

化工园区火灾状态智能演化仿真研究

汤亚玲¹, 钟春燕¹, 张学锋¹, 杨武洲², 江 军³

1. 安徽工业大学 计算机科学与技术学院, 安徽 马鞍山 243000

2. 马鞍山市消防救援支队, 安徽 马鞍山 243000

3. 金隆铜业有限公司, 安徽 铜陵 244000

摘要:目的 为了研究化工园区火灾蔓延情况, 建立一个可靠的仿真系统, 模拟火势的扩散过程。利用系统可以对不同条件下的火灾蔓延进行模拟和预测, 为化工园区火灾的防控提供科学依据和有效手段, 同时, 该系统也可以用于火灾事故的应急响应和演练, 提高应对火灾事故的能力和水平。方法 利用元胞自动机、经验蔓延概率以及组合模型进行火势蔓延仿真。运用火势蔓延模型结合元胞自动机理论, 基于实际火灾蔓延过程中的经验和数据制定状态转移规则, 综合考虑地形、风速、坡度、湿度等多种因素对火蔓延的影响。结果 可以模拟不同条件下火势蔓延情况, 如火源位置、风向、风速、温度等因素的影响; 经过多次实验得到火灾重要数据——平均燃烧速率, 与实际火灾的燃烧速率进行范围对比, 具有 93% 的准确性。结论 仿真系统将模拟结果以三维的形式呈现出来, 更直接清楚; 实验数据准确度高, 可以更好地评估火灾事故的危害和预测火势发展趋势; 可以对不同条件下的火灾蔓延进行分析, 为研究火势蔓延机理和制定火灾防控措施提供理论依据和技术支持。

关键词: 火势蔓延; 化工园区; 仿真研究; 元胞自动机模型; 组合模型

中图分类号: TQ086. 1; TP391. 9 **文献标识码:** A **doi:** 10. 16055/j. issn. 1672-058X. 2025. 0005. 009

Intelligent Evolutionary Simulation Study of Fire Spread in Chemical Industrial Parks

TANG Yaling¹, ZONG Chunyan¹, ZHANG Xuefeng¹, YANG Wuzhou², JIANG Jun³

1. School of Computer Science and Technology, Anhui University of Technology, Anhui Ma' anshan 243000, China

2. Ma' anshan Fire and Rescue Detachment, Anhui Ma' anshan 243000, China

3. Jinlong Copper Co., Ltd., Anhui Tongling 244000, China

Abstract: Objective To study the spread of fire in chemical industry parks, a reliable simulation system is established to simulate the process of fire spread. The system can simulate and predict fire spread under different conditions, and provide a scientific basis and effective means for fire prevention and control in chemical industry parks. At the same time, the system can also be used for emergency response and drills of fire accidents to improve the ability and level of responding to fire accidents. **Methods** Fire spread simulation is conducted using cellular automata, empirical spread probabilities, and a combined model. Using the fire spread model combined with the theory of cellular automata, the state transition rules are formulated based on the experience and data in the actual fire spreading process, and the effects of various factors such as terrain, wind speed, slope, and humidity on fire spreading are considered comprehensively. **Results** The system can

收稿日期: 2023-11-04 **修回日期:** 2024-01-27 **文章编号:** 1672-058X(2025)05-0072-06

基金项目: 安徽省教育厅重点实验室项目(TZJQR007-2023); 安徽高校自然科学研究项目(2022AH050290)。

作者简介: 汤亚玲(1974—), 男, 安徽庐江人, 副教授, 硕士, 从事虚拟现实、数据挖掘、遗传算法和网络数据库系统研究。

通信作者: 张学锋(1978—), 男, 河北石家庄人, 教授, 博士, 从事虚拟现实技术与人工智能研究。Email: zxf_06@ahut.edu.cn.

引用格式: 汤亚玲, 钟春燕, 张学锋, 等. 化工园区火灾状态智能演化仿真研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2025, 42(5): 72-77.

TANG Yaling, ZONG Chunyan, ZHANG Xuefeng, et al. Intelligent evolutionary simulation study of fire spread in chemical industrial parks[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(5): 72-77.

simulate fire spread under different conditions, including the influence of factors like the fire source location, wind direction, wind speed, and temperature. Through multiple experiments, crucial fire data, the average burning rate, has been obtained, which has been compared with the burning rates observed in actual fires, achieving an accuracy of 93%.

Conclusion The simulation system presents the simulation results in three-dimensional form, which is more direct and clear. The high accuracy of the experimental data can better assess the hazard of the fire accident and predict the fire development trend. The analysis of fire spread under different conditions can provide a theoretical basis and technical support for studying fire spread mechanisms and formulating fire prevention and control measures.

Keywords: fire spread; chemical industrial park; simulation study; cellular automaton model; combined model

1 引言

为了开发针对化工园区的元胞自动机 (Cellular Automata, CA)^[1] 火灾蔓延模型和相应系统,更好地预防火灾并进行有效救援,有必要对火势的时空演变过程进行研究并实时预测火势的后续发展趋势。火势蔓延过程中的影响因素^[2] 众多,例如可燃物、风速、空气湿度等。对火势蔓延进行预测存在巨大难度,难以进行实时预测。

目前存在几种模型可以用于模拟火势蔓延,包括基于经验、概率、物理和元胞自动机模型^[3]。这些模型可根据需求选择使用,用来模拟和预测火势的扩散情况。以往火灾蔓延过程多采用基于环境温度、湿度、风速、地形的经验模型。通常情况下,经验模型只在某些特定场景下有效^[4]。不同的火灾场景,由于具有不同的环境参数,可能需要不同的经验模型。概率模型采用数学概率方法进行统计分析和描述。通过分析森林火灾蔓延^[5-7] 的各种数据建立概率模型。概率模型的优点是可以用一种简单易行的方式预测火灾的蔓延。然而,经验模型和概率模型都不基于物理,不能很好地适应外部环境的变化。物理模型是基于燃烧过程的热力学分析。纯物理模型往往包含高度复杂的计算过程,需要较高的计算能力,因此目前大多数基于物理的森林火灾模型都是半经验的基于物理的模型。

近年来,由于元胞自动机模型^[8] 结构简单、计算量小、复杂度低,因此得到了越来越多的关注。在传统火灾蔓延模型的基础上,建立了元胞自动机模型。在火势蔓延研究方面,Denham 等^[9] 使用动态数据和遗传算法集合进行预测;Papadopoulos 等^[10] 建立一个林火管理与蔓延模拟系统,将林火蔓延模拟模型与实际林火情况相结合;Yasseini 等^[11] 将 GIS 和元胞自动机相结合,研究林火的动态行为;Arai 等^[12] 基于 GIS 和二维元胞自动机^[13] 方法,提出一种元数据搜索引擎,研究林火

扩散;翟春婕等^[14] 针对传统水平集法计算量较大的问题,提出根据定义使用形态学膨胀的方法改变建立函数,可以有效节约计算量。前人在林火蔓延^[15] 模拟方面取得了很大进展,但是针对的是森林大尺度火灾,对于建筑火灾的模拟预测较少,研究的影响因素相对较少,模拟精度不高。本文模拟化工园区真实场景的火势蔓延,对建筑火灾进行研究并且进行三维可视化,根据不同建筑区域和环境条件能够实时模拟当前情况下火势的动态蔓延,真实展现出火灾发生的过程和趋势。实验模拟结果与实际发生的火灾数据进行对比以判断准确性,为科学救火提供依据。

2 模型设计与建立

以某化工厂为例,采用基于元胞自动机的蔓延模型。总体思想如下:考虑到化工厂的特点,采用适合野火蔓延特点的基于王正非^[16] 的火势蔓延模型。将王正非的林火模型引入元胞自动机中,建立考虑实际地形情况、风速、风向以及可燃物等外部影响因素的元胞自动机林火蔓延模型,根据元胞之间的影响来定义元胞的局部转换规则,由此推导出元胞的状态,进一步判断该区域蔓延初速度及后续对其他可燃区域的影响。

2.1 组合模型

王正非的林火蔓延模型公式^[16]:

$$R = R_0 K_s K_w K_\varphi \quad (1)$$

$$K_w = e^{0.178 \cdot 3v} \quad (2)$$

$$K_\varphi = e^{3.533 \tan \varphi^{1.2}} \quad (3)$$

式(1)—式(3)中, R 为蔓延速度, R_0 为初始蔓延速度, K_s 用来表征可燃物的化学特性、易燃程度及燃烧配置格局(物理特性)的一个订正系数, K_w 表示风力修正系数, K_φ 表示坡度修正系数, v 表示风速, φ 为沿上坡方向做顺时针旋转至与风方向重合时所形成的角度。

火势随时间变化,与地形的情况也有关。该模型仅适用于蔓延方式为上坡情形,后来毛贤敏等^[17] 结合

风向与地形将模型进一步优化,得出多个方向的模型方程:

$$R = \begin{cases} R_0 K_s e^{0.1783v} e^{-3.533(\tan(\varphi \cos \theta))^{1.2}} & 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \text{ or } 270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ \\ R_0 K_s e^{0.1783v} e^{-3.533(\tan(\varphi \cos(180^\circ - \theta)))^{1.2}} & 90^\circ \leq \theta \leq 270^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, R_0 为初始蔓延速度, $\cos \theta$ 为坡度更正系数, K_s 用来表征可燃物的化学特性、易燃程度及燃烧配置格局(物理特性)的一个订正系数, v 表示风速, φ 为沿上坡方向做顺时针旋转至与风方向重合时所形成的角度。

2.2 元胞自动机模型

元胞自动机是一个在时间和空间上都离散的动态系统,其基于形成网格的单元格,每个单元格是一个元胞,每个元胞都有自己的状态属性,代表该元胞的局部状态。每个元胞仅限于与本地邻里互动。由于形式上的简单性,更适合于模拟高度复杂现象(如环境问题)的动力学。元胞自动机基于局部演化规则处理从一个单元到相邻单元的火焰传播。通常存在两种主要类型的 CA 模型,即确定性模型和随机性模型。确定性模型尝试对火灾进行基于物理的描述,考虑空间特征和与火灾相关的现象。随机性模型使用概率方法考虑火前沿向邻近单元的传播。本文采用确定性模型与随机性模型相结合的方法。

火势蔓延过程中,元胞在 t 时刻的状态定义为

$$A_{i,j}^t = \frac{\text{元胞}(i,j) \text{ 已经燃烧的面积}}{\text{整个元胞}(i,j) \text{ 的面积}} \quad (5)$$

式(5)中, A 的取值代表不同的状态。

某一个元胞的状态会直接影响到周围三层元胞的状态。元胞处于 t 时刻时,其自身的燃烧状态和邻域元胞蔓延的速度影响了元胞 (i,j) 在下一时刻的状态。

2.3 元胞状态转换规则

元胞 (i,j) 处于 t 时刻时,其燃烧状态和邻域元胞向其蔓延的速度 $R_{k,l}$ 在一定程度上影响元胞在 $t+1$ 时刻的状态,可表示为

$$A_{(i,j)}^{(t+1)} = f(A_{(i,j)}^t, R'_{(i-2,j-2)}, R'_{(i-2,j-1)}, R'_{(i-2,j)}, R'_{(i-2,j+1)}, R'_{(i-2,j+2)}, R'_{(i-1,j-2)}, R'_{(i-1,j-1)}, R'_{(i-1,j)}, R'_{(i-1,j+1)}, R'_{(i-1,j+2)}, R'_{(i,j-2)}, R'_{(i,j-1)}, R'_{(i,j)}, R'_{(i,j+1)}, R'_{(i,j+2)}, R'_{(i+1,j-2)}, R'_{(i+1,j-1)}, R'_{(i+1,j)}, R'_{(i+1,j+1)}, R'_{(i+1,j+2)}, R'_{(i+2,j-2)}, R'_{(i+2,j-1)}, R'_{(i+2,j)}, R'_{(i+2,j+1)}, R'_{(i+2,j+2)}) \quad (6)$$

当 $A_{i,j}^t = 2$ 时,如图 1 所示,描述了火从自身元胞向

外蔓延的情况,颜色越深蔓延的速度越大。

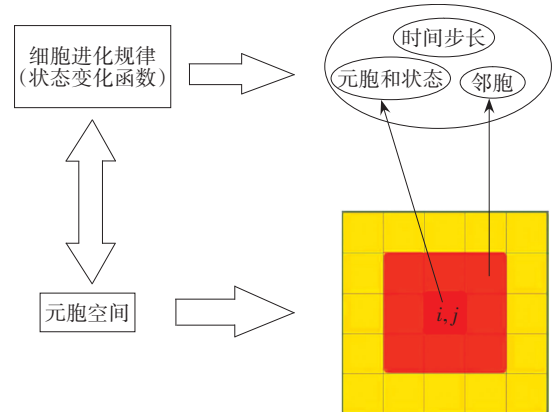


图 1 元胞的 24 领域扩散

Fig. 1 24-domain diffusion of cells

3 仿真实验与结果分析

3.1 元胞定义

在一个 $282.62 \text{ m} \times 121.42 \text{ m}$ 模拟场景中,设置一个元胞的边长为 $1/4 \text{ m}$,整个场景分成大约 5.5×10^5 个元胞,每个元胞有各自的状态参数,这些参数可以反映元胞所处的状态和特性。状态 0 代表还没有被点燃的可燃元胞;状态 1 代表刚开始燃烧还没有往外蔓延能力的可燃元胞;状态 2 代表猛烈燃烧并且可以往外蔓延的可燃元胞;状态 3 代表燃烧到了后期,消失了引燃其他元胞能力的可燃元胞;状态 4 代表燃烧结束的可燃元胞;状态 5 代表不可燃元胞。

对周围元胞的影响会根据两者之间的距离有所变化:

$$d = a \sqrt{(|i-m|^2 + |j-k|^2)} \quad (7)$$

式(7)中, d 为元胞之间的距离, a 为元胞的边长, i, j 为中心元胞的行数和列数, m, k 为被影响元胞的边长。将每个元胞的状态编码为矩阵 S 的一个元素,称为状态矩阵。

3.2 状态转换规则

在模拟的每个离散时间步长 t ,以下规则应用于状态矩阵 S 的元素 i, j (从而应用于所有单元格):

规则 1 IF (i,j,t) 状态 = 0 or 1, Then $(i \pm 1, j \pm 1, t+1)$ and $(i \pm 2, j \pm 2, t+1)$, 状态不被影响。

规则 2 IF (i,j,t) 状态 = 2, Then $(i \pm 1, j \pm 1, t+1)$ and $(i \pm 2, j \pm 2, t+1)$, 状态以概率 p_{burn} 变化。

规则 3 IF (i,j,t) 状态 = 3, Then $(i \pm 1, j \pm 1, t+1)$ and $(i \pm 2, j \pm 2, t+1)$, 状态不被影响。

规则 4 IF (i,j,t) 状态 = 4, Then $(i \pm 1, j \pm 1, t+1)$ and $(i \pm 2, j \pm 2, t+1)$, 状态不被影响。

规则 5 IF (i,j,t) 状态 = 5, Then $(i \pm 1, j \pm 1, t+1)$ and $(i \pm 2, j \pm 2, t+1)$, 状态不被影响。

这意味着当一个元胞在当前时间步长里着火且具备蔓延能力时,火灾可以在下一个时间点以概率 p_{burn} 传播到相邻区域, p_{burn} 是由影响火灾蔓延的各种参数共同作用下的函数结果。

3.3 蔓延概率

考虑化工园区建筑分布、风速、风向、空气湿度等因素的影响,概率 p_{burn} 的计算公式为

$$p_{\text{burn}} = p_h(1+p_v)(1+p_d)p_w p_s \quad (8)$$

式(8)中, p_h 表示与相邻可燃元胞在无风且平坦地形下点燃的恒定概率, p_d 取决于燃烧区类型, p_v 取决于燃烧区大小, p_w 与风速、风向有关, p_s 与坡度有关。

燃烧区类型和大小的影响分别由 p_v 和 p_d 表示。燃烧区类型被分为3类,编号1—3,其中1是农业区,2是森林区,3是建筑区。燃烧区大小被分为两类,编号1—2,其中1是小于 100 m^2 的面积,2是大于等于 100 m^2 的面积。燃烧区类型和大小被分成两个矩阵,即燃烧区类型矩阵和大小矩阵,其中每个类别的概率常量值 p_d 和 p_v 已分配。

式(9)是风速和风向影响燃烧的公式:

$$R_w = R_{0w} \exp(\beta \theta_f) \quad (9)$$

R_w 表示有风时的传播速率; R_{0w} 是风速等于零时的传播速率; θ_f 是从垂直于火势蔓延方向测量的火焰角度; β 是一个常数,通常通过实验数据的最小二乘线性回归获得。当火势蔓延方向与风向相同时,火焰角度设置为 θ_f ; 当方向相反时,火焰角度设置为 $-\theta_f$; 其他方向设置为0,其中 V 表示风速;常用经验公式(10)来计算火焰角度:

$$\tan(\theta_f) = 0.4226V \quad (10)$$

在这项研究中,采用了更灵活的经验风效应关系,其中包含风速和风向影响的概率由以下公式计算:

$$p_w = \exp(c_1 V) f_t, f_t = \exp(V c_2 (\cos \theta) - 1) \quad (11)$$

$$p_s = \exp(\alpha \theta_s) \quad (12)$$

式(11)中, c_1 、 c_2 是待确定的常数, θ 是火传播方向与风向之间的角度;式(12)中, α 是常数, θ_s 是坡度角。

斑点是一种现象,燃烧材料由于某些原因被运送至一定距离,可能会导致新的火灾。在燃烧情况下,假设每个可燃物在空中射出许多燃烧物质,用 N_p 表示, N_p 取自平均值为 λ 的泊松分布;再从均匀分布中绘制每个燃烧物质的去向,计算距离 d_p 。这个距离是两个分量的函数,第一个代表推力,只能以概率方式建模,第二个组成部分是风向和风速,可以用以下公式对这两个分量的组合效应进行建模:

$$d_p = r_n \exp(V c_2 (\cos \theta_p - 1)) \quad (13)$$

式(13)中, r_n 是从具有给定平均值和标准差的正态分布中提取的随机数, θ_p 是风向与射出的燃烧物方向之

间的角度。明确被射出物质的角度和距离就可以知道降落的位置。将点燃新的火灾概率校正为

$$p_c = p_{c0}(1+p_{cd}) \quad (14)$$

其中, p_{c0} 是燃烧概率, p_{cd} 与燃烧区有关。在这种情况下,添加一个进化规则:

规则6 IF(i, j, t) 状态 = 2, Then ($i \pm 1, j \pm 1, t+1$) and ($i \pm 2, j \pm 2, t+1$), 状态以概率 p_c 变化, p_c 取决于 d_p 离中心元胞的距离和风向。

3.4 确定燃烧区域

为了精确地模拟火势蔓延,只能让每个元胞代表的真实面积尽可能小以增加元胞数量。一个元胞的边长为 $1/4 \text{ m}$,而整个模拟场景为 $282.62 \text{ m} \times 121.42 \text{ m}$,整个场景被分成大约 5.5×10^5 个元胞。如果按照二维循环计算元胞的状态,这个工程的计算量会特别大。使用图的广度优先遍历算法和队列来计算会减少计算量。先将燃烧点的元胞存储到队列里面,这个队列里存储的是正在燃烧的元胞。只需要循环队列里面的元胞进行判断计算,获得下一时间步长里面的燃烧元胞,继续进行下一轮的计算。这种方法可以避免在计算循环时重复计算已经处理过的元胞,从而减少计算量。

3.5 模拟效果

在进行三维模拟的工作前,已经开发了二维模拟工具。风向、风速、湿度等影响火势蔓延的天气数据直接在天气预报网页上直接获取。

在二维模拟完成的情况下,采用 Unity 3D 软件对化工厂整个场景进行三维建模。在建模过程中,根据实际的工厂尺寸、结构和布局进行了精细还原,使得模型更加真实且具有可操作性。为进一步研究火灾防控和应急救援提供了重要的数据支撑和参考依据。

通过数据获取、模拟实验和数据计算,获得火势蔓延的效果图,如图2所示。火灾起初,火源处的温度逐渐升高,热辐射和烟气产生,导致周围物质的燃烧。火势随着时间的推移逐渐扩大,形成了火场的主要燃烧区域。同时,火势还会受到风向、风速、温度和湿度等环境因素的影响,火场的形态也会随之变化。最终,如图3、图4所示,火场的规模逐渐扩大。

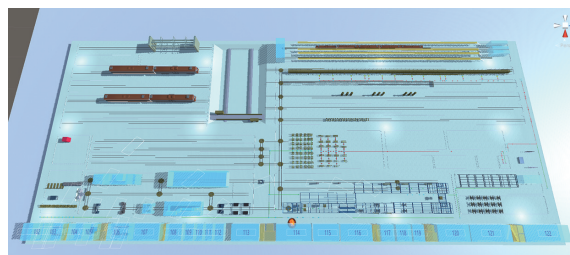


图2 初步燃烧图

Fig. 2 Preliminary burning diagram

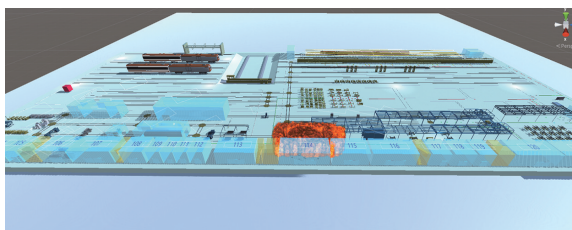


图 3 过渡图

Fig. 3 Transition diagram

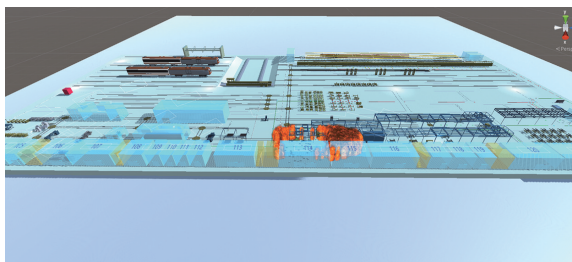


图 4 猛烈燃烧图

Fig. 4 Violent burning diagram

3.6 结果分析

在实际火灾现场中,燃烧区域的大小和形状各异,因此不同的可燃烧区域对于火势蔓延速度是有影响的。通过多次模拟和计算得出:面积小的燃烧区域相对于面积大的燃烧区域,火势蔓延速度会相对较慢。这是因为在面积小的燃烧区域中,火源的热量贡献相对较少,火势蔓延速度会减缓。此外,正方形燃烧区域的燃烧速率也会偏快一些。因为正方形的燃烧区域分布更均匀,有更多的氧气可以进入燃烧区域,促进火势的蔓延。大部分的燃烧区域燃烧速率在 $12 \sim 15 \text{ m}^2/\text{min}$ 。

在燃烧过程中,产生大量的热能和光能,同时燃烧产物也会不断释放出来,使正在燃烧的面积逐渐增大。当燃料物质减少或者其他原因导致燃烧反应减弱时,正在燃烧的面积会慢慢减小如图 5 所示。

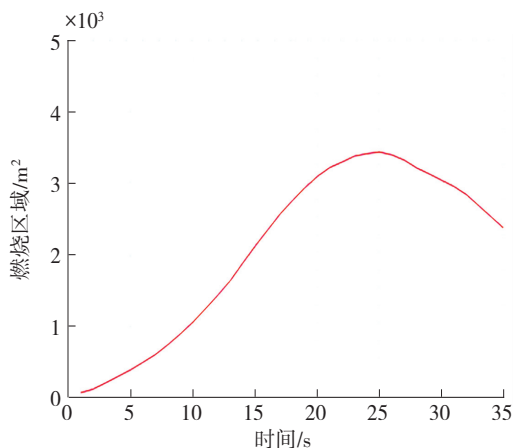


图 5 大面积燃烧图

Fig. 5 Large-area burning diagram

实验收集了化工园区案例报道的火灾数据,其中包含火灾地点、过火面积和火灾持续时间。在火灾研究领域,燃烧速率是一个关键参数,它反映了火焰燃烧的速度和强度。多次模拟获得每次实验的燃烧速率,如图 6 所示。图片中红色区域是实验数据小于最小燃烧速率(m^2/min)的区域,黄色区域是实验数据大于最大燃烧速率的区域,深蓝色区域是实验数据小于最大燃烧速率大于平均速率的区域,天蓝色区域是实验数据大于最小燃烧速率小于平均速率的区域。93%的实验数据都在真实数据的最大值和最小值中间,从侧面验证了实验的真实性。

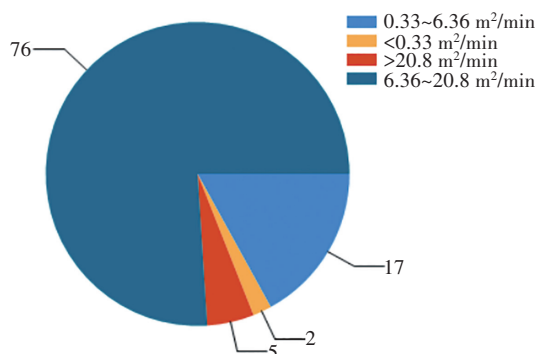


图 6 燃烧速率图

Fig. 6 Plot of burning rates

4 结 论

提出利用元胞自动机理论结合 Unity 三维可视化技术,以及组合模型和经验蔓延概率,对化工园区火势蔓延进行预测的方法。使用元胞自动机理论对化工园区的空间进行划分,通过不断地更新元胞状态,模拟火势在空间中的传播过程。将模拟结果以三维图像的形式呈现出来,直观地展示火势蔓延的过程。针对化工园区建筑分布,还引入了组合模型和经验蔓延概率,对火势的蔓延范围和速度进行了预测。这些方法的应用,使得能够更加准确地预测火势的扩散,为火灾救援提供有力的决策依据。研究结果表明:该方法在对化工园区火势蔓延进行预测方面具有高精度和可视化等优势,并且能够预测出火灾的蔓延速度和路径,对火灾救援具有重要的意义。

参考文献(References):

- [1] 姜文宇, 王飞, 苏国锋, 等. 基于元胞自动机的以火灭火动态建模方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(6): 926-933.
JIANG Wen-yu, WANG Fei, SU Guo-feng, et al. Dynamic modeling approach for suppression firing based on cellular automata[J]. Journal of Tsinghua University (Science and

- Technology), 2023, 63(6): 926–933.
- [2] ALEXANDRIDIS A, VAKALIS D, SIETTOS C I, et al. A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990[J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 204(1): 191–201.
- [3] 王信雷, 芮小平, 谢宜霖, 等. 一种自适应时间步长的场地地表污染扩散元胞自动机仿真模型[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(11): 2071–2088.
- WANG Xin-lei, RUI Xiao-ping, XIE Yi-lin, et al. A cellular automata simulation model of site surface pollution diffusion with adaptive time step[J]. Journal of Geo-Information Science, 2022, 24(11): 2071–2088.
- [4] 彭婷, 袁中原, 袁艳平, 等. 圆筒形地下立体停车库火灾火源位置与火势蔓延规律研究[J]. 化工学报, 2019, 70(6): 2397–2408.
- PENG Ting, YUAN Zhong-yuan, YUAN Yan-ping, et al. Research on fire location and law of fire spread of cylindrical three-dimensional underground garage[J]. CIESC Journal, 2019, 70(6): 2397–2408.
- [5] 高博, 单仔赫, 曹丽丽, 等. 大兴安岭地区森林火灾月动态变化及发生预测研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(9): 53–62.
- GAO Bo, SHAN Zi-he, CAO Li-li, et al. Study on monthly dynamic change and occurrence prediction of forest fires in Daxing'an Mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(9): 53–62.
- [6] 金森, 刘礴霏, 邸雪颖, 等. 平地无风条件下蒙古栎阔叶床层的火行为 I. 蔓延速率影响因子与预测模型[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 51–59.
- JIN Sen, LIU Bo-fei, DI Xue-ying, et al. Fire behavior of Mongolian Oak leaves fuel-bed under no-wind and zero-slope conditions I. Factors affecting fire spread rate and modeling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 51–59.
- [7] 王海军, 张文婷, 陈莹莹, 等. 利用元胞自动机作用域构建林火蔓延模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(5): 575–578, 631–633.
- WANG Hai-jun, ZHANG Wen-ting, CHEN Ying-ying, et al. Fire spreading model based on CA scope[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(5): 575–578, 631–633.
- [8] MUZY A, NUTARO J J, ZEIGLER B P, et al. Modeling and simulation of fire spreading through the activity tracking paradigm[J]. Ecological Modelling, 2008, 219(1–2): 212–225.
- [9] DENHAM M, WENDT K, BIANCHINI G, et al. Dynamic data-driven genetic algorithm for forest fire spread prediction[J]. Journal of Computational Science, 2012, 3(5): 398–404.
- [10] PAPADOPOULOS G D, PAVLIDOU F N. A comparative review on wildfire simulators[J]. IEEE Systems Journal, 2011, 5(2): 233–243.
- [11] YASSEMI S, DRAGIĆEVIĆ S, SCHMIDT M. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour[J]. Ecological Modelling, 2008, 210(1–2): 71–84.
- [12] ARAI K, BASUKI A. GIS based two dimensional cellular automata approach for prediction of forest fire spreading[J]. International Journal of Research & Reviews in Computer Science, 2011, 2(6): 1305–1312.
- [13] 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, 176.
- MENG Xiao-jing, YANG Li-zhong, LI Jian. Probability model of urban district fire spread based on cellular automata[J]. China Safety Science Journal (CSSJ), 2008, 18(2): 28–33, 176.
- [14] 翟春婕, 曹兆楼. 窄带水平集法下林火蔓延仿真研究[J]. 火灾科学, 2017, 26(1): 37–42.
- ZHAI Chun-jie, CAO Zhao-lou. Numerical simulation on wildland fire spread with narrow-band level set method[J]. Fire Safety Science, 2017, 26(1): 37–42.
- [15] 王路兵, 吴鹏, 胡鹏, 等. 资源受限下森林火灾应急救援多目标调度优化[J]. 运筹与管理, 2023, 32(1): 60–66.
- WANG Lu-bing, WU Peng, HU Peng, et al. Multi-objective optimization for forest fires emergency rescue scheduling with resource constraints[J]. Operations Research and Management Science, 2023, 32(1): 60–66.
- [16] 王正非. 山火初始蔓延速度测算算法[J]. 山地研究, 1983, 1(2): 42–51.
- WANG Zheng-fei. The measurement method of the wildfire initial spread rate[J]. Journal of Mountain Research, 1983, 1(2): 42–51.
- [17] 毛贤敏, 徐文兴. 林火蔓延速度计算方法的研究[J]. 辽宁气象, 1991, 7(1): 9–13.
- MAO Xian-min, XU Wen-xing. Study on calculation method of forest fire spread speed[J]. Liaoning Meteorological Quarterly, 1991, 7(1): 9–13.

责任编辑:李翠薇