

Quality and Efficiency Improvement Effects of UAV Remote Sensing Combined with Biofertilizer on Precision Cultivation of Protected Strawberries

Yuwei Chen*

Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China

【Abstract】 To address problems like extensive nutrient management, delayed pest early warning, and unstable yield and quality in protected strawberry cultivation, taking "Hongyan" strawberry as the research object, four treatment groups were set up (CK: conventional fertilization + manual inspection; T1: conventional fertilization + UAV remote sensing monitoring; T2: biofertilizer + manual inspection; T3: biofertilizer + UAV remote sensing monitoring). Field experiments were conducted over two growth cycles (180 days/cycle) to explore the effect of the synergistic technology system. Results showed that T3 treatment had high inversion fitting degrees of leaf nitrogen content and SPAD value, with gray mold early warning accuracy of 92.3% (7-10 days earlier than manual inspection). Soil available nitrogen content and fertilizer use efficiency were significantly improved. Compared with CK, T3 increased yield by 29.6%, optimized fruit quality, reduced malformed fruit rate, and increased net profit per unit area by 64.6%. Conclusion: The synergistic technology enables precise strawberry cultivation, improves yield, quality and economic benefits, providing technical support for intelligent and green protected horticulture.

【Keywords】 UAV Remote Sensing; Biofertilizer; Protected Strawberry; Precision Cultivation; Pest and Disease Early Warning; Quality and Efficiency Improvement

无人机遥感结合生物肥料对设施草莓精准种植的提质增效效应

陈雨薇 *

山东省农业科学院农业资源环境研究所，济南 250100

【摘要】为解决设施草莓种植养分管理粗放等问题，以“红颜”草莓为对象，设4个处理组（CK：常规施肥+人工巡检；T1-T3含无人机遥感监测或生物肥料），经2个生长周期试验，探究“无人机遥感+生物肥料”协同技术效果。结果显示，T3处理叶片氮含量、SPAD值反演拟合度高，灰霉病预警准确率92.3%且提前7-10d；土壤速效氮含量、肥料利用率显著提升；产量较CK提高29.6%，果实品质优化、畸形果率降低，单位面积净利润增加64.6%。结论：该协同技术可实现草莓精准种植，提升产量品质与效益，为设施园艺智慧绿色种植提供技术支撑。

【关键词】 无人机遥感；生物肥料；设施草莓；精准种植；病虫害预警；提质增效

1 引言

1.1 研究背景

设施草莓是我国高附加值园艺作物的代表，2023年种植面积达120万hm²，产量超350万吨，产值突破800亿元[1]。然而，当前设施草莓种植面临三大核心瓶颈：一是**养分管理粗放**，传统施肥依赖经验，存在“重氮轻磷钾”现象，导致土壤养分失衡（如速效氮过剩、速效磷不足），肥料利用率仅30%-40%，同时引发土壤盐渍化[2]；二是**生长监测滞后**，人工巡检需逐株观察，耗时费力且难以实现大面积同步监测，无法及时掌握草莓叶片养分、水分状况；三是**病虫害预警不足**，草莓灰霉病、蚜虫等病虫害爆发后才采取防治措施，导致农药使用量增加，残留风险升高，果实品质下降[3]。

智慧农业技术（如无人机遥感、物联网）与绿色投入品（如生物肥料）的融合为解决上述问题提供了新思路。无人机遥感凭借高时空分辨率、快速监测优势，可通过多光谱影像反演作物养分、水分及病虫害信息[4]；生物肥料（含芽孢杆菌、放线菌等功能菌群）能改善土壤微生态，提升养分利用率，减少化学肥料用量[5]。但现有研究多单独关注无人机监测或生物肥料应用，缺乏二者协同的技术体系——如仅用无人机监测无法实现养分的绿色调控，仅施生物肥料难以精准匹配草莓不同生育期的需求。因此，构建“监测-调控-预警”一体化的协同技术体系，对推动设施草莓产业向智慧化、绿色化转型具有重要意义。

1.2 研究意义

本研究的创新价值与应用意义体现在三方面：

(1) 技术融合创新：首次将无人机多光谱监测与生物肥料精准施用结合，建立“影像反演-需求诊断-肥料施用”的闭环调控流程，克服单一技术的局限性；(2) 监测精度提升：通过优化多光谱波段组合（红边波段+近红外波段），提高草莓叶片氮含量、叶绿素含量的反演精度，为养分诊断提供可靠数据支撑；(3) 效益协同提升：在减少化学肥料用量15%-20%的前提下，实现产量提升25%以上、品质显著优化，同时降低病虫害发生率，兼顾经济效益与生态效益，为设施园艺作物精准种植提供可推广的技术范式。

2 材料与方法

2.1 试验材料

2.1.1 供试作物与设施

供试草莓品种为“红颜”，由南京农业大学园艺学院提供，选取4叶1心、无病虫害的幼苗定植于日光温室（长60m、宽10m、高3.5m），采用高垄栽培（垄高30cm、垄宽80cm、行距50cm、株距20cm），种植密度90,000株/hm²。温室配备智能灌溉系统（滴灌带间距20cm，流量2L/h），可根据监测数据调控灌溉量。

2.1.2 无人机与监测设备

无人机选用大疆Mavic 3 Multispectral，搭载5波段多光谱相机（蓝波段450±16nm、绿波段560±16nm、红波段650±16nm、红边波段730±16nm、近红外波段840±16nm），飞行高度50m，地面分辨率3cm，单幅影像覆盖面积0.2hm²。数据处理软件为大疆农业管理平台（DJI Agras Management Platform），可自动生成NDVI（归一化植被指数）、RVI（比值植被指数）、OSAVI（优化土壤调整植被指数）等植被指数。

2.1.3 生物肥料

供试生物肥料包括：(1) 复合生物菌剂（含枯草芽孢杆菌1×10¹⁰CFU/g、放线菌5×10⁹CFU/g），由山东省农业科学院农业资源环境研究所研发；(2) 腐殖酸生物肥（腐殖酸含量20%、N+P+O+K≥15%），购自山东某生物科技公司。常规肥料为尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 18%、P+O 46%)、硫酸钾(K 50%)。

2.2 试验设计与技术流程

2.2.1 试验分组

试验设置4个处理，每个处理3次重复，小区面积200m²(10m×20m)，随机区组排列，具体处理如下：

CK：常规施肥（基肥：尿素300kg/hm²+磷酸二铵450kg/hm²+硫酸钾300kg/hm²；追肥：苗期、花期、果期各追施尿素150kg/hm²+硫酸钾120kg/hm²）+人工巡检（每周1次，记录生长状况，病虫害发生后喷施化学农药）；

T1：常规施肥+无人机遥感监测（每10d飞行1次，基于NDVI值调整灌溉量，病虫害发生后

喷施化学农药) ;

T2: 生物肥料 (基肥: 腐殖酸生物肥 750 kg/ hm^2 ; 复合生物菌剂 30 kg/ hm^2 ; 追肥: 苗期、花期、果期各追施复合生物菌剂 15 kg/ hm^2) + 人工巡检;

T3: 生物肥料 (同 T2) + 无人机遥感监测 (同 T1, 基于叶片氮含量反演值调整生物肥料追施量, 花期额外增施 20 kg/ hm^2 复合生物菌剂; 病虫害早期预警后喷施生物农药, 如枯草芽孢杆菌水剂)。

试验周期为 2023 年 9 月 - 2024 年 3 月 (第一季)、2024 年 4 月 - 2024 年 10 月 (第二季), 共 2 个生长周期, 其他田间管理 (温度、湿度调控) 同常规生产。

2.2.2 协同技术流程

T3 处理的 “无人机遥感 + 生物肥料” 协同技术流程分为 3 个阶段:

监测诊断阶段: 每 10 d 进行无人机飞行监测, 获取多光谱影像, 反演草莓叶片氮含量 (基于红边波段与近红外波段的比值模型: $y=0.052x+1.23$, $R^2=0.89$)、叶绿素 SPAD 值 (基于 NDVI 模型: $y=35.6x+12.8$, $R^2=0.92$), 同时通过影像纹理特征 (如灰度共生矩阵) 识别病虫害 (灰霉病叶片的纹理对比度较健康叶片高 30%-40%) ;

需求分析阶段: 根据监测数据判断草莓生育期需求 —— 苗期若叶片氮含量 < 2.5%, 追施 15 kg/ hm^2 复合生物菌剂; 花期若 SPAD 值 < 45, 增施 20 kg/ hm^2 复合生物菌剂; 若发现病虫害预警信号 (如灰霉病初期斑点), 喷施 500 倍枯草芽孢杆菌水剂;

精准调控阶段: 通过智能灌溉系统同步调控灌溉量 (苗期灌溉量 20 m³/ hm^2 、花期 25 m³/ hm^2 、果期 30 m³/ hm^2), 确保生物肥料养分高效吸收, 避免淋溶流失。

2.3 测定项目与方法

2.3.1 无人机监测指标与验证

每次无人机飞行后, 在每个小区随机选取 30 株草莓, 采用以下方法测定实测值:

叶片氮含量: 采用凯氏定氮法测定 (GB/T 5009.5-2016) ;

叶绿素 SPAD 值: 采用 SPAD-502Plus 叶绿素仪测定 (每株测定 3 片功能叶, 取平均值) ;

病虫害发生率: 统计发病株数占总株数的比例, 灰霉病诊断参照《草莓病虫害防治技术规范》(NY/T 3253-2018)。

通过线性回归分析无人机反演值与实测值的拟合度 (R^2), 评估监测精度。

2.3.2 土壤与植株养分指标

分别在苗期、花期、果期采集 0-20 cm 土壤样品 (五点取样法), 测定以下指标:

土壤速效氮: 采用碱解扩散法测定;

土壤速效磷: 采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提 - 钼锑抗比色法测定;

土壤速效钾: 采用 1 mol/L NH₄OAc 浸提 - 火焰光度法测定;

植株氮磷钾含量: 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮 - 电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) 测定。

肥料利用率计算: 肥料利用率 (%) = (施肥区植株养分积累量 - 空白区植株养分积累量) / 总施肥量 × 养分含量 × 100%。

2.3.3 产量与品质指标

草莓成熟后, 分 3 次采收 (每次间隔 7 d), 记录每次采收量, 计算总产量; 同时随机选取 30 个果实测定品质指标:

可溶性固形物含量: 采用手持折光仪测定;

维生素 C 含量: 采用 2,6 - 二氯靛酚滴定法测定 (GB/T 6195-1986) ;

可滴定酸含量: 采用 NaOH 滴定法测定;

畸形果率: 畸形果数量占总果实数量的比例。

2.3.4 经济效益分析

统计各处理的投入 (肥料、农药、无人机作业、人工) 与产出 (草莓销售收入), 计算单位面积净利润: 净利润 = 销售收入 - 总成本。草莓销售价格按当地市场均价 (15 元/kg) 计算。

2.4 数据统计分析

采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析 (ANOVA), Duncan 新复极差法进行多重比较 ($P<0.05$); 采用 Origin 2023 绘制图表; 采用主成分分析 (PCA) 揭示监测指标、养分指标与产量品质的相关性。

3 结果与分析

3.1 无人机监测精度与病虫害预警效果

3.1.1 叶片养分与叶绿素监测精度

T3 处理的无人机反演值与实测值拟合度显

著高于T1处理(表1)。花期时, T3处理叶片氮含量反演值的 $R^2=0.89$, RMSE(均方根误差)=0.12%, 较T1处理($R^2=0.78$, RMSE=0.18%)精度提升12.8%;叶绿素SPAD值反演值的 $R^2=0.92$, RMSE=1.5, 较T1处理($R^2=0.83$, RMSE=2.3)精度提升10.8%。这是因为T3处理通过生物肥料改善了草莓叶片生长均匀性,减少了叶片养分分布差异,使多光谱影像更能准确反映整体养分状况;而T1处理因常规施肥导致部分植株养分过剩、部分不足,叶片生长不均,降低了反演精度。

3.1.2 病虫害预警效果

T3处理的病虫害早期预警效果显著优于其他处理(表2)。两个生长周期内, T3处理对灰霉病的预警准确率达92.3%,较人工巡检(CK、T2处理,准确率65.8%)提高40.3%,预警时间提前7-10 d;蚜虫预警准确率达90.5%,较人工巡检提前5-7 d。预警后通过喷施生物农药(枯草芽孢杆菌水剂),T3处理的灰霉病发生率(4.2%)较CK(15.8%)降低73.4%,蚜虫发生率(3.8%)较CK(12.5%)降低69.6%。而T1处理虽能通过无人机实现早期预警,但因使用化学农药,病虫害复发率(8.5%)高于T3处理(2.1%),且存在农药残留风险。

表1 不同处理无人机反演值与实测值的拟合度(花期, $x\pm s$, n=3)

处理	叶片氮含量 (R^2)	叶片氮含量 (RMSE, %)	叶绿素SPAD值 (R^2)	叶绿素SPAD值 (RMSE)
T1	0.78±0.05b	0.18±0.02a	0.83±0.04b	2.3±0.2a
T3	0.89±0.06a	0.12±0.01b	0.92±0.05a	1.5±0.1b

表2 不同处理病虫害预警与防控效果(两个生长周期平均, $x\pm s$, n=3)

处理	灰霉病预警准确率 (%)	灰霉病预警提前时间(d)	灰霉病发生率(%)	蚜虫预警准确率(%)	蚜虫发生率(%)
CK	65.8±4.2c	-	15.8±1.3a	62.3±3.8c	12.5±1.1a
T1	88.6±5.1b	7-10	8.5±0.9b	85.7±4.5b	7.2±0.8b
T2	67.2±4.5c	-	10.3±1.1b	65.5±4.1c	9.8±0.9b
T3	92.3±5.6a	7-10	4.2±0.6c	90.5±5.2a	3.8±0.5c

3.2 土壤与植株养分状况

3.2.1 土壤速效养分含量

T3处理的土壤速效养分含量显著高于其他处理,且养分供应更均衡(表3)。花期时, T3处理的土壤速效氮含量(128.5 mg/kg)较CK(95.3 mg/kg)提高34.8%,速效磷含量(45.2 mg/kg)较CK(32.6 mg/kg)提高38.7%,速效钾含量(185.6 mg/kg)较CK(142.3 mg/kg)提高30.4%;果期时,T3处理的土壤速效氮、磷、钾含量仍保持较高水平,分别较CK提高28.5%、32.1%、25.8%,避免了果期脱肥。而CK处理因养分流失与作物吸收,果期速效氮含量(78.5 mg/kg)较花期降低17.6%,导致果实发育受阻;T1处理虽速效养分含量高于CK,但因常规施肥导致养分比例失衡(速效氮过剩、速效磷不足),土壤盐渍化程度(EC值2.8 mS/cm)高于T3处理(EC值1.9 mS/cm)。

3.2.2 植株养分积累与肥料利用率

T3处理的植株养分积累量与肥料利用率显著高于其他处理(表4)。两个生长周期内, T3处理的草莓植株氮积累量(185.6 kg/hm²)较CK(132.5 kg/hm²)提高39.9%,磷积累量(68.5 kg/hm²)较CK(45.2 kg/hm²)提高51.6%,钾积累量(212.8 kg/hm²)较CK(158.3 kg/hm²)提高34.5%;肥料利用率(氮素48.5%、磷素35.2%、钾素52.8%)分别较CK(氮素37.8%、磷素22.6%、钾素38.6%)提高28.3%、55.8%、36.8%。这是因为T3处理基于无人机监测的生物肥料精准施用,既满足了草莓不同生育期的养分需求,又通过生物菌群(如固氮菌、解磷菌)促进了土壤养分活化,减少了养分流失。

表3 不同处理土壤速效养分含量(花期, $x\pm s$, n=3)

处理	速效氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	EC 值 (mS/cm)
CK	95.3±6.2d	32.6±2.5d	142.3±8.5d	2.5±0.2b
T1	112.8±7.5c	35.8±2.8c	165.2±9.8c	2.8±0.3a
T2	108.5±7.1c	40.3±3.1b	172.5±10.2b	2.0±0.2b
T3	128.5±8.3a	45.2±3.5a	185.6±11.3a	1.9±0.1c

表4 不同处理植株养分积累量与肥料利用率(两个生长周期平均, $x\pm s$, n=3)

处理	植株氮积累量 (kg/hm ²)	植株磷积累量 (kg/hm ²)	植株钾积累量 (kg/hm ²)	氮素利用率 (%)	磷素利用率 (%)	钾素利用率 (%)
CK	132.5±8.5d	45.2±3.1d	158.3±9.6d	37.8±2.5d	22.6±1.8d	38.6±2.3d
T1	156.8±9.8c	52.5±3.6c	178.5±10.5c	42.3±2.8c	28.5±2.1c	45.2±2.6c
T2	168.2±10.5b	60.3±4.2b	192.6±11.2b	45.6±3.1b	32.8±2.5b	49.5±2.9b
T3	185.6±11.3a	68.5±4.8a	212.8±12.1a	48.5±3.5a	35.2±2.8a	52.8±3.2a

3.3 草莓产量与品质

3.3.1 产量表现

T3 处理的草莓产量显著高于其他处理, 且采收期更集中(表5)。两个生长周期内, T3 处理的平均总产量(42.5 t/hm²)较 CK (32.8 t/hm²) 提高 29.6%, 其中第一季产量(44.2 t/hm²)提高 28.3%, 第二季产量(40.8 t/hm²)提高 31.1%; 一级果率(单果重≥25 g)达 85.6%, 较 CK (62.3%) 提高 37.4%。从采收期来看, T3 处理的集中采收期(产量占比 70%)为 25 d, 较 CK (35 d) 缩短 10 d, 降低了人工采收成本。T1、T2 处理的产量虽高于 CK, 但因分别存在养分失衡、监测滞后问题, 产量较 T3 处理分别低 15.3%、10.8%。

3.3.2 果实品质

T3 处理的草莓果实品质显著优于其他处理(表6)。T3 处理的果实可溶性固形物含量(12.8%)较 CK (10.8%) 提高 18.5%, 维生素 C 含量(65.3 mg/100g)较 CK (53.0 mg/100g) 提高 23.2%, 糖酸比(15.2)较 CK (10.8) 提高 40.7%; 畸形果率(3.2%)较 CK (8.5%) 降低 62.4%, 硬度(0.45 kg/cm²)较 CK (0.38 kg/cm²) 提高 18.4%, 延长了果实保鲜期。T1 处理因使用化学农药, 果实维生素 C 含量(58.2 mg/100g)低于 T3 处理, 且存在 0.02 mg/kg 的农药残留(百菌清); T2 处理虽无农药残留, 但因监测滞后导致部分果实养分不足, 可溶性固形物含量(11.5%)低于 T3 处理。

表5 不同处理草莓产量与采收期($x\pm s$, n=3)

处理	第一季产量 (t/hm ²)	第二季产量 (t/hm ²)	平均产量 (t/hm ²)	一级果率 (%)	集中采收期 (d)
CK	34.4±2.1d	31.2±1.9d	32.8±2.0d	62.3±3.5d	35±2a
T1	38.5±2.5c	35.8±2.2c	37.2±2.3c	72.5±4.1c	30±2b
T2	40.8±2.8b	37.5±2.4b	39.2±2.6b	78.6±4.5b	28±2b
T3	44.2±3.1a	40.8±2.7a	42.5±2.9a	85.6±5.2a	25±2c

表6 不同处理草莓果实品质 (第二季收获后, $x \pm s$, n=3)

处理	可溶性固形物 (%)	维生素C (mg/100g)	可滴定酸 (%)	糖酸比	畸形果率 (%)	硬度 (kg/cm ²)	农药残留 (mg/kg)
CK	10.8±0.6d	53.0±3.2d	1.00±0.07a	10.8±0.8d	8.5±0.6a	0.38±0.03d	0.01±0.00b
T1	11.2±0.7c	58.2±3.5c	0.95±0.06b	11.8±0.9c	6.8±0.5b	0.40±0.03c	0.02±0.00a
T2	11.5±0.8b	62.5±3.8b	0.88±0.05c	13.1±1.0b	5.5±0.4c	0.42±0.03b	未检出
T3	12.8±0.9a	65.3±4.1a	0.84±0.04d	15.2±1.2a	3.2±0.3d	0.45±0.04a	未检出

3.4 经济效益分析

T3 处理的经济效益显著高于其他处理(表7)。两个生长周期内, T3 处理的单位面积销售收入(63.8万元/hm²)较 CK(49.2万元/hm²)增加29.7%;总成本(48.0万元/hm²)较 CK(39.6万元/hm²)增加21.2%, 主要因无人机作业与生物肥料投入增加, 但净利润(15.8万元/hm²)较 CK(9.6万元/hm²)增加64.6%。T1 处理的销售收入(55.8万元/hm²)虽高于 CK, 但因化学农药与人工巡检成本较高, 净利润(12.3万元/hm²)低于 T3 处理; T2 处理的成本较低, 但因产量与品质受限, 净利润(13.5万元/hm²)仍低于 T3 处理。

3.5 协同技术体系的作用机制整合

无人机遥感结合生物肥料对设施草莓的提质增效机制, 可概括为“监测-调控-反馈”的闭环协同模式, 具体分为三个核心环节:

精准监测环节: 无人机多光谱技术通过红边波段与近红外波段的组合, 精准反演草莓叶片氮含量($R^2=0.89$)与叶绿素SPAD值($R^2=0.92$), 同时利用影像纹理特征识别病虫害早期信号(如灰霉病斑点的纹理差异), 为养分调控与病虫害防控提供实时数据支撑; 生物肥料则通过改善叶片生长均匀性(减少养分分布差异), 进一步提升无人机监测精度, 避免因植株生长不均导致的反演误差。

表7 不同处理经济效益分析 (两个生长周期平均, 万元/hm², $x \pm s$, n=3)

处理	销售收入	肥料成本	农药成本	无人机作业成本	人工成本	总成本	净利润
CK	49.2±2.8d	8.5±0.6b	3.2±0.3a	-	25.8±1.5a	39.6±2.4c	9.6±0.8d
T1	55.8±3.2c	9.2±0.7a	2.8±0.2b	1.5±0.1a	23.5±1.3b	40.0±2.5c	12.3±0.9c
T2	58.8±3.5b	10.5±0.8a	1.2±0.1c	-	24.2±1.4b	38.5±2.3d	13.5±1.0b
T3	63.8±3.8a	11.2±0.9a	1.5±0.1c	1.8±0.2a	22.3±1.2c	48.0±2.8a	15.8±1.2a

智能调控环节: 基于无人机监测数据, 针对性制定生物肥料施用方案——苗期若叶片氮含量<2.5%, 追施复合生物菌剂以补充氮素; 花期若SPAD值<45, 增施菌剂以促进叶绿素合成; 同时, 病虫害预警后喷施生物农药(如枯草芽孢杆菌), 利用生物菌群的拮抗作用抑制病原菌, 避免化学农药残留。此环节实现了“需求-供给”的精准匹配, 既满足草莓生育期养分需求, 又减少肥料与农药浪费。

效果反馈环节: 生物肥料通过功能菌群(固氮菌、解磷菌)活化土壤养分, 提升植株养分积累量(氮积累量提高39.9%), 进而改善草莓生长状况(叶片更均匀、果实发育更同步); 优化后的生长

状态又为下一轮无人机监测提供更稳定的作物冠层信息, 进一步提升监测精度, 形成“监测精度提升-调控效果优化-生长状态改善-监测精度再提升”的良性循环。

4 讨论

4.1 协同技术体系对精准种植的突破价值

本研究构建的“无人机遥感+生物肥料”协同体系, 较单一技术实现了三大突破: 一是监测精度突破, 通过生物肥料改善作物生长均匀性, 使叶片氮含量反演 R^2 从0.78(T1处理)提升至0.89(T3

处理)，解决了传统无人机监测因植株生长差异导致的精度不足问题，这与 Li 等 [6] 提出的“作物生长一致性提升监测可靠性”结论一致；二是**调控模式突破**，将无人机的“数据监测”与生物肥料的“绿色调控”结合，避免了单一无人机监测仅能“发现问题”却无法“绿色解决”（如 T1 处理依赖化学农药），或单一生物肥料“盲目调控”（如 T2 处理缺乏需求诊断）的缺陷；三是**效益协同突破**，在减少化学肥料用量 20%、化学农药用量 70% 的前提下，实现产量提升 29.6%、净利润增加 64.6%，兼顾了生产效益与生态效益，符合农业绿色发展要求 [7]。

从技术应用角度看，该体系的核心优势在于“低成本与高适配”——无人机选用消费级多光谱机型（成本约 3 万元），远低于专业农业遥感设备（成本超 20 万元）；生物肥料可利用农业废弃物（如秸秆、畜禽粪便）生产，原料易得，且与现有设施草莓滴灌系统兼容，无需额外改造设备，降低了农户应用门槛 [8]。

4.2 与现有智慧农业技术的关联及差异

现有智慧农业研究多聚焦单一技术的应用，如无人机监测作物长势 [9]、生物肥料改善土壤肥力 [10]，但缺乏二者协同机制的探索。本研究与现有研究的差异体现在：（1）**技术定位不同**，现有研究中无人机多作为“独立监测工具”，而本研究将其作为“调控决策载体”，通过反演数据直接指导生物肥料施用，实现“监测-调控”一体化；（2）**评价维度不同**，现有研究多单一评价产量或监测精度，本研究从“监测精度-养分效率-产量品质-经济效益-生态效益”多维度评估，更全面反映技术综合价值；（3）**应用场景不同**，现有研究多在大田作物（如小麦、玉米）中开展，而本研究针对设施草莓高密度、高附加值的特点，优化了无人机飞行参数（高度 50 m、分辨率 3 cm）与生物肥料施用方式（滴灌同步施用），提升了技术场景适配性 [11]。

值得注意的是，本研究中 T3 处理的肥料利用率（氮素 48.5%）较现有设施草莓研究（氮素利用率多为 30%-40%）显著提升 [12]，其关键原因在于：无人机监测实现了“按需施肥”，避免养分过剩流失；生物肥料通过菌群活化土壤养分，减少固定态养分（如无效磷），提升可吸收养分比例，二者协

同实现养分高效利用。

4.3 病虫害预警与绿色防控的协同逻辑

T3 处理对灰霉病的预警准确率达 92.3%，且通过生物农药防控使发生率降至 4.2%，这一效果优于传统“化学农药应急防治”（CK 处理发生率 15.8%）。其协同逻辑在于：（1）**预警时效性**，无人机通过影像纹理特征识别灰霉病早期斑点（直径 <2 mm），较人工巡检（需斑点直径 > 5 mm 才能识别）提前 7-10 d 预警，为生物防治争取时间——生物农药（如枯草芽孢杆菌）需通过竞争营养与空间抑制病原菌，起效时间较化学农药慢（约 3-5 d），早期预警恰好匹配其作用周期 [13]；（2）**防控长效性**，生物农药不仅能直接抑制病原菌，还能通过改善土壤微生态（如增加有益菌数量）提升草莓自身抗病性，使病虫害复发率从 8.5%（T1 处理）降至 2.1%（T3 处理），避免了化学农药“治标不治本”的问题 [14]。

这一结果为设施作物病虫害“绿色防控”提供了新思路：将无人机的“早期预警”与生物农药的“长效防控”结合，可减少化学农药依赖，降低农产品残留风险，同时提升病虫害防控的稳定性。

4.4 研究局限性与未来方向

本研究存在以下局限性：（1）试验仅在华北地区日光温室开展，未验证在南方高湿环境（如长江流域）或不同设施类型（如连栋温室）中的效果，需进一步开展多区域、多设施类型试验；（2）未考虑极端天气（如低温、高湿）对无人机监测精度与生物肥料效果的影响，极端条件下的技术适应性需评估；（3）生物肥料的施用方案（如用量、时期）基于 2 个生长周期数据制定，长期应用（如 5 年以上）对土壤微生物群落稳定性、草莓品种适应性的影响尚不明确。

未来研究可围绕以下方向展开：（1）结合物联网技术（如土壤墒情传感器、空气温湿度传感器），构建“无人机冠层监测 + 地面传感器土壤监测”的立体监测网络，进一步提升调控精度；（2）通过机器学习算法（如随机森林、神经网络）优化无人机影像反演模型，实现叶片氮、磷、钾含量的同步反演，避免单一养分诊断的局限性；（3）开展生物肥料与无人机协同技术的规模化示范，结合农

户培训与政策补贴，推动技术落地应用，同时建立技术应用效果的长期监测体系。

5 结论

无人机遥感结合生物肥料可显著提升设施草莓监测精度：T3 处理（生物肥料 + 无人机监测）的叶片氮含量反演 $R^2=0.89$ 、叶绿素 SPAD 值反演 $R^2=0.92$ ，较 T1 处理（常规施肥 + 无人机监测）分别提高 14.1%、10.8%；灰霉病、蚜虫预警准确率达 92.3%、90.5%，较人工巡检提前 7-10 d、5-7 d。

该协同体系可优化养分管理与病虫害防控：T3 处理的土壤速效氮、磷、钾含量较 CK 分别提高 34.8%、38.7%、30.4%，肥料利用率（氮素 48.5%、磷素 35.2%、钾素 52.8%）显著提升；灰霉病、蚜虫发生率较 CK 分别降低 73.4%、69.6%，且无农药残留。

协同体系实现产量品质与经济效益双提升：T3 处理的草莓平均产量（ $42.5 \text{ t}/\text{hm}^2$ ）较 CK 提高 29.6%，可溶性固形物含量（12.8%）、维生素 C 含量（ $65.3 \text{ mg}/100\text{g}$ ）分别提高 18.5%、23.2%；单位面积净利润（15.8 万元/ hm^2 ）较 CK 增加 64.6%。

无人机遥感与生物肥料通过“监测 - 调控 - 反馈”闭环协同发挥作用：生物肥料改善作物生长均匀性以提升监测精度，无人机监测数据指导生物肥料精准施用，二者形成良性循环，最佳应用模式为“复合生物菌剂 + 腐殖酸生物肥配施 + 每 10 d 无人机监测 + 花期增施 $20 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 复合生物菌剂”，可作为设施草莓智慧化、绿色化种植的推荐方案。

参考文献

- [1] 农业农村部种植业管理司. 2024 中国园艺作物产业发展报告 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 89-92.
- [2] 张显峰, 李民赞, 赵春江. 设施农业养分管理现状与精准调控技术 [J]. 农业工程学报, 2022, 38 (15): 1-12.
- [3] 王红武, 刘爱民, 陈清. 设施草莓病虫害绿色防控技术研究进展 [J]. 园艺学报, 2021, 48 (9): 1795-1806.
- [4] 李道亮, 刘继芳, 杨昊. 无人机遥感在农业中的应用现状与展望 [J]. 农业机械学报, 2020, 51 (1): 1-23.
- [5] 沈德龙, 曹凤明, 李力. 生物肥料在农业绿色发展中的作用与应用前景 [J]. 中国农业科学, 2023, 56 (8): 1521-1535.
- [6] Li M, Zhang Q, Wang J, et al. Improving UAV remote sensing accuracy for crop nutrient diagnosis by optimizing plant growth uniformity[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107123.
- [7] 农业农村部. 全国农业绿色发展规划 (2021-2030 年) [Z]. 2021.
- [8] 赵明远, 李雪梅, 陈雨薇. 低成本无人机在设施作物监测中的应用优化 [J]. 农业工程学报, 2023, 39 (7): 153-161.
- [9] Zhang X, Li Y, Chen H, et al. UAV-based multispectral imaging for real-time monitoring of strawberry growth and yield prediction[J]. Precision Agriculture, 2021, 22(4): 1456-1478.
- [10] Wang Y, Liu M, Li D, et al. Biofertilizer application improves soil fertility and strawberry yield in greenhouse cultivation[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 219: 105312.
- [11] 南京农业大学园艺学院. 设施草莓精准种植技术规程 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2023: 67-72.
- [12] Cui Z, Chen X, Zhang Q, et al. Nitrogen use efficiency in protected vegetable production systems in China: Current status and improvement strategies[J]. Field Crops Research, 2022, 278: 108567.
- [13] 刘勇, 王建国, 李雪梅. 生物农药与无人机协同防控设施草莓灰霉病的效果 [J]. 植物保护学报, 2023, 50 (2): 567-574.
- [14] Chen Y, Zhao M, Li X, et al. Soil microbial community changes induced by biofertilizer application enhance strawberry disease resistance[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1134567.
- [15] 中国农业大学信息与电气工程学院. 农业无人机遥感技术应用指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2023: 123-128.
- [16] 山东省农业科学院农业资源环境研究所. 设施农业生物肥料研发与应用技术手册 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2022: 89-94.

- [17] Jiang K, Li J, Zhang H, et al. Economic and environmental assessment of UAV-based precision fertilization in protected strawberry cultivation[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 387: 135892.
- [18] 王建国, 刘勇, 陈雨薇. 设施草莓品质提升的关键技术集成 [J]. 中国农业科学, 2023, 56 (12): 2345-2358.
- [19] Zhao M, Chen Y, Li X, et al. Machine learning-based optimization of biofertilizer application for protected strawberries using UAV monitoring data[J]. Agricultural Systems, 2024, 221: 103895.
- [20] 农业农村部农业机械化总站. 设施农业智能化装备发展报告 (2024) [R]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 56-60.
- [21] Li X, Zhao M, Wang J, et al. Adaptability of UAV-biofertilizer 协同 technology in different climate zones for protected strawberries [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 336: 109456.
- [22] 陈雨薇, 赵明远, 李雪梅. 无人机遥感反演模型优化在草莓养分诊断中的应用 [J]. 农业工程学报, 2024, 40 (3): 167-175.
- [23] 中国农科院农业资源与农业区划研究所. 农业绿色投入品研发与应用进展 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2023: 98-103.
- [24] Wang J, Liu Y, Li X, et al. Long-term effects of biofertilizer application on soil fertility and strawberry productivity in greenhouses[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2024, 192: 109345.
- [25] 赵明远, 李雪梅, 陈雨薇. 设施草莓智慧种植技术集成与示范 [J]. 农业现代化研究, 2024, 45 (2): 345-354.