

基于数字地球的林火灾害建模

吴玲达^{1,2}, 曹 骥¹, 杨 超¹, 蒋 杰²

(1. 装备学院重点实验室, 北京 101416; 2. 国防科学技术大学信息系统工程实验室, 长沙 410073)

摘 要: 针对数字地球上林火灾害可视化问题, 建立林火灾害仿真可视化框架。设计蔓延表现算法, 采用 Rothermel 火行为计算模型和邻接单元蔓延模型。提出一种网格均匀划分的简化模型, 进行仿真实验。结果表明, 该方法能在数字地球上表达林火蔓延过程, 较好地描述林火蔓延物理机理, 为三维地理环境上的灾害分析提供辅助支持。

关键词: 数字地球; 林火灾害; Rothermel 模型; 邻接单元模型; 网格划分; 等角投影

Forest Fire Disaster Modeling Based on Digital Earth

WU Ling-da^{1,2}, CAO Rui¹, YANG Chao¹, JIANG Jie²

(1. Key Laboratory, Academy of Equipment, Beijing 101416, China; 2. Laboratory of Information System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

【Abstract】 According to the problem of forest fire disaster visualization based on digital earth, forest fire simulation visualization framework is established. Specific spread rendering algorithm is designed, adopting Rothermel fire behavior model and contiguous cellular spread model. An equiangle mesh generation simplification model is proposed. Simulation experiment is carried out. The result indicates the proposed model can simulate forest fire spread process on digital earth and well describe fire spread physics mechanism, which provides disaster analysis and decision support in three-dimensional geographic environment.

【Key words】 digital earth; forest fire disaster; Rothermel model; contiguous cellular model; mesh generation; equiangle projection

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.17.070

1 概述

每年燃烧掉地球上数千顷森林的林火灾害给经济、社会、生态系统带来了严重问题, 引起人们的广泛关注^[1-2]。如果发生林火灾害而又缺乏对发生地受灾情况预测的有效手段, 会造成更加严重的损失。因此, 对火灾快速准确的预测显得尤为重要, 利用计算机对林火灾害进行预测模拟可以促使灾害损失降至最低^[3]。在林火行为计算、预测和仿真等方面的研究, 美国和加拿大处于国际领先地位, 在美国森林服务与航空管理部门的支持下, 由不同组织开发的 BehavePlus、FlamMap、FARSITE、WFAS 等一系列用于林火预测模拟的软件经过多年的发展已经成功应用于实践; 我国虽然起步较晚, 但东北林业大学、中国科学技术大学、林业科学院资源信息所等单位的研究也取得了不少成果^[4-5]。但当前研究大多建立在二维地理信息系统上, 数字地球作为三维地球信息模型, 被认为是迄今为止人类掌握地球表面信息最好的方式; 也是为研究地球及其环境的科学家服务的重要手段^[6], 三维虚拟地理环境上的

灾害分析及辅助决策已经成为迫切需求。

基于以上考虑, 本文主要研究数字地球上林火灾害可视化的问题, 在深入研究林火灾害层次结构模型^[5]的基础上, 建立了林火灾害仿真框架, 设计了具体的蔓延表现算法。在行为计算模型上采用了目前国内外应用最多的 Rothermel 模型, 其抽象程度较高, 适用范围较广^[3-4]; 在蔓延模型上采用了临界单元模型^[4-5,7], 虽然其精度略低, 但在实时性、复杂型、适应性、可靠性等方面都要优于波动传播模型。提出了一种网格均匀划分的简化模型, 用于数字地球上林火灾害的模拟表现^[5]。本文是在数字地球上开展林火灾害模拟的有益探索, 相关工作促进了数字地球更广泛的应用。

2 面向数字地球的林火灾害仿真框架

按照森林火灾计算机模拟层次结构的观点, 整个火灾模拟系统可划分为底层的以火行为计算为主的物理模型, 中间层次的以火场形状计算为主的数学模型, 以及高层的以蔓延模拟为主的计算机模型^[5]。在 Rothermel 火行为计

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2009AA01Z335); 国家部委基金资助项目

作者简介: 吴玲达(1962—), 女, 博士、博士生导师, 主研方向: 多媒体信息系统, 虚拟现实, 空间信息获取与处理; 曹 骥, 博士研究生; 杨 超、蒋 杰, 博士

收稿日期: 2011-09-29 **修回日期:** 2011-12-08 **E-mail:** caorui_137@126.com

算模型的基础上,为在数字地球上模拟表现林火灾害,综合考虑数字地球平台对系统资源的占用程度、现有硬件设备性能的限制,以及仿真模型的实用性与适用性,可以采用邻接单元模型^[5];将火场形状计算与蔓延模拟相结合,利用具有强大空间建模与运算能力的元胞自动机在数字地球上模拟林火灾害的蔓延过程^[7]。本文设计的面向数字地球的林火灾害仿真框架如图 1 所示。

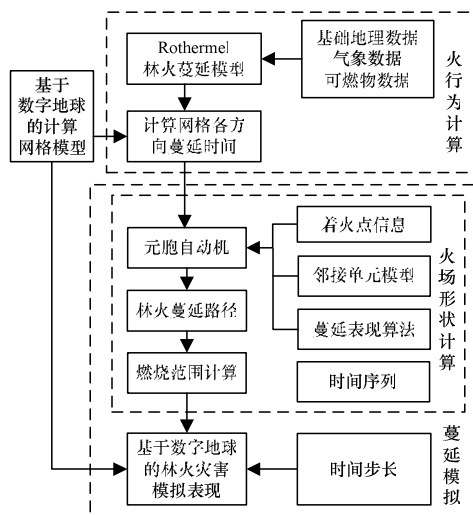


图 1 面向数字地球的林火灾害仿真框架

整个仿真框架分成 5 个部分,具体为:

(1) 仿真准备。采用与邻接单元模型高度相容的二维元胞自动机,为元胞申请存储空间,用于记录元胞所描述范围的位置、着火时间。

(2) 计算网格模型构建。仿真模型首先建立基于数字地球的计算网格模型,网格模型为每个元胞提供其所描述范围的空间地理信息;在仿真结果表现阶段,为绘制单元提供其位置信息。

(3) 火行为计算。将每个元胞所描述范围的基础地理数据、气象数据、可燃物数据导入 Rothemal 模型,同时通过基于数字地球的计算网格模型提供空间信息支持,分别计算出元胞在各方向的林火蔓延速度与时间。

定义处于火场边界的元胞为种子元胞,把林火的蔓延过程描述为一个由种子元胞向邻域元胞的扩散过程^[5],如图 2 所示。

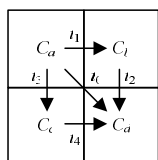


图 2 林火蔓延路径示意图

C_a 为种子元胞, C_b 、 C_c 、 C_d 为邻域元胞,按文献[4]的方法,计算出 C_a 到 C_b 方向上的林火蔓延时间为 t_1 ,以此类推计算出 t_0 、 t_2 、 t_3 、 t_4 。

(4) 火场形状计算。设计蔓延表现算法,按照元胞状态转移函数计算由着火点开始的林火蔓延路径;引入时间序列,则某时刻林火在各方向的蔓延情况,构成了该时刻林

火的燃烧范围。

本文蔓延表现算法的基本思路是,计算由着火点蔓延到某一元胞时间最短的路径,同时也确定了该元胞的着火时间,林火燃烧范围则由着火时间不大于给定时刻的所有元胞来描述。

以图 2 所示情况为例,由 C_a 到 C_d 共有 $C_a-C_b-C_d$ 、 C_a-C_d 、 $C_a-C_c-C_d$ 3 条路径,蔓延时间分别为 t_1+t_2 、 t_0 、 t_3+t_4 ,3 个蔓延时间中的最小值为林火实际蔓延时间,最短蔓延时间经过的路径为林火蔓延路径,时间最短路径不一定与距离最短路径 C_a-C_d 重合。本文蔓延表现算法的具体流程如图 3 所示。

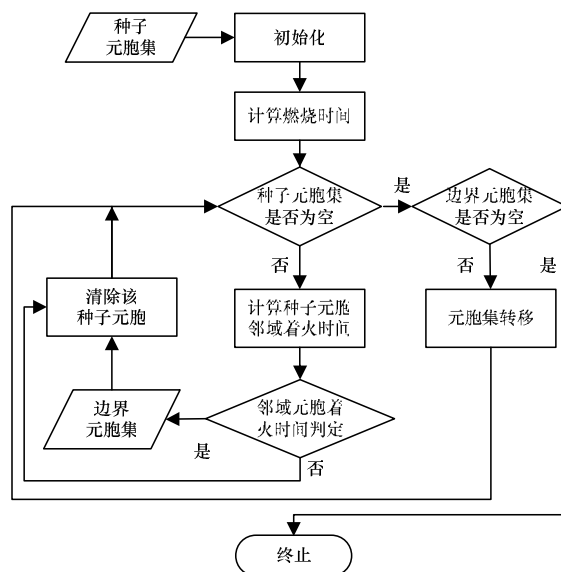


图 3 林火蔓延表现算法流程

在初始化阶段,令所有元胞的着火时间 t_F 为 0,初始化种子元胞集为空集。之后将着火点导入种子元胞集,计算其完全燃耗所需时间 t_B 并记录,令着火点的着火时间 t_F 为 t_B 。种子元胞邻域的着火时间 t'_F 为种子元胞着火时间与林火实际蔓延时间之和。

邻域元胞着火时间判定规则为:若该邻域元胞的着火时间 t_F 的值为 0,或其着火时间 t_F 的值大于 t'_F ,则令其着火时间 t_F 的值为 t'_F ,并导入该邻域元胞到边界元胞集,判定为“是”,否则判定为“否”。元胞集转移阶段是将边界元胞集中的全部数据导入到种子元胞集,同时清空边界元胞集。

按照算法流程计算所有元胞着火时间,最后令着火点元胞的着火时间 t_F 为 0,以元胞的着火时间不大于给定时刻为限制条件,根据时间序列控制元胞是否显示,表现林火的燃烧范围。

(5) 蔓延模拟。以上述计算结果为基础,每隔一定的时间步长表现该时刻林火的燃烧范围,模拟林火蔓延的动态过程。另外,在仿真结果可视化上,火场边界是火灾分析及辅助决策最关心的内容,利用动态纹理映射表现边界处林火的燃烧效果,并通过网格不同的颜色^[8]表现其不同的着火时间。

3 基于数字地球的计算网格建模

为了进行火灾模拟, 首先需要将连续的林火蔓延过程离散化, 即在三维虚拟地理环境中建立计算网格模型。由于采用二维元胞自动机进行空间离散, 需要将矩形试验区域离散为规则的网格。本文提出了一种网格均匀划分的方法, 分为2步:

(1) 确定仿真区域, 并以此区域4个顶点所成矩形为底面, 与地球球心共同构建一个四棱锥, 然后对四棱锥进行等角划分, 如图4(a)所示。

以球心 O 为顶点, 对以球半径 R 为棱长的四棱锥 $O-ABCD$ 4个锥面分别进行等角划分, 如直线 OE 、 OF 等分 $\angle AOB$, 等分角为 α 。以 $\angle AOB$ 的等分线 OE 、 OF , $\angle DOC$ 的等分线 OH 、 OG 分别构造等分面 OEH 和面 OFH , 交四棱锥底面 $ABCD$ 于直线 EH 、 FG ; 同理, 可以构造等分 $\angle AOD$ 、 $\angle BOC$ 的等分面, 其与底面 $ABCD$ 相交的线垂直于直线 EH 、 FG , 并划分底面 $ABCD$ 为矩形网格。

(2) 将每个矩形子网顶点投影到三维球面上。如图4(b)所示, 直线 OE 的球面投影点为点 I , 直线 OF 的球面投影点为点 J 。其球面等角投影透视图如图5所示。

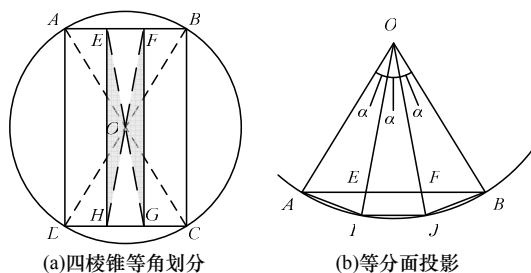


图4 等角划分与投影

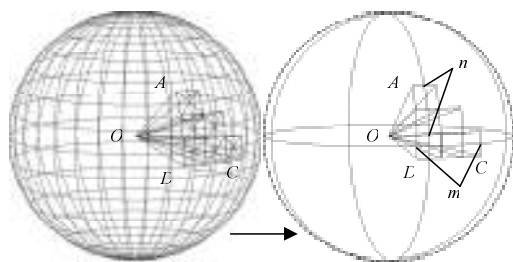


图5 球面等角投影

试验区域矩形网格的各种跨度计算转化为球面距离的计算, 如图5中 m 、 n 所示。由四棱锥 $\angle AOB$ 、 $\angle DOC$ 的等分面(等分面 OEH 和面 OFH 球面投影后为面 OIK 、面 OJL), 与 $\angle AOD$ 、 $\angle BOC$ 的等分面交汇划分出球面的均匀计算网格模型, 即矩形网格划分结果, 如图6所示。

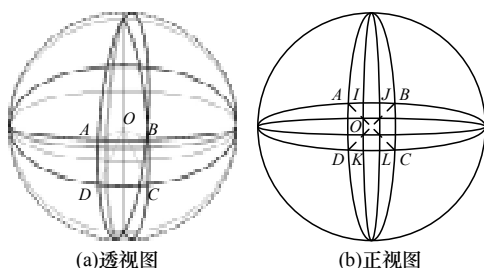


图6 均匀计算网格模型

图中的试验区域 $ABCD$ 是为了清楚表现本文网格模型的一种放大示意图, 实际应用中研究区域的范围比较小。采用这种投影方式, 虽然保证了矩形网格划分的均匀性, 但是构建每个网格顶点都需要相当繁琐的计算。为了在实际应用中减少仿真系统不必要的消耗, 本文对这种划分方法进行了适当改进, 均匀计算网格模型简化算法具体步骤如下:

(1) 由仿真区域确定试验区域均匀计算网格模型的边界顶点, 如图7中左边的顶点 A 、 B 、 C 、 D 。

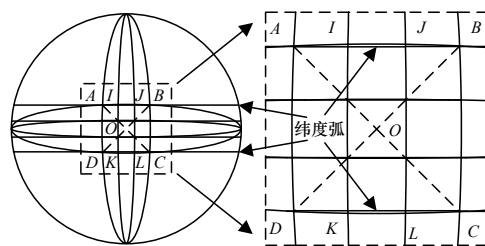


图7 计算网格简化模型

(2) 用纬度线上的弧 $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{DC}$, 即图7中纬度弧箭头所指向的弧, 代替均匀网格模型的弧 $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{DC}$, 采取同样的方式简化由 $\angle AOD$ 、 $\angle BOC$ 等分面与球面投影而成的均匀网格线。

(3) 由 $\angle AOB$ 、 $\angle DOC$ 的等分面与球面投影而成均匀网格线, 与步骤(2)中所得的简化网格线共同生成简化网格模型。

(4) 通过对数字地球平台提供的高程数据进行内插运算, 完成三维计算网格简化模型的构建。

在实际应用中, 相对于数字地球场景上的灾害模拟表现效果而言, 试验区域在数字地球上所占比例非常小, 改进的模型与弧 $\widehat{AD}$ 、 $\widehat{BC}$ 类似的均匀网格线不做简化, 仅在与弧 $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{DC}$ 类似的简化网格线上存在一定的误差, 是可以接受的; 且简化后的均匀网格模型减少了顶点构建的复杂程度。

4 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性, 在数字地球平台上, 对算法进行了实验。

算法采用 C++ 编码实现, 实验系统平台环境为: CPU Intel Pentium IV 3.0 GHz; 内存 1 GB; 显卡 NVIDIA GeForce 6600GT; 操作系统 Windows XP。

Rothermel 模型部分参数需要经过长期实验取得, 一般赋予经验值。实验参数为: 烘干可燃物载量 0.45 kg/m^2 , 低热含量 $8\ 600 \text{ kJ/kg}$, 烘干颗粒密度 537 kg/m^3 , 表面积体积比 $4\ 900 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, 可燃物床深 0.15, 含水率 0.3, 总矿质含量 0.008, 有效矿质含量 0.005, 可燃物熄灭含水率 0.2。

为模拟不同坡度对林火蔓延的影响, 在数字地球平台上选取鞍点型地貌作为实验区 A , 实验结果如图8所示。图8(a)为发生林火灾害 4.6 h 火场形状, 由于鞍点周围地形较平缓, 所以火场形状并没有显现出较明显的特征。随

随着时间的增长,由图 8(b)~图 8(d)可见,林火向鞍点周围 2 个上坡方向的蔓延距离要远大于下坡方向。根据 Rothermel 模型,实验结果符合林火在上坡方向的蔓延速度快,下坡相对较慢的物理机理。

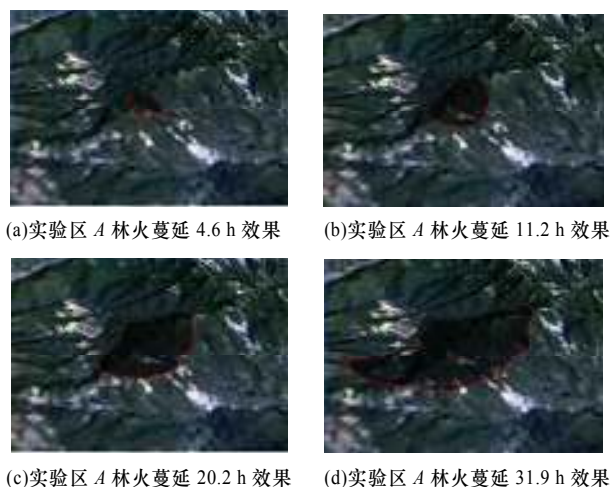


图 8 基于数字地球的林火蔓延模拟

上述林火蔓延模拟的结果能够及时提供受灾火场形状,为更好地辅助林火灾害分析,还可以采用可视化技术直观地表现火场边界及不同区域的着火时间。因此,在数字地球上的实验区 B 中进行了林火蔓延可视化表现,如图 9 所示。

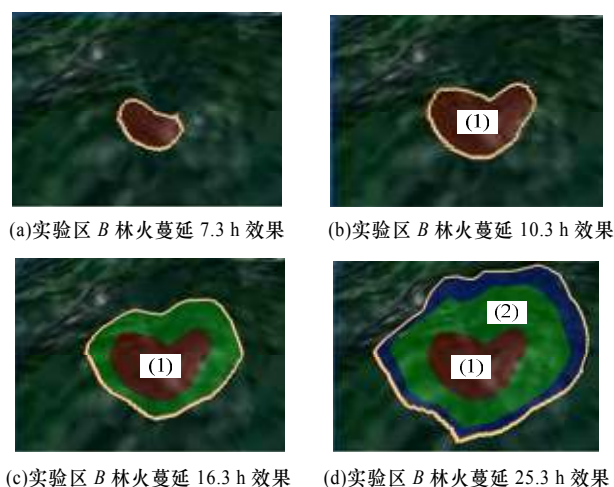


图 9 基于数字地球的林火蔓延可视化效果

在图 9(b)~图 9(d)中,范围(1)代表着火时间小于 8.4 h 的区域,范围(2)代表着火时间不小于 8.4 h,但小于 16.9 h 的区域,火场边界采用了动态纹理映射。由林火蔓延过程的可视化效果,可以清晰地观察到实验区 B 被划分成赋予不同含义的若干部分以辅助分析。

5 结束语

面向数字地球上林火灾害的可视化表现,本文建立了林火灾害仿真框架,提出了一种网格均匀划分的简化模型。仿真实验的结果符合物理机理,表现效果清晰,能为三维地理环境上的灾害分析提供辅助支持。

参考文献

- [1] Lioudakis S, Antonopoulos I, Kakardakis T. Evaluating the Use of Minerals as Forest Fire Retardants[J]. Fire Safety Journal, 2010, 45(2): 98-105.
- [2] Román-Cuesta R M, Marc Gracia, Retana J, et al. Factors Influencing the Formation of Unburned Forest Islands within the Perimeter of a Large Forest Fire[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258(2): 71-80.
- [3] Uerma W, Endo S, Akamine Y, et al. Development of a Simulation for the Spread of Northern Hemisphere Forest Fires[C]//Proc. of International Joint Conference on ICROS-SICE. Fukucoka, Japan: [s. n.], 2009: 2911-2914.
- [4] 陈天恩, 陈立平, 陈红, 等. 基于 GIS 的森林火灾现场模拟及其应用[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(1): 76-80.
- [5] 秦向东, 阿布里提, 林其钊. 两类常用森林火灾蔓延模型的比较[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(5): 113-118.
- [6] 李德仁, 龚健雅, 邵振峰. 从数字地球到智慧地球[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(2): 127-132.
- [7] Liu Yuewen, Yang Hongye, Wang Shuo. Multi-factor Spread Simulation of Forest Fire Based on CA Model[C]//Proc. of International Conference on New Trends in Information and Service Science. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 1087-1089.
- [8] Castrillon M. Wildfire Forecasting Using an Open Source 3D Multilayer Geographical Framework[C]//Proc. of Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM Press, 2009.

编辑 顾逸斐

(上接第 260 页)

参考文献

- [1] 周倩, 王志谦, 李青. 基于 DSM-CC U-N 的 VOD 系统资源会话管理器设计[J]. 电视技术, 2011, 35(2): 58-60.
- [2] 杨春贵, 吴产乐, 彭鸿雁. 一种有效的 Web 代理缓存替换算法[J]. 计算机工程, 2007, 33(3): 43-44.
- [3] 黄敏, 蔡志刚. 缓存替换算法研究综述[J]. 计算机科学, 2006, 33(12): 194-195.
- [4] Mikio K, Kunihiro T. System for Large-scale Networks[C]//Proc. of ICCG'06. [S. l.]: IEEE Press, 2006.
- [5] Shim J, Cheuermann P, Vingralek R. An Unified Algorithm for Cache Replacement and Consistency in Web Proxy Servers[C]//Proc. of Data Bases and Web Conference. [S. l.]: IEEE Press, 1998: 1-13.
- [6] Arlitt M, Cherkasova L, Dilley J. Evaluating Content Management Techniques for Web Proxy Caches[J]. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2000, 27(4): 3-11.
- [7] Chen Songqing, Shen Bo, Wee S, et al. Adaptive and Lazy Segmentation Based Proxy Caching for Streaming Media Delivery[C]//Proc. of the 13th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video. New York, USA: [s. n.], 2003.

编辑 索书志

