

基于森林火灾的生物迁移仿真研究综述

王诗颖¹, 欧阳智^{1,2}, 杜逆索^{1,2}

¹贵州大学数学与统计学院, 贵州 贵阳

²贵州省大数据产业发展应用研究院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年3月22日; 录用日期: 2022年5月23日; 发布日期: 2022年5月30日

摘要

森林火灾给大自然和人类社会造成了无法估计的危害, 随着计算机技术的发展, 越来越多的学者尝试用各种方法对森林火灾蔓延模型进行仿真模拟研究, 以实现森林火灾蔓延的科学模拟。但目前的研究中并没有考虑到受火灾影响的森林生物迁移行为, 导致所建立的森林火灾蔓延模拟系统并不符合现实世界森林火灾蔓延的复杂性。本文对各种生物迁移算法以及森林火灾蔓延的仿真模拟技术进行了综述, 重点分析了生物地理学优化算法、生存迁移算法、基于元胞自动机、基于Agent和基于传染病SIR模型的森林火灾蔓延模型的研究进展。

关键词

生物迁移, 森林火灾仿真

A Review of Simulation Research on Biological Migration Based on Forest Fire

Shiying Wang¹, Zhi Ouyang^{1,2}, Nisuo Du^{1,2}

¹College of Mathematics and Statistics, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Guizhou Big Data Academy, Guiyang Guizhou

Received: Mar. 22nd, 2022; accepted: May 23rd, 2022; published: May 30th, 2022

Abstract

Forest fires have caused incalculable hazards to nature and human society, and with the development of computer technology, more and more scholars are trying to conduct simulation studies on forest fire spread models using various methods to achieve scientific simulation of forest fire spread. However, the migration behavior of fire-affected forest organisms has not been considered in the current study, resulting in a forest fire spread simulation system that does not match

the complexity of real-world forest fire spread. This paper provides a review of various bio-migration algorithms and simulation techniques for forest fire spread simulation, focusing on the research progress of biogeography-based optimization algorithms, living migration algorithms, cellular-automata-based, agent-based, and infectious disease SIR-based models for forest fire spread models.

Keywords

Biogenic Migration, Forest Fire Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

生物迁移命题是由达尔文[1]提出来的。他在《物种起源》中指出生命的变化遵循着时间上的演化和空间上的迁移，两者并行不悖、彼此相随，每个物种都有自己的一个也是唯一的起源中心，在条件允许的情况下，他会从这个中心迁移到他力所能及的地区去生存。迁移，与其说是生物体本身的一种能力，不如说是环境给予的一种机会。只要限制迁移的障碍被消除，迁移的能量就会立即释放出来，迁移就会随机发生。迁移创造和维持着自然生态系统中丰富的生物群落。生物界中形成的生物迁移的机理使它们能够调整自己、适应外界环境的变化，并在环境中生存。从模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理建立的遗传算法开始，研究自然界规律并构建仿生算法，解决工程问题，一直是群体智能优化算法的研究基础。随后提出的利用蚂蚁觅食规律的蚁群算法和利用鸟群的捕食行为规律及社会行为的粒子群算法等都在工程和科研领域得到了广泛的研究和认可。

因此，研究生物迁移的机理并对其进行仿真，也必定会给工程领域带来很多富有成效的智能技术和方法。

森林资源是地球上最重要的资源之一，是生物多样化的基础，但频频发生的森林火灾导致严重的野生动植物伤亡，对动植物的生存环境也造成了破坏，使得森林系统的生态失去平衡，被世界公认为八大自然灾害之一。由于森林火灾给大自然和人类社会造成了无法估计的危害，这使得人们需要迫切地去认识火灾发生及蔓延的规律，以便在森林火灾发生时，能够快速准确地模拟和预测火势的蔓延和发展。随着计算机技术的发展，越来越多的学者在森林火灾研究领域大力开展了森林火灾蔓延的仿真模拟研究，但目前的研究仅仅只考虑了森林中的植被、地形、风力等因素，而对受森林火灾影响的生物迁移的仿真模拟研究却寥寥无几，这是导致目前所建立的森林火灾蔓延模拟系统并不符合现实世界森林火灾蔓延的复杂性的原因之一。由于森林火灾对生物栖息地的严重破坏，这必然会引起大量的生物迁移行为，而通过借鉴对生物的迁移过程进行模拟的各种仿真优化算法，获得森林火灾中生物迁移路线与生物多样性的变化，以此实现基于森林火灾的生物迁移的仿真模拟，获得更真实的森林火灾蔓延模拟系统，对森林火灾防火和火灾预测具有重大实际意义。

本文对各种生物迁移算法进行了综述，重点分析了生物地理学优化算法和生存迁移算法，也对各种森林火灾蔓延的仿真模拟技术的研究进展和趋势进行了综述，重点分析了基于元胞自动机、基于 Agent、基于传染病 SIR 模型的森林火灾蔓延模型的仿真模拟的进展。

2. 生物迁移的仿真优化算法

目前的智能优化算法中,对自然界生物的迁移过程进行模拟的算法主要有生物地理学优化算法和生存迁移算法,本节对两种算法的基本原理以及算法步骤进行了简要概述。其中,改进的生物地理学优化算法主要是针对迁移率模型方面的改进。

2.1. 生物地理学优化算法

2.1.1. 生物地理学优化算法的基本思想

生物地理学优化算法(Biogeography-Based Optimization, 简称 BBO)的基本思想来源于 Alfred Wallace 和 Charles Darwin 在 19 世纪提出的生物地理学理论,这是一门研究物种在栖息地的分布、迁移、新物种的产生以及物种灭绝规律的科学。生物地理学的基本理论描述大致如下:生物种群生活在不同的“栖息地”,每个栖息地都有不同的适宜度指数(HIS, Habitat Suitability Index)。与 HSI 相关的特征包括降雨量、植被的多样性、地质的多样性和气候等,这些特征变量构成了描述栖息地适宜度的向量 SIV (SIV, Suitable Index Vector),其中的每个适宜度变量被称为 SIVs (Suitable Index Variables)。HSI 是影响物种在栖息地上分布和迁移的重要因素之一。HSI 越高的栖息地的物种多样性越高;反之,HSI 越低的栖息地的物种多样性越低。可见,栖息地的 HSI 与生物多样性成正比。HSI 较高的栖息地由于空间饱和等问题,会有大量物种迁出到相邻栖息地,并伴有少量物种迁入;而 HSI 较低的栖息地由于其物种数量较少,会导致迁入的物种较多和迁出的物种较少。但是,当某一栖息地 HSI 持续偏低时,那么自然灾害可能会导致该栖息地上的某一物种趋向于灭绝,造成其他物种的大量迁入。生物地理学中常用如图 1 所示的简单线性迁移模型。

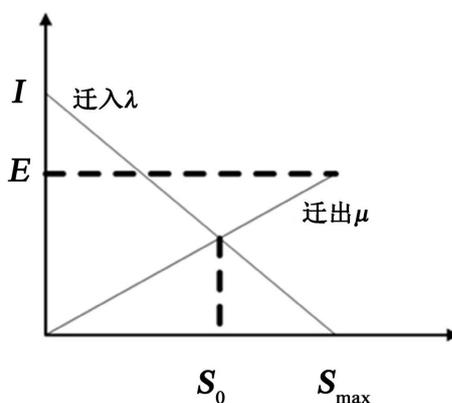


Figure 1. Species migration model

图 1. 物种迁移模型

此模型是针对单一栖息地的物种迁移模型。其中,横坐标表示栖息地中持有的种群数量 s ,纵坐标表示迁移的比率, $\lambda(s)$ 和 $\mu(s)$ 分别为种群数量的迁入率和迁出率函数。

根据生物地理学理论,Simond [2]在 2008 年提出了生物地理学优化算法。该算法的基本思想是通过物种的迁移和突变,根据每个栖息地的适宜度函数的不断更新,实现不同栖息地之间的信息交流与共享,来寻找全局适宜度最优化。BBO 算法中的主要操作是迁移和突变。算法的迁移操作是根据迁移率来调整栖息地,进行栖息地之间的信息交流。由于自然灾害等因素会导致一个栖息地的生态环境彻底改变,使得该栖息地的物种数量脱离平衡点,进而导致栖息地的适宜度发生骤变,所以 BBO 算法采用突变操作模拟这种现象,根据栖息地的物种数量概率给出相应的突变率。

2.1.2. 生物地理学优化算法的基本步骤

BBO 算法的流程为:

- 第一, 初始化。创建一个初始的栖息地生态系统, 并计算每个栖息地相应的适宜度指数;
- 第二, 迁移。计算每个栖息地的迁入和迁出率开始的, 更新每个栖息地的适宜度指数;
- 第三, 突变。突变发生后, 再对每个栖息地的适宜度进行重新计算;
- 第四, 终止。定义终止条件, 可能取决于迭代次数, 或最佳栖息地的适宜度。

2.1.3. 生物地理学优化算法的改进

为研究 BBO 算法的性能, Simond 将此算法与其他进化算法的性能进行了比较, 结果表明, 在一般优化问题上, BBO 算法性能可靠、有效, 具有良好的全局搜索能力, 在某些问题上其性能超过了传统优化算法, 但此算法存在局部探索能力不足, 收敛精度不高、算法不稳定等问题。

目前针对 BBO 算法所存在问题的改进, 学者们的主要研究方向为采用其他形式的迁移率模型来进行函数的优化, 如表 1 所示。

Table 1. Improvement direction and improvement results of the BBO algorithm

表 1. BBO 算法的改进方向及改进成果

主要研究者	所采取的迁移率模型	研究所得最优迁移率模型
马海平等人[3]	线性迁移率模型、指数迁移率模型、二次迁移率模型、余弦迁移率模型	余弦迁移率模型
马海平[4]	线性迁移率模型、固定迁入和线性迁出模型、线性迁入和固定迁出模型、梯形迁移率模型、二次迁移率模型、正弦迁移率模型	正弦迁移率模型
王雅萍等人[5]	线性迁移模型、余弦迁移率模型、基于 Logistic 函数迁移率模型、三次多项式迁移率模型、基于双曲正切函数迁移率模型	基于双曲正切函数迁移率模型
李昌兴等人[6]	自适应差分变异迁移算子与原始迁移算子相结合的双模式余弦迁移率模型	双模式余弦迁移率模型

针对 BBO 算法中线性迁移率模型适应性不足的问题, 马海平等人[3]分析了指数迁移率模型、二次迁移率模型、余弦迁移率模型与最初的线性迁移率模型的特点, 并测试了这四种不同的迁移率模型对 BBO 算法性能的影响。结果表明, 不同迁移率会导致 BBO 算法性能的显著变化, 接近自然规律的复杂迁移率模型性能要优于简单的线性迁移率模型。除此以外, 马海平[4]还提出了常数与线性混合迁移率模型和梯形迁移率模型, 并对固定迁入和线性迁出模型、线性迁入和固定迁出模型、线性迁移率模型、梯形迁移率模型、二次迁移率模型、正弦迁移率模型这六种迁移率模型进行了分析, 结果表明正弦迁移率模型具有最佳的性能。

同样地, 王雅萍等人[5]分别基于 Logistic 函数、三次多项式以及双曲正切函数提出了三种非线性迁移率模型, 并与原始线性模型和余弦迁移率模型进行了对比分析。实证表明, 基于双曲正切函数迁移率模型的 BBO 算法表现最佳。

李昌兴等人[6]提出了一种基于双模式迁移策略的生物地理学优化算法。该算法是在标准 BBO 算法的基础上, 采用余弦迁移模型对迁移算子进行改善, 将自适应的差分变异迁移算子与标准的迁移算子相结合形成双迁移模式。算法性能测试结果表明, 与两种单模式算法相比, 算法的收敛速度、收敛精度和稳定性都有了较大的提升。

BBO 算法相较于其他进化算法而言,还有许多方面值得进一步的研究,比如 BBO 算法在动态优化问题中的性能以及实际工程应用等方面。在目前的研究中,BBO 算法主要应用于函数优化、电力系统的优化等问题,未来可以考虑将 BBO 算法的自适应机制应用于受森林火灾影响的生物迁移过程的仿真中。

2.2. 生存迁移算法

2.2.1. 生存迁移算法的基本思想

迁移从广义上可以分为 3 类:扩张、转移和隔离。绝大多数单一类群的迁移属于转移,即一个类群从一个地理区域向另一个地理区域按一定的方向一步一步地迁移到另一个地理区域,当它到达一个新的地理区域时,此类群在旧的地理区域中已不复存在。这种迁移,在时空分布上是连续的;但是,这种迁移又是在特定的时间只分布在特定的地理区域,在空间上又是不连续的,是孤立的。为了生存和繁衍后代,生物不断地迁移,直至找到最佳的生存环境。可见,生存迁移是生物界的普遍规律。

受生物迁移理论和生存规律的启发,李豆豆等人[7]提出了生存迁移算法(Living Migration Algorithm, LMA)。在算法中,个体被称为“生物体”,每一次迭代称为“一代”。每个生物体都记录了各自的生存位置的生存状况,也就是生物体通过适应环境而获得的生存需求状况。同时,每个生物体都有一个最低的生存极限,它们反映的是生物体最基本的生存需求。一旦生存状况低于生存极限,就会刺激生物迁移,释放出迁移的能量,就会发生生物迁移,生物体会随机迁移到其他地方。生物正是按照这种生存和迁移机理,在环境中找到最佳的生存场所。

2.2.2. 生存迁移算法的基本步骤

根据生存迁移算法的机理,算法的基本步骤为:

第一步,初始化。给定每个生物体的初始位置、每代的移动步数、维数和最大迭代次数;

第二步,搜索。产生每个生物体的生存极限,然后随机地移动,移动的步幅不是固定的,移动搜索结束后,每个生物体选出其搜索的最大值,然后在所有个体的最大搜索结果中选出一个最大值,以此得到生存状况;

第三步,迭代或终止。当每个生物体的生存状况都大于或等于生存极限时,或算法的迭代次数大于最大迭代次数时,算法终止,否则,没有满足终止条件的生物体将随机选择一个迁移位置,进行下一代搜索。

生存迁移算法具有更好的全局优化能力和收敛速度,能够较好地解决局部最优问题,有效地处理含有噪音的优化问题。然而,生存迁移算法的研究才刚刚起步,在现有的文献中,生存迁移算法仅仅只针对一些典型的最优化问题进行了性能测试,在实际应用方面还有待进一步研究。

3. 森林火灾蔓延的仿真模拟技术

由于影响森林火灾的因素繁多,各种参数复杂,森林火灾蔓延的数学模型的运算繁琐,因此借用现代计算机技术,实现森林火灾的蔓延模拟成为必然,这也是目前森林火灾蔓延研究的一个主要方向。由于元胞自动机具有强大的模拟复杂系统的能力,使其在森林火灾的蔓延模拟研究越来越广泛。随着森林火灾蔓延行为的研究深入,基于 Agent 模型和基于传染病 SIR 模型的也被用于森林火灾的蔓延模拟研究中,并很好地模拟出森林火灾蔓延的演变规律。

3.1. 基于元胞自动机的仿真模拟

3.1.1. 元胞自动机模型的基本原理

元胞自动机(Cellular Automata, 简称 CA)是以栅格数据为基础,假定空间、状态和时间都是离散的模

型。其原理是将一个自然现象或物理系统，在时间上离散成若干个独立的时间步长，在空间上，将每个时间步长的连续空间划分成一个有规则的网格[8]。网格中的每个单元格就是 CA 模型的一个元胞。一个 CA 模型通常包括 4 个基本元素：元胞、状态、邻域和状态转换规则。元胞是 CA 模型的最小单位，每个元胞都有一个邻域，一组内部状态变量以及一个局部规则[9]。一般的二维 CA 模型可以简单地表示成式(1)：

$$S_{(i,j)}^{t+1} = f\left(S_{(i,j)}^t, S_{N(i,j)}^t\right) \quad (1)$$

其中， (i, j) 表示元胞在网格中的离散位置， t 表示时间步长， S 表示元胞的内部状态变量集， $N(i, j)$ 表示邻域， f 表示状态转换函数或规则。

CA 的邻域是指元胞周围按照一定形状划分的邻居元胞的集合。最常用的是摩尔邻域，如图 2 所示。

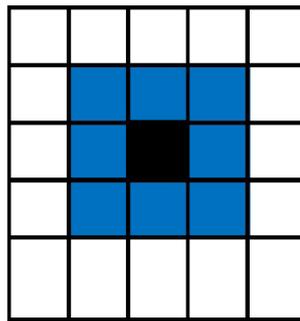


Figure 2. Moore neighbourhood

图 2. 摩尔邻域

摩尔邻域包括中心元胞 (i, j) 周围的 8 个细胞 (i^*, j^*) ，定义为式(2)：

$$N(i, j) = \left\{ (i^*, j^*) : |i - i^*| \leq 1, |j - j^*| \leq 1 \right\} \quad (2)$$

元胞下一时刻的状态由局部状态转换规则计算得来的，与元胞当前状态和邻域元胞的当前状态有关。因此，模型的时间演化是由元胞状态和元胞邻域状态之间的相互作用驱动的。从给定的元胞初始状态配置开始，CA 会自动复制后续元胞状态。

3.1.2. 基于元胞自动机的森林火灾蔓延模型的改进

由于 CA 所具有的离散性、相互作用的局限性、动态演化同步性和模型构建简单等特点，基于 CA 的模拟越来越多地被用来研究森林火灾蔓延模型。Karafyllidis 等人(1997) [10]首次提出了基于 CA 的森林火灾蔓延预测模型，此模型可以预测均质和非均质森林中火势的蔓延，并结合了天气和地形这两个影响森林火灾蔓延的因素。模型将森林划分成相同的正方形单元组成的二维矩阵，并用 CA 表示，其中森林的每个单元都被视为 CA 的单元。每个正方形单元都具有火势蔓延率，它确定了该单元被完全烧尽所需要的时间。

现实世界中的森林火灾事件蕴含着大量复杂且多变的影响因素，基于 CA 的森林火灾仿真模型的优化也致力于在基于 CA 的模型框架中融入更多的环境因素，使仿真结果更接近于真实情况，如表 2 所示。

针对标准 CA 模型中元胞定义的局限，许多学者对元胞的类型与状态进行了更丰富的定义。例如，王长缨等人[11]为每个元胞赋予了五个状态：不可燃烧状态、未燃烧状态、初始燃烧状态、燃烧最盛状态、燃烧接近结束状态，并运用克隆选择的免疫方法搜索最优的规则参数。湛玉剑等人[12]提出了一种应用于具有复杂树种多样性的林火蔓延模拟模型，模型为每个元胞定义了树种易燃性、可燃物密度、地形坡度

Table 2. Optimisation of CA-based forest fire spread models
表 2. 基于 CA 的森林火灾蔓延模型的优化

优化方向	模型优化的具体内容
丰富元胞的类型及状态	燃烧状态
	植被因素(易燃性、密度、大小)
	地形因素(空地、河流、坡度)
	人为因素(砍伐)
融合其他方法	克隆选择的免疫方法
	GIS 技术
	多目标遗传算法
添加真实数据	数字高程模型
	气象数据
	地形数据

等环境因素，并借助 GIS (Geographic Information Systems) 技术实现了蔓延模型的动态模拟。结果表明，模型能够仿真分析不同环境下的林火蔓延趋势，能够较为有效地估算火场形状、过火面积、蔓延速度等。

为建立更真实的森林火灾蔓延仿真系统，许多学者考虑到更多真实情况。例如，宋卫国等人[13]考虑了真实森林中普遍存在的树木大小及分布的不均匀性，为 CA 模型中各个元胞赋予不同的值来表示森林的不均匀性：以数值 0 来代表空地，不为 0 的值表示树木的大小。朱辉等人[14]同样也考虑到森林中空地的影响，并在概率 CA 模型的基础上，增加了人为砍伐事件的演化规则。其仿真结果表明，在森林中适当地留一些空地和适度地砍伐反而会利于森林中树木的生长。虽然该模型考虑到森林中也会存在石头，河流以及人类砍伐等已经非常接近火灾发生的真实情况，但并未考虑到树木种类的不同，种群分布的不同，人为纵火的概率等影响因素。

在 CA 模型的基础上融合其他的算法来优化仿真模型，也是学者们为了更形象地描述森林火灾蔓延过程所研究的方向。周国雄等人[15]提出了一种基于多目标遗传算法的三维元胞空间林火蔓延模型，此模型明确了结束迭代的条件，减少了模型的迭代次数，从而大大提高了林火蔓延模型预测精度。黄华国等人[16]提出了一个整合数字高程模型、气象因子、树种因子的三维曲面 CA 模型，此模型对各种条件下的森林火灾蔓延趋势进行模拟以及结果分析。

针对传统林火蔓延仿真模型在模拟大范围森林火灾时误差大和效率低的问题，惠珊等人[17]建立了耦合地理 CA 模拟林火蔓延过程的仿真算法。此算法引进了遥感数据和数字高程模型，并添加了时间修正系数来提升林火蔓延模拟的准确性。结果表明，此算法模拟的林火蔓延与实际林火蔓延具有较高的相似性，并指出大型林火蔓延模拟算法的时间一致性仍有很大的提升空间，精确的气象数据可进一步提高林火蔓延模拟精度。

虽然目前基于 CA 的森林火灾蔓延模拟的研究中，已经考虑到森林中树木、石头、河流以及人类砍伐等非常接近火灾发生的真实情况，但还有许多未考虑到的影响因素，比如树木种类的不同、动物种群分布的不同以及动物的迁移行为。借鉴其他影响因素的在 CA 模型里的定义方式，可以考虑在 CA 模型中定义动物的存在，并增加演化规则来实现动物的迁移行为。

3.2. 基于 Agent 的仿真模拟

基于 Agent 的模型在一定程度上是从 CA 发展而来的。一般来说，基于 Agent 的模型和 CA 的主要区

别之一是实体是否移动, 或者是否因为一系列的实体而改变了状态。基于 Agent 的模型将世界上的对象表示为离散实体, “Agent”, 他们知道自己的位置, 并积极移动, 且随身携带自身的属性。所以基于 Agent 的模型作为一种运动模型, 在地理科学和其他领域具有相对广泛的应用[18]。基于 Agent 的模型由三类模型元素抽象表示出来的: Agent、Projection、Context。Agent 是模型中最小的单位, 代表了构成复杂系统的许多微观个体, 可以定义出不同的特征, 比如交互性、适应性等。Context 是 Agent 存在和活动的场所, 通过定义 Agent 的属性来表达自己的状态, 这些状态的维持和变化受 Context 中所包含的大量 Agent 之间的相互作用的影响。Projection 表示 Agent 之间的相互作用, 并且与 Agent 相互独立, 典型的 Projection 包括网络、地理图形等。

针对基于 Agent 的森林火灾蔓延仿真模型的优化, 丰富模型中 Agent 的定义为主要的研究方向。张广骏等人[19]所构建的基于 Agent 的森林火灾系统中, 设置了三类 Agent, 分别为树木、林火和消防员。该模型实现了森林火灾蔓延和协作消防扑救这两种模式, 很好地体现出了森林火灾系统的演变规律并分析了加入消防扑救模式对森林火灾蔓延模式的影响。

由于模型中的 Agent 为离散实体, 并能积极移动, 因此, 为模拟受森林火灾影响的动物迁移行为, 可以考虑在基于 Agent 的森林火灾系统中添加动物类 Agent 及其相关属性和交互作用。

3.3. 基于传染病 SIR 模型的仿真模拟

SIR 模型是传染病研究模型中最经典的一种, 其中 S 表示易感者, I 表示感染者, R 表示移出者。利用 SIR 模型, 可以研究某些传染病的传播和扩散机制, 建立数学模型来模拟传染病的传播。森林火灾的发生和蔓延与传染病的传播类似, 因此也可以用 SIR 模型来分析。

尹楠[20]基于传染病的 SIR 模型, 并结合森林火灾的发生特点, 建立了森林火灾 SIR 模型。该模型忽略了树种的生长、死亡、迁移等种群动力因素, 设置总树种数不变, 将树种群分为三类: 易触火者(未燃烧) S、触火者(燃烧中) I、移除者(熄灭) R, 并利用离散化对森林 SIR 模型进行了改善。结论表明, 当触火率增加或者熄灭率减小时, 森林发生大型火灾的概率将会增加, 且该森林火灾模型能够很好的模拟火灾发生的演变状态。

4. 结论

森林火灾的蔓延过程是极其复杂的过程, 具有很强的不确定性。周围环境和自然条件对森林火灾的发生、发展和结束有着重要的影响。从已有的森林火灾蔓延模拟研究可以看出, 研究有助于人们了解和预测森林火灾蔓延趋势。基于 CA、基于 Agent 和基于传染病 SIR 模型的森林火灾蔓延模拟的研究越来越多地将气象条件、地形条件和可燃物等要素纳入模型中, 但仍然有一定局限性。随着与森林火灾相关的技术发展, 如 GIS 技术、全球定位系统等, 未来的森林火灾蔓延将更注重真实环境下多维虚拟森林的构建等方面。

由于森林火灾对森林中的生物的栖息地造成的严重影响势必会引起生物的迁移, 但目前对森林火灾的蔓延模拟的研究中并没有考虑到受火灾影响的森林生物的迁移行为。生物地理学优化算法和生存迁移算法中均对自然界生物的迁移过程进行了模拟, 可考虑将这些算法中的迁移原理应用于受森林火灾影响的生物迁移的仿真模拟中, 建立更符合现实世界复杂性规律的森林火灾蔓延模型。

基金项目

本研究由贵州省科学技术厅重大科技计划项目(黔科合重大专项字[2018] 3002)以及贵州大学培育项目(贵大培育[2020] 41)资助。

参考文献

- [1] 徐炳川. 生物迁移思想的起源与发展[J]. 地质力学学报, 1995, 1(3): 89-95.
- [2] Simon, D. (2008) Biogeography-Based Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **12**, 702-713. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2008.919004>
- [3] 马海平, 李雪, 林升东. 生物地理学优化算法的迁移率模型分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(S1): 16-21.
- [4] Ma, H.P. (2010) An Analysis of the Equilibrium of Migration Models for Biogeography-Based Optimization. *Information Sciences*, **180**, 3444-3464. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2010.05.035>
- [5] 王雅萍, 张正军, 颜子寒, 金亚洲. 基于改进的迁移率模型的生物地理学优化算法[J]. 计算机应用, 2019, 39(9): 2511-2516.
- [6] 李昌兴, 张颖. 基于双模式迁移策略的生物地理学优化算法[J]. 西安邮电大学学报, 2019, 24(1): 73-78+84.
- [7] 李豆豆, 邵世煌, 齐金鹏. 生存迁移算法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(8): 2034-2038.
- [8] 陈崇成, 李建微, 唐丽玉, 冯晓刚. 林火蔓延的计算机模拟与可视化研究进展[J]. 林业科学, 2005, 41(5): 155-162.
- [9] Almeida, R.M. and Macau, E.E.N. (2011) Stochastic Cellular Automata Model for Wildland Fire Spread Dynamics. *Journal of Physics: Conference Series*, **285**, Article ID: 012038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/285/1/012038>
- [10] Karafyllidis, I. and Thanailakis, A. (1997) A Model for Predicting Forest Fire Spreading Using Cellular Automata. *Ecological Modelling*, **99**, 87-97. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(96\)01942-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(96)01942-4)
- [11] 王长缨, 周明全, 张思玉. 基于规则学习的林火蔓延元胞自动机模型[J]. 福建林学院学报, 2006, 26(3): 229-234.
- [12] 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.
- [13] 宋卫国, 范维澄, 汪秉宏. 整数型森林火灾模型及其自组织临界性[J]. 火灾科学, 2001, 10(1): 53-56.
- [14] 朱辉, 吴韬, 王戴木. 多态概率元胞自动机森林火灾模型及应用[J]. 阜阳师范学院学报(自然科学版), 2010, 27(1): 23-26.
- [15] 周国雄, 吴淇, 陈爱斌. 林火蔓延模拟元胞自动机算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 288-294.
- [16] 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.
- [17] 惠珊, 芮小平, 李尧. 一种耦合元胞自动机的改进林火蔓延仿真算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(10): 1326-1332.
- [18] Groesser, S. (2022) Agent Based Modelling: Introduction. University of St. Gallen, St. Gallen.
- [19] 张广骏, 李耀东. 基于 Agent 的森林火灾系统建模仿真[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(20): 4451-4454.
- [20] 尹楠. 森林火灾 SIR 模型及仿真模拟[J]. 统计与决策, 2016(19): 76-77.