图4a). 连续的纹理(如火的跳跃效果)可以将拍摄一组照片处理成透明纹理或用噪声函数制作成模糊的图像. 利用粒子系统的原理可得到模拟火焰的效果(图4b).

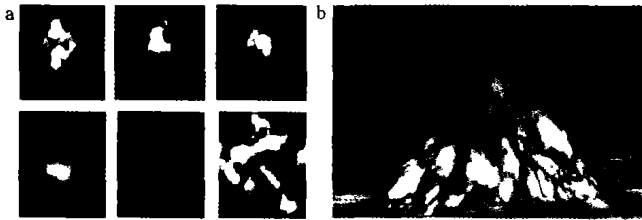


图4 改进的粒子系统模拟火焰原理  
 Fig.4 Principle of simulating forest-fire by improved particle system.  
 a)连续特性的 alpha 通道纹理和噪声纹理 Continuous texture with Alpha channel;b)火焰模拟效果 Result of simulating by this method.

蔓延模型能计算出每一步长下的受灾范围、蔓延速度,及此时的风速、风向能参数.这些参数可作为粒子系统绘制火焰的输入参数,从而实现三维时序的林火蔓延.

3.3 应用结果

3.3.1 实验条件 实验地点位于福建省东南沿海的漳浦县(117°25' ~ 118°02' E, 23°43' ~ 24°21' N).该地是福建主要林区之一,树种以马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)为主,具有南方林区的代表性.该林区地势较平缓,易于遥感影像的获取,且拥有近几年的遥感影像(分辨率为2.5 m的Spot 彩色影像和分辨率为15 m的Landsat 全色影像)、林相图、历年气象、火灾和火情等资料,实验数据比较齐全,故选此处为实验区.实验区域范围为8 km ~ 11 km.测试 PC 配置:Pentium 4 处理器,512 内存,NVIDIA 的 GeForce FX 5600 Ultra 显卡适配器;开发工具:Vc6.0 + OpenGL.

3.3.2 实验流程及结果 参数的获取方式主要有:遥感影像、林相图、历年气象资料和实地考察等,有些参数无法直接获取,采用经验值(表1).参数获取

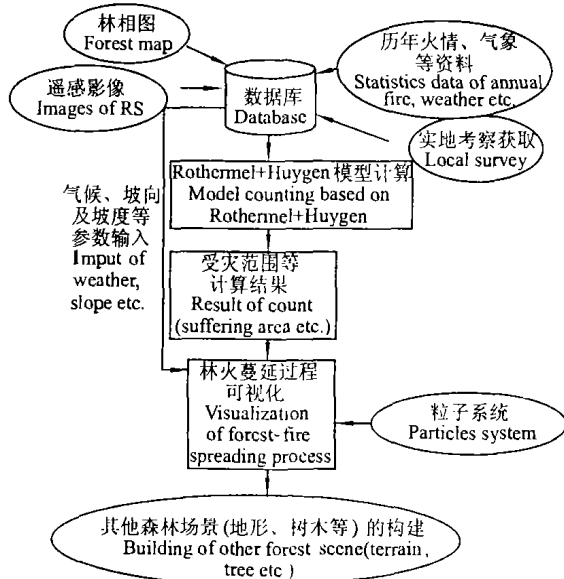


图5 林火蔓延过程可视化实现流程  
 Fig.5 Flow chart of implement on visualization of forest-fire spreading.

表1 输入参数及取值(适用于马尾松、杉木为主的森林)  
 Table 1 Parameters and its value for input based on *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata*

参数类型 Type		取值 Value
燃料量 Fuel loading (kg·m <sup>-2</sup> )	I II III IV V	0.6 0.2 0.5 0.04 0.12
表面积与体积比 Surface to volume ratio (l·m <sup>-1</sup> )	I II III IV V	9800 9800 9800 4900 4900
燃料湿度 Fuel moisture content (%)	I II III IV V	8 7 8 100 150
燃料床深度 Fuel bed depth (m)		0.15
粒子密度 Particle density (kg·m <sup>-3</sup> )		500
粒子低热容量 Particle low heat content (kJ·kg <sup>-1</sup> )		8600
矿物含量 Total mineral content (%)		0.8
有效矿物含量 Effective mineral content (%)		0.8
枯、干燃料湿度 Moisture of extinction, dead fuel (0.01%)		0.18
风速、风向 Wind speed and direction (m·s <sup>-1</sup> )	输入 Input	输入 Input
坡度、坡向 slope and direction (°)	输入 Input	输入 Input
I. 干燃料 0~0.6 cm Dead fuel 0~0.6 cm; II. 干燃料 0~2.5 cm Dead fuel 0~2.5 cm; III. 干燃料 2.5~7.5 cm Dead fuel 2.5~7.5 cm; IV. 湿草本燃料 Live herbaceous fuel; V. 湿木本燃料 Live woody fuel.		

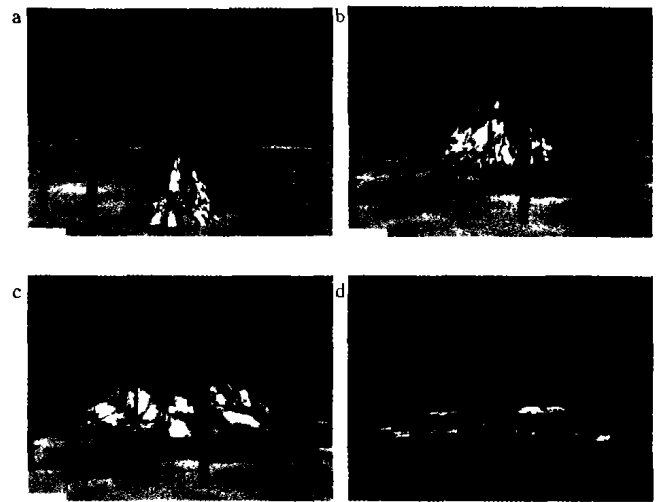


图6 无风无坡度条件下火蔓延状况  
 Fig.6 Process of forest fire spread under no wind and no slope.  
 a)火的初始状态 State of initiation;b)5 min 后过火蔓延状态(过火面积 465.3 m<sup>2</sup>)State of fire spread after 5 minutes (suffering area: 465.3 m<sup>2</sup>); c)10 min 后火蔓延状态(过火面积 877.4 m<sup>2</sup>)State of fire spread after 10 minutes (suffering area: 877.4 m<sup>2</sup>); d)1 h 后的火蔓延状态(过火面积 48 509.1 m<sup>2</sup>)State of fire spread after 10 minutes (suffering area: 48 509.1 m<sup>2</sup>).

后,经过蔓延模型计算,最后在三维森林场景中 will 结果用粒子系统现实,流程如图 5.

与历年火灾、此模型的应用资料相比较,模拟结果与现实误差较少,有一定参考价值 and 实用性.其模拟结果:图 6 为无风无坡下,火在漳浦林区火势蔓延侧面图;图 7 为在 2m·s<sup>-1</sup> 的风速下(风向向右)火

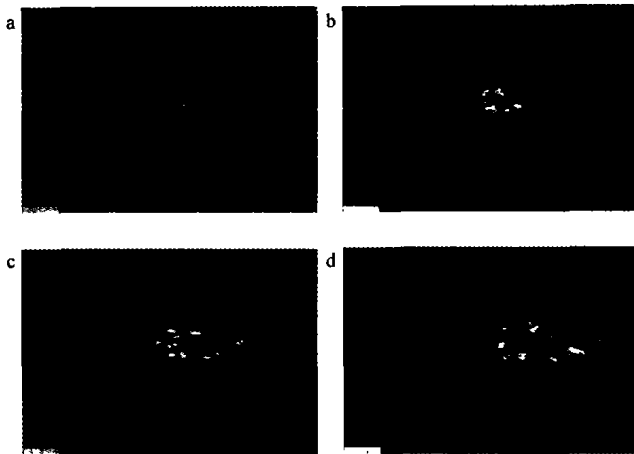


图7 在  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的风速下(风向向右)火蔓延状况

Fig. 7 Process of forest fire spread under wind speed of  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (direction is left).

a) 火的初始状态 State of initiation; b) 5 min 后过火蔓延状态(过火面积  $2170.2 \text{ m}^2$ ) State of fire spread after 5 minutes (suffering area:  $2170.2 \text{ m}^2$ ); c) 10 min 后过火蔓延状态(过火面积  $7816.5 \text{ m}^2$ ) State of fire spread after 10 minutes (suffering area:  $7816.5 \text{ m}^2$ ); d) 1 h 后的火蔓延状态(过火面积  $256100.9 \text{ m}^2$ ) State of fire spread after 10 minutes (suffering area:  $256100.9 \text{ m}^2$ ).

势蔓延俯视图。

#### 4 结 语

在 Rothermel 林火蔓延模型基础上, 利用 Huygen 的原理实现火灾的蔓延, 并用改进的粒子系统将火灾行为以三维可视的形式表现出来. 该方法与传统方法模拟林火相比具有以下优点: 模型中考虑了在每一步长中坡向、坡度等高程信息对林火蔓延的影响, 增加了模型的精度; 结果用三维动态可视化展示, 使决策人员更加快速、真实、形象地获取火场参数, 提高灭火效率.

鉴于林火蔓延模拟的高度复杂性, 研究工作中只考虑林火常见的地表火的蔓延情况, 飞火、地下火模型是今后考虑的方向; 真实的林火蔓延不仅受风向、火势行为的影响, 也受地形及自然景观的影响, 其过程模拟则更为复杂. 用粒子系统表达小范围的林火行为可以满足一定的视觉效果, 但是在表达大范围的林火行为时存在失真现象. 粒子系统用随机函数模拟林火行为, 而现实中的林火是物化反应的结果, 与实际情况尚有一定差距(用物理方法模拟更能真实地反映现实的火但达不到实时绘制的要求). 今后研究重点放在进一步完善模型, 考虑更多控制参数及大范围林火行为真实感模拟等方面.

#### 参考文献

- Alexander ME. 1985. Estimating the length to breadth ratio of elliptical forest fire patterns. Proceedings of the Eighth Conference on Fire and Forest Meteorology Society of American Foresters. Bethesda, Maryland. 287~304
- Anderson HE. 1983. Predicting wind-driven wildland fire size and shape. USDA: Forest Service Research Paper. INT-305
- Bowden K. 1998. Huygens' principle, physics and computers. *Int J General Syst*, 27(1~3): 9~32
- Clarke KC, Brass JA, Riggan PJ. 1994. A cellular automaton model of wildfire propagation and extinction. *Photogra Eng Remote Sensing*, 60(11): 1355~1367
- Du F(杜飞), Hou Z-Z(侯遵泽), Liu J-Q(刘家琦). 2002. Method of ground fire boundaries spread modeling and computer simulation. *Fire Safety Sci(火灾科学)*, 10(4): 204~208(in Chinese)
- Finney MA. 1998. Farsite: Fire area simulator-model development and evaluation. USDA Forest Service. Res Pap RMRSRP-4.
- Guo P(郭平), Sun G(孙刚), Zhou D-W(周道玮), et al. 2000. Study on fire behavior in grassland. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 12(5): 746~748(in Chinese)
- Hanson HP, Bradley MM, Bossert JE, et al. 2000. The potential and promise of physics-based wildfire simulation. *Environ Sci Policy*, 3: 161~172
- Hargrov WW, Gardner RH, Turner MG, et al. 2000. Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. *Ecol Mod*, 135: 243~263
- Karafyllidis I, Thanailakis A. 1997. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecol Model*, 99(1): 87~97
- Karafyllidis I. 2004. Design of a dedicated parallel processor for the prediction of forest fire spreading using cellular automata and genetic algorithms. *Eng Appl Artif Intell*, 17(1): 19~36
- King SA, Crawfis RA, Reid W. 1999. "Fast Animation of Amorphous and Gaseous Phenomena". Volume Graphics '99, Swansea, Wales. 333~346
- Kourtz P, O'Regan WG. 1971. A model for a small forest fire to simulate burned and burning areas for use in a detection model. *For Sci*, 17(2): 163~169
- Li Y-Z(李玉中), Zhu T-C(祝廷成), Li J-D(李建东), et al. 2003. Effect of prescribed burning on grassland nitrogen gross mineralization and nitrification. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 14(2): 223~226(in Chinese)
- Muzy A, Wainer G. 2002. Comparing simulation methods for fire spreading across a fuel bed. In: Barros FJ, Giambiasi N, eds. Proceedings of AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems. AIS'2002, 219-224. Lisbon, Portugal.
- Nelson RM. 2002. An effective wind speed for models of fire spread. *Int J Wildl Fire*, 11: 153~161
- Nguyen DQ, Fedkiw RP, Jensen HW. 2002. Physically based modeling and animation of fire. *ACM Trans Graph*, 21(3): 721~728
- Oswald BP. 1999. Classifying fuels with aerial photography in east texas. *Int J Wildland Fire*, 9(2): 109~113
- Pastor E, Zúrate L, Planas E, et al. 2003. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Prog Energy Comb Sci*, 29(2): 139~153
- Paz C, Fuentes F, Garcia S. 2001. Numerical simulation of forest fire. In: Maron DM, eds. International Symposium on Multi-Phase Flow and Transport Phenomena. Maron DM. 505~512
- Perlin K. 1985. An image synthesizer. *Computer Graph*, 19(3): 287~296
- Reeves WT. 1983. Particle Systems - A technique for modeling a class of fuzzy objects. *Computer Graph*, 17(3): 359~376
- Rothermel RC. 1972. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. USDA: Forest Service Research Paper. INT-115
- Rothermel RC. 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires USDA Forest Service. General Technical Report, INT-143.
- Sandberg DV, Ottmar RD, Cushon GH. 2001. Characterizing fuels in the 21st Century. *Int J Wildland Fire*, 10: 381~387
- Tang X-Y(唐晓燕), Yu M-Y(孟宪宇), Ge H-L(葛宏立), et al. 2003. Research on forest fire spreading simulation based on raster structure and its realization. *J Beijing For Univ(北京林业大学学报)*, 25(1): 53~57(in Chinese)
- Van Wagner CE. 1969. A simple fire growth model. *For Chron*, 45: 103~104
- Wang Q-L(王庆礼), Xu C-G(徐崇刚), Hu Y-M(胡远满), et al. 2004. Dynamics of forest landscape boundary at Changbai Mountain. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 15(1): 15~21(in Chinese)
- Wei X, Li W, Mueller K, et al. 2002. Simulating Fire with Texture Splats. 13th IEEE Visualization 2002 Conference. 227~234

作者简介 李建微, 男, 1979年生, 硕士生. 主要从事虚拟地理环境、三维地学可视化研究. Tel: 0597-87892535; E-mail: lwicq@sina.com