

# 基于三维曲面元胞自动机模型的林火蔓延模拟

黄华国 张晓丽 王蕾

(北京林业大学资源与环境学院)

**摘要:** 为了研究林火蔓延的动态预测及可视化模拟问题, 该文在分析现有林火蔓延模型的基础上, 提出选用三维曲面元胞自动机进行林火建模和蔓延模拟. 该文初步完成了一个整合数字高程模型、气象因子、树种因子的三维曲面元胞自动机模型, 设计了数据提取、加工、应用框架, 开发出了能够进行林火蔓延三维模拟的软件系统. 并通过八达岭林场局部地区的模拟, 指出了应用该模型, 可以实现不同条件下的林火蔓延模拟, 快速预测林火发展趋势, 同时探讨了模型改进的方向.

**关键词:** 元胞自动机, 林火蔓延模拟, 数字高程模型, 可视化

**中图分类号:** S762.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1522(2005)03-0094-04

HUANG Hua-guo; ZHANG Xiao-li; WANG Lei. **Simulation of forest fire spread based on a 3D-surface Cellular Automata Model.** *Journal of Beijing Forestry University* (2005)27(3)94-97 [Ch, 10 ref.] College of Resources and Environment, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

In order to study the forecast and simulation visualization of forest fire spread, the authors introduced Cellular Automata (CA) to forest fire modelling and spread simulation based on the existing forest fire spread models. A 3D-surface CA model was built, integrated with Digital Elevation Model (DEM), weather and tree species information. A framework was designed for data log, processing and application. A software system was developed to simulate forest fire in 3D space. It showed that the model could simulate forest fire under different conditions and rapidly predict a developing fire. Some perspectives in improving the model are also discussed.

**Key words** Cellular Automata, forest fire simulation, Digital Elevation Model, visualization

林火蔓延是一个复杂系统. 一旦发生火灾, 极易形成高强度的树冠火和地表火, 严重危害森林资源、环境和扑火人员生命安全.

唐晓燕等总结了林火蔓延模型及蔓延模拟的研究进展, 将林火蔓延模型分为基于能量守恒定律的 Rothemel 模型、澳大利亚的 McArthur 模型、加拿大林火蔓延模型、王正非的林火蔓延模型、物理模型等 5 种<sup>[1]</sup>. 在此基础上, 唐晓燕提出了基于栅格结构的林火蔓延模型, 用迷宫算法实现了动态模拟<sup>[2]</sup>. 上述研究多是根据统计规律或者物理规律建立的数学模型, 这些模型不具备自组织机制. 当系统复杂性急剧增加或者发生扰动时, 求解微分方程或由计算数值近似确定变得非常困难. 因此, 这些数学模型对于复杂系统模拟有一定的局限性.

元胞自动机是 Ulam 和 Neumann 在 20 世纪 40 年代提出的一个模型框架, 用于研究复杂系统的行为 (von Neumann 1966). 它是定义在一个具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上, 按照一定局部规则, 在离散的时间维上演化的动力学系统. 元胞自动机模型具有很强的灵活性和开放性. 当元胞自动机在二维空间上时, 元胞空间结构与栅格地理信息系统 (GIS) 数据结构高度相容, 因此使用栅格 GIS 结合元胞自动机模型, 可以在离散时间和离散空间的框架下对复杂时空动态过程进行模拟. 综合考虑郁闭度、可燃性和风的影响, 可以应用元胞自动机在二维平面上建立人工环境进行林火模拟<sup>[3]</sup>. Ioannis 等提出了一个完整的林火蔓延元胞自动机模型, 该模型能够预测林火蔓延, 与实际数据吻合较好<sup>[4]</sup>.

**收稿日期:** 2004-04-30

<http://journal.bjfu.edu.cn>

**基金项目:** 北京市教委项目“北京市森林生态系统健康研究”.

**第一作者:** 黄华国, 硕士生. 主要研究方向: GIS 软件开发、3S 技术及应用. 电话: 010-62390034 Email: hawkhq@263.net 地址: 100083 北京林业大学资源与环境学院.

**责任作者:** 张晓丽, 副教授. 主要研究方向: 林业遥感、3S 技术应用、森林可视化. 电话: 010-62338133 Email: zhang-xl@263.net 地址: 同上.

宋卫国等提出了二维森林火灾元胞自动机模型<sup>[5]</sup>,是元胞自动机在国内林火行为中的一个典型应用.如果与数字高程模型(DEM)结合,也可以模拟三维曲面空间的复杂系统动态<sup>[6]</sup>.在与GIS结合方面,朱启疆等进行了GIS支持下的森林火场蔓延的空间模拟<sup>[7]</sup>.George进行了基于GIS的荒地火灾空间结构模拟<sup>[8]</sup>.

上述研究多停留在二维平面基础上进行林火模拟,对地表火研究较多.由于山地火的复杂性,不可能用一个通用的数学模型进行描述.而采用三维曲面元胞自动机可以弥补缺乏自组织的缺陷,并能更形象的描述林火蔓延.作者综合考虑了前人研究成果,引入三维曲面元胞自动机进行林火蔓延动态模拟,并采用Visual C++6.0和OpenGL开发了一个软件系统实现林火蔓延的三维模拟.

## 1 概念模型

将一个三维曲面元胞自动机模型,用于模拟林火的蔓延.火灾的蔓延被限定在一个三维的表面格

网空间上.每个元胞以8个相邻元胞作为其邻域元胞.邻域元胞的燃烧状态根据时间的演进分为5种:未燃烧=0,刚被点燃=1,剧烈燃烧=2,开始熄灭=3,已经燃烧过=4.

元胞状态迁移规则如下(见图1):

①如果元胞可以被点燃,并且有状态为2的邻域元胞,点燃概率 $P > 0.5$ ,下一步该元胞状态就变为1,否则仍是0;②状态为1的元胞,下一步状态变为2;③状态为2的元胞,在树种因子为正常条件时,下一步状态变为3,否则保持状态2;④状态为4的元胞,不可能再被点燃.

该模型共考虑5种因素:邻域元胞燃烧状态 $N$ ,本元胞坡度 $S$ ,本元胞树种因子 $Q$ ,风速 $W$ 和湿度 $H$ (假设只有这5种因素影响元胞点燃概率).

参考Rothemel林火蔓延模型,该模型提出每一个邻域元胞对本元胞的点燃概率公式 $P_i = f(N_i, S_i, Q, W_i, H)$ , $B$ 是一个常量因子, $K_1, K_2, K_3, K_4$ 分别指对应参数的权重.

$$P_i = \begin{cases} B + K_1 Q(K_2 S_i + K_3 W_i + K_4 H) & \text{if } N_i = \text{burning} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 8) \quad (1)$$

将邻域元胞对本元胞的点燃概率求和,得出的总点燃概率为该元胞真正的点燃概率 $P$ :

$$P = \sum_{i=1}^8 P_i \quad (2)$$

## 2 模型应用

### 2.1 数据源

DEM格网数据通过ArcView Spatial Analyst模块由等高线(1:10 000)提取.然后通过输出命令将DEM格网导出为ASCII栅格文件.

树种因子数据也就是元胞的可燃物质量.首先根据全国森林火险区划等级技术规定的树种(组)燃烧类型划分标准,将优势树种(组)归并成难燃、可燃、易燃3类;在3类中,以蓄积比例大于等于55%者确定为树种(组)燃烧类型,若3类中比例均在55%以下,则定为可燃类<sup>[9,10]</sup>.将这些信息入库,并量化成可燃指数,量化标准如下:

①没有树木覆盖的水系、道路、建筑物等点燃的可能性为0;②难燃类属性值介于0和0.33之间;③可燃类属性值介于0.33和0.54之间;④易燃类属性值介于0.54和1之间.

然后根据小班的优势树种资料查询对应的可燃

指数,用程序生成可燃指数分布文件.该文件与DEM格网空间上完全配准.

另外,模拟步长大小、起火点位置、风向、风速大小和湿度等参数,都可在软件系统中手工输入赋值.

### 2.2 软件开发

软件开发包括3部分:等高线处理模块、树种因子提取模块和林火蔓延模拟模块.

等高线处理模块采用Visual Basic 6.0结合MapObjects开发,进行等高线的任意截取、加密/去除点等.

树种因子提取模块采用Visual Basic 6.0结合MapObjects,后端用Access存储树种可燃指数库.该模块能将对应等高线生成的格网的小班数据提取成树种因子的格网数据.

林火蔓延模拟模块是主要模块.采用Visual C++6.0的MFC结合OpenGL 2.1,实现读取并显示DEM数据、树种因子数据,动态模拟林火蔓延趋势等功能.

运行模拟系统步骤见图2.

## 3 应用实例

选取北京八达岭林场榛子岭附近地形进行林火

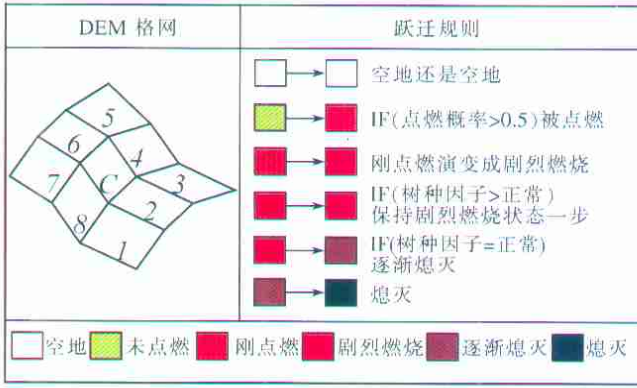


图1 三维曲面元胞空间及其元胞状态跃迁

FIGURE 1 3D-surface CA space and status transition of cells

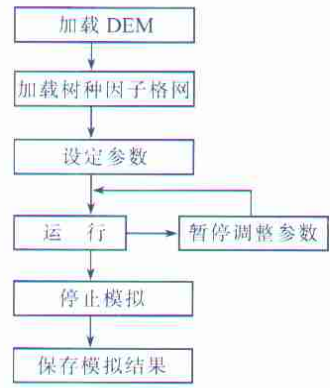
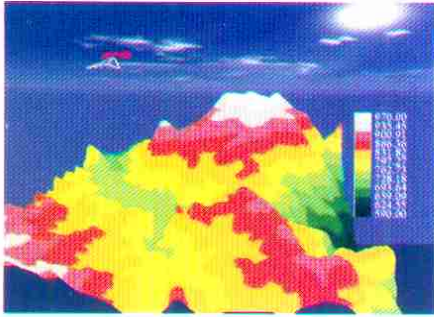
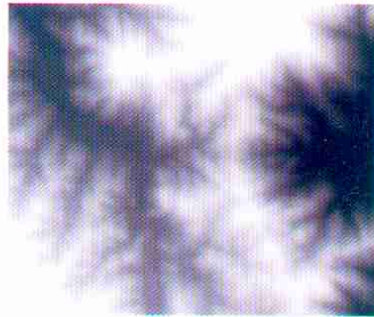


图2 系统模拟流程图

FIGURE 2 Flow chart of the system for simulation



a) 立体渲染图



b) 二维灰度图

图3 数字高程模型

FIGURE 3 Digital Elevation Model

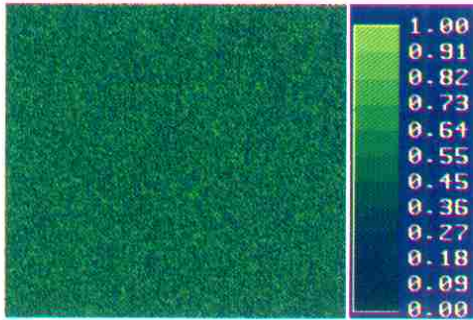


图4 可燃物格网(树种因子)

FIGURE 4 Combustible grid (tree species parameter)

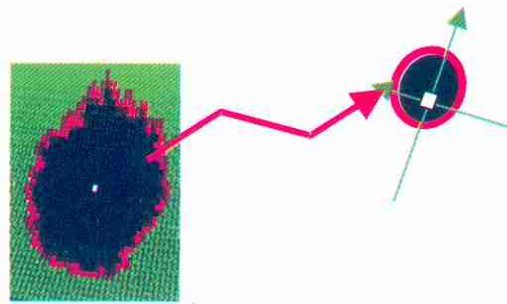
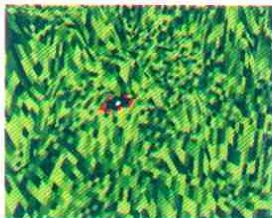


图6 缓坡模拟结果

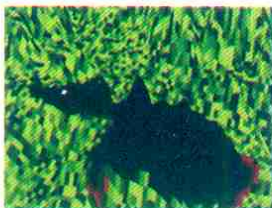
FIGURE 6 Result of simulation on gentle slope



a) 点燃后第四步



b) a 步后若干步



c) b 步后若干步



d) 结果



图5 动态模拟快照图

FIGURE 5 Snapshots of simulation

模拟试验. 八达岭林场属于生态公益林, 境内有举世闻名的八达岭长城, 搞好该山区的防火工作具有重要的意义.

通过等高线处理模块对榛子岭所在图幅的等高线(图幅号 IV-7-12, 1982年4月测图, 2001年10月数字化成图, 比例尺 1:10 000, 单位 m, 等高距 5 m)进行裁剪, 获得坐标范围(466 834, 346 276)~(468 488, 347 716)的等高线. 通过 ArcView 以 5 m×5 m 为单元格大小, 得到 DEM 网格并导出 ASCII 栅格文件, 大小为 331 行×228 列(效果见图 3).

使用树种因子提取模块从对应的小班数据中得到优势树种资料, 并转化为树种因子(图 4).

使用自主开发的模拟软件, 调用数据 DEM 数据(ASCII 栅格文件)和树种因子文件进行模拟演示. 起火点采用相对坐标, 取点(100, 100)进行模拟. 动态模拟过程见图 5.

在模拟过程中, 模型参数设定如下:

风速设为默认值,  $W=0$ ; 空气湿度设为默认值,  $H=0$ ;  $B=0.05$ ;  $K_1=K_2=K_3=K_4=1$ .

从图 5 中可以看出: 火往下坡蔓延较为缓慢; 往上坡蔓延速度较快, 小山丘容易燃烧; 树种可燃性高的元胞点燃后对周围元胞影响力强.

另外, 利用数据生成器产生的缓坡模拟数据进行演示( $W=0$ , 树种分布均一并易燃,  $S=15$ ), 得到如图 6 的结果. 图 6 中红色表示处于剧烈燃烧状态的元胞, 代表着外围火线; 黑色表示过火火场. 从模拟结果看, 该模型在缓坡情况下得到的火场形状接近椭圆, 与椭圆模型的效果接近. 通过改变模型参数, 可以不断接近真实效果. 比如, 调整风速可以使林火形状发生变化; 风向不变时, 如果风速变大, 则椭圆的长轴与短轴的比值也会变大.

## 4 结论与讨论

本文初步完成了一个整合数字高程模型、气象因子、树种因子的三维曲面元胞自动机模型. 通过八达岭林场局部地区的模拟, 实现了不同条件下的林火蔓延模拟, 可以快速预测林火发展趋势. 基于三维曲面元胞自动机模型, 提出了林火蔓延模拟的技术体系框架, 包括数字高程模型的提取加工、小班数据中的树种因子提取, 各种条件下的林火蔓延趋势模拟, 以及蔓延结果分析. 整个流程简单易行, 能快速进行应用. 如果该模拟技术投入使用, 可以提前分析预测林火的蔓延趋势, 准确估算出火烧形状、过火面积、火情大小等, 优化消防指挥部门的灭火决策.

该模型现在只考虑了 5 种约束条件. 为了能够

更加精确的预测模拟, 需要引入更多的元素, 比如气温对林火点燃概率的影响、局部风速变化对蔓延趋势的影响等. 另外也需要通过一定规模的点火实验获取真实的实验数据, 进行比较分析.

## 参 考 文 献

- [1] 唐晓燕, 孟宪宇, 易浩若. 林火蔓延模型及蔓延模拟的研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(1): 87-91.  
TANG X Y, MENG X Y, YI H R. Review and prospect of researches on forest fire spreading models and simulation method[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(1): 87-91.
- [2] 唐晓燕, 孟宪宇, 葛宏立, 等. 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, 2003, 25(1): 54-57.  
TANG X Y, MENG X Y, GE H L, et al. Research on forest fire spreading simulation based on raster structure and its realization[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(1): 54-57.
- [3] LI X D, MAGILL W. Modeling fire spread under environmental influence using a cellular automaton approach [J]. *Complexity International*, 2001, 8(1): 1-14.
- [4] KARAFYLLIDIS I, THANAILAKIS A. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata [J]. *Ecological Modelling*, 1997, 99(1): 87-97.
- [5] 宋卫国, 范维澄, 汪秉宏. 整数型森林火灾模型及其自组织临界性[J]. 火灾科学. 2001, 10(1): 53-56.  
SONG W G, FAN W C, WANG B H. Study on self-organized criticality of forest fires in China[J]. *Fire Safety Science*, 2001, 10(1): 53-56.
- [6] 郭伦, 刘瑜, 张晶, 等. 地理信息系统——原理、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 243-245.  
WU L, LIU Y, ZHANG J, et al. *Geography information system—Principle, method and application* [M]. Beijing: Science Press, 2002: 243-245.
- [7] 朱启疆, 高锋, 张振威. GIS 支持下森林火场蔓延的计算机模拟[J]. 环境遥感, 1995, 10(2): 81-88.  
ZHU Q J, GAO F, ZHANG Z W. Spatial spread simulation of forest fire based upon GIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 10(2): 81-88.
- [8] GEORGE L W, ASHLEY P, SPARROW D, et al. A GIS-supported model for the simulation of the spatial structure of wildland fire, Cass Basin, New Zealand[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1999, 36(4): 502-518.
- [9] 王栋. 中国森林火险与调查区划[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.  
WANG D. *Forest fire risk and division of China* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2000.
- [10] 王正非. 通用森林火险等级系统[J]. 自然灾害学报, 1992, 1(3): 39-45.  
WANG Z F. General forest fire weather ranks system[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1992, 1(3): 39-45.

(责任编辑 李文军)