



农业无人机行业白皮书 (2022)

2023 年 8 月

— 序言 —

对于全球农业来说，2022 年都是富有挑战性的一年，

由于地缘政治、经济、极端天气等原因，

全球粮食价格快速上涨，粮食安全^[1]危机凸显……

挑战伴随机遇，新的一年，

农业无人机在技术研发、农作物应用拓展、行业生态建设等方面都有了发展。



[1] 粮食安全：所有人在任何时候都能通过物质、社会及经济渠道获得充足、安全和富有营养的食物，满足其积极、健康生活的膳食需求和膳食偏好。
见国际粮农组织《2022 年世界粮食安全和营养状况》，<https://www.fao.org/3/nj984zh/nj984zh.pdf>

目录

一、2022 年亮眼瞬间	01
二、全球政策的发展趋势	03
(一) 获得中国民航局的适航许可证	03
(二) 欧洲政策对农用无人机逐步开放	05
1. 《禁止航空喷洒令》的修改提案	
2. 欧洲航空安全局 (EASA) 简化农业无人机的使用申请方式	
3. 德国开放 50KG 以下的农业无人机进行作业	
4. T30 农业无人机获取瑞士 AGROSCOPE 认证: 可以和地面器械一样用药	
(三) 获得北美地区的运行豁免	08
1. T30 和 T40 获得美国 FAA 运行豁免	
2. 获得加拿大民航局的认可	
三、环境保护试验	10
(一) 雾滴粒径测试	10
1. 无风场条件下离心喷头雾滴粒径谱测试	
2. 单旋翼下洗气流场作用下雾滴粒径谱测试	
3. 四旋翼下洗气流场作用下雾滴粒径谱测试	
(二) 飘移田间试验	14
1. T30 飘移测试	
2. T40 飘移试验	
3. T40 除草剂试验	
(三) 仿真模型探索	20
四、新场景应用分享	21
(一) 病虫害防控	21
(二) 农艺与无人机应用的结合	22

（三）智慧农业典型案例分享	23
1. 农业无人机在马铃薯种植过程的应用和发展	
2. 水稻精准农业	
3. 精准喷洒在大豆的应用	
（四）播撒案例.....	37
1. 喂养小龙虾	
2. 水稻播撒应用	
（五）授粉应用.....	40
1. 水稻大田的杨花	
2. 梨树授粉	
3. 果树摇花	
（六）果树防冻防晒的喷洒	42
五、最佳实践	43
（一）人员培训.....	43
（二）新技术发展.....	43
1. 更智能	
2. 更高效	
3. 更安全	
（三）农药使用技术与无人机的结合	45
1. 农药的适当桶混合	
2. 农药制剂及其在无人机应用的技术可行性	
六 应用错误详解	49
（一）错误一：在不适合的区域喷洒除草剂	49
（二）错误二：在蜜蜂、桑树附近喷洒杀虫剂.....	49
（三）错误三：果树作业采用高速度或粗雾滴	49
（四）错误四：障碍物区域采用十几米的飞行高度	50
（五）错误五：除草或者矮壮素作业行距设置过宽	51
（六）错误六：作业行距和作业速度不匹配.....	54
（七）错误七：玉米喷洒茎叶除草剂	52

一、2022 年亮眼瞬间

经过十年深耕，大疆农业的足迹已遍布六大洲，

覆盖超过 100 个国家和地区。

截至 2022 年底，大疆农业无人机全球累计保有量突破 20 万台，

累计作业面积突破 30 亿亩次，惠及数亿农业从业者。

通过飞手培训，累计培训 15 万名植保飞手与 2500 名教员，

推动更多青年创业者投身到科技农业事业中，为智慧农业的发展提供人才支撑。





- 一月** T30 通过德国 JKI 对喷洒系统的安全认可，可以在德国葡萄园场景作业。
- 二月** 在墨西哥建立第一所慧飞分校，为墨西哥提供更多专业的飞手培训。
- 三月** 大疆农业无人机在巴西助力多种植保活动。
- 四月** T30 在欧洲多个国家通过喷洒认证和民航局认可，进行喷洒作业。
- 五月** T40 雾滴粒径研究及飘移测试在中国启动。
- 六月** 首次发布《农业无人机行业白皮书》，提出农业不仅要关注效率，更要兼顾生态环保。
- 七月** 大疆农业向中国乡村发展基金会捐赠 15 台大疆农业无人机，此批无人机将用于甘肃省漳县、内蒙古自治区包括蚂蚁森林在内的所有林草，助力病虫害防治，推动林草业的绿色可持续发展。
- 八月** 美国用户将自己的 7 台直升机更换为 7 台大疆农业无人机。
- 九月** T20P 在马来西亚为榴莲树喷药，拓宽了农业无人机的应用场景。
- 十月** T40 在美国 AirWorks-2022 正式面向全球发布。
- 十一月** 全球首支大疆农业品牌片《让农业更轻松，让生命更美好》发布。
- 十二月** T50 在中国区正式发布并开售。

保有量单位：台

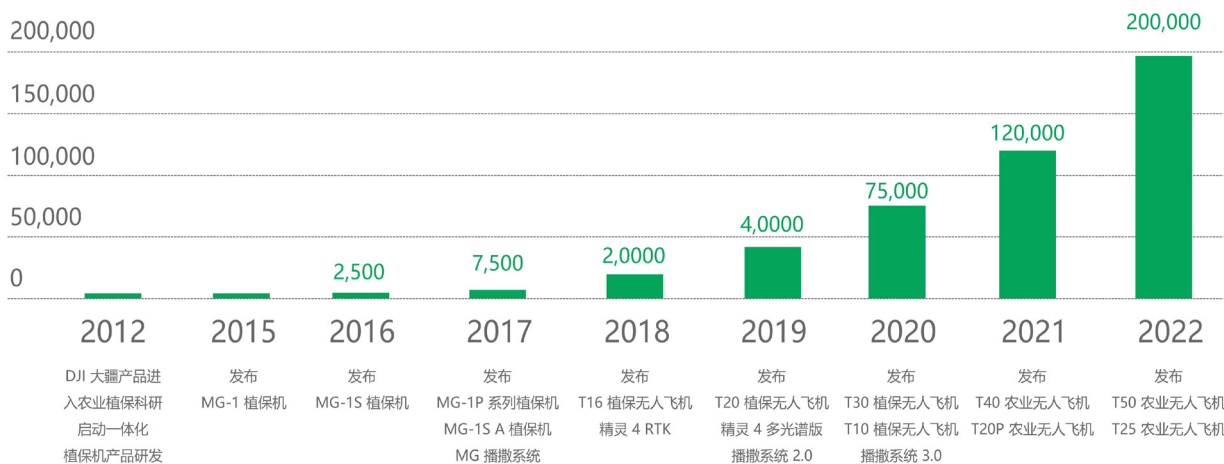


图 1 2022 年大疆农业无人机市场保有量

二、全球政策的发展趋势

农业无人机的管理和其他的无人机产品有所不同。一般来说，无人机的主管单位是民航局，而农业无人机不仅由民航局管理，因其用于农业作业，也受到农业部门和环保部门的管理。随着农业无人机在全球受到越来越多农业从业者的欢迎，政府管理部门也对农业无人机有了新的认知，在管理思路和流程上，均对农业无人机展现出更开放的态度。

（一）获得中国民航局的适航许可证

2022 年，大疆一直在努力申请农业无人机的适航。2023 年 3 月 15 日，民航中南地区管理局现场为大疆创新颁发 T16、T20、T10、T30 农业无人机型号合格证（Type Certificate）与生产许可证（Production Certificate）。大疆创新成为中国首个获得农业无人机生产许可证的单位。



图 2 中南局适航审定处为大疆颁发首个农业无人机生产许可证

根据中国民用航空法第三十四条规定：设计民用航空器及其发动机、螺旋桨和民用航空器上设备，应当向国务院民用航空主管部门申请领取型号合格证书。经审查合格的，发给型号合格证书。无人机作为一种新兴产业，具有设计新颖、运行场景多样等特点，与传统民用航空器具有显著差异，在对其适航管理模式的探索上也带来了巨大的挑战，是国际公认的难题。

大疆创新积极配合中国民航局开展对无人机适航管理的探索、积极参与各项适航技术标准与专用条件的研究与制定。2020 年 5 月，中国民航局适航司发布《民用无人机产品适航审定管理程序（试行）》，大疆创新成为国内首个农业无人机系统设计生产批准函申请单位，在此过程中，积极配合局方审查组的各项审定工作，为低风险民用无人机适航管理积累了大量的实践经验。中国民航局适航司于 2020 年 12 月 21 日向大疆 T16 和 T20 两款机型颁发国内首个农业无人机系统设计生产批准函，并于 2021 年 05 月 31 日完成大疆 T10 和 T30 设计生产批准函审定项目末次审查会议。

2022 年 12 月，依据中国民用航空规章《民用航空产品和零部件合格审定规定》（CCAR-21），民航局正式发布《民用无人驾驶航空器系统适航审定管理程序》（AP-21-AA-2022-71）。根据该程序要求，中型农用无人驾驶航空器系统可按对限用类民用无人驾驶航空器系统的要求进行型号合格审定、生产许可审定和适航合格审定，通过取得型号合格证及其更改和补充型号合格证获得设计批准，通过取得生产许可证获得生产批准，通过取得民用无人驾驶航空器特殊适航证获得适航批准。大疆创新积极按照规章和程序要求开展证件转换和申请工作。民航中南地区管理局完成大疆创新四个型号证件的转换和申请审查后，分别于：2023 年 1 月 31 日，签发大疆 T16、T20 两款农业无人机型号合格证；2 月 10 日，签发大疆 T10、T30 两款农业无人机型号合格证；2 月 22 日，签发大疆 T16、T20、T10、T30 的生产许可证。

中国民用航空局
CIVIL AVIATION ADMINISTRATION OF CHINA

生产许可证
PRODUCTION CERTIFICATE

编号(No.)PC0067A-ZN

本生产许可证发给 This certificate is issued to:
深圳市大疆创新科技有限公司/SZ DJI Technology Co., Ltd.
公司注册地址 whose business address is:
深圳市南山区西丽街道西丽社区仙仙路 53 号大疆天空之城 T3 大堂/Lobby of T3, DJI Sky City, No. 53 Xianxuan Road, Xili Community, Xili Street, Nanshan District, Shenzhen
总装设施地址 whose final assembly facilities are located at:

序号 No.	总装设施地址 final assembly facilities
01	深圳市南山区西丽街道仙仙路 1002 号百旺信工业园 12 栋、13 栋、18 栋/Building 18 & Building 12 & Building 13, Baiwangxin Industrial Park, 1002 Songhai Road, Xili Street, Nanshan District, Shenzhen
02	深圳市龙岗区大鹏新区葵涌街道葵涌社区民安路 1 号比亚迪 A-48 厂房 301/301 of Building A-48, BYD, No. 1, Yantian Road, Kuichong Community, Kuichong Street, Dapeng New Area, Shenzhen

经审查，上述制造人的生产设施、质量管理体系及质量手册和程序等符合中国民用航空规章 CCAR-21 的相关规定，准予在上述生产设施处，对本证所许可生产项目单(No.PC0067A-ZN-01)中列明产品按照批准的型号资料进行重复生产。
The manufacturing facilities, quality system, quality manual and procedures of the manufacturer listed above are demonstrated to be in compliance with Chinese Civil Aviation Regulations CCAR-21. This certificate authorizes to duplicate production products listed in the Production Limitation Record (No.PC0067A-ZN-01) attached to this Production Certificate according to the approved type design at the facilities listed above.

质量手册 Quality Manual
名称 Name: DJI-AW-001_深圳市大疆创新科技有限公司适航管理体系手册_A5/DJI-AW-001_DJI Airworthiness Management System Manual_A5
编号 No.: DJI-AW-001
版次 Rev.: A5 量及以后批准的版次 and later revisions approved by CAAC

局长授权 By direction of the Administrator
首次颁发日期 Original issue date: 2023 年 02 月 22 日
修后颁发日期 Revision issue date:

姓名 Name 陈维 Chen Wei
职务 Title 副局长 Deputy Director General
单位 Department 民航中南地区管理局 CAAC Central and Southern Regional Administration

本证不可转让，除局方另行规定终止日期外，本证长期有效。
This certificate shall continue in effect indefinitely, unless the certificate is suspended, revoked or surrendered by the Authority. This Certificate is not Transferable.

表-21-308-2019

中国民用航空局
CIVIL AVIATION ADMINISTRATION OF CHINA

许可生产项目单
PRODUCTION LIMITATION RECORD

编号(No.)PC0067A-ZN

本许可生产项目单是生产许可证 No. PC0067A-ZN 的附件。
生产许可证 No.PC0067A-ZN 的生产许可证持有人可以制造下列民用航空产品:
This production limitation record is the attachment to Production Certificate No.PC0067A-ZN. The holder of Production Certificate No.PC0067A-ZN may manufacture civil aviation products listed below:

型号合格证(型号认可证)/补充型号合格证/改装设计 批准书编号 Type Certificate (Validation of Type Certificate)/Supplemental Type Certificate (Validation of Supplemental Type Certificate)/Modification Design Approval No.	型号/型别 Model	批准生产的日期 Date Production Authorized
TC0071A-ZN	DJI-T16(3WWDZ-15A)	2023-02-22
TC0072A-ZN	DJI-T20(3WWDZ-15.1B)	2023-02-22
TC0073A-ZN	DJI-T30(3WWDZ-30A)	2023-02-22
TC0074A-ZN	DJI-T10(3WWDZ-10A)	2023-02-22

限制 Limitations: 无 (N/A).

局长授权 By direction of the Administrator
姓名 Name 陈维 Chen Wei
签字 Signature
职务 Title 副局长 Deputy Director General
单位 Department 民航中南地区管理局 CAAC Central and Southern Regional Administration
签发日期 Date of issuance 2023 年 02 月 22 日

图 3 大疆 T16、T20、T10、T30 无人机生产许可证

此次大疆创新·型号合格证与生产许可证颁证仪式，代表大疆创新 T16、T20、T10、T30 农业无人机顺利通过局方型号合格审定与生产许可审定，圆满完成取证工作。



图 4 大疆 T30 农业无人机系统，首批拿到中国民航局生产许可证的机型之一

（二）欧洲政策对农用无人机逐步开放

1. 《禁止航空喷洒令》的修改提案

2022 年 6 月 22 日，欧盟发布 (EU) 2021/2115—欧洲议会和理事会关于植物保护产品可持续使用的法规和修订法规的提案（Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the sustainable use of plant protection products and amending Regulation (EU) 2021/2115）^[2]，在草案中，欧盟提出修改禁止 2009 年关于禁止空中喷洒的法规内容：

“（26）某些无人机可以被允许有针对性地在空中施用植物保护产品。由于有针对性的应用，这种无人机可能有助于减少植物保护产品的使用，因此与使用地面喷洒设备相比，有助于降低对人类健康和环境的风险。因此，宜在本条例中设定标准，免除某些无人机的空中应用禁令……”

草案在第 21 条中增加了对无人机可使用条件的说明。

“第 21 条 植物保护产品在某些类别的无人机空中应用中的使用

1. 如果某些类别的无人机符合第 2 款规定的标准，成员国可以免除此类无人机在空中施用植物保护产品之前第 20 条第（1）款规定的禁令。

2. 成员国可免除无人机的空中申请

从第 20 条第 1 款规定的禁令中说明与使用无人机相关的因素表明其使用的风险低于其他空中设备和陆基应用设备产生的风险。

这些因素应包括与以下相关的标准：

- （a）无人机的技术规格，包括喷雾飘移、旋翼数量和尺寸、有效载荷、吊杆宽度和总重量，操作高度和速度；
- （b）天气状况，包括风速；
- （c）喷洒区域，包括其地形；

[2] 见 https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/sustainable-use-pesticides_en

- (d) 相关成员国授权用作超低容量制剂的植物保护产品的可用性；
- (e) 无人机与实时动态技术的结合，在某些情况下在精准农业上的潜在应用；
- (f) 驾驶无人机的飞行员所需的培训水平；
- (g) 可能在同一地区同时使用多架无人机。
3. 一旦技术进步和科学发展允许制定此类精确标准，委员会有权根据补充本条例的第 40 条通过授权法案，以明确与第 2 款所述因素相关的精确标准。”

Use of plant protection products in aerial application by certain categories of unmanned aircraft

1. Where certain categories of unmanned aircraft fulfil the criteria set out in paragraph 2, a Member State may exempt aerial application by such unmanned aircraft from the prohibition laid down in Article 20(1) prior to any aerial application of plant protection products.
2. An aerial application by an unmanned aircraft may be exempted by the Member State from the prohibition laid down in Article 20(1) where factors related to the use of the unmanned aircraft demonstrate that the risks from its use are lower than the risks arising from other aerial equipment and land-based application equipment. These factors shall include criteria relating to:
 - (a) the technical specifications of the unmanned aircraft, including in relation to spray drift, number and size of rotors, payload, boom width and overall weight, operating height and speed;
 - (b) the weather conditions, including wind speed;
 - (c) the area to be sprayed, including its topography;
 - (d) the availability of plant protection products authorized for use as ultra-low volume formulations in the relevant Member State;
 - (e) potential use of unmanned aircraft in conjunction with real time kinematic precision farming in certain cases;
 - (f) the level of training required for pilots operating an unmanned aircraft;
 - (g) potential concurrent use of multiple unmanned aircraft in the same area.
3. The Commission is empowered to adopt delegated acts in accordance with Article 40 supplementing this Regulation to specify precise criteria in relation to the factors set out in paragraph 2 once technical progress and scientific developments allow for the

图 5 关于允许使用无人机作业的条款

在草案的第 45 条 “Entry into force” 中，对 21 条的适用为此草案法规正式生效后的三年。

虽然该提案仅处于较早的草案阶段，对于无人机喷药的实施规划时间也较长，但仍反映了欧盟委员会对无人机喷药从“全面禁止空中喷洒，个别紧急案例申请豁免”，到“增加针对无人机的条款，以区别传统禁止航空喷洒的作业”以及“可以按照机型来申请农业作业”的转变。

这份草案在欧洲得到了广泛的讨论，很多国家在欧盟层面参与了讨论。我们希望加快立法进程，帮助更多欧洲用户以更快捷的方式实现农业无人机的使用。

2. 欧洲航空安全局（EASA）简化农业无人机的使用申请方式

由于使用 SORA（特许类运行风险评估）进行农业无人机的申请和评估会耗费平均 4-6 个月甚至 1 年的审批时间，欧洲航空安全局发布了 5 个前置风险评估模板（PDRA，Predefined Risk Assessment）来帮助用户和民航部门缩短申请和审批时间^[3]。这 5 个 PDRA 中有 4 个都涉及农业无人机，运营人可以根据自己的需求进行 PDRA 的填写和申请。

同时，EASA 在 2023 年也将启用 SORA 2.5，与 SORA 2.0 相比，新版本希望能够更清晰、简便地让用户使用。鉴于无论是 PDRA，还是 SORA，都存在一些证明无人机安全设计与可靠性测试的内容，大疆会帮助用户去完成这些方面的材料证明。

3. 德国开放 50kg 以下的农业无人机进行作业

2022 年 11 月 4 日，德国联邦数字与交通部发布《农业用地无人机地面部署国家标准场景》（以下简称《国家场景》）（Nationales Standardszenario zum bodennahen Einsatz von unbemannten Fluggeräten auf landwirtschaftlichem Grund (DE.STS.FARM)）^[4]，对 50kg 以下的农业无人机进行开放。

德国联邦数字与交通部认为，以农业、林业为目的的无人机应用在德国很普遍，且当局在此类操作方面的经验一直是积极的。局方不仅考虑到农业无人机喷洒液体的作业，同时还考虑到一些生物防治情况，如用无人机投放赤眼蜂防治欧洲玉米螟。因此，德国在发布该《国家标准场景》时考虑到 25kg 以下的开放类无人机是不够的，将 50kg 以下原本归为特许类的无人机，也按照开放类进行一定程度的开放。运营人在进行农业作业时要遵守一定的飞行高度、速度、喷洒药物及地理信息等方面的要求，但进行申请的时候仅需要发送一个及其简单的申请表。这个申请表包括了申请人的姓名、联系方式、开始作业时间和结束作业时间，局方书面给予确认后，申请人即可进行喷洒。

1. Angaben zum Betrieb des unbemannten Fluggeräts durch den Betreiber:

Name, Vorname:	
E-Mail:	
Anschrift (Straße, Hausnummer, Postleitzahl, Ort):	
Telefonnummer:	
e-ID:	
Identifikationsnummer Kompetenznachweis A1/A3	
Startdatum des Betriebs:	
Enddatum des Betriebs:	

图 6 德国 50kg 以下农业无人机的申请表

[3] 见：<https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones-rpas/specific-category-civil-drones/predefined-risk-assessment-pdra>

[4] 见：https://www.lba.de/SharedDocs/Downloads/DE/NfLs/B5_UAS/NfL_2022_1_2649.html?nn=4065440

4.T30 农业无人机获取瑞士 Agroscope 认证：可以和地面器械一样用药

欧洲国家对农药的使用管理非常严格，加之多年对航空喷洒的禁止，几乎见不到“用于空中喷洒”标签的农药。瑞士 Agroscope 在对 DJI T30 飞机进行认证测试后，认为在环境上的影响，尤其是飘移方面，和地面机具差不多。同时，考虑到 T30 在飞行的时候，喷洒高度基本也和一些大型地面喷雾车类似，Agroscope 认为在瑞士，地面机具可以用的农药，T30 都可以进行使用。此举在农药管理和使用层面，将无人机视为与地面器械类似，是在严格法律框架下的灵活变通。

（三）获得北美地区的运行豁免

1.T30 和 T40 获得美国 FAA 运行豁免

根据 FAA 的要求，农业无人机进行喷药如果符合 part137 的管辖范围，可以根据 44807 进行豁免申请。2022 年，美国的大疆用户分别就 T30 和 T40 申请 FAA 的运行豁免，获取了 T30 的豁免授权，T40 的豁免授权于 2023 年 1 月取得。

The FAA’s Decision

The FAA has determined that good cause exists for not publishing a summary of the petition in the *Federal Register*. The FAA has determined that good cause exists because the requested amendment to the exemption would not set a precedent and any delay in acting on this petition would be detrimental to Elevated.

Although you requested to operate the T-40 at a weight no more than 222.67 lbs., the 49 U.S.C. § 44807 determination for the DJI Agras T40 UAS is limited to no more than 222.66 lbs. Therefore, T-40 operations under this exemption are limited to a maximum take-off weight not to exceed 222.66 lbs.

The FAA has determined that the justification for the issuance of Exemption No. 19037 remains valid with respect to this exemption and is in the public interest. Therefore, under the authority provided by 49 U.S.C. §§ 106(f), 40113, 44701, and 44807, which the FAA Administrator has delegated to me, I hereby grant Elevated Ag LLC an exemption from 14 CFR §§ 61.3(a)(1)(i), 91.7(a), 91.119(c), 91.121, 91.151(b), 91.403(b), 91.405(a), 91.407(a)(1), 91.409(a)(1), 91.409(a)(2), 91.417(a), 91.417(b), 137.19(c), 137.19(d), 137.19(e)(2)(ii), 137.19(e)(2)(iii), 137.19(e)(2)(v), 137.31, 137.33, 137.41(c), and 137.42 to the extent necessary to allow Elevated to operate the DJI Agras T-16, DJI Agras T-20, and DJI Agras T-40 for the provision of commercial agricultural-related services, subject to the following conditions and limitations.

图 7 美国 FAA 豁免大疆 T40

2. 获得加拿大民航局的认可

大疆 T10 系列按照 TC 的要求通过了 Standard 922 审核。飞手可以在管控空域内运行无人机，也可以靠近人运行（5-30 米）^[5]。

Filter items Show entries

Manufacturer name	Model	Type	Manufacturer RPAS safety assurance		
			Controlled airspace	Near people	Over people
DJI	Agras T10	Rotary wing	Yes	Yes	

图 8-1 加拿大交通局官网对 T10 通过 922 标准的公告

T30 和 T40 作为 25kg 以上的无人机，用户需要向加拿大局方申请 SFOC 许可，2022 年，加拿大有很多用户成功获取 SFOC，在加拿大进行喷洒作业。



图 8-2 获取加拿大交通局认可的 T40 农业无人机

[5] 见: <https://tc.canada.ca/en/aviation/drone-safety/learn-rules-you-fly-your-drone/choosing-right-drone#approved>

三、环境保护试验

(一) 雾滴粒径测试

2022 年 8 月至 10 月，中国农业大学药械与施药技术中心实验室使用大疆 T40 的 LX8060SZ 离心喷头雾滴谱特征开展了测试与分析。该测试包括三个部分，第一部分为无风场条件下离心喷头雾滴粒径谱测试，分析在无风的条件下离心喷头的粒径雾滴情况；第二部分为单旋翼下洗气流场作用下雾滴粒径谱测试，分析单旋翼风场对雾滴粒径的作用及粒径变化；第三部分为四旋翼下洗气流场作用下雾滴粒径谱测试，模仿四旋翼无人机作业时的风场对雾滴的作用。

1. 无风场条件下离心喷头雾滴粒径谱测试

1.1 试验过程

试验设备：激光粒度分析、LX8060SZ 离心喷头及其控制系统。

试验方法：将单个 LX8060SZ 离心喷头安装在激光粒度分析仪激光线正上方，设置喷头转盘与水平线的夹角为 45° 与 0° ，喷头倾斜安装时，喷头近地端距离激光束 0.3m 高度范围内，使雾面经过激光束中点。喷头水平安装时，喷头近地端距离激光束 0.2m 高度范围内，两台仪器间距以所有雾滴能准确下落至激光束范围内为宜，推荐距离为 3m。使用标准硬水作为喷雾液。测试 2.70L/min 喷头流量下不同喷头雾化盘转速下的雾滴谱数据，设置多组喷头转速，每个处理测量 3 次，单次测量时间 10s，记录 DV50、DV10、DV90、雾滴相对分布跨度 RS 和小于 100、200 μm 雾滴比例 V100、V200 以评估雾化效果，找出体积中径 DV50 在 50–500 μm 不低于 5 个水平的喷头转速或其他控制指标。



图 9-1 雾滴粒径试验现场

1.2 结果分析

测试结果表明，受重力影响，喷头 45° 倾角时所产生的雾滴谱 $Dv50$ 与 $Dv90$ 低转速区要明显高于 0° 倾角，继续增加喷头转速，两种喷头倾角雾滴谱 $Dv50$ 与 $Dv90$ 区别消失，原因为高速转产生的离心力远大于重力，可消除重力带来的影响，而 0° 倾角在多数转速区间其 $Dv10$ 值均高于 45° 倾角。

根据上述分析，该型号离心喷头水平放置时的雾化效果优于倾斜放置，水平放置喷头更有利于产生雾滴谱更均匀的雾滴，田间作业时推荐将喷头水平放置以获取最佳喷雾效果。

2. 单旋翼下洗气流场作用下雾滴粒径谱测试

2.1 试验过程

搭建以 T40 电机及旋翼为基础的旋翼下洗气流场 LX8060SZ 离心喷头雾滴粒径分布测试平台（图 4、图 5），喷头位于旋翼正下方，调节仪器位置，使喷头中心位置位于激光束上方，保持喷头位置水平，借助风场作用改变雾滴运动方向，增加通过激光截面的雾滴比例。使用 OP-10 非离子表面活性剂配置成浓度为 0.1% 的喷雾液以模拟农药药液理化性质。开启旋翼电机调节转速至无人机飞行状态工作转速，打开喷雾系统，调节喷雾流量至 2.7L/min 和喷头转速待稳定后开始测量雾滴谱。测试待测流量下不同喷头雾化盘转速下的雾滴谱数据，设置多个喷头转速，每个处理测量 3 次，单次测量时间 10s，记录 $Dv50$ 、 $Dv10$ 、 $Dv90$ 、雾滴相对分布跨度 RS。



图 9-2 喷雾试验现场

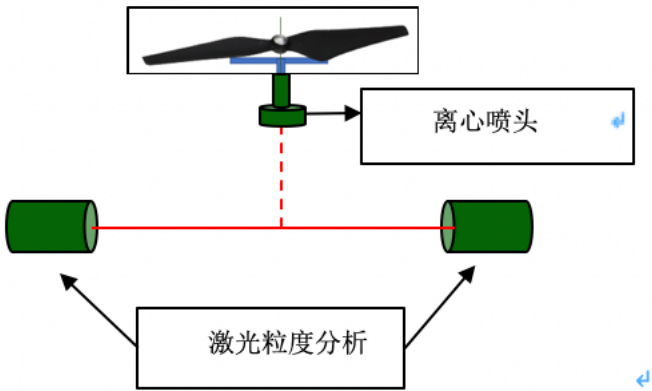


图 10 粒径测试示意图

2.2 结果与分析

相比于无风场状态测量雾滴粒径结果，在相同喷头转速条件下，旋翼下洗气流与雾场存在交互作用，导致如下结果：

- 1) 在 5500–14000 r/min 转速区间，相比于静态测量，下洗气流场会增加雾滴尺寸 10%–60%，在该区间内，喷头转速越低，该增大效应越明显。
- 2) 受下洗气流影响，根据上述内容推测静态风场下雾滴粒径跃迁效应由 3000–4000r/min 喷头转速区间增大至 4000–6000r/min，即跃迁效应向更高喷头转速发展。

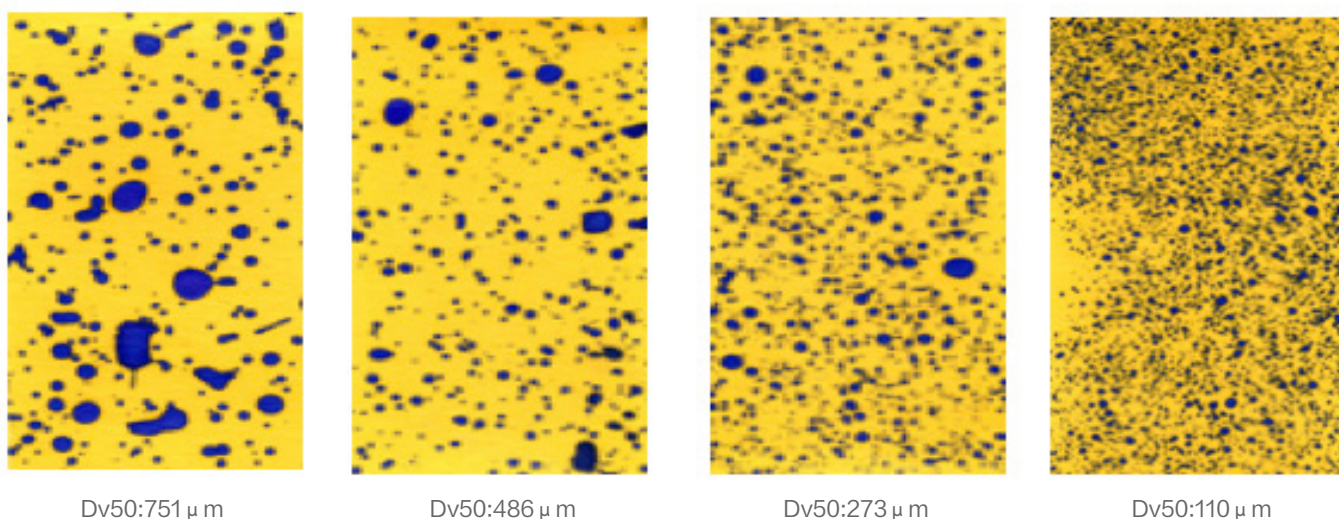


图 11 水敏纸测试结果



图 12 单旋翼下洗气流场作用下雾滴粒径谱测试现场

3. 四旋翼下洗气流场作用下雾滴粒径谱测试

3.1 材料与方法

将两个 LX8060SZ 离心喷头安装在自行搭建的模拟无人机喷雾试验台上，以模拟四旋翼无人机下洗气流场与雾滴的交互作用过程，喷头安装于旋翼正下方，调节激光粒度分析仪水平位置，激光束平行于无人机前进方向，并使喷头喷洒部件位于激光束上方 2m 处，保持喷头位置水平，测试无人机风场与雾滴的整体交互作用。

使用 OP-10 非离子表面活性剂配置成浓度为 0.1% 的喷雾液以模拟农药药液理化性质。开启旋翼电机调节转速至无人机飞行状态工作转速，打开喷雾系统，调节喷雾流量和喷头转速待稳定后开始测量雾滴谱，初始测量位点位于模拟无人机中线处。测试 1.6L/min 流量下不同喷头雾化盘转速下的雾滴谱数据，每个处理测量 3 次，记录 DV50、DV10、DV90、雾滴相对分布跨度 RS 和小于 100、150 μm 雾滴比例 V100、V150 以评估雾化效果。

在水平方向沿垂直激光线方向选取三个测量位点分别位于无人机模拟平台中点处、喷头正下方以及旋翼半径外（对应图 13，①；②；③处），移动激光粒度仪位置以测量水平方向上的雾滴粒径分布情况。

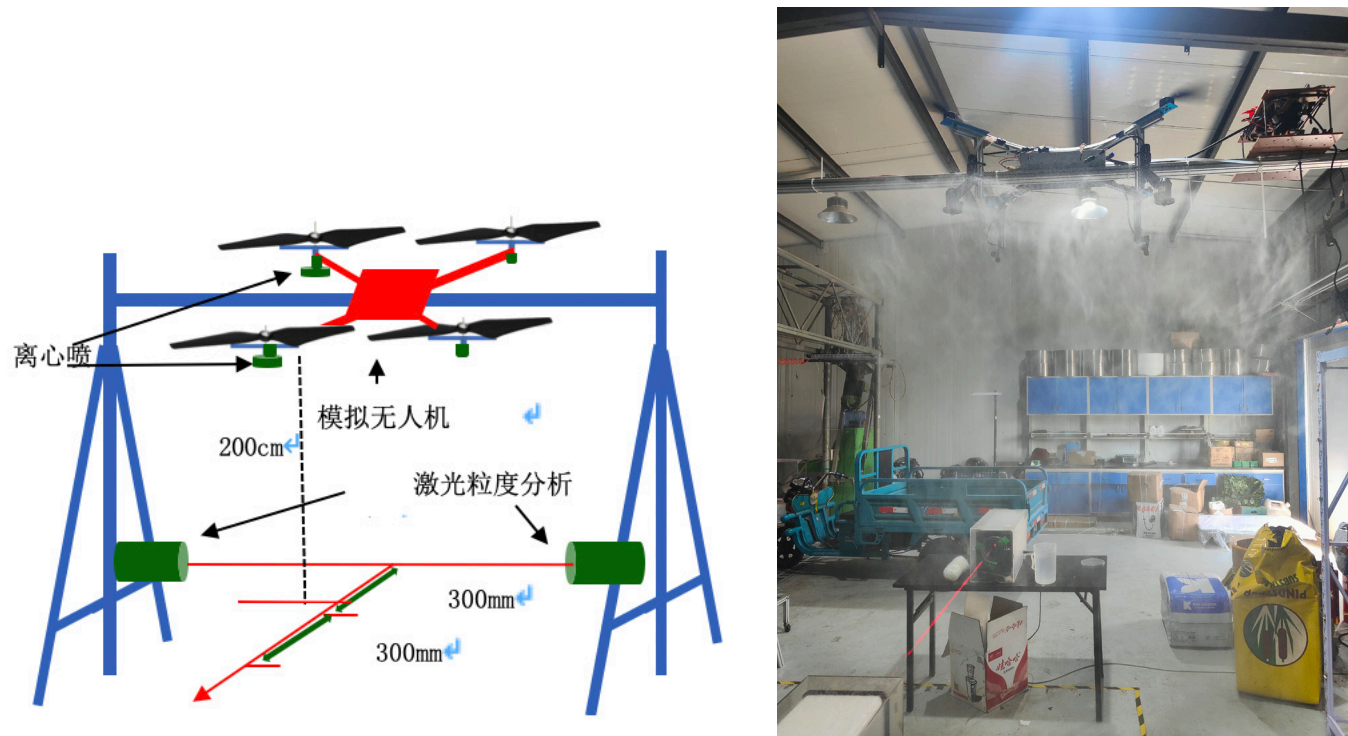


图 13 无人机风场环境中雾滴粒径分布测试测试现场

3.2 结果与分析

测试结果如图 14 所示，极低转速区间，产生大雾滴易挣脱下洗气流场范围，不利于农药雾滴的沉积均匀分布。



图 14 无人机下洗气流场雾滴粒径分布测试现场现场

（二）飘移田间试验

为了明确不同影响因子下农业无人机的喷雾飘移规律，指导农业无人机安全、高效地开展植保作业，保障非靶标生物与环境安全，对 T30、T40 展开飘移田间试验。

1. T30 飘移测试

1.1 试验方案及过程

试验在中国农业科学院新乡基地试验田中开展，使用 T30 农业无人机，农田地形平坦且四周空旷无遮挡，T30 飞行速度选择 3 m/s、4 m/s、5 m/s 和 6 m/s，飞行高度选择 2.0、3.0 和 4.0 m，选择正常、粗 2 种雾滴粒径，每种参数组合测定 3 种不同侧风速度下多旋翼农业无人机喷雾的雾滴沉积及飘移情况。

农业无人机飘移规律测定作业场景与雾滴采集区。试验在 128 m × 125 m（长 × 宽）的区域中开展，采样区域共布置 6 条采样带，每条采样带之间间隔 5 m，第一条和最后一条采样带分别距离测试区域边缘 50m。采样区域包括作业区 0–20 m 及下风向飘移区 0–50 m。根据 ISO 22866 喷雾飘移田间测试标准，在保证尽可能保证采样结果的精确度的条件下，采样点的设置为：从下风向作业区边缘至下风向飘移区 10 m 之间每隔 1 m 放置一个雾滴采集装置（由麦拉片为底部支撑，将雾滴测试卡与直径为 9 cm 滤纸固定于麦拉片上，在此设计基础上可以达到最大范围减少试验人员以及单个采集装置间的交叉污染问题），并在距离作业区下风向边缘 12、14、16、18、20、22、24、26、28、30、32、34、36、38、40、45 和 50 m 处分别放置一个雾滴采集装置。同时，将采样装置置于距地面 1 m 的位置，以避免地面效应对雾滴沉积的影响。喷雾结束后等待 5–10 min，确认滤纸上的雾滴全部晾干后按顺序分别装入自封袋中，并将样品在避光、阴凉条件下保存，随后对样品进行处理和测定。

农业无人机设置为多喷幅自动作业模式，飞机航线长 125 m，以保证农业无人机在采样带区域保持匀速飞行。试验前配制 5 g/L 的罗丹明 B 水溶液，将配置好的罗丹明 B 水溶液加入药箱中，确保农业无人机载药量为满载的 50%。试验前检查无人机喷头作业状态并校准其流量。

待风向达到要求并稳定后，一键起飞无人机进行自动喷洒，利用飞机自带的 RTK 确保航线准确，喷洒结束后从上风向高空绕回起飞点，每次喷雾结束后使用深色离心管收集喷雾母液以明确喷雾过程中溶液浓度变化情况



图 15 T30 试验场景记录图

1.2 结论与分析：

- 1) 侧风风速对雾滴飘移的影响：侧风风速是影响飘移距离和飘移量的最主要因素，最佳作业条件是侧风风速小于 3.4 m/s（二级风）。
- 2) 飞行高度对雾滴飘移的影响：当侧风风速在 0-3.4 m/s 之内，飞行高度为 2 m、3 m 和 4 m 时，喷雾雾滴在作业区的沉积量逐渐减少，雾滴分布均匀性变差，雾滴飘移距离也逐渐增加。而当侧风风速大于 3.4 m/s 后，改变作业高度对雾滴沉积和飘移几乎没有影响，侧风风速是主要影响因素。
- 3) 环境温湿度对飘移的影响：环境温度 15-30℃，侧风风速小于 3.4 m/s 的前提下，空气湿度在 20-80% 之间，湿度对雾滴飘移的影响最为显著，随着环境湿度升高，雾滴飘移量和飘移距离均减少，降低雾滴飘移的最佳环境湿度范围是：环境湿度在 60% 以上。而当环境风速达到 3.4 m/s 以上，改变环境的温湿度对雾滴飘移均无显著影响。

2. T40 飘移试验

因为 T40 使用了全新设计的离心喷头系统，因此我们对 T40 采取了“一年两地”的飘移测试，即在同一年的时间里，在河南新乡、河北冀州两个地方同步开展飘移测试。

2.1 河南新乡 T40 飘移试验

2.1.1 试验方法

农业无人机飘移规律测定作业场景与雾滴采集区。试验在 128 m x 125 m（长 × 宽）的区域中开展，采样区域共布置 6 条采样带，每条采样带之间间隔 5m，第一条和最后一条采样带分别距离测试区域边缘 50m。采样区域包括作业区 0-28m 及下风向飘移区 0-50m。根据 ISO 22866 喷雾飘移田间测试标准，在保证尽可能保证采样结果的精确度的条件下，采样点的设置为：从下风向作业区边缘至下风向飘移区 10 m 之间每隔 1 m 放置一个雾滴采集装置，并在距离作业区下风向边缘 12、14、16、18、20、22、24、26、28、30、32、34、36、38、40、45 和 50 m 处分别放置一个雾滴采集装置。同时，将采样装置置于距地面 1 m 的位置，以避免地面效应对雾滴沉积的影响。喷雾结束后等待 5-10 min，确认滤纸上的雾滴全部晾干后按顺序分别装入自封袋中，并将样品在避光、阴凉条件下保存，随后对样品进行处理和测定。

农业无人机设置为多喷幅（n=4）自动作业模式，飞机航线长 125 m，以保证农业无人机在采样带区域保持匀速飞行。试验前配制 5 g/L 的罗丹明 B 水溶液，将配置好的罗丹明 B 水溶液加入药箱中，确保农业无人机电载药量为满载的 50%。试验前检查无人机喷头作业状态并校准其流量。

待风向达到要求并稳定后，无人机进行自动喷洒，利用无人机的 RTK 功能确保航线准确，喷洒结束后从上风向高空绕回起飞点，每次喷雾结束后使用深色离心管收集喷雾母液以明确喷雾过程中溶液浓度变化情况。

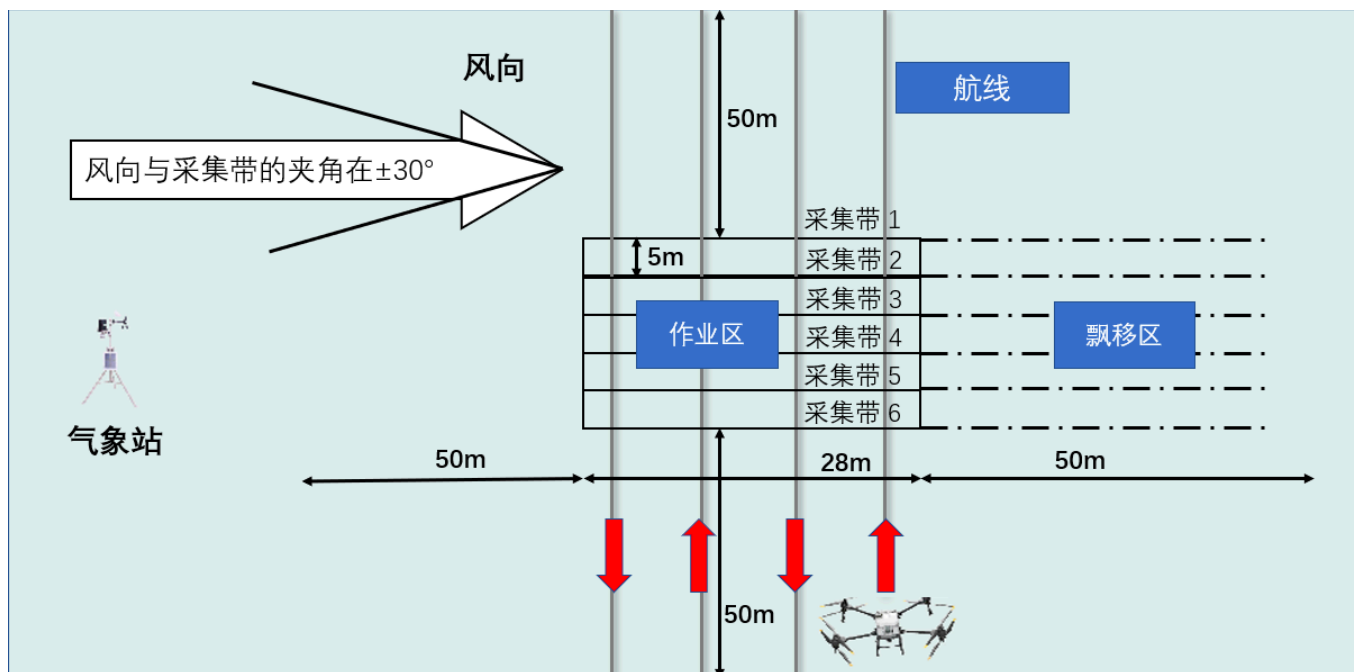


图 16 试验示意图

2.1.2 试验结论

1) 侧风风速对雾滴飘移的影响：侧风风速是影响飘移距离和飘移量的最主要因素，最佳作业条件是侧风风速小于 3.4 m/s（二级风）。

2) 飞行高度对雾滴飘移的影响：当侧风风速在 0–3.4 m/s 之内，飞行高度为 2 m、3 m 和 4 m 时，喷雾雾滴在作业区的沉积量逐渐减少，雾滴分布均匀性变差，雾滴飘移距离也逐渐增加。而当侧风风速大于 3.4 m/s 后，改变作业高度对雾滴沉积和飘移几乎没有影响，侧风风速是主要影响因素。

3) 环境温湿度对飘移的影响：环境温度 15–30℃，侧风风速小于 3.4 m/s 的前提下，空气湿度在 20–80% 之间，湿度对雾滴飘移的影响最为显著，随着环境湿度升高，雾滴飘移量和飘移距离均减少，降低雾滴飘移的最佳环境湿度范围是：环境湿度在 60% 以上。而当环境风速达到 3.4 m/s 以上，改变环境的温湿度对雾滴飘移均无显著影响。

2.2 河北冀州 T40 飘移试验

2.2.1 试验设置

为了探索 T40 的雾滴飘移情况，我们采用三种雾滴收集装置（地面雾滴沉积收集器、地面飘移收集装置、空中飘移收集装置）用于评估雾滴在作业区域及作业下风向区域的分布情况。

地面雾滴沉积收集器：为收集农业无人机作业区域的沉积分布，在农业无人机的作业区域的中布置 PVC 卡承托装置带收集沉积雾滴，沉积雾滴收集带垂直于无人机飞行方向，沉积收集区宽度 30m（3 个喷幅），每组从上风向到下风向边缘共 13 个点，间隔 2.5m，共 3 组，39 个点，使用过程中保证 PVC 卡平面平行于地面。

地面飘移收集装置：为收集农业无人机在下风向地面飘移分布，在农业无人机喷幅边缘下风向 3、5、10、15、20、30、50m 处布置 9 个直径为 15cm 的塑料培养皿，放置于 3 块金属平板上，培养皿处于同一直线上并平行于无人机行进方向，每组测试共 63 个培养皿。

空中飘移收集装置：为收集下风向的空中飘移雾滴，在喷幅边缘下风向 2m 放置 3 组空中飘移收集框架，框架上自距离地面 0.5m 处起，每距离 50cm 布置 1 根长度为 2m 直径为 1.98 mm 的聚四氟乙烯线，直至 5.0m 处；同时在下风向 15m 处放置 3 组 2.0 m × 2.0 m 空中飘移收集框架，同样间隔 50cm 布置聚四氟乙烯线，每组测试共 42 根。聚四氟乙烯线两端用夹子固定至竖直框架上，并绷直以保证无弯曲。

气象站：采用 YG-BX 型便携式田间气象站记录室外飘移试验期间全程风速、风向、温度、湿度，频率 0.2Hz。

荧光仪：日立 F-2700 型荧光分光光度计。其余设备还包括：瓶口分液器、脱色摇床等。

2.2.2 方案及场地

试验场地如图 17 所示布置，飘移测试装置完全垂直于航线，测试过程中开启气象站采集风速和风向。当风速、风向达到要求并且稳定时，通知操控手进行起飞前准备，将配置的 ABF 荧光示踪剂与 OP-10 非离子表面活性剂浓度均为 0.1% 的模拟药液加入药液箱，在各收集装置上布置收集器。

无人机共飞行三个航线，航线间隔 6.5m，使用全自动飞行模式，调用已经设定好的航线进行作业，每个处理进行 3 次重复，确保 54 次有效测试。试验可承受自然侧风参数为：风速范围 1.0–3.0m/s 或 > 3.0m/s，风向垂直于航线 $\pm 30^\circ$ 。试验完成后收集样品避光保存，运送至实验室进行后续检测，每组试验完成后收集不少于 10ml 母液于 50ml 离心管中用于分析沉积量。

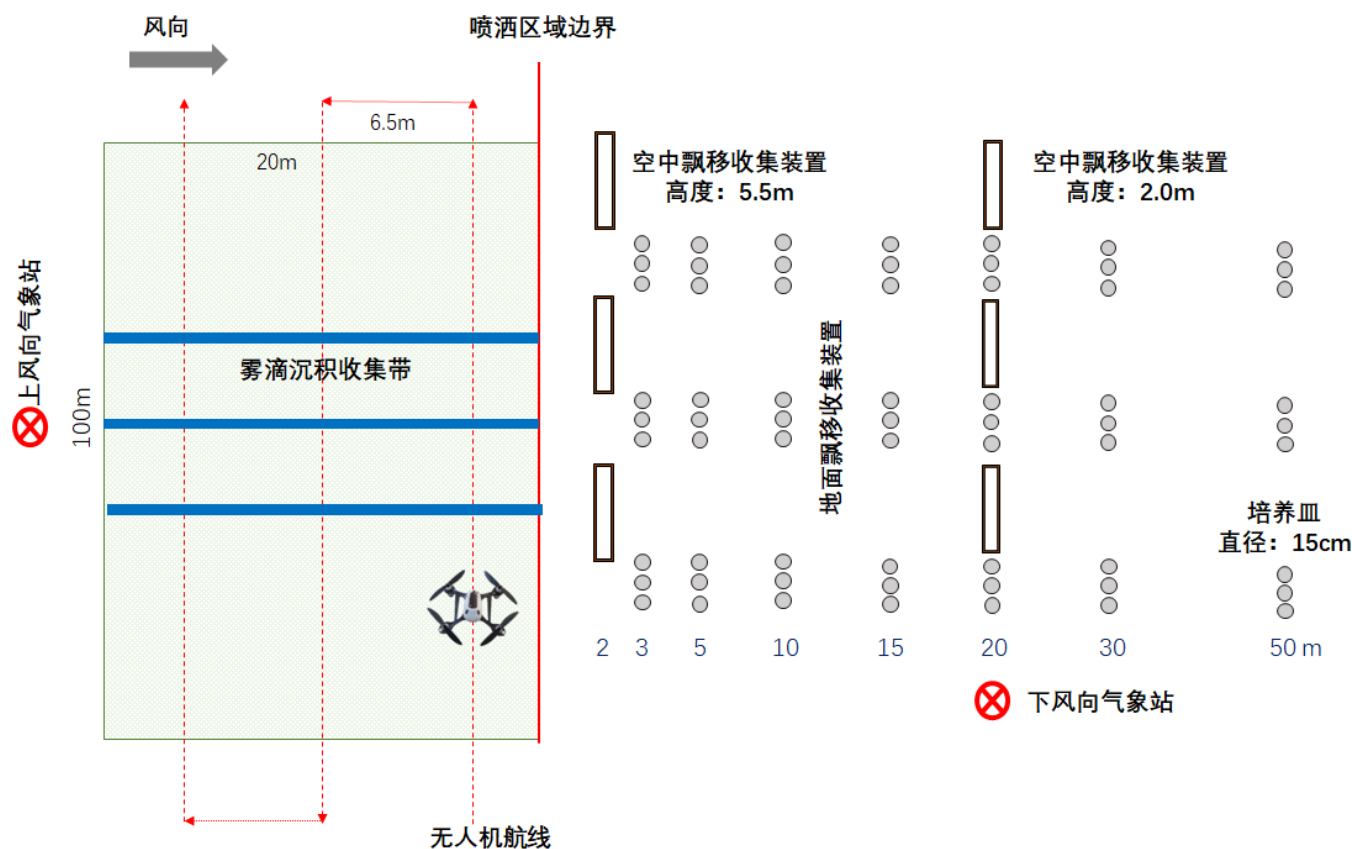


图 17 试验示意图

2.2.3 试验结果与建议

试验期间，环境温度位于 13–29℃ 之间，平均湿度 22–69%，低风速处理组环境风速分布于 0.7–3.4m/s，高风速处理组环境风速分布于 1.9–4.2m/s，有部分重复存在环境风速不满足该处理所需环境风速，但该部分风速在试验过程中占比较低，平均风速仍在试验所要求的风速范围内。

该试验目前在高环境风速（ $\geq 3\text{m/s}$ ）与低环境风速（1–3m/s）条件下进行了对 T40 型号无人机选择三种不同飞行速度；三种喷头转速；三种飞行高度作业参数的雾滴飘移相关测试，共设置了 14 个试验处理组，基于对以上测试结果与分析得到如下建议：

- 低风速环境的不同参数作业时，地面飘移不明显，建议低风速环境下进行作业。
- 高环境风速（ $\geq 3\text{m/s}$ ）条件下，空中飘移率与飞行速度、喷头转速、飞行高度呈正相关关系，选择飞行高度为 1.5m 或喷头低转速可显著降低雾滴飘移比率。
- 农业无人机作业飞行高度是影响雾滴飘移的主要因素，飞行高度为 4m 时，其潜在飘移指数远高于其他处理组，田间植保作业时，应将飞行高度控制在 2–3m 的合理范围内。
- 除个别处理，环境风速从 1–3m/s 增加至 3m/s 以上风速会导致同一位置的空中飘移率增加，高速飞行状态产生的雾滴飘移对风速的改变最敏感，在较大的环境风速条件下，应尽量降低农业无人机作业速度。



图 18 T40 河北飘移测试记录图

3、T40 除草剂试验

在农药药剂中，除草剂是最容易因为飘移产生药害的种类。除草剂飘移一般有两种原因造成，一是在施药过程中风速过大；二是除草剂在气温较高时容易蒸发，气态的除草剂同空气中的水蒸气结合，随风飘移到作物上或在温差的作用下气态除草剂重新在植物叶面凝结。

因此，除了飘移试验外，我们还专门开展了除草剂的飘移试验。该试验针对农业无人机 T40 进行的除草剂喷施作业场景模拟展开，研究不同风速条件下除草剂的喷雾飘移对非靶标区敏感作物油菜的生长的影响。

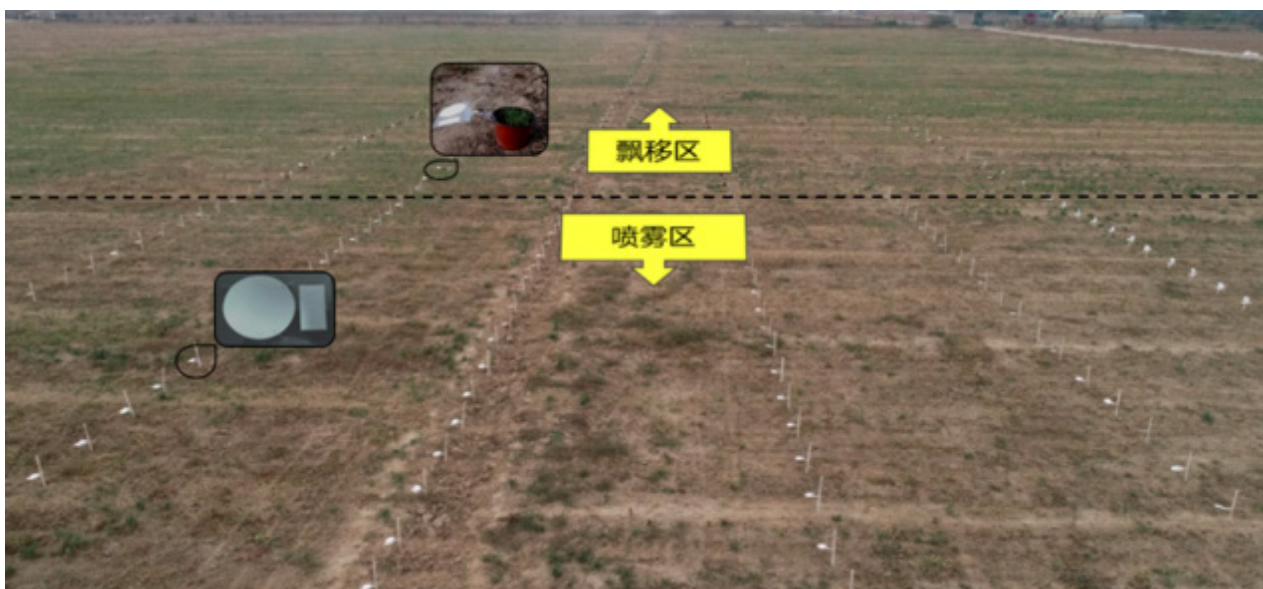


图 19 敏感作物及测试卡布置示意图

（三）仿真模型探索

随着农业无人机在精细农业上的应用日益增长，雾滴沉积飘移的仿真模拟成为喷洒性能的重要预测手段，可大幅节省试验成本和时间周期。通过计算无人机旋翼运动产生的非定常下洗流场，求解离散相颗粒的运动轨迹，可预测药液雾滴运动受旋翼翼尖涡结构演化以及地面作物冠层及旋翼下洗气流的相互作用影响下的沉积飘移规律。通过引入蒸发模型、冠层效应等，可进一步提高模拟精细程度。

目前主要模型研究手段包括：无粘模型（AGDISP 模型、CHARM 模型等）、有限体积法、有限差分法以及格子玻尔兹曼模型等。但当前已有的研究多针对于传统固定翼和单旋翼无人机，且由于多旋翼风场的复杂性，仿真预测的精度有限。未来如何更加准确地预测雾滴在无人机旋翼风场作用下的沉积与飘移情况，针对性改善农业无人机施药效果，具有重要的意义。



T40 果树作业拍摄图

四、新场景应用分享

（一）病虫害防控

马尔代夫作为世界闻名的旅游胜地，这里的度假村却常年被毛毛虫 (*Euproctis fraterna*) 困扰。毛毛虫的刚毛含有一种毒素，在与人的皮肤接触后会造成严重的皮疹和水泡，严重的情况需要就医，度假村需设置专门的医务室来为客人提供就医。

传统的驱虫方式是由当地的工作人员用手动式喷杆机向树木喷洒杀虫剂，这种喷杆机不仅重量大，难以携带和移动，作业效率也非常低。由于无法精准杀虫，从地面喷洒会耗费数百升的杀虫剂。有些度假村在毛毛虫灾害严重时不得不砍伐树木，由于这里大多数岛屿都是珊瑚岛，树木的根系对岛屿的稳定性起到很大作用，砍伐树木对生态会造成糟糕影响。



图 20 当地进行地面喷洒

与人工喷洒相比，使用大疆农业无人机可以更有效、精准地进行喷洒。诺尔斯博士带领团队在马尔代夫使用 T30 农业无人机进行精准喷洒。为了达到更好的杀虫效果，应当在更早的阶段进行对树木进行监控，“早发现，早治疗”。这就需要用到多光谱来监测虫害，一旦识别到风险，对树木进行精准点喷。这样不仅不会影响到没有受灾的树木，也可以把潜在的危害扼杀在初期。



图 21 大疆农业无人机在马尔代夫作业

这种用无人机的多光谱监测 + 精准喷洒的方案受到了当地游客的欢迎，因为它不仅解决了问题，也更符合当地游客和度假村的环境保护意识。

未来，这种方法可能会被推广到更多的国家和地区，来帮助人们进行病虫害的防控。

（二）农艺与无人机应用的结合

农业无人机和农艺的结合，是在农业上的另一个趋势，传统的农艺随着新科技的到来而改变。以葡萄种植为例，因为葡萄传统的种植方式是使用水平的网架栽培，先打水泥桩，拉上网架，让葡萄依附网爬藤自然生长。在南美地区，葡萄甚至会形成类似“顶棚”的生长结构。

对于传统的葡萄种植，打药时多采取人工背负式喷药或地面弥雾机喷药。在枝叶繁茂的时候人工打药，打药人员暴露在药物环境中，容易造成打药人员中毒。对于传统的葡萄种植，打药时多采取人工背负式喷药或地面弥雾机喷药。在枝叶繁茂的时候人工打药，打药人员暴露在药物环境中，容易造成打药人员中毒。

在中国，很多葡萄园采用新的葡萄栽培技术，将葡萄枝修剪为更易于无人机作业的形状。这种葡萄枝被修剪为“丫”字型，在 3 月份枝叶发芽后进行修剪，一棵树仅预保留 15-16 串葡萄。农业无人机在葡萄的生长周期会进行三次打药，第一次打药杀卵、杀虫、杀菌；第二次打药杀虫和杀菌，第三次打药杀虫和杀菌，在三次打药后在葡萄上搭棚子。搭棚后会使用弥雾机给葡萄打一次营养剂，不涉及农药药剂。

以 40 亩的葡萄园为例，一般弥雾机喷药作业一次需要 2 个小时，无人机仅需不到 30 分钟即可完成作业。



图 22 智利的传统农艺葡萄园



图 23 河南的葡萄园

（三）智慧农业典型案例分享

1. 农业无人机在马铃薯种植过程的应用和发展

世界有 158 个国家和地区种植马铃薯，其中，主要集中在亚洲和欧洲。世界马铃薯种植面积多的前 5 个国家分别是中国、俄罗斯、印度、乌克兰及孟加拉国；马铃薯单产水平最高的前 5 个国家分别是新西兰、美国、比利时、荷兰和法国；马铃薯产量前 5 大国家分别是中国、印度、俄罗斯、乌克兰和美国。

据 FAO 统计，中国是目前最大的马铃薯生产国。在中国，马铃薯有 400 多年的种植历史。到 2020 年，马铃薯种植面积扩大到 1 亿亩以上。从空间布局上，根据优势区域布局规划，中国马铃薯分为 4 个优势区：北方一作区、中原两作区、南方两作区、西南混作区。其中北方一作区占种植总面积的 50%，包括东北地区的黑龙江省，吉林省及辽宁省的大部；华北地区的河北、山西、陕西北部，内蒙古自治区；西北地区的宁夏，甘肃，青海的东部和新疆的天山以北，气候特点为日照较长，昼夜温差大，结薯期在 7-8 月，高湿凉爽，是重要的种薯和商品薯种植基地。同时，个体种植规模大，种植水平、机械化程度和欧美发达国家相当，亩均单产在两吨以上，在 2008 年前就实现了全程机械化管理。

马铃薯的主要病害包括晚疫病、早疫病、病毒病和环腐病，全程管理施药在 8-12 次不等，其中晚疫病对马铃薯的叶片、茎秆和薯块均有侵害，是典型的流行病，条件适宜迅速爆发开始发病到全田枯死不到半月，要求高湿凉爽气候，空气相对湿度不低于 85%，为毁灭性病害。早疫病侵染部位和晚疫病一样，但危害程度弱于晚疫病。北方一作区，随着连续多年的种植，病源基数大，晚疫病防治压力越来越大，加之特殊的气候条件，在马铃薯植株封垄，进入结薯膨大期后，天气也进入了雨水期，种植集中程度高，且地势以丘陵缓坡为主，容易造成积水，加上冷凉高湿的自然条件极易诱发晚疫病的快速传播。



图 24 马铃薯田的打药车作业

传统的地面打药器械以拖挂式打药机或者自走式打药车为主，降雨之后为晚疫病等病害防治的最佳时期，但受限于田间泥泞的条件，地面打药器械在降雨之后不能立即下田，需要对田块进行排水或晾干后才可下田作业，此时往往已经错过最佳防治时期，晚疫病已发生危害传播。同时，作业的地面器械往往会变成病菌的传播工作，将病菌从发病中心柱带到更大的区域去。另外，因为种植管理的需求，北方一作区往往会留出地面打药器械的作业道，普遍为每 11 垄留出 1 垄作业道，该作业道种植的马铃薯全程都会被地面机具挤压破坏，不仅影响结薯大小，而且因时常积水，变成晚疫病等病害的发生的温床，薯块也会带菌，容易发生晚疫病在贮藏期间传播腐烂。



图 25 马铃薯田的车辆作业垄道

大疆农业在 2017 年开始尝试将农业无人机在马铃薯上应用，前期受制载荷和风场大小，作业效果一般，应用发展面积较小，随着 2019 年后，载重的加大，风场穿透性的提升，北方一作区的使用农业无人机作业的种植户和面积越来越多，总结起来有以下优势：

- 1. 突击性强，雨后即可进地执行打药任务，可夜间作业；
- 2. 无人机可实现在农田里等速度、等高度、等行距、等流量进行喷洒作业，不重喷，不漏喷，更均匀，更高效；
- 3. 无人机作业不受地形限制，仿地飞行模式可在各种复杂地块进行作业；
- 4. 无人机喷洒雾化好，作物能更快吸收农药有效成分，在使用无人机植保时可以提供农药利用率，减少农药掉落地面浪费的情况；
- 5. 无人机作业不压地，可有效避免大型机械对作物的挤压破坏，从而达到增产的作用，也可避免大型机械对管道的损坏及避免病菌通过机械传播；

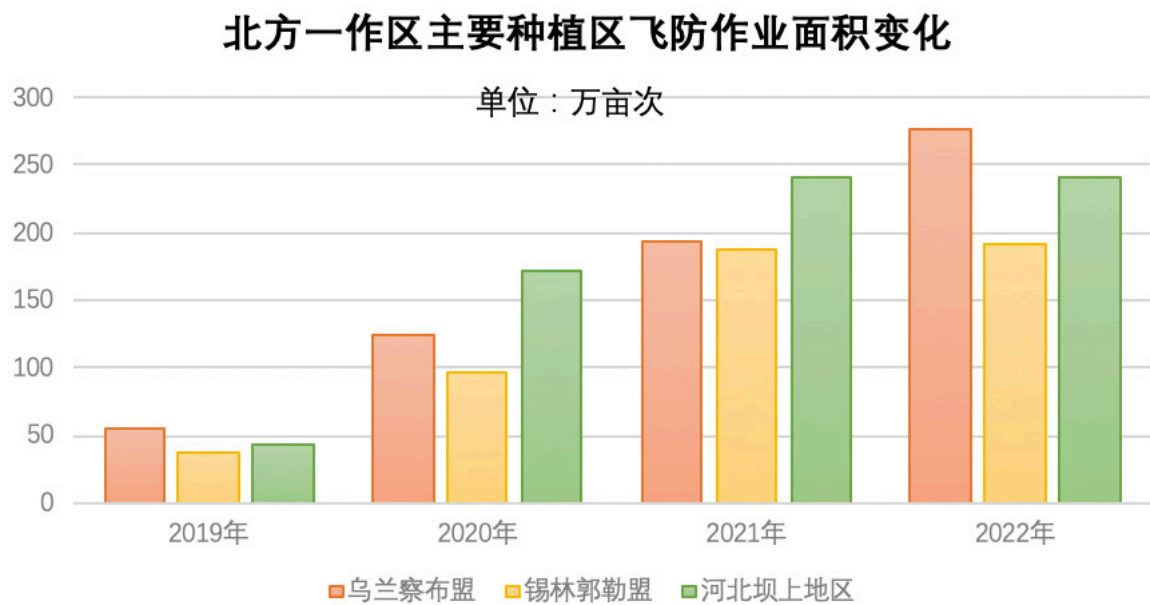


图 26 北方一区主要种植区飞防作业面积变化

在使用农业无人机对马铃薯进行植保飞防的基础上，结合高分辨率多光谱巡田无人机，还可以实现马铃薯的地块平整监测、出苗识别、病虫害监测、精准变量营养液、和杀虫剂精准点喷作业。

地块不平整会造成灌溉、水肥分布不均匀，增加管理难度。通过无人机对马铃薯种植地块进行航测，可以生成地块的数字高程模型，测量地块内高差、发现局部高地、洼地等，及时整改。或对整地工程进行验收，确保土地平整度达到验收标准。

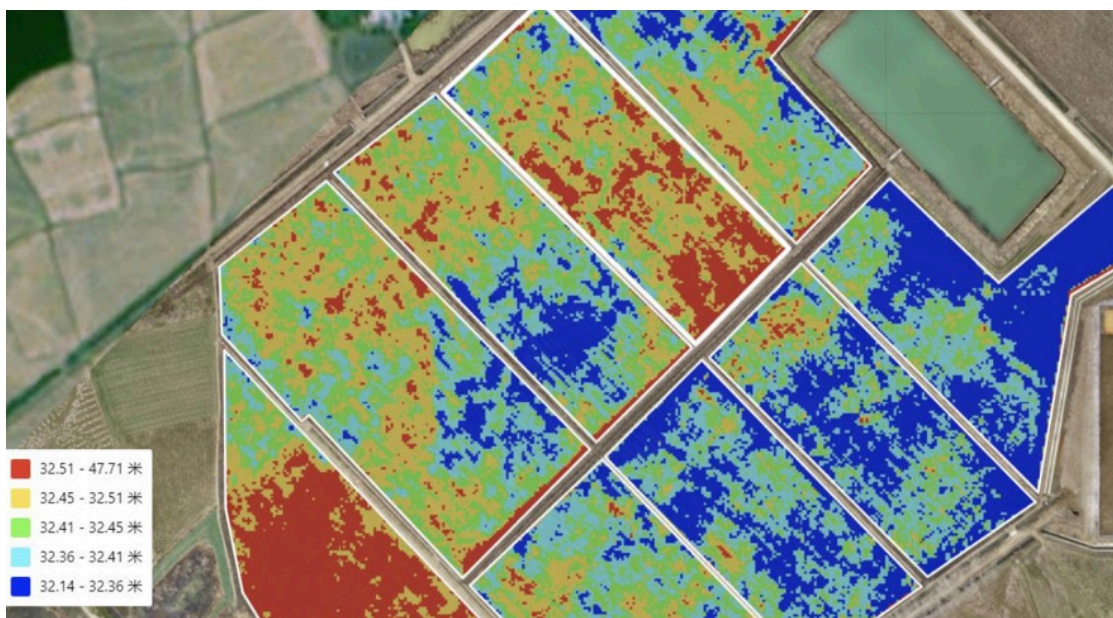


图 27 多光谱无人机绘制的田地处方图

马铃薯的病虫害巡查通常依靠农艺师巡田，在田块内挑选一些样本点进行抽查。这种方法由于巡查到的面积有限，比较容易遗漏问题点。此外人工巡田靠行走，效率较低，且走动过程中也容易造成病虫传播。

相反，无人机巡田可以无接触式拍摄马铃薯冠层，飞行拍摄速度远高于人工巡田，并且能监测到全田，大大提高了早期发现病症的概率。对于一些高风险病害，如晚疫病和早疫病，可以早发现、早防治，减少产量损失。无人机发现病虫害的方法为设置全田自动飞行和拍摄航线，对田间进行高密度采样拍照，并把拍摄到的照片输入到病虫害识别 AI 模型，从而自动监测病虫害，并把病虫害位置和等级通过软件呈现给管理人员。

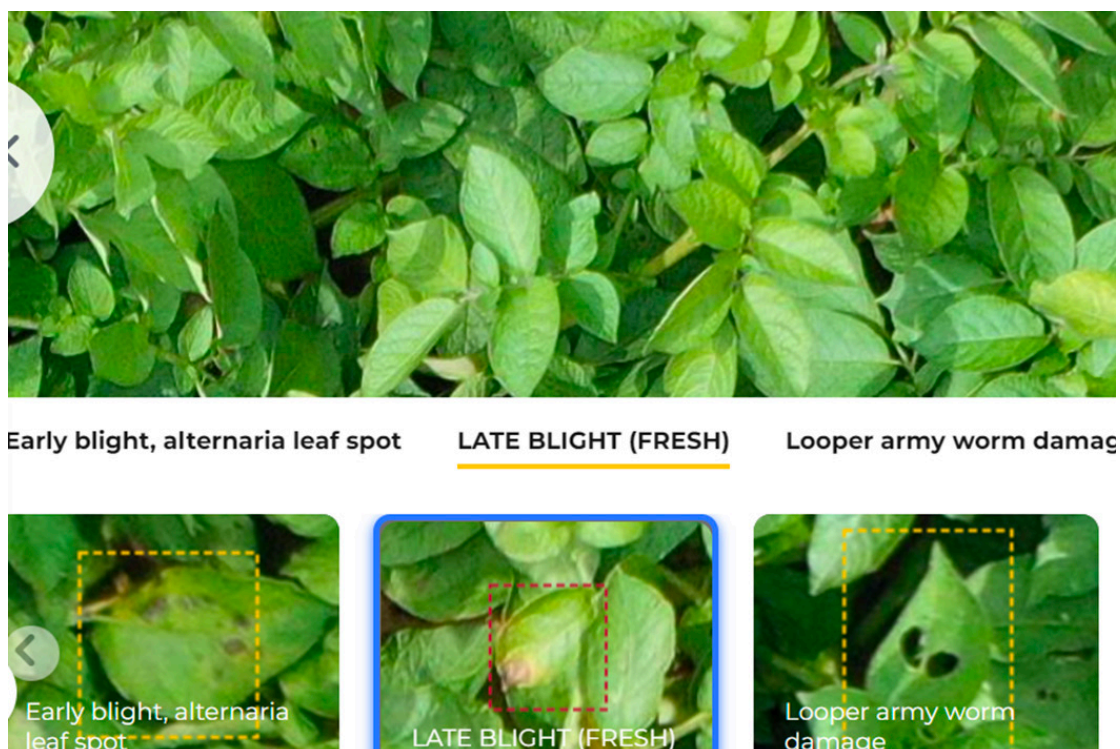


图 28 无人机巡田拍摄的病害监测照片

结合无人机识别到的病虫害发生热点，可以生成点喷处方图，下发给农业无人机进行点喷作业，相比传统的全田喷洒做法，在达到有效防治的情况下，也可以大量节省虫害。2022 年美国华盛顿州的马铃薯种植大户利用大疆御 3 多光谱无人机和 AgroScout^[6] 的病虫害监测和处方图软件功能，对科罗拉多甲壳虫进行监测和点喷，60 公顷的田块，通过点喷，节省虫药 80%，并达到了一样的防治效果。

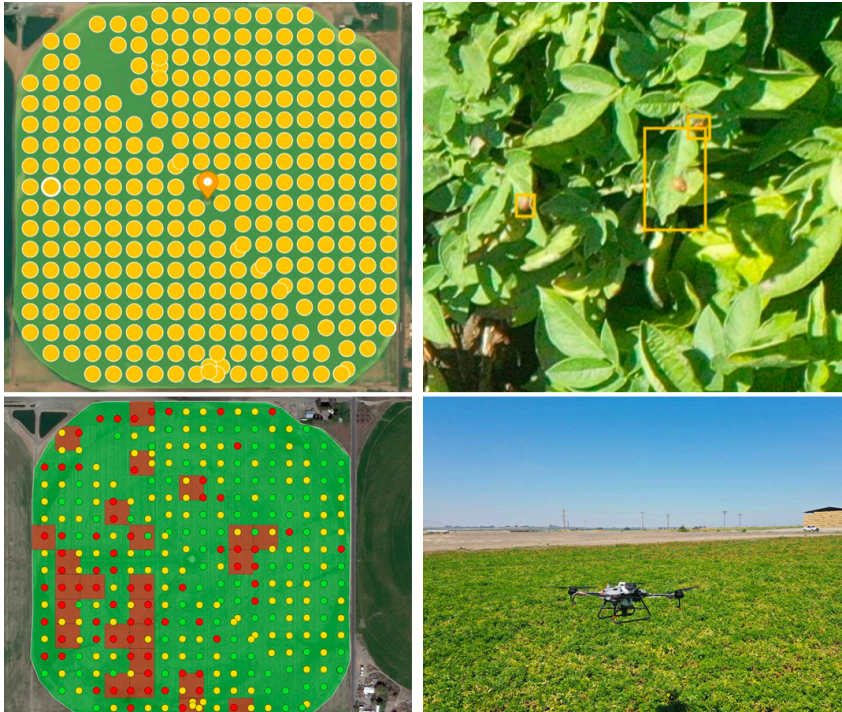
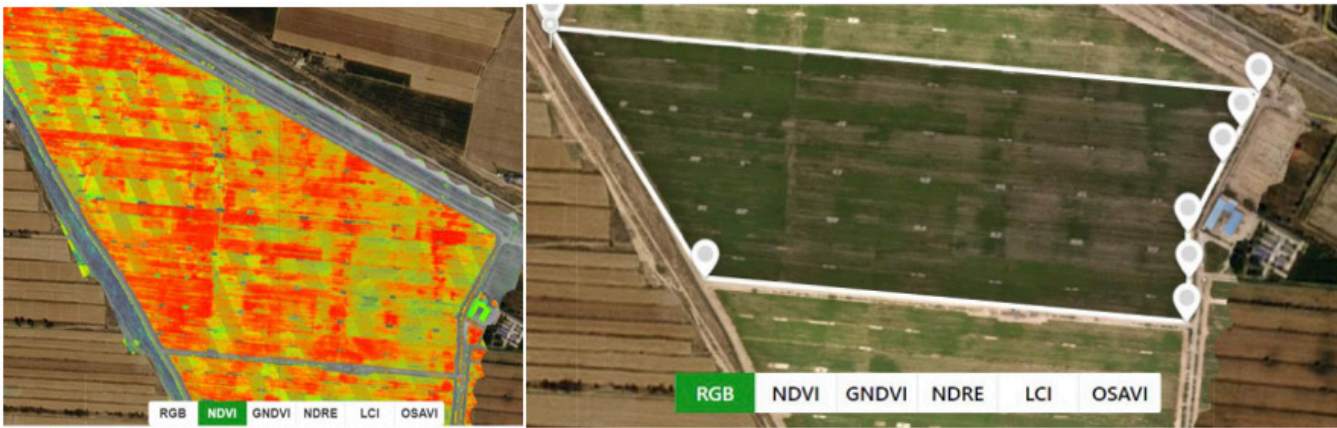


图 29 御 3 多光谱无人机生成的点喷处方图

除了病虫害精准点喷，无人机也可对马铃薯整体长势进行监测，并进行营养液的变量喷洒。通过多光谱无人机进行航测，可以生成全田植被指数图，如 NDVI（归一化植被指数），反映全田长势和田间差异。基于 NDVI 指数，可以生成营养液变量处方图，针对性用药，调节长势差异，节省成本的同时增加产量。



[6] 见: <https://agro-scout.com/>

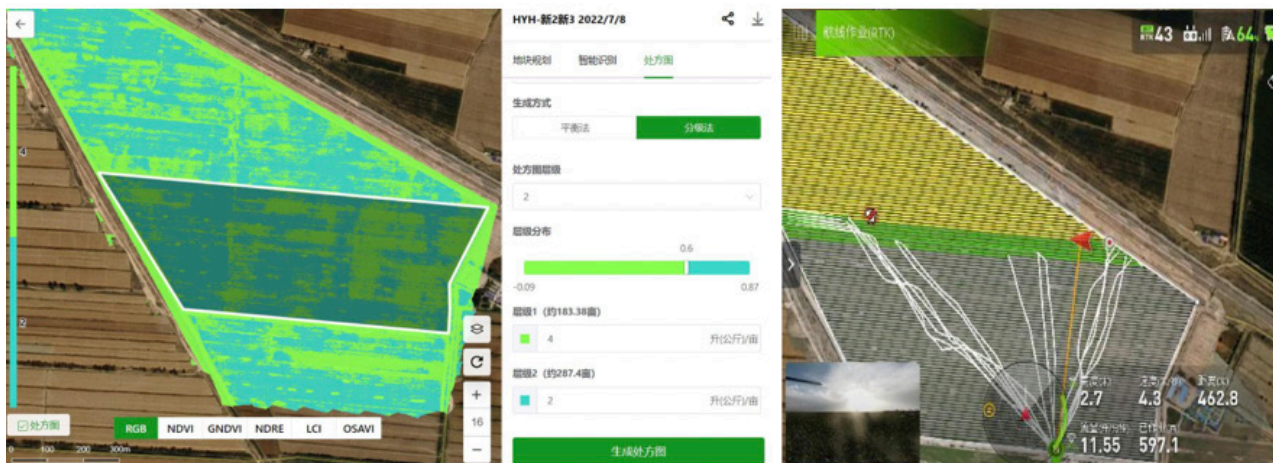


图 30 全田植被指数图和 NDVI 处方图

2. 水稻精准农业

在日本最富盛名的当属“越光米”，但这种大米易倒伏、易患病，产量波动大，而“星印大米”作为“越光米”的“平替”，抗病性强，产量高，适合直播栽培。当地食客们认为煮熟“星印大米”的味道与“越光米”非常相似，口感蓬松软糯，且价格友好，被许多日本餐厅和食品厂家作为原料所使用。

“星印大米”的重要产地之一是位于日本中部的岐阜县海津市海津町。当地农产品年销售额达 52 亿日元左右，其中稻米销售额就占了四分之一。在这里种植“星印水稻”的主体除个人农户外，还有农业企业。这里单田块面积大，人们习惯性使用低含量尿素化肥，单次播撒量较大，在水稻种植过程中容易出现以下几个痛点：

1. 大规模均量播撒，对于长势较好的部分容易出现过量施肥，导致水稻烧苗。
2. 当地会采用无人直升机进行播撒，但其变量作业依赖卫星影像，无法实现自动播撒作业，播撒精度较低。
3. 到了水稻生长后期，如采用传统地面农机进行追肥，会对作物产生较高的作业损耗。
4. 传统农机在雨后难以进入田地中进行作业。



图 31 日本“星印大米”水稻



图 32 使用大疆农业无人机作业的日本植保队

为解决以上种植痛点，大疆农业与日本洋马无人机植保队在 2022 年 7 月 -11 月合作开展了一项可变量施肥项目。通过无人机精准追肥，在每亩节省 417 日元肥料成本的情况下，可实现每亩增产 128 kg。2022 年日本大米的平均参考价格是 400 日元 /kg，据此计算，每亩降本及增产总额可达到 5.16 万日元 / 亩（2618 人民币 / 亩）。本次项目的过程主要分为以下几个步骤：航测作图，图片处理及重建，以及无人机精准追肥。

a. 大疆多光谱无人机及 T30 现身变量追肥实验，解决日本水稻种植痛点

通过设置两块面积相似的变量追肥田块和定量追肥田块，DJI 与日本洋马无人直升机植保队合作开展了一项实验，使用 DJI 智慧农业方案，测试多光谱航测和无人机变量施肥效果，对比定量田块和变量对照组田块的施肥量和作物产量。具体步骤为：通过大疆多光谱无人机精灵 4 进行航测，使用大疆智图在现场生成农田处方图，再由洋马植保队使用 DJI T30 农业无人机完成肥料播撒。



图 33 多光谱采集重建作业

b. 变量追肥过程一览

大疆农业团队设置了两块大小相近的田地（变量施肥田块面积为 3.11 ha，定量施肥田块面积为 3.43 ha，）均使用 MIX20，一种氮含量 20% 的复合肥料，施肥方法为空散追肥，作业高度 2 米，播幅 7 米，飞行速度 18-22 km/h。首先使用大疆精灵 4 进行多光谱图片采集，上传至大疆智图进行图片重建，完成航线规划。

完成平台重建图片并规划航线后，通过大疆 T30 农业无人机分别对两块田地实施肥料喷洒，以下是 T30 播撒两块田地的作业参数。对于变量追肥田，在长势较好的设定追肥量 100 L/ha，长势较差的区域设定为 125 L/ha，长势平均的区域设定为 100L/ha。对于定量追肥田，全田等量喷洒 100L/ha。



图 34 多光谱无人机航测与大疆智图建图

表 1 变量追肥田喷洒参数

最大亩用量	长势较好区域: 75 kg/ha
	长势一般区域: 100 kg/ha
	长势较差区域: 125 kg/ha
飞行速度	13.8 公里/小时
甩盘转速	700 rev/min
飞行高度	2 米

表 2 定量追肥田喷洒参数

最大亩用量	100.1 kg/ha
飞行速度	25.2 km/h
甩盘转速	700 rev/min
飞行高度	2 米

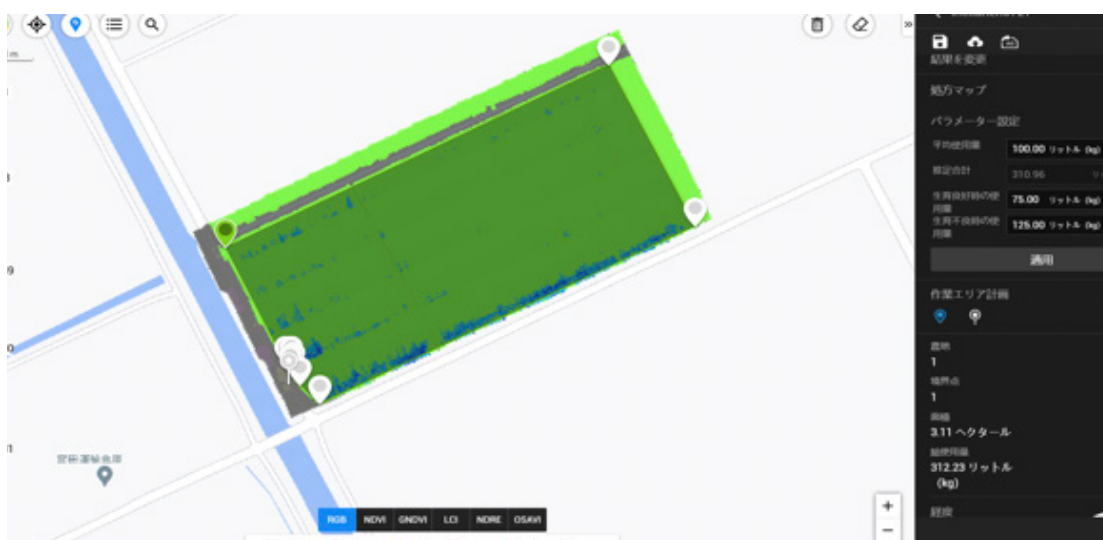


图 35 变量追肥田图



图 36 定量追肥图

从最初的处方图可看出，变量施肥田块的长势和均一性不如定量施肥田块。

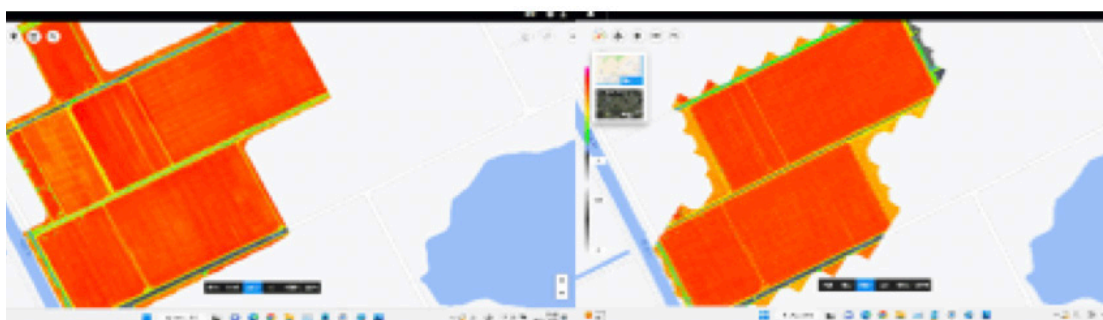


图 37 左：变量追肥田，右：定量追肥田

通过两块田地肥料的使用量、成本及增产数据可见，变量追肥田使用的肥料量仅为定量追肥田的 81%，但产量为定量田的 108%。

表 3 多项指数对比表

参数	变量追肥田	定量追肥田
追肥量	302.8	371.9
肥料成本	22296 日元/ha	24829 日元/ha
产量	31591KG → 10157.88kg/ha	32176 KG → 9380.76kg/ha
收割日期	2022.9.28	2022.9.29

原本基础较差的变量田 经过变量施肥后，产量超过了原本长势较好的定量施肥田。

从长势情况来看，两周后，通过可见光、NDVI 及 GNDVI 图，都能看到稻田色块变得更加均匀，反映出作物长势差异减小。背后的原因，是因为 P4M 精准识别了水稻长势正常与欠佳的部分，在此基础上精准追肥，使整片稻田长势趋于平均，实现省肥增产。

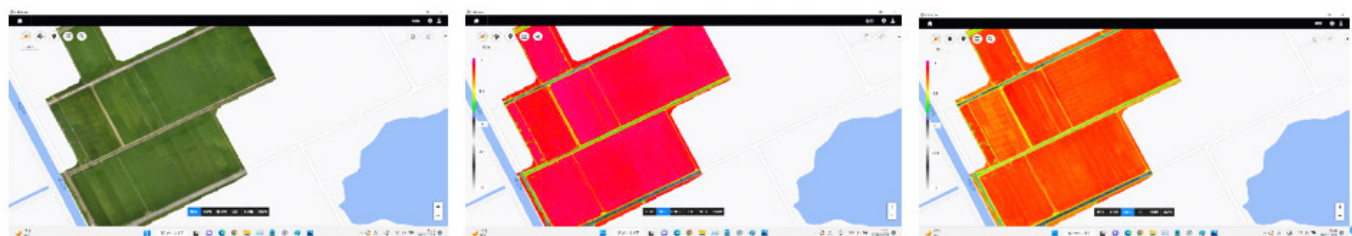


图 38 作业前

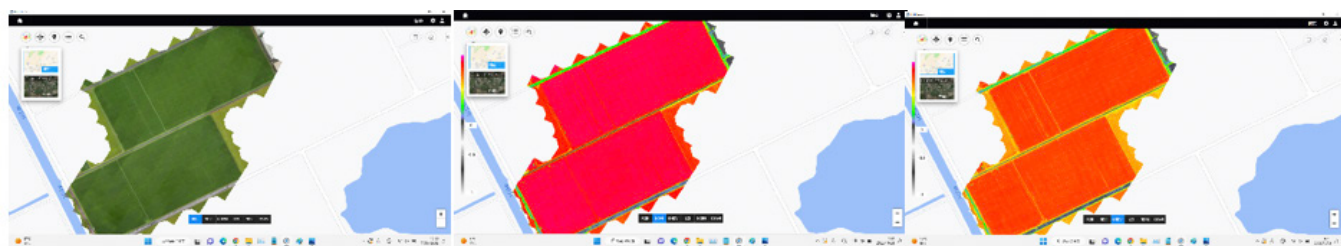


图 39 作业后（2 周后）

从经济角度衡量，无人机可变量追肥的实际肥料使用量比预计要低，在节省肥料成本 417 日元 / 亩的情况下，可实现增产 128kg / 亩，提升了肥料利用效率，避免了过量施肥带来的损失，用最少的成本提升了产量。

用更少的化肥达成更高的产量看似不可能，但在精准农业理念的指引下，降本增效成为了可能。这不是一个无端的空想，背后有实在的数据和越来越多的成功案例作为支撑。

使用无人机对稻田进行液体肥料喷洒，不仅能节省肥料，还能避免过量施肥带来的损失。此外，相较地面机械，目前日本飞防手动作业用户比例仍有 45% 以上，对于老年化日益严重的日本而言，无人机追肥全程自动操作节省人力，让使用者可以摆脱对体力条件的影响。同时也如前文提到的，有效解决了传统农机在追肥作业中导致的作业损耗、雨后作业范围受限等问题。

DJI

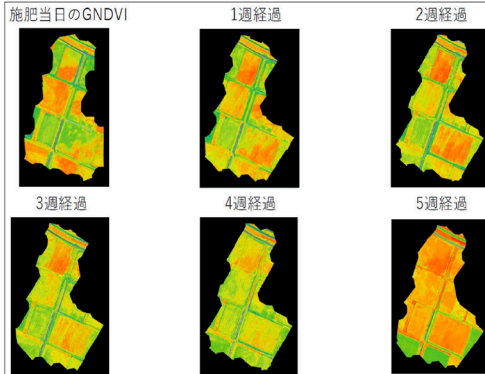
水稻可変施肥の実証開始

P4M×T10、T30

完全自動航行で可変散布

「可変施肥」とは、リモートセンシングにより一枚の圃場の作物状態を見える化し、施肥量を調整しながら散布することで生育ムラを均一化し、品質向上と収量向上を図る技術だ。必要のない肥料を抑えられるため、肥料高騰対策としても注目されている。DJI JAPANは昨年、肥料散布に適した農業ドローンAGRAS T10 T30を発売。今年からセンシング用ドローンを活用した可変施肥の試験を開始。同社のエンジニア・朱云平氏にその取り組みについて聞いた。

【DJIの可変施肥への「取り組み」】リモートセンシング技術は既に中国など下、P4Mを用いた水



では活用が進み、ジャガイモの精密可変施肥やトウモロコシの精密除草「P4Mによる可変施肥」P4Mは、異なる植物に対して適切な植生指数を選択して分析できる。RGB（可視光）と青・緑・赤・レッドエッジ・近赤外線（6つの特殊カメラ）を搭載しており、農業用の画像収集が効率的に行える。

センシングでは、マップピン精度を上げるために、RTK測位を設定する。飛行計画アプリGS PROを用いて飛行経路を設定し、P4Mで広範囲に画像を収集する。続いて、作物の健康状態を正確に把握するため、撮影した画像データをパソコンの「DJI TERRA 2DマップでRGB、NDVI、GNDVIなど5つの植生指数を生成する。

そして可変施肥を行うための処方マップでは、平均使用量、最大使用量、最小使用量を設定すると、ソフトウェアがNDVI植生指数値に基づいて農地全体の肥料使用量を削減。また、ドローンによる可変施肥によって、これまで衛星画像で処方マップを作成していた農業法人では、天候の影響で作業を延期することもあったが、ドローンでは天候に関係なく作業がで



P4Mを手に、エンジニアの朱氏

を自動で調整してくれ。更に、飛行ルートなどの作業タスクを保存したSDカードを農業ドローンAGRAS T10 T30の導入コストが高く、測量業者に依頼するしかない、といったユーザーの声もきかれた。

また、可変施肥後のGNDVI画像（窒素吸収量を表す）では、徐々に赤い色の部分が増え、均一化していくことが確認できた。（※図1）今後、収穫後の収益や収量の結果を集計し、精密農業の実現に取り組んでいく。

T30 散布

耐腐

DJI JAPANは2021年に高性能農業散布用ドローンAGRAS

图 40 日本报纸的报道

3. 精准喷洒在大豆的应用

农业可能曾经是效率最低的行业，但创新科技的应用正在改变行业趋势。杂草管理是农民必须要面对的工作困扰，美国中西部的一个农场采用大疆无人机和 Agremo AI 杂草检测，做出了点喷方案，精准防治杂草^[7]。

研究数据表明，在常规的玉米大豆轮作农场，控制“自生玉米”可以分别防止单个自生玉米苗和丛生的自生玉米苗 15% 和 60% 的产量损失。同时，农民可通过选择针对性处理替代全面喷洒来节省资金。通过使用无人机图像和 Agremo 的杂草检测功能，在这个占地 64 英亩的大豆农场中发现了 3.75 英亩的个体自生玉米和 6 英亩的玉米丛生侵扰。农民随后操作大疆的喷洒无人机 T30，当场处理这些自生玉米。结果，他只使用了 60% 的除草剂，庄稼也没有需要喷药车进入田块而遭受损失。最终，农民的收入增加了 68.39%。

这些结果验证了“无人机制图 + 人工智能分析 + 点喷”农业精准治理的技术可行性和经济回报。

玉米和大豆是美国许多地区的标准轮作作物，然而，收获期间掉落的玉米粒可能在下一季发芽，并与大豆竞争。自生玉米苗会剥夺大豆的营养、阳光和水分，并降低产量。自生玉米比任何其他杂草都更具危害性，而且更多更大的植物增加了大豆产量损失。每 10 平方英尺种植一株自生玉米可使产量降低 8% 至 9%，每平方英尺种植一株玉米可使产量降低 71%。

如果种植者允许自生种植的玉米自由生长，他们就需要更多的除草剂来进行控制。自生种植的玉米还会吸引根虫，这可能成为下一季玉米作物的问题。如果不使用额外的除草剂处理，抗草甘膦的自生玉米不能被用于大豆杂草的控制，并且抗性增强的概率会增加。



图 41 大豆田中的个体自生玉米

[7] 见: <https://www.agremo.com/improving-soybean-yield-with-spot-weed-treatment/>

传统上，种植者使用配备喷雾器的拖拉机进行全田出苗后喷洒，增加了处理成本。此外，拖拉机的移动导致土壤板结，降低了每英亩的产量。由于有必要朝相反的方向行驶以避免喷雾的阴影并改善杂草周围和杂草上的除草剂施用，因此种植者用拖拉机越多，作物遭受的损害越大。

3.1 DJI 和 Agremo 如何应对挑战：

首先用多光谱无人机进行探测，然后用 T30 农业无人机进行喷洒，这样一套完整的解决方案不仅可以避免因土壤板结和作物破坏造成的损失，还可以利用喷洒无人机的点喷能力精准治理杂草侵扰。DJI 的合作伙伴 Agremo^[8] 在这种精确喷洒解决方案中提供了一个关键功能——杂草检测分析。该分析工具可以精确识别杂草的确切位置、范围和程度，并利用分析得出的结果制作农业无人机喷洒地图，使农业无人机能够在除草剂的位置进行可变量喷洒 (VDS) 应用。这种除草剂的喷洒只覆盖杂草点，从而取代整个农场的喷洒。



图 42 DJI Phantom 4 多光谱无人机

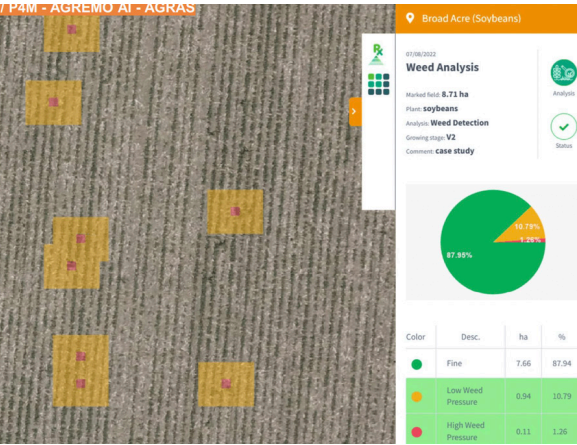


图 43 自生玉米杂草检测结果



图 44 用于喷洒除草剂的 DJI T30 AGRAS 无人机

[8] 见: <https://www.agremo.com/>

3.2 农民从 Agremo 和 DJI 服务中获益

一位农民同意试用 VDS 应用程序来帮助验证新的 Agremo-DJI 技术。在总共 65 英亩的农田中，农民有 3.75 英亩的单粒玉米和 6 英亩的丛生玉米，如果农民没有控制自生玉米，他们将分别损失 15% 和 60% 的产量（见表 4）。

表 4：不控制自生玉米的情况下，杂草的侵扰区域和可能造成的损失。

杂草	杂草面积（英亩）	减产%	大豆价格（每蒲式耳）	产量损失(\$)
单粒玉米	3.75	15%	15 美元	422 美元
丛生玉米	6	60%	15 美元	2,700 美元
总产量损失				3,122 美元
每英亩平均产量损失				48 美元

预计农场产量为每英亩 50 蒲式耳^[9]，售价为每蒲式耳 15 美元。这位农民的总损失为 3122 美元，单个玉米损失 422 美元，玉米结块损失 2700 美元。那将是每英亩 48 美元的损失。

借助 Agremo 和 DJI 的新技术，该农民仅处理了 9.75 英亩土地，而不是采用全喷处理整个农场，从而节省了大量资金。因此，农民通过处理作物获得的产量增加并不是新技术的唯一好处。

3.3 投资回报：

使用现场处理可以通过两种方式提高农民的投资回报率：

1. 减少除草剂处理所需的量和成本。
2. 消除因行车造成的农作物损失。

表 5：全面喷洒和 Agremo-DJI 处理成本的比较表

喷洒	面积（英亩）	每英亩除草剂成本	行车损失的产量	不喷洒的产量损失	杂草管理成本	利润	每亩利润
全面喷洒	65	7.00美元	15.00美元	3,122美元	1,430美元	1,692美元	26美元
AGREMO & DJI AGRAS	65	4.20美元	0.00美元	3,122美元	273美元	2,849美元	44美元

[9] 蒲式耳（英语：bushel），又称英斗，是英制的容量及重量单位，于英国及美国通用，主要用于量度干货，尤其是农产品的重量。通常 1 蒲式耳等于 8 加仑（约 36.37 公升），但不同的农产品对蒲式耳的定义各有不同。在农产品的美国期货市场上，会使用“美分 / 蒲式耳”作为价格单位。见：<https://zh.wikipedia.org/zh-hans/%E8%92%B2%E5%BC%8F%E8%80%B3>

以每英亩 7 美元的价格对整个田地进行全面喷洒将使农民花费 455 美元，而由于驾驶造成的土壤压实造成的产量损失将达到 975 美元（或每英亩 15 美元）。因此，喷洒农户的总成本为 1430 美元。

AGRAS 只喷洒 Agremo AI 识别的那些地方，因此农民只需花费 60% 的除草剂。化学品的成本仅为每英亩 4.20 美元或整个杂草管理成本为 273 美元。此外，由于没有因驾驶造成的农作物损失，因此产量更高。因此，他们从现场处理中获得的投资回报率明显高于从全喷处理中获得的投资回报率。

Agremo-DJI 现场处理每英亩可节省 17.80 美元，农民的投资回报率比全喷处理高 68.39%，这是一条难以超越的差距。

（四）播撒案例

1. 喂养小龙虾

小龙虾养殖过程中最费时费力的就是喂饲料的过程。小龙虾日摄食量较大，每天需投喂饲料量达到小龙虾体重的 5%–10%，在生长最旺盛的季节，每天每亩投喂量可达 4 公斤。

小龙虾一般每天投喂两次饲料，投喂时间分别为上午和傍晚；早春和晚秋水温较低时，只需每天下午投喂一次。



图 45 小龙虾饲料



图 46 传统投喂方式

传统的投喂方式主要是人工行走在虾田中或者划船进入虾田中喂料，每小时只能撒 30 亩左右。这样的方式，劳动强度大，而且撒得不均匀。

T 系列播撒系统 2.0 上市后，各地养殖户纷纷购置来给自己家的虾田撒饲料。省时省力还省钱。

浙江方先生 4 小时撒完 1000 亩：

方先生家住浙江省绍兴市，有 4 年的小龙虾养殖经验，是远近闻名的小龙虾养殖大户。给小龙虾撒饲料一直是件让他头疼的事情，以往他都是请人工给自己家的 1000 亩虾稻田撒饲料，每天需要请 10 个人忙活一下午才能完成作业。在水稻种植季节，撒饲料速度更慢，还容易踩坏水稻。耗费大量人工成本不说，在农忙季节还请不到人。

无人机播撒改变了他原有的生产方式。方先生将无人机在自家的虾稻田中播撒饲料。第一次使用，他开足马力，仅仅用了一个小时，两台播撒机就完成了 300 亩的作业。之后，每天两台播撒机同时作业，不到 4 小时就能撒完 1000 亩饲料。

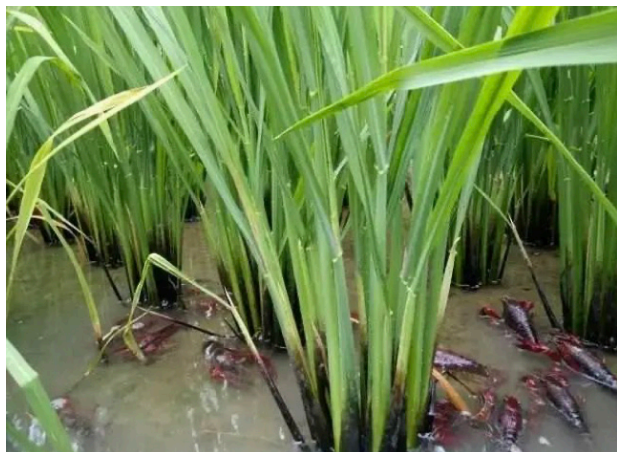


图 47 虾稻田



图 48 平整田块作业

2. 水稻播撒应用

水稻播撒对田块的要求很高，如直播水稻田块一定要平整，无积水，田块平面高低差不超过 3~5 厘米，对于东三省这片肥沃的黑土地在稻种直播时，尤其需要注意泥浆的松软度，避免稻种直播下去后陷入泥浆。田块平整好后，如种子从 3 米空中掉落完全陷入泥浆，田块平整后就应晒田 3~5 天，直至符合无人机播撒稻种要求。

浸种 + 催芽

在催芽前需要对水稻种子进行包衣、灌袋、封装，然后药剂浸种灭杀稻种携带的病菌，这样使种子出芽率更高，抗病力更强，而完成浸泡、催芽这一过程，只需稻种在智能化控温、控水箱内待 7 天左右就可以，催芽效率大大提高了。在催芽后需要将水稻种子平铺放在阴凉通风的地方晾干，直至将晾干的种子抓在手中感受不到明显的水分即可。也可在手中留出缝隙，种子能一粒一粒的从缝隙中掉落而不相互黏连则表示已晾干。若催芽后种子不晾干，在模板校准时种子容易结块、落料不均匀，从而导致播撒不精准。

表 6 播撒作业参数



图 49 晾芽

所用机型	T40	飞行速度	6m/s
相对高度	3.5m	作业行距	5m
亩播撒量	12.6kg/亩（浸泡后）	甩盘转速	1000r/min
作业模式	全自主航线作业（自动扫边）		

在催芽后需要将水稻种子平铺放在阴凉通风的地方晾干，直至将晾干的种子抓在手中感受不到明显的水分即可。也可在手中留出缝隙，种子能一粒一粒的从缝隙中掉落而不相互黏连则表示已晾干。若催芽后种子不晾干，在模板校准时种子容易结块、落料不均匀，从而导致播撒不精准。

作业时机

5 月上旬，播撒作业当天气温达到了 15℃，适宜的气温选择对于寒地水田直播极为重要，这将影响种子的成活率。

作业效果

5 月 12 日使用 T40 播撒下去的种子，每一粒都均匀的散落在泥土之上。



图 50 6 月 2 日播种后的 23 天



6 月 24 日播种后的 44 天



图 51 7 月 10 日播种后第 60 天

6 月 2 日播种后的 23 天，可以清晰地看见每颗种子由破胸露白开始冒出绿芽。6 月 24 日播种后的 44 天，秧苗已经开始茁壮成长了。

农户表示，以往采用人工播撒不均匀且效率低，人工作业一天最多 75 亩地，但采用农业无人飞机直播后，作业效率是传统机插秧的 10 倍，且无需购置扣棚、育秧等设备，大幅降低了劳动力及生产成本。“可以说使用 T40 农业无人飞机直播 500 亩，节省的成本达 3.65 万元，这还不包括零碎的成本投入。”

（五）授粉应用

1. 水稻大田的杨花

制种水稻母本与父本交错种植，在水稻扬花的关键期内，需要通过外部手段促进父本和母本的花粉交换。以往都是通过人工，以竹竿的方式进行作业，每日作业效率只有 2-3 亩；而通过农业无人机的风场进行“赶花”作业，效率可达 100 亩，是人工作业效率的 30 倍以上。

2. 梨树授粉

梨树是异交授粉结实作物，即需要不同株花粉互相授粉才能结实。因此，授粉已经成为梨的生产中一个重要的环节，花期如何高效高质量的为梨树授粉显得尤为关键。以往的果树授粉，主要以蜜蜂和自然风助力完成，但是随着规模化种植的开展，仅依靠自然措施并不能完成大规模种植的授粉需求。在四川省广安市除采用蜜蜂授粉外，以往还会雇佣工人进行人工授粉。人工授粉方式包括丝袜筒抖授粉、鸡毛掸子授粉、液体授粉，不仅效率低质量还不稳定。现在普通采用无人机液体授粉，先将花粉溶解在特制溶液里，搅拌均匀后，通过无人机在低空雾化喷洒，帮助梨花（雌蕊）完成授粉、坐果。采用无人机液体授粉技术，综合授粉成本比之前降低三分之二，受到了果农的欢迎。

3. 果树摇花

在柑橘集中开花后期，枯败的花朵会积聚在叶片上造成灰霉病多发，所以需要将残留的花朵及时清理出叶片。目前常见的摇花方式包括：

- 1) 人工摇花，人工抓住果树主杆快速晃动，比较辛苦，每天可完成约 0.66 公顷；
- 2) 背负式摇花吹风机，风速大、操作灵活，一台机器每天可处理 2 公顷；
- 3) 使用无人机摇花，利用无人机产生的风场对果树进行吹动，从而吹落叶片上的花朵，每天可处理 10 公顷。可以看到，使用无人机摇花效率高、成本低，目前使用范围越来越广。

表 7 果树摇花作业参数表



图 52 无人机授粉作业

作业环境				飞防作业参数			
果树情况		果树情况					
树高	2米	当日天气	阴天	作业机型	T50	航线类型	区域航线
树冠直径	2米	风力	2级	飞行速度	2米/秒	作业高度	3.5米
生长期	花期	温度	28℃	亩用量	13升/亩	作业行距	3.5米
植保管理	摇花保果	湿度	64%	雾滴粒径	最细	流速	/



图 53 广西柑橘



图 54 人工摇花



图 55 飞机摇花保果

广西是柑橘种植面积最大的省份，其主要种植是沃柑和砂糖橘，沃柑种植主要集中在南宁周边，崇左作为广西南部的沃柑种植区域，其温度较高，花期也较南宁早一些。从南到北温度不同、花期不同，依次呈现谢花期－盛花期－始花期。

往常，柑橘在谢花达到 50% 时，需要根据天气情况需要摇花一次，但通常因为人力不足果农会选择在谢花达到 70%–80% 时打药并预防灰霉病，如果遇到阴雨天气更是需要人工紧急摇花，但由于人工摇花耗时耗力，也不一定能及时摇干净谢花，对于后期的灰霉病的预防增加了管理成本。



图 56-1 摇花前



图 56-2 摇花后



图 57 无人机喷白效果
(果树防冻晒的喷洒)

有了无人机的助力，果农在谢花期会选择摇花 1 至 2 次，期间兼治蓟马、红蜘蛛，同时也可节省防治灰霉病的农药和人力成本。由于柑橘灰霉病是果实膨大后花皮果的主要原因之一，所以通过无人机前期摇花也可提高成熟期果品外观，提高收益。

通过对人工摇花和无人机摇花效果的对比，无人机摇花不仅效率远高于人工，而且摇花效果与人工相当或更好，因为无人机的大风场，粘在叶片上的花瓣也能被吹落，反而人工摇花很难将粘在叶片上的花瓣摇落。

（六）果树防冻防晒的喷洒

7、8 月的广西，天气较为炎热，此时沃柑也正处于快速膨大期，非常容易有裂果，如果遇上高温便极易出现太阳果、裂果，严重影响果品和果农收益。

往常果园需请工人作业，但工人难请、作业效率低、高温天气工人易中暑中毒，果园经常因为请不到工人或作业效率跟不上，而导致防晒不及时，出现大量的太阳果和裂果。而农业无人机喷施方式属于垂直喷洒，喷洒涂白剂后形成的防晒膜能对沃柑的太阳照射面很好的覆盖，从而能大大降低太阳果和裂果的数量，保证果农的收益。



图 58 太阳果



图 59 柑橘果园

对于种植密度大、果树高、冠层后的果园，需采用【井】字型航线作业 2 遍，即同一个区域航线任务分别改变航线方向作业，第一次作业时与树行平行，第二次作业时与树行垂直。

表 8 防晒喷洒作业参数（注：单次任务亩用量为 15 升 / 亩，井字作业后实际亩用量为 30 升 / 亩。）

作业参数			
航线类型	区域航线	亩用量	15升/亩
飞行速度	3米/秒	作业高度	3.5米

五、最佳实践

（一）人员培训

大疆建立了 DJI ACADEMY 培训品牌，并在泰国、墨西哥、巴西、土耳其开展了落地了农业无人机操作培训。农业无人机的健康发展离不开从业人员的良好素质，不仅需要具备对设备的正确认识，更应该掌握作物、病虫害、作业风险控制等综合运用知识。

在墨西哥，大疆慧飞培训讲师推动合作企业开展标准化农业无人机操作培训，并且自身已经开展了多场的操作技术培训。同时，针对用户操作安全问题，还开展了多场安全操作线上培训，涉及到用药安全、用电安全、飞行安全、安全法规等。在土耳其，大疆慧飞在主要合作伙伴中挑选了能力优秀的教员并授权其为当地讲师，与总部一起合作培训更多合格的教员；从而，这些充足的教员队伍将培训更多用户进行农业无人机的规范和高效操作，进一步将 DJI Academy 标准培训体系深入开展。



图 60 DJI 土耳其慧飞培训

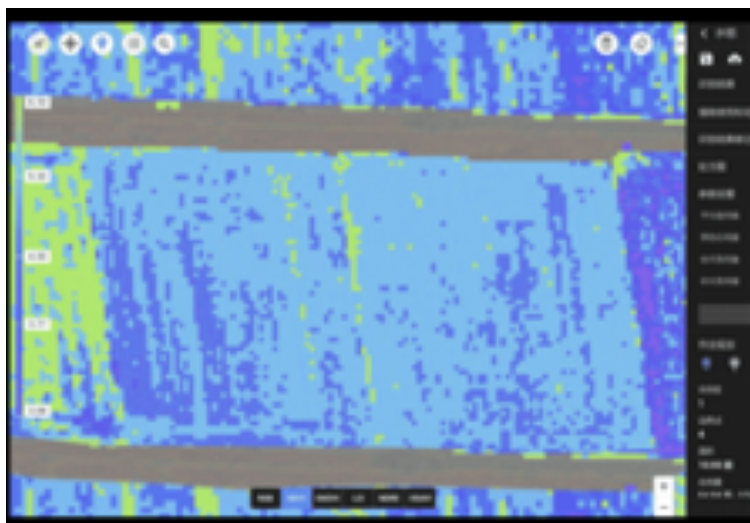


图 61 农田处方图

（二）新技术发展

农业无人机正在以更智能、更高效、更安全的方式革新农业生产方式。

2022 年 11 月 23 日 DJI 大疆农业发布 T50、T25 农业无人机以及 Mavic 3 多光谱版无人机。两款全新农业无人机全面升级，针对大田喷洒、肥料播撒，果树喷洒等应用场景进行多项优化，配合 Mavic 3 多光谱版无人机将农业生产管理中的智能化、作业效率、效果、安全性等提升至全新高度。

1. 更智能

依据作物生长情况，结合农田处方图，农业无人机即可实现精准变量作业，如水稻变量施肥，棉花变量化控，大豆、玉米变量营养液等。

通过大疆智慧农业平台和全新 Mavic3M 航测无人机，即可实现自动巡田、土地平整监测、出苗识别、长势分析等智慧农业解决方案。Mavic3M 航测无人机全新升级的影像系统，集成了 1 个 2000 万像素可见光相机及 4 个 500 万像素的多光谱相机（绿光，红光，红边和近红外）。可实现高精度航测、作物生长监测、自然资源调查等应用。



图 62 Mavic 3M 航测作业

利用 Mavic3M 仿地航测山林果园，配合大疆智图或大疆智慧农业平台重建果园高清地图，可以自动识别果树棵数、区分果树与障碍物，并且能够生成农业无人机三维作业航线，作业更智能。

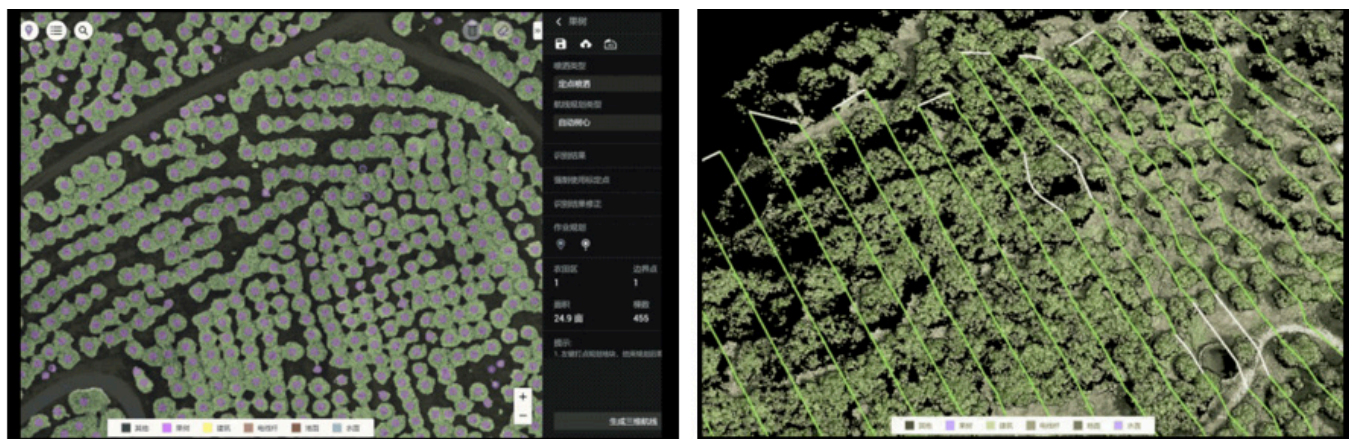


图 63 Mavic 3M 航测作业

自 2018 年大疆农业推出果树模式，截至 2022 年，大疆无人机果树飞防面积超 1500 万亩次，设备保有量超 3000 台。经过多年技术积累，大疆农业给出了“无人机航测 + AI 识别 + 全自动作业”的果树解决方案，并在柑橘、芒果、香梨等作物上验证了无人机果树飞防的效果。

2. 更高效

随着农业无人机研发技术的演进，载重小、流量低和充电慢等影响作业效率的问题在不断得到解决。T50 农业无人机最大有效载重高达 50kg，水泵最大流量 24L/min，播撒最大流量 108kg/min。在大田场景实现喷洒最大作业效率为 320 亩 / 小时，播撒肥料最大作业效率为 1.5 吨 / 小时；在果树场景实现喷洒最大作业效率为 72 亩 / 小时。电力系统方面可实现 9 分钟极速快充，2 组电池即可实现循环作业，电池保内循环高达 1500 次。

3. 更安全

T50 升级为 2 组有源相控阵雷达与 2 组双目视觉，雷达射频收发通道数量提升 1 倍，探测距离更远，检测精度更高，面对复杂多变的作业环境也能保障安全。配合两组双目视觉，可精准描绘地形与障碍物细节。前后两组相控阵雷达，实现 360 度全向避障与智能绕行，面对大坡度果园，实现全自动仿地作业。

T50 集航测、飞防于一体，搭载角度可调的超高清 FPV 云台相机，可实时采集农田、果园影像，搭配智能遥控器，即可生成高清地图与航线，自动识别障碍物，一键起飞，实现全时段安全自动作业。

(三) 农药使用技术与无人机的结合^[10]

1. 农药的适当桶混合

一般情况下,对于行间作物和一些小型冠层蔬菜,无人机使用的水量为 15–45 升 / 公顷。果树的用量为 75–300 升 / 公顷,因此,无人机应用属于低水量或极低水量应用。中国对农药喷药量的详细分类如表 9 所示。在如此低的水量下,重要的是知道如何正确地使用杀虫剂、叶面肥料、植物生长调节剂和助剂进行罐内混合。由于缺乏专业知识或,无人机服务商或飞行员每年都会遇到一些“混罐”问题。一般来说,这个问题与混合溶液在低水量下的物理不相容和不稳定有关。^[11]

表 9 农药喷洒水量的分级

喷洒水量分级	每公顷喷洒水量（升）		雾滴粒径（um）	喷头类型
	行间作物	果园或树林		
高水量	> 600	> 1000	400–1000	孔径大于1.3mm的空心锥形喷嘴，或大流量扇形喷嘴
中水量	200–600	500–1000	225–400	孔径0.7–1mm、中小流量扇形喷嘴
低水量喷洒	50–200	200–500	150–250	孔径0.7mm，离心喷头
较低水量喷洒	5–50	50–200	80–150	孔径0.7mm，离心喷头，双流体喷嘴
极低水量喷洒	< 5	< 50	15–75	离心喷头，超低压喷嘴

[10] Pamela Wang, Crop Life Asia 无人机任务组应用技术组组长； 科迪华亚太地区 CPDD 无人机应用技术负责人

[11] Hui zhu, Yuan Plant Protection Mechaine and Standardization of Application Technology, 见: <https://www.gengzhongbang.com/article-194340-1.html>



图 64 桶混使用（苯醚甲环唑、噻虫啉、溴氰菊酯、植物生长调节剂和叶面肥）对柑橘叶片的药害



图 65 使用农药混配导致凝结堵塞滤网

因此，对于任何良好的无人机应用实践来说，对使用的化学品有一般性的了解是必要的。如每种农药、肥料或植物生长调节剂及助剂的混罐要求及禁忌，上述化学品的 pH 值，混罐溶液在温度高于 35℃ 等极端气候条件下的稳定性，所使用的产品是否符合国家标准等等。例如，有些无机铜是相对偏碱性的，有些抗生素是偏酸性的化学物质。将这些农药与其他化学品混合在罐中时应非常小心。不建议将钙肥罐与磷酸二氢钾（KDP）混合。在水溶液中，两者混合物的稳定性很差，叶面钙肥易与磷酸二氢钾反应生成不溶于水的磷酸钙。

为确保无人机喷施安全有效地使用农药，可以遵循以下一些良好做法：

1) 经常检查产品的标签和 MSDS，以确保更好地了解所使用的化学品。

2) 如果可能的话，始终建议在无人机应用中使用化学品之前进行物理相容性研究和物理 / 化学稳定性测试。例如，大公司会与市场上有代表性的涉及到罐混的合作伙伴一起通过罐混的方式对其农药进行此类测试。这种测试既简单又便宜，可供服务提供商和飞行员执行。使用适当的方法稀释、罐混或制备农药溶液（来源：亚洲作物生命无人机操作员工具包）。

3) 正确的罐混顺序和程序对于确保农药、植物生长调节剂、叶面肥和助剂良好的罐混相容性非常重要。但许多农民、零售商和服务提供商没有掌握这些基本知识，并造成了一些问题。正确的罐混合顺序和程序是：

加入 1/4-1/3 水，摇匀。按照以下顺序添加不同种类的配方。在添加下一种化学品之前，请确保现有的混合物混合均匀且充分。当必须推迟申请时，需要正常搅拌以重新悬浮在进行申请之前可能已经沉降的任何材料。农药罐混后需立即使用。不要将农药溶液放置过夜。遵守混合物中使用的所有产品最严格的标签限制和预防措施。

良好的做法是遵循产品罐混合顺序，保持搅拌并在同一天喷涂。正确的罐混合顺序是 [来源，科迪华]：

- ① 干制剂 - 水溶性包 (WSP)；水分散粒剂 (WG、DP)；水溶性颗粒剂 (SG)；可湿性粉剂 (WP)
- ② 悬浮液浓缩物 (SC)；胶囊混悬液 (CS)；悬乳剂 (SE)；水包油乳液 (EW)。
- ③ 液体飘移阻滞剂（聚合物，脱水）。
- ④ 乳油 (EC)；油分散度 (OD)；可溶性液体 (SL)。

如果需要，添加佐剂（COC、MSO 等）。如果需要，添加微量营养素和液体肥料。

4) 水质对农药的药效至关重要。与农药性能相关的水质指标主要有四项。一般情况下, 建议使用硬度较小、pH 值为中性的干净水, 例如池塘水或沟渠水而不是深井的水。

A. 硬水是由带正电荷的矿物质和阳离子引起的, 它们可以与某些除草剂(草甘膦是最著名的例子, 还有 2,4-D 胺)结合并降低其性能。

B. pH 值在 4-7 之间的水相对较好, 但有些除草剂需要特定 pH 值的水才能正确溶解。标签说明很重要, 有时需要特定的佐剂, 而一些农药在 pH 值较高的水中会迅速分解, 比如杀虫剂。

C. 清洁度 / 浊度。水可能含有悬浮固体, 例如粘土。一些化学物质对此很敏感, 因为它们很容易被土壤颗粒吸附, 因此浑浊的水会降低其有效性。

2. 农药制剂及其在无人机应用的技术可行性

了解不同农药剂型的属性对于实现农药的安全有效使用非常重要。无人机应用推荐使用合格配方的产品。选择农业无人机可行的配方进行应用。任何新产品的喷雾性能的小规模预测试都是必要的。

1) 日本的注册

1) 日本对无人机应用有完善的法规。拥有 30 多年无线电遥控直升机发展历史, 并将其完善的无线电遥控直升机法规迅速转变为无人机应用。

2) 由于担心飘移到周围农田和地区, 日本工业界没有对除水稻以外的农田作物进行除草剂施用。唯一的特殊用途是烧毁森林和丰富的非农业土地中的杂草。考虑到无人机施药的正常喷雾飘移风险, 飘移风险和对邻近田地的潜在植物毒性是不可避免的。因此, 日本行业参与者仅针对水稻开发了无人机除草剂施用, 其中使用即用型制剂的水中施用是最常见的方法, 并且不太可能导致飘移问题。

3) 除草剂无人机申请登记主要针对水稻除草剂。共有 204 个除草剂产品获得水稻无人机申请登记(颗粒剂型: 141 个产品, SC 剂型: 61 个产品, EC 剂型: 1 个产品, EW 剂型: 1 个产品)。

4) 除了水稻以外, 除草剂仅有 2 种无人机获得登记。日本东北大地震后, 草甘膦(Round-up MxLoad)获得了特殊的无人机应用注册, 用于非农业地区的杂草烧毁。另一种选择性除草剂配方(细颗粒)已注册用于森林杂草控制。

5) 即用型水稻除草剂有 2 种。

A. 撒入水中的颗粒(单独或最多 4 种成分的混合物), 每公顷 10 公斤是最常见的产品剂量, 无人机机器可以配备特殊的附件来散布或掉落颗粒, 而不会产生太大的飘移风险

B. 未经稀释即可滴入或溅入水中的液体(SC、EC、EW 等)。配方专为提高水中的铺展性而开发。由于铺展性差导致的植物毒性风险或性能问题, 所有液体制剂可能不适用于此类入水应用。此方法需要完全淹没的条件(浸没 3-5 厘米的条件)。如果稻田未完全淹没, 则可能无法发挥除草效果。无人机施用可以通过特殊喷嘴轻轻地溅入水中而无需稀释。

C. 对于 GR 和液体配方, 可以将飘移风险降至最低, 因为细颗粒在应用过程中可能不适用。

D. 您可以看到无人机对 2 种不同配方 / 应用的实际演示：

a. 施用颗粒水稻除草剂演示^[12]： https://www.youtube.com/watch?v=bQOe_x-YJZI

b. 施用液体水稻除草剂演示^[13]： <https://www.youtube.com/watch?v=l9WoZT89N9k>

2) 农药剂型的可行性与无人机施用的不同喷头密切相关

A. 喷雾系统的类型

一般有两种不同类型的喷雾系统：液压能量喷嘴和泵以及离心喷嘴和相关泵（如蠕动泵或磁力驱动叶轮泵）。极飞和极目采用离心喷嘴及相关泵。但大疆同时使用了两种雾化系统，包括液压喷嘴和离心喷嘴。目前，离心式喷嘴在中国市场占据主导地位。

B. 旋转离心喷嘴

离心喷嘴的液滴尺寸可以调节，可以实现非常粗的液滴尺寸，如 T50 的液滴尺寸可以在 50 μm 至 500 μm 之间调节。因此，可以通过调节转速选择较粗的雾滴尺寸进行除草剂施用。与液压喷嘴相比，它更适合用于除草剂施用，因为雾滴大小相对均匀。

C. 液压能量喷嘴

水力雾化特别适用于喷涂水溶性制剂，是使用最多的雾化方法。雾化粒径主要受喷嘴压力、喷嘴类型和孔口的影响。对于此类喷嘴，液滴尺寸的范围很广。例如常用的 XR11001VS 和 XR110015VS 的范围为 100–250 μm 。国内常用的液压能喷嘴有扁扇形喷嘴和空心锥形喷嘴。与 XR 喷嘴相比，AIXR、AI、TF、TT 等防飘移喷嘴可以产生更粗的液滴尺寸。但 IDK 等喷嘴的喷射范围较窄，工作效率较低。因此，IDK 或相关的防飘移喷嘴由于其工作效率低而没有被商业化使用。工作效率是限制服务提供商使用防飘移喷嘴的一大障碍。喷幅窄，导致防飘移喷嘴工作效率低，因此国内广泛采用扇形、锥形液压喷嘴、离心喷嘴。

[12] 来源：先正达 – 日本，见：<https://www.youtube.com/@syngenta-japan>

[13] 资料来源：Hashino Yoji SGSG，来自先正达和 CLA，见：<https://www.youtube.com/@HaradaFarm>

六 应用错误详解

（一）错误一：在不适合的区域喷洒除草剂

很多药液都具有一定的飘移特性，尤其是除草剂产品。所以在喷施选择性除草剂时，应注意周边是否有敏感作物存在，避免产生飘移要害，影响周边作物生长。例如在 2-3 月份，中国湖北省、四川省会耕地上同时存在冬小麦和油菜，如对小麦进行除草作业，药液飘移到油菜上，会造成油菜枯萎甚至完全枯死。

（二）错误二：在蜜蜂、桑树附近喷洒杀虫剂

化学农药对蜜蜂活性具有一定影响。特别是应用较为广泛的新烟碱类杀虫剂（吡虫啉、噻虫嗪等），对蜜蜂具有很强的灭杀作用，应特别注意喷施该类药剂周边是否存在蜜蜂养殖活动。其他药剂也应根据产品标签要求，确认对蜜蜂影响程度后，再制定施药方案和放蜂时机的窗口。

2022 年在广西某香蕉果园喷洒杀虫剂吡虫啉，造成附近流动蜜蜂养殖者损失 246 箱蜜蜂，综合损失几十万元。在存在蜜蜂养殖产业的地区，作业前应提前与耕地负责人确认周围 3 千米范围内是否有蜜蜂养殖，如存在则禁止作业。或者与蜜蜂养殖人员确认，提前转移后再作业。对于下风向有桑树种植的区域，严禁喷洒杀虫剂。

（三）错误三：果树作业采用高速度或粗雾滴

果树具有株高较高、冠层较厚、较难穿透的特点，所以作业参数选择应秉承更高亩用量、低速、更细雾滴的原则。农业无人机速度越快则雾滴对作物的穿透性就越差，常见速度一般在 1.5-3 米 / 秒左右。一些大田地区的飞手往往不明确果树作业的具体要求，采用大田作业常见的 1-2L 亩用量、6-7 米 / 秒速度在果树作业，不仅效果差降低了无人机飞防的口碑，而且还造成了后续本地飞手的推广困难。





图 66 果树作业需要更高亩用量和更细的雾滴以保障效果

同时，果树枝繁叶茂，需要更多的雾滴数量来提升作业效果，所以应选择更细的雾滴。对于 T20/T30 等标配压力式喷洒系统的机型，应选择标配喷嘴，不建议更换 015、02 等喷嘴。对于 T40/T20P 采用离心喷嘴的机型，雾滴粒径可调节，一般建议采用细到最细，以提升作业效果。

（四）错误四：障碍物区域采用十几米的飞行高度

部分区域电线较多，部分飞手为了飞行更安全，直接飞行到十几米高度。药液在喷出后，需要几秒的时间才能到达作物表面，如果环境温度高、风速大，那这种作业方式就会带来药液大量蒸发、随风飘移等问题，最终药剂大部分并不能有效到达靶标。

所以，为了安全而飞的过高不可取，作业效果没保障。

（五）错误五：除草或者矮壮素作业行距设置过宽

茎叶除草以及生长调节剂对作业参数要求较高，重喷或者漏喷产生的问题肉眼可见。行距如果设置过宽，对于茎叶除草产生的现象就是航线结合处杂草杀灭效果差。对于矮壮素类作业，则从整田观察来看，产生高度波浪起伏。



图 67 矮壮素不均匀导致的波浪形长势

从谨慎角度，除草或者矮壮素类作业，建议如下：

T20 机型，建议高度 2.2–2.5 米，行距应控制在 5.5 米以内；

T20P 机型，建议高度 2.5–3 米，行距应控制在 5.5 米以内；

T30 机型，建议高度 2.5–3 米，行距应控制在 6 米以内；

T40 机型，建议高度 3–3.5 米，行距应控制在 7 米以内。

（六）错误六：作业行距和作业速度不匹配

农业无人机其有效喷幅与飞行速度有一定关联，理论上在完全悬停时期有效喷幅最低。所以，行距的设置应与飞行速度进行关联，避免重喷或漏喷。

正确的思路：飞行速度越快，允许设置的行距就更宽。

例如，以 T40 为例，大田作物一般可设置 7 米行距，但是在果树区适用因飞行速度慢，一般行距不超过 4.5 米。

错误的思路：不论飞行速度，而设置固定的行距。

在黑龙江地区，因为按照一壶药 1 晌地或者半晌地（1 晌 =15 亩）的打法，存在 T30 打 4L 亩用量的情况，此时飞行速度只有 3-4 米，部分飞手甚至还设定了 7 米的行距。此时航线结合处，药液喷洒量是比较少的，就容易出现药害或者作业效果不佳。

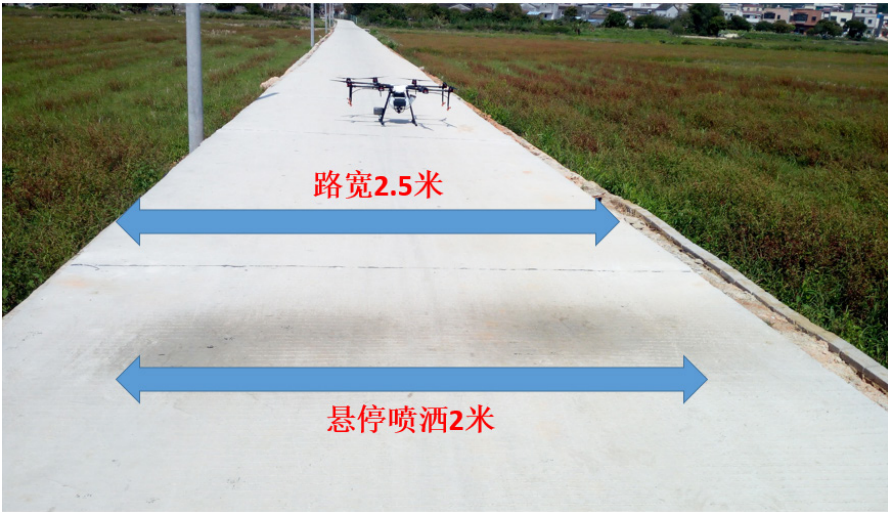


图 68 悬停喷洒覆盖范围较窄

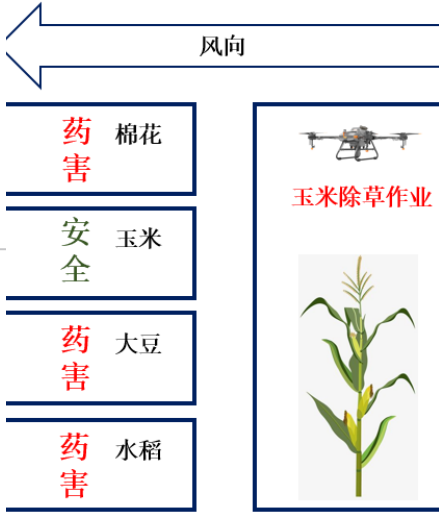


图 69 风向对漂移药害的影响

（七）错误七：玉米喷洒茎叶除草剂

玉米除草剂常见药剂莠去津、烟嘧磺隆都具有对玉米安全而对其他作物不安全的特点，所以玉米除草作业应特别谨慎。我国目前玉米种植最广泛区域在东北地区和华北平原，该玉米种植区往往周边会存在大豆、水稻、花生等其他作物，所以玉米茎叶除草应注意周边敏感作物距离和施药事天气风速条件。对于玉米、大豆复合种植田块，不可使用农业无人机进行除草作业。

玉米除草飘移药害，往往是存在以下几个情况：

- （1）高度过高，部分案例里甚至出现了 5 米高度的情况；
- （2）选择了“细、最细”雾滴，加剧了雾滴飘移的距离；
- （3）玉米下风向 100 米范围内有其他作物，且作业时环境风力在 3 级风以上，使得飘移的距离增加。

通过以上案例可以明确，农业无人机要保障作业效果并杜绝药害，必须对作物、病虫害、农业无人机、气象因素、农药特性等具备基本理解，才能实现安全而规范的作业。忽视任何一个因素，轻则导致作业效果降低，重则产生药害甚至经济损失。

— 结语 —

在人类数千年的文明中，农业精神始终贯穿其中，
透过农业无人机的行业发展，
我们得以窥见农业精神的延续。
如今，农业无人机在世界上的每一个角落“起飞”，
我们衷心希望，
农业无人机可以以科技之美服务农业，
改变农业创造力，
让农业更轻松，让生命更美好。

