

无人机飞行速度与氮肥农药减施模式对机插稻产量形成和能效的影响

陈雪芳¹ 曹云¹ 汤菁莎¹ 黄兴海¹ 何咨霆¹ 王岚芃¹ 李瑞杰¹ 陆焘¹ 孙园园²
廖琴¹ 王仲林¹ 杨志远¹ 马均¹ 孙永健^{1,*}

(¹ 四川农业大学 水稻研究所/作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 成都 611130; ² 四川省气候中心, 成都 610072; *通信作者, email: yongjians1980@163.com)

Effects of UAV Flight Speed and Reduced Application of Nitrogen Fertilizers and Pesticides on Yield Formation and Energy Efficiency in Machine-transplanted Rice

CHEN Xuefang¹, CAO Yun¹, TANG Jingsha¹, HUANG Xinghai¹, HE Ziting¹, WANG Lanpeng¹, LI Ruijie¹, LU Tao¹, SUN Yuanyuan², LIAO Qin¹, WANG Zhonglin¹, YANG Zhiyuan¹, MA Jun¹, SUN Yongjian^{1,*}

(¹Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University/Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China; ² Sichuan Climate Center, Chengdu 610072, China; *Corresponding author, email: yongjians1980@163.com)

Abstract:【Objective】To determine the effects of efficient, reduced-input pesticide and nitrogen (N) fertilizer application via unmanned aerial vehicles (UAVs) on the yield formation and energy efficiency of machine-transplanted rice. This study proposes an optimal model for adapting reduced N fertilizer and pesticide inputs to UAV operational efficiency, providing a theoretical foundation and practical basis for integrated UAV fertilizer and pesticide application systems.

【Methods】A randomized block design was used with two drone flight speeds and four fertilizer-pesticide reduction treatments. Two drone speeds were set: 5.0 m/s (F₁) and 5.5 m/s (F₂). Four treatments with proportionally reduced N fertilizer and pesticide application were established: conventional application rate (N₁), 10% reduction (N₂), 20% reduction (N₃), and 30% reduction (N₄). Manual conventional application (CK₁) and no application (CK₂) served as controls. The study examined the effects of UAV flight speed and combined reduction treatments on machine-transplanted rice yield, plant population quality, and energy efficiency, while exploring the relationship between yield formation and energy efficiency under the UAV-based integrated fertilizer and pesticide application model.

【Results】Compared with the CK₁ treatment, the F₁N₁, F₂N₁, F₁N₂, and F₂N₂ treatments increased yields by 1.22%-1.96%, with no significant yield differences among treatments and disease control efficacy exceeding 84% in all cases. Notably, under 10% reduced fertilizer and pesticide application, treatments F₁N₂ and F₂N₂ exhibited increases of 1.73%-13.24% in both dry matter transport volume and rate, as well as N transport volume and rate. N partial factor productivity, N uptake efficiency, and N harvest index increased by 12.48%-12.89%, 17.84%-18.75%, and 1.86%-2.30%, respectively. Energy output, net energy and energy utilisation efficiency increased by 0.54%-0.66%, 0.98%-1.11%, and 5.47%-5.52%, respectively. Under identical fertilizer-pesticide regimes, a 10% increase in drone flight speed raised electricity consumption by 5.19%-10.11%. However, reduced labor hours offset electricity costs, yielding the highest net profit of 8,848.94 yuan/hm² under the F₂N₂ treatment. This demonstrates that a 10% increase in UAV speed combined with a 10% reduction in N fertilizer and pesticide application (F₂N₂ treatment) enhances operational efficiency and reduces production costs (labor) while maintaining net profit. This achieves cost savings and efficiency gains, representing the optimal production model for N fertilizer and pesticide reduction adapted to UAV operational efficiency in this trial. **【Conclusion】**The 10% drone speed increase coupled with 10% integrated N fertiliser and pesticide reduction drives synergistic optimization of yield, ecology, and energy efficiency in machine-transplanted rice through an optimised compensation mechanism. This achieves unified synergies of fertilizer and pesticide savings alongside high yields and efficiency, providing theoretical and technical support for fully mechanised green rice production.

Keywords: rice; UAV; flight rate; N fertilizer; pesticide; production energy efficiency

收稿日期: 2025-08-18; 修改稿收到日期: 2025-12-12。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2023YFD2301903); 四川省科技计划资助项目(2024NZZJ0005); 四川省“十四五”生物育种重大科技专项(2022ZDZX0012); 四川省农机研发制造推广应用一体化试点项目; 国家现代农业产业体系四川创新团队项目(SCCXTD-2024-2); 四川省育种攻关项目(2021YFYZ0005)。

摘要: 【目的】明确无人机高效减量喷洒农药与氮肥对机插稻产量形成与能效的影响, 提出氮肥农药减量适配无人机作业效率的最佳模式, 为无人机肥药综合生产模式提供理论基础和实践依据。【方法】设置无人机飞行速度与肥药综合减施随机区组试验, 2 种无人机飞行速度分别为 5.0 m/s (F_1) 和 5.5 m/s (F_2); 4 种氮肥农药同比例减施处理分别为氮肥农药综合常规用量处理(N_1)、减量 10% (N_2)、减量 20% (N_3)、减量 30% (N_4), 并设人工常规氮肥农药处理(CK_1)和不施肥药处理(CK_2)为对照, 研究无人机飞行速度与氮肥农药综合减施处理对机插稻产量、群体质量及能效的影响, 并探讨无人机肥药综合生产模式下机插稻产量形成与能效间的关系。【结果】与 CK_1 处理相比, F_1N_1 、 F_2N_1 、 F_1N_2 和 F_2N_2 处理增产 1.22%~1.96%, 各处理产量差异不显著且对病害防治效果均达 84% 以上。尤其是 F_1N_2 和 F_2N_2 处理, 在肥药减量 10% 条件下, 群体干物质转运量、转运率和氮素转运量、转运率增加了 1.73%~13.24%, 氮肥偏生产力、氮肥吸收利用率和氮素收获指数分别增加 12.48%~12.89%、17.84%~18.75%、1.86%~2.30%, 能量产出、净能量、能量利用效率分别增加 0.54%~0.66%、0.98%~1.11%、5.47%~5.52%。同一肥药模式下, 无人机飞行提速 10% 电能耗量增加 5.19%~10.11%, 但缩短了劳动力工作时间, 可补偿电能成本, 净收益以 F_2N_2 处理 8848.94 元/hm² 最高。表明无人机提速 10% 配合氮肥农药减量 10% (F_2N_2 处理), 在保障净收益的基础上提高工作效率和节省生产成本(劳动力), 达到节本增效, 为本研究氮肥农药减量适配无人机作业效率的最佳生产模式。【结论】提高无人机作业速度 10% 且配合氮肥农药综合减量 10% 模式, 可驱动机插稻通过优化模式补偿机制实现产量、生态、能效的协同优化, 达到节肥节药丰产高效的协同统一, 为水稻全程机械化绿色生产提供了理论与技术支撑。

关键词: 水稻; 无人机; 飞行速度; 氮肥; 农药; 生产能效

水稻产量不仅受品种遗传特性的影响, 也受肥料、农药使用等因素的影响^[1]。中国氮肥生产量和消费量均居世界第一, 但氮肥利用率却比发达国家低 20%^[2]。过量施氮使作物贪青晚熟, 茎秆弱易倒伏, 导致减产^[3]。如何保证水稻高产稳产的同时提高氮肥利用效率已成为急需解决的问题。前人研究认为, 采用均衡减氮^[4]、氮肥后移^[5]、缓控释肥施用^[6]等技术, 能够在保持较高有效穗和每穗粒数的基础上, 显著提高结实率, 若集中单一生育时期减施会导致有效穗和每穗粒数显著下降, 进而减产^[7]。中国继“十三五”时期成功实施了化肥、农药减量行动, 单位面积农药使用量呈相对平稳且减少趋势, 但总投入量仍不容忽视^[8]。有研究表明, 当化肥减量不超过 20%, 并用生物农药替代化学农药时, 能基本实现控制主要病虫害发生而不减产的目的^[9]。为进一步推进农业可持续发展, 国家仍将继续深入推进化肥、农药减量增效工作。

2022 年, 中国近几十年来首次出现人口负增长, 老龄化日益严重、农村劳动力减少、农资生产成本增加等制约水稻产投效益^[10]。但随农业科技不断进步, 无人机施肥打药、机械化种植与智能化管理应运而生, 为水稻生产提供了新路径, 特别是农业现代化转型升级和高标准农田建设, 无人机产业迅猛发展。当前无人机可完成水稻“种、管”生产环节, 且相比传统肥药管理, 具有作业效率高、省工、省水、省药、成本低和施药效果好等优点^[11]。另外, 无人机比人工播种更能够获得较高的基本苗数、高峰苗数和有效穗数, 产量也无显著差异^[12]; 飞防时减少农药用量 20%, 对稻飞虱、纹枯病和稻

曲病等的防治仍具有一定增效作用^[13], 且无人机肥药管理已在水稻、小麦、玉米等大田粮食作物上广泛应用^[14-15]。无人机喷洒均匀度是评价其工作效果的关键, 主要受飞行速度和飞行高度的影响^[16], 但研究结论不一致^[17-18], 当飞行高度 4.0 m, 速度 5 m/s 时复合肥播撒均匀度最高; 也有研究表明无人机飞行高度 3.0 m、速度 5.0 m/s、喷液量为 60.0 L/hm² 时效果最佳。此外, 相关研究表明无人机飞行速度过快肥药易漂移, 过慢则导致肥药过量堆积^[19]; 尤其在无人机工作参数的优化过程中, 不仅要考虑肥料、农药的减量增效, 还要考虑生产中电力、燃料、相关设备机械能源消耗和投入物的生产成本情况, 当前系统性研究仍不多。

为此, 本研究以飞行速度和氮肥农药减施为切入点, 探究两者对水稻产量、防治效果、群体生长、能效及效益的影响。通过对水稻生产过程中能量的投入、产出进行分析, 评估无人机氮药减施技术的可持续性, 为集成无人机肥药减施综合生产技术提供理论基础和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

在前期研究^[5]的基础上, 试验于 2024 年 4-9 月在四川省眉山市东坡区永丰村(103°83'E, 30°14'N, 海拔 424 m)水稻新品种新技术四川省中试研发基地进行, 试验田块为 2002 年改造的高标准农田, 面积 2 hm²。试验地年平均温度 17.2°C, 降雨量 1400 mm, 耕层土壤(0-20 cm)含速效氮

表 1 氮药综合减施处理

Table 1. Integrated N fertilizer reduction treatment

处理 Treatment	氮肥施用 N application (kg/hm ²)			农药施用 Pesticide application (mL/hm ²)		
	基肥 (移栽前 1 d) Basal fertilizer (1 day before transplanting)	蘖肥 (移栽后 7 d) Tillering fertilizer (7 days after transplanting)	穗肥 (幼穗分化期) Topdressing for panicle initiation	分蘖期 (移栽后 22 d) Tillering stage (22 days after transplanting)	分蘖临界期 -拔节期 Critical tillering stage-jointing stage	抽穗 破口期 Heading stage
F ₁ N ₁	45.00	45.00	60.00	100% (A+B)	100% (A+C)	100%(B+C+D+E)
F ₁ N ₂	40.50	40.50	54.00	90% (A+B)	90% (A+C)	90%(B+C+D+E)
F ₁ N ₃	36.00	36.00	48.00	80% (A+B)	80% (A+C)	80%(B+C+D+E)
F ₁ N ₄	31.50	31.50	42.00	70% (A+B)	70% (A+C)	70%(B+C+D+E)
F ₂ N ₁	45.00	45.00	60.00	100% (A+B)	100% (A+C)	100%(B+C+D+E)
F ₂ N ₂	40.50	40.50	54.00	90% (A+B)	90% (A+C)	90%(B+C+D+E)
F ₂ N ₃	36.00	36.00	48.00	80% (A+B)	80% (A+C)	80%(B+C+D+E)
F ₂ N ₄	31.50	31.50	42.00	70% (A+B)	70% (A+C)	70%(B+C+D+E)
CK ₁ (人工)	45.00	45.00	60.00	100% (A+B)	100% (A+C)	100%(B+C+D+E)
CK ₂ (空白)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

N1: 常规氮肥农药模式; N2: 氮肥农药综合减量 10%; N3: 氮肥农药综合减量 20%; N4: 氮肥农药综合减量 30%; F₁和 F₂ 分别表示无人机飞行速度 5.0 m/s 和 5.5 m/s。CK1: 人工常规氮肥农药处理; CK2: 不施肥药。农药施用时间及用量均按照当地生产模式。A: 11.6%甲维氯虫苯(750 mL/hm²); B: 10%阿维菌素(750 mL/hm²); C: 30%苯甲丙环唑(450 mL/hm²); D: 20%三环唑(1500 mL/hm²); E: 40%氯虫噻虫嗪(150 g/hm²)。

N₁, Conventional nitrogen fertilizer and pesticide treatment; N₂, 10% reduction in total nitrogen fertilizer and pesticide amount; N₃, 20% reduction in total nitrogen fertilizer and pesticide amount; N₄, 30% reduction in total nitrogen fertilizer and pesticide amount; F₁ and F₂ refer to drone speeds of 5.0 m/s and 5.5 m/s, respectively. CK₁, Conventional manual nitrogen fertilizer and pesticide treatment; CK₂, No fertilizer or pesticides; The average yield range in the table represents the mean of the UAV treatment F₁ (5.0 m/s) and F₂ (5.0 m/s). The timing and dosage of pesticide application shall be determined in accordance with local production practices. A, 11.6% methoxyfenozide (750 mL/hm²); B, 10% avermectin (750 mL/hm²); C, 30% benomyl (450 mL/hm²); D, 20% triazole (1500 mL/hm²); E, 40% chlorantraniliprole (150 g/hm²).

101.5±2.6 mg/kg, 速效磷 19.6±1.4 mg/kg, 速效钾 106.0±4.2 mg/kg, 有机质 23.8±0.3 g/kg, pH 值为 6.0±0.4, 肥力均匀。以超级稻品种川康优 6308(粳型三系杂交稻, 四川农业大学选育)为试材, 用大疆 T60 无人机(深圳大疆科技创新有限公司)开展肥药撒施作业。无人机参数设置如下: 离心盘转速为 1000 r/min, 喷幅为 7.0 m, 内缩为 2.0 m, 飞行高度为 3.0 m, 飞行速度 5.0 m/s 和 5.5 m/s。

1.2 试验设计

采用完全随机区组设计, 设置 2 种无人机飞行速度和 4 种氮肥农药减施组合(表 1), 其中, 飞行速度分别为 F₁(常规飞行速度 5.0 m/s)和 F₂(飞行速度提高 10%, 即 5.5 m/s)。在常规施氮量 150 kg/hm²和常规用药量基础上设置氮肥农药同比例减施处理, 具体包括: N₁(常规氮肥农药模式)、N₂(氮肥农药综合减量 10%)、N₃(氮肥农药综合减量 20%)、N₄(氮肥农药综合减量 30%)。同时设置两个对照 CK₁(人工常规氮肥农药处理)和 CK₂(不施肥药空白)。共 10 个处理, 重复 3 次。4 月 10 日机械化播种, 暗化出苗无纺布覆盖育秧, 机插秧龄 25 d, 行株距 30 cm×18 cm。为确保肥药不会飘至邻近小区, 小区宽 11.5 m, 无人机作业喷施幅面 7.0 m, 各小区间形成自然间隔安全缓冲带, 并通过单次飞行完整覆盖小区宽度(无人机无需掉头往返重新喷施), 避免了肥药飘移, 也使各个小区均达到防治效果。

各处理磷肥(过磷酸钙, 含 P₂O₅ 12%)施用量折合 P₂O₅ 75 kg/hm², 均作为基肥一次施用; 钾肥(氯化钾, 含 K₂O 60%)施用量折合 K₂O 150 kg/hm², 作基肥和穗肥等量施用。基肥于插秧前 1 d 施用, 蘖肥于栽后 7 d 施用, 穗肥于倒 4 叶期施用, 其他田间管理均按照当地病情、虫情发生规律及高产栽培技术管理。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 病虫害防治

纹枯病和螟虫防效调查参照姚熔薇等^[20]的方法, 水稻抽穗破口前按枯心、枯鞘穴数调查螟虫危害情况; 稻曲病(黄熟期)病情分级参照唐春生等^[21]的调查方法; 收获前调查白穗穴数。

1.3.2 干物质积累及转运

于拔节期、齐穗及成熟期根据平均茎蘖数, 取植株 3 穴, 重复 3 次。将茎鞘、叶片和穗分装, 于 105℃下杀青 30 min, 80℃下烘干至恒重。按照杨永刚等^[22]的方法计算叶片(茎鞘)干物质积累量、转运量和转运率。

1.3.3 叶面积指数和 SPAD 值

在拔节期、齐穗及成熟期, 各小区根据平均茎蘖数取样, 利用长宽系数法^[23]测定植株绿叶叶面积, 计算叶面积指数(LAI)。用 SPAD-502 叶绿素测定仪(柯尼卡美能达, 日本)测定齐穗期、齐穗后 15 d、成熟期 5 片剑叶上部 1/3 处、中部和下部 1/3

表 2 能量系数和投入要素的单位价格
Table 2. Energy coefficient and unit price of input factors

项目 Parameter	单位 Unit	能量系数 Energy equivalent	价格(元) Price (yuan)
杂交稻种 Hybrid rice seeds	kg	14.70	70.51
劳动力 Labor	h	1.96	18.15
燃料 Fuel	L	56.31	6.66
电 Electricity	kWh	3.60	0.55
氮肥 N fertilizer	kg	66.14	3.26
磷肥 Phosphate fertilizer	kg	12.44	2.76
钾肥 Potash fertilizer	kg	11.15	2.35
杀虫剂 Insecticide	kg	101.20	332.30
杀菌剂 Fungicide	kg	216.00	461.42
稻谷 Paddy rice	kg	17.00	2.60
秸秆 Rice straw	kg	12.50	0.30
机械 Machinery	h	62.70	-

单位价格为试验区生产价格和平均用工费。
The unit price is based on the production cost in the pilot zone and the average labor cost.

处的 SPAD 值，重复 3 次，取平均值。

1.3.4 氮素积累及转运

将 1.3.2 烘干样品粉碎过 80 目筛，用 H₂SO₄ 消煮后采用全自动凯氏定氮仪(K1100/K1100F，海能未来技术集团股份有限公司，中国)测定各部位氮含量。按照杨永刚等^[22]的方法计算植株氮素积累量、转运量及吸收利用效率。

1.3.5 考种及测产

在成熟期，根据平均有效穗数，每小区选取 5 穴稻株，测定空秕粒、实粒数和千粒重，并计算总颖花数、结实率等。各小区单独采收、晾晒后，将籽粒含水量换算为标准含水量 13.5%。

1.3.6 能效及效益分析

试验过程中使用的各种机械分别为育秧播种机 2BP-1000，质量 210 kg，电消耗 2.37 kWh；雷沃耕地机 P1204-4P，质量 4000 kg，燃料消耗 15.30 L/h；洋马插秧机 YR60M，质量 755 kg，燃料消耗 3.47 L/h；大疆无人机 T60，质量 62.00 kg，电消耗 9.65 kWh；人工喷雾器 3WBD-20L，质量 4.50 kg，电消耗 0.003 kWh；久保田收割机 PRO888GM，质量 3760 kg，燃料消耗 17.39 L/h。生产成本统计整个生产环节中人工和无人机不同肥药模式下肥料、农药、用工、机械费等总投入(表 2)。

1.3.7 参数计算

纹枯病和螟虫防效计算按照姚熔薇等^[20]方法进行，稻曲病分级按照唐春生等^[21]方法；机械输入量、净能量、能量利用效率和能量生产力按照 Cheng 等^[24]的方法计算；能量系数按照朱岳梅等^[25]和 Dzkan 等^[26]的方法计算；主要的参数如下：

病指防效(%)=[(清水对照区病情指数-药剂处理区病情指数)/清水对照区病情指数]×100；

机械输入量 (EIM，MJ/hm²)=WHF×MTR×WOM/TOL/FEW，式中 WHF、MTR、WOM、TOL、FEW，分别为机械能量输入、机械工作时间、制造运输和修理机器的能源、机器质量、机器使用寿命、工作效率。

净能量(NE，MJ/hm²)=能量产出-能量投入；
能量利用效率(EUE，%)=能量产出/能量投入；
能量生产力(EP，kg/MJ)=稻谷产量/能量投入；
能量产出(EO，MJ/hm²)=稻谷产量×能量系数；
能量投入(EI，MJ/hm²)=各项投入指标(投入时间、用量)×能量系数。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2016 和 IBM SSPSS 27 处理数据，对数据进行单因素方差(One-way ANOVA)分析，处理间均值比较使用 Duncan 差异显著性检验(P<0.05)；用 Origin 2024 进行相关性分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成

不同氮肥农药配施处理对机插稻产量及其构成因素的影响均达显著水平，尤其对有效穗数和总颖花数(有效穗数与每穗粒数的乘积)的影响均明显高于其他各产量构成因素(表 3)。与常规人工等量配施肥药的 CK₁ 处理相比，无人机 F₁N₁ 和 F₂N₁ 处理增产 1.39%~1.96%，表明无人机氮肥农药配施完全

表 3 氮肥农药施用方式对机插稻产量及其构成的影响

Table 3. Effects of N fertilizer and pesticide application methods on yield and yield components						
处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number(×10 ⁴ /hm ²)	每穗粒数 No. of grains per panicle	总颖花数 Total spikelets (×10 ⁶ /hm ²)	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	稻谷产量 Grain yield (kg/hm ²)
F ₁ N ₁	265.00±0.30 a	178.38±1.06 a	472.72±2.85 a	83.54±0.24 ab	28.74±0.06 ab	10334.50±104.98 a
F ₁ N ₂	264.21±0.49 a	173.95±2.05 b	459.60±7.42 b	84.47±0.23 a	29.12±0.55 a	10298.45±148.61 a
F ₁ N ₃	256.07±1.48 b	165.08±1.79 c	422.74±6.77 c	83.13±0.84 ab	28.37±0.28 b	9164.36±189.56 b
F ₁ N ₄	244.22±0.94 c	158.95±4.27 d	388.19±11.18 e	81.22±0.79 cd	27.48±0.40 c	8175.73±207.25 c
F ₂ N ₁	265.15±0.79 a	174.97±1.81 ab	463.95±6.18 ab	83.45±0.34 ab	28.25±0.59 b	10276.27±105.65 a
F ₂ N ₂	263.79±0.70 a	173.28±1.29 b	453.04±4.56 b	83.84±0.62 a	28.75±0.10 ab	10259.44±68.81 a
F ₂ N ₃	256.57±0.78 b	157.40±2.38 de	403.83±5.84 d	82.34±0.29 bc	28.36±0.19 b	9143.78±63.26 b
F ₂ N ₄	244.97±2.46 c	154.23±2.46 ef	377.83±8.85 e	80.02±0.63 d	27.39±0.32 c	8154.63±251.64 c
CK ₁	265.60±1.10 a	174.14±1.48 b	462.52±4.59 ab	83.41±0.49 ab	28.47±0.11 ab	10135.71±175.53 a
CK ₂	215.44±0.72 d	151.50±1.88 f	326.39±4.89 f	77.28±0.18 e	27.17±0.56 c	6330.49±90.91 d
F 值 F value	581.62**	57.97**	156.67**	53.85**	9.31**	227.97**

同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。下同。
Different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level. * and ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

可以达到甚至超过常规人工管理水平。同一无人机飞行速度下, 氮肥农药减量 10% (N₂ 处理)减产 0.16%~0.35%, 氮肥农药减量 20% (N₃ 处理)和 30% (N₄ 处理)显著减产 11.02%~20.89%, 不施肥药处理 (CK₂)显著减产 38.39%~38.74%; 同一施量下, 无人机飞行速度由 5.0 m/s 提升至 5.5 m/s 对产量影响不显著。表明相对 F₁N₁, F₂N₂ 处理在提高无人机作业效率基础上, 氮肥农药减量 10%, 减产 0.73%(差异不显著), 且比 CK₁ 增产 1.22%, 为本研究无人机飞行速度与氮肥农药减施处理最优模式, 可达到节肥节药提高效率的效果。

由表 3 还可看出, 与 CK₁ 相比, F₁N₁ 和 F₂N₁ 处理各产量构成因素间均差异不显著。同一飞行速度下, 随氮肥农药减量幅度上升各产量构成因素表现出不同程度的下降趋势, 有效穗数、每穗粒数、总颖花数分别减少 0.21%~7.84%, 0.95%~11.85%和 2.35%~18.56%; 结实率和千粒重则呈先增后降趋

势。同一肥药处理下, 飞行速度差异对产量构成因素影响不显著。表明不同无人机飞行速度下氮肥农药协同减量 20%~30%, 会显著降低各产量构成因素, 进而显著减产, 而氮肥农药协同减量 10%, 能够在保持较高总颖花数的基础上提高结实率 (0.52%~1.27%)和千粒重(0.98%~2.29%), 尤其飞行速度提升 10%结合氮肥农药减量 10%(F₂N₂)依然保持产量稳定, 可达到节肥节药丰产高效的协同统一。

2.2 病虫害防治

不同氮肥农药配施处理方式对纹枯病、稻曲病的防治效果的影响达显著水平(表 4)。纹枯病防效最佳为 F₁N₃ 和 F₂N₃ 处理, 相较于其他处理防治效果提高 0.71%~10.62%。稻曲病防治效果最佳为 F₁N₂ 和 F₂N₂ 处理, 相较于其他处理提高 2.29%~11.38%。各处理间枯鞘(心)率、白穗率差异均未达显著。而两种病害在同一无人机飞行速度下, 防治效果均呈

表 4 氮肥农药施用方式对机插稻病害防治效果的影响

Table 4. Effect of N fertilizer and pesticide application methods on disease control								
处理 Treatment	纹枯病 Sheath blight disease			稻曲病 Green smut			二化螟 Striped stem borer	
	病株率 Disease incidence rate (%)	病情 指数 Desease index	防治效果 Control effect (%)	病穗率 Disease incidence rate(%)	病情 指数 Desease index	防治效果 Control effect (%)	枯鞘(心)率 Dead sheath (heart) rate(%)	白穗率 White head rate(%)
F ₁ N ₁	6.91±0.18 cd	0.97±0.02 c	84.27±0.40 a	1.33±0.02 e	0.35±0.03 de	88.80±0.96 a	0.57±0.33 a	0.13±0.05 a
F ₁ N ₂	7.45±0.08 c	0.94±0.03 c	84.64±0.48 a	1.15±0.15 e	0.30±0.03 e	90.35±1.00 a	0.64±0.30 a	0.13±0.06 a
F ₁ N ₃	6.27±0.14 e	0.88±0.08 c	85.66±1.31 a	1.99±0.33 c	0.47±0.04 c	84.82±1.19 c	0.69±0.12 a	0.20±0.11 a
F ₁ N ₄	8.94±0.49 b	1.41±0.16 b	77.07±2.58 b	2.54±0.10 b	0.57±0.02 b	81.65±0.61 d	0.72±0.13 a	0.25±0.12 a
F ₂ N ₁	7.24±0.64 cd	0.97±0.03 c	84.15±0.48 a	1.37±0.43 e	0.36±0.13 de	88.32±4.20 a	0.57±0.19 a	0.16±0.05 a
F ₂ N ₂	6.09±0.31 e	0.95±0.04 c	84.51±0.65 a	1.22±0.06 e	0.33±0.01 e	89.45±0.36 a	0.71±0.11 a	0.17±0.06 a
F ₂ N ₃	6.71±0.39 de	0.90±0.01 c	85.35±0.18 a	1.97±0.44 c	0.49±0.06 c	84.28±2.10 c	0.83±0.21 a	0.24±0.12 a
F ₂ N ₄	8.64±0.44 b	1.46±0.06 b	76.29±0.87 b	2.59±0.17 b	0.59±0.01 b	81.12±0.34 e	0.94±0.14 a	0.29±0.16 a
CK ₁	7.02±0.23 cd	0.98±0.05 c	84.05±0.77 a	1.52±0.16 de	0.39±0.01 de	87.52±0.41 ab	0.57±0.19 a	0.13±0.06 a
CK ₂	28.80±0.21 a	6.14±0.09 a	-	9.25±0.41 a	3.12±0.20 a	-	1.03±0.49 a	0.32±0.18 a
F 值 F value	1132.10**	1638.40**	31.68**	236.03**	341.19**	11.99**	1.25 ^{ns}	1.27 ^{ns}

先增后降趋势，与 CK₁ 处理差异不显著；同一肥药处理下，无人机速度由 5.0 m/s 提升至 5.5 m/s 对防治效果影响均不显著。结合产量(表 3)，相较 CK₁，无人机常规或提速 10%结合氮肥农药减量 20%，尽管防效达 80%以上，但显著减产 11.02%~11.32%。因此，F₂N₂ 为本研究无人机飞行速度与氮肥农药减施优化模式，可到达节肥节药和高效率高防效的统一。

2.3 剑叶 SPAD 值

不同氮肥农药配施处理对机插稻剑叶 SPAD 值影响达显著水平(表 5)。与 CK₁ 相比，F₁N₃ 和 F₁N₄ 处理在齐穗、齐穗后 15 d 和成熟期剑叶 SPAD 值分别下降 4.07%~5.84%、7.23%~12.19% 和 9.48%~14.65%；无人机提速 10%，各生育时期 F₂N₃ 和 F₂N₄ 处理剑叶 SPAD 值分别下降 4.26%~5.89%、7.85%~12.71% 和 9.91%~14.98%；F₁N₁、F₁N₂ 和 F₂N₁、F₂N₂ 处理剑叶 SPAD 值与 CK₁ 无显著差异。可见，同一飞行速度下，剑叶 SPAD 值随氮肥农药减量的幅度上升而降低，且随生育进程下降趋势更

明显，而同一肥药处理下，无人机速度由 5.0 m/s 提升至 5.5 m/s 对剑叶 SPAD 值影响不显著。

2.4 叶面积指数

由表 6 可见，不同氮肥农药配施处理显著影响机插稻叶面积指数(LAI)。与 CK₁ 相比，F₁N₃ 和 F₁N₄ 处理拔节期、齐穗及成熟期 LAI 分别下降 7.23%~9.57%、10.51%~18.23%和 8.65%~13.15%；提速 10%后，拔节期、齐穗及成熟期 F₂N₃ 和 F₂N₄ 处理 LAI 分别下降 7.62%~10.55%、12.32%~18.72% 和 9.00%~13.84%。相对于 CK₂，F₁N₂ 和 F₂N₂ 在拔节期、齐穗及成熟期 LAI 分别增加 45.66%~45.95%、50.26%~51.29%和 46.88%~48.44%。表明同一无人机飞行速度下，LAI 随氮肥农药减量程度的增加而下降，提速 10%结合氮肥农药减量 10%(F₂N₂)也能维持较高 LAI。

2.5 干物质积累与转运

不同氮肥农药配施处理对主要生育时期干物质积累及转运的影响均达显著水平(表 7)。与 CK₁ 相比，拔节期、齐穗期及成熟期，F₁N₃ 和 F₁N₄ 处

表 5 氮肥农药施用方式对机插稻剑叶 SPAD 值的影响

Table 5. Effect of N fertilizer and pesticide application management methods on SPAD value

处理 Treatment	齐穗期 Full-heading stage	齐穗后 15 d 15 days after full-heading	成熟期 Maturity stage
F ₁ N ₁	42.51±0.94 a	39.46±0.97 a	30.69±0.18 a
F ₁ N ₂	42.44±0.39 a	39.34±0.14 a	30.45±0.64 a
F ₁ N ₃	40.55±0.90 b	36.44±0.57 b	27.31±0.56 b
F ₁ N ₄	39.80±0.55 b	34.49±0.26 c	25.75±0.76 b
F ₂ N ₁	42.17±0.33 a	38.94±0.42 a	30.41±1.39 a
F ₂ N ₂	42.04±0.35 a	38.77±0.67 a	30.27±0.92 a
F ₂ N ₃	40.47±0.46 b	36.25±0.32 b	27.18±1.01 b
F ₂ N ₄	39.78±0.56 b	34.34±0.12 c	25.65±0.49 b
CK ₁	42.27±0.18 a	39.28±0.70 a	30.17±0.96 a
CK ₂	39.75±0.77 b	34.22±0.48 c	22.56±1.72 c
F 值 F value	12.57**	53.96**	25.37**

表 6 氮肥农药施用方式对机插稻叶面积指数的影响

Table 6. Effect of N fertilizer and pesticide application management methods on the LAI

处理 Treatment	叶面积指数 Leaf area index			高效叶面积 Efficient leaf area	
	拔节期 Jointing stage	齐穗期 Full-heading stage	成熟期 Maturity stage	高效叶面积指数 Efficient leaf area index	高效叶面积率 Efficient leaf area ratio (%)
F ₁ N ₁	5.10±0.08 a	6.18±0.09 a	2.89±0.08 a	3.89±0.09 a	62.95±0.60 d
F ₁ N ₂	5.05±0.02 a	5.87±0.27 a	2.85±0.02 a	3.84±0.10 a	64.89±0.41 c
F ₁ N ₃	4.75±0.17 b	5.45±0.14 c	2.64±0.03 b	3.52±0.10 b	65.71±0.65 bc
F ₁ N ₄	4.63±0.05 b	4.98±0.05 d	2.51±0.16 b	3.34±0.17 c	66.76±0.29 b
F ₂ N ₁	5.07±0.02 a	6.11±0.22 a	2.90±0.04 a	3.83±0.15 a	62.06±0.41 d
F ₂ N ₂	5.04±0.23 a	5.83±0.20 a	2.82±0.10 a	3.73±0.18 a	63.33±1.19 d
F ₂ N ₃	4.73±0.13 b	5.34±0.39 b	2.63±0.18 b	3.48±0.23 b	65.36±1.31 c
F ₂ N ₄	4.58±0.25 b	4.95±0.21 c	2.49±0.11 b	3.30±0.15 c	67.02±0.55 b
CK ₁	5.12±0.12 a	6.09±0.19 a	2.89±0.15 a	3.80±0.12 a	62.50±0.20 d
CK ₂	3.46±0.04 c	3.88±0.10 d	1.92±0.08 c	2.64±0.06 d	70.41±0.51 a
F 值 F value	61.82**	36.02**	32.20**	20.58**	39.79**

表 7 氮肥农药施用方式对机插稻各生育时期干物质积累与转运的影响

Table 7. Effects of N fertilizer and pesticide application management methods on dry matter accumulation and transport					
处理 Treatment	干物质积累 Dry matter accumulation(kg/hm ²)			干物质转运 Dry matter transport	
	拔节期	齐穗期	成熟期	转运量	转运率
	Jointing stage	Full-heading stage	Maturity stage	Transport amount (kg/hm ²)	Transport rate (%)
F ₁ N ₁	5171.19±95.18 a	15585.97±81.49 a	19786.57±167.86 a	3538.68±79.12 a	27.39±0.41 d
F ₁ N ₂	5166.02±90.99 a	15578.02±92.12 ab	19760.21±92.24 a	3526.66±128.32 a	27.44±0.85 d
F ₁ N ₃	4816.18±106.07 b	12791.72±159.86 c	17467.83±66.32 b	3251.53±183.52 b	28.90±1.03 bc
F ₁ N ₄	4452.45±172.93 c	11483.67±82.80 d	15684.20±36.01 c	2989.52±160.61 c	29.89±1.12 b
F ₂ N ₁	5161.81±111.01 a	15571.11±93.90 ab	19739.24±127.75 a	3509.87±73.80 a	27.36±0.55 d
F ₂ N ₂	5154.63±91.73 a	15546.28±127.44 ab	19734.48±59.99 a	3500.67±79.80 a	27.41±0.47 d
F ₂ N ₃	4802.99±83.65 b	12759.74±81.61 c	17450.93±20.13 b	3204.31±99.14 b	28.62±0.65 c
F ₂ N ₄	4438.80±73.40 c	11477.43±76.99 d	15657.75±65.40 c	2867.82±17.34 c	29.02±0.27 bc
CK ₁	5145.28±81.41 a	15405.96±55.66 b	19663.94±49.79 a	3441.15±17.81 a	26.94±0.15 d
CK ₂	3558.91±95.83 d	8459.91±11.49 e	11662.88±77.60 d	2467.78±11.68 d	32.63±0.19 a
F 值 F value	75.64**	2087.74**	3146.91**	36.67**	21.16**

理的干物质积累量分别下降 6.40%~13.47%、16.97%~25.46%和 11.17%~20.24%；无人机提速 10%后，F₂N₃ 和 F₂N₄ 处理在拔节期、齐穗期及成熟期的干物质积累量分别下降 6.65%~13.73%、17.18%~25.50%和 11.2%~20.37%，表明氮肥与农药过量减施会导致干物质积累量显著降低。此外，与 CK₁ 相比，F₁N₂ 和 F₂N₂ 处理在齐穗期、成熟期积累量和转运量(率)分别增加 0.40%~2.49%和 0.18%~1.73%，表明无人机管理结合氮肥农药减量 10%模式可促进群体干物质积累及转运。

2.6 氮素利用

不同氮肥农药配施处理方式对机插稻各时期氮素累积及转运的影响均达显著水平(表 8)。与 CK₁ 相比，F₁N₃ 和 F₁N₄ 处理下，拔节期、齐穗期及成熟期氮素积累量分别下降 4.99%~11.53%、12.47%~22.69%和 9.35%~16.01%；提速 10%后，拔节期、

齐穗期及成熟期氮素积累量分别下降 7.83%~13.52%、14.06%~24.76%和 10.38%~16.51%。相比 CK₁，在拔节期、齐穗期及成熟期，F₁N₂ 和 F₂N₂ 处理氮素积累量与转运率分别增加了 2.69%~13.24%和 0.85%~6.00%。同一无人机飞行速度下，氮素积累量与转运量均随氮肥农药减量而降低。

不同氮肥农药配施处理方式对氮素利用效率的影响显著(表 9)。与 CK₁ 相比，F₁N₂ 和 F₂N₂ 处理下氮肥偏生产力、氮肥吸收利用率及收获指数分别增加了 12.48%~12.89%、17.84%~18.75%、1.86%~2.30%。随着减量梯度增加，F₁N₃ 和 F₁N₄ 处理下氮肥吸收利用率、氮肥贡献率分别显著下降 17.79%~21.13%和 18.06%~25.05%，表明同一无人机飞行速度下，氮肥偏生产力、氮素收获指数随氮肥农药减量而持续增加，氮肥吸收利用率表现为先增后降，氮肥贡献率随氮肥农药减量而下降；同一肥药处理

表 8 氮肥农药施用方式对机插稻氮素积累与转运的影响

Table 8. Effects of N fertilizer and pesticide application management methods on N accumulation and transport					
处理 Treatment	氮素积累 N accumulation (kg/hm ²)			氮素转运 N transport	
	拔节期	齐穗期	成熟期	转运量	转运率
	Jointing stage	Full-heading stage	Maturity stage	Transport amount (kg/hm ²)	Transport rate (%)
F ₁ N ₁	75.37±1.71 a	156.00±0.66 a	173.00±5.00 a	68.39±1.93 a	51.45±1.10 bc
F ₁ N ₂	73.44±0.39 b	152.55±0.60 b	170.32±5.13 a	67.98±1.11 a	51.87±1.24 bc
F ₁ N ₃	66.97±0.75 d	127.08±0.55 e	150.36±2.94 b	55.56±2.39 d	52.38±0.91 b
F ₁ N ₄	62.36±0.96 f	112.24±1.01 g	139.31±4.32 c	48.91±1.37 f	55.52±1.31 a
F ₂ N ₁	72.07±0.55 bc	150.25±1.48 c	169.11±2.00 a	64.12±0.77 b	50.57±0.57 bc
F ₂ N ₂	71.09±1.01 c	149.51±0.59 c	167.42±6.09 a	63.63±0.54 b	50.64±0.41 bc
F ₂ N ₃	64.97±0.52 e	124.77±1.47 f	148.65±0.65 b	51.86±0.63 e	51.64±0.45 bc
F ₂ N ₄	60.96±1.84 f	109.23±1.91 h	138.48±2.01 c	48.15±1.69 f	55.13±1.31 a
CK ₁	70.49±1.11 c	145.18±1.48 d	165.86±5.88 a	60.03±2.27 c	49.69±0.28 c
CK ₂	52.80±0.81 g	96.19±0.54 i	120.84±1.04 d	43.27±1.22 g	56.98±1.00 a
F 值 F value	125.52**	1070.60**	57.84**	140.04**	24.40**

表 9 氮肥农药施用方式对机插稻氮素利用效率的影响

Table 9. Effect of N fertilizer and pesticide application management methods on NUE

处理 Treatment	氮肥偏生产力 Partial factor productivity	氮肥吸收利用率 N use efficiency (%)	氮肥贡献率 N contribution rate (%)	氮素收获指数 N harvest index (%)
F ₁ N ₁	68.90±0.70 b	34.77±2.64 a	38.74±0.88 a	62.94±1.47 cd
F ₁ N ₂	76.28±1.10 a	36.65±3.03 a	38.53±1.16 a	63.00±1.71 cd
F ₁ N ₃	76.37±0.15 a	24.60±1.58 c	30.86±1.10 b	64.42±0.93 cd
F ₁ N ₄	77.86±0.60 a	17.59±3.12 d	22.19±1.59 c	69.78±2.65 b
F ₂ N ₁	68.51±0.71 b	32.18±0.64 ab	38.40±0.41 a	62.49±1.14 cd
F ₂ N ₂	76.00±0.51 a	34.50±3.73 ab	38.29±0.37 a	62.73±3.02 cd
F ₂ N ₃	76.20±0.53 a	23.18±0.33 c	30.76±0.66 b	65.58±0.22 c
F ₂ N ₄	77.66±2.39 a	16.80±0.92 d	22.28±2.41 c	69.55±0.58 b
CK ₁	67.57±0.54 b	30.01±3.23 b	37.54±0.81 a	61.59±1.64 d
CK ₂	-	-	-	72.98±1.21 a
F 值 F value	327.85**	28.23**	30.07**	16.33**

下，无人机速度由 5.0 m/s 提升至 5.5 m/s 对氮素利用影响不显著。

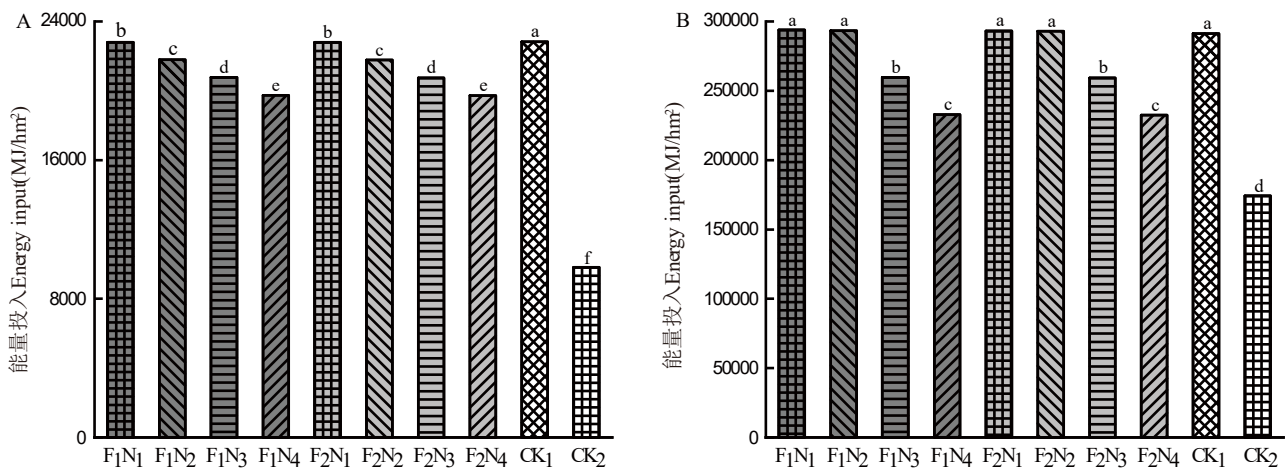
2.7 能量投入、产出、利用效率及占比

2.7.1 能量投入与产出

不同飞行速度下氮肥农药减施处理和人工常规氮肥农药处理间总能量投入存在显著差异(图 1-A)。两种飞行速度间总能量投入差异均受施氮量的影响，即随氮肥减量，投入量减少。F₁N₁、F₁N₂、F₁N₃、F₁N₄ 处理总能量投入量较 CK₁ 分别降低 31.63 MJ/hm²、1050.22 MJ/hm²、2071.49 MJ/hm²、3099.26 MJ/hm²；提速 10%后，F₂N₁、F₂N₂、F₂N₃、F₂N₄ 处理较 CK₁ 分别降低 43.98 MJ/hm²、1067.68 MJ/hm²、2089.20 MJ/hm²、3111.19 MJ/hm²，表明无人机提速 10%，在提高工作效率的同时减少了劳动力投入。CK₁ 和 CK₂ 处理下总能量投入分别为 22835

MJ/hm² 和 9816.92 MJ/hm²，CK₁ 劳动力能量投入相较于其他处理增加了 8.06%~12.33%。

能量产出随氮肥农药减量呈不同程度下降趋势(图 1-B)。F₁N₁ 处理能量产出最大，达 293837.37 MJ/hm²。与 CK₁ 相比，F₁N₃ 和 F₁N₄ 处理能量产出分别降低 31822.40 MJ/hm² (10.92%)和 58566.67 MJ/hm² (20.10%)；F₂N₃ 和 F₂N₄ 处理能量产出分别降低了 32126.32 MJ/hm² (11.02%)和 58992.27 MJ/hm² (20.24%)，表明无人机模式下，氮肥农药减量 20%~30%导致减产的同时进一步降低能量产出。而 F₁N₁、F₁N₂ 和 F₂N₁、F₂N₂ 处理下能量产出较 CK₁ 分别增加 0.66%~0.83%和 0.54%~0.60%；说明在提速 10%结合氮肥农药协同减量 10%(F₂N₂)，在降低能量投入的同时保持较高能量产出，做到节能增产。



柱上不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters above the bars indicate a statistically significant difference at the 0.05 level ($P < 0.05$)

图 1 不同飞行速度下氮药减施和人工模式总能量投入(A)与能量产出(B)

Fig. 1. Total energy input for reduced N fertilizer and pesticide application at different flight speeds (A) and manual management(B)

表 10 不同飞行速度下氮肥减施和人工模式对能量利用效率的影响

Table 10. Differences in energy utilization rates of N fertilizer and pesticide application and manual management at different flight speeds

处理 Treatment	净能量 Net energy (MJ/hm ²)	能量利用效率 Energy utilization efficiency (MJ/MJ)	能量生产力 Energy productivity (kg/MJ)
F ₁ N ₁	271034.00±1497.99 ab	12.89±0.09 c	0.45±0.01 c
F ₁ N ₂	271560.84±1216.13 a	13.47±0.05 b	0.47±0.02 b
F ₁ N ₃	238824.04±1523.66 c	12.50±0.04 d	0.44±0.02 c
F ₁ N ₄	213107.54±1404.85 d	11.80±0.16 e	0.41±0.03 d
F ₂ N ₁	270359.41±1592.87 ab	12.86±0.08 c	0.45±0.01 c
F ₂ N ₂	271206.13±1059.51 a	13.46±0.03 b	0.47±0.02 b
F ₂ N ₃	238537.84±1110.31 c	12.50±0.01 d	0.44±0.01 c
F ₂ N ₄	212693.88±1552.54 d	11.78±0.11 e	0.41±0.03 d
CK ₁	268574.97±1619.00 b	12.76±0.04 c	0.44±0.02 c
CK ₂	164456.23±1146.88 e	17.75±0.02 a	0.64±0.01 a
F 值 F value	2044.05**	1469.88**	71.45**

2.7.2 能量利用效率

在同一无人机飞行速度下,氮肥农药减施处理和人工常规氮肥农药处理间能量利用效率存在显著差异(表 10)。净能量受处理间能量产出和投入差异的影响。与 CK₁ 相比, F₁N₃、F₁N₄ 处理净能量分别降低 29750.93 MJ/hm²、55467.43 MJ/hm²; F₁N₂ 和 F₂N₂ 处理的净能量较 CK₁ 增加了 2631.36~2985.87 MJ/hm²。能量利用效率受处理间能量产出和投入的比值的影响,与 CK₁ 相比, F₁N₁ 和 F₁N₂ 处理能量利用效率分别提高了 0.97%~5.52%,且提速 10%后能量利用效率提高 0.79%~5.47%。表明无人机提速 10%结合氮肥农药减少 10%(F₂N₂),在降低投入量的同时,提高净能量、能量利用效率和生产力。不同速度下氮肥农药减量 20%~30%尽管降低了能量投入,但随产出和投入量的减少,净能量、能量利用效率均下降。

2.7.3 投入占比

如图 2 所示,各处理间能量投入占比因投入量不同而存在差异。各处理间肥料投入占比最大,为 48.39%~54.96%,能源投入占比次之,为 32.06%~74.44%。其中,CK₂ 全生育期末进行肥药处理,总能量投入表现为能源(74.44%)>劳动力(10.68%)>机械(10.11%)>种子(4.77%)。不同飞行速度下生产资料的能量投入为肥料(48.39%~54.96%)>能源(32.06%~37.57%)>劳动力(4.70%~5.50%)>机械(4.37%~5.05%)>种子(2.05%~2.38%)>农药(1.19%~1.28%)。

2.8 节量比较及经济效益

由表 11 可知,从全生育期肥药消耗及产量表

现来看,无人机模式下 N₁ 处理氮肥农药用量与人工模式 CK₁ 处理一致,产量较 CK₁ 平均增加了 1.61%; N₂ 处理下氮肥用量较 CK₁ 节约了 15 kg/hm²,农药用量节约了 75.65 mL/hm²,产量较 CK₁ 平均增加 1.41%;其中, N₃、N₄ 处理下氮肥和农药用量分别较 CK₁ 节约了 30 kg/hm²~45 kg/hm²和 151.3 mL/hm²~226.95 mL/hm²,但产量较 CK₁ 平均降低了 9.68%~19.44%。由此可见,无人机模式下 N₂ 处理可实现肥药减量同时稳产增产,达成节肥、节药、稳产三者协调统一。

各处理间生产成本、生产产出、净收益和产出投入比存在显著差异(图 3)。与 CK₁ 相比,无人机常规速度下生产成本降低 956.93~1438.05 元/hm²,无人机提速 10%,尽管电成本增加了 8.96~11.26%,但随着工作时间的减少,劳动力投入也减少,生产成本降低了 1231.12~1674.98 元/hm²;净收益以 F₂N₂ 处理最高,为 8848.94 元/hm²,F₂N₁ 次之,为 8740.37 元/hm²,产出投入比分别为 1.49 和 1.48,净收益较 CK₁ 提高了 22.32%~23.84%。表明无人机提速 10%结合氮肥农药减量 10%(F₂N₂ 处理),在降低 1383.16 元/hm² 的生产成本同时能够提高净收益 23.84%,做到节本(劳动力)增效,而氮肥农药协同减量 20%~30%,随着生产成本和产出的降低,其净收益、产出投入比均显著下降。

2.9 相关性分析

由图 4 可知,产量与 LAI、剑叶 SPAD 值、干物质积累与转运量、氮素积累与转运量、氮肥利用效率、能量投入与产出、净能量、能量生产力、生产成本、生产产出、产出投入比均显著正相关,净

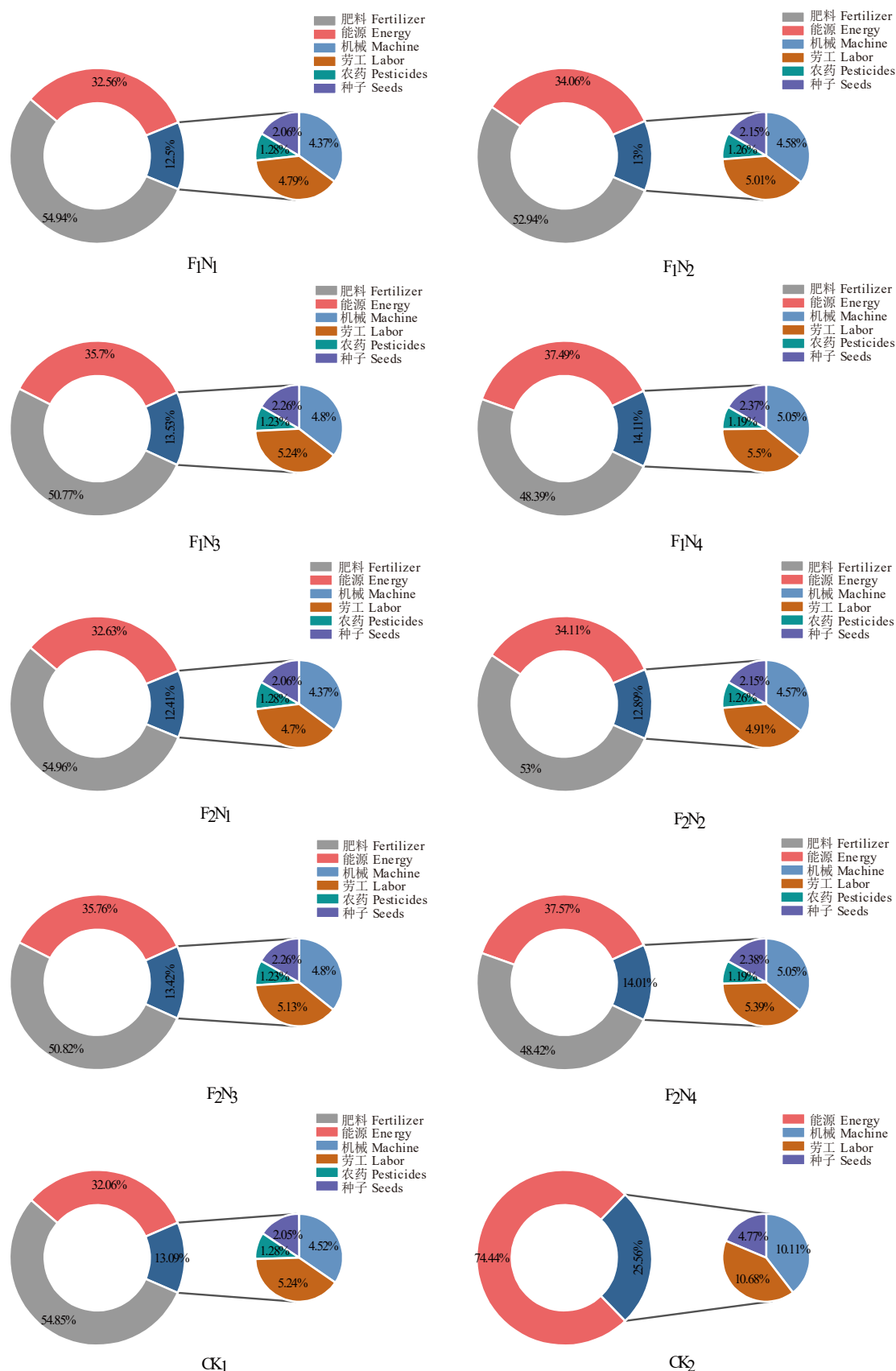


图 2 不同飞行速度下氮药减施和人工模式总能量投入占比
Fig. 2. Proportion of total energy input for N fertilizer and pesticide application and manual management at different speeds

表 11 无人机和人工模式下氮药减量下机插稻氮肥农药节量比较

Table 11. Comparison of N fertilizer and pesticide application in machine-planted rice under UAV and manual management with N and pesticide reduction

处理 Treatment	常规/减量后用量 Application rate (kg/hm ² or mL/hm ²)	节约量 Amount saved (kg/hm ² or mL/hm ²)	节约百分比 Saving percentage (%)	平均产量变化幅度 Range of variation (%)
N ₁	150.00	—	—	+1.61
	756.50	—	—	
N ₂	135.00	15.00	10.00	+1.41
	680.85	75.65		
N ₃	120.00	30.00	20.00	-9.68
	605.20	151.30		
N ₄	105.00	45.00	30.00	-19.44
	529.55	226.95		
CK ₁	150.00	—	—	—
	756.50	—	—	—
CK ₂	0.00	150.00	100	-37.54
	0.00	756.50	100	

N₁: 常规氮肥农药模式; N₂: 氮肥农药综合减量 10%; N₃: 氮肥农药综合减量 20%; N₄: 氮肥农药综合减量 30%; CK₁: 人工常规氮肥农药处理; CK₂: 不施肥药; 表中平均产量变化幅度根据无人机模式 F₁ (5.0 m/s)和 F₂ (5.0 m/s)的均值计算。

N₁, Conventional nitrogen fertilizer and pesticide treatment; N₂, 10% reduction in total nitrogen fertilizer and pesticide amount; N₃, 20% reduction in total nitrogen fertilizer and pesticide amount; N₄, 30% reduction in total nitrogen fertilizer and pesticide amount; CK₁, Conventional manual nitrogen fertilizer and pesticide treatment; CK₂, No fertilizer or pesticides; The average yield range in the table is based on the mean of the UAV treatment F₁ (5.0 m/s) and F₂ (5.0 m/s).

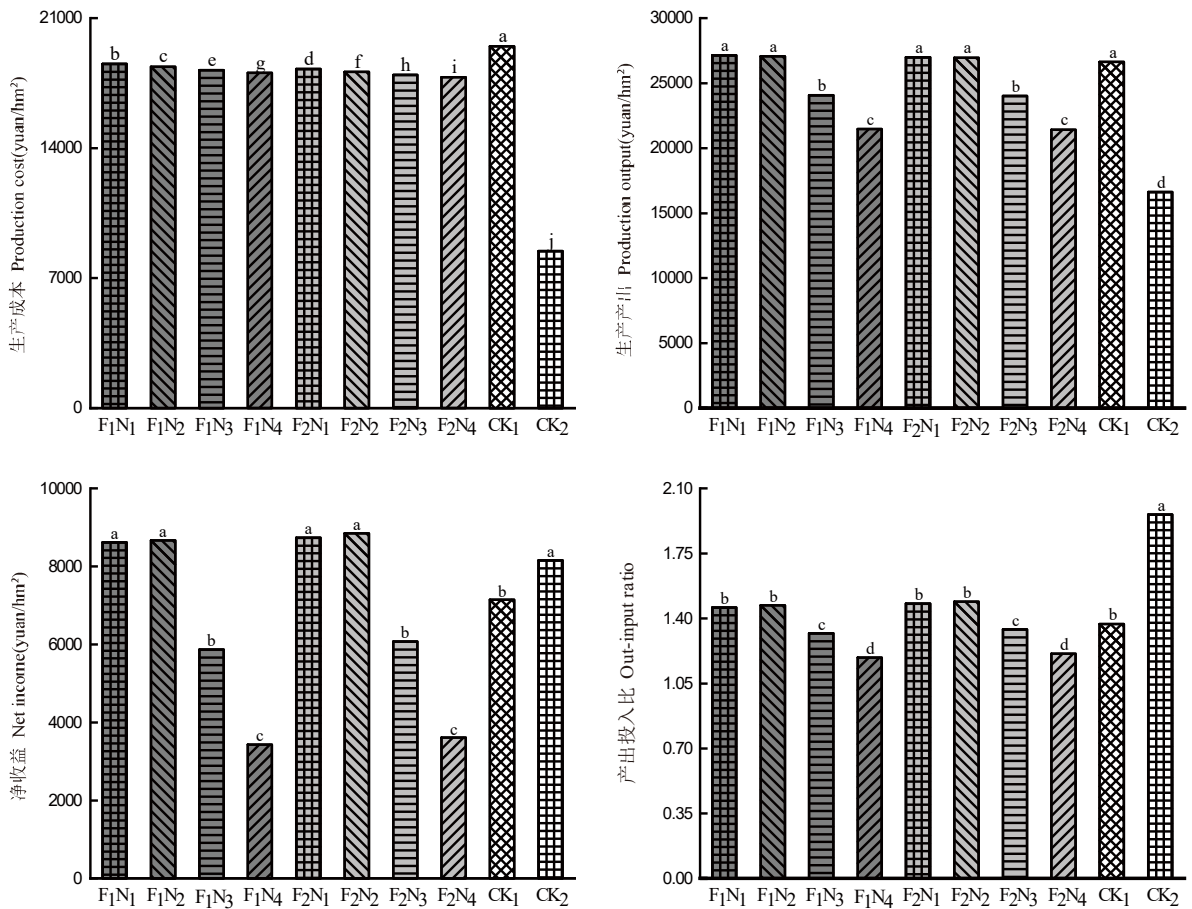
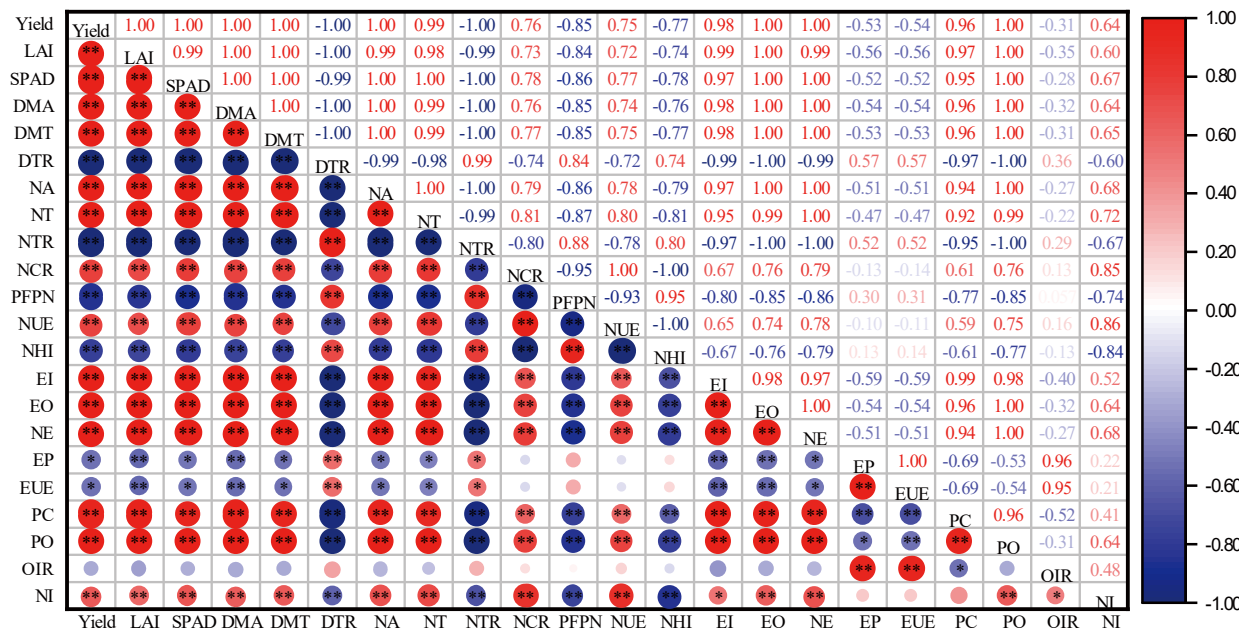


图 3 不同飞行速度氮药减施和人工模式的经济效益比较

Fig. 3. Economic benefits of N fertilizer and pesticide application and manual management at different flight speeds



*, **分别表示在 0.05 和 0.01 水平相关显著。Yield: 产量; LAI: 叶面积指数; DMA: 干物质积累量; DMT: 干物质转运量; DTR: 干物质转运率; NA: 氮素积累量; NT: 氮素转运量; NTR: 氮素转运率; NCR: 氮肥贡献率; NUE: 氮肥利用效率; PFPN: 氮肥偏生产力; EI: 总能量投入; EO: 能量产出; NE: 净能量; EP: 能量生产力; EUE: 能量利用效率; PC: 生产成本; PO: 生产产出; OIR: 产出投入比; NI: 净收益。
*, ** indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. LAI, Leaf area index; DMA, Dry matter accumulation; DMT, Dry matter transport amount; DTR, Dry matter transport rate; NA, N accumulation; NT, N transportation; NTR, N transport rate; NCR, N contribution rate; NUE, N use efficiency; PFPN, Partial factor productivity; EI, Energy input; EO, energy output; NE, Net Energy; EP, Energy productivity; EUE, Energy utilization efficiency; PC, production cost; PO, Production output; OIR, Output-input ratio; NI, Net income.

图 4 水稻产量及各项指标相关性分析
Fig. 4. Correlation analysis of rice yield and indicators

收益和产量显著正相关。

3 讨论

3.1 无人机氮药减施对机插稻产量形成和防治效果的影响

氮素作为水稻生长发育中必需的营养元素之一，一般认为，随施氮量的增加产量呈先增后减的趋势^[27]。目前关于氮肥减量的研究主要从减氮方式和品种^[28]、生态条件和轮作方式等^[29-30]方面进行了探究。而有关无人机的研究主要从无人机与肥料的适配性^[17]、飞行参数^[18-19]、部件优化与参数优选^[31]等方面进行探究。也有研究就验证无人机施肥是否影响水稻产量进行对比试验，结果显示两种施肥方式下无人机施肥区域水稻产量均大于人工施肥区域且效率高^[32]。但针对无人机管理下，水稻产量构成因子、生理基础和群体生长的影响还较为缺乏。本研究结果表明，无人机管理下 F₁N₁ 和 F₂N₁、F₂N₂ 和 F₂N₂ 处理较 CK₁ 增产 1.39%~1.96%，1.22%~1.39%，说明无人机管理下常规氮肥农药和氮肥农药协同减量 10%条件下，水稻产量可以达到甚至超过常规人工管理的水平。尤其相对 CK₁，F₂N₂ 处理

可以提高病虫害防治效果(表 4)、提高结实期物质转运率(表 7)及氮素转运率(表 8)，最终能够在保持较高有效穗数和总颖花数的基础上提高结实率和千粒重(表 3)，是保障稳产增产的关键。同时，研究也发现，当飞行速度提升 10%，其产量构成因素间无显著差异，究其原因可能是栽培品种、施肥总量、飞行高度、离心盘转速等因素都是一致的，产量因子对施肥方式不敏感^[33]。

目前，利用无人机进行水稻病害防治的研究较多，而飞行参数的选择会直接影响农药雾滴在目标作物上分布的覆盖均匀性和覆盖率，进而影响作物的防治效果^[16]。且随着矮秆品种和杂交水稻的大力推广和种植高肥量、高密度，纹枯病发生日益严重，研究认为纹枯病的病株率、病情指数和垂直扩展速率均受氮肥梯度的影响^[34]。本研究结果表明，各处理间防治效果存在显著差异，但不同病害间也存在差异，纹枯病以 F₁N₃ 和 F₂N₃ 为最佳，相较于其他处理提高了 0.71%~10.62%；稻曲病以 F₁N₂ 和 F₂N₂ 为最佳，相较于其他处理提高了 0.85%~6.31%。与常规人工等量配施肥药(CK₁)处理不显著，可能有以下原因：一方面，当氮肥减量后，提高了群体生长结构和田间通风透光性，从而降低了纹枯病发生；

另一方面,相比传统喷雾的大液滴易蒸发,无人机的雾化雾滴能让药剂更充分接触靶标,少量药液即可达到理想的覆盖和作用效果,即使农药减量,也能维持较高防效。此外,有研究认为,当农药减量30%时,防治效果接近常规用量,这主要是由于增加了助剂的使用,而助剂可在油性物质与水之间形成桥键,从而抑制雾滴在空中运行时的粒径衰减^[35],因此,后续研究可关注助剂对研究结果的影响。

3.2 无人机氮药减施对机插稻群体生长和氮素吸收转运的影响

叶绿素作为植物进行光合作用的关键色素,其含量与植物叶片含氮量密切相关。一般认为 SPAD 值随施氮量增加而呈上升趋势,若与种植密度互作时将在生育后期达到峰值^[36]。本研究结果表明,与 CK₁ 相比, F₁N₁、F₁N₂ 和 F₂N₁、F₂N₂ 处理间 SPAD 值无显著差异,在同一无人机飞行速度下,SPAD 值会随着氮肥农药用量的减少呈现逐渐下降趋势,且随着生育时期的推进,下降趋势更明显。LAI 作为协调水稻库源关系和谷粒产量的关键之一,与施氮量显著正相关^[36]。本研究结果表明,在同一无人机飞行速度下, LAI 会随着氮肥农药用量减少逐渐下降,提速 10%结合氮肥农药减量 10%(F₂N₂),其 LAI 与 CK₁ 无显著差异,可见,无人机管理下氮肥农药减量 10%对水稻 SPAD 值和 LAI 具有一定的积极影响。作物生长发育过程中约 90%的干物质形成来源于光合作用,产量形成的实质是干物质积累与分配的过程^[37]。前人研究认为,物质积累量会随着氮肥用量的增加而提高,但茎鞘的物质转运率会降低^[38]。本研究结果进一步补充完善了前人研究结果^[39]。相较 CK₁, F₁N₂ 和 F₂N₂ 在齐穗期、成熟期干物质积累量和转运量(率)增加了 0.36%~2.49%和 1.73%~1.87%。

有关氮素吸收和转运方面,一般认为产量高的水稻群体,成熟期的氮素积累量也高^[40]。而孙永健等^[41]认为不管氮高效还是氮低效品种,采用施氮 150 kg/hm²(以纯氮计)、施磷 75 kg/hm²(P₂O₅)、施钾 150 kg/hm²(K₂O)的施肥模式,可利于不同氮效率水稻主要生育时期氮素的累积,促进结实期氮素的转运。本研究通过无人机的介入研究,进一步补充完善了前人结果^[42]。本研究表明,水稻氮素积累总量、转运量随氮肥农药减量而呈现下降趋势且转运率呈上升趋势,与 CK₁ 相比, F₁N₂ 和 F₂N₂ 处理在齐穗期、成熟期氮素积累量、转运率分别增加了 5.08%、2.69%和 2.98%、0.94%且氮肥吸收利用率增加了 18.75%和 17.84%。说明在无人机管理下结

合氮肥农药减量 10%(即 F₂N₂ 处理),也能使水稻在减少氮肥施用的同时,保障库容的充实和提高水稻氮肥吸收利用率。此外,本研究还发现,飞行速度提升 10%对于水稻群体生长和氮素吸收转运的影响不大。究其原因,可能是试验中飞行速度提升 10%的幅度尚未达到影响以上指标的阈值,是否进一步提高飞行速度,仍待研究。

3.3 不同飞行速度下氮药减施对机插稻能量利用效率和经济效益的影响

随着农业机械化进程的不断推进,农业生产要求更高的能源储备水平。在生产过程中,化肥产业是典型的高能耗产业,特别是氮肥生产,其所需的原料和燃料都严重依赖各种化石能源^[43],而肥料往往是影响水稻生产能源投入的重要变量^[44]。研究发现,杂交水稻生产的氮肥投入量是常规稻生产的 1.86~1.91 倍,且高产模式下的氮肥投入量更高^[45]。Yang 等^[46]对西南地区机械化和半机械水稻的生产能源利用进行比较,发现肥料是最大的投入量且机械化生产能够减少肥料投入。相关研究表明,在稳产前提下,集成无人机与免耕垄沟管理模式可实现能源投入和生产成本的双重降低,且无人机较轻,运行效率较高,使得机械能投入仅为机械化插秧一体化的 50.31%^[47]。目前,针对无人机在水稻、玉米等作物中的应用已有较多研究,但由于作物和无人机的型号功能不同,应用效果呈现出一定的差异。一般来说,无人机作业效率和作业范围受电池续航限制^[48]。而前人研究表明,随着飞行速度的提升,作业过程中的能耗增加,影响喷洒效率等^[19],但对于具体耗量和经济性仍待进一步研究。因此,研究通过评估水稻生产过程无人机中的耗能情况对于规划作业任务和保障作业连续性至关重要。本研究进一步完善了前人研究结果,从投入差异看,各处理总能量投入量均随着氮肥减量幅度的增加而减少。说明当其他投入要素基本一致的情况下,无人机提速 10%,尽管能耗有所增加,但投入量主要受氮肥的影响。本文能量产出与产量表现基本一致,即产量随着氮肥农药减量程度的增加呈下降趋势。其中, F₁N₂ 和 F₂N₂ 处理下能量产出、能量利用效率分别较 CK₁ 增加 0.66%和 0.54%、5.52%和 5.47%。这说明无人机提速 10%,尽管电能耗量相较于常规速度增加了 5.19%~10.11%,但随飞行速度的增加,能够在单位时间内覆盖更大的面积,在缩短作业周期和减少人力投入的同时,有效提高农业生产效率和质量。此外,本研究主要侧重于无人机不同速度与肥药配施模式,由于本研究中因素及

处理较多, 田块大小有限, 未设置无人机飞行速度与飞行高度的双因素耦合试验, 对于飞行速度与最佳喷洒高度的关系有待进一步研究。

经济效益作为农民生产意愿的核心因素, 在生产过程中不仅需考虑肥料、农药的减量增效还需考虑生产中电力、燃料、相关设备机械能源消耗情况和投入物的生产成本。也有研究围绕不同播栽方式^[12]和不同喷雾方式^[49], 探究无人机与人工管理间的经济效益比较。研究表明, 相较于人工, 无人机管理能在保障水稻稳产的同时, 在减轻劳动强度和提高生产效率的基础上显著提高净收益。本研究进一步补充和完善了前人研究结果, 无人机管理的生产成本较人工常规氮肥农药管理(CK₁)降低了956.93~1674.98元/hm², 净收益以F₂N₂处理最高, 为8848.94元/hm², 较CK₁提高了23.84%。主要是当无人机提速10%后, 随无人机作业时间减少, 劳动力投入也相应减少, 所以生产成本低于人工、无人机常规速度管理。可见, 提速10%结合氮肥农药减量10%, 在降低生产成本同时提高净收益, 达到节本(劳动力)增效。即F₂N₂处理, 能在保障较高产量的前提下提高水稻工作效率和净收益并有效克服了人工管理费耗时耗工等问题。此外, 本研究在四川盆地稻作区进行, 结果对四川及类似稻作区无人机配套粳型杂交中稻高产高效栽培提供了技术支撑, 但不同稻作区因生态条件、不同品种特征特性、无人机选用类型、农药剂型及配施量、匹配喷头流量、单位面积雾滴沉降密度均可能存在差异, 本研究结果在其他稻作区是否适用, 有待于进一步研究与验证。

4 结论

本研究从机插稻群体质量与产量、病害防治效果, 以及生产效能效益角度综合分析表明, 与常规人工等量配施肥药处理相比, 当无人机飞行速度提升至5.5 m/s和氮肥农药减量10%配施时, 机插稻产量相对稳定且增加1.22%; 尤其氮素转运量、氮肥偏生产力及吸收利用率增加了1.73%~17.84%。尽管无人机提速10%会导致工作电耗增加5.19%~10.11%, 但通过减少劳动力投入, 净收益提高了23.84%, 表明无人机提速10%配合氮肥农药减量10%处理在节约氮肥农药用量的同时, 改善了植株群体干物质积累和氮肥利用效率, 实现了节本增效, 为最佳的氮肥农药减量与无人机作业效率匹配的管理模式。

参考文献:

- [1] 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静. 中国再生稻种植的影响因素及可持续性研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1365-1377.
Song K F, Zhang G B, Xu H, Ma J. A review of research on influencing factors and sustainability of ratoon rice cultivation in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(6): 1365-1377. (in Chinese with English abstract)
- [2] Liu Q, Wu T Y, Pu L, SUN J. Comparison of fertilizer use efficiency in grain production between developing countries and developed countries[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(6): 2404-2412.
- [3] Yadav K, Kumar M, Gulaiya S, Singh N, Singh S, Salar A, Joshi M, Pal S S, Singh P P. Adverse impacts of lodging and strategies for management in cereal crops: A comprehensive review[J]. *Plant Archives*, 2024, 24(2): 495-503.
- [4] 张小祥, 邵士梅, 赵步洪, 张耗, 季红娟, 肖宁, 潘存红, 李育红, 吴云雨, 蔡跃, 刘建菊, 吉春明, 张秀琴, 刘广青, 周长海, 黄年生, 李爱宏. 氮肥减施模式对不同穗型迟熟中粳水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(3): 278-294.
Zhang X X, Shao S M, Zhao B H, Zhang H, Ji H J, Xiao N, Pan C H, Li Y H, Wu Y Y, Cai Y, Liu J J, Ji C M, Zhang X Q, Liu G Q, Zhou C H, Huang N S, Li A H. Effects of nitrogen reduction model on yield and nitrogen absorption and utilization of late-maturing mid-japonica rice with different panicle types[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(3): 278-294. (in Chinese with English abstract)
- [5] 罗颖菡, 李波, 孙永健, 郭长春, 邢梦文, 李飞杰, 刘芳艳, 杨志远, 徐富贤, 马均. 氮肥后移对杂交籼稻产量及不同粒位稻米垩白与食味品质的影响[J]. 中国稻米, 2021, 27(5): 54-58, 63.
Luo Y H, Li B, Sun Y J, Guo C C, Xing M W, Li F J, Liu F Y, Yang Z Y, Xu F X, Ma J. Effects of postponing nitrogen topdressing on yield, chalkiness in different grain positions and tasting quality of hybrid indica rice[J]. *China Rice*, 2021, 27(5): 54-58, 63. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘秋蒙, 刘静文, 张满, 舒晨晖, 季雅岚, 吴文革, 束维正, 任兰天. 缓控释肥料对水稻产量、品质及土壤微生物多样性的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(9): 136-142.
Liu Q M, Liu J W, Zhang M, Shu C H, Ji Y L, Wu W G, Shu W Z, Ren L T. Impacts of slow and controlled release fertilizers on yield, quality and soil microbial diversity of rice[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(9): 136-142. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨标. 氮肥减施对稻米食味品质和淀粉理化特性的作用效应研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
Yang B. Effects of nitrogen reduction on eating quality and starch physicochemical properties of rice [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022. (in Chinese with English abstract)

- abstract)
- [8] 金书秦, 张惠, 付饶, 刘静. 化肥零增长行动实施状况中期评估[J]. 环境保护, 2019, 47(2): 39-43.
Jin S, Zhang H, Fu R, Liu J. Mid-term evaluation on the implementation of zero growth action of chemical fertilizers[J]. *Environmental Protection*, 2019, 47(2): 39-43. (in Chinese with English abstract)
 - [9] 张舒, 赵华, 吕亮, 常向前, 杨小林, 杨利, 卢殿友, 陈明学. 不同化肥农药减施组合对水稻主要病虫害发生及产量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(6): 1-7.
Zhang S, Zhao H, Lü L, Chang X Q, Yang X L, Yang L, Lu D Y, Chen M X. Effects of reduction combinations of fertilizer and pesticide on incidence of main pests and diseases and yield in rice[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(6): 1-7. (in Chinese with English abstract)
 - [10] 李伟. 我国人口负增长趋势及应对策略[J]. 中国发展观察, 2024(S1): 6-9.
Li W. Trends of negative population growth in China and countermeasures [J]. *China Development Observation*, 2024(S1): 6-9. (in Chinese with English abstract)
 - [11] 姜尚易, 薛新宇, 顾伟, 崔龙飞, 周晴晴, 王昕. 农用植保无人机的研究现状及趋势[J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 1-6, 31.
Lou S Y, Xue X Y, Gu W, Cui L F, Zhou Q Q, Wang X. Current status and trends of agricultural plant protection unmanned aerial vehicle[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(12): 1-6, 31. (in Chinese with English abstract)
 - [12] 童纪斌, 戎雪利, 任萍, 褚光, 王丹英. 水稻无人机直播产量、效益分析及技术要点[J]. 中国稻米, 2024, 30(1): 98-100, 107.
Tong J C, Rong X L, Ren P, Chu G, Wang D Y. Yield and benefit analysis of rice drone direct seeding and its technical points[J]. *China Rice*, 2024, 30(1): 98-100, 107. (in Chinese with English abstract)
 - [13] 彭志清, 柏超, 宁国云. 基于农药减量下植保无人机施药对水稻病虫害防效的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25(2): 106-107, 110.
Peng Z Q, Bai C, Ning G Y. Effects of applying plant protection UAV on rice pests and diseases based on pesticide reduction[J]. *China Rice*, 2019, 25(2): 106-107, 110. (in Chinese with English abstract)
 - [14] 朱赞彬, 黄钰琪, 龚守富. 无人机作业参数对小麦喷雾效果的分析及试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(5): 186-190.
Zhu Z B, Huang Y Q, Gong S F. Analysis and experiment on the effect of UAV operating parameters on wheat spraying[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2023, 45(5): 186-190. (in Chinese with English abstract)
 - [15] 臧禹, 谷秀艳, 林树青, 资乐, 李长龙, 陈其龙, 臧英. 植保无人机作业方式对玉米螟防治的雾滴沉积和防治效果影响[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(6): 325-332.
Zang Y, Gu X Y, Lin S Q, Zi L, Li C L, Chen Q L, Zang Y. Effects of mode of operating agricultural unmanned aerial vehicles on deposition of droplet and prevention and control of corn borer[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2024, 43(6): 325-332. (in Chinese with English abstract)
 - [16] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 周志艳, 金济, 刘爱民. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 40-46.
Chen S D, Lan Y B, Li J Y, Zhou Z Y, Jin J, Liu A M. Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(17): 40-46. (in Chinese with English abstract)
 - [17] 周圆, 沈云鹏, 段志平, 李月帅, 张卫峰. 肥料物理性质对无人机撒肥均匀性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 57-71.
Zhou Y, Shen Y P, Duan Z P, Li Y S, Zhang W F. Effects of physical properties of fertilizer on the uniformity of UAV fertilization[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12): 57-71. (in Chinese with English abstract)
 - [18] 方铁飞, 姚晓明, 周宇杰. 植保无人机不同喷液量对抗性二化螟防治效果的影响[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(7): 1663-1666.
Fang T F, Yao X M, Zhou Y J. Effect of different spray amounts of plant protection drones on the control effect of the *Chilo suppressalis*[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2024, 65(7): 1663-1666. (in Chinese with English abstract)
 - [19] 杨行洲, 乐秀虎. 植保无人机喷洒技术在不同作物中的适应性与优化策略[J]. 中国农机装备, 2024, 42(12): 77-79.
Yang X Z, Le X H. Adaptability and optimization strategy for spray application of UAV in different crops[J]. *China Agricultural Machinery Equipment*, 2024, 42(12): 77-79. (in Chinese with English abstract)
 - [20] 姚熔薇. 不同杀菌剂对水稻纹枯病防效筛选试验[J]. 现代化农业, 2022(5): 18-19.
Yao R W. Screening test of control effect of different fungicides on rice sheath blight[J]. *Modernizing Agriculture*, 2022(5): 18-19. (in Chinese)
 - [21] 唐春生, 高家樟, 曹国平, 黄守行, 刘二明, 刘承龙. 稻曲病病情分级标准的研究和应用[J]. 植物保护, 2001, 27(1): 18-21.
Tang C S, Gao J Z, Cao G P, Huang S X, Liu E M, Liu C L. Studies on the grading standard of rice false smut disease[J]. *Plant Protection*, 2001, 27(1): 18-21. (in Chinese with English abstract)
 - [22] 杨永刚, 袁晓娟, 曹云, 陈雪芳, 尹慧来, 王志强, 文艳芳, 杨志远, 孙园园, 贾现文, 马均, 孙永健. 品种和播种量互作对机械旱直播水稻与杂草养分竞争的影响[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(2): 185-197.
Yang Y G, Yuan X J, Cao Y, Chen X F, Yin H L, Wang Z Q, Wen Y F, Yang Z Y, Sun Y Y, Jia X W, Ma J, Sun Y J. Effects of variety and seeding rate interaction on nutrient

- competition between mechanized dry direct seeded rice and weeds[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2024, 38(2): 185-197. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘凤, 石爱龙, 祝海竣, 段玉婷, 关常铮, 罗龙欣, 彭涛, 王学华. 施氮量与肥料配比对水稻群体生长和产量的影响[J]. 杂交水稻, 2024, 39(3): 117-126.
- Liu F, Shi A L, Zhu H J, Duan Y T, Guan C Z, Luo L X, Peng T, Wang X H. Effects of nitrogen application rate and fertilizer ratio on population growth and yield of rice[J]. *Hybrid Rice*, 2024, 39(3): 117-126. (in Chinese with English abstract)
- [24] Cheng Q Y, Li L Y, Liao Q, Fu H, Nie J X, Luo Y H, Wang Z L, Yin H L, Shu C H, Chen Z K, Sun Y J, Ma J, Li N, Yang Z Y. Is scale production more advantageous than smallholders for Chinese rice production[J]. *Energy*, 2023, 283: 128753-128765.
- [25] 朱岳梅. 种子包衣对淹水直播杂交稻产量、能量利用和经济效益的影响[D]. 温江: 四川农业大学, 2023.
- ZHU Y M. Effects of seed coating on yield, energy use and economic benefits of flooded direct seeding hybrid rice [D]. Wenjiang: Sichuan Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [26] Ozkan B. Energy input-output analysis in turkish agriculture[J]. *Energy*, 2017, 32(2): 145-155.
- [27] 董洋阳, 贾晴晴, 朱新春, 刘章生, 王雅凤. 施氮量对机穴播水稻产量及其构成因素的影响[J]. 中国稻米, 2018, 24(3): 105-107.
- Dong Y Y, Jia Q Q, Zhu X C, Liu Z S, Wang Y F. Effects of nitrogen application rate on yield and yield components of mechanical-dibbling rice[J]. *China Rice*, 2018, 24(3): 105-107. (in Chinese with English abstract)
- [28] 顾汉柱, 王琛, 吴昊, 张瑛, 肖治林, 景文疆, 张耗. 减氮方式对不同穗型粳稻产量和品质的影响[J]. 作物研究, 2023, 37(5): 448-460.
- Gu H Z, Wang C, Wu H, Zhang Y, Xiao Z L, Jing W J, Zhang H. Effects of nitrogen reduction on yield and quality of Japonica rice with different panicle type[J]. *Crop Research*, 2023, 37(5): 448-460. (in Chinese with English abstract)
- [29] 徐文波. 减量施氮对优质杂交籼稻产量形成及品质的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- Xu W B. Effect of reduced nitrogen application on yield formation and quality of high-quality indica hybrid rice [D]. Guiyang: Guizhou University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [30] 胡明明, 李志欣, 丁峰, 陈凯瑞, 廖琴, 吴子牛, 熊莹, 付浩, 罗永恒, 陈宗奎, 杨志远, 孙永健, 马均. 不同水旱轮作模式下秸秆还田与精量减氮对水稻产量、氮素吸收利用及土壤氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(8): 1500-1514.
- Hu M M, Li Z X, Ding F, Chen K R, Liao Q, Wu Z N, Xiong Y, Fu H, Luo Y H, Chen Z K, Yang Z Y, Sun Y J, Ma J. Effects of straw returning and precise N reduction on rice yield, N uptake and utilization and soil N content under different paddy-upland rotation patterns [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(8): 1500-1514. (in Chinese with English abstract)
- [31] 宋灿灿, 王国宾, 韩金钢, 兰玉彬, 王会征, 赵静. 农用无人机播撒装置与技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 110-122.
- Song C C, Wang G B, Han J G, Lan Y B, Wang H Z, Zhao J. Review of research progress on agricultural UAV spreading devices and technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(1): 110-122. (in Chinese with English abstract)
- [32] 任万军, 吴振元, 李蒙良, 雷小龙, 朱世林, 陈勇. 水稻无人机撒肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 88-98.
- Ren W J, Wu Z Y, Li M L, Lei X L, Zhu S L, Chen Y. Design and experiment of UAV fertilization spreader system for rice[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(3): 88-98. (in Chinese with English abstract)
- [33] 吴振元. 无人机施肥装置的设计及在水稻穗肥上的应用与评价[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
- Wu Z Y. Design of UAV fertilization device and its application and evaluation on rice panicle fertilizer [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [34] 黄世文, 王玲, 陈惠哲, 王全永, 朱德锋. 氮肥施用量和施用方法对超级杂交稻纹枯病发生的影响[J]. 植物病理学报, 2009, 39(1): 104-109.
- Huang S W, Wang L, Chen H Z, Wang Q Y, Zhu D F. Effect of nitrogen dosage and fertilization approach on the occurrence of sheath blight disease in super hybrid rice(SHR)[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2009, 39(1): 104-109. (in Chinese with English abstract)
- [35] 任家琼. 2种助剂对水稻二化螟防治的减施增效作用[J]. 植物医学, 2022, 1(4): 60-65.
- Ren J Q. Effects of two additives on reducing pesticide and increasing efficiency for control of rice stem borer[J]. *Plant Health and Medicine*, 2022, 1(4): 60-65. (in Chinese with English abstract)
- [36] 陈秋玉, 黄影华, 张华杰, 周丽燕, 赵丽君, 张善炫, 夏丽莎, 洪瑞霞, 李艳大, 陈青春. 不同生育期水稻叶片SPAD值与氮素指标相关关系[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(17): 19-24, 27.
- Chen Q Y, Huang Y H, Zhang H J, Zhou L Y, Zhao L J, Zhang S X, Xia L S, Hong R X, Li Y D, Chen Q C. Correlation between SPAD value and nitrogen indicators in rice leaves at different growth stages[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(17): 19-24, 27. (in Chinese with English abstract)
- [37] 刘磊, 宋娜娜, 齐晓丽, 崔克辉. 水稻根系特征与氮吸收利用效率关系的研究进展[J]. 作物杂志, 2022(1): 11-19.
- Liu L, Song N N, Qi X L, Cui K H. Research advances on the relationship between root characteristics and nitrogen uptake and utilization efficiency in rice[J]. *Crops*, 2022(1): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [38] 王坤庭, 陶钰, 邢志鹏, 冯源, 郭力, 赵欣怡, 缪孙静, 陈慧敏, 胡雅杰. 穗肥施氮量和结实期遮光对水稻产

- 量和干物质积累特征的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(8): 105-110.
- Wang K T, Tao Y, Xing Z P, Feng Y, Guo L, Zhao X Y, Miao S J, Chen H M, Hu Y J. Effects of panicle nitrogen fertilizer amount and shading during grain filling period on yield and dry matter accumulation characteristics of rice[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(8): 105-110. (in Chinese with English abstract)
- [39] 王颖姮, 陈丽娟, 崔丽丽, 詹生威, 宋煜, 陈世安, 解振兴, 姜照伟, 吴方喜, 卓传营, 蔡秋华, 谢华安, 张建福. 施氮量对优质稻“福香占”光合特性、产量及品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(1): 89-101.
- Wang Y H, Chen L J, Cui L L, Zhan S W, Song Y, Chen S A, Xie Z X, Jiang Z W, Wu F X, Zhuo C Y, Cai Q H, Xie H A, Zhang J F. Effects of nitrogen rate on photosynthesis, yield and grain quality of superior quality rice “Fuxiangzhan”[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2023, 37(1): 89-101. (in Chinese with English abstract)
- [40] 霍中洋, 杨雄, 张洪程, 葛梦婕, 马群, 李敏, 戴其根, 许轲, 魏海燕, 李国业, 朱聪聪, 王亚江, 颜希亭. 不同氮肥群体最高生产力水稻品种各器官的干物质和氮素的积累与转运[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1035-1045.
- Huo Z Y, Yang X, Zhang H C, Ge M J, Ma Q, Li M, Dai Q G, Xu K, Wei H Y, Li G Y, Zhu C C, Wang Y J, Yan X T. Accumulation and translocation of dry matter and nitrogen nutrition in organs of rice cultivars with different productivity levels[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1035-1045. (in Chinese with English abstract)
- [41] 孙永健, 孙园园, 蒋明金, 李应洪, 严奉君, 徐徽, 王海月, 马均. 施肥水平对不同氮效率水稻氮素利用特征及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(24): 4745-4756.
- Sun Y J, Sun Y Y, Jiang M J, Li Y H, Yan F J, Xu H, Wang H Y, Ma J. Effects of fertilizer levels on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(24): 4745-4756. (in Chinese with English abstract)
- [42] 马巍, 齐春艳, 刘亮, 刘晓亮, 郭晞明, 隋鹏举, 付胜, 侯立刚. 氮肥减量后移对超级稻吉粳88氮素利用效率及产量的影响[J]. 东北农业科学, 2016, 41(1): 23-27.
- Ma W, Qi C Y, Liu L, Liu X L, Guo X M, Sui P J, Fu S, Hou L G. Effects of postponing and decreasing nitrogen application on nitrogen use efficiency and yield of super rice “Jijing 88” [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2016, 41(1): 23-27. (in Chinese with English abstract)
- abstract)
- [43] 刘洪涛, 陈同斌, 郑国砥, 高定, 雷梅. 有机肥与化肥的生产能耗、投入成本和环境效益比较分析: 以污泥堆肥生产有机肥为例[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 1000-1003.
- Liu H T, Chen T B, Zheng G D, Gao D, Lei M. Comparative analysis of organic and chemical fertilizer production energy consumption, input cost and environmental benefit: Sewage sludge composting as example[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 1000-1003. (in Chinese with English abstract)
- [44] Pishgar-KomLeh S H, Sefeedpari P, Rafiee S. Energy and economic analysis of rice production under different farm levels in Guilan Province of Iran[J]. *Energy*, 2011, 36(10): 5824-5831.
- [45] AghaAlikhani M, Kazemi-Poshtmasari H, Habibzadeh F. Energy use pattern in rice production: A case study from Mazandaran Province, Iran[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 69: 157-162.
- [46] Yang Z Y, Zhu Y, Zhang J, Li Y D, Wang H Y, Ma J, Sun Y J, Fu H, Shu C H, Yin H L, Chen Z K, Li N. Comparison of energy use between fully mechanized and semi-mechanized rice production in Southwest China[J]. *Energy*, 2022, 24(5): 123270.
- [47] Yang Z Y, Zhu Y, Zhang J, Li Y D, Wang H Y, Ma J, Sun Y J, Fu H, Shu C H, Yin H L, Chen Z K, Li N. Unmanned aerial vehicle direct seeding or integrated mechanical transplanting, which will be the next step for mechanized rice production in China? : A comparison based on energy use efficiency and economic benefits[J]. *Energy*, 2023, 27(3): 127223.
- [48] Qi P, Wang Z Q, Wang C, Zhang J, Li Y D, Ma J, Sun Y J, Fu H, Shu C H, Yin H L, Chen Z K, Li N. Development of multifunctional unmanned aerial vehicles versus ground seeding and outplanting: What is more effective for improving the growth and quality of rice culture[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 953753.
- [49] 李艳大, 叶春, 曹中盛, 孙滨峰, 舒时富, 陈立才. 无人机与人工喷施雾滴在水稻冠层内沉积特征及效益比较[J]. 中国水稻科学, 2021, 35(5): 513-518.
- Li Y D, Ye C, Cao Z S, Sun B F, Shu S F, Chen L C. Comparison of droplet deposition characteristics in rice canopy and benefit between unmanned aerial vehicle spray and artificial spray[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2021, 35(5): 513-518. (in Chinese with English abstract)