

文章编号: 2095-2163(2023)01-0186-03

中图分类号: TP311.13

文献标志码: A

# 森林火灾仿真研究综述

李颖<sup>1</sup>, 杜逆索<sup>1,2</sup>, 欧阳智<sup>2</sup>

(1 贵州大学 计算机科学与技术学院, 贵阳 550025; 2 贵州大数据产业发展应用研究院, 贵阳 550025)

**摘要:** 森林火灾对全球生态和社会经济构成了严重的威胁。因此,准确地预测山火的蔓延情况,有助于制定合理的火控方案,降低山火传播的风险。本文针对基于主体的模型、元胞自动机和机器学习方法在森林火灾仿真中的研究现状进行综述,为科研人员提供指导和参考。

**关键词:** 基于主体的模型; 元胞自动机; 机器学习; 森林火灾模型

## A review of forest fire simulation research

LI Ying<sup>1</sup>, DU Nisuo<sup>1,2</sup>, OUYANG Zhi<sup>2</sup>

(1 School of Computer Science and Technology, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2 Guizhou Institute for the Development and Application of Big Data Industry, Guiyang 550025, China)

**[Abstract]** Forest fires pose a serious threat to global ecology and socioeconomics. Therefore, accurate prediction of the spread of mountain fires can help to develop appropriate fire control plans and reduce the risk of their spread. Currently, many forest fire models have been developed and are classified into empirical, physical and mathematical models according to the nature of their construction. In addition, the maturity of computer development has led to the emergence of computer simulation in fire spread simulation. This paper provides a review of the current state of research on subject-based models, meta-cellular automata and machine learning methods in forest fire simulation to provide guidance and reference for researchers.

**[Key words]** agent-based models; cellular automata; machine learning; forest fire models

## 0 引言

由于气候变化和人类发展的共同影响,森林火灾发生频率必然会持续增加。森林火灾往往从起火点快速蔓延,且蔓延方向随着植被状态、气象条件和地形等因素的影响会发生突然改变。因此,准确地预测山火的蔓延情况,有助于制定合理的火控方案,降低山火传播的风险。

森林火灾是一个典型的非线性复杂过程,因此建立一个高精度的林火蔓延预测是一项艰巨的任务。为此,许多学者针对森林火灾蔓延进行相关建模研究。目前,许多森林火灾模型已经被开发出来,根据其构建性质可分为经验模型、物理模型和数学模型。经验模型通常通过统计分析描述观察到的火灾行为,或者使用某种形式的物理框架作为统计模型的基础。如著名的 Rothermel 模型,通过室内实验

构建动力学方程来表征森林火灾蔓延。物理模型将物理和化学结合起来,试图表示火灾的蔓延。如 Mell 等人<sup>[1]</sup>构建的火灾动力学模型,考虑了燃烧物所产生气体与氧气之间的化学反应。数学模型则通过数学方法来模拟野外火灾。如基于物理的多相计算流体力学模型<sup>[2]</sup>。

除此之外,随着计算机技术的成熟,人们也越来越认识到计算机仿真在探索森林火灾中具有重要意义。计算机仿真通过将真实系统作为建模的依据,并运行已建立的仿真模型,从而获得相关实验数据,对现实系统的变化规律进行预测和评估。

本文重点关注计算机领域中基于主体建模、元胞自动机和机器学习方法在森林火灾仿真中的研究进展,总结应用范围及优势,为森林火灾仿真在计算机仿真领域的研究提供参考。

**基金项目:** 贵州省重大科技专项(20183002); 贵州大学培育项目([2020]-41)。

**作者简介:** 李颖(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:复杂系统的建模和仿真;杜逆索(1986-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:机器学习和复杂系统的建模和仿真;欧阳智(1987-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:知识管理和大数据管理。

**通讯作者:** 杜逆索

Email: nsdu@gzu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-09

## 1 基于主体建模的森林火灾仿真

基于主体的建模方法,是一种强大的仿真建模技术,被应用于描述各种真实世界问题。模型中,主体是自主决策的实体集合。每个主体可以自主评估自己的情况,并根据一组规则做出相应决策。

Niazi 等人<sup>[3]</sup>提出了一种基于书体的森林火灾模型的验证和确认。该模型使用虚拟叠加多智能体系统(VOMAS)和火灾天气指数(FWI)相结合的方法。本研究中,每个虚拟“传感器”主体使用FWI计算火灾概率,并与仿真模型进行比较。结果表明,基于主体模型的VOMAS验证和确认方法,能够使模拟专家和主题专家参与到基于主体模型的交互设计中。Chang<sup>[4]</sup>建立了一个基于主体的森林火灾蔓延模型(FFSA),描述了火灾主体的蔓延行为,并提出了基于遗传算法的FFSA模型规则生成算法,使森林火灾蔓延的模拟更加贴近现实世界。Behzadi 等人<sup>[5]</sup>提出了一种基于信念-愿望-意图(BDI)为主体的森林火灾预测模型,并将其映射到地理环境系统中,以此预测伊朗北部马扎达兰地区的森林火灾行为。该模型的预测结果与火灾真实数据集进行对比,准确率已达到68.2%左右。

由于基于主体的模型可以定义不同的主体属性和行为规则,因此该方法更多的将森林火灾和社会个体进行结合,以探索火灾对个体行为的影响。如:Minelli 等人<sup>[6]</sup>以瑞士南部阿尔卑斯地区为例,构建一种基于主体的模型来评估森林火灾的动态。通过分析人口增长、城市化和土地使用管理等因素,进而探讨城镇森林交界域(Wildland-Urban interface, WUI)的演变。Spies 等人<sup>[7]</sup>建立的主体模型,结合现有植被演替和火灾蔓延模型,以及土地管理者的实证信息,并以俄勒冈州东部喀斯喀特斯多为例,基于构建模型探讨了土地管理者的决策对景观中火灾和生态系统服务指标的影响程度。

## 2 基于元胞自动机的森林火灾仿真

元胞自动机起源于冯诺依曼提出的自动机理论,其是一个离散的动力学系统,其中包含大量的简单细胞,每个细胞之间存在局部交互特性。尽管元胞自动机的结构简单,但其能做出复杂的行为,并能较好地地从微观角度预测火灾蔓延行为。因此,在模拟火灾传播行为的离散模型中具有较强的优势。在基于元胞自动机的模型中,森林被认为是一个随时间演化的元胞空间,每个单元格都有独立和依赖状

态。其独立状态是自身随时间的演化,而依赖状态是邻近的未燃烧单元。

Alexandridis 等人<sup>[8]</sup>提出了一种基于元胞自动机的预测山地森林火灾蔓延模型,考虑了影响火灾蔓延的主要因素,其中包括植被类型和密度、风速和风向等。Collin 等人<sup>[9]</sup>将物理模型与元胞自动机结合,在定义元胞自动机变化规则时,特别考虑了植被特性和火焰特性。Ghisu 等人<sup>[10]</sup>提出一种用于野外火灾预测的元胞自动机方法,对于火灾前沿行为的描述上利用修正平流速度进行优化,从而使火灾形状与预期更接近。Jellouli 等人<sup>[11]</sup>提出了一种基于元胞自动机的森林火灾蔓延动态预测模型,考虑了植被和密度、四度和海拔高度等,评估了森林火灾的脆弱性及蔓延性,并应用于墨西哥某一流域。Rui 等人<sup>[12]</sup>提出了一种改进的森林火灾蔓延模型,结合了元胞自动机和现有林火模型,考虑了时间步长与仿真精度之间的关系,并以大兴安岭森林火灾蔓延数据对模型进行了验证。Bhakti 等人<sup>[13]</sup>构建了一个基于元胞自动机的森林火灾蔓延模型,模拟了不同植被烧毁概率条件对森林的破坏程度。

基于元胞自动机建模方法,其核心在于用简单的规则,描述了有限状态的复杂过程,但对于复杂系统中的现象表示存在一定的局限性。因此,该方法更适用于低维度下的简单森林火灾仿真。

## 3 基于机器学习的森林火灾仿真

近年来,由于机器学习能够学习各种参数之间的非线性关系而受到广泛关注。该方法已被应用于各种科学和技术领域的预测和决策,其中包括森林火灾预测和检测。

Sakr 等人<sup>[14]</sup>使用神经网络和支持向量机,开发了针对累积降水和相对湿度、独立于任何天气预测机制的林火预测算法。结果表明,两种方法均在预测火灾数量方面效果显著。Arpaci 等人<sup>[15]</sup>分别使用增强回归树(BRT)和最大熵(MaxEnt)的机器学习方法,分析了蒂罗尔森林火灾分布并指出森林中发生火灾频率较高的区域。Bui 等人<sup>[16]</sup>提出一种森林火险空间建模方法,该方法基于人工神经网络、差分花传粉和小匹配反向传播的混合训练算法,并以越南林东省的热带森林作为案例研究,预测精度达到88.43%。Zhai 等人<sup>[17]</sup>建立了一种基于机器学习的野外火灾传播模型,用来预测短期的野火传播。该方法利用实时测量的火灾扩散速率来更新预测火灾扩散速率,提高了计算效率和预测精度。运用多

层感知神经网络预测未燃烧区域的火灾扩散速率,通过经典 BP 算法更新不同神经元之间的权值与偏差。Allaire 等人[18]提出了一种混合架构的深度神经网络,该方法可以同时处理不同类型的输入数据,用于估计不同环境条件下的火灾蔓延。输入数据包括周围景观的二维图像和燃烧参数,最终输出烧毁表面面积。刘丹<sup>[19]</sup>分别使用支持向量机和随机森林 K 近邻等方法,对分布空间、时间、气候指标和 FWI 系统指标进行数据分析,用以预测森林火灾的燃烧面积。

随着遥感和地理信息系统(GIS)技术的发展,基于机器学习的火灾仿真方法也正发挥着重大作用。由于基于 GIS 收集的数据规模庞大,这意味着在对森林火灾的分析过程中将涉及多种变量,如风向、坡度和气温等。而机器学习既能处理多个变量又能处理大型数据集的特点使得其可以更好地模拟森林火灾。此外,机器学习的推理能力有助于更加精准的估计森林火灾的空间分布。

## 4 结束语

计算机仿真方法在森林火灾模拟中提供了有力的支撑。本文综述了基于主体的模型、元胞自动机和机器学习方法在森林火灾仿真研究的主要进展。基于主体的模型已经进行了森林火灾模型的构建和验证,但是更多用于探索森林火灾过程与个体之间的影响;元胞自动机结合物理和数学方法可以模拟离散的火灾蔓延行为,但是该方法更适用于简单的火灾蔓延行为;机器学习在目前存在大量现实火灾数据及多变量的背景下,更有利于精准有效地模拟森林火灾。

## 参考文献

- [1] MELL W, JENKINS M A, GOULD J, et al. A physics-based approach to modelling grassland fires[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, 16(1): 1-22.
- [2] AGRANAT V, PERMINOV V. Mathematical modeling of wildland fire initiation and spread[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2020, 125: 104640.
- [3] MUZA A N, QASIM S, AMIR H, et al. Verification & validation of an agent-based forest fire simulation model [C]//In Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference, Society for Computer Simulation International, San Diego, CA, USA, 2010: 1-8.
- [4] CHANG Y C. An adaptive algorithm for forest fire spread based on genetic algorithm[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 694-697: 2842-2845.
- [5] BEHZADI S, MOUSAVI Z. A novel agent-based model for forest fire prediction[J]. *Earth Observation and Geomatics Engineering*, 2019, 3(2): 51-63.
- [6] MINELLI A, TONINI M. A multi-level agent-based model to assess the forest fire Management in the southern swiss alpine region[J]. *PeerJ Preprints*, 2016, 4: e2152v3.
- [7] SPIES T A, WHITE E, et al. Using an agent-based model to examine forest management outcomes in a fire-prone landscape in oregon, USA[J]. *Ecology and Society*, 2017, 22(1): 1-54.
- [8] 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.
- [9] COLLIN A, BERNARDIN D, SÉRO - GUILLAUME O. A physical-based cellular automaton model for forest-fire propagation[J]. *Combustion Science and Technology*, 2011, 183: 347-369.
- [10] GHISU T, ARCA B, PELLIZZARO G, et al. An improved cellular automata for wildfire spread [J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 51(1): 2287-2296.
- [11] JELLOULI O, BERNOUSSI A, MAATOUK M, et al. Forest fire modelling using cellular automata: application to the watershed Oued Laou (Morocco) [J]. *Mathematical Modelling of Systems*, 2016, 22(4-6): 493-507.
- [12] RUI X, SHAN H, YU X, et al. Forest fire spread simulation algorithm based on cellular automata[J]. *Natural Hazards*, 2018, 91: 309-319.
- [13] BHAKTI H D, H IBRAHIM, FRISTELLA F, et al. Fire spread simulation using cellular automata in forest fire [J]. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, 821: 012037.
- [14] SAKR G E, ELHAJJ I H, MITRI G. Efficient forest fire occurrence prediction for developing countries using two weather parameters[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2011, 24(5): 888-894.
- [15] ARPACI A, MALOWERSCHNIG B, SASS O, et al. Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests[J]. *Applied Geography*, 2014, 53: 258-270.
- [16] BUI D T, LE V H, HONG N D. GIS-based spatial prediction of tropical forest fire danger using a new hybrid machine learning method[J]. *Ecological Informatics*, 2018, 48: 104-116.
- [17] ZHAI C, ZHANG S C, CAO Z D, et al. Learning-based prediction of wildfire spread with real-time rate of spread measurement-Science Direct[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 215: 333-341.
- [18] ALLAIRE F, MALLET V, FILIPPI J B. Emulation of wildland fire spread simulation using deep learning[J]. *Neural Networks*, 2021, 141: 184-198.
- [19] 刘丹. 基于机器学习对森林火灾的预测分析[J]. *统计学与应用*, 2016, 5(2): 163-171.