

林火蔓延模拟元胞自动机算法研究^{*}

周国雄¹ 吴 淇^{1,2} 陈爱斌¹

(1. 中南林业科技大学计算机与信息工程学院 长沙 410004; 2. 湖南大学信息科学与工程学院 长沙 410082)

摘 要: 二维元胞自动机模型常用于林火蔓延中,但其存在迭代次数过多、进化过程不充分以及结束迭代的条件不明确等缺点。针对上述问题,提出一种基于多目标遗传算法的三维元胞空间林火蔓延模型。首先,将影响和决定林火蔓延因子的主体作为元胞引进二维元胞自动机模型中;其次,为了减少二维元胞自动机模型的迭代次数,明确结束迭代的条件,首先对初始化方式改进,采用三维球形元胞空间对二维元胞空间进行改进,其次通过多目标遗传算法对元胞自动机算法进行改进,从而提高林火蔓延模型预测精度。通过仿真结果,对比分析传统的二维元胞自动机模型、王正非模型以及 Rothermel 模型与本文提出的方法,可知本文提出的方法迭代次数大幅减少,运行时间大幅下降,使得元胞自动机的运行效率得到了显著提高。此外元胞自动机的终止条件得到了明确,且实际林火蔓延过程与提出的林火蔓延模型的实验仿真结果具有较高的相似性。

关键词: 林火蔓延; 森林火灾; 三维元胞空间; 多目标遗传算法; 模拟

中图分类号: TP391.9 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Research of cellular automata model for forest fire spreading simulation

Zhou Guoxiong¹, Wu Qi^{1,2}, Chen Aibin¹

(1. School of Computer and Information Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China;
2. School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Two-dimensional cellular automata model is often applied to simulate the forest fire spreading. However, the model has many disadvantages which include numerous iteration times, unfinished evolutionary process, uncertain condition of iteration, etc. Aiming at tackling these problems, a 3-D cellular space fire spread model based on genetic algorithm with multiple objectives is proposed. First, the main factors that influence the spreading of forest fire are applied to the two-dimensional cellular automaton model. Secondly, to decrease the iterations of cellular automaton model of spreading forest fire and identify the termination condition of iteration, the initial mode of the two-dimensional model is improved which utilizes the three-dimensional spherical cell space. The genetic algorithm with multiple objectives is applied to cellular automaton algorithm for improving the prediction accuracy of forest fire spreading model. By comparing the proposed method with the traditional two-dimensional cellular automaton model, Wangzhengfei model and Rothermel model, it can be seen that the proposed method in this paper can greatly reduce the number of iterations and the running time. The operation efficiency of the cellular automata is also improved remarkably. In addition, the termination condition of cellular automata is explicit. The actual forest fire spreading process has high similarity with the simulation results of the proposed forest fire spread model.

Keywords: forest fire spreading; forest fire; three-dimensional cellular space (CA); multi-objective genetic algorithm; simulation

1 引言

森林火灾具有随机和突发的性质,在较短的时间内

可对人与环境造成相当大的危害,因此,当火警情报出现时,必须根据具体情况,尽快采取相应的措施。由于林火蔓延具有多相以及多组分的性质,并且在地形条件和各种气象影响下,可燃物燃烧和运动相对复杂,因此预测林

收稿日期: 2016-08 Received Date: 2016-08

^{*} 基金项目: 国家 948 项目(2014-4-09)、国家自然科学基金(31470659)项目资助

火蔓延具有一定难度。由于现有的单模型预测精度不足,为了提高精度,必须采用多模型的预测手段^[1-3]。

当前林火蔓延模型可大致分成以下几类:以加拿大的国家林火蔓延模型为代表的半机理半统计模型、以美国的 Rothermel 模型为代表的物理机理模型、以澳大利亚的 McArthur 模型为代表的统计模型以及我国王正非的框架模型^[4]。这些模型大多是基于统计规律或者物理规律而建立的数学模型,在不具备自组织机制的复杂系统仿真方面,存在一定的局限性。张菲菲等人^[5]通过分析元胞空间中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,杨福龙等人^[6]利用 Unity3D 三维引擎建立野外三维地形,建立适用于不同条件的火焰库和烟雾库,输入气象因素后可实现林火在三维环境下的模拟蔓延;陈喆等人^[7]以我国西南火灾高发区作为实验区域,建立了三维元胞自动机林火蔓延框架,但是没有明确结束迭代的条件,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, Li C. B. 等人^[8]等采用 Huygens 波传播; Duff T. J. 等人^[9]采用元胞自动机以栅格或矢量图形来表达林火蔓延的过程。但是,上述两种模型都要求输入大量的参数,参数之间关系复杂,且大多参数需要通过实验才能得出,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。

元胞自动机迭代受周围邻域的范围大小影响,并且计算复杂,耗费大量的时间,这些现象在林火面积较大时尤为明显;为了使单个元胞在二维元胞空间(cellular space, CA)内充分交换,需要多次进行对相邻元胞的随机选择。此外,元胞自动机迭代次数的终止条件没有得到明确。本文提出基于多目标遗传算法的三维元胞空间林火蔓延模型,可以更加生动地描述森林火灾的蔓延,实现山区森林火灾动态模拟。

2 模型的总体思想

通过分析现有的林火模型及其适用性以及林火蔓延机制。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,对于更复杂的系统模型,有一定限制。当系统变得越来越复杂,非常难以求解微分方程^[10-11]。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,本文采用基于多目标遗传算法的三维元胞空间林火蔓延模型。总体思想如下:考虑到湖南省邵东县水东江镇芽江村莲湖山场的特点,本文采用适合我国林火特点的基于王正非的林火蔓延模型。首先将王正非模型引入二维元胞自动

机中,建立考虑实际可燃物类型、气候以及地形等约束条件的元胞自动机林火蔓延模型,然后根据元胞之间的能量传递来定义元胞的局部转换规则,由此推导出元胞自动机确定的元胞林火蔓延速度。其次,由于其存在迭代次数过多、进化过程不充分以及结束迭代的条件不明确等缺点,本文用三维球形元胞空间对二维元胞空间进行改进,以及利用多目标遗传算法对元胞自动机算法进行改进,构建基于多目标遗传算法的三维元胞空间林火蔓延模型,以求明确结束迭代的条件,减少元胞自动机林火蔓延模型的迭代次数,从而提高林火蔓延模型预测精度,并且能较好地模拟出林火蔓延趋势。

3 王正非林火蔓延模型

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^[12],符合该村莲湖山场的林火蔓延特点。通过选用王正非林火蔓延模型可得到不同环境条件下的林火火头蔓延的速度。

4 三维元胞空间多目标遗传算法

元胞自动机迭代受周围邻域范围大小的影响,并且计算复杂,耗费大量的时间,这些现象在林火面积较大时尤为明显^[13-15];为了使单个元胞空间能够在二维元胞空间内充分交换,需要多次进行对相邻元胞的随机选择。此外,元胞自动机迭代次数的终止条件没有得到明确。因此用三维球形元胞空间对二维元胞空间进行改进,并通过多目标遗传算法对元胞自动机算法进行改进,从而减少元胞自动机林火蔓延模型的迭代次数以及明确结束迭代的条件。

4.1 初始化方式的改进

在初始的二维元胞空间中,以正在燃烧的中心元胞为原点,将原点向各个相邻元胞蔓延的速度向量扩展到三维球形元胞空间,以此建立起紧贴地表的元胞网格。此时的元胞空间是一个空间曲面,而非二维平面,此时一个元胞空间内各个类别的元胞的大致分布可以直接被确定,初始化可不经迭代运算。对于一个未知的区域,在没有实地测量实际可燃物数据而发生火情的情况下,可以较好地预测火场的面积以及周长,即林火蔓延的发展趋势。

4.2 基于多目标遗传算法的三维元胞空间林火蔓延模型

在三维元胞空间多目标遗传算法中,先在三维元胞空间中安置初始种群中的个体,与二维元胞空间类似,使初始种群在球体的表面网格中均匀分布,以同心球球面

为网状结构的边界,并根据个体在种群网格中与其它个体之间的距离定义它的邻居。如此可以在三维元胞空间内直接确定各个类别的元胞的大致分布,初始化时不用经过迭代运算。在三维元胞空间中,由于种群分布在球的表面,此时不会出现类似二维元胞空间中,由于繁殖周期到一定程度时,最优个体扩散速度明显下降,种群中最佳个体扩散到窄边界的情况。最优个体所占比例增长速度不会减慢。

同时为了在元胞自动机运行过程中,减少一次迭代中的随机性,尽可能充分进化,燃烧元胞不能随机选择而需通过按顺序选择交换元胞,这样在元胞达到较高的进化水平时,可以减少迭代次数。因此,当整个元胞自动机的运行时,只改变了该空间内各类元胞的空间位置,算法流程如下。

步骤 1: 输入火灾发生两小时的气象资料(相对湿度、风向、风速以及温度等),山场的地形分布图及林相分布图,火灾蔓延范围。

步骤 2: 设置元胞格网大小。在三维球形元胞空间中元胞格网是不规则的,通过坡度图计算三维元胞格网投影在水平面上的大小,元胞初始状态为 0(已经获得足够的能量将其点燃—正在燃烧的元胞)。计算起火点处燃烧元胞的林火蔓延初速度,迭代运算与每个元胞状态的更新步骤如下: 1) 将初始的燃烧元胞分布在三维元胞空间中,指向第一个元胞,开始新的迭代; 2) 在相邻元胞中依次选择一个个体作为父代; 3) 将燃烧元胞与被选择的相邻元胞进行交叉,变异,其中邻居元胞状态为 1(还需要更多的热量将其点燃——未燃烧的元胞); 4) 根据 Pareto 支配关系,在相邻元胞中找出非支配解并保存到精英集中,由此产生新的个体; 5) 如果产生的新个体优于燃烧元胞,则将该燃烧元胞状态改为 2(本身的能量已消耗殆尽—已燃烧的元胞)并被替换,下一个时间起,它不再具有林火蔓延速度,否则,不替换,且燃烧元胞状态不变; 6) 如果进化代数小于最大进化代数,则返回到步骤 2); 7) 输出当前最优解。

4.3 模型评价指标

本文使用了 3 个指标来评价改进后的元胞自动机在林火蔓延中的运行效率以及结果精度,分别是调整后的 Kappa 系数、迭代次数以及运算时间。

有很多的方法和指标来评价火行为模拟的,例如比较蔓延速率、火场面积、周长等。由于缺乏火场蔓延速率的详细数据,故只能进行比较形状指标,如同文献[16],本文进行精度评价采用了调整后的 Kappa 系数,计算方式与 Kappa 系数一致,只是去除其他林火蔓延因子对林火蔓延精度评价的影响,使得评价结果更加直观。而算法效率主要依据迭代次数、运行时间进行评价,迭代次数是指整个三维元胞空间内元胞迭代运算的次数;运行时

间是指计算机迭代计算耗费的时间。一般而言迭代次数和运行时间是成正比关系,某种算法可以通过在较少的迭代次数以及较短的运行时间情况下获取的 Kappa 系数的高低来判断该种算法的效率,Kappa 系数越高,说明该种算法效率越高。

5 应用分析

5.1 实验的计算环境

根据上述模型的实现步骤,进行计算机仿真,本系统在开发时所选择的操作系统是 Windows XP,采用的开发工具是 My eclipse,My SQL 为后台数据库。

实验开发语言采用 Java 语言,地图数据的加载采用 Google 公司的 Google Earth 完成。地理及可燃物数据用文本文件保存,为减少运算量,气象参数中动态参数在运行中采用直接读取及随机产生的方式。

5.2 数据准备与处理

以 2007 年发生在湖南省邵东县水东江镇芽江村莲湖山场发生的一起森林火灾为例。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,火灾蔓延范围。并通过运用 Google Earth 工具获取了当地的地形图和火灾蔓延范围图。为了方便处理数据,选取 600×600 的实验界面, 200×200 的森林元胞单元空间,根据地图缩放比例,每个元胞单元的长度设为 100 m。

5.3 CA 模型分析

在随机初始化结果的基础上,将改进后的 CA 算法流程与原始的 CA 算法流程进行对比实验。由于只有改进后的 CA 过程明确了终止条件,所以,当在有限的迭代次数内,两者得出各自的最佳结果则停止,即随着迭代的进行,Kappa 系数呈平稳状态即停止。本文测试在 $S = 200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 下进行, S 为元胞单元空间。

图 1 所示为 Kappa 系数在两种 CA 过程下林火蔓延的结果调整后,随迭代次数增加的变化趋势以及平稳时间。图 1(a) 为原始 CA 过程,图(b) 为改进后 CA 过程。从图 1 可以发现: 1) 改进后的 CA 过程在达到平稳状态所需的迭代次数在 10 次以内,比原始 CA 过程更低; 2) 改进后的 CA 过程达到平稳时间大都远少于原始 CA 过程; 3) 改进后的 CA 过程每一次迭代都会“穷尽”元胞空间内的所有元胞; 而原始 CA 算法每一次迭代是随机选择元胞。这样缺少选择的灵活性成为了改变之后的缺点。通过这些改变,在林火蔓延中元胞的空间相关性会产生一定的影响,因此在随机初始化的基础上改进后的 CA 过程,其最终结果调整后的 Kappa 系数比原始 CA 过程更低。其中,为了避免大量不必要的随机改变,通过牺

性准确性来换取结果的稳定性和运行效率,这对于本文提出的终止提供了方便。并且改进后的 CA 过程与改进后的元胞自动机初始化相结合,可以提高结果的准确性以及运行效率。

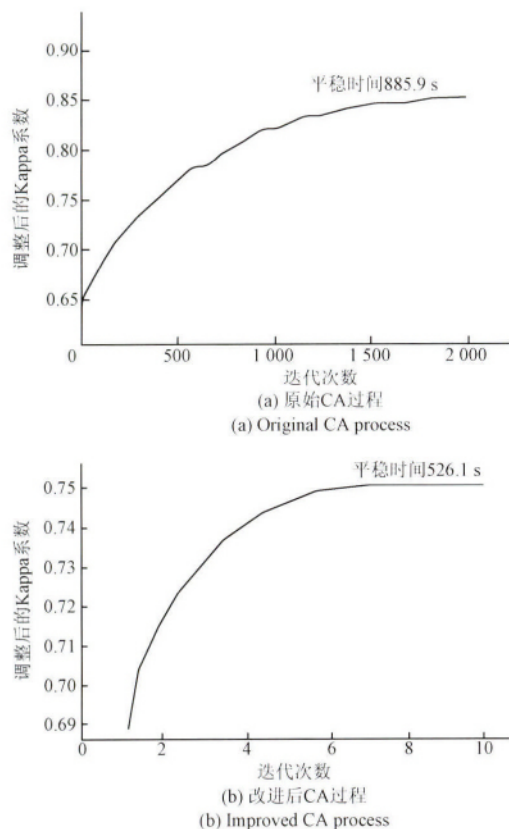


图1 Kappa系数在两种CA过程下结果调整后, 随迭代次数变化的趋势以及平稳时间

Fig. 1 The change trend of Kappa coefficient with the number of iterations and the stationary time under the two CA processes

5.4 结果与应用分析

图2(a)所示为本文提出的林火蔓延模型根据火灾发生地点的气象、林相和地形等数据模拟仿真林火燃烧2 h之后的林地着火情况,该情况下未考虑灭火人员的灭火现象。根据实际火灾燃烧范围图,可以看到,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。图2(b)所示为基于二维元胞自动机模型得到的2 h结果,在该图中,虽然本实验模拟的林火燃烧范围在实际林火燃烧范围之内,但是火势蔓延有部分已经超越的实际火灾蔓延的边界线。图2(c)所示为基于王正非模型得到的2 h结果。图2(d)所示为基于Rothermel模型得到的2 h结果。图2(c)、(d)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。并且在2 h

之内,火势蔓延有部分也已经超越的实际火灾蔓延的边界线。由于本文只研究林火的蔓延趋势,未考虑灭火人员情况下的林火的蔓延趋势。只对林火开始着火之后的2 h之内的林火蔓延情况进行实验。从图3可知,当林火开始蔓延那么林火左右两边蔓延范围可能会增大。从图2(a)可以看到,起火点左右两边的林火有越过实际火灾蔓延范围的趋势,这与实际情况相符合。林火存在向上部和右边界蔓延的趋势,这与实际火灾蔓延趋势也十分符合。这说明本文提出的模型能够较好地预测林火蔓延趋势。

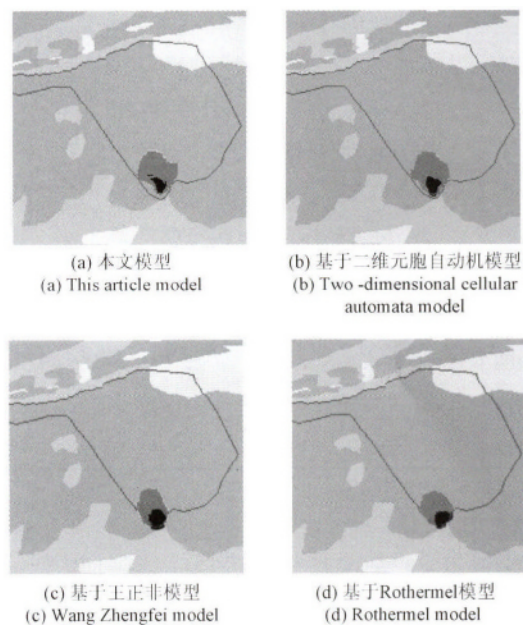


图2 基于Rothermel模型、王正非模型、二维元胞自动机模型以及本文模型2 h结果

Fig. 2 The two-hour results of the model based on the Rothermel model, Wang Zhengfei model, two-dimensional cellular automata model

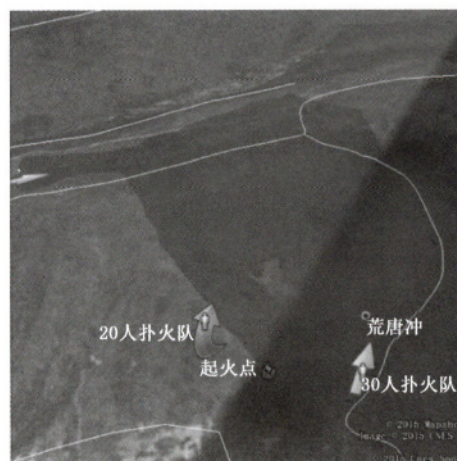


图3 森林火灾一天后实际林火蔓延情况

Fig. 3 The actual spread of forest fires after a day of forest fires

图 3 从宏观角度 ,将本文模型与基于二维元胞自动机模型、Rothermel 模型以及王正非模型、和实际火灾情况进行对比分析 ,其中实际火场数据是从当地林业局所

获得。下面从微观角度 ,进一步利用着火面积和周长进行对比分析。

表 1 四种模型与实际火场分析表

Table 1 Analysis of four models and actual fire

时间/min	本文模型		基于二维元胞自动机模型		基于王正非模型		基于 Rothermel 模型		实际火场	
	燃烧面积/ m ³	燃烧周长/ m	燃烧面积/ m ³	燃烧周长/ m	燃烧面积/ m ³	燃烧周长/ m	燃烧面积/ m ³	燃烧周长/ m	燃烧面积/ m ³	燃烧周长/ m
10	2 460.33	136.47	2 485.93	136.32	2 464.43	135.47	2 456.94	134.52	2 743.25	137.48
20	4 848.93	196.89	4 729.48	192.75	4 753.94	190.43	4 728.49	188.79	5 173.37	202.93
30	1 0634.48	272.61	9 980.02	266.34	1 0175.40	266.33	10 095.04	264.24	11 559.92	284.18
40	16 495.06	345.73	15 087.46	334.21	14 737.04	328.72	14 355.42	326.61	16 033.66	351.59
50	23 016.78	434.54	20 694.61	402.25	20 438.76	393.52	19 982.67	391.57	22 283.34	420.45
60	31 021.89	576.02	27 376.54	526.65	27 237.85	526.06	26 773.58	521.56	29 656.84	561.41
70	39 781.65	741.28	35 653.31	683.43	34 896.63	673.24	34 380.36	668.34	37 865.45	718.02
80	48 654.12	930.79	44 236.76	873.21	42 954.17	860.72	42 335.81	845.21	46 356.03	907.32
90	55 346.89	1 169.23	50 367.02	1 087.67	48 870.80	1 079.26	48 352.20	1 063.68	52 866.72	1 142.35
100	61 234.25	1 389.01	55 765.20	1 305.63	54 023.22	1 283.06	53 414.26	1 254.62	58 451.93	1 346.75
110	67 023.34	1 634.26	60 387.04	1 532.73	60 311.30	1 524.37	59 323.47	1 502.51	64 967.29	1 613.28
120	71 923.46	1 843.39	64 987.39	1 789.93	63 256.43	1 743.24	62 533.93	1 693.07	68 568.56	1 823.67

表 1 所示为采用本方法的模型、基于二维元胞自动机模型、基于王正非模型以及基于 Rothermel 模型与实际火场的对比分析 ,图 4 所示为火场面积对比图 ,图 5 所示为火场周长对比图 ,通过图 4、5 及表 1 可以看出 ,无论从燃烧面积还是燃烧周长来看本文提出的模型相对于其他 3 种模型更符合实际情况。本文模型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。

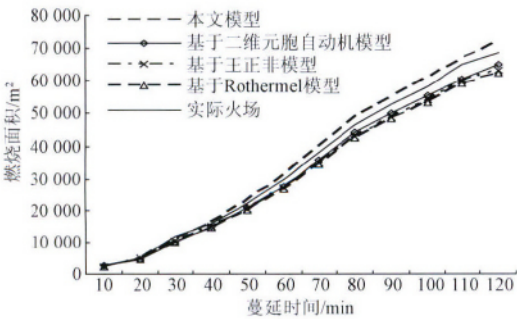


图 4 火场面积对比

Fig. 4 Contrast of the fire area

为了进一步说明本文所提出的模型的优势和有效性 ,计算出了利用本文模型、基于二维元胞自动机模型、基于王正非模型以及基于 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。

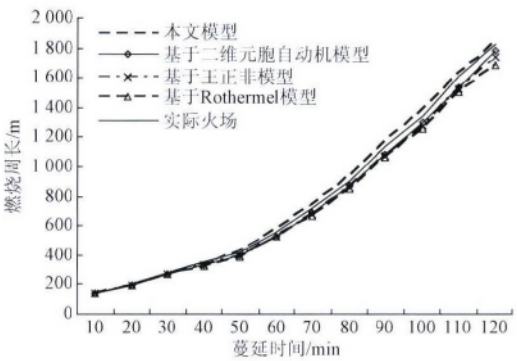


图 5 火场周长对比

Fig. 5 Contrast of the fire perimeter

表 2 误差分析结果

Table 2 Error analysis results table (%)

模型	面积误差		周长误差	
	1 h	2 h	1 h	2 h
本文模型	6.21	5.30	2.59	2.41
基于二维元胞自动机模型	9.64	7.64	4.86	4.45
基于王正非模型	10.07	9.11	5.88	5.72
基于 Rothermel 模型	11.59	10.59	6.65	7.04

根据表 2 可知 ,无论从燃烧面积误差还是燃烧周长误差来看 ,基于二维元胞自动机模型、基于王正非模型以

及基于 Rothermel 模型模拟出来的结果都要比本文模型大,可以看出本文所提出的模型更具有优势。模型与实际相比必然存在着不可消除的误差,因此,本文提出的模型更符合我国南方林区的实际情况。

6 结 论

针对二维元胞自动机模型用于林火蔓延中存在迭代次数过多、进化过程不充分以及结束迭代的条件不明确等缺点。本文提出了基于多目标遗传算法的三维元胞空间林火蔓延模型,从以下3个方面对用于林火蔓延的二维元胞自动机进行了改进:提出终止条件并改进元胞自动机初始化方式以及其算法过程;降低了元胞自动机林火蔓延模型的迭代次数;明确了结束迭代的条件。将该模型应用于2007年发生在湖南省邵东县水东江镇芽江村莲湖山场发生的一起森林火灾模拟过程中,结果表明,将本文提出的方法与传统的二维元胞自动机模型、王正非模型以及 Rothermel 模型对比分析,可知本文提出的林火蔓延模型的实验结果与实际林火蔓延过程具有较高的相似性,并且可以较为详细地模拟出林火蔓延的动态过程。

参考文献

- [1] ATESOGU A. Forest fire hazard identifying mapping using satellite imagery-geographic information system and analytic hierarchy process: Bartin, turkey [J]. Journal of Environmental Protection and Ecology, 2014, 15 (2): 715-725.
- [2] HOFFMAN C M, ZIEGLER J, CANFIELD J, et al. Evaluating crown fire rate of spread predictions from physics-based model [J]. Fire Technology, 2016, 52(1): 221-237.
- [3] 杨晓萍, 孙继玮, 牛超, 等. 数据融合在物联网火灾监测系统中的应用研究 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 100-105.
YANG X P, SUN J W, NIU CH, et al. Application of data fusion technology in fire detection system based on the internet of things [J]. Electronic Measurement Technology 2016, 39(3): 100-105.
- [4] CHENEY N P, GOULD J S, MCCA W L, et al. Predicting fire behaviour in dry eucalypt forest in southern Australia [J]. Forest Ecology and Management, 2012, 280(4): 120-131.
- [5] 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.
ZHANG F F, XIE X L. An improved forest fire spread model and its realization [J]. Geomatics & Spatial Information Technology 2012, 35(2): 50-53.
- [6] 杨福龙, 曹佳, 白夜. 基于元胞自动机的林火蔓延三维模拟仿真研究 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(19): 37-41.
YANG F L, CAO J, BAI Y. Study on simulation of three dimensional simulation of forest fire spread based on cellular automation [J]. Computer Engineering and Application 2016, 52(19): 37-41.
- [7] 陈喆, 孙涛, 张凌寒, 等. 三维元胞自动机各向异性林火蔓延快速模型 [J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(1): 86-91.
CHEN ZH, SUN T, ZHANG L H, et al. Forest fire spread model based on 3D cellular automation in spatially heterogeneous area [J]. Journal of Beijing Forestry University 2012, 34(1): 86-91.
- [8] LI C B, ZHOU J, TANG B G, et al. Analysis of forest fire spread trend surrounding transmission line based on rothermel model and Huygens principle [J]. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2014, 9(9): 51-60.
- [9] DUFF T J, CHONG D M, TOLHURST K G. Using discrete event simulation cellular automata models to determine multi-mode travel times and routes of terrestrial suppression resources to wildland fires [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 241(3): 763-770.
- [10] ZIELINSKI T, PETELSKI T, STRZALKOWSKA A. Impact of wild forest fires in Eastern Europe on aerosol composition and particle optical properties [J]. Oceanologia 2016, 58(1): 13-24.
- [11] 张叶. 森林火情烟雾识别算法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 103-106.
ZHANG Y. A study on forest fire smoke automatic recognition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 103-106.
- [12] CAVARD X, BOUCHER J F, BERGERON Y. Vegetation and topography interact with weather to drive the spatial distribution of wildfires in the eastern boreal forest of Canada [J]. International Journal of Wildland Fire, 2015, 24(3): 391-406.
- [13] 湛玉剑, 张帅, 张磊, 等. 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.
ZHAN Y J, ZHANG SH, ZHANG L, et al. Simulation of forest fire spreading based on geographic cellular automata [J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(2): 121-124.
- [14] IUDIN D I, SERGEYEV Y D, HAYAKAWA M. Reprint of Infinity computations in cellular automaton forest-fire

model [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2015, 21(3): 861-870.

- [15] 史久根, 刘春霞, 席海强. CA 模型下的改进 D* 路径规划算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1): 30-37.

SHI J G, LIU CH X, XI H Q. Improved D* path planning algorithm based on CA model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(1): 30-37.

- [16] WU Z W, HE H S, YANG J, et al. Defining fire environment zones in the boreal forests of northeastern China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 518(C): 106-116.

作者简介



周国雄 2002 年于湖南农业大学获得学士学位, 分别在 2006 年和 2010 年于中南大学获得硕士学位和博士学位, 现为中南林业科技大学副教授, 主要研究方向为森林防火、机器人。

E-mail: zhougx01@163.com

Zhou Guoxiong received his B. Sc. degree from Hunan Agricultural University in 2002 and his M. Sc. degree from Central South University in 2006. He received his Ph. D. degree from Central South University in 2010 and is an associate professor in Central South University of Forestry and Technology. His main research interests include forest fire prevention and robot.



吴淇(通讯作者), 现为中南林业科技大学本科生, 目前已推免至湖南大学攻读硕士学位, 主要研究方向为人工智能以及图像处理等。

E-mail: wuqi199509@163.com

Wu Qi (Corresponding author) is an undergraduate student in Central South University of Forestry and Technology. Now he has been recommended to Hunan University for his M. Sc. degree. His main research interests include artificial intelligence and image processing.