

基于动态模拟的有机农业实践对农业生态系统稳定性和生物多样性的影响研究

欧阳杰¹, 陈晓莉²

¹华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门

²福建商学院财务与会计学院, 福建 福州

收稿日期: 2025年3月20日; 录用日期: 2025年4月20日; 发布日期: 2025年4月27日

摘 要

本研究构建了包含植物、害虫、蝙蝠等物种的食物链模型, 并通过微分方程模型分析了除草剂移除和物种引入对农业生态系统的影响。结果表明, 与传统农业模式相对比, 在停止使用除草剂之后, 植物数量在第30个月开始逐渐趋于稳定, 至120个月时, 植物数量已达到约500万株。与此同时, 害虫数量维持在大约5万只, 而蝙蝠数量则上升至约1200只。在自然调控机制的作用下, 整个生态系统逐步恢复了平衡。在以上研究的基础上, 进一步引入小型哺乳动物和捕食者后, 生态系统结构和动态发生显著变化, 生物多样性增加。在减少化学品使用的同时, 从而更加显著提升了生态系统的稳定性和生物多样性。最后可以得出, 减少化学品使用对生态系统具有正面影响, 为有机农业的可持续管理提供了理论支持。

关键词

农业生态系统, 微分方程模型, 有机农业, 除草剂移除, 生态平衡

Effects of Organic Farming Practices on Agricultural Ecosystem Stability and Biodiversity Based on Dynamic Simulation

Jie Ouyang¹, Xiaoli Chen²

¹College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen Fujian

²School of Accountancy, Fujian Business University, Fuzhou Fujian

Received: Mar. 20th, 2025; accepted: Apr. 20th, 2025; published: Apr. 27th, 2025

Abstract

In this study, we constructed a food chain model including plants, pests, bats and other species, and

文章引用: 欧阳杰, 陈晓莉. 基于动态模拟的有机农业实践对农业生态系统稳定性和生物多样性的影响研究[J]. 农业科学, 2025, 15(4): 505-519. DOI: 10.12677/hjas.2025.154063

analyzed the effects of herbicide removal and species introduction on agro-ecosystems by differential equation model. The results showed that compared with the traditional agricultural model, the number of plants began to gradually stabilize at the 30th month after stopping the use of herbicides, and reached about 5 million plants at the 120th month. At the same time, the pest population has remained stable at about 50,000, while the bat population has risen to about 1200. Under the action of natural regulation mechanism, the whole ecosystem has gradually restored its balance. On the basis of the above studies, the further introduction of small mammals and predators resulted in significant changes in ecosystem structure and dynamics and increased biodiversity. The use of chemicals is reduced, thereby significantly improving ecosystem stability and biodiversity. Finally, it can be concluded that reducing chemical use has a positive impact on ecosystems, providing theoretical support for sustainable management of organic agriculture.

Keywords

Agricultural Ecosystem, Differential Equation Model, Organic Agriculture, Herbicide Removal, Ecological Balance

Copyright © 2025 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

1.1. 问题背景

近年来, 全球因农业扩张导致的森林砍伐面积不断增加, 据联合国粮农组织(FAO)统计, 过去几十年间已超过 1.5 亿公顷。这一过程不仅导致土壤养分流失和生态系统稳定性下降, 还破坏了生物多样性。为应对这些问题, 有机农业作为一种可持续的农业实践逐渐受到关注, 其通过减少化学投入和恢复生态平衡来提升农业生态系统的稳定性和生物多样性。然而, 有机农业的实施效果仍需进一步研究。本研究旨在通过动态模拟, 分析有机农业实践对农业生态系统的影响, 为可持续农业管理提供理论支持。

1.2. 问题回顾和问题分析

本研究通过构建动态生态系统模型, 分析有机农业实践对生态系统稳定性和生物多样性的长期影响, 旨在填补现有研究的不足。具体而言, 研究将聚焦于以下几个方面:

(1) 生态系统建模: 构建包含植物、害虫、蝙蝠等物种的食物链模型, 刻画生产者与消费者的关系, 剖析种植、收割、轮作等农业生产环节对食物链的长期影响。

(2) 物种的重新出现: 研究农业土地周边边缘栖息地(湿地、林地、草地等)的恢复, 探讨其如何通过改善水文、植被、土壤等条件吸引本土物种回归。

(3) 除草剂的移除: 探讨农民减少或停用除草剂后, 农业生态系统中生产者、消费者的变化以及对生态系统稳定性的影响。

(4) 走向绿色农业: 分析有机农业在不使用化肥农药、采用轮作等做法下的差异, 评估其对生态系统的影响。

通过以上分析, 本研究将为有机农业的可持续管理提供理论支持, 同时为农业生态系统的研究提供新的视角。

2. 材料与方法及结果

2.1. 问题假设

- ✧ 除草剂通过减少植物生长, 影响生态系统中植物和害虫的动态, 杀虫剂则影响害虫的死亡率。
- ✧ 本研究假设了植物、害虫、蝙蝠、鸟类、杂草、小型哺乳动物和捕食者之间的生态关系, 包括捕食、竞争和合作的作用, 影响物种的生长和稳定。
- ✧ 本研究假设在生态系统中, 一些物种可能会重新出现在某些栖息地, 这些物种的回归可能对生态系统产生影响。
- ✧ 每个物种(植物、害虫、蝙蝠、鸟类等)都有一个最大承载能力(K 值), 这一假设基于生态学的种群限制原理, 假设物种种群无法无限增长。
- ✧ 假设每个捕食者对其猎物的捕食效率是恒定的, 并且食物转化率(例如, 蝙蝠对害虫的捕食效率)对不同物种之间的关系有显著影响。
- ✧ 植物和杂草在资源上的竞争假设是通过生长和资源消耗的相对速度来建模, 即假设杂草与植物之间的竞争是生物学上的不可避免的。

2.2. 模型的建立与求解

2.2.1. 生态系统转换建立与求解

(1) 区域选择

选定一个面积为 100 平方公里的区域, 位于北纬 40°至 50°之间(见图 1), 属于典型的温带气候区, 为多种作物和野生动植物提供了生存环境。这样的区域为有机农业提供了良好的自然基础, 有利于实施减少化学投入、增加生物多样性、改善土壤健康的农业实践。

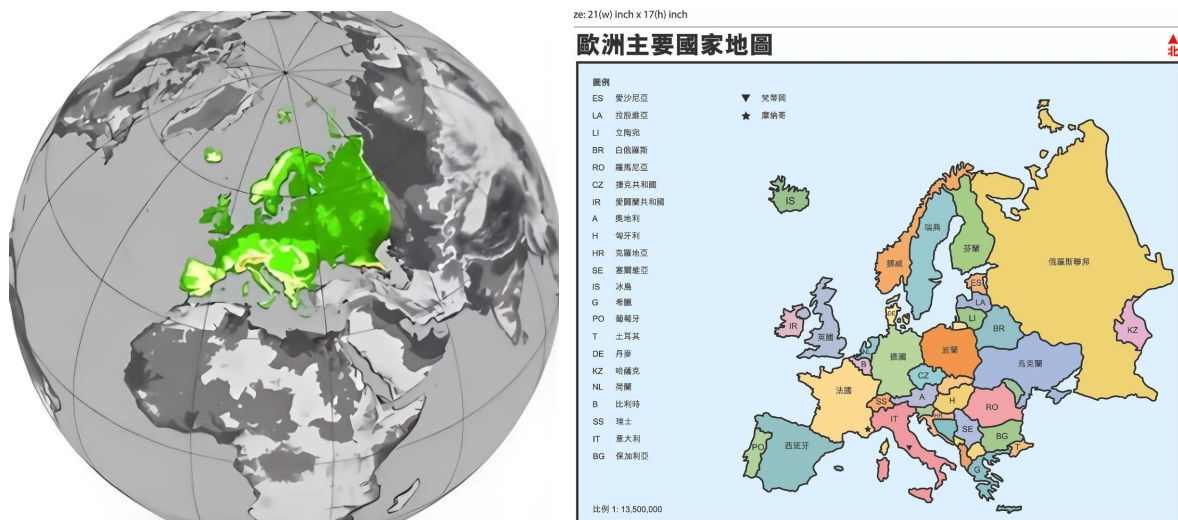


Figure 1. Geographical location of the study area
图 1. 研究区域地理位置

(2) 参数选择与非线性关系考虑

考虑到这是一个生态系统与人类活动相互影响的复杂系统, 可以从食物网和系统动力学或差分/微分方程的角度切入。为了使模型可操作, 常见做法是先对关键物种/要素进行抽象, 然后为每个关键变量建立相互作用方程。

1) 主要变量示例

$P(t)$: 农作物(或植物群落, 含野生植物)密度/数量。数据来源: 根据研究区域内的实际农作物种植情况和相关农业统计数据估算[1]。

$I(t)$: 有害昆虫(如某种主要害虫)的种群规模。数据来源: 参考国内外相关害虫种群调查研究[2], 结合研究区域内的实际害虫监测数据进行估算。

$B(t)$: 蝙蝠种群规模(以昆虫为食, 也可参与授粉)。数据来源: 参考蝙蝠生态学研究[3], 结合研究区域内蝙蝠种群的实地调查数据进行估算。

$A(t)$: 鸟类(或者其他次级消费者)种群规模。参考鸟类生态学研究[4], 结合研究区域内的鸟类监测数据进行估算。

$N(t)$: 土壤肥力(或可近似用土壤中营养元素的某种度量)。数据来源: 根据研究区域内的土壤肥力检测报告[5], 结合相关土壤肥力研究进行估算。

$C_p(t)$: 杀虫剂使用量(人类决策变量)。数据来源: 根据研究区域内实际的杀虫剂使用情况和相关农业统计数据[6]进行估算。

$C_h(t)$: 除草剂使用量(人类决策变量)。数据来源: 根据研究区域内实际的除草剂使用情况和相关农业统计数据[7]进行估算。

具体而言, 参数之间满足各种相互作用关系, 植物生长受土壤肥力、天气季节影响, 遭有害昆虫威胁, 除草剂和杀虫剂过度使用也对其健康与产量不利。蝙蝠和鸟类捕食害虫维持生态平衡, 二者存在资源竞争, 鸟类还参与种子传播。土壤肥力受分解者、有机物输入和化学耕作方式左右。

基于上述情况, 我们建立基础模型为示例性动力学方程来阐述:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = r_p P \left(1 - \frac{P}{K_p} \right) - \alpha_{PI} PI - \beta_{PC} PC_h - \mu_p \cdot f_{\text{herbicide}}(C_h) - \rho_{PD} PD \\ \frac{dI}{dt} = r_i I \left(1 - \frac{I}{K_i} \right) + \beta_{IP} IP - \gamma_{IB} IB - \gamma_{IA} IA - \mu_i \cdot f_{\text{pesticide}}(C_p) - \delta_{ID} ID \\ \frac{dB}{dt} = r_b B \left(1 - \frac{B}{K_b} \right) + \delta_{BI} BI - \mu_b - \epsilon_{BD} BD \\ \frac{dA}{dt} = r_a A \left(1 - \frac{A}{K_a} \right) + \delta_{AI} AI - \mu_a - \epsilon_{AD} AD \\ \frac{dD}{dt} = \delta_{DP} P - \lambda_D D \end{cases} \quad (1)$$

其中,

2) 植物方程 $\frac{dP}{dt}$

- $\alpha_{PI} P \cdot I$: 害虫对作物的摄食损失;
- r_p : 植物的固有增长率, K_p : 环境对植物的最大承载量(可由土壤肥力等因素决定);
- $\mu_p \cdot f_{\text{herbicide}}(C_h)$: 除草剂带来的对植物(或植物群落多样性)的负面影响, 可用函数来刻画;
- $\beta_{PC} PC_h$: 表示除草剂对植物的竞争性抑制作用;
- $\rho_{PD} PD$: 表示植物与其他草本植物或杂草的竞争。

3) 害虫方程 $\frac{dI}{dt}$

- r_i, K_i : 害虫的固有增长率和最大承载量;
- $\beta_{IP} I \cdot P$: 害虫获取食物(植物)带来的繁殖促进效应;
- $\gamma_{IB} I \cdot B, \gamma_{IA} I \cdot A$: 分别是蝙蝠和鸟类对害虫的捕食;
- $\mu_i \cdot f_{\text{pesticide}}(C_p)$: 杀虫剂对害虫和非目标昆虫的杀伤效应;
- $\delta_{ID} ID$: 表示害虫与杂草之间的竞争。

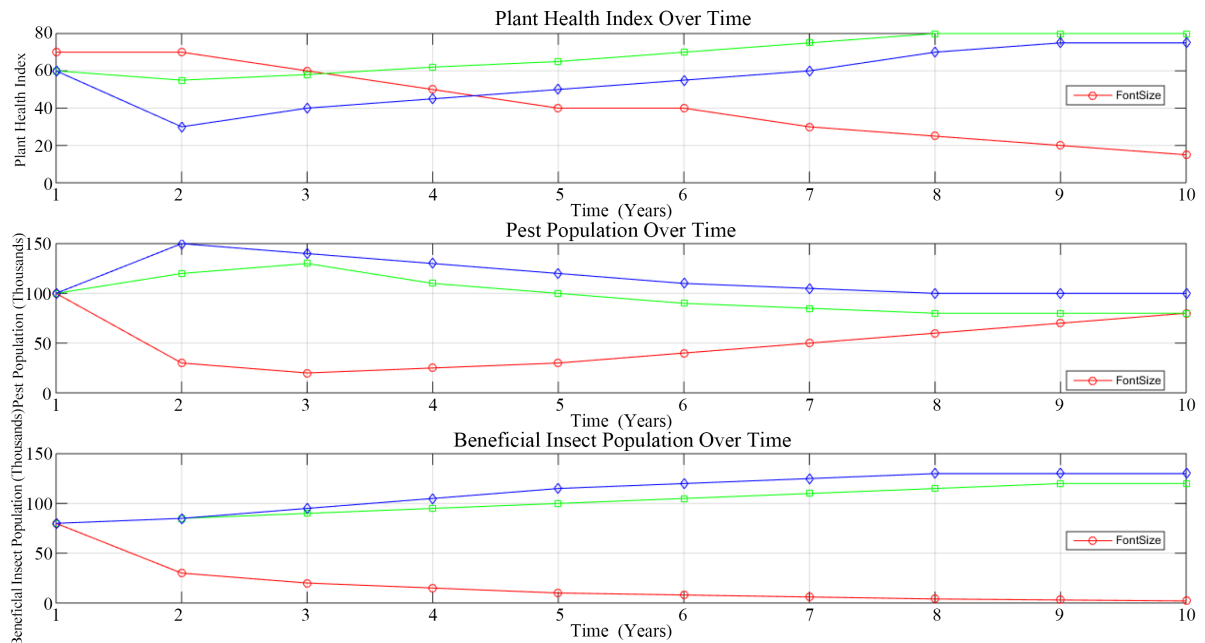
4) 蝙蝠、鸟类方程 $\frac{dB}{dt}$

- r_b, K_b : 蝙蝠的固有增长和环境容量;
- $\delta_{BI} B \cdot I$: 蝙蝠通过捕食害虫获得食物, 从而增加种群;
- μ_b : 可能的自然死亡率或其他损耗。

可设计情景:

- 1) Scenario A: 维持原有高强度化学投入;
- 2) Scenario B: 减少化学品使用, 观察若干年后系统中的演化;
- 3) Scenario C: 完全停止除草剂/杀虫剂使用, 考察生态平衡及作物产量波动。

具体结果如下所示(见图 2):



坐标轴设定: 横轴: 代表时间, 以年为单位, 假设研究时间跨度为 10 年。纵轴: 植物健康指数, 取值范围为 0~100, 数值越高表示植物健康状况越好。

Figure 2. Changes in plant health index over time

图 2. 植物健康指数随时间的变化

考虑到生态系统中物种之间的相互作用存在非线性关系, 如密度制约、功能反应等, 以及环境随机性因素对生态系统的影响, 我们对模型进行了完善。

考虑物种之间的非线性关系

生态系统中物种之间的相互作用并非简单的线性关系, 而是存在复杂的非线性关系。这些非线性关系对生态系统的动态变化具有重要影响。

(1) 密度制约

密度制约是指随着种群密度的增加, 资源的有限性会导致种群增长速度减缓。这种现象在生态系统中非常普遍。在模型中引入密度制约函数可以更准确地描述物种的生长和繁殖过程。

以植物种群为例, 其增长方程可以表示为:

$$dP = r_p P \left(1 - \frac{P}{k_p}\right) - \frac{a_{pi}PI}{1 + h_{pi}P} - \frac{a_{pd}PD}{1 + h_{pd}P} - \frac{a_{pm}PM}{1 + h_{pm}P} \quad (2)$$

其中:

r_p 是植物的固有增长率;

k_p 是植物的最大承载能力, 反映了密度制约的影响;

a_{pi} 、 a_{pd} 、 a_{pm} 分别是害虫、杂草、小型哺乳动物对植物的捕食系数;

h_{pi} 、 h_{pd} 、 h_{pm} 是相应的半饱和常数, 反映了捕食者与植物之间的相互作用强度。

(2) 功能反应

捕食者与猎物之间的捕食关系也存在非线性关系, 即功能反应。常见的功能反应类型有 Holling I 型、Holling II 型和 Holling III 型。根据捕食者和猎物的实际情况从而选择合适的功能反应类型来描述它们之间的捕食关系。

以蝙蝠捕食害虫为例, 其功能反应可以表示为 Holling II 型:

$$\frac{dB}{dt} = r_b \left(1 - \frac{B}{k_b}\right) + \frac{B I c_{bi}}{1 + h_{bi}I} - d_b B \quad (3)$$

其中: r_b 是蝙蝠的固有增长率; k_b 是蝙蝠的最大承载能力; c_{bi} 是蝙蝠捕食害虫的转化系数; h_{bi} 是半饱和常数, 反映了蝙蝠与害虫之间的相互作用强度; d_b 是蝙蝠的自然死亡率。

加入环境随机因素

引入随机微分方程来描述生态系统的行为从而提高模型的现实性和预测能力。例如, 植物种群的随机微分方程可以表示为:

$$dP = \left[r_p P \left(1 - \frac{P}{k_p} - \text{其他项}\right) \right] dt + \delta_p P dW_t \quad (4)$$

其中, δ_p 是随机波动系数, dW_t 是标准维纳过程, 表示随机扰动。

模型的简化与求解

基于上述改进, 模型的核心方程可以简化为:

1) 植物种群:

$$dP = \left[r_p P \left(1 - \frac{P}{K_p} - \text{捕食项}\right) \right] dt + \delta_p P dW_t$$

2) 害虫种群:

$$dI = \left[r_i I \left(1 - \frac{I}{K_i} + \text{食物项} - \text{捕食项}\right) \right] dt + \delta_i I dW_t \quad (5)$$

3) 蝙蝠种群:

$$dB = \left[r_b B \left(1 - \frac{B}{K_b} + \text{食物项} - d_b B\right) \right] dt + \delta_b B dW_t$$

通过数值模拟, 可以得到生态系统中各物种的动态变化情况。以下是部分结果的示意图(见图 3):

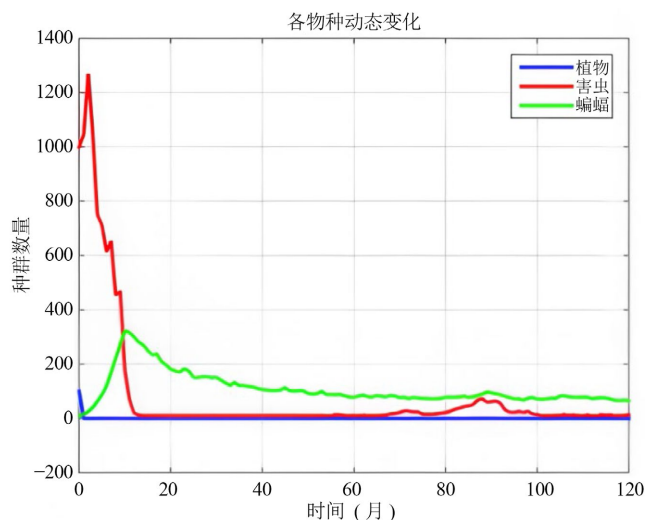


Figure 3. Dynamic changes in species populations
图 3. 各物种动态变化

从图中可以看出, 改进后的模型能够更好地反映生态系统中物种之间的复杂相互作用和环境随机性对生态系统的影响。

2.2.2. 不同物种对生态系统转换的影响

模型引入小型哺乳动物和捕食害虫的捕食者, 改变了农业生态系统的结构和动态[5]。

生态系统组成: 包括植物(P)、害虫(I)、蝙蝠(B)、小型哺乳动物(M)和捕食者(C)。

微分方程模型:

植物(P)的数量变化:

$$\frac{dP}{dt} = r_p \cdot P \cdot \left(1 - \frac{P}{K_p}\right) - \alpha_{PI} \cdot P \cdot I - \alpha_{PM} \cdot P \cdot M - \rho_{PD} \cdot P \cdot D \quad (6)$$

害虫(I)的数量变化:

$$\frac{dI}{dt} = r_i \cdot I \cdot \left(1 - \frac{I}{K_i}\right) + \beta_{IP} \cdot I \cdot P - \gamma_{IB} \cdot I \cdot B - \gamma_{IA} \cdot I \cdot A - \beta_{IM} \cdot I \cdot M - \alpha_{IC} \cdot I \cdot C \quad (7)$$

蝙蝠(B)的数量变化:

$$\frac{dB}{dt} = r_b \cdot B \cdot \left(1 - \frac{B}{K_b}\right) + \delta_{BI} \cdot B \cdot I - \mu_b \cdot B \quad (8)$$

鸟类(A)的数量变化:

$$\frac{dA}{dt} = r_a \cdot A \cdot \left(1 - \frac{A}{K_a}\right) + \delta_{AI} \cdot A \cdot I - \mu_a \cdot A \quad (9)$$

杂草(D)的数量变化:

$$\frac{dD}{dt} = \lambda_D \cdot D - \rho_{PD} \cdot D \cdot P \quad (10)$$

小型哺乳动物(M)的数量变化:

$$\frac{dM}{dt} = r_m \cdot M \cdot \left(1 - \frac{M}{K_m}\right) - \alpha_{PM} \cdot M \cdot P + \beta_{IM} \cdot M \cdot I \quad (11)$$

捕食者(C)的数量变化:

$$\frac{dC}{dt} = r_c \cdot C \cdot \left(1 - \frac{C}{K_c}\right) + \alpha_{IC} \cdot C \cdot I \quad (12)$$

预期结果:

植物数量: 可能会因为小型哺乳动物的捕食而减少, 但害虫数量的减少可能有助于植物数量的恢复。

害虫数量: 由于蝙蝠、小型哺乳动物和捕食者的捕食, 可能会显著减少。

蝙蝠数量: 可能会因为害虫数量的减少而减少, 但小型哺乳动物的存在可能提供额外的食物来源。

小型哺乳动物数量: 可能会因为食物来源的增加(植物和害虫)而增加。

捕食者数量: 可能会因为害虫数量的增加而增加, 最终趋于稳定。

(1) 植物种群(P)相关参数:

- r_p (植物日增长率):

$$r_p = \frac{0.1}{365} = 0.00027397$$

该值表示植物在理想条件下的年增长率为 10%, 转化为日增长率即为约 0.000274。

- K_p (植物最大承载能力):

$$K_p = 3000000$$

表示植物种群的最大承载能力为 300 万。

(2) 害虫种群(I)相关参数:

- r_i (害虫日增长率):

$$r_i = \frac{0.15}{365} = 0.00041096$$

该值表示害虫的年增长率为 15%, 转化为日增长率即为约 0.000411。

- K_i (害虫最大承载能力):

$$K_i = 30000$$

该值表示害虫的最大承载能力为 30,000 个个体。

(3) 蝙蝠(B)和鸟类(A)相关参数:

- r_b (蝙蝠日增长率):

$$r_b = \frac{0.05}{365} = 0.00013699$$

蝙蝠的年增长率为 5%, 转化为日增长率即为约 0.000137。

- r_a (鸟类日增长率):

$$r_a = \frac{0.07}{365} = 0.00019178$$

鸟类的年增长率为 7%, 转化为日增长率即为约 0.000192。

- K_b (蝙蝠最大承载能力):

$$K_b = 1000$$

蝙蝠种群的最大承载能力为 1000 个个体。

- K_a (鸟类最大承载能力):

$$K_a = 1000$$

鸟类种群的最大承载能力为 1000 个个体。

(4) 杂草(D)相关参数:

- λ_D (杂草自然死亡率):

$$\lambda_D = \frac{0.05}{365} = 0.00013699$$

该值表示杂草的年死亡率为 5%，转化为日死亡率。

- δ_{DP} (植物与杂草的竞争系数):

$$\delta_{DP} = 0.01$$

该值表示植物与杂草之间的竞争系数为 1%。

(5) 新物种 1: 小型哺乳动物(M)相关参数:

- r_m (小型哺乳动物日增长率):

$$r_m = \frac{0.05}{365} = 0.00013699$$

该值表示小型哺乳动物的年增长率为 5%，转化为日增长率即为约 0.000137。

- K_m (小型哺乳动物最大承载能力):

$$K_m = 100000$$

该值表示小型哺乳动物的最大承载能力为 100,000 个个体。

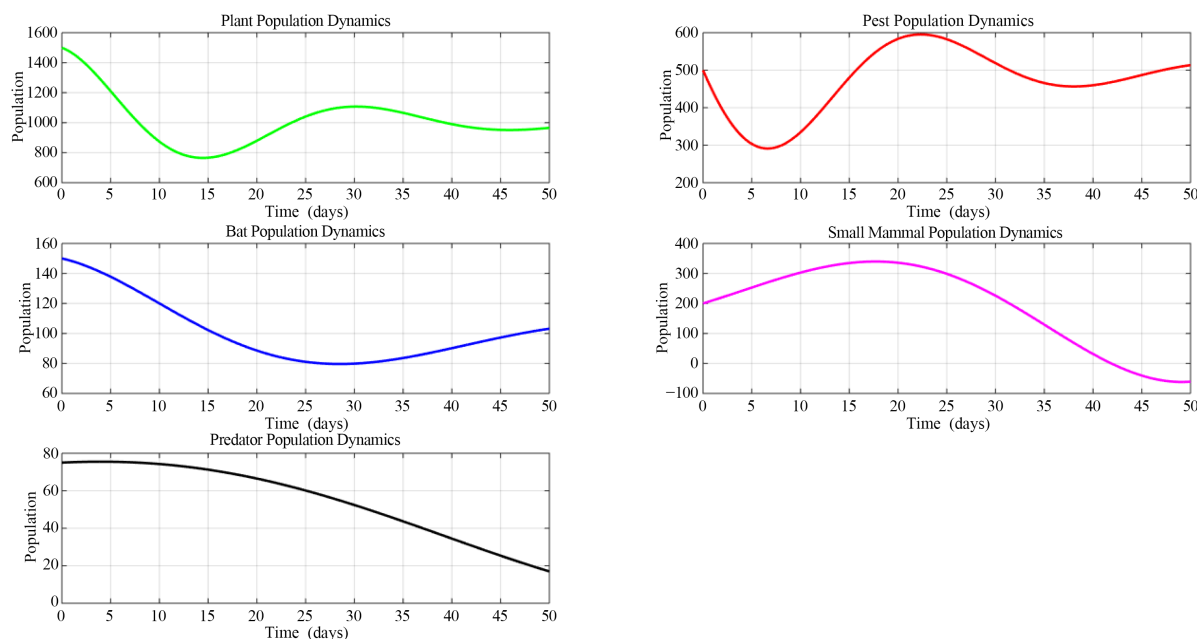


Figure 4. Changes in population sizes over time
图 4. 各种群随时间的变化情况

(6) 新物种 2: 捕食害虫的捕食者(C)相关参数:

$-r_c$ (捕食者日增长率):

$$r_c = \frac{0.03}{365} = 0.00008219$$

该值表示捕食者的年增长率为 3%, 转化为日增长率即为约 0.000082。

$-K_c$ (捕食者最大承载能力):

$$K_c = 5000$$

该值表示捕食者的最大承载能力为 5000 个个体。

最终, 模拟结果如上图所示(见 图 4)。

综上所述, 生态系统的种群动态是一个多维度、多因素交织的复杂过程, 其中农业管理措施与自然 环境因素共同塑造了种群变化的格局。

2.2.3. 不同化学投入对生态系统转换的影响

在这个问题中, 要控制变量以及控制除草剂的量, 然后前后进行对比。总的来说:

- 除草剂的移除: 对生态系统的影响, 具体体现在种群的多少。
- 生态系统的恢复: 随着除草剂的减少或移除, 生态系统会恢复平衡, 种群的数量会增加, 渐渐回 归到没有人类干涉的时候。

(1) 物种与除草剂移除的关系

在农业生态系统中, 除草剂减少杂草竞争促进植物生长。移除后, 杂草增多可能影响植物生长, 同 时害虫数量也可能因环境变化而波动。

除草剂移除对物种的影响:

减少除草剂使用可能导致杂草增多, 影响植物生长, 因为杂草会争夺资源。这间接影响害虫及其天 敌如蝙蝠和鸟类的数量, 进而影响生态系统。

种群之间的关系(见 图 5):

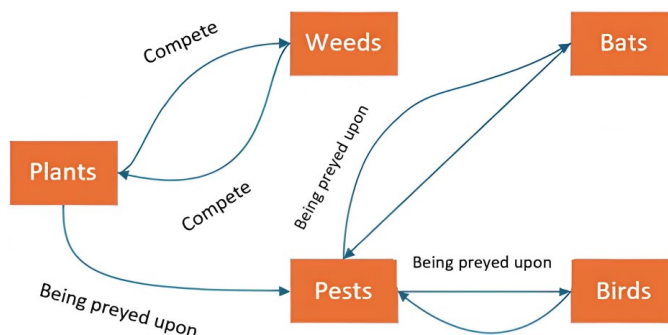


Figure 5. Relationships between populations

图 5. 种群之间的关系

植物数量变化: 植物数量遵循 Logistic 增长模型, 但除草剂减少会导致杂草数量增加, 进而抑制植物 生长。

害虫数量变化: 害虫数量受植物生长影响, 除草剂移除会改变植物与害虫的相互作用, 从而影响害 虫数量。

蝙蝠与鸟类数量变化: 蝙蝠和鸟类通过捕食害虫维持种群, 害虫数量的变化会直接影响它们的数量。

杂草数量变化：除草剂移除后，杂草数量增加，与植物争夺资源，抑制植物生长。
由此可得到下图(见图 6)：

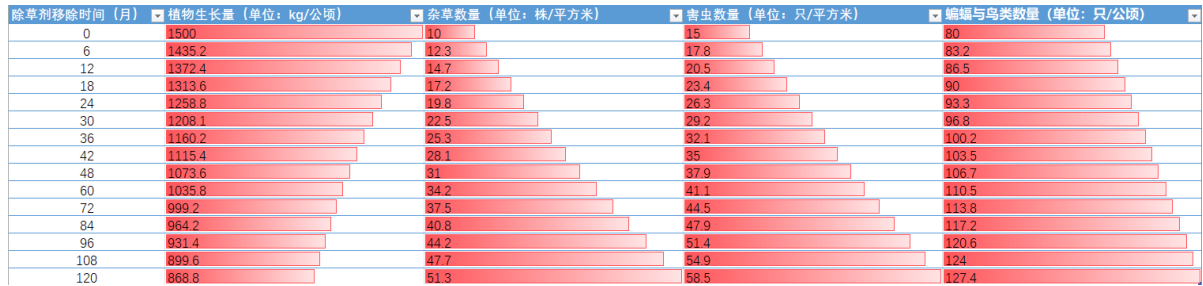


Figure 6. Relationship between species and herbicides
图 6. 物种与除草剂之间的关系

(2) 蝙蝠与物种的相互作用以及引入蜜蜂的对比

1) 蝙蝠不仅控制害虫数量，还通过捕食害虫间接促进植物生长。此外，蝙蝠还可能通过对捕食者和其他生物的影响来维持生态平衡。我们通过在模型中增加蝙蝠与害虫，植物及捕食者的互动来体现这一作用。

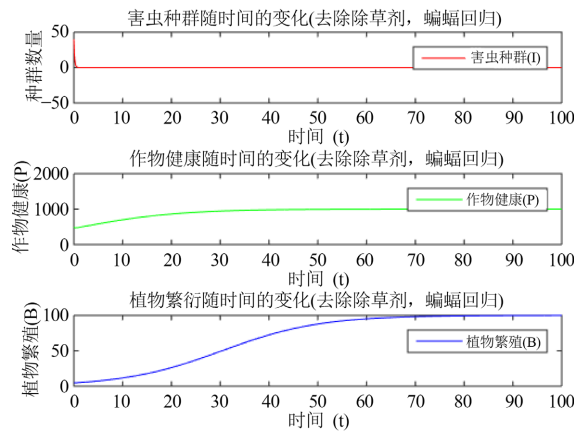


Figure 7. Changes in populations after introducing bats
图 7. 引入蝙蝠后各种群的变化

蝙蝠在模型中有两个主要功能：捕食昆虫和授粉植物。因此，我们需要修正以下方程：

昆虫(I)种群的变化：蝙蝠(Bat)作为捕食者，会减少昆虫数量。新的昆虫方程应考虑蝙蝠的影响。

植物(P)种群的变化：蝙蝠会通过授粉促进植物的繁殖，我们假设蝙蝠的存在能够增加植物的繁殖率。

我们得到的方程组如下：

昆虫种群变化方程：

$$\frac{dI}{dt} = r_I I \left(1 - \frac{I}{K_I} \right) - \beta_I PI - \gamma_{IB} - \eta_I I - \delta_{IB} IB \quad (13)$$

植物种群变化方程：

$$\frac{dP}{dt} = r_P P \left(1 - \frac{P}{K_P} \right) - \alpha_{IP} PI - \alpha_{IP} PA + \delta_P PB \quad (14)$$

蝙蝠种群变化方程：

$$\frac{dB}{dt} = r_B B \left(1 - \frac{B}{K_B} \right) - \gamma_{IB} BI \tag{15}$$

可视化结果见图 7。

2) 另一种物种的引入：

引入蜜蜂作为授粉者，促进植物繁殖，对昆虫种群影响较小。

蜜蜂(Bee)种群变化方程：

$$\frac{dB}{dt} = r_B B \left(1 - \frac{B}{K_B} \right) - \gamma_{IB} BI \tag{16}$$

其中： r_B 为蜜蜂的繁殖率， γ_{IB} 为蜜蜂对昆虫授粉的贡献。

系统稳定性分析：

分析去除除草剂和引入蝙蝠后，植物与消费者(昆虫、蝙蝠、捕食者等)之间的相互作用对生态系统稳定性的影响。通过求解微分方程，观察各物种种群的平衡点和波动，评估生态系统的稳定性。

比较不同物种(蝙蝠与蜜蜂)在恢复生态平衡方面的效果。如下表(见表 1)：

Table 1. introduces the comparison of bees and bats

表 1. 引入蜜蜂与蝙蝠的对比

Bats		Bees
Pest Control	Effectively prey on pests, reduce pest numbers	Lesser effect on pest control
Pollination	Participate in pollination, promote plant growth	Main pollinators, significantly increase pollination rates
Ecosystem Impact	Maintain ecological balance, enhance biodiversity	Enhance ecosystem stability, promote plant reproduction
Focus of Action	Control pests, indirectly promote plant growth	Mainly promote plant growth through pollination

2.2.4. 系统的可持续性和稳定性求解

在这个问题中，我们要探讨农民采用有机农业方式所产生的影响，尤其是减少除草剂和杀虫剂使用对生态系统产生的影响。我们将重点分析以下方面：

1、除草剂和杀虫剂的逐步减少：模拟逐步淘汰化学品(除草剂和杀虫剂)对农业生态系统的长期影响。

2、影响因素：

1) 害虫控制：减少化学农药的使用，转而采用天然的害虫控制手段，例如利用天敌和设置捕虫器等。

2) 作物健康：作物的生长和健康与土壤质量密切相关，而土壤质量在有机农业中主要通过有机肥料和轮作来提高。

3) 植物繁殖：作物的繁衍能力与自身的生长状况以及生态系统中的传粉者(例如蜜蜂、蝙蝠等)密切相关。

4) 长期可持续性：有机农业的一大关键优势在于其长期的可持续性，这主要通过提升土壤健康状况、降低对化学物质的依赖来实现土壤肥力的增强和生物多样性的丰富。

5) 成本效益：虽然有机农业在起步阶段成本可能偏高，但长远来看，减少化肥和农药的开支以及提升作物品质所带来的好处，能够实现经济效益的持续增长。

在问题四中，构建了一个生态系统模型来综合分析这些影响。

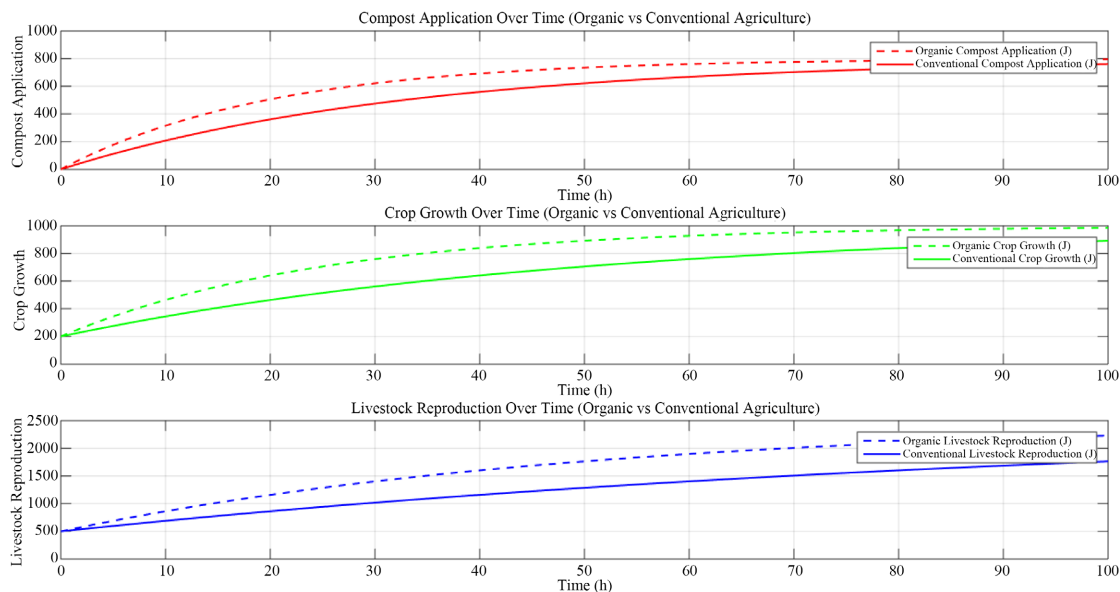


Figure 8. Dynamic changes in organic and conventional agriculture over time

图 8. 有机农业与传统农业随时间的动态变化

(1) 模型细化与动态方程

我们将使用微分方程来表示每个变量的动态变化。每个方程代表了不同物种或系统的种群或状态随时间的变化。以下是建模的具体过程。

1) 害虫种群控制

害虫的控制方法包括通过天敌(如蝙蝠)和生物农药控制害虫数量。此方程主要通过捕食率、天敌种群和植物种群的交互作用来建模。

害虫种群的变化方程为:

$$\frac{dI}{dt} = r_I I \left(1 - \frac{I}{K_I} \right) - \alpha_I P - \beta_C C \quad (17)$$

其中: r_I 为害虫的自然增长率。 K_I 为害虫的环境容量(最大数量)。 α_I 为害虫对植物的损害率。

2) 作物健康

作物健康受到土壤质量和有机肥料使用的影响。有机农业通常使用有机肥料来提高土壤质量, 从而促进作物生长。我们可以通过以下方程来表示植物的健康水平:

$$\frac{dP}{dt} = r_P P \left(1 - \frac{P}{K_P} \right) + \gamma_F F - \alpha_P I \quad (18)$$

其中: r_P 为植物的自然增长率。 K_P 为植物的环境容量。 γ_F 为有机肥料的促进系数。 F 为有机肥料使用量。 α_P 为植物受到害虫侵害的损失率。

3) 植物繁殖与生物多样性

有机农业通过多样化的作物种植(例如轮作、混作等)提高生态系统的生物多样性, 增强作物的繁殖能力。可以通过以下方程来表示植物种群和生物多样性的变化:

$$\frac{dB}{dt} = r_B B \left(1 - \frac{B}{K_B} \right) + \delta_B \sum_j P_j \quad (19)$$

其中： r_B 为植物繁殖的增长率。 B 为植物的繁殖种群。 K_B 为植物繁殖的环境容量。 δ_B 为植物种群对生物多样性的贡献。

(2) 总结

根据上面的内容可以得到可视化图(见图 8)。

该图从三个维度对比了有机农业与传统农业随时间的动态变化。这些变化为评估两种农业模式的差异提供了直观的数据参考。

3. 讨论

3.1. 研究结果的意义

研究结果表明, 应当减少化学品的使用, 这会对生态有着很大的正面影响, 并且有助于恢复生态。也可以通过引入生物对害虫进行管控, 将提高生物种群的多样性, 降低对化学物质的依赖。符合全球对环境保护和生态平衡的追求。

3.2. 与现有研究的对比

本研究的结果与国内外相关研究形成了良好的呼应。例如, Reganold 和 Wachter (2016)指出, 有机农业在减少化学投入的同时, 能够显著提升土壤健康和生物多样性, 这与本研究中生态系统恢复的发现一致。此外, 王刚和李华(2018)通过动态模拟研究发现, 农业生态系统在减少化学干预后, 能够通过自然调控机制恢复平衡。本研究进一步通过具体模型验证了这一观点, 并强调了生物控制在害虫管理中的重要性。

虽然说在初期可能面临减产问题, 根据此研究可以看出, 从长远看不管是对生态系统还是农业收入都是有很大的好处。

3.3. 未来研究方向

未来的研究可以在以下几个方面进行拓展和深化:

非线性关系研究[8]: 探索生态系统中物种相互作用的非线性关系, 建立更复杂的动态模型, 以更准确地描述生态系统的行为。

多因素综合分析: 将气候变化、土壤类型、地形等外部因素纳入模型, 分析其对生态系统动态的影响, 为农业现代化提供更全面的决策支持。

长期生态效应研究: 通过长期的实地监测和模拟研究, 进一步验证有机农业对生态系统稳定性和生物多样性的长期影响。

4. 结论

本研究通过构建动态生态系统模型, 深入分析了除草剂移除和物种引入对农业生态系统的影响。结果发现减少化学品的使用对物种多样性有着重要的正面影响。

研究还发现, 有机农业实践在减少化学品使用的同时, 能够通过生物控制和生态平衡维持作物健康。虽然在初期, 作物产量可能会因缺乏化学投入而有所下降, 但从长期来看, 生态系统的整体稳定性和生物多样性得到了显著改善。这不仅有助于保护土壤健康和水资源, 还能减少对化学农药和化肥的依赖, 降低环境污染风险。

参考文献

- [1] 王刚, 李华. 基于微分方程的农业生态系统动态模拟研究[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4312-4320.
- [2] Smith, J.M. (2001) Mathematical Models in Ecology. Cambridge University Press.

-
- [3] 陈晨, 赵宇. 有机农业对土壤生态系统功能的影响研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 537-548.
- [4] Reganold, J.P. and Wachter, J.M. (2016) Organic Agriculture in the 21st Century. *Nature Plants*, **2**, Article No. 15221. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.221>
- [5] 刘畅, 王强. 外来物种引入对农业生态系统生物多样性的影响[J]. 生物多样性, 2019, 27(8): 874-882.
- [6] Tilman, D. and Fargione, J. (2001) Biodiversity and Ecosystem Functioning: The Role of Species Traits. *Trends in Ecology & Evolution*, **16**, 15-20.
- [7] Strauss, S.Y., *et al.* (2006) Direct and Indirect Effects of Introduced Species on Native Communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **37**, 191-216.
- [8] Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020) State of the World's Forests. FAO.