arXiv:2304.14515v3 [physics.soc-ph] 9 Apr 2024

咖啡树锈病大流行的经济流行病学分析

Teddy Lazebnik[1,2,*]、Ariel Rosenfeld[3],和 Labib Shami[4]

[1]数学系，Ariel University，Ariel，以色列[2]癌症生物学系，癌症研究所，伦敦大学学院，伦敦，英国[3]信息科学系，巴伊兰大学，拉马特甘，以色列[4]经济学系，西加利利学院，阿卡，以色列[*]通讯作者：lazebnik.teddy@gmail.com

摘要

咖啡叶锈病是一种常见的植物病害，会导致全球咖啡供应量和品质下降，进而造成巨大的经济损失。尽管目前已有多种用于应对这种锈病大流行的大流行干预政策（PIPs）可供商业应用，但这些措施似乎只能为农民提供部分流行病学缓解。在本研究中，我们构建了一种高分辨率经济流行病学模型，用于刻画锈病大流行在咖啡树农场中的传播及其相关经济影响。通过针对哥伦比亚这一案例进行广泛模拟——该国主要由小规模咖啡农场组成，并且是全球第二大咖啡生产国——我们的结果表明，如果不直接应对锈病大流行，维持任何利润在经济上都是不可行的。此外，即使在农民能够完全掌握其农场流行病学状态并提前了解天气这一假设情形下，与锈病大流行相关的任何应对措施所能带来的利润也仅约为投资额的4%。在更为现实的情形下，任何与锈病大流行相关的应对措施预计都会导致经济损失，这表明咖啡市场将出现重大动荡。

关键词：咖啡叶锈病、经济流行病学分析、植物大流行控制、大流行干预政策。

1 引言

咖啡是全球交易最广泛的农产品之一，其交易量仅次于石油。据估计，全球咖啡贸易支撑着世界各地约1亿人的生计 [1]。仅在2014年，来自52个国家的约2600万农民种植了逾850万吨咖啡，在这些国家创造了近390亿美元的价值 [2]。咖啡的零售价值则高得多；仅在2019年，美国的咖啡销售额就达到870亿美元 [3]。在大多数主要种植区，小农户占据生产主导地位，其土地持有面积通常不超过5公顷 [4, 5]。具体而言，哥伦比亚是全球第二大咖啡生产国，也是本研究的重点；在该国，小农农场是咖啡种植的主要形式 [6]。

近年来，气候变化 [7], 、经济变动[8], ，尤其是咖啡叶锈病（CLR）大流行 [9]，给咖啡生产造成了严重冲击。咖啡叶锈病是一种破坏性真菌病害，会侵害咖啡植株，由咖啡驼孢锈菌引起。它是全球咖啡产业面临的最重大威胁之一，因为会大幅降低作物产量和咖啡豆品质 [10]。它是全球分布最广泛的阿拉比卡咖啡病害之一，也是唯一具有全球分布特征的重要咖啡病害 [11, 12]。仅在哥伦比亚，受咖啡叶锈病暴发影响，2008年至2011年间咖啡产量较2007年下降了31%。同样，整个中美洲在2012—2013年收成季的咖啡产量较2011—2012年下降了16%，这也是锈病大流行所致。

目前，尽管已有若干大流行干预政策（PIP）在理论和实践中都显示出良好效果 [13, 14, 15]，但仍没有一劳永逸的解决方案来应对咖啡叶锈病疫情。对于

例如，一些农民一直使用化学药剂对抗病原体 [16] ，而另一些人则采用各种遮荫方法来阻止病原体传播 [17]。遗憾的是，尽管已有这些及类似的植物病害干预措施，小型咖啡农场在经济上仍难以应对咖啡叶锈病疫情。

本研究的主要目标是确定有效的咖啡叶锈病管理政策能否为小型咖啡农场带来可持续的利润。为此，我们构建了一个高分辨率模型，用以刻画咖啡叶锈病疫情相关的经济与流行病学动态。我们以哥伦比亚为案例实例化该模型，并通过大规模模拟分析多种常见植物病害干预措施的智能实施方式。

本文其余部分安排如下：第2节简要回顾与咖啡叶锈病相关的流行病学、经济学及PIP文献。随后，第3节正式介绍所提出的模型，该模型分为流行病学、生态学和经济动态，以及它们之间的交互。接着，第4节介绍所提出模型的仿真实现，采用基于主体的模拟方法和基于深度强化学习的智能体，以获得近似最优的流行病学—经济学咖啡叶锈病管理政策。然后，第5节基于现实配置和历史数据开展分析。最后，第6节讨论结果、总结结论，并提出未来可能的研究方向。

2 相关研究

咖啡是全球消费最广泛的饮品之一，其全球市场每年创造数十亿美元的收入。咖啡生产是许多经济体的重要组成部分，尤其是在欠发达国家（LDCs），咖啡是数百万小规模农民的主要收入来源 [18, 19, 20]。咖啡叶锈病疫情对这一产业产生了重大影响，导致农场在缺乏外部援助的情况下陷入财务困境，甚至破产 [21]。近年来，研究人员开发了多种模型，以更好地理解咖啡叶锈病疫情的传播过程，并为有效管理策略（也称为植物病害干预措施（PIPs））的设计与实施提供指导[22, 23, 24]。借助这些模型，研究人员和政策制定者能够在地方、国家或国际层面，就防治咖啡叶锈病疫情的具体措施作出有依据的决策。接下来，我们将简要回顾与本研究挑战相关的三个主要研究方向：咖啡叶锈病传播的植物学—流行病学模型、用于缓解咖啡叶锈病疫情的植物病害干预措施，以及咖啡生产经济学与咖啡叶锈病管理。

2.1 植物学—流行病学模型

植物学—流行病学模型（BEM）是一类特殊的数学模型，用于研究植物种群中的流行病学动态 [25, 26, 27, 28]。这类模型用于探究可能促成疾病传播和扩散的因素，并预测这些疾病对作物产量和品质、Food Security 等方面可能造成的影响 [29, 30, 31, 32]。BEM 与以动物和人类为研究对象的流行病学模型具有共同特征和属性，例如流行病学状态和感染机制 [33, 34, 35]。因此，常见的一类 BEM 是基于 [36] 为人类种群提出的经典易感—感染—康复（SIR）模型构建的。然而，在使用历史数据进行检验时，这些基于 SIR 的模型表现出有限的能力，因为它们过于简单，且未能考虑植物种群和植物病原体的独特属性 [37]。

随着时间推移，研究人员不断开发出更复杂、更精密的BEM，将植物空间分布、寄主抗性和病原体毒力等新因素纳入其中。例如， [38] 采用高斯相互作用和离散化SIR模型，分析了二维斑块中种群数量恒定的空间种群里的疾病传播。每日的邻域相互作用和传染率会影响疾病传播；结果表明，疫情会出现多波传播，且波及规模逐步扩大，传染率则取决于与起点的距离。类似地， [39] 采用时空扩展SIR流行病学模型与非线性产出经济模型，对植物大流行期间植物农场的利润进行建模。在 [40], 中，作者分析了多菌株易感者—感染者—易感者（SIS）流行病模型的稳定性、周期解的存在性以及多种菌株的共存。总体而言，扩展SIR模型会考虑病原体、植物和环境各自的独特特性，并适用于多种情境，具备良好的预测能力
[41, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 42, 43, 44, 45, 46]。

由于每种植物与病原体的组合都具有独特特性，因此将某种病原体或植物的模型应用于另一种情况颇具挑战。聚焦于咖啡叶锈病动力学，从总体上看，这种疾病的局部传播分为两个阶段，与其他直接传播的疾病相似 [55]。在第一阶段，

风携带的夏孢子落在咖啡农场上，并穿透咖啡叶背面的气孔。随后，夏孢子长出吸器，从叶片组织中获取养分，再次经由气孔逸出并产生更多孢子。接着，在第二阶段，夏孢子通过直接接触、水花飞溅或湍流风传播到附近的咖啡植株。孢子也可能被气流带入《大气》，从而促使疾病在更大范围内传播。

与其他类型的植物和病原体相比，先前针对咖啡叶锈病的数学建模工作较为有限，这可能是因为 CLR 动态本身较为复杂。先前的研究包括 [56]，其中提出了一种基于机器学习的模型，用于根据历史记录对咖啡叶锈病暴发进行分类。在 [57] 中，作者针对遮荫 PIP（香蕉树上常用的一种做法）开展了计算机模拟实验，并采用随机非线性回归模型（具体而言，是提升回归树模型）预测疾病传播，以探究涉及众多变量、且以多个过程间的交互为特征的复杂生物系统相关问题。 [58] 也以类似方式使用了反向传播神经网络、非线性回归树和支持向量回归模型。然而，这些研究及类似工作普遍忽视了与咖啡叶锈病及其防治相关的经济方面。

与先前的研究一致，本研究针对咖啡叶锈病病原体采用了扩展的、基于 SIR 的 BEM 方法。然而，据我们所知，我们提出的模型迄今最为全面：除了纳入前文所述尚未在这一背景下得到考虑的经济方面，还考虑了随时间变化的独特环境因素，例如降雨、温度和湿度。

2.2 咖啡叶锈病的植物病害干预措施

针对咖啡叶锈病的植物病害干预措施，通常旨在应对咖啡叶锈病疫情病原体所利用的感染途径 [59]。具体而言，研究表明，三种主要的植物病害干预措施在大量农场和较长时间内均有效：1）喷洒化学物质；2）遮荫；3）剪枝。本研究重点考察这些干预措施单独实施及组合实施的效果。

化学物质被喷洒到咖啡树上，并与病原体发生反应，从而将其消灭。根据巴西农业部的数据，有 100 多种化学物质可用于防治咖啡叶锈病，其作用强度和生态副作用各不相同[1]。事实上， [60]描述了在巴西一个农场开展的一项为期四年的实验，内容是在该农场喷洒化学物质。作者指出，这项植物病害干预措施的效果在很大程度上取决于总体天气状况，尤其是降雨量。然而，平均而言，化学物质能够有效遏制咖啡叶锈病暴发。墨西哥也得出了类似结果： [16] 的研究表明，使用化学物质应对咖啡叶锈病暴发的农民，平均而言能够将其遏制。

遮荫是一种截然不同的方法，旨在拦截降雨，因为降雨是锈病病原体传播感染的主要途径之一。也就是说，如果咖啡树周围的降雨量减少，雨滴就不会直接接触树木，因此不会促使病原体释放孢子。实施遮荫 PIP [61, 16, 62, 63, 64]主要有两种方式：人工遮荫和自然遮荫。人工遮荫通常是在咖啡树上方搭建遮棚，使用密集的网进行遮挡 [17]。自然遮荫则是种植香蕉树等较高的树木，利用它们为咖啡树遮荫 [57]。前一种方法成本较高，而且由于缺乏阳光，会减缓幼树的生长 [65]，；后一种方法也有其他缺点。如果降雨量大，遮荫树会形成排水槽，使水汇聚成较大的水滴。这些水滴会成为更有效的咖啡叶锈病传播媒介 [66, 67, 68, 64]。

最后，采用枝条修剪型PIP可以降低咖啡叶锈病的感染率 [68]。不过，咖啡树枝条修剪的影响尚不明确，因为某些种植管理措施会以不同方式影响寄主或微气候，从而可能促进或抑制感染周期的不同环节。例如， [69] 分析了秘鲁亚马孙地区两种咖啡品种的遮荫树管理和修剪对咖啡叶锈病的影响。作者发现，侧边采用多作物种植、且茎干在距地面 40 cm 处剪断的咖啡植株，咖啡叶锈病的发病率和严重程度均较低。 [70] 的另一项研究建议结合使用修剪方法和杀菌剂，以降低非抗性咖啡品种感染咖啡叶锈病的风险；研究表明，单独修剪效果不佳。

需要注意的是，农民可以在任何所需的时间范围内，以不同程度单独或组合实施上述任何植物病害干预措施（PIPs）。也就是说，在某一生产周期内，农民不一定要“锁定”单一的PIP方案。

[1]我们 r efer 感兴趣的读者 http://www.agricultura.gov.br/servicos-e-sistemas/sistemas/agrofit

2.3 咖啡生产的经济学

与所有企业主一样，咖啡农场主力求实现利润最大化。由于小农农场在咖啡生产市场中占主导地位，假设每个农场主对世界市场价格 [71]的影响微乎其微。因此，假设农民将单位价格视为既定价格。相应地，单个农场在世界市场上的竞争力，主要取决于农场层面的生产成本。

接下来，咖啡生产成本大致可分为四大类：有偿劳动力（即正式工人）、无偿劳动力（即家庭成员等非正式工人）、投入品（即除草剂、农药和肥料）以及固定成本（即安装成本、融资成本、折旧等）。大多数或所有咖啡种植者都会采取 CLR 防控措施，因此这些措施被视为农场的固定成本。相反，CLR 根除成本则是在咖啡叶锈病暴发时产生的额外成本。 [72],

我们来看看 Fairtrade USA 和康奈尔大学近期对不同咖啡产地的成本结构和盈亏平衡点分析。作者估算了洪都拉斯、秘鲁、哥伦比亚和墨西哥小农咖啡农场的成本，并利用平均成本和生产力，为每个合作社构建了一位“代表性”生产者。随后，他们使用这些“代表性”农场主计算了四种盈亏平衡点：仅考虑可变成本的一种；在此基础上计入固定成本的一种；计入折旧的一种；以及将农场设立成本、土地成本、劳动力成本和实物资本摊销纳入考量的一种。他们得出结论，所有受研究咖啡产地的农场主都面临着长期生存能力方面的重大不确定性。据我们所知，目前关于这一问题最全面的研究是 [72]。作者使用了一个全新的大规模数据集，其中包含来自拉丁美洲三个阿拉比卡咖啡生产国——哥伦比亚、哥斯达黎加和洪都拉斯的横截面数据。该研究考察了农场层面数据，以分析这三个重要咖啡产地各农场的成本分布和盈利能力。分析显示，各农场主之间存在高度异质性和差异性。

从经济角度来看，咖啡叶锈病被认为是全球对咖啡危害最大的疾病，会同时影响产量质量和产量数量 [73]。因此，对农民而言，这种疾病会造成灾难性的经济后果，产量损失最高可达 50% [74]。随着气候变化，咖啡叶锈病的危害进一步加剧，甚至在过去被认为不易发生这种疾病的地区也是如此 [75]。根据热带农业研究与高等教育中心的数据，2012- 2013年咖啡叶锈病在中美洲地区暴发，导致作物生产平均减少 15% [3]。洪都拉斯和萨尔瓦多的作物损失比例最高，分别为 31% 和 23%。还应注意的是，与 2008年全球金融危机和 COVID-19 带来的社会经济冲击等其他生产扰动类似，咖啡叶锈病暴发与咖啡农场投资大幅减少[76]以及失业率上升 [45]有关。

3 模型

所提出的模型由三个相互关联的组件组成：BEM 组件用于描述咖啡叶锈病疫情在树和农场层面的传播，同时考虑描述时间性环境变化的生态动态；经济组件用于定义农民支出和收入；PIP 组件则用于指定农场主实施了哪些植物病害干预措施（如果有）。下面将详细介绍这些组件及其相互之间的交互。

3.1 BEM 组件

为刻画咖啡叶锈病疫情的传播，我们采用多尺度生物经济模型，该模型既模拟疫情在单棵树和农场层面的传播，也模拟时间环境动态。在树木层面，我们采用常微分方程方法，描述每棵树各枝条之间的流行病学状态和疾病动态。过去的研究表明，这种粒度能够很好地解释咖啡叶锈病疫情在单棵咖啡树中的传播（见 [24]）。因此，采用更精细的分辨率，例如分别考虑每片叶子，可能对捕捉实际动态贡献不大，却会带来看似不必要但不可忽视的计算负担。

[2] https://www.roastmagazine.com/resources/Articles/2017/2017_Issue3_MayJune/Roast_MayJune17_FinSustCoffeeProd.pdf

[3] https://www.researchgate.net/profile/Elias-De-Melo-Virginio-Filho/publication/340494371_Prevention_and_control_of_coffee_leaf_rust_Handbook_of_best_practices_for_extension_agents_and_facilitators_Prevention_and_control_of_coffee_leaf_rust_Handbook_of_best_practices_for_extension_agents_a/links/5e8d22bca6fdcca789fde44c/Prevention-and-control-of-coffee-leaf-rust-Handbook-of-best-practices-for-extension-agents-and-facilitators-Prevention-and-cont pdf

在农场层面，我们采用时空方法，根据树木之间的距离来定义同一农场内树木之间的咖啡叶锈病传播。众所周知，树木之间的距离在疾病传播中发挥着核心作用[26]。最后，我们还加入了一个生态部分，用以表示与咖啡叶锈病动态无关的时间环境动态。接下来将讨论生物经济模型的三个部分。

3.1.1 树级传播

咖啡树是一种多年生植物，具有持久叶片。其年度生产力周期约持续九个月，并且在很大程度上取决于咖啡树物种的栽培品种和气候条件。在此，我们根据与咖啡叶锈病生命周期相对应的流行病学状态，描述咖啡树枝条数量的演变：健康、潜伏期（即已暴露于病原体但不具传染性）、感染期和无叶期。一个枝条的感染对应于其所有叶片的感染。形式上，树级大流行传播可表示为以下常微分方程组：

$$
\begin{aligned}
\frac{dH(t)}{dt} &= \Lambda(t) - \omega(t)U(t)H(t) + p_L(t)L(t) + p_I(t)I(t) + p_J(t)J(t),\\
\frac{dL(t)}{dt} &= \omega(t)U(t)H(t) - \theta(t)L(t) - p_L(t)L(t),\\
\frac{dI(t)}{dt} &= \theta(t)L(t) - \alpha(t)I(t) - p_I(t)I(t),\\
\frac{dJ(t)}{dt} &= \alpha(t)I(t) - \mu(t)J(t) - p_J(t)J(t),\\
\frac{dU(t)}{dt} &= \gamma(t)I(t) - v(t)U(t) - p_U(t)U(t),\\
\frac{dB_p(t)}{dt} &= \delta_H(t)H(t) - h(t),\\
\frac{dB_r(t)}{dt} &= \delta_L(t)L(t) + \delta_I(t)I(t) + \delta_J(t)J(t) - h(t),
\end{aligned}
\tag{1}
$$

其中， $H(t)$ $L(t)$ $I(t)$ $J(t)$ $U(t)$ $B_p(t)$和 $B_r(t)$分别表示时间 t时健康、潜伏期、感染期和无叶枝条、夏孢子、优质浆果和普通浆果的数量。树的枝条总量记为 $N(t) := S(t) + L(t) + I(t) + J(t)$。树级大流行传播模型的示意图见图1。公式（1）的完整说明如下。

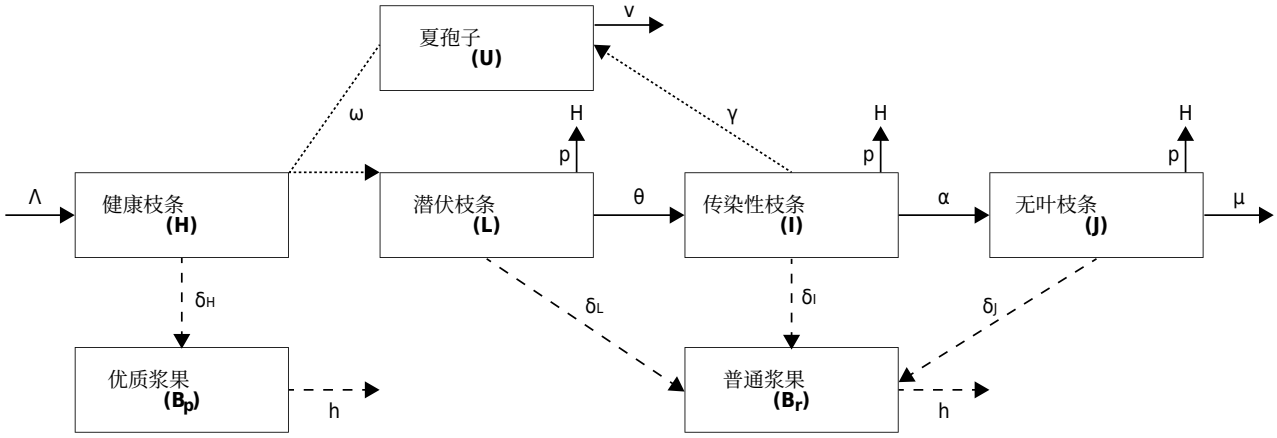


图 1：树级咖啡叶锈病传播动态示意图。实线表示咖啡树枝条流行病学状态的变化。虚线表示咖啡果实的生成。点线表示夏孢子的产生及其与咖啡树枝条的相互作用。

咖啡树是一种常绿多年生植物，其年度生产力受物种、栽培品种和气候条件等因素影响。所提出的模型基于咖啡叶锈病的生命周期

，包括健康、潜伏、感染和无叶枝条等状态。大流行的演变由一个常微分方程组表示，该方程组考虑了各流行病学状态下枝条的数量及其随时间发生的交互。模型表示特定时刻（t）健康枝条（H）、潜伏枝条（L）、感染枝条（I）和无叶枝条（J）的数量，以及夏孢子（U）、优质浆果（B_p）和普通浆果（B_r）的数量，同时还表示树上的枝条总数。流行病学动态由式（2-8）描述。

在公式（2）中，$^{dH}_{(t)\ dt}$ 表示健康枝条的动态数量。它受以下五个因素影响。首先，以 $\Lambda(t)$的速率生成健康枝条。其次，每沉积一个孢子后转变为潜伏枝条的健康枝条数量，即萌发效能，速率为 ω。第三，PIP 对潜伏枝条的影响p_L使其重新变为健康枝条。第四，PIP 对传染性枝条的影响 p_I使其重新变为健康枝条。最后，PIP 对无叶枝条的影响 p_J使其重新变为健康枝条。

$$\frac{dH(t)}{dt} = \Lambda(t) - \omega(t)U(t)H(t) + p_L(t)L(t) + p_I(t)I(t) + p_J(t)J(t). \tag{2}$$

在公式（3）中，$^{dL}_{(t)\ dt}$ 表示咖啡树潜伏枝条的动态数量。它受以下三个因素影响。首先，覆盖孢子的健康枝条以 $\omega(t)$的速率转变为潜伏枝条。其次，潜伏枝条以 θ的速率变为传染性枝条。最后，PIP 对潜伏枝条的影响 p_L使其重新变为健康枝条。

$$\frac{dL(t)}{dt} = \omega(t)U(t)H(t) - \theta(t)L(t) - p_L(t)L(t). \tag{3}$$

在公式 (4) 中，$^{dI}_{(t)\ dt}$ 是咖啡树受感染枝条的动态数量。它受到以下三个项的影响。首先，潜伏枝条以 $\theta(t)$ 的速率变为具有传染性，其中 $^{1}_{\theta\ t\ ()}$ 对应潜伏期。其次，受感染枝条以 $\alpha(t)$ 的速率变得无叶，其中 $^{1}_{\alpha\ t\ ()}$ 是产孢期。最后，PIP 对受感染枝条 p_I 的影响使其恢复健康。

$$\frac{dI(t)}{dt} = \theta(t)L(t) - \alpha(t)I(t) - p_I(t)I(t). \tag{4}$$

在公式 (5) 中，$^{dJ}_{(t)\ dt}$ 表示咖啡树上无叶枝条的动态数量。它受以下三个因素影响。首先，受感染枝条以 $\alpha(t)$的速率变为无叶枝条，其中 $^{1}_{\alpha\ t\ ()}$ 为产孢期。第二个因素是自然死亡率，所有枝条的基准率为 $\mu(t)$。最后，PIP 对无叶枝条的影响为 p_I，使其恢复健康。

$$\frac{dJ(t)}{dt} = \alpha(t)I(t) - \mu(t)J(t) - p_J(t)J(t). \tag{5}$$

在公式（6）中，$^{dU}_{(t)\ dt}$ 是咖啡树夏孢子枝条的动态数量。它受到以下三个项的影响。首先，以 γ的速率产生感染枝条时，会产生一条夏孢子枝条。其次，夏孢子枝条以 $v(t)$的速率沉积。此外，PIP对夏孢子枝条的影响 p_I 会使其恢复健康。

$$\frac{dU(t)}{dt} = \gamma(t)I(t) - v(t)U(t) - p_U(t)U(t). \tag{6}$$

采摘的浆果数量 h 也很重要，因为它会被纳入方程，并影响可采摘浆果的总量，但不会直接影响优质浆果的动态。在式 (7) 中，$^{dB_p}_{(t)\ dt}$ 表示优质浆果的数量。它受以下几项影响：健康枝条以 δ_H 的速率生成优质浆果；其次，浆果以速率 h 被采摘。

$$\frac{dB_p(t)}{dt} = \delta_H(t)H(t) - h(t). \tag{7}$$

在公式（8）中，$^{B_r}_{(t)\ dt}$ 表示普通浆果数量随时间的变化。这一数量受四个因素影响：枝条休眠时浆果的产出率 δ_L、枝条感染时浆果的产出率 δ_I、无叶枝条存在期间产出的浆果数量 δ_J，以及 h 已收成的浆果数量。

$$\frac{dB_r(t)}{dt} = \delta_L(t)L(t) + \delta_I(t)I(t) + \delta_J(t)J(t) - h(t). \tag{8}$$

树级流行病学模型的参数及其说明汇总于表1中。此外，同一表中还列出了参数平均值及相应的来源。

参数	生物学含义	平均价值	来源
Λ	补充率 $[day^{-1}]$	7	[24]
ω	接种体效力 [1]	5	[77]
p_L	PIP对潜伏枝条的影响率 [1]	NA	NA
p_I	PIP对感染枝条的影响率 [1]	NA	NA
p_J	PIP对无叶枝条的影响率 [1]	NA	NA
θ	感染率 $[day^{-1}]$	25.5	[78]
α	受感染 枝条 变得 无叶的 rate $[day^{-1}]$	150	[78]
μ	自然死亡率 $[day^{-1}]$	0.0084	[24]
γ	夏孢子 生产 from 感染 枝条率 $[day^{-1}]$	10	[79]
v	沉降率 $[day^{-1}]$	0.09	[79]
p_U	夏孢子沉降率 $[m^2 day^{-1}]$	5000	[80]
δ_H	健康枝条的浆果产量率 $[day^{-1}]$	0.35	[24]
δ_L	潜伏枝条的浆果产量率 $[day^{-1}]$	0.25	[24]
δ_I	受感染枝条的浆果产量率 $[day^{-1}]$	0.15	[24]
δ_J	无叶枝条的果实产量率 $[day^{-1}]$	0.025	[24]
h	收成率 [1]	NA	NA

表1：树级锈病大流行传播中所用参数的说明（见公式（1））。NA 表示历史上或通过经验无法获得的数据，这些数据针对每个实例分别选取。

3.1.2 农场层面传播

对于农场层面的传播动态，我们在时空 SEIS 模型 [81, 82, 83] 的基础上进行了以下三项修改：1）假设易感咖啡树可随时间增加到农场中（如 [84] 中所观察到的）；2）所有流行病学状态的咖啡树都可能因与咖啡叶锈病无关的原因死亡（参见 [85] 中的讨论）；3）暴露树木可能在尚未感染前转为易感状态（如 [86] 中所述）。形式上，农场层面的大流行传播可表示为以下常微分方程组：

$$\begin{aligned}
\frac{\partial S_f(t,x)}{\partial t} &= a(t)S_f(t,x) - \rho_s(t)S_f(t,x) - \beta(t,x)S_f(t,x)I(t,x) + \gamma(t)I_f(t,x) + \zeta(t)E_f(t),\\
\frac{\partial E_f(t,x)}{\partial t} &= \beta(t,x)S_f(t,x)I(t,x) - \phi(t)E_f(t,x) - \rho_e(t)E_f(t,x) - \zeta(t)E_f(t),\\
\frac{\partial I_f(t,x)}{\partial t} &= \phi(t)E_f(t,x) - \gamma(t)I_f(t,x) - \xi(t)I_f(t,x) - \rho_i(t)I_f(t,x),
\end{aligned} \tag{9}$$

其中，$S_f(t,x)$ $E_f(t,x)$ 和 $I_f(t,x)$ 分别表示时间 t 和地点 x 处易感、暴露和感染咖啡树的密度。图 2 示意了农场层面的传播动态。农场层面模型的构建如下。

在公式 (10) 中，$\frac{dS_f(t,\ x)\ dt}{}$ 表示易感咖啡树随时间变化的动态密度。它受以下五个项的影响。首先，易感咖啡树以相对于当前易感咖啡树数量的速率 $a(t)$ 新生。其次，易感咖啡树以速率 $\rho_s(t)$ 因非大流行相关原因死亡。第三，易感咖啡树以速率 $\beta(t)$ 被传染性咖啡树感染，并转为潜伏状态。第四，传染性咖啡树以

速率 $\gamma(t)$ 康复并转为易感咖啡树。第五，若潜伏期咖啡树上的非健康枝条在其变为传染性之前被移除，则这些树可再次变为易感状态，速率为 $\zeta(t)$。

$$\frac{\partial S_f(t,x)}{\partial t} = a(t)S_f(t,x) - \rho_s(t)S_f(t,x) - \beta(t,x)S_f(t,x)I(t,x) + \gamma(t)I_f(t,x) + \zeta(t)E_f(t). \tag{10}$$

在公式（11）中，$dE_{f(t,\ x)\ dt}$ 表示随时间变化的染病咖啡树密度。它受以下四个因素影响。首先，易感咖啡树以 $\beta(t)$的速率被具有传染性的咖啡树感染，进而成为暴露个体。其次，暴露个体以 $\phi(t)$的速率变为具有传染性。第三，暴露个体以 $\rho_e(t)$的速率因与大流行无关的原因死亡。第四，若在变为具有传染性之前移除其不健康枝条，暴露个体可重新变为易感个体，速率为 $\zeta(t)$。

$$\frac{\partial E_f(t,x)}{\partial t} = \beta(t,x)S_f(t,x)I(t,x) - \phi(t)E_f(t,x) - \rho_e(t)E_f(t,x) - \zeta(t)E_f(t). \tag{11}$$

在公式（12）中，$dI_{f(t,\ x)\ dt}$ 表示随时间变化的具有传染性的咖啡树密度。它受以下四个因素影响。首先，暴露个体以 $\phi(t)$的速率变为具有传染性。其次，具有传染性的咖啡树以 $\gamma(t)$的速率康复或死亡。第三，受感染的咖啡树因与大流行无关的原因死亡。第四，具有传染性的咖啡树以 $\rho_i(t)$的速率因与大流行无关的原因死亡。

$$\frac{\partial I_f(t,x)}{\partial t} = \phi(t)E_f(t,x) - \gamma(t)I_f(t,x) - \xi(t)I_f(t,x) - \rho_i(t)I_f(t,x). \tag{12}$$

农场级　　流行病学模型的参数及其描述汇总于表　　2.

参数	生物学含义
a	易感树的出生率
ρ_s	易感树的自然死亡率
β	易感树木暴露于病原体的速率
γ	受感染的树木康复的速率
ζ	暴露的树木因某些 PIP 而康复的速率
ϕ	暴露的树木变为具有传染性的速率
ρ_e	树木因病原体导致的自然死亡率
ξ	受感染的树木因锈病大流行导致的平均死亡率。
ρ_i	病原体导致的受感染树木自然死亡率

表2：农场层面的锈病大流行传播中所用参数的说明（见公式（9））。

请注意，公式（9）的系数很大程度上取决于若干因素，包括农场内咖啡树的流行病学状态、环境的时间变化，以及所实施的PIP。首先，易感增长参数 $a(t)$ 取决于农场主是否决定播种更多树木，因为我们假设在有组织的农场中几乎不会发生或完全不会发生自然繁殖 [87, 88, 89]。具传染性的咖啡树种群（I_f）对易感咖啡树种群（S_f）的平均感染率 β，与传染性树木的相对感染状态成正比；该状态由传染性咖啡树上具传染性及无叶枝条所占的比例，以及两棵咖啡树之间的相对距离决定。因此，$\beta(t,\ x)$ 定义如下：

$$\beta(t,x) = \frac{\sum_{s\in S_f(t,x)}\sum_{i\in I_f(t,x)}\frac{\beta(t)i_U}{d(s,i)}}{S_f(t,x) * I_f(t,x)}, \tag{13}$$

其中，$d(s,\ i)$ 是一个度量函数，用于获取农场中两棵咖啡树并返回它们之间的距离（即欧几里得距离）；i_x 是 i的咖啡树的 x 枝条种群；$\beta(t)$ 是病原体在时间 t的平均感染率，该数值会随环境条件的变化而变化。从感染状态中康复的平均康复率取决于感染状态和感染性咖啡树的持续时间，$\gamma(t)$ 与其潜伏、感染及无叶枝条被移除或恢复的感染性咖啡树平均数量成正比。形式上，$\gamma(t)$ 的形式为：

$$\gamma(t) = \frac{\sum_{i\in I_f(t,x)}\sum_{x\in\{L,I,J\}} i_x(t) - i_x(t-1)}{I_f(t,x)}. \tag{14}$$

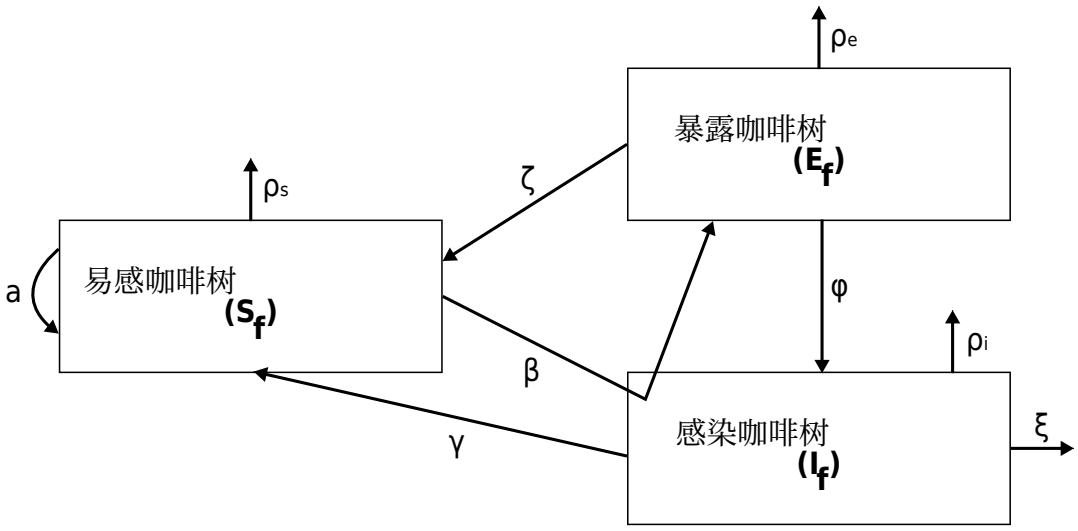


图2：农场层面的咖啡叶锈病疫情动态示意图。

从暴露状态中康复的过程与此类似，因此，从暴露状态中康复的康复率$\zeta(t)$ 的形式为：

$$\zeta(t) = \frac{\sum_{e \in E_f(t,x)} e_L(t) - e_L(t-1)}{E_f(t,x)}, \tag{15}$$

其中， e_L 是树木 e的潜伏枝条数量。在暴露状态下未康复的咖啡树，其部分枝条会从潜伏状态转变为感染状态，因此会成为感染咖啡树。因此，平均暴露转感染率 $\phi(t)$定义如下：

$$\phi(t) = \frac{\sum_{e \in E_f(t,x)} sign(e_I(t) * e_I(t-1))}{E_f(t,x)}, \tag{16}$$

其中， e_I 是树木 e的受感染枝条数量。相应地，未康复的感染咖啡树会因咖啡叶锈病疫情而以平均速率 $\xi(t)$死亡；该速率取决于这棵咖啡树的非易感枝条数量，以及咖啡树死亡前病原体承载能力的阈值：

$$\xi(t) = \frac{\sum_{i \in I_f(t,x)} D(i_L, i_I, i_J)}{I_f(t,x)}, \tag{17}$$

其中， D 是一个函数，接收咖啡树潜伏、感染和无叶枝条的数量；如果树木因疾病而死亡，则返回 1，否则返回 0。最后， p_s， p_e和 p_i 分别是易感、暴露和感染咖啡树的自然死亡率。这些参数由与咖啡叶锈病疫情没有直接关系的自然原因决定。

3.1.3 生态动态

咖啡叶锈病的传播以及咖啡树果实产量，取决于多种环境与气候过程 [90, 91, 92]。具体而言，温度、湿度和降雨被认为是直接影响咖啡叶锈病大流行传播的主要生态属性 [93, 6, 94]。形式上，这三个过程分别用三个时间序列向量 $C_T(t)$ $C_H(t)$和 $C_R(t)$表示。

由于难以将这三种生态过程与树木层面的咖啡叶锈病疫情传播联系起来，我们采用机器学习方法来学习二者之间的关联。形式上，我们定义函数 C: $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^{12}$，使得 $C(C_T, C_H, C_R)$ $\rightarrow [\lambda, \omega, \theta, \alpha, \mu, \gamma, v, \delta_H, \delta_L, \delta_I, \delta_J, h]$将生态过程映射到树木层面的参数。具体而言，为了获得 C，我们使用了来自 [95, 96, 97]的历史数据，并采用 $TPOT$ 自动机器学习框架 [98] ，结合分层K折交叉验证方法[99]。

3.2 经济组成部分

如前所述，咖啡农场的成本记为 TC，大致可分为四大类（见表3）：有偿劳动力（PL）、无偿劳动力（UL）、投入品（化学和有机）（IN）以及固定成本（FC）；因此 $TC{:=}\ FC + PL + UL + IN$。值得注意的是，前三项取决于农场中的树木数量。这些是基本成本，不包括防治咖啡叶锈病暴发所产生的额外成本。为此，假设只有在发生暴发时才会产生咖啡叶锈病根除成本（即 $I_f > 0$），则将防治大流行的额外成本 SC 计入总成本 TC，得出 $TC{:=}\ FC + PL + UL + IN + SC$。具体而言， SC由农场主采用的植物病害干预措施定义，详见下一节。

3.3 植物病害干预措施

我们考虑三种潜在的植物病害干预措施（PIP）：1）喷洒化学物质 [13]；2）遮荫 [15]；以及 3）剪枝[14]。从技术上讲，每种植物病害干预措施都有一个由特定参数化空间定义的使用规模，该参数化空间会影响农场的流行病学状态，以及因实施各项植物病害干预措施所产生的成本而影响其经济状态。接下来，我们将详细定义这些措施。

喷洒化学物质（SCS）植物病害干预措施由每阿卡施用的化学物质数量 $c \in \mathbb{R}$ 和实施该措施的阿卡数 $a \in \mathbb{R}$ 定义。施用的化学物质数量会在实施时线性减少每条树行中的病原体数量。因此，式（1）可写为：

$$\frac{dU(t)}{dt} = \gamma(t)I(t) - v(t)U(t) - p_U(t)U(t) - \kappa_{ca}c\frac{a}{A},$$

其中， $\kappa_{ca} \in \mathbb{R}^+$ 是活性物质的效率， $A \in \mathbb{R}^+$ 是农场的总面积。从经济角度来看，SCS 植物病害干预措施具有相关成本，满足：

$$scs_{cost}(t,[c,a]) = \begin{cases} \big(\kappa_1 log(a) + \kappa_2\big) \cdot \big(\kappa_3 log(c) + \kappa_4\big) & c \le \kappa_c \wedge a \le \kappa_a \\ \big(\kappa_1 log(a) + \kappa_2\big) \cdot \big(\kappa_3 log(\kappa_c) + \kappa_c^o(c-\kappa_c) + \kappa_4\big) & c > \kappa_c \wedge a \le \kappa_a \\ \big(\kappa_1 log(\kappa_a) + \kappa_a^o(a-\kappa_a) + \kappa_2\big) \cdot \big(\kappa_3 log(c) + \kappa_4\big) & c \le \kappa_c \wedge a > \kappa_a \\ \big(\kappa_1 log(\kappa_a) + \kappa_a^o(a-\kappa_a) + \kappa_2\big) \cdot \big(\kappa_3 log(\kappa_c) + \kappa_c^o(c-\kappa_c) + \kappa_4\big) & c > \kappa_c \wedge a > \kappa_a \end{cases} \tag{18}$$

其中， $\kappa_i \in \mathbb{R}$ 使得 $i \in [1,\ldots,6] \wedge \{c,a\}$ 成为由外部供需随时间决定的成本自由参数。

遮荫 PIP 旨在保护咖啡树免受携带病原体、在枝条间传播的雨滴侵袭。因此，遮荫 PIP 通过 C_R 函数影响函数 C，从而根据农场的覆盖面积（以阿卡计）， $a \in \mathbb{R}^+$，减少 C_R 的平均数量。形式上，覆盖面积为 a 的遮荫 PIP 可表示为：

$$C_R \leftarrow C_R\frac{a}{A}.$$

遮荫 PIP 的相关成本为安装成本：

$$shading_{cost}(t,[a]) = \begin{cases} \kappa_1 log(a) + \kappa_2 & a \le \kappa_a \\ \kappa_1 log(\kappa_a) + \kappa_a^o(a-\kappa_a) + \kappa_3 & a > \kappa_a. \end{cases} \tag{19}$$

最后，剪枝（BC）PIP 就是剪掉 $\zeta \in \mathbb{N}$ 枝条。起初，会随机剪掉无叶枝条，因为它们容易识别。之后，如果 ζ 大于咖啡树中的无叶枝条数量，就会随机修剪非无叶枝条。

也就是说，

$$\begin{aligned} \tfrac{dH(t)}{dt} &= -max(0,\zeta - J(t))\tfrac{H(t)}{H(t)+L(t)+I(t)}, \\ \tfrac{dL(t)}{dt} &= -max(0,\zeta - J(t))\tfrac{L(t)}{H(t)+L(t)+I(t)}, \\ \tfrac{dI(t)}{dt} &= -max(0,\zeta - J(t))\tfrac{I(t)}{H(t)+L(t)+I(t)}, \\ \tfrac{dJ(t)}{dt} &= -min(\zeta, J(t)). \end{aligned} \tag{20}$$

树枝修剪植物病害干预措施的相关成本，是在农场范围内修剪枝条所需的劳动力。因此，对于 $a \in \mathbb{R}$ 阿卡土地以及每棵树 ζ 的修剪工作量，成本形式如下：

$$BC_{cost}(t,[\zeta,a]) = \begin{cases} \big(\kappa_1 log(a) + \kappa_2\big) \cdot \big(\kappa_3\zeta + \kappa_4\big) & a \le \kappa_a \\ \big(\kappa_1 log(\kappa_a) + \kappa_a^o(a-\kappa_a) + \kappa_2\big) \cdot \big(\kappa_3\zeta + \kappa_4\big) & a > \kappa_a \end{cases} \tag{21}$$

4 仿真实现

为了对所提出的模型进行数值求解，并评估所考察的植物病害干预措施（PIPs）的影响，我们采用了广泛使用的基于主体的仿真（ABS）方法 [100, 101]。ABS 是一种计算方法，通常用于模拟系统中自主主体的行为。在植物流行病学建模的背景下，这些主体代表种群中的植物，以及它们彼此之间和与环境之间的交互。与其他数值方法相比，ABS 的一个优势在于，它能够轻松地整合和评估个体的决策过程及其非对称特性，使模拟结果更接近现实情境 [102, 103, 104]。本节介绍所提出的流行病学—生态学—经济学模型的 ABS 实现，随后介绍咖啡叶锈病防控的优化。

4.1 基于智能体的模拟

单个咖啡农场种群中的每棵咖啡树均由一个有限状态机表示 [105]，其中咖啡树的状态定义为式 (1) 中的各个量，以及表示其在物理空间 [39] 中位置的二维向量 $(x,\ y)$。形式上，每棵咖啡树均由一个元组 $\tau := (H,\ L,\ I,\ J,\ U,\ B_p,\ B_r,\ x,\ y)$ 表示。

受 [106], 启发，我们按如下方式实现模拟：整个种群遵循离散全局时钟，并按轮次 $t \in [1,T]$ 运行，使得 $T < \infty$。在模拟开始时（$t = 1$），种群被设定为外部定义的初始条件。生态过程也在模拟开始时由外部定义，并设定为大小为 T 的向量。每轮 t 都会进行以下三个过程：首先，对每棵树执行树级流行病学动态（式（1））；随后执行农场级流行病学动态（式（9））；从而更新种群中咖啡树的状态。感染动态按照 [107] 提出的方法，以成对方式实现。接着，按照下文所述，应用任何选定实施的 PIP。最后，更新累计利润。

4.2 咖啡叶锈病防控

请注意，咖啡农场可随时更改已实施的植物病害干预措施（PIP）。因此，为了允许实施可调整的植物病害干预措施（PIP），我们将农场主的决策过程视为在 T 轮中进行的马尔可夫决策过程（MDP）[108]。具体而言，在每个时间步 t，都会观测到一个给定状态，其中包含以下信息：第 t 轮时模拟的状态、第 t 轮实施植物病害干预措施（PIP）可用的资金数额、一个估算的生态因素向量（$C_T,\ C_H,\ C_R$），由（$C'_T,\ C'_H,\ C'_R$）捐赠，大小为 $\psi > 0$，持续时间为 $[t, t+\psi]$，满足 $\forall i,\ j \in [t, t+\psi] \wedge a \in [T,H,R]:\ \ i \le j \leftrightarrow ||C'_a(i) - C_a(i)|| \le ||C'_a(j) - C_a(j)||$。然后，农场主需要选择一个动作，动作空间由所考察的三种植物病害干预措施（PIP）的所有组合构成（见第 3.3 节），并由它们组合后的参数空间定义。农场主旨在最大化以下多目标奖励函数：

$$R(t) := w_1 \sum_{i=1}^{t} O(i) - w_2 \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{t} R_0(i), \tag{22}$$

其中，$O(t)$ 是第 t 轮农场的经济利润，而 $R_0 := \big(I(t) - I(t-1) + R(t) - R(t-1)\big)/I(t-1)$ 是第 t [109, 110, 111, 112, 113] 轮咖啡叶锈病疫情的再生数。此外，$w_1,\ w_2 \in \mathbb{R}^+$ 是用于平衡各要素重要性的权重。最后，转移函数遵循上述生态—流行病学动态。

我们使用深度强化学习（DRL）智能体来近似最优 PIP策略。为训练该智能体，我们采用了 [114] 提出的 ABS-RL（SiRL）方法，并使用了范围广泛的初始条件、生态动态和参数。智能体的投入包括农场的流行病学状态、可用资金的数量

用于咖啡叶锈病防控，以及距离年末的天数。随后，它会将各项 PIP 的参数作为一项操作返回。有关深度强化学习智能体训练过程的完整细节，请参见补充代码。

需要注意的是，农场的流行病学状态可通过以下两种方式之一获得：第一，在完全可观测疫情 选项中，可以获取农场流行病学状态的准确信息。第二，在 α-部分可观测疫情 选项中，从各自的咖啡树种群中随机抽取比例为 α 的一部分树木，并据此估算整体流行病学状态。对于 $\alpha = 1$，这两种方式自然会趋于一致。由于农场主无法在每个时间点抽样或监测所有树木，甚至无法监测其中的大多数，因此，$0 < \alpha << 1$ 似乎是更现实的设定，这使得两种方式存在显著差异。

5 分析

本节将使用前文提出的模型和模拟，对哥伦比亚小型咖啡农场的案例进行分析。请注意，哥伦比亚是全球第二大咖啡生产国，其咖啡农场大多规模较小。我们首先概述分析中采用的流行病学、生态学和经济学参数值，这些数值基于历史记录及以往文献中的数据。接下来，我们开展三个层面的分析：基线动态、参数敏感性和最优控制。具体而言，首先确定咖啡农场在未采取防治措施时所面临的流行病学和经济后果；其次，探究模型所用的若干核心参数与咖啡农场产出之间的关联；最后，评估农场主通过实施智能咖啡叶锈病防控策略维持利润的能力。

5.1 设置

在哥伦比亚，咖啡的生长季约为 8 个月，具体时长取决于此期间的生态参数。咖啡农场通常需要约 4 个月才能完成收成，且咖啡树每年收成一次 [4]。因此，我们将一个时间步定义为 $\delta t = 1\ day$ 和 $T = 365\ days = 1\ year$。具体而言，我们假设在 $t_h = 275$ 开始收成，并在 $T_h = 90$ 天内均匀进行收成（即 3 个月）；通常第一个月被视为阶段转换期，与该阶段其余时间相比，实际收成较少。预计其他国家和地区的咖啡生长周期也类似，但这些周期对环境差异非常敏感，在分析中应予以考虑。我们计划在未来的研究中分析更多国家和地区。

为捕捉咖啡叶锈病疫情的传播速度，我们使用基本再生数指标 [115]。同时，为衡量经济动态随时间的变化，我们使用归一化经济产出指标，其定义为 $O(t)/O(0)$。

5.1.1 流行病学设定

为了使用模型中的流行病学部分，平均参数值取自先前的文献，汇总见表1。根据哥伦比亚咖啡种植者联合会的数据，哥伦比亚咖啡生产每公顷种植5,243棵咖啡树；假设没有咖啡树感染咖啡叶锈病疫情，每公顷咖啡树的生产力为21.4袋、每袋60千克的咖啡豆。我们利用这些数据推算咖啡果的平均生长率[5]。

5.1.2 生态环境设定

农场主可以完全知晓随时间变化的天气 $C(t)$，也可以使用某种预报模型进行预测。因此，我们分别定义了完全可观测天气和基于模型的天气两种情形。具体而言，我们使用一种遵循标准 SARIMA 模型 [116] 的天气预报模型，该模型基于哥伦比亚 2011年-2021[6]年的真实逐日天气数据（即温度、湿度和降雨）进行训练。

[4] https://easyhomecoffee.com/does-coffee-grow-all-year-round/ [5] https://federaciondecafeteros.org/wp/coffee-statistics/?lang=en [6] 数据来源：https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/climatePredictions/colombia_colombia_3686120

5.1.3 经济设定

规模经济出现在成本表现出凹性的区间。规模经济的一个方面是“0.6 规则” [117]。该规则描述了生产成本的增加 TC 与生产量的增加 $v \in V$ 之间的关系，具体表示为（TC_v/TC_{v+1}） = （Q_v/Q_{v+1}）$^{\alpha}$，其中α 表示规模系数。 α 的值小于 1，意味着规模报酬递增。$\alpha = 0.6$ 的值常被用作经验法则，以根据与产能水平 Q_v相关的成本 TC_v，估算产量水平 Q_{v+1} 对应的成本。“0.6 规则”指出，提高产量水平后，新水平对应的成本低于此前水平的成本，这意味着扩大产能可以节约成本。这一经验法则常用于估算扩大产能的成本，其依据是：产能增加时，由于规模经济，新增产能的成本会降低。这是因为产能水平提高后，较高产能所对应的固定成本会分摊到更多的生产单位上。

2019年年底，咖啡作物的价值为7.2万亿比索（即按同年平均汇率计算为22亿美元）[7]。因此，如果考虑从1公顷增加到2公顷时成本的增幅，并假设表3所示成本适用于第1公顷，且咖啡袋数量将从21.4增加到42.8，那么当规模系数 α 为0.6时，根据规则（TC_v/TC_{v+1}） = （Q_v/Q_{v+1}）$^{\alpha}$，总成本将增加11711美元，达到5028.8美元。然而，这些成本仅适用于没有咖啡叶锈病暴发的季节。在这种情况下，还需将咖啡叶锈病清除成本计入总成本。根据 [118], ，这项成本为每英亩90至472美元；使用背负式喷雾器时，劳动力成本为每小时15至20美元，使用拖拉机喷雾器时则为每小时40美元。整个季节监测咖啡叶锈病的成本为150至175美元，按每次每小时25美元、进行6至7次咖啡叶锈病调查计算。整个咖啡季节管理咖啡叶锈病的总成本为每英亩（0.4公顷）450至1167美元。不过，这些成本适用于夏威夷（美国）。若以哥伦比亚与美国的人均国内生产总值之比衡量价格差异，得出的比率为8.7%[8]。因此，预计哥伦比亚的成本为每英亩39至102美元，即每公顷98至255美元。为简化计算，我们假设最高金额适用于1公顷，且随着公顷数增加，成本将按每增加1公顷线性递减2.5美元，直至达到每公顷98美元的最低值。

据 Fedecafe[9], 称，哥伦比亚有近543,000个咖啡种植家庭。其中，96%为小型种植户（土地面积不足5公顷），3%为中型种植户（土地面积在5至10公顷之间），1%为大型种植户（土地面积超过10公顷）[10]。

据美国农业部（USDA）[11] , 统计，2021年种植密度为每公顷5,268棵树，生产力为每公顷19.3袋生豆当量（GBE）；哥伦比亚目前的总生产潜力估计为1,470万袋，近几年的平均产量约为1,400万袋。咖啡豆出口占哥伦比亚出口总额的90%以上，其次是速溶咖啡和烘焙咖啡。文中还提供了更细分的类别，例如具体的劳动任务和投入品类型。若计入所有经济成本，2015/16年每公顷平均成本为3,318美元。其中，57%（1,908美元）为雇佣劳动力成本，18%（586美元）为无偿劳动力成本，16%（519美元）为投入品成本，9%（305美元）为固定成本。表3汇总了完全经济成本。

在哥伦比亚，国家咖啡种植者委员会 (FNC)[12] 负责销售大部分商业咖啡作物，并设定咖啡的“每卡加”价格。这个术语指的是 125 千克带壳咖啡，经干燥前加工厂处理，并假定咖啡品质完好。每卡加生咖啡价格会随市场波动；截至本文撰写时，国内参考价格为 2.160 哥伦比亚比索（约合 440.43 美元）。不过，这些价格仅适用于合作社在城镇直接向生产者采购的标准咖啡，不包含任何品质奖励。对于评分较高的精品咖啡，价格依据从生产者处获得的报价制定，并在每卡加价格的基础上加价 10% 至 30%。生产者会将运营成本和研发成本（更先进的咖啡加工工艺需要经过多次试验才能完善）纳入考量来计算价格。不过，低等级咖啡豆每 125 千克的价格为 60.000 哥伦比亚比索（约合 12.23 美元）。

[7]https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/colombian-coffee-production-closed-2019-at-14-8-million-bags/?lang=en [8]https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?locations=CO [9]https://federaciondecafeteros.org/[10]近年来，大型外国投资者已开始在哥伦比亚生产咖啡，并购买了数千公顷土地用于生产，因此这些数据在可预见的未来可能会发生变化。

[11]https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Coffee%20Annual_Bogota_Colombia_CO2022-0010.pdf

[12] https://thosecoffeepeople.com/how-much-are-green-coffee-beans/

每公顷成本类别	价值
有偿劳动力	1,907.92
修剪和除草劳动	245.13
施肥劳动	75.39
喷药劳动	48.99
收获人工	1,538.41
无偿劳动力	586.11
修剪和除草劳动	79.57
施肥劳动	27.24
喷药劳动	12.11
收获人工	467.19
投入品	519.18
除草剂	2.16
农药	22.46
肥料	494.57
固定成本	304.59
安装成本	40.80
机械折旧	112.93
土地机会成本	97.50
融资成本	53.36
完全经济成本	3,317.80

表3：2015/16年每公顷平均生产成本（美元）。这些数值取自 [72]。

5.2 基线动态

首先，我们模拟咖啡叶锈病疫情期间一个季节内咖啡农场的流行病学动态和经济动态。我们选取 $n_f = 100$ 个农场，这些农场的规模、树木密度和初始资金各不相同，并针对每个农场进行了 $n_i = 100$ 次模拟；由于模拟具有随机性，每次模拟的结果均有所不同。流行病学模型的初始条件设定为与 [24]一致。图 3 展示了依据 [119] 提出的方法为每个农场所得的结果。我们总共进行了 $n = n_f \cdot n_i = 10000$ 次模拟，以尽可能全面地获取具有代表性的一组结果。图 3 总结了这些结果：横轴表示模拟开始后的时间，起点为上一季收成结束时。红线的左侧纵轴表示再生数 ($R_0(t)$)，蓝线的右侧纵轴表示归一化经济产出 ($O(t)/O(0)$)。请注意，在此分析中，我们假定农场主不会采取任何 PIP 措施来应对咖啡叶锈病疫情。

可以观察到，在咖啡树生长期，经济产出呈线性下降，这是因为假设支出均匀分布。在收获期，咖啡会被出售，经济产出则以次线性的方式增长（即增长速率低于源变量的线性增长速率）。在没有大流行的情况下，由于假设收获以固定速率进行，这一阶段的增长是线性的。然而，在这一阶段死亡或感染咖啡叶锈病的树木会随着线性收获的进行而逐渐减少，从而导致次线性动态。可以注意到，在最低点，经济产出达到 -0.96，这意味着此时仅剩初始资金的 4%。此外，在 $t = T$，经济产出约为 -8.5%，相较于 $O(o)$，这意味着农场主在季末损失了大量资金，若没有外部援助或贷款，便无法维持经营。相应地，基本再生数呈现振荡行为，这是具有此类动态的生态信号共同作用的结果。此外，在一年中的旱季（大约从 4 月到 10 月），基本再生数平均低于雨季（大约从 10 月到次年 4 月）。

5.3 咖啡叶锈病最优控制

为研究在资金有限的情况下，深度强化学习智能体执行最优疫情控制的能力，我们使用 $n_{train} = 10000$ 次随机模拟对智能体进行训练，每次采用不同的动作空间配置，具体如下。随后，我们在相同的 $n_{eval} = 100$ 农场上比较所有智能体的结果，并报告

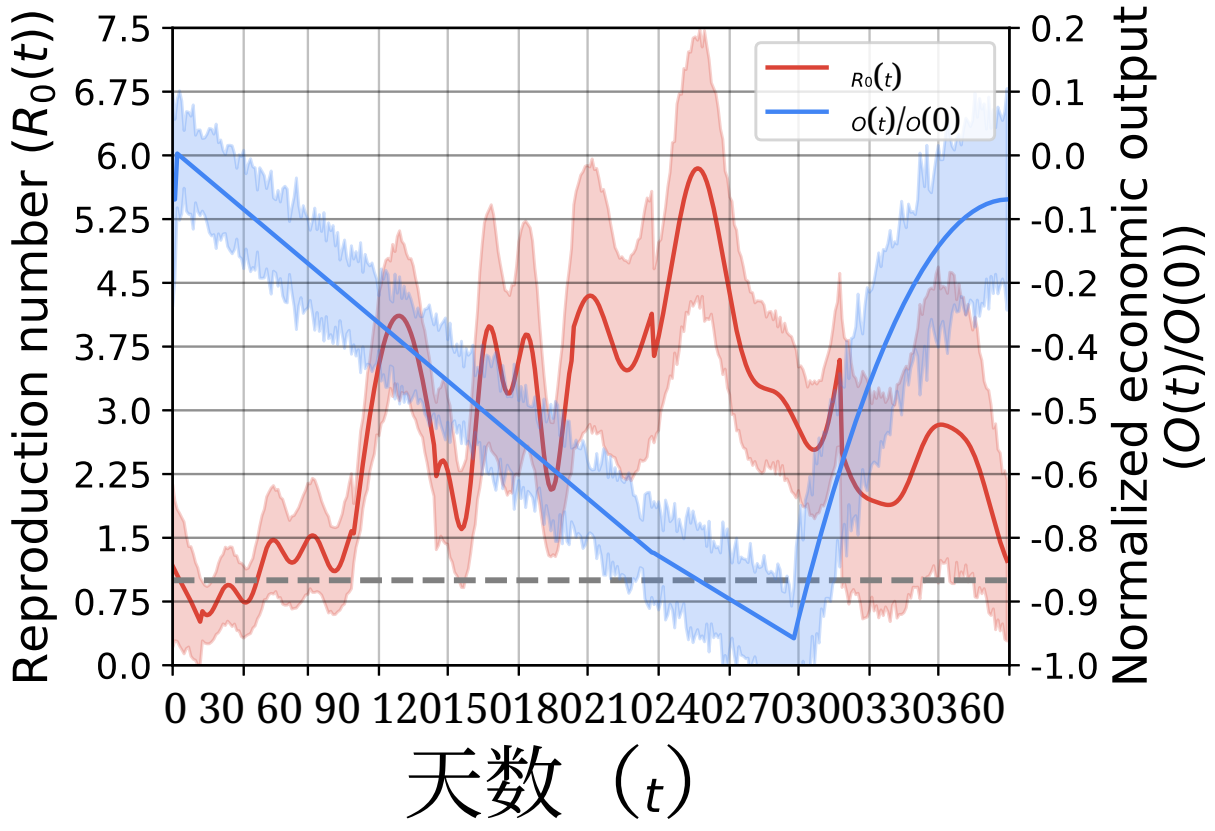


图3：在没有采取任何咖啡叶锈病防控措施的情况下，单个季节（一年）内流行病学和经济过程的基线动态。结果显示为 ± 标准差结果的均值（ $n = 10000$次重复），其中划分为100个独立农场，每个农场有100次交互。

结果为标准化季节利润（NSP）的均值 ± 标准差，表示为 $NSP := {}^{O}{}_{(t)-O(0)}\ O(0)$ 。我们针对三种不同配置重复这一完整过程。第一种是完全可观测疫情和完全可观测天气；第二种是完全可观测疫情和基于模型的天气；最后一种是 α部分可观测疫情和基于模型的天气，其中 $\alpha = 0.05$。作为比较，我们考察了七种配置：“基线”配置不采用任何植物病害干预措施；“随机”配置随机采用植物病害干预措施（即不使用深度强化学习智能体）；“仅 SCS”、“仅遮荫”和“仅 BC”配置分别表示深度强化学习智能体只能使用 SCS、遮荫和 BC。“SCS +遮荫”配置表示深度强化学习智能体可以同时采用 SCS 和遮荫植物病害干预措施。最后，“通用”配置表示深度强化学习智能体可以采用全部三种植物病害干预措施。图4展示了这项分析的结果，分为三种情况。值得注意的是，对于最后一种情况（c），也就是可能最贴近现实的情况，所有动作空间配置的平均 NSP 都为负值。

5.4 敏感性分析

为了评估流行病学和经济动态对农场主 NSP 的影响，我们在 α-部分可观测大流行及基于模型的天气代理这一现实假设下计算了模型的敏感性，其中 $\alpha = 0.05$。为此，我们测试了平均感染率、平均病原体侵袭性、咖啡成本和劳动力成本，如图 5.4 所示；横轴表示参数值，纵轴表示 NSP。结果以 $n = 100$ 个不同咖啡农场的均值 ± 标准差表示。参数值范围确定如下。对于流行病学参数，我们采用了 10% 的数值，参考了 [39]。经济参数值依据 2021 年 8 月至 2022 年 8 月期间一 carga（125 千克一袋的生咖啡豆）的价格确定（这是该网站上能找到数据的最后一个月份。）

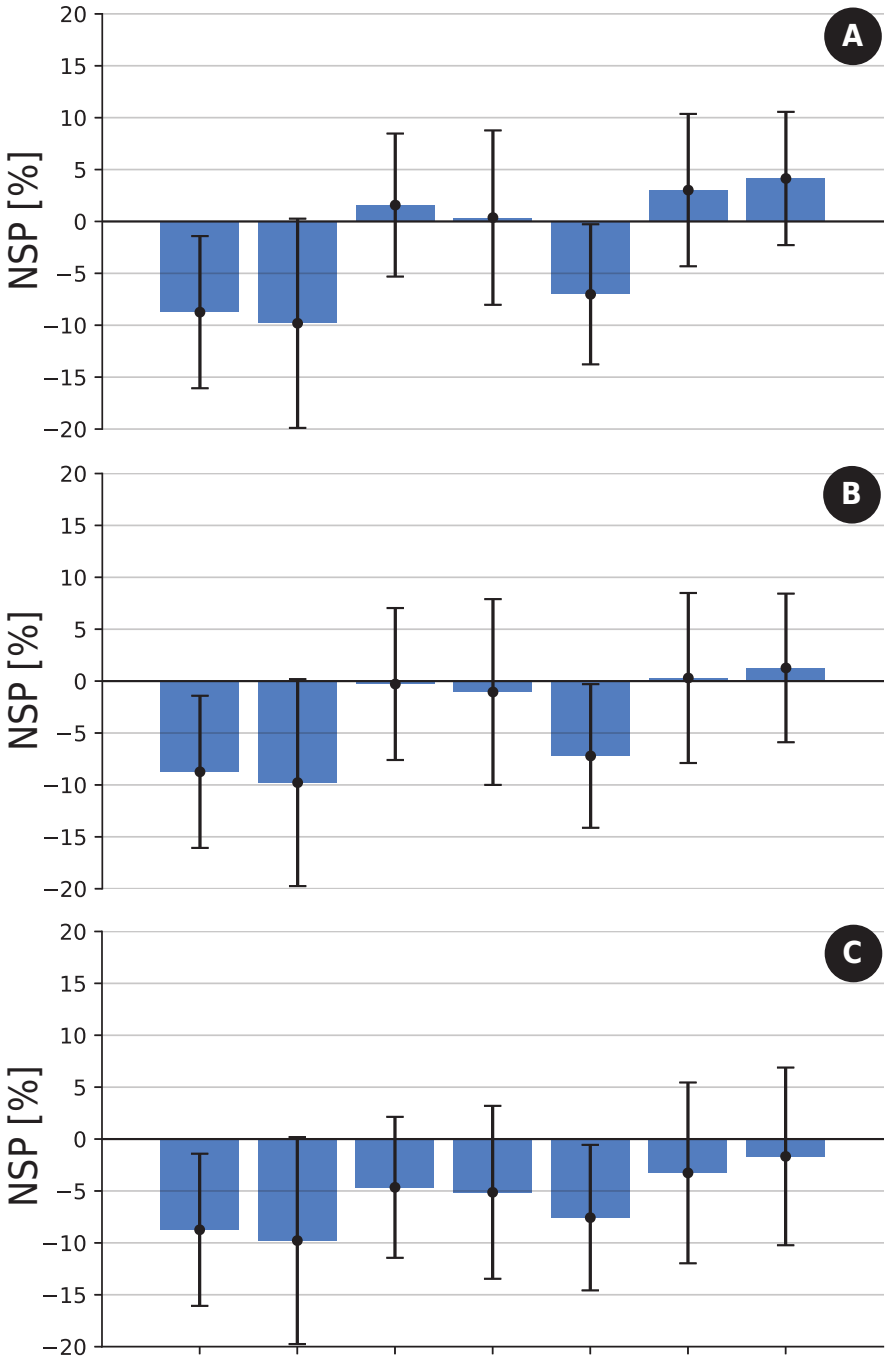
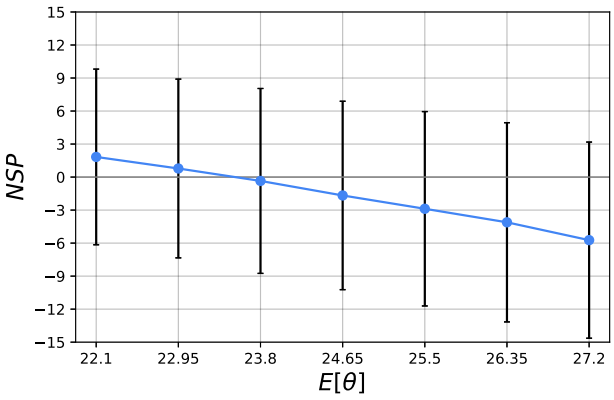
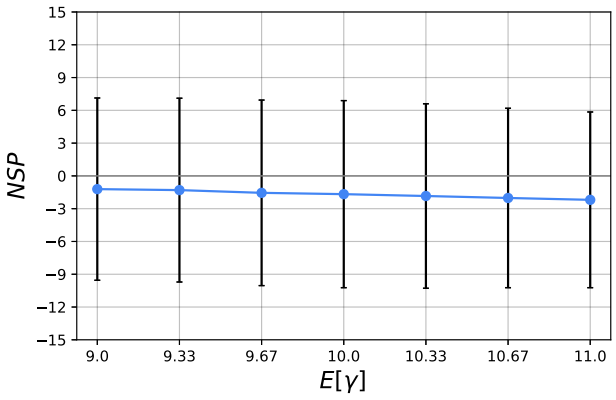


图4：深度强化学习智能体针对几种不同PIP配置所获得的NSP比较。结果以 $n = 100$ 次重复实验的均值 $\pm$ 标准差表示。(a) 完全可观测疫情和完全可观测天气。(b) 完全可观测疫情和基于模型的天气。(c) α-部分可观测疫情和基于模型的天气，其中 $\alpha = 0.05$。

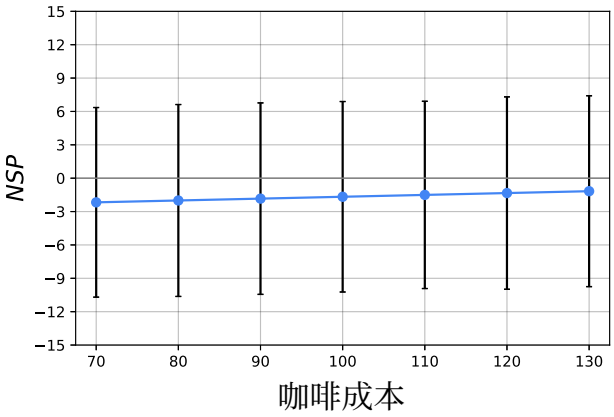
国家咖啡种植者委员会[13]），每月价格变动幅度介于下降10%至上涨12%之间。此外，鉴于劳动力成本对利润的重要性，我们将考察雇用工人成本在每年变动10%的范围内的变化。基础成本1,907.92$取自表3。



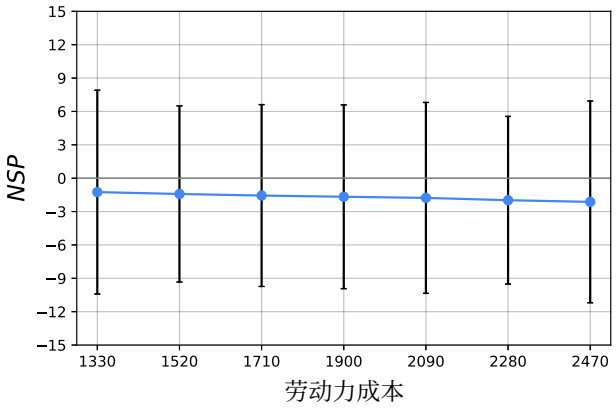
(a) 平均感染率（$E[\theta]$）。



(b) 平均病原体侵袭性（$E[\gamma]$）。



(c) 咖啡成本。



（d）劳动力成本。

图5：针对系统主要流行病学和经济属性的NSP敏感性分析。结果显示为 α-部分（$\alpha = 0.05$）可观测大流行和基于模型的天气深度强化学习智能体情况下， $n = 100$ 次重复实验的均值 $\pm$ 标准差。

6 讨论与结论

在本研究中，我们开发了一个高分辨率数学模型及相应的模拟，用于分析有效的咖啡叶锈病管理政策能否为小型咖啡农场主带来可持续的利润。我们的分析基于真实世界数据、既有文献以及先进的建模和优化技术，结果表明，遗憾的是，答案大多是否定的。

从基线分析开始，我们的研究确立了大流行随时间的传播与其对经济产出的影响之间的联系。平均而言，图3显示，如果农民完全不实施任何咖啡叶锈病管理措施，他们平均会损失约8.5%的资金。在这一情景下，87%的农民到年底甚至无法实现盈亏平衡。这些结果似乎与历史数据 [24, 80]一致。

在现实情境中采用先进的人工智能代理，通过实施咖啡叶锈病管理政策来优化经济结果时，大多数农民仍然亏损，如图4(C)所示。在假设情境中，如果能够完全观测流行病学状态和/或准确预测

[13]咖啡统计 - 哥伦比亚国家咖啡种植者联合会（federaciondecafeteros.org）

时间环境动态，代理在使用全部三种植物病害干预措施时可以带来一定的利润，尽管幅度不大，如图4(A)和(B)所示。

根据敏感性分析，在合理改变参数的情况下，我们的主要结果似乎具有稳健性。

综上所述，我们令人担忧的结果应被农民和其他利益相关者视为采取行动的号召。具体而言，据 World Coffee Research 统计，迄今已有170万名咖啡工人因咖啡叶锈病疫情失业。我们的分析似乎表明，这并非一个短暂阶段，而是当前咖啡市场背后经济—流行病学动态中一个固有的复杂问题。如果不采取直接行动，小型咖啡农场很可能会崩溃。

尽管如此，所提出的模型并非没有局限性。与现实中的大多数情况不同，我们假设农场主使用可用资金承担植物病害干预措施的成本，而不从政府获得贷款或财政援助。因此，在未来的研究中，可以引入预算、税收和利息等其他因素，使模型更加现实，并纳入一个更严谨的经济模型，其中包含具有不同目标和动作空间的多类参与者 [106]。此外，近期培育出的抗锈病性更强的咖啡树可能会显著改变咖啡叶锈病疫情的传播。考虑不同类型的咖啡树及其相关特性，将有助于研究这一新颖的行动路径。对所提出模型的另一项可能扩展，是整合比我们所使用的种群随机样本更复杂的抽样策略 [120]。此外，本研究关注的是单个季节（或年份）的咖啡叶锈病。然而，在某一年施用的植物病害干预措施可能会对后续年份产生显著影响。因此，探索将模拟扩展至多年和多农场设置的效果，可能会进一步揭示咖啡叶锈病疫情的动态。最后，导致咖啡叶锈病疫情的病原体会自然发生突变，这与其他病原体一样，可能形成多菌株植物疫情。将本研究提出的流行病学子模型加以扩展，以描述多菌株甚至多重突变动态，例如 [121], ，将更真实地呈现现代锈病大流行。最后，由于所得结果并非线性可扩展的，大型农场并不一定意味着结果会相似，甚至不一定会朝着相同的变化方向发展。因此，对其他市场设置进行研究，需要重新配置并分析所提出的模型。

声明

资金

本研究未获得公共部门、商业部门或非营利部门资助机构提供的任何专项拨款。

利益冲突／竞争性利益

作者声明无须披露任何利益冲突。

数据可用性

所有数据 用于本研究的数据均可公开获取，相关来源已注明。

作者贡献

Teddy Lazebnik：概念构思、方法设计、软件、形式分析、调查、资源管理、数据整理、初稿撰写、可视化、项目管理。Ariel Rosenfeld：验证、审阅与编辑。Labib Shami：概念构思、方法设计、数据整理、初稿撰写。

参考文献

[1] M. Pendergrast.《Uncommon Grounds: 咖啡的历史及其如何改变了我们的世界》。载于：*BasicBooks* （2010年）。

[2] M. Hirons、Z. Mehrabib、T. A. Gonfac、A. Morelad、T. W. Golec、C. McDermotta、E. Boyde、E. Robinsonf、D. Shelemec、Y. Malhia、J. Masong 和 K. Norrisc。“在埃塞俄比亚推动气候韧性咖啡生产——一项批判性综述”。载于：Geoforum 91（2018年），第108–116页。[3] 精品咖啡协会。《价格危机应对倡议：工作总结》。2019年。URL：https:// static1 . squarespace . com / static / 584f6bbef5e23149e5522201 / t / 5ebd4d5f1e9467498632e0b8 / 1589464434242/AW_SCA_PCR_Report 2020+-+December+2019+-+Update+May+2020.pdf。[4] S. Geiger-Oneto 和 E. J. Arnould。“替代贸易组织与主观生活质量：拉丁美洲咖啡生产者案例”。载于：Journal of Macromarketing 31.3（2011年），第276–290页。[5] R. Negash。“公平贸易咖啡认证对小农生产者的影响：综述论文”。载于：Global Journal of Management and Business Research 16.5（2016年），第33–39页。[6] J. Avelino、M. Cristancho、S. Georgiou、P. Imbach、L. Aguilar、G. Bornemann、P. Laderach、F. Anzueto、A. J. Hruska 和 C. Morales。“哥伦比亚和中美洲的咖啡锈病危机（2008–2013年）：影响、可能原因及拟议解决方案”。载于：Food Security 7（2017年），第303–321页。[7] C. Bilen、D. El Chami、V. Mereu、A. Trabucco、S. Marras 和 D. Spano。“气候变化对咖啡农业生态系统影响的系统综述”。载于：Plants 12.1（2023年）。[8] K. Sarirahayu 和 A. Aprianingsih。“提高小农咖啡种植者生产力的策略”。载于：The Asian Journal of Technology Management 11.1（2018年），第1–9页。[9] R. Villarreyna、M. Barrios、S. Vilchez、R. Cerda、R. Vignola 和 J. Avelino。“经济制约因素是尼加拉瓜咖啡锈病流行的驱动因素”。载于：Crop Protection 127（2020年），第104980页。[10] J. Kolmer、M. Ordonez 和 J. Groth。“锈菌”。载于：eLS（2009年）。[11] E. Millard。“大宗商品供应链中小农和中小企业的价值创造”。载于：Enterp. Dev. Microfinance 28（2017年），第63–81页。[12] D. Batista、L. Guerra-Guimaraes、P. Talhinhas、A. Loureiro、D. A. Silva、L. Gonzalez、A. P. Pereira、A. Vieira、H. Azinheira、C. Struck、M. do Ceu Silva、O. S. Paulo 和 V. Varzea。“利用分子标记分析咖啡驼孢锈菌的种群遗传多样性与分化”。载于：第23届国际咖啡科学会议（2010年），第3–8页。[13] A. F. de Souza、L. Zambolim、V. C. de Jesus Junior 和 P. R. Cecon。“滴灌树木咖啡叶锈病的化学防治方法”。载于：Australasian Plant Pathology 40（2011年），第293–300页。[14] S. J. Martins、A. C. Soares、F. H. V. Medeiros、D. B. C. Santos 和 E. A. Pozza。“寄主和环境因素对田间条件下咖啡锈菌重寄生的影响”。载于：Australasian Plant Pathology 44（2015年），第605–610页。[15] L. Soto-Pinto、I. Perfecto 和 J. Caballero-Nieto。“咖啡遮荫：对恰帕斯（墨西哥）的咖啡果小蠹、叶锈病和自生草本植物的影响”。载于：Agroforestry Systems 55（2002年），第37–45页。[16] V. Valencia、L. Garcia-Barrios、E. J. Sterling、P. West、A. Meza-Jimenez 和 S. Naeem。“小农对环境变化的应对：墨西哥森林边缘地带咖啡叶锈病的影响”。载于：Land use policy 79（2018年），第463–474页。[17] J. A. M. Bedimo、I. Njiayouom、D. Bieysse、M. Ndoumbe Nkeng、C. Cilas 和 J. L. Nott´eghem。“遮荫对阿拉比卡咖啡浆果病发展的影响：构建农林复合系统以减轻疾病影响”。载于：Phytopathology 98.12（2008年），第1320–1325页。[18] C. L. R. Vegro 和 L. F. de Almeida。“第1章——全球咖啡市场：社会经济和文化动态”。载于：《巴西的咖啡消费与产业战略》。Luciana Florencio de Almeida 和 Eduardo Eugenio Spers 编。Woodhead Publishing，2020年，第3–19页。[19] D. Nestel。“墨西哥的咖啡：国际市场、农业景观与生态学”。载于：Ecological Economics 15.2（1995年），第165–178页。[20] K. Austin。“咖啡出口作为生态、社会和物质不平等交换：对爪哇贸易的跨国调查”。载于：International Journal of Comparative Sociology 53.3（2012年），第155–180页。[21] K. Watson 和 M. L. Achinelli。“背景与偶然因素：巴西传统小规模咖啡种植者面临的咖啡危机”。载于：The Geographical Journal 174.3（2008年），第223–234页。

[22] J. Arroyo-Esquivel、F. Sanchez 和 L. A. Barboza。“利用细菌抗真菌化合物对咖啡锈病进行生物防治的感染模型”。载于：《数学生物科学》307（2019年），第13–24页。[23] N. E. T. Castillo、Y. A. Acosta、L. Parra-Arroyo、M. A. Martinez-Prado、V. M. Rivas-Galindo、H. M. N. Iqbal、A. D. Bonaccorso、E. M. Melchor-Martinez 和 R. Parra-Saldivar。“迈向环保型咖啡锈病防治：从营养与抗真菌角度汇总天然替代方案”。载于：Plants 11（2022年），第2745页。[24] C. Djuikem、F. Grognard、R. T. Wafo、S. Touzeau 和 S. Bowong。“咖啡叶锈病动态建模以控制其传播”。载于：《自然现象数学建模》16（2021年），第26页。[25] J. Miller、T. M. Burch-Smith 和 V. V. Ganusov。“数学建模表明植物侵染病毒之间存在协作”。载于：Viruses 14.4（2022年），第741页。[26] N. Tromas、M. P. Zwart、G. Lafforgue 和 S. F. Elena。“植物病毒感染在细胞层面的宿主内时空动态”。载于：PLoS genetics 10.2（2014年），e1004186。[27] J. Kranz。《植物病害疫情：数学分析与建模》。第13卷。施普林格科学与商业媒体，2012年。[28] Y. Herskowitz、S. Bunimovich-Mendrazitsky 和 T. Lazebnik。“利用蜗牛作为生物防治因子控制咖啡树锈病的数学模型”。载于：Biosystems 229（2023年），第104916页。[29] M. Donatelli、R. D. Magarey、S. Bregaglio、L. Willocquet、J Whish 和 S. Savary。“害虫和疾病对农业系统影响的建模”。载于：Agricultural systems 155（2017年），第213–224页。[30] R. A. Taylor、E. A. Mordecai、C. A. Gilligan、J. R. Rohr 和 L. R. Johnson。“数学模型是理解和控制黄龙病传播的有力方法”。载于：PeerJ 4（2016年），e2642。[31] E. S. Allman、E. S. Allman 和 J. A. Rhodes。《生物学中的数学模型》。剑桥大学出版社，2004年。[32] P. K. Shaw、S. Kumar、S. Momani 和 S. Hadid。“具有治疗和预防措施的分数阶植物病害模型的动力学分析”。载于：《混沌、孤子与分形》164（2022年），第112705页。 ISSN：0960-0779。[33] C. A. Gilligan、S. Gubbins 和 S. A. Simons。“一种具有宿主对感染负荷响应的植物病害SIR模型分析与拟合”。载于：《伦敦皇家学会哲学汇刊B辑：生物科学》352.1351（1997年），第353–364页。[34] M. Meyer、J. A. Cox、M. D. T. Hitchings、L. Burgin、M. C. Hort、D. P. Hodson 和 C. A. Gilligan。“量化病原体跨大陆的空气传播途径，以保障全球小麦供应”。载于：Nature Plants 3.10（2017年），第780–786页。[35] N. J. Cunniffe、R. O. J. H. Stutt、R. E. DeSimone、T. R. Gottwald 和 C. A. Gilligan。“在流行病学存在不确定性的情况下，优化并传达入侵性植物病害的防控方案”。载于：PLoS computational biology 11.4（2015年），e1004211。[36] W. O. Kermack 和 A. G. McKendrick。“对流行病数学理论的贡献”。载于：Proceedings of the Royal Society 115（1927年），第700–721页。[37] N. Anggriani、M. Yusuf 和 A. K. Supriatna。“杀虫剂对水稻东格鲁病媒介的影响：数学模型带来的启示”。载于：International Information Institute (Tokyo). Information 20.9A（2017年），第6197–6206页。[38] J. C. Marques、A. CEZARO 和 M. J. Lazo。“具有空间分布的多种群交互作用的SIR疾病传播模型”。载于：《计算与应用数学趋势》23（2022年），第143–154页。[39] T. Lazebnik。“驯化田地植物大流行期间的成本最优播种策略”。载于：arXiv（2023年）。[40] M. Martcheva。“一种非自治多菌株SIS流行病模型”。载于：Journal of biological dynamics 3.2-3（2009年），第235–251页。[41] N. Motisi、J. Papaix 和 S. Poggi。“遮荫的阴暗面：小气候如何驱动咖啡果病的流行病学机制”。载于：Phytopathology 112.6（2022年），第1235–1243页。

[42] R. M. Nair、V. N. Boddepalli、M-R. Yan、V. Kumar、B. Gill、R. S. Pan、C. Wang、G. L. Hartman、R. Silva e Souza 和 P. Somta。“蔬菜大豆全球状况”。载于：Plants 12.3（2023年）。[43] A.T. Tschanz 和 S. Shanmugasundaram。“大豆锈病”。载于：《第三届世界大豆研究会议：论文集》。CRC出版社。2022年，第562–567页。[44] E. M. Del Ponte、C. V. Godoy、M. G. Canteri、E. M. Reis 和 X. B. Yang。“亚洲大豆锈病流行的风险评估与预测模型及其应用”。载于：《巴西植物病理学》31（2006年），第533–544页。[45] M. A. Cristancho、Y. Rozo、C. Escobar、C. A. Rivillas 和 A. L. Gaitan。“哥伦比亚咖啡叶锈病（咖啡驼孢锈菌）暴发”。载于：《新发疾病报告》25.19（2012年），第2044–0588页。[46] J. A. Bruhn 和 W. E. Fry。“通过模拟建模分析马铃薯晚疫病的流行病学”。载于：Phytopathology 71.6（1981年），第612–616页。[47] C. Ferris 和 A. Best。“时间波动对寄主耐受寄生性的进化的影响”。载于：《理论种群生物学》130（2019年），第182–190页。 ISSN：0040-5809。 DOI：https : // doi.org/10.1016/j.tpb.2019.07.015。[48] B. Quetglas、D. Olmo、A. Nieto、D. Borr`as、F. Adrover、A. Pedrosa、A. Montesinos、Juan de Dios Garcia、M. L`opez、A. Juan 和 E. Moralejo。“巴利阿里群岛木尔氏菌防控策略评估”。载于：《微生物》10.12（2022年），第2393页。[49] E. A. Ampt、J. van Ruijven、M. P. Zwart、J. M. Raaijmakers、A. J. Termorshuizen 和 L. Mommer。“植物邻体可能促成或阻断真菌根部病原体的疾病传播链”。载于：《新植物学家》233.3（2022年），第1303–1316页。[50] F. Fabre、J. B. Burie、A. Ducrot、S. Lion、Q. Richard 和 R. Djidjou-Demasse。“用于预测产孢病原体在异质环境中对数量抗性的适应的流行病学—进化模型”。载于：《进化应用》15.1（2022年），第95–110页。[51] D. P. Bebber、T. Holmes 和 S. J. Gurr。“作物害虫和病原体的全球传播”。载于：《全球生态学与生物地理学》23.12（2014年），第1398–1407页。[52] T. Abraha、F. Al Basir、L. L. Obsu 和 D. F. M. Torres。“通过提高农业意识防治害虫：时滞的影响及生物农药的优化使用”。载于：《混沌、孤子与分形》146（2021年），第110869页。[53] D. R. A. Sanya、S. F. Syed-Ab-Rahman、A. Jia、D. On´esime、K.M. Kim、B. C. Ahohuendo 和 J. R. Rohr。“水稻细菌性叶枯病防控方法综述”。载于：《世界微生物学与生物技术杂志》38.7（2022年），第113页。[54] L. Yu、C. Yang、Z. Ji、Y. Zeng、Y. Liang 和 Y. Hou。“中国东南部首次报告由菠萝泛菌引起的新型水稻细菌性叶枯病”。载于：《植物病害》106.1（2022年），第310页。[55] J. Avelino、M. Cristancho、S. Georgiou、P. Imbach、L. Aguilar、B. Gustavo、P. Laderach、F. Anzueto、A. J. Hruska 和 C. Morales。“哥伦比亚和中美洲的咖啡锈病危机（2008-2013年）：影响、可能的成因及拟议解决方案。”载于：Food Security 7（2015年），第303–321页。[56] D. C. Corrales、A. Figueroa、A. Ledezma 和 J. C. Corrales。“用于检测哥伦比亚作物咖啡锈病的经验多分类器”。载于：《计算科学及其应用—ICCSA 2015：第15届国际会议，2015年6月22–25日，加拿大艾伯塔省班夫，论文集，第一部分15》。施普林格。2015年，第60–74页。[57] N. Motisi、F. Ribeyre 和 S. Poggi。“咖啡树形态结构及其与小气候的交互作用驱动咖啡树咖啡果病的动态”。载于：《科学报告》9.1（2019年），第2544页。[58] D. C. Corrales、A. F. Casas、A. Ledezma 和 J. C. Corrales。“用于估计哥伦比亚作物咖啡锈病的两级分类器集成”。载于：《国际农业与环境信息系统杂志》（IJAEIS）7.3（2016年），第41–59页。[59] R. N. Thompson 和 E. Brooks-Pollock。“传染病疫情的检测、预测与防控：对人类、动物和植物疫情暴发进行建模”。载于：《皇家学会哲学汇刊B辑：生物科学》374.1775（2019年），第20190038页。[60] A. S. Capucho、L. Zambolim、U. N. Lopes 和 N. S. Milagres。“中果咖啡康隆品种咖啡叶锈病的化学防治”。载于：Australasian Plant Pathol 42（2013年），第667–673页。

[61] K. Belachew, G. A. Senbeta, W. Garedew, R. W. Barreto, and E. M. Del Ponte. “海拔是咖啡叶锈病流行的主要驱动因素：埃塞俄比亚的大规模调查”。载于：《热带植物病理学》45 (2020年)，第 511–521 页。[62] D. F. L´opez-Bravo, E. de M. Virginio-Filho, and J. Avelino. “与全日照相比，在标准化果实负载条件下，遮荫有利于咖啡锈病发生”。载于：Crop Protection 38 (2012年)，第 21–29 页。[63] T. Liebig, F. Ribeyre, P. L¨aderach, H. M. Poehling, P. Van Asten, and J. Avelino. “海拔、微气候和遮荫系统对咖啡叶锈病的交互影响”。载于：《植物相互作用杂志》14.1 (2019年)，第 407–415 页。[64] F. M. DaMatta. “遮荫与无遮荫咖啡生产的生态生理限制：综述”。载于：《田间作物研究》86.2 (2004)，第 99–114 页。 ISSN：0378-4290。[65] A. B. Eskes. “光照强度对咖啡抵御咖啡驼孢锈菌的不完全抗性的影响”。载于：《荷兰植物病理学杂志》88 (1982)，第 191–202 页。[66] E. Rahn, T. Liebig, J. Ghazoul, P. van Asten, P. L¨aderach, P. Vaast, A. Sarmiento, C. Garcia, and L. Jassogne. “乌干达埃尔贡山沿海拔梯度实现咖啡农业生态系统可持续集约化的机遇”。载于：《农业、生态系统与环境》263 (2018年)，第 31–40 页。[67] J. Avelino, L. Willocquet, and S. Savary. “作物管理模式对咖啡锈病流行的影响”。载于：《植物病理学》53.5 (2004)，第 541–547 页。[68] J. Avelino, L. Willocquet, and S. Savary. “作物管理模式对咖啡锈病流行的影响”。载于：《植物病理学》53.5 (2004)，第 541–547 页。[69] R. Solis Leyva, R. Gonzales, and L. Arevalo. “秘鲁亚马孙地区两种咖啡品种的遮荫管理与修剪：对植物生长和叶锈病的影响”。载于：(2023年)。[70] A. M. Kawabata, S. Wages, and S. T. Nakamoto. “用于防治夏威夷咖啡叶锈病和咖啡果小蠹的修剪方法”。载于：(2022年)。[71] Andreu Mas-Colell. “完全竞争理论”。载于：计量经济学会专著 29 (1998)，第 16–32 页。[72] C. Saenger. “部分拉美国家咖啡种植的盈利能力——中期报告”。载于：国际咖啡组织：国际咖啡组织 (2019年)。[73] M. A. Rutherford and N. Phiri. “东非咖啡病虫害：技术与咨询手册”。载于：英国沃灵福德：国际农业与生物科学中心 (2006)。[74] Gustavo Hiroshi Sera, Carlos Henrique Siqueira de Carvalho, Juliana Costa de Rezende Abrah˜ao, Edson Amp´elio Pozza, Jos´e Braz Matiello, Saulo Roque de Almeida, Lucas Bartelega, and Deila Magna dos Santos Botelho. “巴西咖啡叶锈病：历史事件、现状与防治措施”。载于：《农学》12.2 (2022年)，第 496 页。[75] N. E. T. Castillo, E. M. Melchor-Martinez, J. S. O. Sierra, R. A. Ramirez-Mendoza, R. Parra-Saldivar, and H. M. N. Iqbal. “气候变化与咖啡锈病的早期发展——保护墨西哥有机栽培品种的防控策略综述”。载于：《整体环境科学》738 (2020年)，第 140225 页。[76] K. Rhiney, Z. Guido, C. Knudson, J. Avelino, C. M. Bacon, G. Leclerc, M. C. Aime, and D. P. Bebber. “疫情与咖啡生产的未来”。载于：《美国国家科学院院刊》118.27 (2021)，e2023212118。[77] R. W. Rayner. “咖啡锈病（咖啡驼孢锈菌 B. & Br.）的萌发与侵入研究”。载于：《应用生物学年鉴》49.3 (1961)，第 497–505 页。[78] J. M. Waller. “咖啡锈病——流行病学与防治”。载于：Crop Protection 1.4 (1982)，第 385–404 页。[79] K. R. Bock. “田间条件下咖啡驼孢锈菌夏孢子的传播”。载于：《英国真菌学会会刊》45.1 (1962)，第 63–74 页。[80] J.B. Burie, A. Calonnec, and M. Langlais. “葡萄园真菌病害入侵的建模”。载于：《生物系统数学建模》第二卷：流行病学、进化与生态学、免疫学、神经系统与大脑及创新数学方法 (2008)，第 11–21 页。

[81] A. Mummert and O. M. Otunuga. “随机 SEIRS 流行病模型的参数识别：流感案例研究”。载于：数学生物学杂志 79 (2019年)，第 705–729 页。[82] W. Wang. “具有时滞的 SEIRS 流行病模型的全局行为”。载于：应用数学快报 15.4 (2002年)，第 423–428 页。[83] Y. Nakata and T. Kuniya. “周期环境下某类 SEIRS 流行病模型的全局动态”。载于：数学分析与应用杂志 363.1 (2010年)，第 230–237 页。[84] C-H. Li, C-C. Tsai, and S-Y. Yang. “复杂异质网络中 SIRS 模型的疫情传播分析”。载于：《非线性科学与数值模拟通讯》19.4 (2014)，第 1042–1054 页。[85] J. E. Amaro, J. Dudouet, and J. N. Orce. “利用简单流行病学模型对 COVID-19 大流行进行全局分析”。载于：应用数学建模 90 (2021)，第 995–1008 页。[86] I. M. Longini, M. E. Halloran, A. Nizam, and Y. Yang. “使用抗病毒药物控制大流行性流感”。载于：美国流行病学杂志 159.7 (2004)，第 623–633 页。[87] A. E. Havens. “新品种种子的传播及其后果：哥伦比亚案例”。载于：Brill, 1975，第 93–111 页。[88] E. Wale. “农民如何为咖啡树分配土地？对埃塞俄比亚农场内保护和种子技术采用的启示”。载于：可持续农业杂志 34.3 (2010年)，第 270–291 页。[89] J. P. Rodriguez, A. I. Montoya-Munoz, C. Rodriguez-Pabon, J. Hoyos, and J. C. Corrales. “IoT-Agro：面向哥伦比亚咖啡农场的智慧农业系统”。载于：农业中的计算机与电子学 190 (2021)，第 106442 页。[90] E. D. Bongase. “气候变化对全球咖啡生产业的影响：综述”。载于：非洲农业研究杂志 12.19 (2017年)，第 1607–1611 页。[91] Y. Pham, K. Reardon-Smith, S. Mushtaq, andG. Cockfield. “气候变化与气候变率对咖啡生产的影响：系统综述”。载于：气候变化 156 (2019年)，第 609–630 页。[92] A. Adane and W. Bewket. “优质咖啡生产对埃塞俄比亚南部耶加雪菲小农适应气候变化的影响”。载于：气候变化战略与管理国际期刊 13.4 (2021)，第 511–528 页。[93] F. D. Hinnah, P. C. Sentelhas, C. A. A. Meira, and R. N. Paiva. “基于天气的咖啡叶锈病表观侵染率建模”。载于：国际生物气象学杂志 62 (2018年)，第 1847–1860 页。[94] E. Lasso, D. C. Corrales, J. Avelino, E. de Melo Virginio Filho, and J. C. Corrales. “通过特征选择方法发现有利于咖啡锈病发生的天气时段和作物属性”。载于：农业中的计算机与电子学 176 (2020年)，第 105640 页。[95] T. L. A. Dinh, F. Aires, and E. Rahn. “越南罗布斯塔咖啡产量的天气影响统计分析”。载于：环境科学前沿 10 (2022年)，第 820916 页。[96] M. Jayakumar, M. Rajavel, U. Surendran, G. Gopinath, and K. Ramamoorthy. “气候变率对印度咖啡产量的影响——基于湿热带喀拉拉邦长期咖啡产量数据的微观案例研究”。载于：气候变化 145 (2017年)，第 335–349 页。[97] 国际咖啡组织团队。全球咖啡贸易历史数据。URL：https://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics。[98] R. S. Olson and J. H. Moore. “TPOT：用于自动化机器学习的基于树的管道优化工具”。载于：自动机器学习研讨会。PMLR。2016，第 66–74 页。[99] X. Zeng and T. R. Martinez. “用于准确率估计的分布平衡分层交叉验证”。载于：实验与理论人工智能杂志 12.1 (2000)，第 1–12 页。[100] L. Tesfatsion. “基于主体的计算经济学：自下而上构建经济体”。载于：人工生命 8.1 (2002)。[101] J. D. Priest, A. Kishore, L. Machi, C. J. Kuhlman, D. Machi, and S. S. Ravi. “CSonNet：用于离散时间模拟的基于主体的建模软件系统”。载于：2021年冬季模拟会议 (WSC)。2021，第 1–12 页。

[102] C. Genre-Grandpierre 和 A. Banos。“利用 S3 探索城市道路网络的新型度量指标：基于智能体的仿真平台”。载于：实用多智能体系统进展。Q. Bai 和 N. Fukuta 编。2011年，第 267–285 页。[103] Z. Ying-chao、Y. Feng、Y. Qin-zhang 和 C. Xin。“基于多智能体的 C4ISR 有效性模拟与评估研究”。载于：*2010*年第二届国际计算机建模与仿真会议。第 1 卷。2010年，第 561–568 页。[104] H. Rahmandad 和 J. Sterman。“扩散动态中的异质性与网络结构：比较基于智能体的模型与微分方程模型”。载于：《管理科学》54.5 (2008)，第 998–1014 页。[105] E. Vidal、F. Thollard、C. de la Higuera、F. Casacuberta 和 R.C. Carrasco。“概率有限状态机——第一部分”。载于：《*IEEE*模式分析与机器智能汇刊》27.7 (2005)，第 1013–1025 页。[106] L. Shami 和 T. Lazebnik。“多菌株流行病学中检测新菌株的经济方面

al-

数学模型”。载于：《混沌、孤子与分形》165（2022年），第112823页。[107] T. Lazebnik 和 A. Alexi。“使用异质性人口模型比较若干建筑类型中的大流行干预政策”。载于：《非线性科学与数值模拟通讯》107（2022年），第106176页。[108] D. J. White。“马尔可夫决策过程的应用综述”。载于：《运筹学学会杂志》44.11（1993年），第1073–1096页。[109] A. Alexi、A. Rosenfeld 和 T. Lazebnik。“一种受安全博弈启发的大流行传播分布式控制方法”。载于：《高级理论与模拟》（2022年），第2200631页。[110] L. Di Domenico、G. Pullano、C. E. Sabbatini、P. Y. Bo Elle 和 V. Colizza。“封锁对法兰西岛 COVID-19疫情的影响及可能的退出策略”。载于：《*BMC*医学》（2020年）。[111] S. Zhao、L. Stone、D. Gao、S. S. Musa、M. K. C. Chong、D. He 和 M. H. Wang。“2019年至2020年中国武汉新型冠状病毒病（COVID-19）疫情暴发缓解中的模仿动力学”。载于：《跨国医学年鉴》8（2020年）。[112] D. Breda、F. Florian、J. Ripoll 和 R. Vermiglio。“结构化种群基本再生数的高效数值计算”。载于：《计算数学与应用数学杂志》384（2021年），第113165页。[113] K. Chatterjee、K. Chatterjee、A. Kumar 和 S. Shankar。“COVID-19疫情对印度医疗保健的影响：随机数学模型”。载于：《印度武装部队医学杂志》76.2（2020年），第147–155页。[114] S. Bushaj、X. Yin、A. Beqiri、D. Andrews 和 I. E. Buyuktahtakin。“用于疫情控制优化的仿真深度强化学习（SiRL）方法”。载于：《运筹学年鉴》（2022年）。[115] D. Breda、F. Florian、J. Ripoll 和 R. Vermiglio。“结构化种群基本再生数的高效数值计算”。载于：《计算数学与应用数学杂志》384（2021年），第113165页。[116] L. Martinez-Acosta、J. P. Medrano-Barboza、A. Lopez-Ramos、J. F. Remolina Lopez 和 A. A. Lopez-Lambrano。“在哥伦比亚辛努河流域生成合成月降雨量的 SARIMA 方法”。载于：《大气》11.6（2020年）。[117] M. A. Tribe 和 R. L. W. Alpine。“规模经济与‘0.6 规则’”。载于：《工程成本与生产经济学》10.4（1986年），第271–278页。[118] L. F. Aristizabal 和 M. A. Johnson。“夏威夷商业咖啡农场咖啡叶锈病（咖啡驼孢锈菌）监测：疾病传入首年的初步观察”。载于：《农学》12.5（2022年），第1134页。[119] T. Lazebnik、L. Shami 和 S. Bunimovich-Mendrazitsky。“非药物措施的时空影响

al

干预政策对疫情动态和经济的影响：以COVID-19为例”。载于：*EconomicResearch-Ekonomska Istrazivanja* 35.1(2022年)，第1833–1861页。

[120] J. D. Nichols、T. L. Bogich、E. Howerton、O. N. Bjornstad、R. K. Borchering、M. Ferrari、M. Haran、C. Jewell、K. M.Pepin、W. J. M.Probert、J. R. C. Pulliam、M. C. Runge、M. Tildesley、C. Viboud 和 K. Shea。《用于针对性疾病监测的战略性检测方法可为大流行决策提供参考》。载于：*PLOS Biology* 19.6（2021），第 1–9 页。[121] T. Lazebnik 和 G. Blumrosen。《结合干预政策的高级多重突变大流行模型》。载于：*IEEE Access* 10（2022年），第 22769–22781 页。