

基于多智能体算法的 CA 林火空间扩散模型

周国雄, 吴淇*, 陈爱斌*

(中南林业科技大学 计算机与信息工程学院, 湖南 长沙, 410004)

摘要: 针对林火蔓延多相和多组分的性质, 提出一种基于多智能体算法的 CA 林火空间扩散模型。首先, 采用基于王正非的 CA 模型对林火蔓延趋势进行近似模拟。其次, 在 CA 确定的元胞状态转换规则的基础上, 结合多智能体算法的自学习及变异的方法, 使得实测林火格局与 CA 规则驱动的演进模式最为接近, 实现自动优化 CA 规则, 从而使得 CA 蔓延模型的精度提高。通过仿真结果, 对比分析传统的 Rothermel 模型与本文提出的方法, 可知在火场面积和火场周长方面, 实际林火蔓延过程与本文提出的林火空间扩散模型的实验仿真结果具有较高的相似性。

关键词: 进化智能体; 多智能体算法; 元胞自动机; 规则函数; 林火蔓延

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

文章编号: (2016)

A forestry fire spatial diffusion model based on the integration of multi-agent algorithm with cellular automata

Zhou Guo-xiong, Wu Qi*, Chen Ai-bin*

(School of Computer and Information Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha, 410004)

Abstract: Due to forestry fire has the nature of multi-phase and multi-component. A forestry fire spatial diffusion model based on the integration of multi-agent algorithm with cellular automata was proposed. Firstly, using a method, which was based on the Wang Zhengfei-CA model, to approximative simulate the spread of forestry fire. Then, On the basis of the status transition rule, which was determined by CA, and using the self-learning and variation methods of multi-agent algorithm. So that the measured forestry fire pattern is nearest to CA rule-driven evolution model, and the CA rule can be automatically optimized. Through simulation results, comparative analyzing the traditional Rothermel model and the method was mentioned in this article. it was found that in the fire area and fire perimeter aspects. The Experiment show that the actual forestry fire spread process has higher similarity to the forestry fire spatial diffusion model was mentioned in this article.

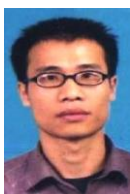
Key words: evolutionary agent; multi-agent algorithm cellular; automata; rules function; forestry fire

引言

森林火灾具有突发和随机性质, 在短时间

内可对人与环境造成巨大的伤害, 在火警情报出现的情况下, 必须根据当时情况尽快的采取紧急措施。由于林火蔓延有多相以及多组分的性质, 以及地形条件和各种气象(温度、风力以及风向等)的影响下, 可燃物燃烧和运动极其复杂, 所以林火蔓延较难预测。而现有的单模型预测精度不高, 因此有必要采用一种多模型预测的手段提高林火蔓延的预测精度。

在 W.R.Fons 首次提出林火蔓延的数学模型, 自此之后, 许多国家相继提出了林火蔓延



作者简介: 周国雄(1980-), 男, 湖南嘉禾人, 博士后, 副教授, 研究领域: 智能控制、无损检测。***通讯作者:** 吴淇(1995-), 男, 福建三明人, 本科生, 研究领域: 智能控制。***通讯作者:** 陈爱斌(1971-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 图像处理, 模式识别, 研究生教育管理等。

Email: zhougx01@163.com.

收稿日期: 2016. 3. 9 **修回日期:** 2016. 5. 18

基金项目: 国家 948 项目(2014-4-09); 国家自然科学基金资助项目(31470659)

模型。目前可以分为加拿大林火蔓延模型（半机理半统计模型）、基于能量守恒定律的 Rothermel 模型（物理机理模型）、澳大利亚的 McArthur 模型（统计模型）、王正非的林火蔓延模型、物理模型 5 种模型^[1]。同时林火行为预测预报的主要方向是基于林火蔓延模型以地理信息系统为平台的林火蔓延模拟^[2]。在不具备自组织机制的复杂系统仿真方面，这些大多是基于统计规律建立或者物理规律数学模型而建立的模型存在一定的局限性。张菲菲^[3]等通过分析元胞空间中可燃物类型，坡度，风向，风速，温度和湿度等林火蔓延影响因子的作用形式，实现林火行为在不同条件下的模拟。在三维林火模拟方面，黄华国^[4]等以八达岭林场局部地区为实验区域，提出了三维曲面元胞自动机林火蔓延模型，并且开发相关软件系统来三维模拟林火蔓延形态。但是将林火蔓延的真实速度忽略，只将元胞转换规则考虑在内。在根据物理规律建立的林火蔓延模型方面，Stephen^[5]等在元胞自动机中引入 Rothermel 模型；Jan^[6]等则引入椭圆模型。但是，上述两种模型都要求输入大量有嵌套关系的参数，且大多参数需要通过实验来获取。因此，当这些模型推广应用至大范围地区时，仍有一定的限制性。

湖南省邵东县水东江镇芽江村莲湖山场中，森林有效可燃物载量高，植被种类复杂多样，条件特殊，尤其是林下灌木、杂草丛生抗火性能较差；在特殊的地形条件下，火灾发生地山势险峻且道路少，对扑火队伍行进速度有较大的影响且扑救难度大。基于上述参考文献，考虑全局因素在林火蔓延过程的影响，并将 CA 以及多智能体算法与具有连续特征的林火蔓延速度模型相互结合，提出一种基于多智能体算法的 CA 的林火空间扩散模型。

1 林火模型结构

林火蔓延是对林火行为的研究，从林火被点燃到熄灭的全过程中所释放的能量、火灾类型、火焰强度等特征的综合即为林火行为^[7]。通

过分析现有的林火模型及其适用性，并对林火蔓延机理进行分析。目前，大多数的经典模型都是基于物理规律或统计规律建立的数学模型，主要集中在林火行为与自然因素之间建立关系，缺乏自组织性，以及林火蔓延的时空特性未考虑在内，其状态随时间连续变化，对于比较复杂的系统模型存在一定的局限性。当系统变得越来越复杂，非常难以求解微分方程^[8,9]。由于中国的林木结构组成复杂，以湖南省邵东县水东江镇芽江村莲湖山场为例，本文提出采用基于多智能体算法的 CA 林火空间扩散模型。模型的结构框架如图 1 所示。考虑到该村莲湖山场的特点，本文采用适合我国林火特点的基于王正非的 CA 林火蔓延模型。由于 CA 模型通常按照预先设计的确定规则来进行 CA 的演进，而在确定的规则驱动下，CA 能在原理上模拟比较复杂的自然现象，但较难精确地模拟。因此，本文提出应用多智能体算法来自适应调节元胞自动机规则的方法，并且根据实测的林火蔓延数据来训练 CA 规则，在此基础上，林火蔓延实验模型得以建立，林火蔓延趋势得以较好地被模拟出来。

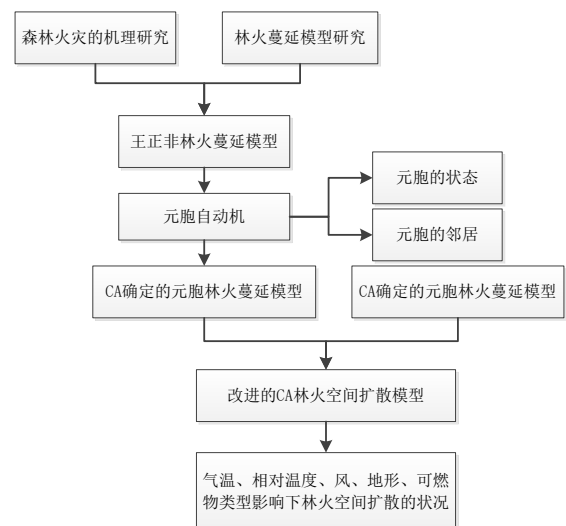


图 1 模型结构图

2 王正非林火蔓延模型

模拟林火蔓延的类型各不相同，据此可将林火模型分为三类：地表火模型、树冠火模型、

地下火模型等。近 50 年来,在全世界范围内,最主要的林火研究项目之一便是建立地表火模型。地表火模型主要考虑的林火蔓延影响因素有:实际可燃物类型、气象以及地形等。

本文选择的王正非模型,具有较强的针对性和简单的操作性,当地形的坡度在 60° 以下时有较强的适用性,符合我国的林火蔓延特点。林火蔓延的初速度(v_0)由王正非分析得出:

$$v_0 = 0.0299T + 0.047W + 0.009(100 - h) - 0.304 \quad (1)$$

式中: v_0 为林火蔓延的初速度 (m/min); T 为每天的最高温度 ($^\circ C$); W 为中午的风力(级); h 为每天的最小相对湿度 (%),可用中午实测值。

林火蔓延的初速度(v_0)乘以可燃物类型更正值(K_s)、地形坡度更正值(K_f)、风力更正值(K_w)可得林火火头蔓延的速度(v_1):

$$v_1 = v_0 \cdot K_s \cdot K_f \cdot K_w \quad (2)$$

式中:可燃物类型更正值(K_s)、地形坡度更正值(K_f)、风力更正值(K_w)可以通过查表获取。

3 元胞自动机

元胞自动机是通过简单的局部运算来模拟空间与时间上离散的复杂性现象的模型^[10]。它主要有元胞、时间、状态、邻近范围、转换规则函数这五个部分构成。基本运算法则是:可通过某元胞在时刻状态及周围邻近范围元胞状态函数表示其在时刻的状态,函数形式即:

$$S^{t+1} = f(S^t, N^t) \quad (3)$$

式中: S^t 为该元胞在 t 时刻的状态, S^{t+1} 为元胞在 $t+1$ 时刻的状态, f 为转换规则函数, N^t 为 t 时刻该元胞邻近范围的状态。

根据元胞的八邻域,可将其分为两种,即“ \times ”形和“ $+$ ”形。选取摩尔(Moore)型的邻居类型。其中 Moore 邻居描述如下:

$$N_{\text{moore}} = \{v_i = (v_{ix}, v_{iy}) \mid |v_{ix} - v_{ox}| \leq 1, |v_{iy} - v_{oy}| \leq 1, (v_{ix}, v_{iy}) \in Z^2\} \quad (4)$$

式中: v_{ix} , v_{iy} 为邻域元胞的行列坐标, v_{ox} , v_{oy} 为中心(当前)元胞的行列坐标。一个元胞的邻居个数为 $3^d - 1$ (d 为维数)。

每个元胞都包含了坡度、风因子和林种数

据等不同的描述参数。林火的初始蔓延速度可以通过式(1)计算得出。正在燃烧的中心元胞向各个邻域元胞蔓延的速度向量为 $\tilde{v}_{i,j}$, 如式(5)所示:

$$\tilde{v}_{i,j} = v_0 \begin{bmatrix} (K_s K_w K_f)_{i-1,j} \\ (K_s K_w K_f)_{i,j+1} \\ (K_s K_w K_f)_{i+1,j} \\ (K_s K_w K_f)_{i,j-1} \\ (K_s K_w K_f)_{i-1,j-1} \\ (K_s K_w K_f)_{i-1,j+1} \\ (K_s K_w K_f)_{i+1,j+1} \\ (K_s K_w K_f)_{i+1,j-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,列向量元素 $v_0(K_s K_w K_f)_{k,l}$ 表示从 (i,j) 元胞到邻域 (k,l) 元胞的蔓延速度。根据影响因子计算出不同环境条件下的林火扩散速度,再通过已确定的初始蔓延速度,可以得到整个元胞空间的蔓延速度。由式(3)以及式(5),元胞的状态由元胞自身在 t 时刻的状态和在这个时间步长内八邻域元胞的蔓延速度共同决定,如式(6)所示:

$$S_{i,j}^{t+1} = f(S_{i,j}^t, v_{i-1,j-1}^t, v_{i-1,j}^t, v_{i-1,j+1}^t, v_{i,j-1}^t, v_{i,j}^t, v_{i,j+1}^t, v_{i+1,j-1}^t, v_{i+1,j}^t, v_{i+1,j+1}^t) \quad (6)$$

式中: $S_{i,j}^{t+1}$ 为元胞在 $t+1$ 时刻的状态函数, $v_{i-1,j-1}^t$, $v_{i-1,j}^t$, $v_{i-1,j+1}^t$, $v_{i,j-1}^t$, $v_{i,j}^t$, $v_{i,j+1}^t$, $v_{i+1,j-1}^t$, $v_{i+1,j}^t$, $v_{i+1,j+1}^t$ 为在 t 时刻元胞八邻域向中心元胞的林火蔓延速度。CA 的状态转换规则函数 f , 可以通过以上的计算得到:

$$S_{v_{ix}, v_{iy}}^{t+1} = S_2 \mid S_{v_{ix}, v_{iy}}^t = S_1 \text{ and } \Delta S = S_2 \quad (7)$$

$$S_{v_{ix}, v_{iy}}^{t+1} = S_3 \mid S_{v_{ix}, v_{iy}}^t = S_2 \text{ and } S > S_3 \quad (8)$$

$$S_{v_{ix}, v_{iy}}^{t+1} = S_0 \mid S_{v_{ix}, v_{iy}}^t = S_0 \text{ and } \Delta S = S_4 \quad (9)$$

式中: S_0 为不可燃烧状态(比如已燃烧状态或没有燃烧物); S_1 为未燃烧状态; S_2 为初始燃烧状态; S_3 为燃烧最盛状态; S_4 为燃烧接近结束状态。

4 基于多智能体算法的 CA 林火空间扩散模型

构造林火空间扩散模型时,用实测的林火蔓延数据训练 CA 规则,以便根据环境的变化得出一组优化的规则集(即规则模式)。因此,将元胞空间分成 C_s 、 C_r 、 C_{rule} 3 层。其中, C_s 描述火场的基本属性; C_r 描述实际林火蔓延数据; C_{rule} 描述每个元胞适用规则的参数。通过对规则参数的选择优化, CA 规则对实测林火蔓延模式的自适应得以实现。

多智能体算法的理论和应用有了很大的发展^[11],可以将多智能体算法的决策行为多样性抽象为对多峰值函数的寻优问题,林火蔓延问题中的 CA 模型也具有相同的特点。该机制的基本原理是:以实测系统演进格局 C_r 为燃烧智能体,以参数化的规则模式作为进化智能体,运用多智能体算法的自学习及变异方法,目标是使 CA 规则驱动的演进模式最接近实测林火格局,经过 CA 多次的演进迭代得到一组优化的规则参数,即规则模式。其中,自学习行为指的是:在 CA 每一次演进中,燃烧智能体与进化智能体之间的亲和度(即实测林火格局与规则驱动的演进模式的相似度),选取亲和度高的进化智能体进行遗传,然后变异(即规则参数的随机扰动),并在新旧进化智能体中,将亲和度高的进化智能体保留并使其进行下一次迭代。重复上述步骤,直到亲和度不再提高或者选择出最优的规则模式为止。

4.1 进化智能体(规则模式)的编码

在给定的 CA 演进时间步数的条件下,规则模式由每个时间步上驱动 CA 演进的所有元胞的适用规则构成,用参数表示每一个适用规则,进化智能体就是这些用参数表示的规则。为使进化智能体多样化,避免陷入局部最大,在每个时间步, C_{rule} 空间的每一个元胞可以存储多组规则参数,即保持一定的群体数目。所有的表示元胞适用规则的参数组构成了进化智能体模式。利用多智能体算法,目的就是要得到一个最优的进化智能体模式。假定式(9)恒定不变,以此保证以下两个条件得到满足:过火林木不

再燃烧,火线在遇到阻燃障碍物时不发生燃烧。因此可以通过式(7)、(8)得到规则的参数表达:

$$S_{v_{ix},v_{iy}}^{t+1} = S_{p1} \left| S_{v_{ix},v_{iy}}^t \right| = S_{p2} p_3 S = S_{p4} \quad (10)$$

式中, p_1 , p_2 , p_3 , p_4 是规则参数,因此一条规则可以用一个四元组 (p_1, p_2, p_3, p_4) 来定义。一般情况下,第 k 个元胞的适用进化智能体可以由 n 组 m 个参数确定,即:

$$P_k = \left((p_{11}, p_{12}, \Lambda, p_{1m}), (p_{21}, p_{22}, \Lambda, p_{2m}), \dots, (p_{n1}, p_{n2}, \Lambda, p_{nm}) \right) k, k=1,2,\Lambda,l \quad (11)$$

式中, k 为元胞编号; l 为当前的元胞数; m 为一条规则所需要的参数数目,即进化智能体所需要的参数数目,在本例中取值为 4。进化智能体的群体数 n 的大小反比于当前元胞的适用进化智能体群对燃烧智能体(实测系统演进格局)的亲和度。对于简化的林火空间扩散模型, p_{i1} , p_{i2} , p_{i4} 的取值范围是 $(0, 1, 2, 3, 4)$, p_{i3} 的取值范围是: *and*, *or*。将 *and*, *or* 映射到 $(0, 1, 2, 3, 4)$ 上,可以实现编码形式上的统一。比如设参数 0, 1 对应于 *and*, 参数 2, 3, 4 对应于 *or*。这样对规则的编码就变成了对参数 p_{ij} 的编码。

初始化燃烧智能体和进化智能体。即输入实测元胞格局,并以静态设计的林火蔓延规则参数作为进化智能体模式。

4.2 燃烧智能体的设计与编码

在每一遍 CA 演进的每一时间步按预设的亲和度评价策略计算进化智能体和燃烧智能体的亲和度。保留亲和度较大的进化智能体群。对 C_r 空间进行燃烧智能体编码。将 CA 演进的 C_r 空间邻居表示为 $neighbour_r(k)^t$, Moore 型总共具有 8 个邻居,设每个邻居元胞有 5 个可能的状态。可将定义燃烧智能体定义为:

$$anti g \in \{u_1, a_2, \Lambda, a_i, \Lambda, a_m\} \quad (12)$$

本例采用 Moor 邻居,则包括当前元胞, $m=9, a_i=0-4$ 。

启动学习机制时,计算 C_r 空间(实测系统)的演进格局与当前演进规则模式的亲和度,并选择亲和度大的规则模式群。

4.3 基于信息熵的进化智能体适应性与多样性评价

用进化智能体间的相似性量度进化智能体的多样性, 计算 n 个进化智能体间的相似度。将 n 个进化智能体视为信源, 那么, 在整体统计意义上, n 个进化智能体的取值的平均不确定性, 可用信息熵表示。进化智能体间的相似程度通过这种不确定性得到量度, 不确定性越小则相似程度越高^[12]。由式(12), 设第 k 个元胞的进化智能体集合有 n 个进化智能体, 用 m 个参数的编码表示每个进化智能体, 每个参数 p 从含有 s 个字母的字母表 $(a_1, a_2, \Lambda, a_r, \Lambda, a_s)$ 中取值, $(0,1,2,3,4)$ 为本例的实际取值范围。第 k 个元胞的第 i 个进化智能体构成一个 m 维随机矢量: $(p_{i1}, p_{i2}, \Lambda, p_{ij}, \Lambda, p_{im})$ 。所有 n 个进化智能体的第 j 位就构成了一个向量 $P_n(j) = (p_{1j}, p_{2j}, \Lambda, p_{ij}, \Lambda, p_{nj})$ 。依据香农的信息论所描述, 事件发生的概率越小所携带的信息量越大, 若 $P_n(j)$ 取字母 a_r 的概率为 $q_r[P_n(j)]$, 则其所携带的信息量, 即自信息量为:

$$I[P_n(j)] = \log \frac{1}{q_r[P_n(j)]} = -\log [P_n(j)] \quad (13)$$

由此 $P_n(j)$ 取所有字母的平均不确定性就可以用其自信息量的数学期望表示为:

$$H[P_n(j)] = E\{-\log_r[P_n(j)]\} = \sum_{r=1}^s -q_r[P_n(j)] \log q_r[P_n(j)] \quad (14)$$

$H[P_n(j)]$ 为信息熵, 是在第 j 位上 n 个进化智能体编码取所有 s 种符号的概率平均信息量, 它量度了在第 j 位上, n 个进化智能体取相同字母的可能性, 即不确定性。若 $H[P_n(j)]$ 值较大, 在第 j 位上, n 个进化智能体取值相差较大; 在第 j 位上, 表面 n 个进化智能体相似性较小。在实际算法中, $q_{rj}(n)$ 的计算是通过统计 n 个进化智能体中取字母 a_r 的数量 $g_{rj}(n)$, 再除以字母表元素数 s 而得出的, 公式为: $q_{rj}(n) = g_{rj}(n)/s$ 。依据信息熵的可加性, 定义 n 个进化智能体的信息熵为所有 1 到 m 位上信息熵的平均, 即:

$$H(P_n) = \frac{1}{4m} \sum_{j=1}^m H[P_n(j)] \quad (15)$$

从而进化智能体 P_w 和 P_w 间的相似程度可以表示为:

$$\text{similarity}_{w,w} = 1/[1 + H(P_2)] \quad (16)$$

4.4 进化智能体、燃烧智能体亲和度计算及进化智能体选择

进化智能体、燃烧智能体亲和度函数 $\text{affin}(P_g, \text{anti}g)$ 用当前元胞的第 g 个进化智能体 P_g 驱动下的 CA 演进格局与燃烧智能体, 即 C_r 空间演进格局间的欧氏距离来定义。设在进化智能体 P_g 驱动下 CA 演进格局中当前元胞及其 Moore 邻居为:

$$c_{pg} = (c_1, c_2, \Lambda, c_i, \Lambda, c_m) \quad (17)$$

式中, Moore 邻居数 $m=9$, 结合(12)可以得到进化智能体 P_g 驱动下的 CA 演进格局与 C_r 空间演进格局间的欧式距离:

$$d_g = \left[\sum_{i=1}^m w_g (c_i - a_i)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

不同方向的邻居以及中心元胞对欧氏距离的贡献由权重 w_g 决定。若 C_r 空间的演进格局与 P_g 驱动下的 CA 演进格局之间的欧氏距离为零时, 则说明实测格局与 CA 演进格局完全相同, 此时无需调整元胞适用规则。将中心元胞权重设为 1, 其邻居权重皆设为 0 时, 是对 w_g 选择的最简单情况, 即用实测状态与 P_g 驱动下的当前元胞的演进状态的差简略地估计进化智能体、燃烧智能体的亲和度。

按照上述方法在当前进化智能体群中选择亲和度最大的 h 个作为遗传父本。

4.5 进化智能体变异

为实现进化智能体变异, 应对保留下来的进化智能体(当前元胞适用规则参数组)分别作随机扰动。变异概率与进化智能体的亲和度成反比。计算燃烧智能体与变异后的新进化智能体之间的亲和度。

4.6 进化智能体成熟化操作

对新进化智能体及其父本进行亲和度比

较，保留新进化智能体与其父本中亲和度较大者，或淘汰亲和度小者。进化智能体间相似度计算按照式(4)进行，将相似度大的进化智能体合并，形成新的进化智能体群。

4.7 迭代循环

从式(3)开始，进行多遍 CA 演进，并反复执行式(4)-(8)，直到实测格局与 CA 演进格局或设定的阈值的差别不再明显减小为止。

为了提高迭代效率，在仿真实验中，当 C_r 空间的演进格局不发生变化时，直接以缺省规则驱动 CA，而不做规则的自学习。规则学习机制仅在实测格局变化时启动。

5 仿真研究

本文以湖南省邵东县水东江镇芽江村莲湖山场曾经发生过的森林火灾为例，为验证本文方法的有效性，选取了火灾过程中的初始阶段和中间阶段为例对森林火灾蔓延情况进行仿真。根据本文选取的模型，从当地林业局获取了相关数据：山场的地形分布图及林相分布图，发生时的气象资料（温度、风向、风速以及相对湿度等），火灾蔓延范围。并通过运用 Google Earth 工具获取了当地的的地形图、林相图和火灾蔓延范围图。为了方便处理数据，设计了一个 Moore 邻居的简化林火空间扩散模型，并选取 600*600 的实验界面，200*200 的森林细胞单元空间，根据地图缩放比例，每个细胞单元的长度设为 100 米。

图 2 为 Rothermel 模型以及本文模型 1 小时结果，左图为模拟仿真林火燃烧 1 小时之后，林地着火情况，这个图像是根据火灾发生地点的气候、林相和地形等数据通过 Rothermel 模型得到的。从图中可以看到，模拟林火的火场越过了实际火场的边界。林火没有往右边蔓延，却存在向上和向左边界蔓延的趋势，尽管在实验中考虑了存在灭火人员的影响。并且在一小时之内，火势蔓延有部分已经超越的实际火灾蔓延的边界线。右图为本文模型 1 小时结果

图 1 小时之后，林地着火情况，这个图像是根据火灾发生地点的气候、林相以及地形等数据通过 CA 林火空间扩散模型得到的。本实验模拟的林火燃烧范围在实际林火燃烧范围之内，边界线几乎重合。表明了本方法比 Rothermel 模型有的模拟效果精度更高。

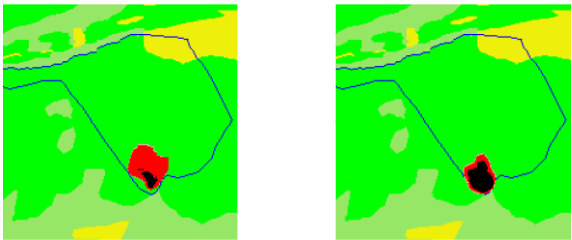


图 2 Rothermel 模型以及本文模型 1 小时结果

表 1 为两种模型与实际火场分析表，图 3 为火场面积对比图，图 4 为火场周长对比图，通过对比燃烧面积和燃烧周长可知，Rothermel 模型模拟出来的结果都要比实际火场小。对比实际情况和本文提出的模型，二者在开始时基本接近，随着时间的推移，模型中的火场燃烧的范围比实际情况大。出现以上情况的原因是实际中存在灭火人员的影响。综上可知，本文所用的基于多智能体算法的 CA 林火空间扩散模型，较为符合我国南方集体林区的实际情况。

表 1 两种模型与实际火场分析表

时间 (分 钟)	本文模型		基于 Rothermel 模型		实际火场	
	燃烧面 积(平 方米)	燃烧 周长 (米)	燃烧面 积(平 方米)	燃烧 周长 (米)	燃烧面 积(平 方米)	燃烧 周长 (米)
10	2460.33	136.47	2485.93	136.32	2743.25	137.48
20	4848.93	196.89	4729.48	192.75	5173.37	202.93
30	10634.48	272.61	9280.02	266.34	11559.92	284.18
40	16495.06	345.73	15087.46	334.21	16033.66	351.59
50	23016.78	434.54	20694.61	402.25	22283.34	420.45
60	31021.89	576.02	27376.54	526.65	29656.84	561.41

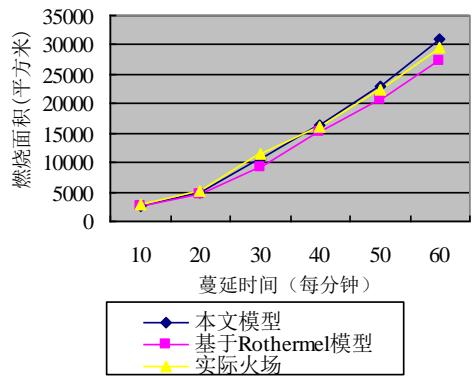


图3 火场面积对比图

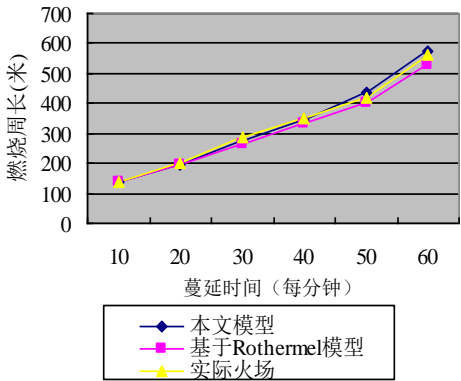


图4 火场周长对比图

为了进一步说明本文所提出的模型的优势和有效性，我们计算出了利用本文模型和基于Rothermel模型所模拟出来的结果相对实际火场的平均误差，如表2所示。

表2 误差分析结果

	面积误差 (1 小时)	周长误差 (1 小时)
本文模型	6.12%	4.13%
基于 Rothermel 模型	12.36%	9.56%

根据表1、表2，我们可知，无论从燃烧面积还是燃烧周长来看，基于Rothermel模型模拟出来的结果都要比实际火场小。而本文提出的模型与实际情况相比，刚开始与实际火场基本相近，随着时间的推移，比实际火场燃烧的范围要大，这是因为存在灭火人员的缘故。因此，本文提出的模型更符合我国南方林区。

6 结论

在考虑了林火蔓延过程的全局因素影响下，本文以一起发生在湖南省邵东县水东江镇

芽江村莲湖山场的森林火灾为例，提出一种基于多智能体算法的CA的林火空间扩散基本模型。通过仿真结果，对比分析传统的Rothermel模型与本文提出的方法，可知在火场面积和火场周长方面，实际林火蔓延过程与本文提出的林火空间扩散模型的实验仿真结果具有较高的相似性。

参考文献:

- [1] 单延龙, 金森, 李长江. 国内外林火蔓延模型简介[J]. 森林防火, 2004, 4(4):18-21.
- [2] 王晓红, 张吉利, 金森. 林火蔓延模拟的研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(10):69-77.
- [3] 张菲菲, 解新路. 一种改进的林火蔓延模型及其实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(2):50-53.
- [4] 黄华国, 张晓丽, 王蕾. 基于三维曲面元胞自动机模型的林火蔓延模拟[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(3):94-97.
- [5] STEPHEN, G. B.; JOHN, W. H. An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous savanna system. Ecological Modelling 2002, 148, 133-151.
- [6] Jan, Glasa.; Ladislav, Halada. On elliptical model for forest fire spread modeling and simulation. Mathematics and Computers in Simulation 2008, 78, 76 - 88.
- [7] Batista, A. C.; Beutling, A.; Pereira, J. F. FIRE BEHAVIOR EVALUATION IN EXPERIMENTAL FIRES ON FOREST FUELS OF Pinus elliottii PLANTATIONS. REVISTA ARVORE 2013, 37, 779-787.
- [8] Cheney, N. P.; Gould, J. S.; McCaw, W. L. Predicting fire behaviour in dry eucalypt forest in southern Australia. FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT 2012, 280, 120-131.
- [9] Sturm, T.; Fernandes, P. M.; Sumrada, R. The Canadian fire weather index system and wildfire activity in the Karst forest management area, Slovenia. EUROPEAN JOURNAL OF FOREST RESEARCH 2012, 131, 829-834.
- [10] 湛玉剑, 张帅, 张磊, 刘学军. 林火蔓延地理元胞自动机仿真模拟[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(2):121-124.
- [11] Xiao, H.; Lee, L. H. Simulation optimization using genetic algorithms with optimal computing budget allocation. SIMULATION-TRANSACTIONS OF THE SOCIETY FOR MODELING AND SIMULATION INTERNATIONAL 2014, 90, 1146-1157.
- [12] 覃威宁, 郑天舒, 沈旭昆. 基于-的实体建模与时间同步方法研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(9):1933-1938.