

云南省永德县蔗区病虫草害绿色精准防控技术体系构建与无人机飞防验证

段开鲜

永德县地方产业发展服务中心，云南省临沧市，677600；

摘要：针对永德县 16.68 万亩蔗区病虫草害复合侵染问题，本研究构建“生态调控-生物防治-无人机精准干预”三位一体技术体系。通过 24 个监测点 ($n=2160$ 株) 确定关键阈值 (蔗螟枯心率 $\geq 5\%$ ，杂草盖度 $\geq 30\%$ 持续 30 天)，依托无人机飞防实施精准施药。2024-2025 年大田试验表明：该体系减少化学农药 38.7% ($p<0.01$)，天敌数量提升 110% ($p<0.05$)，实现“三增”（增产 $15.2\% \pm 1.8\%$ ，增糖 $0.4\% \pm 0.05\%$ ，增收 834 元/亩）与“三减”（减药、减污 40%，减碳 $1.48\text{kg CO}_2\text{ e/亩}$ ）。无人机飞防效率达人工 30 倍，雾滴穿透率提升至 65.3%（人工 40.2%），沉积均匀性 (CV%) 优化至 28.5%（人工 46.8%），为山地蔗区绿色防控提供标准化范式。

关键词：甘蔗病虫草害；无人机飞防；精准干预；减药增效；永德县

DOI：10.69979/3041-0673.26.01.049

引言

永德县作为优质甘蔗主产区（2024/25 榨季种植面积 16.68 万亩），病虫草害的复合侵染已成为制约产业发展的瓶颈。传统化学防控方式成本较高（59 元/亩/次），且易导致农药残留超标与生态环境退化。

创新点：构建“生态调控-生物防治-精准干预”三位一体技术体系，首次将“时空精准干预”模型（阈值驱动窗口期 + 无人机靶向施药）应用于山地蔗区，通过无人机飞防将生态与生物防控措施有机耦合，破解了“效率-精准度-减药”的三角难题。

1 材料与方法

1.1 研究对象与田间监测

1.1.1 研究区域

云南省永德县核心甘蔗种植区域。

1.1.2 研究对象

甘蔗主要病害（梢腐病、黑穗病、白条病、花叶病）、虫害（蔗螟、粘虫、蓟马、绵蚜）以及恶性杂草（香附子、马唐、狗尾草）。

1.1.3 监测网络

于 2023-2025 年期间，设立 24 个固定监测点位，其分布覆盖不同海拔高度、土壤类型以及种植模式的区域。

1.1.4 监测内容与方法

动态调查：每月对发病率、虫口密度、杂草盖度进

行记录（采用五点取样法，病害调查每点选取 30 株，虫草害调查每点选取 1 平方米，总样本量 $n=2160$ 株）。

损失评估：设置不同危害程度梯度的小区，对产量与糖分损失进行量化分析。

关键阈值：蔗螟：枯心率不低于 5% 或螟害节率不低于 8%；

粘虫：幼虫密度不低于 5 头/平方米；

杂草：盖度超过 30% 且持续时长达到 30 天。

1.2 “三位一体”绿色精准防控技术体系

以生态调控为基础、生物防治为核心、精准干预为关键，构建以无人机飞防为核心载体的技术体系。其中，“精准干预”环节的核心技术依托为无人机飞防。

1.2.1 生态调控

抗性/耐性品种布局：选用云蔗 05/51、福农 41 号（抗黑穗病），粤糖 00/236、桂糖 42 号（抗锈病），ROC22、闽糖 69 号（耐旱、抗蓟马）。

健康种苗与消毒：种苗先在 50°C 温水浸 20 分钟，再在 50% 多菌灵 800 倍液或 25% 咪鲜胺 1000 倍液浸 10 分钟，后喷施 5% 氨基寡糖素；刀具每 30 分钟用 75% 酒精消毒。

土壤与轮作管理：宿根田深翻 30cm 并晒垡 15 天；酸性土壤每亩施 100kg 生石灰调 pH；推广“甘蔗（新植）→甘蔗（宿根）+间作大豆→玉米（深翻）”三年轮作模式。

水肥精准管理：依每亩 6 吨目标产量，制定基肥

(有机肥 3000 – 4000kg + 过磷酸钙 50kg)、苗期(尿素 15 – 20kg)、分蘖期(氯化钾 20 – 25kg)、伸长期(高钾复合肥 30 – 40kg)施肥方案,结合水分管理(伸长期土壤湿度 60% – 70%, 成长期控水分促糖分积累)。

1.2.2 生物防治

天敌释放: 4 月下旬、7 月上旬蔗螟成虫羽化初期, 每亩挂 3 – 5 卡赤眼蜂(每卡 3000 头蜂卵)于蔗株中部叶背, 放蜂前后特定时间禁施化学农药。

微生物农药应用: 卵孵化高峰(枯心率 5%), 每亩喷 8000IU/mg WP 的 Bt 100g 防蔗螟; 4 – 5 月或 9 – 10 月, 每亩撒 5 亿孢子/g GR 的白僵菌 5kg(与细沙混合)防蔗龟。

1.2.3 精准干预(以无人机飞防为核心载体)

“精准干预”是基于监测阈值的无人机定向施药作业, 与生态调控、生物防治时序互补。

核心理念: 遵循“治早治小, 病虫兼治, 药肥协同”原则, 按监测预警结果及阈值精准施药。

技术核心: 无人机飞防集成技术。

平台选择: 多旋翼植保无人机(大疆 T 系)。

应用场景与药剂方案:

苗期/分蘖期: 防绵蚜、蓟马、前期螟害, 用噻虫嗪、氯虫苯甲酰胺与杀菌剂复配液。

伸长期至成熟前期: 6–7 月(锈病发病初期), 用 72% 百菌清 SC 100mL + 43% 代森锰锌 SC 100mL + 磷酸二氢钾 120g + 飞防助剂 10mL 进行飞防防治。8 月下旬 – 9 月中旬梢腐病等中上部病虫害等病虫高发期, 用核心复配方案(方案 A: 20% 氯虫苯甲酰胺悬浮剂 10g + 30% 甲维杀虫单微乳剂 200g + 50% 甲基硫菌灵悬浮剂 100g + 70% 噻虫嗪 15g + 45% 毒死蜱 50mL + 25% 吡唑醚菌酯悬浮剂 50g + 46% 尿素 400g + 膨化速溶磷酸二氢钾 200g + 飞防助剂 10mL; 方案 B: 20% 氯虫苯甲酰胺悬浮剂 10g + 30% 甲维杀虫单微乳剂 200g + 50% 甲基硫菌灵悬浮剂 100g + 25% 吡唑醚菌酯悬浮剂 50g + 46% 尿素 400g + 膨化速溶磷酸二氢钾 200g + 飞防助剂 10mL)进行飞防防治。

杂草防控: 杂草 3 – 5 叶敏感期, 用茎叶处理剂。

飞防关键技术规范:

作业参数: 严格按照以下参数执行

飞行高度 $\leq 6\text{m}$ (距蔗株冠层顶部) 平衡穿透性与漂移风险

飞行速度 $\leq 6\sim 7\text{m/s}$ 保证雾滴沉积时间
亩喷液量 (L) 3.5 (± 0.25) 满足有效沉积所需最少药液量

雾滴粒径 (μm) 90–200 优化漂移与沉积的平衡(通过喷嘴选择实现)

雾滴密度 (个/ cm^2) 冠层上部 ≥ 20 ; 冠层中下部 ≥ 15 (目标值) 验证沉积覆盖

雾滴穿透率 (%) (冠层中下层沉积量 / 总沉积量) * 100% 验证冠层穿透能力(对比人工喷雾)

沉积均匀性 (CV%) $\leq 30\%$ (目标值) 验证喷雾均匀度 (变异系数)

作业环境要求 风速 ≤ 3 级, 温度 $< 32^\circ\text{C}$, RH $> 60\%$, 无雨 保证作业安全与效果

农药减量 38.7% ($p < 0.01$) 减碳 1.48 kg CO₂ e/亩

沉积均匀性 (CV%) $\leq 30\%$ 减少药剂流失 15% ↑
药剂与剂型: 优先用飞防专用剂型等, 禁易堵塞等药剂。

环境要求: 风速不超 3 级, 温度低于 32℃, 湿度大于 60%, 避降雨前后 6 小时。

效果监测指标: 雾滴密度等。

杂草靶向防控: 结合无人机飞防与人工防治, 芽前封闭与芽后茎叶处理结合。

1.2.4 物理防治配套

每 15 – 20 亩设 1 盏频振式杀虫灯, 每亩设 3 – 5 个性诱剂。

1.2.5 数字化辅助

开发预警小程序推送实时信息及用药指导。

1.3 技术体系验证试验设计

试验时间与地点: 2024—2025 年, 在永德县大雪山、崇岗蔗区设立试验点。

试验设计: 采用大田对比试验。

处理组 (T): 应用本研究构建的“三位一体”绿色精准防控技术体系(包含无人机飞防核心方案)。

对照组 (CK): 采用当地常规防治措施(以化学防治为主, 施药方式主要为人工背负式喷雾或撒粒)。

重复与面积: 每个处理设置 3 个重复, 每个重复面积 ≥ 3 亩。随机区组排列。

投入指标: 化学农药使用种类、次数、折百量 (kg ai/ha); 生物农药/天敌使用成本; 人工投入; 飞防作业成本。

病虫草害控制: 主要病虫发病率/虫口减退率、病情指数、杂草防除率。

有益生物: 天敌（瓢虫、草蛉、寄生蜂等）种群数量动态。

作物响应: 甘蔗株高、茎径、有效茎数、产量（吨/亩）、蔗糖分（%）。

经济效益: 亩产值、亩成本、亩纯收益。

环境效益: 农药减量百分比。

无人机飞防效能: 雾滴密度、穿透率、沉积均匀性（CV%）（使用水敏纸或示踪剂法测定）；作业效率（亩/小时）；防治成本对比。

统计分析: 采用 SPSS 软件进行 t 检验或方差分析（ANOVA），比较处理组与对照组差异的显著性（ $p<0.05$ ）。

2 结果与分析

2.1 病虫草害规律与阈值验证

梢腐病: 7~9月高发（低洼连作田）；**黑穗病:** 雨季宿根田高发；**蔗螟阈值:** 枯心率 $\geq 5\%$ 为防治节点。

2.2 无人机飞防效能

2.2.1 作业效率

无人机飞防单机日作业效率稳定在 150~160 亩，是人工背负式喷雾效率（5~8 亩）的 30 倍以上，有效解决了甘蔗生长中后期植株高大、人工施药困难且效率低下的瓶颈问题。

2.2.2 雾滴性能

穿透率 65.3%（人工 40.2%， $p<0.01$ ）；沉积均匀性（CV% 28.5 vs 46.8， $p<0.05$ ）。

2.2.3 防效

应用方案 A 或 B 进行无人机飞防，对中后期梢腐病、螟虫等主要靶标的防治效果达到 87.5%~92.3%，与人工喷施优质药剂效果相当，无显著差异（ $p>0.05$ ），但显著减少了用药总量并提高了作业时效性。

杂草茎叶处理高效: 在杂草 3~5 叶期采用无人机喷施茎叶处理剂，防效可达 85% 以上，且对甘蔗安全。

2.2.4 成本效益

综合计算药剂、作业费，无人机飞防亩均成本为 34.8~39.8 元，较人工施药节省 19.2~24.2 元/亩，并减少药剂浪费 $>15\%$ 。

3 讨论

3.1 技术体系价值

本研究构建并验证了适配云南永德山地蔗区的“生态调控—生物防治—精准干预”绿色精准防控技术体系。理论上，首次将“时空精准干预”模型用于复杂地形下甘蔗病虫草害防控，借助无人机飞防技术实现高效落地。该模型强调：

3.1.1 时间精准

依据长期田间监测和气象预报，科学确定各类病虫害最佳防治窗口期。如甘蔗梢腐病，在雨季前 7~10 天预防性施药；田间杂草，在 3~5 叶期最敏感阶段化防，此时杂草对药剂吸收好、防治效果佳。

3.1.2 空间精准

利用无人机飞防优势，突破传统人工施药地形限制。通过 GPS 定位和智能航线规划，将药剂精准投送至甘蔗冠层中上部主要靶标区，确保药液均匀覆盖叶片正反面，提升药剂利用率。

3.1.3 措施精准

根据不同生育期病虫害发生规律和防治靶标，科学优化药剂复配方案，合理搭配杀虫剂、杀菌剂和植物生长调节剂，实现“一喷多效”或“一药多防”协同增效，减少施药次数和劳动强度。

3.1.4 剂量精准

系统优化无人机作业参数，配合专用剂型，降低药剂飘移损失，采用低容量喷雾技术，提升药剂在靶标上的有效沉积量，实现农药减量 30% 以上的控害目标。

该“时间—空间—措施”三位一体的精准防控体系，解决了传统防控模式的矛盾和难题。在永德县应用取得“三增三减”成效：病虫害防治效果提升 20% 以上，农药利用率提高 35%，经济效益增长 15%；农药使用量减少 30%，人工成本降低 50%，环境污染风险大幅降低。

这一创新模式为永德及类似生态区甘蔗产业绿色高质量发展提供可量化、可复制的技术范例，有重要推广应用价值。

3.2 无人机飞防——精准干预的核心技术载体

本研究验证了无人机飞防作为“精准干预”核心载体的关键作用：

3.2.1 效能优势

研究显示，无人机飞防在作业效率、地形适应性、雾滴穿透性和沉积均匀性方面，显著优于传统人工作业，

促使农药使用量减少 38.7%。

3.2.2 解决核心痛点

无人机飞防契合永德县规模化种植、高秆作物种植、人工成本高、施药风险大等需求，是技术体系实现规模化应用的关键。它不仅是一种施药工具，更是实现“精准诊断—智能决策—定向喷药”闭环的未来平台。

3.2.3 推广模式启示

“村级合作社/种植大户统购飞防服务”模式降低了技术应用门槛，若结合可能的政策补贴，其推广前景十分可观。

3.3 体系可持续性与生态效益

该体系使化学农药使用量减少 38.7%，天敌种群数量增加 2.1 倍，降低了环境风险和碳排放，维护并增强了蔗田生态系统的自我调节能力，符合全球农业绿色发展趋势以及国家“双减”政策目标。

3.4 局限性与未来展望

3.4.1 监测智能化

目前，监测工作仍主要依赖人工操作。未来，需要融合物联网（IoT）传感器、遥感（RS）技术，构建智能监测预警网络，以提高预警的时效性和准确性，为精准干预提供更及时的数据支持。

3.4.2 生物防治深化

需要进一步筛选、评估和推广应用本地高效天敌及微生物菌株，优化释放/施用技术，从而降低对化学干预的依赖程度。

3.4.3 飞防技术升级

探索让无人机搭载多光谱/高光谱传感器，用于早期病虫草害识别，并结合 AI 模型生成变量施药处方图，实现真正意义上的“按需施药”。

3.4.4 技术适应性

需要在不同生态蔗区开展更大范围的验证和参数

优化工作，以提升该体系的普适性。

4 结论

本研究针对云南永德蔗区病虫草害复合侵染问题，通过系统监测明确主要靶标发生规律及防治阈值（ET），创新性地构建了“生态调控—生物防治—无人机精准干预”三位一体技术体系。核心成果如下：

规律解析：明确梢腐病（7—9月高发）、蔗螟（枯心率 $\geq 5\%$ ）等关键靶标发生期与阈值。

技术集成：融合抗性品种、天敌释放（赤眼蜂）及无人机飞防（方案 A/B），实现时空精准干预。

综合效益：农药减量 38.7%，天敌数量增加 110%，增产 15.2%、增收 834 元/亩，碳减排 1.48 kg/亩。

飞防优势：作业效率达人工 30 倍，雾滴穿透率提升 25%（冠层中下层），沉积均匀性（CV%）优化 18%。

推广价值：形成可复制技术范式，未来需深化智能监测与变量施药技术。

参考文献

- [1] 陈健等. 甘蔗绿色防控进展 [J]. 中国糖料, 2021.
- [2] 国家甘蔗产业体系. 防控技术手册 [M]. 2022.
- [3] 张建平等. 无人机施药参数优化 [J]. 农业工程学报, 2020.
- [4] 农业农村部. (2021). 农药减量增效技术指南（甘蔗篇）[R]. 农办科 (2021) 12 号.
- [5] IPCC. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 4 Agriculture [M].
- [6] 张宏伟等. (2023). 农药生命周期碳排放核算模型 [J]. 中国环境科学, 43(5), 2453 – 2460.

作者简介：段开鲜（1973.04.03—），性别：女，民族：白族，籍贯：云南，学历：本科，职称：高级农艺师，研究方向：甘蔗病虫害或出糖率研究。