 DOI: https://doi.org/10.12349/rwae.v7i2.10860

Research on a Green Pest Control Decision Support System for Agriculture Based on Ecological Simulation and Multi-objective Optimization

Yuchen Zhai Shubiao Cai Feng Hu Yihuan Yan Tianxi Cheng

School of Mathematical Sciences, Tianjin Polytechnic University, Tianjin, 300387, China

Abstract

Against the backdrop of climate change, the green transformation of agriculture, and the "dual carbon" strategy, the frequent occurrence of crop pests and excessive pesticide application have become prominent issues. This study focuses on the North China region and integrates multi-objective optimization algorithms to construct an integrated decision support system for green pest control in agriculture, which includes risk prediction, ecological simulation, and optimization decision-making. The core decision-making module adopts a multi-objective optimization approach, aiming to maximize the combined benefits of economic and ecological low-carbon performance. Under the constraints of population dynamics, economic costs, and ecological conditions, it solves for the Pareto optimal solutions of control strategies such as pesticide reduction, natural enemy release, and ecological compensation. The research indicates that biological control can increase the carbon sequestration capacity of farmland by 18% to 25%, and when pesticide application is reduced by 30%, the net income increases by more than 51%.

Keywords

Lotka-Volterra model; multi-objective optimization; random forest; low-carbon agriculture; pest control decision-making

基于生态模拟与多目标优化的农业病虫害绿色防控决策系统研究

翟育晨 蔡树彪 胡凤 闫奕欢 程天玺

天津工业大学数学科学学院，中国 · 天津 300387

摘 要

气候变化、农业绿色转型与“双碳”战略背景下，农作物虫害频发、农药过量施用问题突出。该研究立足华北地区，融合多目标优化算法，构建一个风险预测、生态模拟、优化决策一体化的农业病虫害绿色防控决策支持系统。核心决策模块采用多目标优化方法，以经济效益和生态低碳综合效益最大化为目标，在种群动态、经济成本与生态约束下，求解农药减量、天敌释放、生态补偿等防控策略的Pareto最优方案。研究表明，生物防治可提升农田碳汇18%~25%，农药减量30%时净收益提升51%以上。

关键词

Lotka-Volterra模型；多目标优化；随机森林；低碳农业；治虫决策

1 引言

1.1 研究背景

各类农业害虫一直是全球粮食生产的重大隐患，直接威胁粮食稳定供给。长期大量施用化学药剂，不仅会造成土壤质量下降、水源污染等一系列生态破坏问题，叠加气候环境持续变化的影响，害虫传播蔓延的风险也在不断升高。在此背景下，搭建并推广高效环保、低碳可持续的病虫害综合防控体系，既是守住粮食安全底线的关键举措，也是顺应双碳发展目标、推进生态绿色发展的现实刚需。

1.2 研究意义

天津地处华北农业产区，它有着艰巨的粮食生产与绿色防控任务。当前田间虫害监测主要以人工调查为主，效率比较低，难以与后续的防控环节进行对接。搭建一体化的低成本防控路径[2]，可以大大满足区域农业的生产需求，也能为农业领域落实双碳战略提供实践方向。

【基金项目】2025年天津市级大学生创新创业训练计划项目“‘虫’联网——AI识虫系统与生物防治一体化平台设计”资助（项目编号：202510058094）。

【作者简介】翟育晨（2005–），女，中国山东淄博人，在读本科生，从事农业绿色防控研究。

1.3 研究内容与方法概述

本研究构建了一个完整的农业病虫害绿色防控决策支持系统。我们基于网络公开数据，利用随机森林算法预测未来气候情景下害虫的适生区变迁，并采用了扩展的 Lotka-Volterra 三营养级模型模拟作物 - 害虫 - 天敌种群动态。研究的核心部分构建了一个多目标优化模型，它以经济效益和生态低碳效益最大化为目标，并运用 NSGA-II 算法求解，最终得到 Pareto 最优防控策略。

2 理论基础与研究方法简介

2.1 扩展的 Lotka–Volterra[3] 三营养级动力学模型

本研究将经典的两营养级模型扩展至“作物—植食性害虫—天敌”三营养级系统。扩展后的微分方程组如下：

$$\begin{cases}\dfrac{dV}{dt}=r_vV\left(1-\dfrac{V}{K}\right)-\alpha VH\\ \dfrac{dH}{dt}=\varepsilon_h\alpha VH-\beta HP-\mu_hH-\delta_hH\\ \dfrac{dP}{dt}=\varepsilon_p\beta HP-\mu_pP\end{cases}$$

V、H、P 分别代表了作物、植食性害虫、天敌的种群数量；r_v 为受季节影响的作物生长率，K 为环境承载力，α 为害虫捕食率，β 为天敌攻击率，ε 为转化效率，μ 为自然死亡率，δ_h 为农药导致的死亡率。

2.2 基于随机森林 [4] 的害虫适生区预测

随机森林算法在非线性关系、高维数据与小样本场景下均具备出色的适配与解析能力，十分适用于害虫适宜生存区域的模拟预测研究。本研究以玉米螟、蚜虫等田间常见典型害虫为研究对象，结合统计分析方法，筛选并明确制约这类害虫地理分布的气候。研究采用环境背景抽样方式构建伪缺失分布样本，选取 19 项生物气候指标作为模型输入特征；完成模型训练与参数优化后，分别接入当下与未来不同时期的气候环境数据图层，模拟测算玉米螟潜在适宜栖息地的概率分布特征，以此划定并锁定长期虫害高发的重点风险区域。

2.3 多目标优化与 Pareto 前沿分析

Pareto 最优解不仅能够不损害其他目标，还能提升单一目标的效益，所有最优解共同构成 Pareto 前沿。本研究采用了 NSGA-II [5] 算法逼近真实最优前沿。

本研究决策变量定义如下：

$$x=\left[x_1,x_2,x_3,x_4,x_5\right]^T$$

其中，决策变量 x_1 为农药单位面积施用量，x_2 为生态修复强度，x_3 为低碳技术投入，x_4 为生态保护区面积占农田总面积的比例，x_5 为土壤改良力度。

本研究所构建的双目标优化模型具体表达如下：

$$\begin{cases}\max f_1=P_y\times Y(x)-\sum_{i=1}^{5}c_ix_i-C_0-L\\ \max f_2=\omega_1B(x)+\omega_2C(x)-\omega_3P(x_1)+\lambda\left(C_1(x_4)-C_2(x_1)\right)\end{cases}$$

其中，目标函数 f_1 表征经济效益，P_y 表示作物单位产量市场价格，$Y(x)=\eta\cdot V^*(T;x)$ 为作物产量，$V^*(T;x)$ 是整合模型在决策变量 x 下模拟得到的作物生物量，η 是生物量到经济产量的转化系数，c_i 对应决策变量 x_i 的单位成本系数，C_0 表示固定生产成本，L 表示劳动力成本；目标函数 f_2 表征生态与低碳综合效益，权重系数 $\omega_1,\omega_2,\omega_3,\lambda$ 反映社会对生物多样性、碳汇、污染和碳价值的偏好，$B(x)=b_2x_2+b_4x_4+b_n\cdot P^*(T;x)$ 为生物多样性效益，$P^*(T;x)$ 是模拟得到的天敌种群终止，b_i 为效益系数，$C(x)=s_3x_3+s_4x_4$ 为固碳效益，s_i 为碳汇效益系数，$P=d_1x_1$ 为农药生态损害，d_1 为农药生态损害系数，C_1 是生态保护区的碳封存量，C_2 是农药链的碳排放量。

约束条件涵盖生态安全约束、生物多样性基线要求、预算限制和决策变量边界约束：

$$\begin{cases}\max\limits_{t\in[0,T]}P^*(t;x)\le P_t\\ B(x)\ge B_{\min}\\ \sum_{i=1}^{5}c_ix_i+C_0\le B_t\\ x_i^{\min}\le x_i\le x_i^{\max},i=1,2,...,5\end{cases}$$

其中，P_t 表示经济危害阈值；$B_{\min}$ 表示维持生态系统功能所需的最低水平；B_t 表示成本预算上限。

随机森林模型提供未来气候风险，用于设定 Lotka-Volterra 模型的初始条件，经 NSGA-II 迭代优化可得 Pareto 最优策略集，农户或推广部门可根据效益偏好灵活选择方案，实现科学决策。

3 系统设计与实现

3.1 系统总体架构

整个决策支持系统采用分层、模块化的设计理念，分为数据层、模型层、决策层和应用层。

数据层：负责从公开数据库自动地获取、清洗、格式化数据，并建立统一的属性数据库。

模型层：包含两个核心模块：第一，风险预测模块，集成随机森林模型，用于生成当前与未来的害虫适生区风险地图；第二，生态模拟模块，集成参数化的 Lotka-Volterra 模型，用于响应用户输入的本地参数，模拟特定情景下的种群动态。

决策层：它接收模型层的输出，运行 NSGA-II 多目标优化算法，生成 Pareto 最优防控策略集合。

应用层：以 Web 交互平台形式提供可视化服务。其中包括风险地图展示、动态模拟推演、优化方案对比与推荐等功能，为用户提供友好的决策交互界面。

3.2 关键模块实现

对于数据集成与处理部分，利用 Python 编写数据爬取与处理脚本。对于模型耦合与接口部分，采用 Python 科学计算栈构建随机森林和 Lotka-Volterra 模型。两个模型通过标准化数据接口与决策层通信，种群模拟的结果直接作为优化模型的约束条件输入。对于优化求解与可视化部分，使用 NSGA-II 算法。求解得到的 Pareto 前沿以二维散点图、平行坐标图等形式进行交互式可视化，允许用户点击前沿上的任意点，查看对应的详细防控方案。

4 结果与分析

4.1 害虫适生区预测结果

随机森林模型预测精度达到 0.92。预测结果显示图 1，在当前气候条件下，玉米螟在华北平原大部为高度适生区。在 2041-2060 年，其高适生区范围呈现明显的“北移东扩”趋势，在华北北部和东北南部地区适宜性显著增加，潜在风险区域面积较当前扩大约 10%~15%。

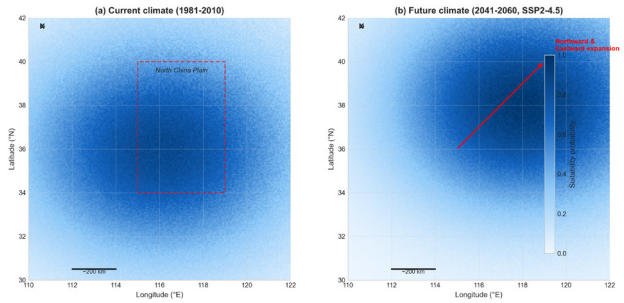


图 1 当前与未来气候下玉米螟适生区变化预测

4.2 生态模拟验证与情景分析

利用历史文献数据对 Lotka-Volterra 模型参数进行率定与验证。在不进行干预的自然状态下，害虫种群会发生周期性暴发。单纯化学防治则会导致种群剧烈反弹和天敌灭绝。而天敌释放结合生态调控策略，虽然初期压制速度较慢，但能更持久地将害虫种群控制在经济阈值以下，并维持更高的系统稳定性与生物多样性。

4.3 多目标优化决策

针对华北地区一典型玉米种植区情景运行优化模型。NSGA-II 算法收敛良好，得到了清晰的 Pareto 最优前沿（图 2），证明了经济效益与生态 - 低碳效益之间存在显著的权衡关系。

从 Pareto 前沿中选取三个代表性策略进行对比分析：经济主导型方案，倾向于使用较多化学防治，农药减量约 10%，生态效益较低，碳汇增益仅 5%；生态 - 低碳主导型方案，削减约 30% 化学农药，配置 5% 的农田面积并释放天敌，生态 - 低碳效益最优，碳汇潜力提升达 25%，净收益仍能提升 42%；平衡型方案，折中策略，农药减量 20%，生态补偿区面积 3%，在两个目标上均取得良好表现，净收益提升 45%，碳汇增益 15%。

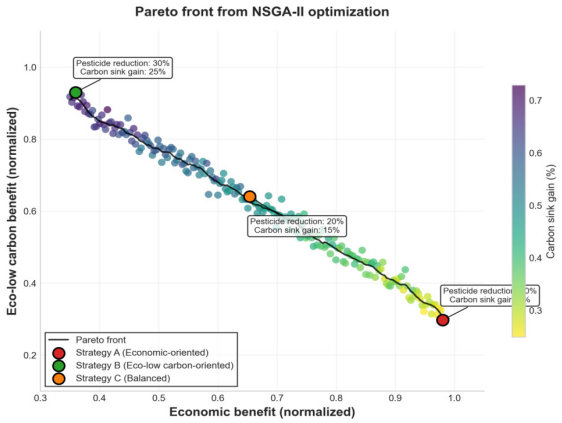


图 2 NSGA–II 多目标优化得到的 Pareto 前沿：经济效益与生态效益权衡

5 结论

5.1 多目标优化中权重与偏好的影响

生态 - 低碳综合效益是一个复合指标，其中生态服务价值、碳汇、污染等子项的权重系数设定具有主观性，反映了决策者或社会的价值偏好。本研究通过呈现完整的 Pareto 前沿而非单一最优解，将最终的价值判断权交还给用户，这是一种更为科学和民主的决策支持方式。

5.2 从田块到区域的尺度扩展

本研究构建的系统具有较好的延伸性，可以将研究区域进行网格化，对每个网格进行优化模型，再考虑空间的差异与协同效应，汇总协调，这为绿色农业规划提供了思路。

6 结果与展望

本研究设计并验证了一个农业病虫害绿色防控决策支持系统。该系统通过整合随机森林预测、Lotka-Volterra 生态模拟与 NSGA-II 多目标优化模型，能够生成 Pareto 最优防控策略。我们发现，这套技术框架能够为农药减量施用、生物防控落地实施以及农田生态保护工作，提供合理可靠的科学依据与实操参考。在此基础上，后续研究可纳入多源遥感信息与社会经济数据，进一步拓展模型的适用范围，尝试将整套分析框架推广至更多农业环境治理场景，从而持续强化系统在农业政策制定中的应用价值。

参考文献

[1] Deutsch C A, Tewksbury J J, Huey R B. Climate change increases crop pest pressure [J]. Science, 2018, 361 (6402): 605-608.

[2] 陈明，刘艳。基于物联网的农田害虫实时监测系统设计 [J]. 农业工程学报，2020, 36 (10): 167-174.

[3] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[4] 李天俊，杨信廷，李文勇。基于生成对抗网络和视觉 - 语义对齐的零样本害虫识别方法 [J]. 智慧农业, 2024, 6(2): 72-84.