PLA 可降解材料赋能农村白色污染治理与乡村振兴的路径研究

陈秋彤，林云婷，徐慧丹，陈思铭，徐旭晖，唐乐红

（阳光学院人工智能学院，福建 福州 350015）

摘要：农村白色污染在农膜残留、农资包装、生活袋膜和设施园艺薄膜等环节呈现源头分散、回收半径大、残留隐蔽性强和治理收益外部化等特征。聚乳酸（PLA）基可降解材料兼具生物基来源、可加工性和在适宜条件下可生物降解等属性，为农村塑料污染源头替代和末端闭环提供了新的技术载体。本文从“减污降碳—产业延伸—组织协同—价值转化”的复合目标出发，构建县域白色污染负荷、PLA 材料降解动力学、治理物质流和乡村振兴绩效评价模型，并采用固定随机种子生成 2026-2035 年情景模拟数据。结果表明：在“PLA 替代 + 回收 + 堆肥”集成路径下，2035 年县域白色污染负荷可较常规治理情景下降约 70%，地膜残留和农资包装成为减污贡献最大的两个环节；PLA 材料降解效率对温度和湿度高度敏感，常温低湿环境下降解周期较长，而高温高湿堆肥条件下可显著缩短半降解期；从综合绩效看，集成路径在减污效果、土壤风险控制、就业带动和治理韧性方面优于单一替代模式。研究认为，PLA 材料治理农村白色污染不能停留在“以材料换材料”，而应通过标准化应用、回收网点布局、县域堆肥设施、农户激励和本地化产业链培育，形成面向乡村振兴的系统治理方案。

关键词：PLA；可降解材料；农村白色污染；农膜残留；乡村振兴；情景模拟

收稿日期：2026 年 4 月 2 日　　**中图分类号：**S-01

通讯作者：唐乐红，阳光学院人工智能学院

Research on the Path of Utilizing PLA Biodegradable Materials for Rural White Pollution Control and Rural Revitalization

Qiutong Chen, Yunting Lin, Huidan Xu, Siming Chen, Xuhui Xu, Lehong Tang

(School of Artificial Intelligence, Yango University, Fuzhou, Fujian 350015)

Abstract: Rural white pollution is characterized by dispersed sources, long collection radius, hidden residues and externalized governance benefits. Polylactic acid (PLA) -based biodegradable materials provide a potential technical carrier for source substitution and end-of-pipe circular treatment. This study constructs a county-level simulation framework covering pollution load, PLA degradation kinetics, material flow and rural revitalization performance, and generates reproducible scenario data for 2026–2035 with a fixed random seed. The simulated results indicate that the integrated pathway of PLA substitution, recycling and composting can markedly reduce rural plastic leakage, while degradation performance is strongly controlled by temperature and humidity. The findings suggest that PLA-enabled governance should be organized as a county-scale system combining material standards, collection networks, composting facilities, farmer incentives and local industrial chains.

Key words: PLA; biodegradable materials; rural white pollution; agricultural film residue; rural revitalization; scenario simulation

1 引言

农村白色污染是农业现代化和农村生活方式转型过程中形成的复合性环境问题。与城市塑料垃圾相比，农村塑料废弃物具有空间分布广、单位点位回收量小、混杂泥土和农药残液、季节性集中暴发等特点，单纯依靠末端清运难以形成稳定治理效果。近年来，我国聚乳酸产业在原料、聚合、改性和制品应用方面形成一定基础，为生物基材料规模化应用提供了产业条件[1]。与此同时，可降解塑料的生物降解过程受材料组成、环境温湿度、微生物活性和结晶度等因素影响，必须将材料性能放入实际场景中评估[2]。

从乡村振兴角度看，农村白色污染治理并非单一环保工程，而是连接绿色生产、农村人居环境整治、县域产业培育和农户增收的重要抓手。PLA 基材料若仅作为传统塑料的价格更高替代品，其推广动力有限；若与农膜减量、农资包装回收、农村有机废弃物堆肥和县域生物基材料产业链结合，则可能形成“环境治理—就业创造—产业增值”的复合收益。本文据此提出一个面向县域治理的研究框架：以 PLA 基材料替代为源头切入点，以回收和堆肥设施为过程支撑，以农户采纳和政策激励为扩散条件，以乡村振兴绩效为综合评价目标。

2 研究设计与模拟方法

2.1 研究对象与场景设定

本文以典型农业县域作为模拟对象，将农村白色污染划分为地膜残留、农资包装、生活袋膜、快递 / 外卖包装和设施园艺薄膜五类。既有全生物降解地膜在北方作物区的试验表明，可降解材料在不同作物、气候和覆膜制度下表现存在差异，场景适配性是推广前提[3]。因此，本文不将 PLA 视为普适替代品，而将其放入“作物制度—回收条件—堆肥能力—农户行为”的县域情景中推演。

情景期设为 2026 — 2035 年。基准情景代表治理方式延续，即传统塑料使用量随农业投入和农村消费增长而缓慢上升；回收强化情景代表不大规模替代材料，但提高地膜和包装回收率；PLA 替代情景代表对地膜、包装和设施薄膜进行生物基材料替代，但回收与堆肥体系建设不足；集成情景代表 PLA 替代、回收网点、堆肥设施和农户激励同步推进[4]。

2.2 指标体系与变量构建

评价指标分为四组，具体指标构成如表 1 所示。第一组为污染负荷指标，包括年度白色污染产生量、环境泄漏量、残留转移量和减污贡献；第二组为材料性能指标，包括 180 d 降解率、半降解期、表观降解速率常数和温湿度响应；第三组为治理过程指标，包括回收参与率、堆肥利用率、边际减污成本和闭环处理率；第四组为乡村振兴指标，包括农户净收益、就业带动、村庄环境改善和组织协同水平。

表 1 PLA 材料赋能农村白色污染治理的模拟指标体系

指标类别	核心变量	单位或尺度	解释
污染负荷	年度白色污染量	t·a−1	县域五类塑料废弃物流入环境或形成存量的总量
材料降解	180 d降解率	%	不同温湿度条件下PLA基材料质量损失率
治理过程	回收参与率/堆肥利用率	%	农户与经营主体进入闭环治理体系的程度
经济绩效	新增成本/净收益指数	元·亩−1/0–100	材料替代、回收、堆肥和补贴共同作用下的经济结果
乡村振兴	综合绩效指数	0–100	环境、经济、社会和治理韧性指标加权得到

2.3 模型设定

污染负荷采用情景递推方法计算。设 L_t 为第 t 年白色污染负荷，g 为新增塑料需求增长率，R_t 为回收削减量，S_t 为 PLA 源头替代削减量，C_t 为堆肥闭环削减量，则 L_t 可表示为：L_t=L_{t − 1}（1+g）− R_t − S_t − C_t − E_t，其中 E_t 为源头减量和农户行为变化产生的削减量。PLA/PBAT 类可降解材料的制备与应用研究显示，改性、共混和加工条件会改变力学性能与降解表现，本文在降解动力学中以环境参数和表观速率常数共同表征材料差异[5]。

降解过程采用一级表观动力学近似，即 D（t）

=100 ×（1 − e^{ − kt}），其中 D（t）为 t 天时的质量损失率，k 为表观降解速率常数。k 被设定为温度 T 和相对湿度 H 的函数，用以表达高温高湿环境对 PLA 基材料水解和微生物降解的促进作用。综合绩效指数采用标准化加权求和方法，权重依据减污效果、土壤风险、农户接受、净收益、就业带动和治理韧性的政策重要性设定。本文所有数据均为模拟数据，随机扰动采用固定随机种子 20260611，以保证图表可复现。

3　PLA 介入农村白色污染治理的情景模拟结果

3.1　污染源结构与年度负荷变化

如图 1 所示，模拟结果显示，地膜残留是县域白色污染负荷的主要来源，2026 年占比约 44%；农资包装、生活袋膜和快递 / 外卖包装构成次级来源，具有点多面广和清运成本较高的特征。若延续常规治理，白色污染负荷在 2035 年前后仍将上升；单纯强化回收可以抑制增量，但难以显著改变污染存量；“PLA 替代 + 回收 + 堆肥”的集成情景则表现出最明显的负荷下降趋势。

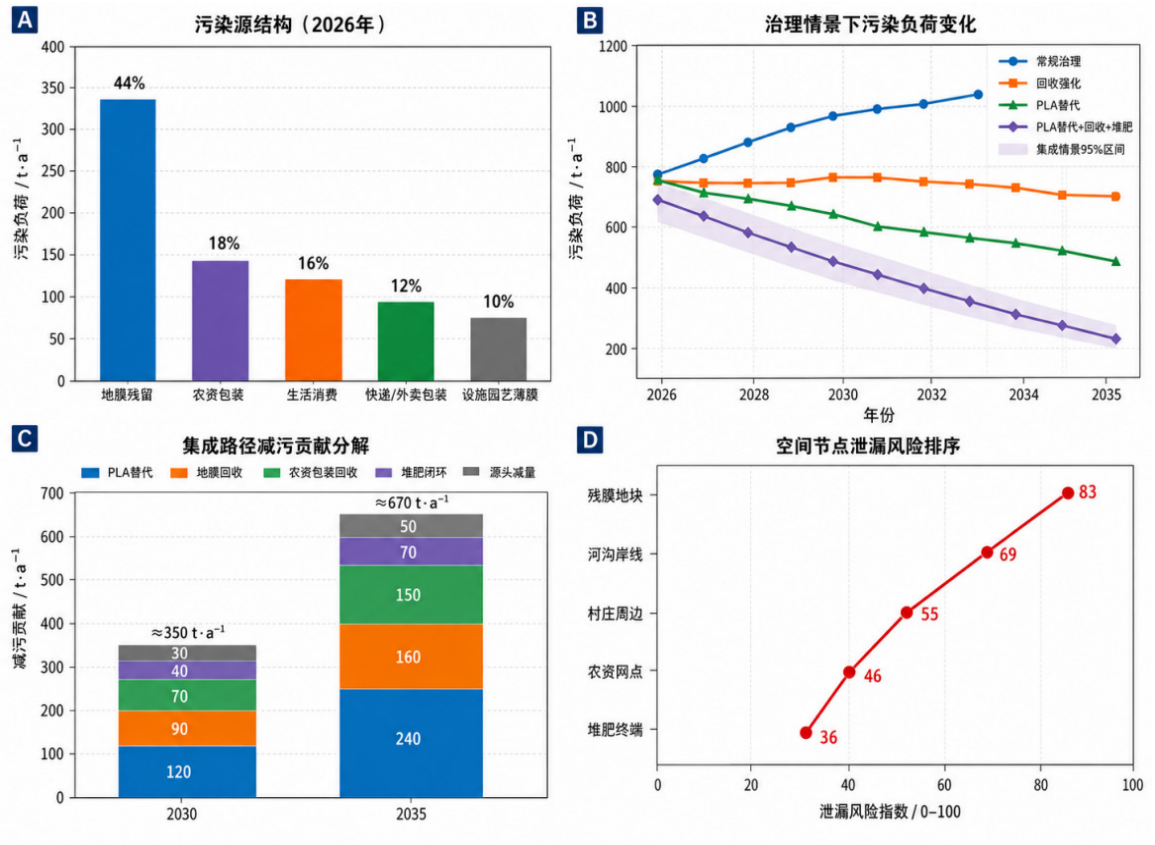

图 1　县域白色污染负荷与 PLA 协同治理情景模拟

结合图 1 右侧的减污贡献分解和风险排序可以进一步看出，PLA 替代的贡献主要来自地膜和部分包装材料源头替换，地膜回收和农资包装回收则决定了中期削减强度。堆肥闭环在 2030 年前贡献较小，但随着县域堆肥设施投运和分类收集体系成熟，到 2035 年成为重要的边际增量。风险排序显示，残膜地块、设施农业园区和农资集散点是治理优先区域。

3.2　PLA 基材料降解动力学特征

如图 2 所示，模拟降解曲线表明，PLA 基材料降解并不是简单的线性过程，而是受环境温湿度显著控制。在 20° C、40% 相对湿度条件下，180 d 质量损失率较低，说明常温干燥农田环境中材料碎片可能持续较长时间；在 30° C、70% 相对湿度条件下，降解率明显提高；在 35° C、85% 相对湿度条件下，曲线前期增速更快，表明在工业堆肥或高温高湿堆置环境中材料更容易实现较高程度降解。

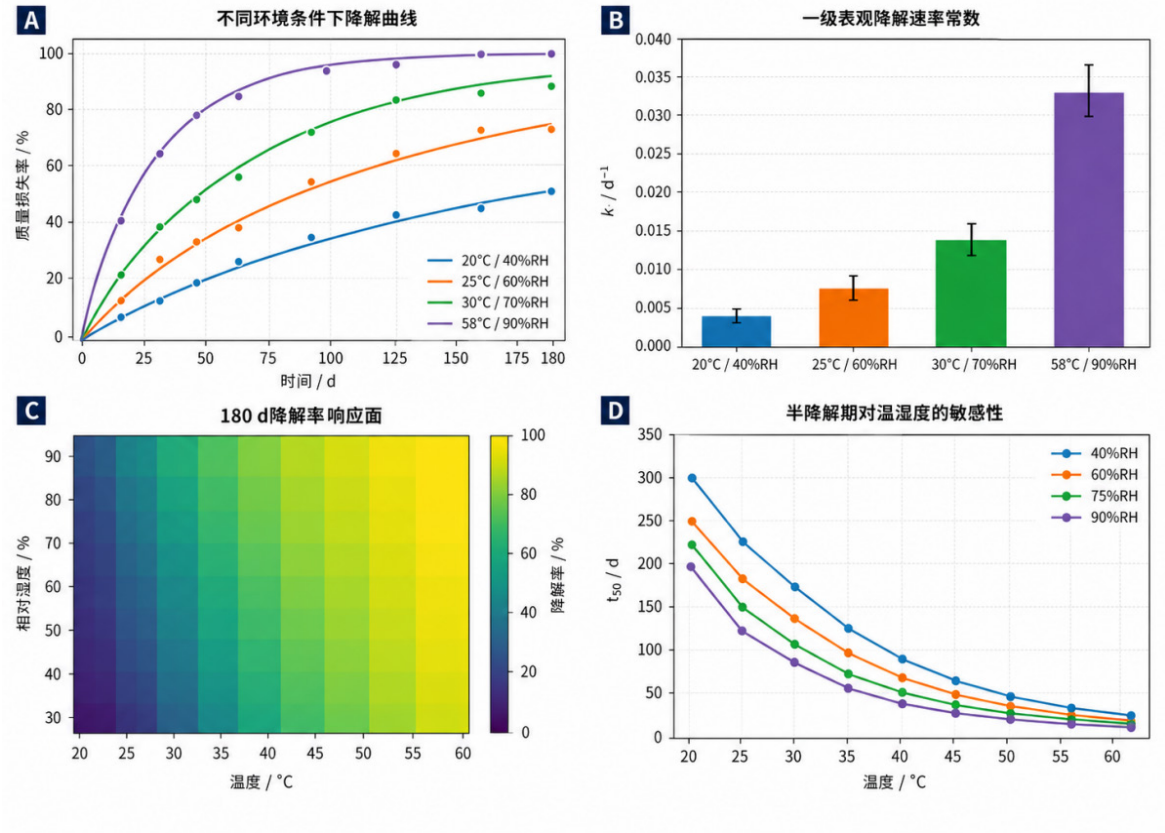

图 2　PLA 基材料降解动力学与温湿度响应模拟

表 2　不同环境条件下 PLA 基材料降解性能模拟结果

环境条件	表观速率常数 k / d−1	180 d降解率 / %	半降解期 / d	治理含义
20° C / 40%RH	0.0038	49.5	182.4	需回收或集中处置
25° C / 60%RH	0.0075	74.1	92.4	适合农田季节性降解观察
30° C / 70%RH	0.0140	92.0	49.5	适合农田季节性降解观察
58° C / 90%RH	0.0330	99.7	21.0	适合县域堆肥闭环

图 2 中的温湿度响应热图进一步表明，在温度低于 25° C 且湿度较低时，即使材料具有可降解属性，其 180 d 降解率 仍可能不足以支撑“就地消纳”的治理目标。这意味着 PLA 地膜和包装推广必须配套分类回收、集中破碎和高温堆肥等过程，而不能把材料降解完全交给自然土壤环境。

4　PLA 赋能乡村振兴的系统路径

4.1　从材料替代到闭环治理

PLA 赋能农村白色污染治理的第一条路径是“源头替代 – 过程回收 – 末端堆肥”的闭环，如图 3 所示。源头替代解决传统塑料进入农田和村庄环境的问题；过程回收降低材料散落和碎片化风险；末端堆肥将可降解材料残余与农村有机废弃物协同处理，形成土壤改良和循环农业的连接点。

图 3 显示，常规治理模式下环境泄漏占比最高；PLA 替代后泄漏比例下降，但存量转移仍然较高；当回收体系介入后，机械回收比例上升，环境泄漏继续下降；当堆肥闭环形成后，环境泄漏可降至个位数水平，生物降解 / 堆肥和机械回收共同成为主导去向。由此可见，PLA 本身并不自动等于低污染，只有嵌入闭环治理体系后，其环境效益才会稳定释放。

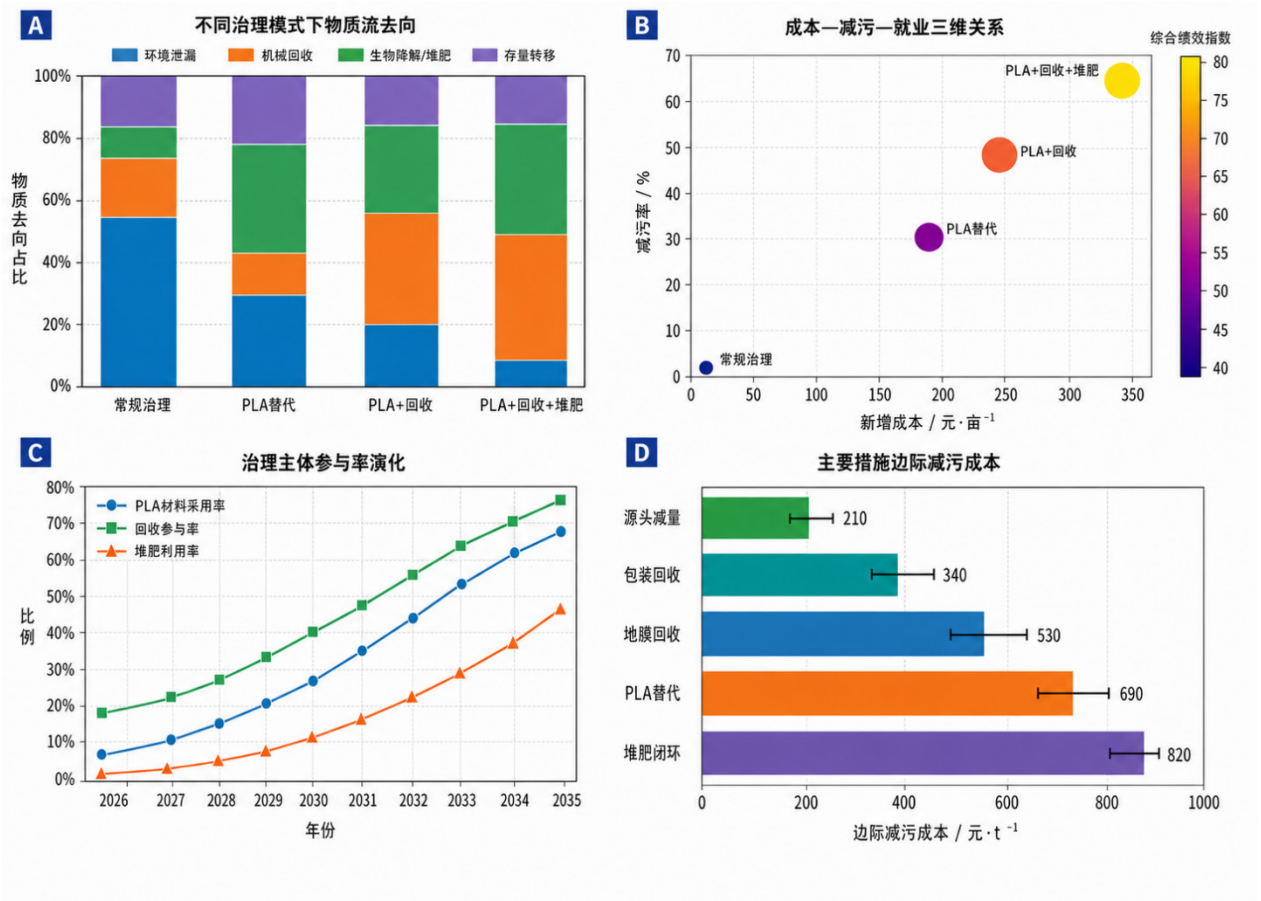

图 3　PLA 替代 – 回收 – 堆肥闭环的治理绩效模拟

4.2　产业链延伸与农户协同

第二条路径是围绕县域产业链和农户行为形成协同。农村白色污染治理的成本不仅来自材料价格，也来自分类、暂存、运输、清洗、破碎和堆肥等环节。贵州地形与气候条件下生物降解地膜应用研究关注了产量、土壤环境和经济效益的综合影响，说明推广决策应同时纳入农户收益和生态收益[6]。本文模拟显示，集成路径虽然新增成本高于单一替代和单一回收，但其减污率、就业带动和综合绩效更高，说明在适当补贴和规模化组织条件下，系统治理可能优于低成本零散治理。

在组织层面，可采取“合作社集中采购 + 村级回收点 + 县域处理中心”的模式。合作社负责 PLA 地膜和包装材料的统一采购，降低单户议价弱势；村级回收点负责称重、积分和临时储存，解决农户回收激励不足问题；县域处理中心负责分选、破碎、堆肥和再资源化，形成稳定处置能力。对种植大户、家庭农场和农资经销商，可设置责任清单和差异化补贴，推动从“政府清理”转向“主体共治”。

4.3　标准化应用与质量监管

第三条路径是建立与 PLA 基材料应用相匹配的标准和监管体系。不同 PLA 协同改性材料在拉伸性能、透光率、诱导期和降解周期方面存在差异，若缺少质量标准，可能出现材料过早破裂、降解不足或伪可降解产品进入市场等问题[7]。因此，县域推广不宜只规定“使用可降解材料”，还应明确材料厚度、力学性能、覆盖周期、回收窗口、堆肥条件和标识追溯要求。

在监管层面，可建立“三码合一”机制：产品码记录材料批次和性能参数，地块码记录作物类型和覆膜时间，回收码记录回收重量和处置去向。通过数字化台账将补贴发放与回收量、堆肥利用量和残膜抽检结果挂钩，可以减少“买了不用、

用了不收、收了不处置”的执行偏差。

5 综合绩效评价与政策含义

5.1 绩效评价结果

如图 4 所示，综合绩效评价结果显示，四类治理模式呈现明显梯度。常规治理在农户接受度方面具有一定优势，但减污效果、土壤风险控制和治理韧性得分较低；PLA 替代模式改善减污效果，但因材料成本和后端设施不足，净收益得分不高；“PLA+ 回收”在成本与减污之间达到较优平衡；“PLA+ 回收 + 堆肥”则在综合绩效指数上最高。

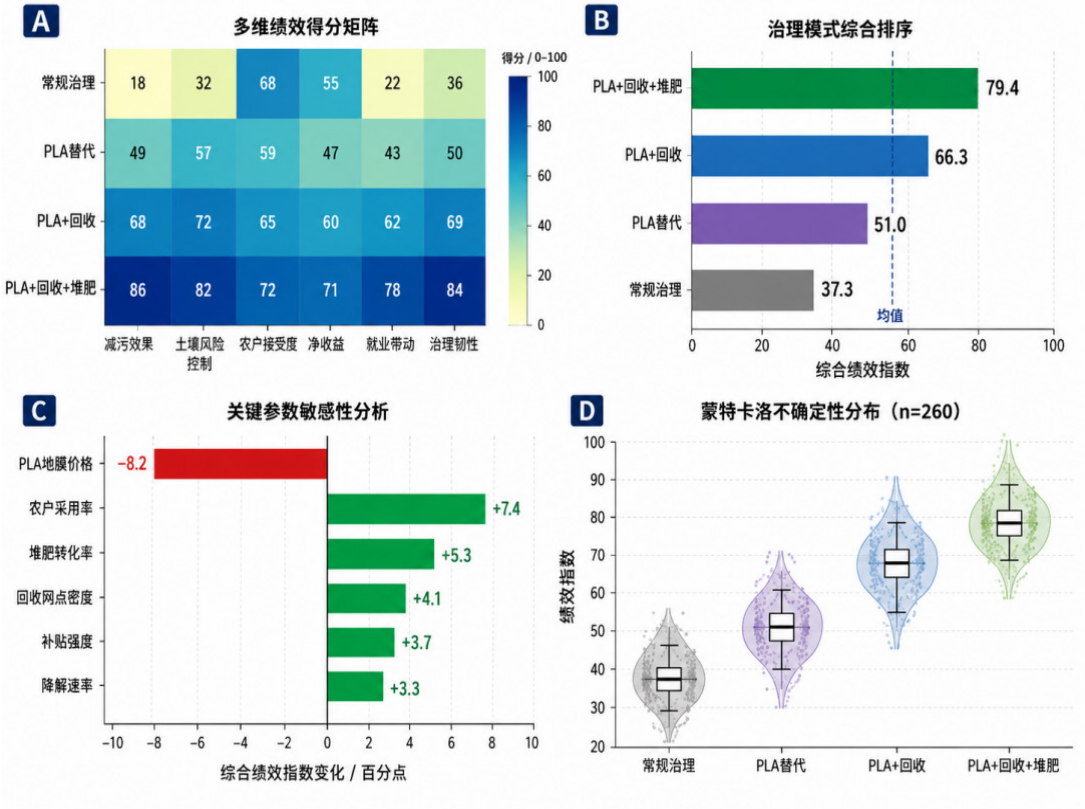

图 4 农村白色污染治理与乡村振兴协同绩效评价

结合图 4 中的热图、雷达图和不确定性分析可知，敏感性分析表明，PLA 地膜价格是影响综合绩效的最大负向因素，说明成本下降和适度补贴仍是早期推广关键；农户采用率、堆肥转化率和回收网点密度是主要正向因素，说明组织体系比单一材料补贴更能提升综合绩效。蒙特卡洛结果显示，集成路径虽然不确定性较高，但其绩效下限仍优于常规治理和单一替代路径。

表 3 不同治理模式成本收益与综合绩效模拟结果

治理模式	减污率 / %	新增成本 / 元 · 亩 −1	新增就业 / 人 · 千亩 −1	净收益指数	综合绩效指数
常规治理	0.0	0.0	0.0	0.0	37.3
PLA 替代	29.0	185.0	7.5	339.0	51.0
PLA+ 回收	48.0	245.0	14.3	581.8	66.3
PLA+ 回收 + 堆肥	67.0	325.0	22.6	827.3	79.4

5.2 成本收益测算

表 3 显示，PLA 替代带来的新增成本较明显，但单一替代并不能同步获得最高净收益。原因在于其仅降低部分污染负荷，却没有充分激活回收岗位、堆肥利用和治理积分等附加收益。集成路径新增成本最高，但净收益指数和综合绩效指数

也最高，说明其价值并非来自材料本身，而来自县域治理体系重构与产业协同。

6 结论

本文基于模拟数据构建了 PLA 可降解材料赋能农村白色污染治理与乡村振兴的分析框架。研究表明：图 1 所揭示的情景趋势说明，单一回收难以根本扭转白色污染累积，只有“PLA 替代 + 回收 + 堆肥”协同路径才能实现长期负荷下降；图 2 所展示的动力学特征说明，PLA 材料的环境效益高度依赖温湿度条件和末端处置方式；图 3 和图 4 共同表明，材料替代若与回收网络、堆肥设施和组织激励结合，才能同步提升环境绩效、经济绩效与乡村振兴绩效。

总体而言，PLA 材料治理农村白色污染的政策重点应从“材料推广”升级为“系统治理”：以标准化材料保障应用质量，以回收网络保障过程闭环，以堆肥设施保障末端消纳，以农户激励保障行为持续，以产业链延伸保障乡村振兴收益。只有把材料技术嵌入乡村治理和县域产业体系，PLA 可降解材料才能真正成为农村白色污染治理和乡村振兴协同推进的有效工具。

参考文献：

[1]王正祥 . 我国聚乳酸产业发展现状与对策研究[J]. 中国工程科学，2021，23（6）:155–166.

[2] 李昕玥，刘卓苗，薛润泽，等 . 典型塑料的生物降解及其降解机理[J]. 科学通报,2021,66(20):2573–2589.

[3] 武岩，张树清，王冲，等 . 内蒙古阴山北麓马铃薯应用 PBAT/PLA 全生物降解地膜可行性分析 [J]. 生态环境学报，2021，30（10）:2100–2108.

[4] 曹晓庆，马新明，汪烁涵，等 . 五种常见可降解地膜的研究应用现状和展望 [J]. 核农学报，2023，37（5）:1076–1087.

[5] 陈晨，沈超，沈静妍，等 .PLA/PBAT 可降解地膜的制备技术和研究应用进展 [J]. 塑料科技，2024，52（4）:137–142.

[6] 陈卓，张森，陈吉，等 . 贵州地形及气候条件下生物降解地膜对白菜产量、土壤环境和经济效益的影响[J]. 中国塑料，2025，39（1）:97–103.

[7] 张珍珍，李飞李进平，等 . 基于聚乳酸协同改性的全生物降解地膜性能分析 [J]. 烟草科技，2026，59（4）:29–39，48

作者简介：陈秋彤（2005–），女，汉族，福建漳州人，阳光学院人工智能学院本科生，主要研究方向为可降解材料、乡村振兴、人工智能等；唐乐红（1985–），女，汉族，福建福州人，阳光学院人工智能学院竞赛组副组长，主要研究方向图像识别、目标检测、多模态融合。