

一种基于 CA 的林火蔓延模型的设计与实现^{*}

——以内蒙古地区为例

刘月文, 杨宏业, 王 硕, 赵 淳

(内蒙古工业大学 信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘 要: 森林火灾是一种严重危害人类社会的灾害, 它的发生和蔓延将给社会带来不可估量的经济损失和生态环境的严重恶化。若能将森林火灾控制在初发阶段并预测其发展蔓延趋势, 将有效的控制森林火灾的进一步蔓延。利用元胞自动机(CA)模拟复杂现象的特点, 根据林火燃烧过程中影响因素是否可变, 将影响林火燃烧因素分为两大类, 设计并实现了适合内蒙古地区林火蔓延模型。

关键词: 森林火灾; 元胞自动机; 模拟; 内蒙古地区

中图分类号: S762.3⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2009)03-0098-05

0 引言

内蒙古森林总面积约 1 406.6 hm², 占全国森林总面积的 11%, 居全国第 2 位, 是我国重要的森林基地之一。树木种类繁多, 全区乔灌木种达 350 多种。内蒙古森林资源大部分集中在大兴安岭北部山地, 被誉为“祖国的绿色宝库”。但由于近几年持续高温、干旱、少雨、大风等不利因素的影响, 经常发生雷电或人为引起的林火事故。如果在火灾发生初期能快速准确地模拟和预测火势的蔓延和发展, 可以为及时部署灭火力量、控制火灾蔓延提供科学的决策依据。

元胞自动机(Cellular Automata, 简称 CA)是一种时间、空间、状态都离散, 空间相互作用和时间因果关系都为局部的网格动力学模型, 其目的主要是从计算的角度来设计出一种可自我复制的自动机。CA 具有强大的空间建模能力和运算能力, 能模拟具有时空特征的复杂动态系统。随着元胞自动机研究的深入, CA 被越来越多的学者用来模拟和预测森林火灾的扩散研究, 如 Bak 和 Tang 建立的森林火灾扩散概率元胞自动机模型, 这个概率元胞自动机模型定义在 d 维超正方体网格上。最初, 每个网格有树、正在燃烧的树及空三种状态。但模型没有考虑到森林树种、森林形状,

发生火灾时的天气状况(温度、湿度、风速、风向等), 地形、坡度等要素的影响, 是理想的模型。并且, 如果定义的元胞尺度较大, 这种状态定义具有一定的局限性^[1]; Karafyllidis 和 Thanailakis 提出了用元胞内各成分的比值表达的元胞状态及其林火蔓延的 CA, 该模型可以很容易的结合影响林火的气候因素和地形影响因素; 其他模型有对上述模型进行修正的^[3], 也有利用概率型元胞自动机模型进行模拟的应用实例^[4]。

林火的燃烧受多种因素的影响, 是一种极其复杂的物理现象。大多数模拟林火蔓延的研究中, 主要考虑了气象、坡度及可燃物类型三种影响林火蔓延的因素。本文借鉴 Karafyllidis 和 Thanailakis 于(1997)提出的基于元胞自动机的森林火灾蔓延模拟模型^[2], 设计实现了基于 CA 的多因素型林火蔓延新模型。该模型在原有模型的基础上考虑了森林可燃物类型对林火蔓延的影响, 并根据林火燃烧过程中影响因素是否可变, 将影响林火燃烧因素分为两大类, 利用 MapInfo 网格生成器生成元胞网格, 实现林火蔓延模拟仿真。

1 林火的基本模型描述

元胞自动机最基本的组成单位包括元胞、元胞空间、邻居及规则 4 个部分, 另外还应包括元胞

^{*} 收稿日期: 2009-02-02

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重大项目(2006BAK01A32)

作者简介: 刘月文(1982-), 女, 山西祁县人, 硕士研究生, 主要研究领域为 CA 模型应用及突发性公共事件应急技术与信息系统研究. E-mail: liu_yuewen@yahoo.cn

的状态。某一时刻, 每一个元胞都具有自己的状态, 元胞状态根据研究问题的不同而不同。并且根据具体问题的具体规则, 每一时刻元胞状态也会发生变化。下面我们主要介绍应用在森林火灾模拟方面的元胞自动机模型的元胞空间划分、状态函数及规则等。

1.1 元胞空间划分

元胞所分布在空间上的网格点的集合就是我们所说的元胞空间。理论上它可以是任意维数。目前的研究工作多集中在一维和二维元胞自动机上。本文采用二维元胞自动机的邻居定义, Moore 型邻居。一个元胞的上、下、左、右 4 个相邻元胞加上对角线方向上的 4 个次邻胞为该元胞的邻居。如图 1, 邻胞即与中心元胞 (i, j) 有公共边的元胞, 分别用 $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$ 表示。次邻胞即位于对角线方向上的 4 个位置, 分别用 $(i-1, j-1)$, $(i-1, j+1)$, $(i+1, j-1)$, $(i+1, j+1)$ 表示。

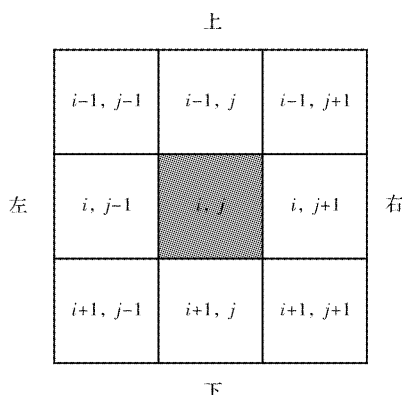


图 1 Moore 邻域

将森林区域按边长 L 划分成相等的网格点集合, 即每个边长为 L 的森林网格点被看作元胞自动机中的一个元胞单元。 L 越小, 模拟林火的细节越清晰, 但计算量和数据量会加大, 要以牺牲模拟速度为代价。因此需要根据具体情况适当地选取元胞边长尺寸。

1.2 林火蔓延速度

结合改进型王正非林火蔓延模型, 给出火的初始蔓延速度回归式^[5] (m/min):

$$R_0 = aT + c, \quad (1)$$

式中: R_0 为元胞的初始蔓延速度, 在不考虑风速、日最小相对湿度及坡度影响的情况下, 林火的自然蔓延速度; T 为当日实时气温 ($^{\circ}\text{C}$); a 为系数 (0.053); c 为常数 (0.275)。每个元胞都有一个初始蔓延速率 R_0 , 例如元胞 (i, j) 的初始蔓延速率为

$R_{i,j}$, 即 $R_0 = R_{i,j}$, 它决定了元胞 (i, j) 完全燃烧所需的时间。

1.3 元胞状态函数

1.3.1 t 时刻元胞 (i, j) 的状态

t 时刻元胞 (i, j) 的状态可以描述为元胞 (i, j) 已经燃烧的面积与整个元胞 (i, j) 面积的比值。

$$C_{i,j}^t = A_a / A_b, \quad (2)$$

式中: A_a 为元胞 (i, j) 已经燃烧的面积; A_b 为整个元胞 (i, j) 的面积。如果 $A_a = 0$, 则 $C_{i,j}^t = 0$, 表示当前元胞未燃烧; $0 < A_a < A_b$, 则 $0 < C_{i,j}^t < 1$, 表示当前元胞处于不完全燃烧状态; $A_a = A_b$, 则 $C_{i,j}^t$ 为 1, 表示元胞 (i, j) 在 t 时刻已经完全燃烧。

在此基础上, 可以根据实际情况增加相应的状态表达, 在 $A_a = A_b$, 即 $C_{i,j}^t$ 为 1 后的若干时间之后, 可以置 $C_{i,j}^t$ 为 2, 表示该元胞已经燃烧结束, 以后也不再可能燃烧。除此之外, 我们也还可以考虑增加元胞的属性状态, 用来表示坡度、异质森林等可能影响到林火蔓延模拟的各种因素, 此部分内容论文后边部分详述。

1.3.2 元胞状态更新

按定义, 元胞自动机演化规则是局部的, 对指定元胞的状态进行更新时只需要知道其邻胞的状态。对于通常状态下的元胞, 不考虑特殊附加属性的影响, 它在 $t+1$ 时刻的状态由元胞 t 时刻自身的状态以及 t 时刻元胞周围 4 个邻胞和 4 个次邻胞状态共同决定。CA 的演变规则函数可表示为:

$$C_{i,j}^{t+1} = F(C_{i-1,j-1}^t, C_{i-1,j}^t, C_{i-1,j+1}^t, C_{i,j-1}^t, C_{i,j}^t, C_{i,j+1}^t, C_{i+1,j-1}^t, C_{i+1,j}^t, C_{i+1,j+1}^t). \quad (3)$$

$C_{i,j}^t$ 和 $C_{i,j}^{t+1}$ 分别表示元胞 (i, j) t 时刻和 $t+1$ 时刻的状态。如果元胞 (i, j) 处于未燃烧状态, 即 $C_{i,j}^t = 0$ 。假设它周围的 4 个邻胞中有且仅有一个燃烧, 那么根据元胞边长和火蔓延速率可以确定时间步长 $T(s)$:

$$T = L / R_{i,j}, \quad (4)$$

式中: L 为元胞边长 (m); $R_{i,j}$ 为元胞 (i, j) 的初始蔓延速率 (m/min)。即经过 T 时刻后元胞 (i, j) 的状态为完全燃烧, 即 $C_{i,j}^{t+1} = 1$ 。如果假设它周围的 4 个次邻胞中有且仅有一个燃烧, 如图 2(a) 示, 那么元胞 (i, j) 完全燃烧完需要经过 T' 时刻:

$$T' = \sqrt{2}L / R_{i,j} = 2T, \quad (5)$$

式中: $\sqrt{2}L$ 为元胞单元对角线的长度 (m); $R_{i,j}$ 为元胞 (i, j) 的初始蔓延速率 (m/min)。

如上所述, 与元胞 (i, j) 次相邻的邻胞中仅有一个元胞单元某时刻处于燃烧状态, 如果经过 T

时刻,那么元胞 (i, j) 的状态应根据式(2)得到。 T 时刻后元胞燃烧的面积应为 $1/4$ 圆的面积,如图 2(b)所示, T 时刻后元胞 (i, j) 已经燃烧的面积应为 $\pi L^2/4(m^2)$ 。元胞 (i, j) T 时刻后的状态为:

$$C_{i,j}^{t+1} = \pi L^2/4L^2 \approx 0.785. \quad (6)$$

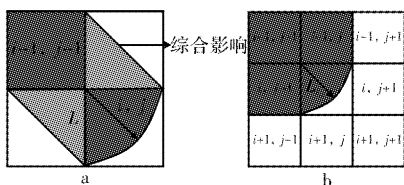


图2 T 时刻后元胞 (i, j) 受次邻胞影响的燃烧面积

简言之,如果中心元胞 (i, j) 具备燃烧条件,但在某时刻处于未燃烧状态,如果与之相邻的元胞中仅有一个元胞单元处于燃烧状态,则 T 时刻后,元胞 (i, j) 状态为 1;如果与之次相邻的元胞中仅有一个元胞单元某时刻处于燃烧状态,则 T 时刻后,元胞 (i, j) 状态为 0.785。如果中心元胞周围的邻胞不止一个处于燃烧状态,则元胞 (i, j) 在下一时刻的状态为 1。综上所述,元胞 (i, j) $t+1$ 时刻的状态,即 CA 演变规则可表示为:

$$C_{i,j}^{t+1} = C_{i,j}^t + \Psi(C_{i-1,j}^t + C_{i,j-1}^t + C_{i,j+1}^t + C_{i+1,j}^t) + 0.785(C_{i-1,j-1}^t + C_{i-1,j+1}^t + C_{i+1,j-1}^t + C_{i+1,j+1}^t). \quad (7)$$

如果 $C_{i,j}^{t+1} > 1$, 那么取 $C_{i,j}^{t+1} = 1$ 。

2 林火蔓延的影响因子及其分类

为简化林火蔓延模型,只考虑气象因素、地形因素及可燃物类型因素对林火燃烧的影响。气象因素主要考虑温度、风速和风向的影响;地形因素主要考虑林区的坡度影响;森林可燃物是森林燃烧的物质基础,也是林火行为的主体。可燃物类型与林火结构、森林火灾潜在关系紧密。除此之外,我们也考虑了像湖、河流、公路等阻止林火燃烧的障碍物对林火蔓延的影响。通过对这几种因素本身的特点的分析,对元胞自动机规则进行改进,以符合实际林火蔓延规律。

2.1 可变因素对元胞自动机规则的影响

一方面,温度、风速和风向均是随时变化的,它们对林火的影响是外在的,连续的。在林火燃烧过程中是可变的,温度的影响已经包含在火蔓延速度的公式中,例如对于同一片森林夏天火蔓延的速度就要比冬天火蔓延的速度快,原因是由于季节不同植被的干湿情况也不同。

另一方面,在无限小区域、时间内,温度、风速和风向因素又都可以看做是不变的常数。为

了使模型可以较快速的正常运行,我们在此处把连续的风速和风向的作用,用离散型的一组数据来表示。这组离散型的数据取值密度,将会影响到整个模型的精确度,然而,在实际应用中,当离散数据的取值密度足够大的时,往往可以忽略由取值密度所产生的系统误差。

为了将风的影响加入到元胞自动机规则中,将式(6)中每个元胞 t 时刻的状态赋予一个风权重。无风的情况下,所有的权重值设为 1。结合实际情况,可以随时调整风权重值,与实际火蔓延情况进行校对。此时的 CA 演变规则变为:

$$C_{i,j}^{t+1} = C_{i,j}^t + \Phi(uC_{i-1,j}^t + dC_{i,j-1}^t + lC_{i,j+1}^t + rC_{i+1,j}^t) + 0.785(luC_{i-1,j-1}^t + ruC_{i-1,j+1}^t + ldC_{i+1,j-1}^t + rdC_{i+1,j+1}^t), \quad (8)$$

式中: u 、 d 、 l 、 r 分别为上下左右 4 个元胞上的风权重值; lu 、 ru 、 ld 、 rd 分别为对角线方向上元胞的风权重值。

2.2 不可变因素对元胞自动机规则的影响

坡度、可燃物类型和障碍物是森林区域固有的属性。它们不会随燃烧的变化而发生变化。所以我们认为它们在林火燃烧中是不变的。对于某时、某地来说,整个燃烧范围和燃烧过程中,可假定为常数。

林火向上坡蔓延,蔓延速度加快。林火向下坡蔓延,蔓延速度减慢。设元胞 (i, j) 为中心元胞,中心点高度值为 $h_{i,j}$,元胞 (k, l) 为元胞 (i, j) 的一个邻胞,中心点高度值为 $h_{k,l}$ 。

$$G_{i,j} = f(h_{k,l} - h_{i,j}), \quad (9)$$

式中: $G_{i,j}$ 为坡度系数,表示邻胞坡度对中心元胞的影响。由于次邻胞坡度对中心元胞影响较小,主要是通过影响中心元胞周围的邻胞对中心元胞坡度起间接作用,所以将次邻胞的影响一并考虑到邻胞坡度中。

s 用来表征可燃物的易燃程度及是否有利于燃烧的修正系数,它随地点和时间而变。王正非林火蔓延模型专门针对大兴安岭林区,按照野外实地可燃物配置类型,将可燃物分为 3 类,草甸,次生林、针叶林,分别给出了修正值 1.0, 0.7, 0.4^[6]。对于每个森林元胞区域,可燃物类型系数是元胞的一个属性,通过这个属性值的大小,很容易的反映出该元胞区域是否易燃。并且可燃物只影响本身元胞状态,对周围邻胞没有影响。我们也可以根据实际情况增加属性值,修正特殊林区的可燃物类型。

障碍物可以有效阻止林火蔓延。将代表障碍

物的元胞区域赋予一个常数属性值 -1, 判断, 如果元胞状态值为 -1, 则此元胞永远不会燃烧。

综上所述, 除了考虑风因素影响, 还要考虑坡度、可燃物类型和障碍物的综合影响。则 CA 演变规则变为:

$$C_{i,j}^{t+1} = sC_{i,j}^t + (uG_{i-1,j}C_{i-1,j}^t + dG_{i+1,j}C_{i+1,j}^t + lG_{i,j-1}C_{i,j-1}^t + rG_{i,j+1}C_{i,j+1}^t) + 0.785(luG_{i-1,j-1}C_{i-1,j-1}^t + ruG_{i-1,j+1}C_{i-1,j+1}^t + ldG_{i+1,j-1}C_{i+1,j-1}^t + rdG_{i+1,j+1}C_{i+1,j+1}^t) \quad (10)$$

3 模拟结果

采用 VisualBasic 集成 MapX 控件进行二次开发。MapInfo 本身正好自带了创建网格空间的工具 (Grid maker), 可以根据需要设定网格的大小。我们以 $300 \times 300 \text{ m}^2$ 的区域为实验地, 生成含有 10 万个网格单元的元胞空间。一个元胞单元在元胞空间中的位置用网格行列号来确定。经过网格行列号的计算和网格单元字段的初始化处理后, 就可以为每一个元胞赋上属性值, 并且量化了元胞在空间中的位置。

模拟结果 1 根据上述对基本模型的描述, 假设火灾发生在地形平坦、材质均匀的森林区域, 且无风。在这种条件下, 通过上述规则模拟出的火势形状应为规则的圆形, 如图 3 所示, 由于正方形的元胞格子, 所以图中的火圈呈现为面的趋势而不是光滑的曲面。

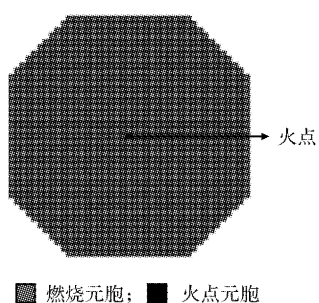


图3 无风、无坡度情况下火蔓延形状图

上述的元胞局部演变规则是在无风、无坡度、不考虑可燃物类型的理想情况下给出的, 实际情况下, 森林可燃物并不单一, 且火的蔓延受地形和气象因子的影响是不可忽略的。

模拟结果 2 假设火灾发生在地形平坦、材质均匀的森林区域, 风向由右向左, 风权重设置如下。

$$\begin{aligned} \text{Fire_Wind_l} &= 0.8 & \text{FirevWind_r} &= 1.3 \\ \text{Fire_Wind_d} &= 1 & \text{Fire_Wind_u} &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fire_Wind_dl} &= 0.6 & \text{Fire_Wind_ul} &= 0.8 \\ \text{Fire_Wind_dr} &= 0.8 & \text{Fire_Wind_ur} &= 1.1 \end{aligned}$$

这种条件下, 通过上述规则模拟出的火势形状如图 4 所示。由图可以看出, 由于风因子影响, 导致火势向左 (顺风方向) 蔓延的速度最快, 向右 (逆风方向) 蔓延的速度最慢。

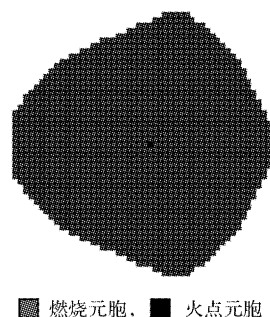


图4 风因素影响下的林火蔓延图

模拟试验 3 假设林火燃烧受气象、地形、可燃物类型和障碍物的综合影响, 模拟结果如图 5 所示。图 5(a) 是在理想情况下元胞遇到障碍物的模拟结果图; 图 5(b) 为综合上述影响因素情况下模拟效果图。

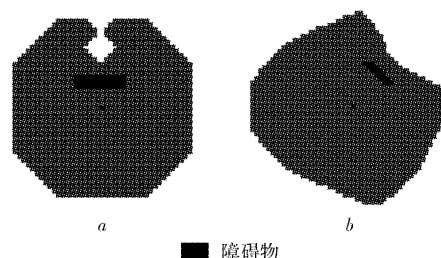


图5 综合模拟效果图

针对显示终端的效果要求, 可以在上述试验仅考虑元胞状态包括 0 和 1 两种状态的基础上, 增设一种新的状态。元胞燃烧一段时间后, 我们可以设置其元胞状态值, 即 $C_{i,j}^{t+1} = 2$ 表示燃烧完的元胞, 如图 6 所示。燃烧完的元胞与燃烧着的元胞以不同颜色表示。

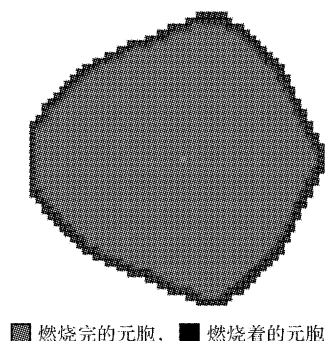


图6 增加状态后的元胞效果

4 结论

采用元胞自动机模型对森林火灾蔓延的复杂现象进行模拟,将元胞自动机模型特点与林火燃烧自身特点进行整合,探讨了影响林火蔓延的主要因素在元胞自动机中的作用形式,风因素随时间步长的变化、坡度的方向和大小对元胞状态的影响及可燃物类型的划分。在此基础上,还进行了外在因素对不同方向上的蔓延速度的影响做了初步研究,但是由于林火燃烧的复杂性,上述问题还有待进一步研究探讨。通过对上述问题的简单分析,并结合 MapX 控件生成的元胞网格点,在 VB 上开发实现了林火行为的模拟仿真。该模型可以根据实际情况校正,并为搭建林火辅助救援决策平台提供有力的决策支持。

参考文献:

[1] 黎夏,叶嘉安,刘小平,等.地理模拟系统元胞自动机与多

智能体[M].北京:科学出版社,2007.

- [2] Ioannis Karafyllidis, Adonios Thanailakis. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata [J]. Ecological Modelling, 1997, (99): 87-97.
- [3] Stephen G Berjak, John W Hearne. An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system [J]. Ecological Modelling, 2002, (148): 133-151.
- [4] 孟晓静,杨立中,李健.基于元胞自动机的城市区域火蔓延概率模型探讨[J].中国安全科学学报,2008,18(2): 28-33.
- [5] 王正非.通用森林火险系统结构[J].林业科技,1992,(3): 22-24.
- [6] 温广玉,刘勇.林火蔓延的数学模型及其应用[J].东北林业大学学报,1994,22(2): 31-36.
- [7] A. Hernandez Encinas, L. Hernandez Encinas, S. Hoya White, A. Martin del Rey, G. Rodriguez Sanchez. Simulation of forest fire fronts using cellular automata [J]. Advances in Engineering Software 2007, (38): 372-378.
- [8] S. Yassemi, S. Dragicevic, M. Schmidt. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour [J]. Ecological Modelling, 2008, (210): 71-84.

Design and Implementation of CA-based Forest Fire Spread Model ——A Case Study in Inner Mongolia Region

Liu Yuewen, Yang Hongye, Wang Shuo and Zhao Chun

(Information Engineering College, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Forest fire is a serious natural disaster that causes great economic losses and terrible ecological deterioration. Further spread of forest fire can be effectively controlled in case of being restricted in its primary developmental stage and its developing trend being predicted. Based on the characteristics of simulating complicated situations with cellular automata (CA) model, forest fire factors are divided into two types according to their influences in the fire process, and a forest fire spread model suitable for Inner Mongolia Region is then designed and implemented.

Key words: forest fire; cellular automata; simulation; Inner Mongolia region