

6-20-2023

Agent-based Ecosystem Simulation Research under Forest Fire

Ying Li
1969370410@qq.com

Nisuo Du
nsdu@gzu.edu.cn

Zhi Ouyang

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Agent-based Ecosystem Simulation Research under Forest Fire

Abstract

An Agent-based multi-species simulation model under forest fire is proposed to study the effect of forest fire on the balance of animal species population. By abstracting elements of each type of species and fire in the forest fire process as agents, the attributes and behavior rules of each type of agents according to the real characteristics of each type of species and forest fire are refined. ABM model is used to show the characteristics of multi-agent interaction in complex systems, and construct a multi-species forest ecological model and a forest fire model. On the basis of validating the rationality of the models, two models are integrated, and the changes of species and the effects before and after the occurrence of forest fires are analyzed. The results show that the species with high reproductive capacity and high mortality rates are still able to reproduce offspring rapidly under the harsh environmental conditions after the fire suppression. The higher the intensity of fire disturbance, the faster the species category grow. In conversely, the species with high competitive ability but low reproductive capacity are difficult to recover from the disaster.

Keywords

Agent-based model, ecosystem, forest fire, multi-species, species changes

Recommended Citation

Li Ying, Du Nisuo, Ouyang Zhi. Agent-based Ecosystem Simulation Research under Forest Fire[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1362-1371.

基于 Agent-based 的森林火灾下生态系统仿真研究

李颖¹, 杜逆索^{1,2*}, 欧阳智²

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

摘要: 为研究森林火灾对动物物种数量平衡的影响, 提出一种基于 Agent-based 的森林火灾下多物种仿真模型。通过将森林火灾过程中各类型物种和火灾等元素抽象为主体, 根据各类物种和森林火灾的真实特性, 提炼出各类主体的属性和行为规则; 利用 ABM (agent-based model) 模型可以展现复杂系统中多主体交互的特性, 构建出多物种的森林生态模型和森林火灾模型, 在对模型合理性进行验证的基础上整合 2 个模型; 分析森林火灾发生前后的物种变化情况及影响。结果表明: 当火灾扑灭后的恶劣环境条件下, 生殖能力强且死亡率高的物种依然能够迅速繁殖后代; 火灾干扰强度越高, 该类物种增长越快。竞争能力强但繁殖能力弱的物种却难以在灾难中得以恢复。

关键词: Agent-based 模型; 生态系统; 森林火灾; 多物种; 物种变化

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)06-1362-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0155

引用格式: 李颖, 杜逆索, 欧阳智. 基于 Agent-based 的森林火灾下生态系统仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(6): 1362-1371.

Reference format: Li Ying, Du Nisuo, Ouyang Zhi. Agent-based Ecosystem Simulation Research under Forest Fire[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1362-1371.

Agent-based Ecosystem Simulation Research under Forest Fire

Li Ying¹, Du Nisuo^{1,2*}, Ouyang Zhi²

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

2. Guizhou Big Data Academy, Guiyang 550025, China)

Abstract: An Agent-based multi-species simulation model under forest fire is proposed to study the effect of forest fire on the balance of animal species population. By abstracting elements of each type of species and fire in the forest fire process as agents, the attributes and behavior rules of each type of agents according to the real characteristics of each type of species and forest fire are refined. ABM model is used to show the characteristics of multi-agent interaction in complex systems, and construct a multi-species forest ecological model and a forest fire model. On the basis of validating the rationality of the models, two models are integrated, and the changes of species and the effects before and after the occurrence of forest fires are analyzed. The results show that the species with high reproductive capacity and high mortality rates are still able to reproduce offspring rapidly under the harsh environmental conditions after the fire suppression. The higher the intensity of fire disturbance, the faster the species category grow. In conversely, the species with high competitive ability but low reproductive capacity are difficult to recover from the disaster.

Keywords: Agent-based model; ecosystem; forest fire; multi-species; species changes

收稿日期: 2022-03-02 修回日期: 2022-04-16

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

第一作者: 李颖(1996-), 女, 硕士生, 研究方向为复杂系统的建模与仿真。E-mail: 1969370410@qq.com

通讯作者: 杜逆索(1986-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为机器学习和复杂系统的建模与仿真。E-mail: nsdu@gzu.edu.cn

0 引言

森林资源是地球上最重要的资源之一, 具有许多生态系统服务功能, 如野生动物栖息地, 因此森林生态系统是提供更多的生物多样性的基础, 其稳定性对动物的生存和繁殖起着至关重要的作用。由于人为原因、气候变暖和干燥, 发生严重火灾的天气正在增加, 同时烧毁面积和火灾严重程度也在不断增加^[1]。频频发生的森林火灾造成野生动植物严重伤亡, 使森林生态系统正常的结构、功能和生物栖息地遭到严重破坏, 改变了动物的种群分布和丰富程度。因此, 了解火灾扩散机制以及预测火灾状态对于扰动生态至关重要。

在以往研究中, 通过物理方法或统计方法对火灾蔓延模型进行构建。在国内, 王正非^[2]提出林火蔓延模型, 探究了火灾蔓延的理论, 研究表明火灾的蔓延与作为燃料的植物密集程度有密切关系。随着计算机技术的发展, 更多学者使用仿真技术来模拟火灾的动态变化。李兴东等^[3]针对运用元胞自动机的林火蔓延模型引入权重系数, 并对王正非林火蔓延模型进行改进。在国外, Mutthulakshmi 等^[4-5]使用元胞自动机模拟森林火灾蔓延。其中, 前者的研究中模拟了消防灭火策略对不同环境的效果; 后者的研究为预测林火提供了决策参考。与此同时, 为了能更好地理解森林火灾的作用过程, 有学者也将 ABM(agent-based model)用于对森林火灾的仿真模拟。例如, Prieto 等^[6]集成了物理森林火灾蔓延模型和风场模型, 并借助 GIS(geographic information system)技术实现了基于主体的森林火灾蔓延模型的动态模拟。火对植被的影响被广泛的研究, 并取得诸多研究成果, 但火对动物影响的研究还处在起步阶段。

Carolina 等^[7]通过监测巴西西南部 11 个草原火灾后蚂蚁和植物之间的相互作用, 评估了火灾后对草原生境结构和蚂蚁和植物网络结构的影响; Anjos 等^[8]通过收集 2 年内定时采样的蚂蚁群落数据, 以估计火灾对当地蚂蚁群落生存的影响;

Steel 等^[9]使用贝叶斯层次模型评估森林火灾与蝙蝠森林占有率的关系, 表明森林火灾对蝙蝠多样性存在积极的影响。虽然上述火灾对动物影响的研究为生态系统中复杂的因果关系提供了一定的见解, 但是, 由于发生火灾时难以直接观测火灾中动物的行为和获取火灾中动物的行为数据, 所以至今鲜有对动物与火灾之间的动态变化分析的研究。

为了演示动物的运动和分析动物运动过程中所受的影响, 学者通过 ABM 的方式进行探讨。例如, Chudzinska 等^[10-11]模拟大黄蜂的觅食行为来理解动物与资源之间的相互作用; Diaz 等^[12]模拟非洲象在内部状态和外部环境的驱动下的行为变化; Neil 等^[13]提出了一个基于主体的大象偷猎模型, 以分析如何结合自适应偷猎者主体以及大象的生态和行为, 从而展示反偷猎措施对减少大象偷猎的有效性; Potterf 等^[14]开发了一个基于主体的空间显示模型, 模拟风势扰动事件与昆虫种群迁移间的相互作用, 评估了风投事件的空间范围和受风投影响引起甲虫种群迁移造成森林虫害从地方性和流行性之间的转变。但是, 目前的研究集中在单一生物, 鲜有对多物种生物的交互共生进行研究。

综上所述, 针对现有研究中缺少有效演示复杂森林生态系统及其内部物种和火灾之间动态变化的方式, 以及对动物运动的研究主要集中在单一生物, 未能充分对多物种情况展开探讨的问题。本文提出一种森林火灾和多物种相融合的结构, 基于 Agent-based 建立森林火灾下多物种的仿真模型, 展现森林火灾下多物种之间相互作用, 并通过模型对不同生物种群状态和不同森林火灾下的多种生态环境进行微观分析, 探究其过程变化和影响因素及程度。

1 森林火灾下多物种模型构建

本研究提出的模型框架如图 1 所示, 该模型

由动物行为系统和森林火灾系统构成。

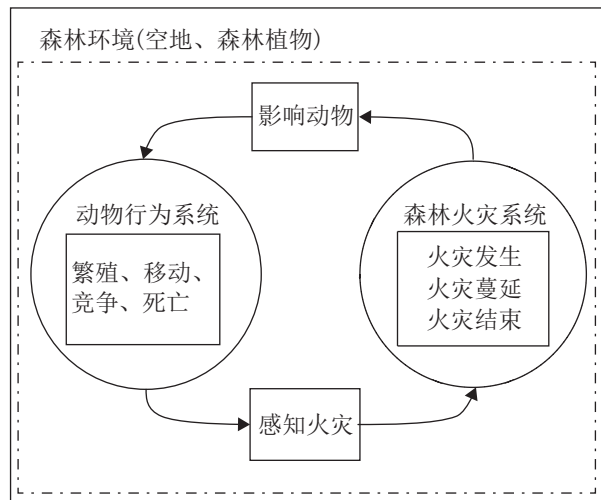


图1 模型框架
Fig. 1 Model frame

首先构建森林场景，假设环境存在边界且不联通，由于地理环境、气候等条件的影响，不同的森林生态系统存在广泛的差异性，但是本文重点关注的是火灾对物种产生的影响，因此，对森林景观进行了简化。森林场景中包含森林植物和空地2种地理要素，通过各要素比例随机生成森林环境。然后生成多个动物物种分散在森林环境场景中，动物根据动物行为规则在场景中进行出生、死亡、移动等行为，使不同生物个体之间阐述共生与竞争关系。接着在森林环境的边缘随机生成火灾起火点，火灾根据火灾行为规则进行蔓延和熄灭。最后动物行为系统和森林火灾系统将产生交互作用。在本模型中，由于起火点是随机发生，对景观中任意位置上的生物都有可能造成伤害，因此在火灾的蔓延过程中，如果动物没有及时地从火灾区域撤离，那么动物将遭受死亡威胁。由于火灾燃烧区域的食物资源匮乏，动物将不会选择在被燃烧过的网格环境中进行日常活动。同时，动物还会感知周围的火灾威胁，不会向火灾发生或者蔓延的方向移动，会向感知到威胁的相反方向移动，从而逃避威胁避免火灾的伤害。

1.1 Agent结构设计

模型Agent包括森林环境、物种和森林火灾3种类型。

1.1.1 森林环境Agent

森林环境由 250×250 网格单元组成。环境Agent的属性变量设置说明如下：

(1) 景观类型 L_i ：景观包括空地和植被2种类型。在初始化时，空地和植被随机放置在模拟环境。为了使物种能有更多的生存空间以及符合森林最小覆盖率^[15]，植被将覆盖约90%的网格单元。

(2) 景观网络的当前状态 S_f ：景观网络分为2类：①空地景观网格状态为不会点燃，由于空地缺少燃料，因此不会被火灾点燃；②植被景观网格状态分为点燃和未点燃。

(3) 植被网络恢复时间 T_{veg} ：植被恢复时间参考Machida等^[16]的设置方式，本文设置为3 000时间步。

1.1.2 物种Agent

假设森林环境中存在多种物种，通过 N_{as} 表示不同物种种类， $N_{as} = 1, 2, \dots, 10$ 。初始化时，所有动物数量占据了环境中总植被网格的50%左右，位置在模拟环境内随机设置。物种Agent的属性变量设置说明如下。

(1) 初始数量占比 R_{sp} ：每个物种的数量初始化根据物种的相对比例 R_{sp} 决定：

$$R_{sp}(i) = \alpha^i \times 0.5, i \in N_{as} \quad (1)$$

式中： α 为 N_{as} 物种的比例系数，本文设置为0.5； i 为物种中的一个类别。

(2) 出生率 R_b ：由于在现实环境中存在具有不同寿命和繁殖水平的物种，本文主要使用指数函数设置物种的出生率。

$$R_b(i) = \beta^i, i \in N_{as} \quad (2)$$

式中： β 为繁殖权重，本文设置为0.4。

(3) 死亡率 R_m ：初始化时，使用调整的逻辑函数进行建模。在模拟过程中，死亡率会根据物

种数量的不同发生变化。

$$R_m = \varepsilon - \frac{1}{1 + e^{-(t-1)}} \quad (3)$$

式中: ε 为死亡系数, 本文设置为 1.5。

(4) 竞争率 R_c : 不同物种拥有不同的竞争率。如果物种相遇将通过竞争率来竞争资源。

$$R_c(i) = \frac{(\gamma \times i + 1)}{\sum_{n=1}^{10} (\gamma \times i + 1)}, i \in N_{as} \quad (4)$$

式中: γ 为竞争系数, 本文设置为 [1, 10] 之间的随机整数。

(5) 繁殖后代数量 O_n : 动物在每个时间步可以繁殖后代数量, 本文设置为 1。

1.1.3 森林火灾 Agent

在模型中火灾作为突发事件出现, 其属性变量设置说明如下。

(1) 火灾发生时间 T_{fire} : 火灾起始的时间点, 本文假设火灾在 1 000 时间步发生。

(2) 火灾出现位置 $L(x, y)$: 人为在森林边缘点燃植被的位置, 坐标位置随机生成。

(3) 当前时间火灾状态 $S_{fire}(t)$: 为了模拟植被网络的燃烧过程, 被点燃的植被网络将呈现从点燃到熄灭的状态变化。

$$\begin{cases} S_{fire}(t) = S_{fire}(t-1) + \lambda, & 5 \leq t < 9 \\ S_{fire}(t) = S_{fire}(t-1) - \lambda, & 0 < t < 5 \end{cases} \quad (5)$$

式中: λ 为状态系数, 本文设置为 0.2; $S_{fire}(t-1)$ 为上一个时间步的火灾状态。其中, 假设植被类型相同, 植被网络可以被燃烧 t 时间步, 本文设置为 9。

(4) 火灾蔓延概率 R_{fire} : 通过结合王正非山火蔓延概率模型^[2]和元胞自动机传递规则, 每一个植被网络的火灾蔓延概率取决于其周围 8 个网络的森林环境 Agent 中的植被状态 S_f 和火灾 Agent 状态 S_{fire} 决定。

(5) 火灾燃烧面积 A_{burned} : 假设人为森林火灾在燃烧植被面积 30%、50%、70% 后被人为扑灭。

1.2 Agent 行为规则的设计

1.2.1 环境 Agent 的变化规则

该模型中, 只有植被网格会随着时间发生改变。如果植被网格被燃烧, 则该植被网格的植物会在火灾熄灭后的 T_{veg} 时间步恢复, 本文设置为 3 000 时间步。

1.2.2 物种 Agent 的变化规则

动物行为包括繁殖、移动、竞争和死亡 4 种行为, 流程如图 2 所示。

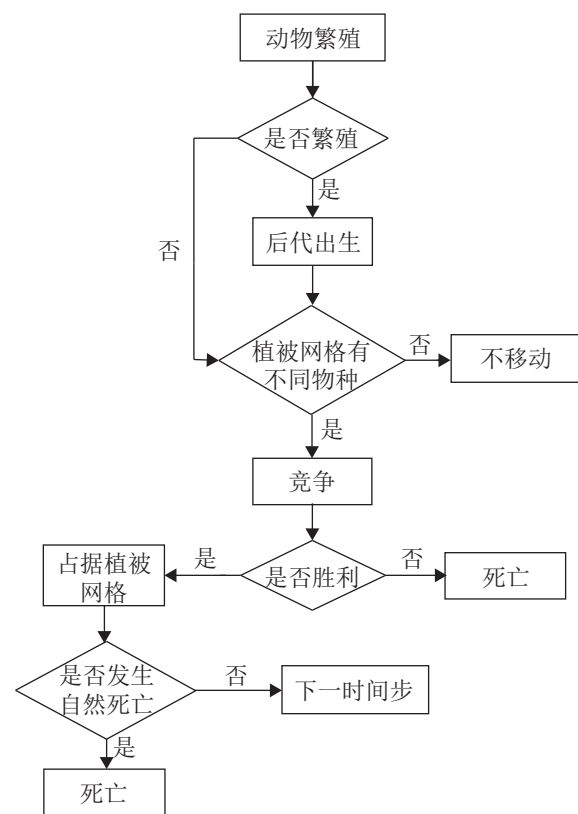


图2 动物行为流程

Fig. 2 Flowchart of animal behavior

在每个时间步, 动物的行为流程:

(1) 根据出生率 R_b 随机繁殖后代。繁殖后代会导致动物的移动速度下降^[17], 因此, 出现生殖行为的动物将保持静止, 而后代和没有繁殖后代的动物可以移动到邻近植被网格。

(2) 如果移动的新植被网格没有动物, 则动物直接占领新的植被网格。当动物移动的新植被网

格有原有动物且不是同类，那么来自不同网格的动物可能会参与领土竞争。

(3) 发生领土竞争的网格会根据不同物种的竞争率 R_c 进行领地争夺。为了简化动物的竞争过程，动物的竞争方式仅通过竞争率进行比较：

$$\max(R_c(i), R_c(j)), i, j \in N_{as}, i \neq j \quad (6)$$

(4) 为了模拟动物自身的物种数量动态平衡，当不同物种在环境中的数量达到峰值时，不同物种的死亡率 R_m 将进行调整，其中，峰值为不同物种的个体初始数量。当相应物种的个体数量持续上升时，死亡率将会上升，当个体数量逐渐下降时，死亡率将会下降，以此模拟种群周期波动。死亡率变化的公式为

$$R_m(i, t) = R_m(i, t-1) + \frac{e^{\frac{N(i, t)}{N(R_{sp}, t_0)}} - e}{1000}, i \in N_{as} \quad (7)$$

式中： $R_m(i, t-1)$ 为上一时间动物的死亡率； $N(i, t)$ 为当前时间； $N(R_{sp}, t_0)$ 为初始化时间的个体动物数量。

1.2.3 人为森林火灾 Agent 的变化规则

人为森林火灾在 T_{fire} 时发生，流程如图 3 所示。

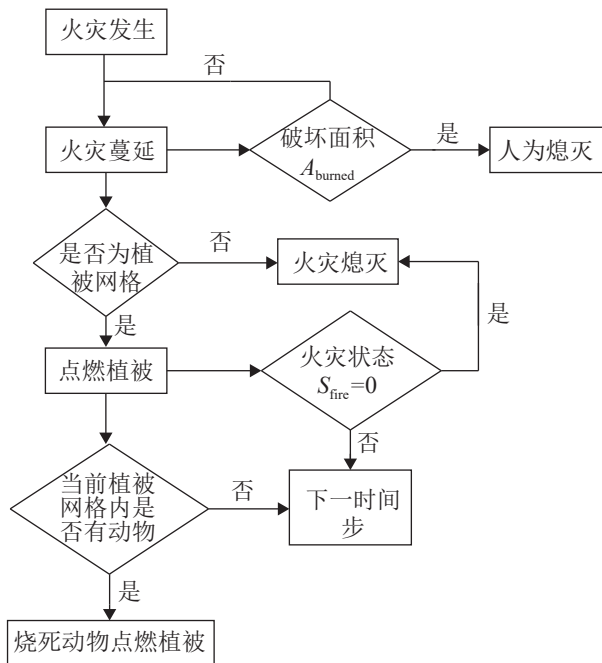


图 3 森林火灾流程
Fig. 3 Flowchart of forest fire

在每个时间步，火灾流程如下：

(1) 火灾蔓延应用摩尔场，即火将从正在燃烧的网格向 8 个方向的相邻网格蔓延，如图 4 所示。

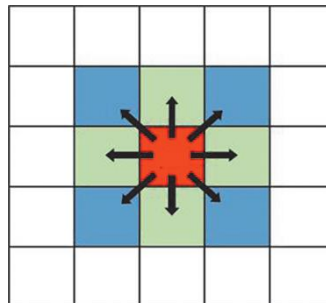


图 4 摩尔领域的火势蔓延(红色网格)
Fig. 4 Fire spread in Moore Field (red grid)

火灾点燃邻近网格的概率由 R_{fire} 控制。 R_{fire} 的概率由相邻 8 个网格单元的燃烧条件系数的总和和计算而来。各网格的燃烧条件系数 P_θ 通过网格的燃烧状态等计算得到。

$$R_{fire} = \sum_{\theta} P_{\theta} \quad (8)$$

$$P_{\theta} = K \times D \times L_l \times S_f \times S_{fire}(t) \quad (9)$$

式中： K 为燃烧权重，本文设置为 0.7； D 为不同方向的扩散系数，取值为 0.7 或 1，当 $D=0.7$ 时，代表东南、东北、西南和西北方向， $D=1$ 时，代表东、南、西和北方向； L_l 为空地 and 植被景观； S_f 为植被网格当前状态； $S_{fire}(t)$ 为当前时间火灾状态。

(2) 植被网格被点燃，则该植被网格状态为 $S_f=0$ ，同时，该植被网格动物被杀死；如果该网格为空地，则火灾熄灭。

(3) 判断植被网格破坏面积是否达到 A_{burned} ，如果达到 A_{burned} 则森林火灾被人为熄灭；否则，火灾将继续点燃下一个邻近的植被网格。

2 模型验证

模型的运行环境为 Windows10，模型的开发平台为 Visual Studio，开发语言为 C++。本文对 1 种无火灾情景和 3 种人为林火燃烧情景进行模拟，对每一种情景都进行 50 次不同的随机种子模拟，每个实验模拟时间为 10 000 个时间步长。部分结

果如图5所示, 图中绿色表示植被、白色表示空地、灰色表示已被燃烧森林、红色表示正在燃烧森林。

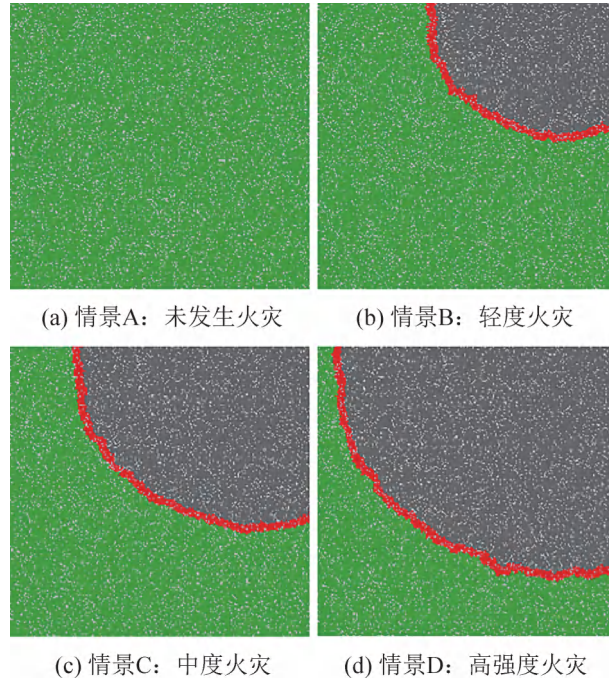


图5 4种情景的森林情况

Fig. 5 Forest situation in four scenarios

本文通过对模型结果的合理性进行模型验证。模型由动物和火灾蔓延2部分构成, 因此, 分别进行合理性验证, 以确保人为森林火灾下多物种模型的有效性。

(1) 动物部分的验证。本文从种群波动到所有动物在模拟环境中的变化进行理论验证。首先, 验证在模拟过程中物种种群波动的合理性。针对情景A进行10个随机数的模拟并对结果进行均值处理。图6~7展示了在模拟时间内10种物种个体数量的变化波动, 其中, 物种10的个体数量较少, 次数越集中。其次, 结果表明在模拟过程中10种物种的种群波动均服从稳定分布。这种波动情况曾被文献[18]在多种动物中进行了很好的证明。除此之外, 合理性验证也包括没有外在条件影响(如人类没有点燃植被)下的生物变化。图8显示了10次模拟中存在动物的数量均值(橙色线条)及标准差SD

(橙色阴影部分), 从结果可以看到在没有外在影响时存活动物数量保持稳定($SD \leq \pm 1632$)。在生态系统中, 这种现象表明自然生物与环境处于动态平衡, 达到了自然生物平衡, 即生物平衡理论^[19], 表明模型对于动物的模拟是合理的。

(2) 火灾蔓延部分的验证。本文对火灾蔓延变化进行理论验证。在相同随机数下, 模型中的环境条件是固定的。如图9所示, 对轻度火灾 $A_{burned} = 30\%$ 的模拟环境状况进行展示, 由于人为火灾是从模拟环境边缘开始, 因此, 实验中火灾蔓延造成的燃烧区域表现为不光滑的半椭圆形。这种森林燃烧形状与Green等^[20]的结论相符, 即在相同环境下火灾的蔓延形状表现为椭圆、双椭圆。

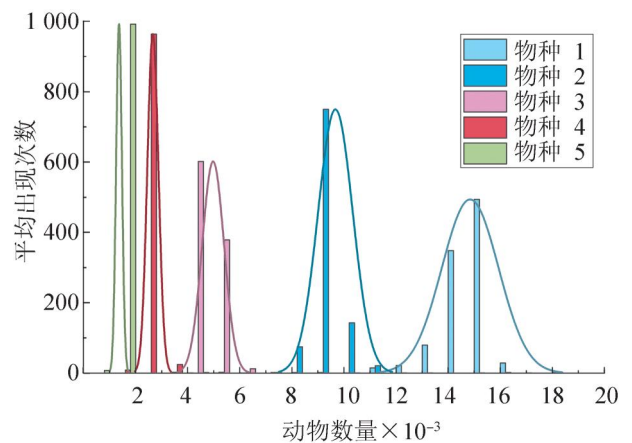


图6 物种1~5的种群波动分布

Fig. 6 Population distribution of species 1~5

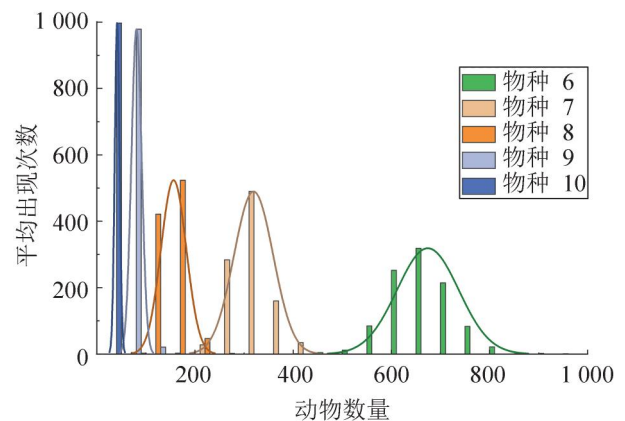


图7 物种6~10的种群波动分布

Fig. 7 Population distribution of species 6~10

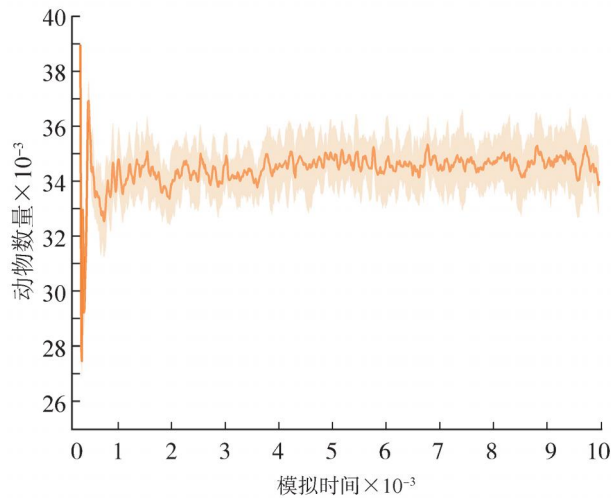


图8 模拟环境中存活动物的数量和标准差

Fig. 8 Number and standard deviation of surviving animals in simulated environment

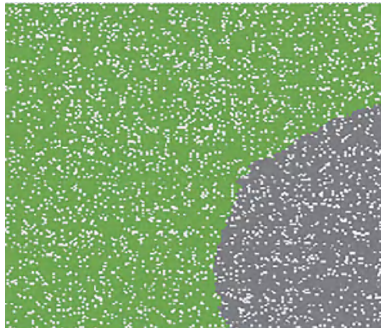


图9 情景B的火势蔓延

Fig. 9 Fire spread diagram, taking fire spread of Scenario B as an example

综上所述，由于该模型需要动物与火势的相互作用才能获得模拟实验结果，因此，本文通过对动物和火势分别进行理论验证，证明模型的合理性，使模型结果在演示火灾与动物之间的动态关系具有一定实际意义。

表1 各类动物分类及相关参数范围

Table 1 Classification of various animals and range of related parameters

动物等级	参数范围	解释
低	$R_b \in [0.16, 1]$	初始数量大,繁殖能力强,死亡率高,竞争能力低代表个体弱小
	$R_m \in [0.000\ 318, 0.000\ 513]$	
	$R_c \in [0.027, 0.14]$	
中	$R_b \in [0.000\ 26, 0.001\ 6]$	初始数量中等,繁殖能力和死亡率中等,竞争能力中等
	$R_m \in [0.000\ 258, 0.000\ 281]$	
	$R_c \in [0.19, 0.36]$	
高	$R_b \in [0.000\ 26, 0.001\ 6]$	初始种群少,繁殖能力弱,死亡率低,竞争能力强
	$R_m \in [0.000\ 256, 0.000\ 257]$	
	$R_c \in [0.41, 0.52]$	

3 仿真结果分析

由于现实世界中存在不同生活节奏和竞争能力的动物，因此，为了研究人为森林火灾对不同种类动物的影响，根据10种物种初始参数值范围进行分类，分类结果及参数范围如表1所示。第1类为低等级动物($N_{as} = 1\sim 3$)，代表生活节奏快的动物，它们寿命短，繁殖能力强且个体弱小；第2类为中等级动物($N_{as} = 4\sim 7$)，介于第1类和第3类之间，生活节奏均匀，它们的竞争能力处于中间水平；第3类动物($N_{as} = 8\sim 10$)，繁殖能力弱，寿命长，追求高质量繁殖且竞争能力强。

图10中展示了不同程度人为森林火灾破坏下低等级动物的存活数量变化，结果表明低等级动物对火的反应剧烈。具体表现：①随着火灾燃烧程度的增加，动物幸存的数量会随着火灾蔓延的持续逐渐减少，在情景B中减少约23.6%，在情景C中减少约50.1%，在没有及时发现森林火灾的情景D中动物数量则减少了约71%；②在森林逐渐恢复的过程中，低等级动物的数量没有呈现增加的趋势；③在森林恢复之后直至模拟时间结束，低等级动物的数量得到恢复，在情景B中增加约3.9%，在情景C中增加约49.75%，特别要注意的是，在火灾蔓延较大的情景D中增加了约212.5%。分析其原因，因为低等级动物不具备强大竞争力，在资源稀缺和激烈的领土竞争行为的影响下无法发挥其繁殖优势，但是在火灾对森林生态平衡造成破坏之后，这类动物可以通过其自身强大的繁殖优势快速增长个体的数量。

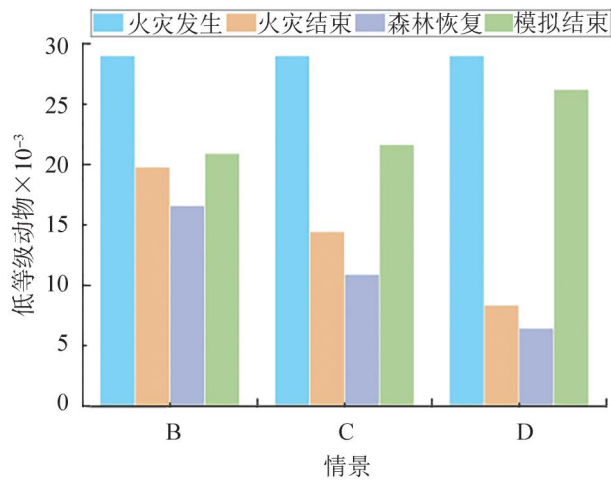


图10 3种情景中低等级动物数量变化
Fig. 10 Changes in number of low-level animals in 3 scenarios

在不同规模火灾情境下的中等级动物数量变化情况如图11所示,从火灾发生到达到稳定状态期间,轻度火灾(情景B)和中度火灾(情景C)的动物数量变化均小于9%,即使在高强度火灾发生的场景D中,大量可用资源被摧毁的情况下,直到模拟结束时中等级动物的减少也仅为火灾发生时的13.6%。结果表明:无论是轻度火灾的场景B还是高强度火灾的情景D,这类动物都对火烧程度不敏感。在森林恢复后,可以看到中等级动物数量得到有效恢复,但其个体数量并未显著增加。分析其原因,这类动物虽然具有较好的繁殖和竞争能力以及一定数量的个体,并且被高级动物和大型食物资源(低级动物)捕食的威胁较小,但是受初始数量的限制,当它们在景观中的个体数量超过初始数量时,其死亡率会增加,从而使这类物种的整体数量没有显著增长。

图12展示了高等级动物数量的变化情况,从图中可以看到这类动物无法从火灾伤害中迅速恢复数量,并且火灾强度的增大会导致其数量减少的情况增大,例如,情景B中减少了27.1%,情景C中减少了44.6%,情景D中减少的比例高达61.4%。虽然在火灾结束和模拟结束之间高级动物的数量有相应的增加,但是它们却无法维持原有

的水平。分析产生这一结果的原因是,这类动物虽然在野外比其他类别的动物具有更高的生存优势(即拥有较高的竞争能力),但是在火灾前这类动物的初始基数较小,当人类无法有效控制造成大面积森林破坏的火灾时,将造成这类动物数量减少,在其繁殖后代困难的影响下(繁殖能力低下),火灾发生会对这类物种的数量造成破坏性打击。

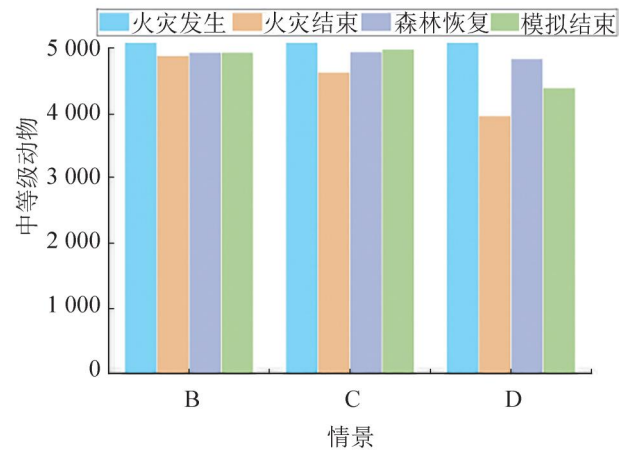


图11 3种情景中中等级动物数量变化
Fig. 11 Changes in number of middle-level animals in 3 scenarios

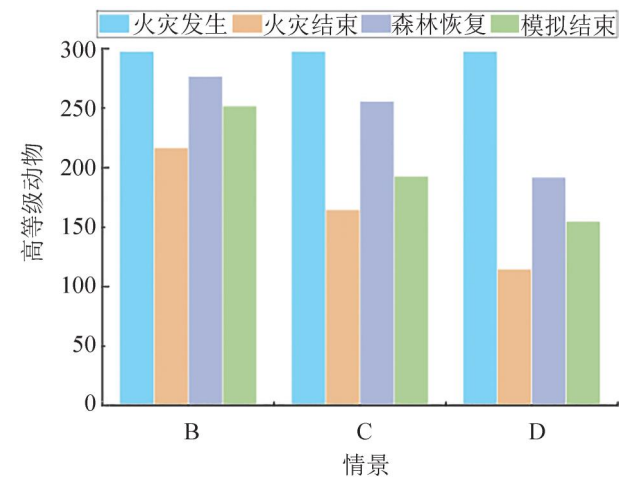


图12 3种情景中高等级动物数量变化
Fig. 12 Changes in number of high-level animals in 3 scenarios

从本文仿真模拟结果可以看出,森林火灾不会同时使所有类型的动物数量都大幅减少,这一结论与 Grover^[21]研究表明的自然界中没有一种特

定环境会同时对所有动物产生不利影响的结论基本一致。同时，本文结果中表明的低等级动物数量变化趋势，与 Anjos 等^[8]通过实证分析火对蚂蚁影响的研究中得到的结论相符，即大面积火灾发生的环境下，数量众多且竞争能力弱的动物在火灾过程中数量会大幅减少。但是，在森林恢复期间，它们的数量恢复速度也最快。

4 结论

针对目前鲜有对多物种交互行为及其与森林火灾的动态变化的相关研究，本文提出了一个基于 Agent-based 的森林火灾下多物种仿真模型，并对模型进行合理性验证。把多种动物行为和森林火灾结合在一起，初步探讨森林火灾过程对物种的影响，以及物种在恶劣环境下的恢复能力。结果表明繁殖能力强的物种更能在不利的外界条件下生存，并且这类物种在火灾干扰强度越高时，物种增长越快。与之相反，竞争能力强但繁殖能力弱的物种却难以在灾难中得以恢复。

在未来的研究中，该模型将得到进一步发展，旨在将其应用于现实世界的情况并尽可能地再现现实场景，可以减少时间和资源的投资，进一步支持管理人员进行生态系统保护。

参考文献:

- [1] Cattau M E, Wessman C, Mahood A, et al. Anthropogenic and Lightning-started Fires Are Becoming Larger and More Frequent Over a Longer Season Length in the U. S. A. [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(4): 668-681.
- [2] 王正非. 山火初始蔓延速度测算法[J]. *山地研究*, 1983, 1(2): 42-51.
Wang Zhengfei. The Measurement Method of the Wildfire Initial Spread Rate[J]. *Mountain Research*, 1983, 1(2): 42-51.
- [3] 李兴东, 李鑫, 李晓锟, 等. 一种基于元胞自动机的林火蔓延模型[J]. *林业机械与木工设备*, 2019, 47(6): 48-55.
Li Xingdong, Li Xin, Li Xiaokun, et al. A Forest Fire Spread Model Based on Cellular Automata[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2019, 47(6): 48-55.
- [4] Mutthulakshmi K, Wee M R E, Wong Y C K, et al. Simulating Forest Fire Spread and Fire-fighting Using Cellular Automata[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2020, 65: 642-650.
- [5] Rui Xiaoping, Hui Shan, Yu Xuetao, et al. Forest Fire Spread Simulation Algorithm Based on Cellular Automata[J]. *Natural Hazards*, 2018, 91(1): 309-319.
- [6] Prieto Herráez D, Asensio Sevilla M I, Ferragut Canals L, et al. A GIS-based Fire Spread Simulator Integrating a Simplified Physical Wildland Fire Model and a Wind Field Model[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(11): 2142-2163.
- [7] Carolina Veronese Corrêa da Silva, Camila Goldas da Silva, Wesley Dáttilo, et al. Effects of Time-since-fire on Ant-plant Interactions in Southern Brazilian Grasslands [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106094.
- [8] Anjos D, Campos R, Campos R, et al. Monitoring Effect of Fire on Ant Assemblages in Brazilian Rupestrian Grasslands: Contrasting Effects on Ground and Arboreal Fauna[J]. *Insects*, 2017, 8(3): 64.
- [9] Steel Z L, Campos B, Frick W F, et al. The Effects of Wildfire Severity and Pyrodiversity on Bat Occupancy and Diversity in Fire-Suppressed Forests[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 16300.
- [10] Chudzinska M, Dupont Y L, Nabe-Nielsen J, et al. Combining the Strengths of Agent-based Modelling and Network Statistics to Understand Animal Movement and Interactions with Resources: Example from Within-patch Foraging Decisions of Bumblebees[J]. *Ecological Modelling*, 2020, 430: 109119.
- [11] Newton A C, Boscolo D, Ferreira P A, et al. Impacts of Deforestation on Plant-pollinator Networks Assessed Using an Agent Based Model[J]. *PloS One*, 2018, 13(12): e0209406.
- [12] Diaz S G, DeAngelis D L, Gaines M S, et al. Development and Validation of a Spatially-explicit Agent-based Model for Space Utilization by African Savanna Elephants (*Loxodonta Africana*) Based on Determinants of Movement[J]. *Ecological Modelling*, 2021, 447: 109499.
- [13] Neil E, Madsen J K, Carrella E, et al. Agent-based Modelling as a Tool for Elephant Poaching Mitigation[J]. *Ecological Modelling*, 2020, 427: 109054.
- [14] Potterf M, Bone C. Simulating Bark Beetle Population Dynamics in Response to Windthrow Events[J]. *Ecological Complexity*, 2017, 32, Part A: 21-30.
- [15] Chazdon R L, Brancalion P H S, Laestadius L, et al. When is a Forest a Forest? Forest Concepts and Definitions in the Era of Forest and Landscape

- Restoration[J]. *Ambio*, 2016, 45(5): 538-550.
- [16] Machida W S, Gomes L, Moser P, et al. Long Term Post-fire Recovery of Woody Plants in Savannas of Central Brazil[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 493: 119255.
- [17] Tidière M, Gaillard J M, Berger V, et al. Comparative Analyses of Longevity and Senescence Reveal Variable Survival Benefits of Living in Zoos Across Mammals[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 36361.
- [18] Lan B L, Chandran P. Distribution of Animal Population Fluctuations[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2011, 390(7): 1289-1294.
- [19] Looman J. Biological Equilibrium in Ecosystems 1: A Theory of Biological Equilibrium[J]. *Folia Geobotanica & Phytotaxonomica*, 1976, 11(1): 1-21.
- [20] Green D G, Gill A M, Noble I R. Fire Shapes and the Adequacy of Fire-spread Models[J]. *Ecological Modelling*, 1983, 20(1): 33-45.
- [21] Grover J P. Nonequilibrium Resource Competition[M]// Grover J P. *Resource Competition*. Boston, MA: Springer US, 1997: 100-131.