

基于 GIS 的地震火灾动态蔓延模拟

谢旭阳¹, 任爱珠²

(1. 中国安全生产科学研究院, 北京 100029; 2. 清华大学土木系防灾减灾工程研究所, 北京 100081)

[摘要] 用惠更斯原理对震后火灾的动态蔓延过程进行了模拟, 并开发了基于 GIS 的城市地震次生火灾动态蔓延模拟系统, 该系统可以模拟单个或者多个起火点的动态蔓延过程。研究结果可以定量地估计地震次生火灾对城市的危害, 从而在最短时间内给救灾应急提供决策依据。

[关键词] 地震次生火灾; GIS; 火灾动态蔓延; 模拟系统

[中图分类号] X43 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)08-0082-06

1 前言

地震次生火灾是指因地震直接或间接引起的火灾。在地震产生的次生灾害中, 次生火灾往往是最危险的。地震次生火灾造成的损失往往比地震直接造成的损失还要大。如 1906 年 4 月 18 日, 在美国旧金山的一场里氏 8.3 级的大地震引发了大火, 连续燃烧了 3 天, 烧毁了 521 个街区中的 508 个, 28 288 栋房屋被毁, 死亡 400 人, 损失达 4 亿美元。在这次地震中, 火灾造成的损失比地震造成的直接损失大 10 倍^[1,2]。

国内外关于地震灾害模拟的系统比较多^[3,4], 但关于地震次生火灾动态蔓延的模拟模型较少。如中国地震局地质研究所的许建东等结合传统的火焰蔓延数学模型, 在 ArcView 平台上开发了一个基于 GIS 的城市地震次生火灾蔓延模型^[5]。日本的 Hamada^[6]通过对日本建筑的调查, 研发了一个城市火灾蔓延模型。在该模型的基础上, 美国联邦应急管理局(FEMA)开发了一个基于 GIS 的地震次生火灾蔓延模型 FFE(包含在 HAZUS99 中)^[6]。日本在对地震中可能受火灾伤害的人员数目以及所需要的物品进行了研究^[1]。在调查日本神户地震次生火灾以及滨

田蔓延模型的基础上, 开发了一个模拟地震次生火灾的模型^[7]。

火灾蔓延过程的动态模拟可以使消防人员了解火灾随时间动态发展的过程及某一时刻火灾发生的情况, 如:

1) 可以知道在火灾发生后某一时刻已经蔓延的范围和燃烧的建筑物, 以及将有可能蔓延的范围和燃烧的建筑物, 并计算灭火救灾力量到达现场所需要的时间, 便于确定派遣消防车的数量、类型, 需要多少消防用水, 从而可以将有限的力量投入到更多需要灭火的地方去, 有利于消防指挥人员有效地指挥灭火。

2) 可以动态地了解多少建筑物以及多少人受到了火灾的影响。

作者在总结前人经验的基础上, 对震后城市中建筑物的火灾危险性模拟、可能的着火点模拟、火灾蔓延范围的模拟、以及火灾蔓延过程的动态模拟进行了研究, 开发了基于 GIS 的地震次生火灾蔓延模拟系统^[8,9], 介绍了地震次生火灾动态蔓延模拟的方法。

在对地震次生火灾蔓延过程模拟时, 需要的数据主要有: GIS 地图、建筑的属性(建筑的面积和火灾荷载等)、燃料属性以及气象参数。

[收稿日期] 2006-09-26; 修回日期 2007-03-01

[基金项目] “十五”国家科技攻关计划资助项目(2001BA601B-04-01-02)

[作者简介] 谢旭阳(1973-), 男, 湖南双峰县人, 中国安全生产科学研究院高级工程师, 博士

2 火灾蔓延计算

2.1 惠更斯原理的应用

对于火灾蔓延边界的确定方法主要有以下4种^[10-13]:快速路径搜索法、惠更斯原理、最大蔓延速率、正常火线前进法。

惠更斯原理是光学中的一个理论,该理论于20世纪90年代开始应用于火灾蔓延过程的模拟^[14,15]。在实际燃烧中,火灾蔓延具有象光波一样向前传播和移动的特征,它解决了在指定时间内火灾前沿所在位置这个问题。

惠更斯原理应用于火灾蔓延计算时认为火边界的每一个顶点是相互独立的,以椭圆形状向前蔓延(如图1所示)。椭圆的形状和方向主要由风和斜面向量来决定,椭圆的大小由蔓延速度和时间步长来决定。

惠更斯原理可以确定火在任意 t 时刻的边界,边界可以看作是一些离散的点组成的连续曲线。模型假设边界上的每一个点都以小的椭圆向外蔓延。在 $t + \Delta t$ 时刻,火的外边界由小椭圆的边界组成。

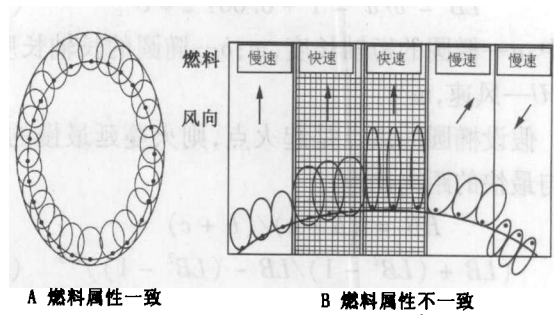


图1 惠更斯原理的应用

Fig. 1 The apply of Huygens' principle

对于边界的每一个点,当地的环境条件(如燃料、地形等)影响了火的蔓延速度与快速蔓延方向。当地的环境条件主要用来计算每一个小椭圆的参数(如图2中的 a, b, c)。在系统中可以设置火边界的点数目,点数目设置的越多,模拟结果就越准确,但模拟所需要的时间就更长。对于每一个顶点需要如下参数^[14-15]:**a.** 该顶点的坐标微分(x_s, y_s)值, **b.** 最大蔓延速度方向(e), **c.** 决定椭圆形状的参数 a, b, c (见图2)。根据这些参数,对一个顶点,计算蔓延速度的微分方程(Richards方程)为:

$$X_t = \frac{a^2 \cos e(x_s \sin e + y_s \cos e) - b^2 \sin e(x_s \cos e - y_s \sin e) + c}{(b^2(x_s \cos e + y_s \sin e)^2 - a^2(x_s \sin e - y_s \cos e)^2)^{1/2}} \quad (1)$$

$$Y_t = \frac{-a^2 \sin e(x_s \sin e + y_s \cos e) - b^2 \cos e(x_s \cos e - y_s \sin e)}{(b^2(x_s \cos e + y_s \sin e)^2 - a^2(x_s \sin e - y_s \cos e)^2)^{1/2}} \quad (2)$$

利用惠更斯原理进行地震次生火灾蔓延过程的动态模拟时,做了如下的假设:

1) 建筑物与建筑物之间的空地的燃料密度与建筑物的燃料密度一致,这是由于地震后建筑物遭到破坏造成的。

2) 火以椭圆形状向前蔓延。

3) 椭圆上的顶点蔓延是互相独立的,不互相影响。

Richards方程开始适用于平坦的地形,在程序中计算出来的平面坐标系不需要转化就可以直接在图上显示出来。但是,这在斜面上不适应,在式(1)和式(2)中的输入输出中的每一个顶点(x_s, y_s)都是以平面的形式显示的。在普通的水平平面,火边界的所有顶点都存入计算机,这就意味着式(1)和式(2)中的参数(x_s, y_s, e)必须转换到平面上,相应地输出结果(X_t, Y_t)也应该转换到水平面上。

对于第 i 个顶点的(x_s, y_s)可以通过增加或者减少由于地表决定的斜面修正数来进行计算^[14,15]。

2.2 椭圆参数

根据大量的测试,在一定的空间条件中,即使起火发生在一个不规则的地方或者是一个波浪行状的地形,火灾蔓延的形状是一个如图2所示椭圆。

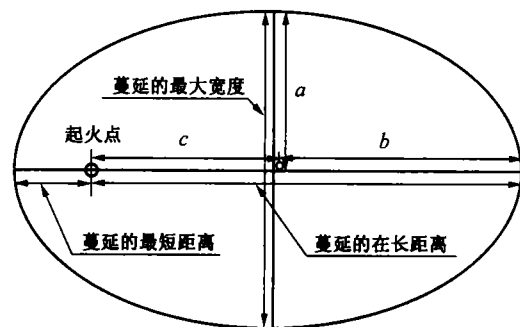


图2 椭圆模型示意图

Fig. 2 Sketch of elliptical model

式(1)和式(2)中的参数 a, b, c 确定了在某一个顶点处椭圆的形状。在模型中,确定椭圆的主要因素是长半径与短半径之比。对于风速在13.9 m/s以下时,椭圆的形状与风速关系很大:

$$LB = b/a = 1 + 0.0012 * U^{2.154} \quad (3)$$

其中： a —椭圆的短轴长度， m ； b —椭圆的长轴长度， m ； U —风速， m/s 。

假设椭圆的焦点是起火点，则火蔓延最慢的距离与最快的距离比为：

$$HB = (b - c)/(b + c) = (LB + (LB^2 - 1)/LB - (LB^2 - 1))^{0.5} \quad (4)$$

根据式(3)，式(4)以及火的蔓延速率 R 确定 a, b, c ：

$$a = 0.5(R + R/HB)/(LB) \quad (5)$$

$$b = (R + R/HB)/2.0 \quad (6)$$

$$c = b - R/HB \quad (7)$$

2.3 蔓延速度

对于每一个顶点，可以用式(8)来计算蔓延速度^[15]：

$$R = 0.801 * (3.6U)^{1.1} * BH \quad (8)$$

其中： R —火蔓延速度， m/min ； U —风速， m/s ； BH —建筑物的层高， m 。对于单层建筑取建筑物的高度。

式(8)主要针对木结构建筑，在系统中假设对所有的建筑的蔓延速度该公式都适用。

事实上，在地震次生火灾中，决定蔓延速度的主要因素有建筑物的构造、高度、火灾荷载及建筑物之间的间隔，以及风速、消防能力等。其中建筑物的构造是表征建筑物是否容易起火的参数，而建筑物的高度则是决定火焰高度的要素，也是表征辐射热量的一个参数。此外，火灾荷载表征建筑物在一定的燃烧发热量、风速以及气流引起的热传播、以及火星和飞火的影响下蔓延的难易程度，消防能力则是代表蔓延阻力的一个参数。

3 蔓延过程计算流程

在模拟的过程中采用时间间隔法来对地震次生火灾的蔓延过程进行动态模拟，采用顶点法来确定燃烧边界。计算方法如下：

- 1) 确定每个起火点的蔓延范围，即确定每个起火点的燃烧区域；
- 2) 动态地计算模拟时间间隔；
- 3) 确定该起火点是否已经起火，流程图如图3所示；
- 4) 对于每一个时间间隔，计算火的蔓延，流程图如图4所示；
- 5) 计算下一时间间隔，如果每个起火点的每一个顶点都不能蔓延，则结束计算；

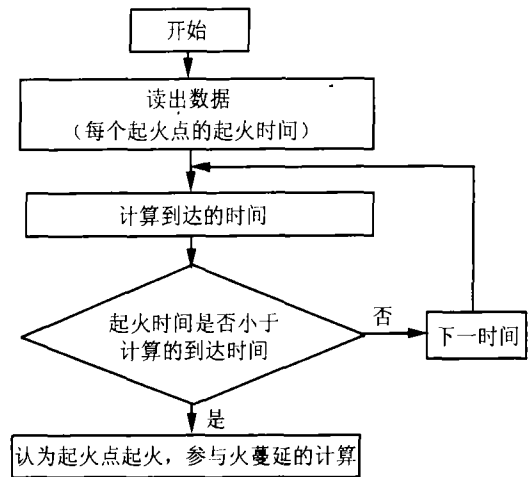


图3 起火点是否起火计算流程
Fig.3 Flow chart of fire spot's status

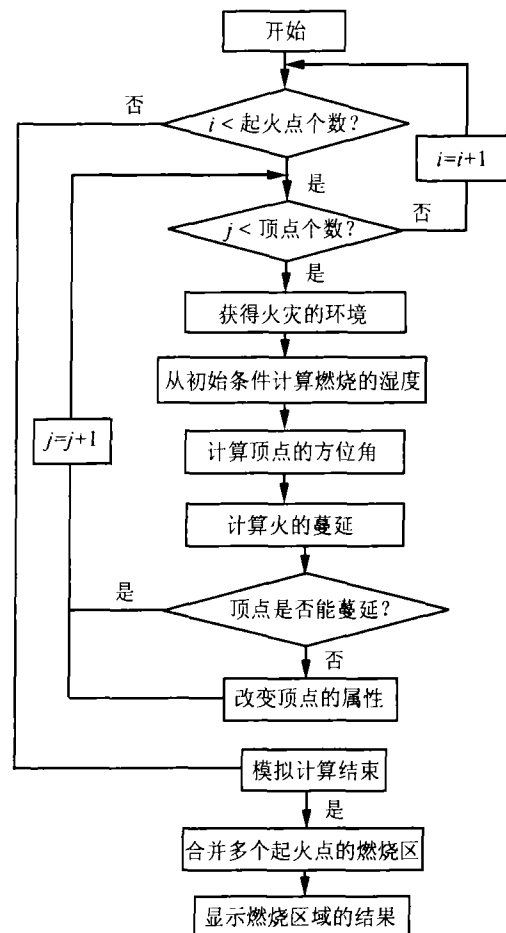


图4 每个时间间隔计算流程图
Fig.4 Flow chart of fire spread calculation of each time step

6) 重复2到5的过程，直到所有的模拟时间都结束或者不能再蔓延时停止。

其中，计算火蔓延的流程图如图5所示。

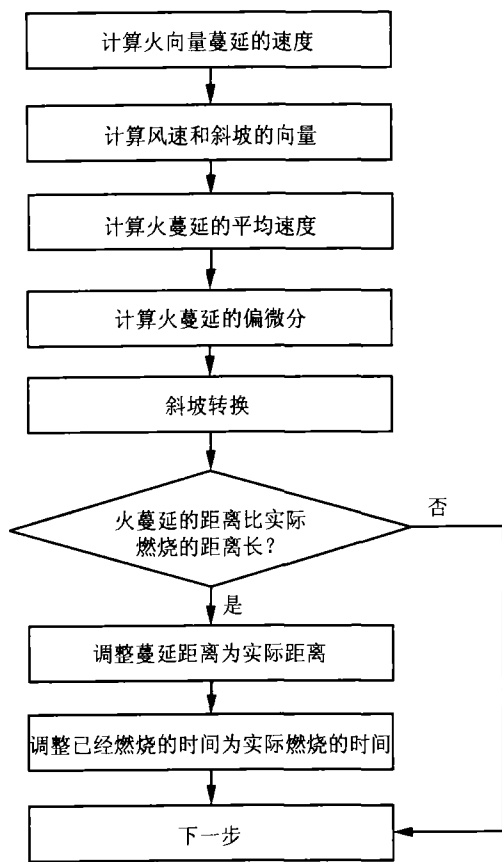


图5 火蔓延计算流程图
Fig.5 Flow chart of fire spread

4 火灾边界的处理

4.1 火灾边界处理

虽然严格地执行火灾蔓延过程的计算,但计算时,计算机不能智能地区分燃烧区域和没有燃烧的区域,这时会出现燃烧区域重叠或者出现“岛屿”的情况,如图6所示。

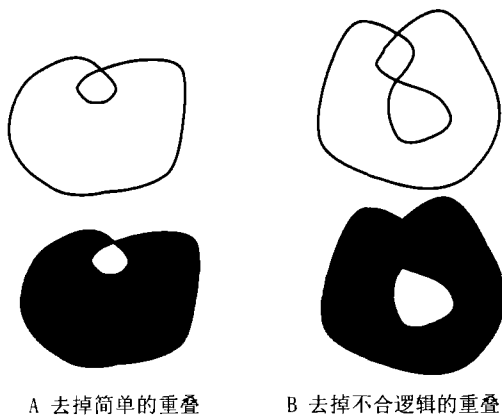


图6 火边界的处理
Fig.6 Handle of fire boundary

在地震次生火灾中,有时候在燃烧区域的当中

还有不能燃烧的房子,这样更增加了这种情况出现的机率,所以在计算蔓延的过程中需要对火灾的边界进行处理。如果不处理那些已经燃烧过的区域或者不能燃烧的区域,那么火焰的边界便会形成非常复杂的循环,并有可能造成死循环。火灾交叉的处理,必须保存那些火焰边界有意义的部分。在计算的过程中,那些不能燃烧的建筑往往会形成“岛屿”。这样,经过交叉处理就能计算燃烧的边界并且求出火焰的周长以及面积。

在计算中需要通过中间的步骤来进行处理,GIS系统本身提供了区域重叠的计算问题,但由于要对多余的火焰边界的顶点进行处理,所以需要大量的计算。

在国际上有好几种方法对火灾边界进行处理^[14,15],如 Richards^[14], Knight^[14], Coleman^[15], Wallace^[15]用裁剪的方法对火灾的边界进行处理, Richards 和 Bryce^[15]用改变顶点属性的方法进行火灾边界的处理。

作者在模拟过程中,采用改变顶点属性的方法进行火灾边界的处理。对顶点数组设置了一个属性(NodeType),该属性用来标记顶点的状态(其中,“0”表示可以继续燃烧,“1”表示在可燃区里但不能继续燃烧,“2”表示在非可燃区的边界)。整个边界处理的过程如下:

1) 将起火点等分为32个蔓延方向不同的顶点(顶点数可以在系统里进行设置,顶点数设置得越多,则计算时间越长);

2) 计算各个顶点的动态蔓延,同时将各个顶点燃烧边界设定32个不同蔓延的顶点;

3) 计算上一时间的蔓延边界;

4) 确定各个顶点的属性,如果顶点在上一时间的燃烧范围外并且处于可以燃烧的范围,则该顶点的属性设置为“0”,如果顶点在上一时间的燃烧范围内并且处于可以燃烧的范围,则该顶点的属性设置为“1”,如果顶点处于不可以燃烧的范围,则该顶点的属性设置为“2”;

5) 检测属性为“2”的顶点位置,并确定是否在不可燃区域边界,如不在,则通过插入点的方法,确定可燃区域与不可燃区域的交界点作该顶点的新位置,并保存在顶点数组中;

6) 属性为“0”的顶点参与下一时间段的蔓延计算,属性为“1”的顶点则在顶点数组中删除,属性为“2”的顶点不参与下一时间段的蔓延计算,但在顶

点数组中保留,用于计算蔓延范围;

7)重复2至6的过程,就可以确定各个时间段的蔓延边界。

4.2 多个起火点燃烧区域的合并

如果模拟多个起火点,那么需要对火灾燃烧区域进行合并处理。在对边界的处理过程中,可以知道边界顶点的坐标,这样就可以计算出每个起火点的整个燃烧区域。如果所有的起火点都模拟完以后就可以对各个起火点的燃烧区域进行合并(如图7所示)。在合并的过程中,利用地理信息系统中的多边形合并方法进行处理。

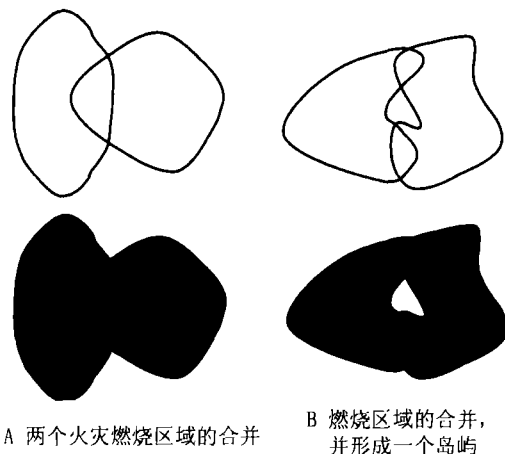


图7 多燃烧点区域的合并
Fig.7 Area merge of multi fire apots

5 示例

作者利用VB与ArcObjects对整个地震次生火灾模拟系统进行了设计与开发^[9],以汕头市1:1000电子地形图为例,对汕头市房屋数据库中老城区大约2万多栋建筑物在8级地震情况下进行了次生火灾的动态蔓延过程模拟(如图8所示)。汕头市是广东省第二大城市,地处广东省东部沿海,位于韩江、榕江出海口,面积约245 km²,人口约100万。市区人口密度1.8万人/km²,为世界上人口密度最大的地区之一。该模拟在确定火灾蔓延范围的基础上^[8],以一个容易起火点为着火点,并假设起火后第3个小时风向发生了改变。从模拟的结果来看,整个区域在7.5 h内将全部燃烧完毕,西南方向的建筑物在6 h内将全部燃烧,而东北部的建筑物在3 h后,燃烧的速度迅速加快。同时通过模拟可以知道在该燃烧区域中有一个大的广场,该广场将不会被烧到,可以作为紧急情况下的疏散区域。通过地理信息系统中多边形周长和面积计算函数,可以计算出各个时间段的火焰周长和整个燃烧面积。

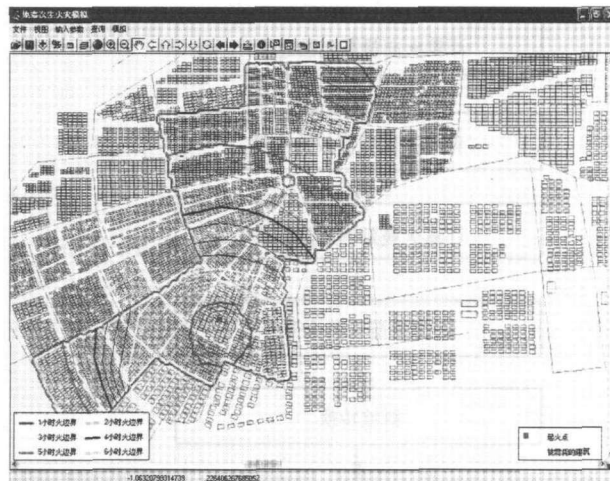


图8 地震次生火灾动态蔓延过程模拟结果
Fig.8 Simulation result of fire spread process

6 结论

系统可以模拟多个起火点的动态蔓延过程,同时也可以模拟风速和风向的变化对火灾动态蔓延的影响。该系统为采取有效措施来预防地震火灾的发生以及在地震中为消防指挥人员采取有效扑救措施提供了基础。为使方法进一步得到完善,尚需进行以下研究:

1)作者在计算地震次生火灾蔓延速度时采用的是普通火灾蔓延的速度,但此公式也许并不一定适合于地震次生火灾的蔓延速度,所以会造成一定的误差。

2)作者假定建筑物与建筑物之间空地的燃料属性与建筑物的属性一致,并且认为这些燃料是由地震后建筑物破坏所造成的,但由于建筑物与建筑物空地之间的蔓延速度与建筑物内的蔓延速度的不一致性,可能会造成一定的误差,所以需要继续研究如何定量地表示燃烧的建筑在多长时间会引燃另外的建筑物。

3)作者没有考虑在一定风速情况下造成飞火的情况,如何考虑一定火灾荷载和风速情况下的飞火情况,将使系统更加完善。

参考文献

[1] Nakamori Y, Tanakam H, Oda J, Kuwagata Y, Matsuoka T, Yoshioka Y. Burn injuries in the 1995 Hanshin-Awaji earthquake [J]. Burns, 1997, 23(4): 319 ~ 322

[2] Ohnishi K. Causes of the seismic fires following the great Hanshin-Awaji Earthquake survey [A]. Thirteenth meeting of the UJNR panel on fire research and safety [C]. Gaithersburg MD, 1996. 337 ~ 344

- [3] Okayama K, Kiriya T, Yabuuchi S. Development of Disaster Information System (DIS/Earthquakes)[A]. Proceedings of the 30th joint meeting of the U. S.-Japan Cooperative Program in Natural resources panel on wind and seismic effects[C]. USA: NASA,1998. 286 ~ 299
- [4] 陆伟民, 董伟民. 利用神经网络预测城市震害火灾损失[J]. 同济大学学报,1995, 23(1): 15 ~ 20
- [5] 许建东, 王新茹, 林建德, 张 宁. 基于 GIS 的城市地震次生火灾蔓延初步研究[J]. 地震地质,2002, 24(3):445 ~ 452
- [6] Federal Emergency Management Agency. HAZUS99 User's and Technical Manuals[M]. Washington DC: FEMA,1999
- [7] 神戸消防局. 神戸地震火灾调查及火灾模拟[M]. 神戸:神戸市消防局,1996
- [8] Ren A Z, Xie X Y. The simulation of fire spreading region induced by earthquake based on GIS [J]. Fire Science,2004, 22(5):421 ~ 439
- [9] 谢旭阳. 地震火灾发生危险性概率模型和蔓延模型研究[D]. 北京:清华大学,2004
- [10] Muzy A, Wainer G, et al. Comparing simulation methods for fire spreading across a fuel bed[R]. Computer Modeling, University of Corsica SPE-UMR CNRS 6134 B. P. 52, Campus Grossetti 20250 Corti. France
- [11] 唐晓燕, 孟宪宇, 葛宏立, 易浩若. 基于栅格结构的林火蔓延模拟研究及其实现[J]. 北京林业大学学报,25(1): 53 ~ 57
- [12] Andr J C S, Viegas D X. An unifying theory on the propagation of the fire front of surface forest fires[A]. III International Confer on Forest Fire Research, 14th Conference on Fire and Forest Meteorology[C]. Luso:Coimbra Portugal, 1998. 1:259 ~ 279
- [13] Balbi J H, Santoni PA, Dupuy J L. Dynamic modeling of fire spread across a fuel bed[J]. International Journal of Wildland Fire, 1999, 9(4):275 ~ 284
- [14] Finney M A. FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation[A]. Washington DC: United States Department of Agriculture Forest Service,1998
- [15] Finney M A, Andrews P L. The FARSITE 1 fire area simulator: Fire management applications and lessons of summer 1994[A]. Washington DC: United States Department of Agriculture Forest Service,1994

Dynamic Simulation of Fire Following Earthquake Based on GIS

Xie Xuyang¹, Ren Aizhu²

(1. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100029, China;

2. Institute of Disaster Prevention and Mitigation, Tsinghua University, Beijing 100083, China)

[Abstract] The dynamic simulation of fire following earthquake was researched by employing of Huygens' Principle. A dynamic simulation system of post-earthquake fire based on GIS was developed. The system can be used to simulate spread process of one fire spot and multi fire spots. The system can estimate the damage of fire following earthquake quantitatively, and provided foundation for emergency in short time.

[Key words] fire following earthquake; GIS; fire dynamic simulation; simulation system