

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.03.023

周晗林, 林芬, 曹洁, 等. 食品产业的未来: 低空经济和无人机技术的融合[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(3): 219-226.

ZHOU H L, LIN F, CAO J, et al. The future of the food industry: the convergence of the low-altitude economy and drone technology[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(3): 219-226.

# 食品产业的未来：低空经济和 无人机技术的融合

周晗林<sup>1</sup>, 林芬<sup>1</sup>, 曹洁<sup>2</sup>, 李小林<sup>3</sup>, 张园园<sup>4</sup>,  
骆主胜<sup>5</sup>, 孙意岚<sup>6</sup>, 庞杰<sup>1</sup>✉

1. 福建农林大学 食品科学学院, 福建 福州 350002;
2. 福建警察学院实验中心, 福建 福州 350002;
3. 福建农林大学 计算机与信息学院, 福建 福州 350002;
4. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350002;
5. 福建富邦食品有限公司, 福建 泉州 362101)
6. 上海交通大学医学院附属第九人民医院 口腔颌面头颈肿瘤科, 上海 200011)

**摘要:** 低空经济是利用低空飞行技术推动相关产业发展的经济形态; 在国家发展战略中具有重要地位。食品产业, 作为公众生活中核心部分, 与低空经济的结合尤为紧密。无人机产业是低空经济的核心, 本文系统分析了低空经济中, 无人机在食品产业中的一系列应用, 特别是在无人机监测农产品生长状况以及进行相关农业活动、利用无人机进行食品物资(包括外卖、易腐食品等)的配送等领域的实际应用和挑战。尽管低空经济在食品领域的应用初见成效, 但也面临着消费者接受度不足、产业发展不够深入、相关法律法规不够完善等一系列问题, 亟需出台更多支持政策, 以促进低空经济技术在食品领域的进一步发展和应用, 在方便人民生活的同时, 强调持续的技术创新是推动该领域长期发展的关键。此外, 还探讨了如何通过科技创新和政策引导, 解决当前发展低空经济存在的问题, 并推动低空经济与食品产业的深度融合, 促进相关产业的繁荣。

**关键词:** 低空经济; 食品产业; 无人机; 农业监测; 外卖配送; 食品物资运输

中图分类号: TS2; F426; F562 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2025)03-0219-08

网络首发时间: 2025-01-21 12:00:42

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20250121.0919.002>

收稿日期: 2024-09-19; 修回日期: 2024-11-01; 录用日期: 2024-11-06

基金项目: “十四五”国家重点研发计划“特色花(果)茶智能化窈制及数字化拼配关键技术与示范”(2022YFD2101102); 福建省自然科学基金重点项目“基于拓扑结构的魔芋葡甘聚糖力学行为的机制研究”(2022J02021)

**Supported by:** National Key Research and Development Project of the 14th Five-year Plan, China “Research and Demonstration of Key Technology for Intelligent Cultivation and Digital Blending of Characteristic Flower (Fruit) Tea” (No. 2022YFD2101102); Key Project of Fujian Provincial Natural Science Foundation “Mechanistic Study of the Mechanical Behaviour of Konjac Glucomannan based on Its Topological Structure” (No. 2022J02021)

第一作者: 周晗林, 男, 1997年出生, 在读硕士生, 研究方向为食品科学、茶叶风味品质及机器学习, E-mail: zhou297375723@163.com

通信作者: 庞杰, 男, 1965年出生, 博士, 教授, 研究方向为机器学习及分子数值模拟在活性多糖中的功能化设计与应用, E-mail: pang3721941@163.com

## The Future of the Food Industry: the Convergence of the Low-altitude Economy and Drone Technology

ZHOU Han-lin<sup>1</sup>, LIN Fen<sup>1</sup>, CAO Jie<sup>2</sup>, LI Xiao-lin<sup>3</sup>, ZHANG Yuan-yuan<sup>4</sup>,  
LUO Zhu-sheng<sup>5</sup>, SUN Yi-lan<sup>6</sup>, PANG Jie<sup>1</sup>✉

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Experimental center, Fujian Police College, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. College of Computer and information Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 4. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 5. Fujian Fubang Foodstuff Co., Ltd, Quanzhou, Fujian 362101, China; 6. Department of Oral and Maxillofacial Head and neck Oncology, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** Low-altitude economy refers to an economic form that leverages low-altitude flight technology to promote the development of related industries; It has an importance in the national development strategy. The food industry, as a core part of public life, is particularly closely integrated with the low-altitude economy. The drone industry is at the heart of the low-altitude economy, and this paper systematically analyses a range of drones applications in the food industry within the low-altitude economy, in particular the practical applications and challenges in the areas of drone monitoring of the growth of agricultural products, conducting related agricultural activities, delivering food supplies (including takeaways, perishable food, etc.), and aerial photography. Although the application of low-altitude economy in the food sector has shown initial promise, it faces a series of problems such as limited consumer acceptance, underdeveloped industrial depth, and inadequate legal and regulatory frameworks, etc. There is an urgent need for the government to introduce more supportive policies to facilitate the further development and application of low-altitude economy technologies in the food sector. Additionally, sustained technological innovation is the key to ensuring long-term progress in this field, alongside public convenience. In addition, this paper also discusses how scientific and technological innovation, along with policy guidance can solve the possible problems in the current development of low altitude economy, promote the deep integration of low altitude economy with the food industry, and drive the prosperity of related sectors.

**Key words:** low-altitude economy; food industry; drones; agricultural monitoring; food delivery; foodstuff's transportation

低空 (Low altitude) 指的是距离地面垂直高度 1 000 m 以内, 可根据实际情况扩展到不同安全飞行高度的空域; 低空经济 (Low altitude economy) 即为在这段空域内部所进行的各项经济活动, 例如各式各样的无人、有人驾驶的航空器, 或是一系列以载人、载货为目的的多场景低空飞行活动<sup>[1]</sup>。在英文中“低空经济”没有直接对应的表达, 相关表述包括“低海拔园林树木培育的经济领域” (Economic areas of low altitude garden tree breeding); 因此, 低空经济是由我国作为一个新经济现象, 或

是经济领域进行首创的名词<sup>[2]</sup>。

### 1 低空经济的现状

低空经济涉及通用航空产业, 信息通信网络等多个领域和环节; 能够创造众多的就业机会, 如飞行器研发、运营、维护等方面; 空中运输降低了土地资源的占用, 减少了交通拥堵的状况, 提高了运输效率; 低空经济的发展还可以在抢险救灾、医疗救援等方面提供高效且快速的支援服务, 保障人民群众的财产安全和需求, 缩小城乡

差距,提高社会福利水平<sup>[3]</sup>;因此,发展低空经济,能促进各项相关产业的升级和创新。目前,我国许多城市针对低空经济开展了相关活动:例如,上海早在 2022 年就发布了《打造未来产业创新高地发展壮大未来产业集群行动方案》,探索低空经济新模式<sup>[4]</sup>;南京于 2024 年发布《南京市促进低空经济高质量发展实施方案(2024—2026 年)》和《南京市关于支持低空经济高质量发展的若干措施(试行)》,明确了南京将用 3 年时间推动南京跻身低空经济全国第一方阵,形成超 500 亿元产业规模<sup>[5]</sup>;北京丰台区于 2024 年 4 月

12 号举办的低空经济研讨会,明确了后续将打造首都乃至全国的低空经济技术创新和成果转化主阵地,并将于同年建设低空经济产业园<sup>[6]</sup>。

在低空经济中,通用航空为主导,最重要的是无人机产业。无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)是一种利用无线电遥控设备以及自备的程序控制的不载人飞机,其飞行方式、轨迹由地面飞行员或无人机本身计算机系统控制;随着和平年代的发展,无人机因其小巧简便,学习操作的门槛低,被广泛应用在人民的生产生活中<sup>[7]</sup>;目前,我国无人机产业呈持续上升的态势,如图 1 所示。

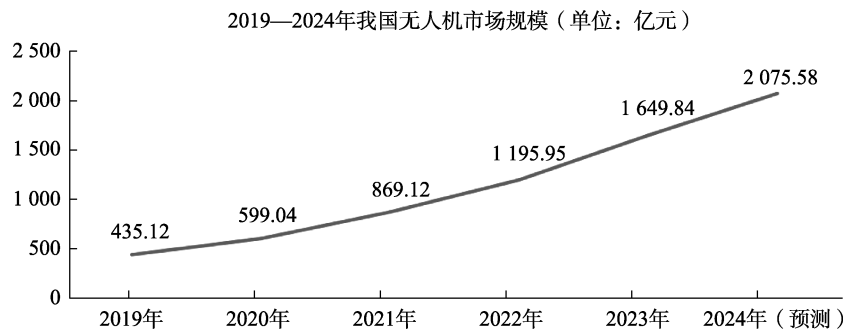


图 1 我国无人机市场规模(2024 年为预测)(数据来源:中国移动研究院)

Fig.1 Size of China's unmanned aerial vehicle market (Forecasted in 2024) (Data source: China Mobile Research Institute)

无人机一般通过其结构差异分为 3 种类型,如表 1 所示<sup>[8]</sup>。

表 1 不同类型的无人机

Table 1 Different types of drones

| 无人机类型       | 具体描述  |
|-------------|---|
| 固定翼无人机      | 通过空中向前运动实现升力;因能源消耗较少,能以较高的速度飞行,可在更短的时间内覆盖更大的区域;但需要较大的空间进行起飞降落,对操作人员的水平要求较高;且设备成本较高。 |
| 单旋翼无人机(直升机) | 飞行速度适中,可以在任何地方悬停;载重量大、航行时间长、场地限制较小,但故障率较高,续航时间短。                                    |
| 多旋翼无人机      | 根据螺旋桨的数量可以分为四个转子、六个转子、八个转子;体积小,重量轻、操作方便;但续航时间短,且航速较慢。                               |

食品是人们赖以生存的基础,食品产业发展水平关系着一个国家的经济发展水平以及人民的生活质量高低。本文综述了低空经济在食品领域上的应用,包括食品原料培育以及食品运输方面;希望通过这一综述,能够促进相关政策的出台,

为低空经济的发展提供有益的启发。

## 2 低空经济在农业及农产品方面的应用:以花果茶和粮油相关产业为例

快速、合理观测农产品生长状况极为重要,通过观测数据,可以预估作物产量,为制定销售方案和来年作物的培育方式提供依据。然而,人工观测预估农产品的生长状况易受环境和人员主观因素影响,效率较低;观测中可能无意损害了农作物,影响产量<sup>[9]</sup>。

农用无人机能缓解以上问题,其操作灵活、高效、控制效果好,不仅有利于节约资源和保护环境,而且被广泛应用于地面机械难以种植的农业地区:可在无人机上搭载遥感系统预估田间产量,该系统具有灵活性高,作业周期短且拍摄影像清晰等特点;通过该系统也可以避免因人工下地而造成植株破坏,从而提高作物的产量<sup>[10]</sup>。

通过无人机预估作物产量的步骤如图 2 所示。选择合适的无人机,针对作物本身生长特

点或环境特点，配备适当的相机、遥感系统或各类传感器，获取种植园区作物相关信息；选择合适的飞行参数，通过拍照或录视频获取原始数据；根据实际需求，对照片或视频进行预

处理，获得相关信息；通过机器学习，对处理过后的数据进行分析，抓取特征；最后通过分析特征，预估作物产量，进行相应的“增产”措施<sup>[11]</sup>。

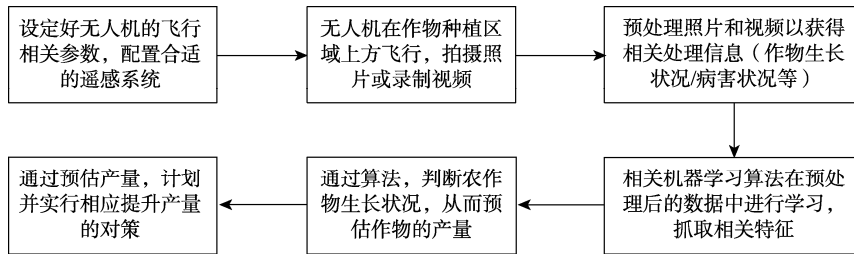


图 2 农用无人机检测农作物生长状况的步骤

Fig.2 Steps for agricultural drones to detect crop growth status

无人机获取原始图像后，可以通过计算机视觉技术提取识别作物特征信息。该技术通过计算机模拟人的视觉系统以感知物质的外观特征以及变化规律，提取目标图像的相关特征，进行建模和识别<sup>[12]</sup>。该技术相比人工，能更早发现农作物之间差异；此外，该技术还能够使无人机在复杂环境下避障；因此该技术在检测农作物生长状况乃至整个低空经济领域中具有广阔的应用前景<sup>[13]</sup>。此外，如果确定图像中作物与其他杂草的数量、或是通过该技术确定同一作物不同生长状态植物器官的数量，则可以结

合其他机器学习算法，如决策树 (Decision tree, DT) 等，对相关信息进一步处理，从而能够建立农作物产量预估模型<sup>[14]</sup>。以下介绍一些利用无人机结合计算机视觉技术观测农产品生长状况的实例，详见表 2。

利用无人机获取作物相关信息后整合分析，可以制定并采取合适的方案，对其进行相关农业活动；这些活动也可以利用无人机完成。适合三种类型无人机的农业领域用途如表 3 所示。使用无人机完成这些活动，能够避免农业资源的过度使用，提升生产效率<sup>[19]</sup>。

表 2 通过无人机结合机器学习算法检测茶树生长状况、鲜花开放程度，果树生长状况、粮油类产品生长状况的实例

Table 2 Examples of detecting tea tree growth, flower opening, fruit tree growth and growth status of grain and oil products by drones combined with machine learning algorithms

| 检测类型                          | 无人机型号  | 机器学习算法及目的  | 结论  |
|-------------------------------|--|--|---|
| 炭疽病原菌引起的茶树枯萎病 <sup>[15]</sup> | 一架带有 48 mp 可见光传感器的无人机  | 超分辨率(Super-resolution, SR)网络、轻量级检测网络 (Lightweight detection network, LWDNet)，检测无人机拍摄图像中茶叶的颜色差异   | 无人机搭载合适的传感器可以准确捕捉到茶树的光谱信息,从而能够获取茶叶被病害感染的原始数据;同时,算法的检测结果表明,该算法模型可以减少计算量,提升对图像的检测精度。      |
| 不同时期、不同成熟度的玫瑰 <sup>[16]</sup> | 大疆幻影 4 Pro 四轴飞行器, 配备 Sentera 双 4K 多光谱传感器   | 多元线性回归 (Multiple linear regression, MLR)、多元自适应回归样条 (Multivariate adaptive regression splines, MARS)、决策树 (Decision tree, DT) 等算法预测玫瑰花产量估算模型 | 通过拍摄不同时期玫瑰园的无人机图像,结合其他信息,通过机器学习算法进行处理,可以准确的建立玫瑰产量的预测模型;实验证明了当地农民可以通过无人机照片为建立智能农业系统提供参考。 |
| 苹果果实产量预测 <sup>[17]</sup>      | 大疆 M600 配备 Riegl VUX-1 和鸚鵡红杉多光谱相机  | 支持向量回归 (Support vector regression, SVR) 和 k-最近邻 (k-Nearest neighbor, KNN) 提取苹果树的光谱和形态特征以建立苹果产量预测模型   | 利用无人机遥感系统获取的苹果树多光谱图像,加上机器学习算法进行辅助,预测苹果产量的精度达到最高;该研究可以为农户优化果园管理提供参考。                     |
| 水稻产量预测 <sup>[18]</sup>        | 多旋翼 mk-慕尼黑直升机, 搭配 RGB、彩色红外 (Color Infrared/NIR-G-B) 和多光谱 (Multispectral, MS) 照相机 | 一种新的结合无人机拍摄水稻纹理特征以及光谱特征的 DT 算法, 预估水稻产量   | 搭配三种相机的无人机能够精准捕捉水稻的各种特征;同时,结合水稻各种信息的决策树算法表现较好,可以推广到其他作物生长状况检测及产量预测。                     |

表 3 不同类型无人机可以进行的农业活动  
Table 3 Agricultural activities that different types of drones can carry out

| 无人机类型        | 用途  |
|--------------|---|
| 固定翼无人机       | 用于大面积农田的巡视和测绘, 以及用于农作物相关信息获取, 作物成熟度评估; 但不适合中等面积和不规整的地形作业。 |
| 单旋翼无人机 (直升机) | 适用于农药喷洒、农田地理信息获取和散播、小面积农田作业监测等任务。                         |
| 多旋翼无人机       | 适用于精细农业作业, 以及果园、蔬菜大棚中作物生长状况的检测; 也可应用于农药喷洒, 农业地理信息获取散播。    |

此外, 可以在无人机上搭配合适的收割装置来采收果实。郭等<sup>[20]</sup>研制了一款可以搭载于无人机的气振式核桃采收机, 发现该采收机采收合适成熟度核桃的效率达到了 100%; 因此, 通过无人机搭配合适测装置以采收木本植物的果实, 可以避免人工采收造成的人身安全风险, 同时采收效率较高, 有望成为未来采收相关木本类植物农产品的一种高效方式。

### 3 低空经济在产品运输方面的应用: 以外卖配送和食品物资运输为例

#### 3.1 外卖配送方面

近年来, 外卖点餐已成为当前主流的餐饮消费方式。目前, 外卖配送主要依靠骑手使用摩托车和电动车的方式将餐品直接送达消费者手中; 然而该

方式存在弊端, 在遇到通行困难的情况时, 易导致送餐延迟, 无法确保食品的品质, 进而降低顾客满意度; 此外, 为了避免差评, 商家和骑手可能会拒绝较远的订单, 这可能导致顾客数量减少<sup>[21]</sup>。

为了解决这些问题, 外卖平台尝试将无人机应用于外卖配送, 利用其快速飞行的能力提高物流效率, 从而减少送餐延迟, 降低“最后一公里”配送成本。2018 年, “饿了么”在上海宣布开通首批无人机即时送餐航线, 这标志着中国无人机送餐时代的正式开启; 无人机相关信息如表 4 所示<sup>[22]</sup>。

表 4 “饿了么”外卖配送无人机相关信息  
Table 4 “Ele.me” takeout delivery drone related information

| 指标     | 相关信息    |
|--------|---------|
| 最高飞行速度 | 65 km/h |
| 最大载重   | 10 kg   |
| 满载续航里程 | 20 km   |

在配送过程中, 商家出餐后会统一将多个餐品装载到无人机上进行配送; 无人机能够避开地面障碍物将餐品运送到顾客所在地点附近, 随后由骑手完成最后配送, 将外卖送至顾客家门口、小区门口或公司门口, 如图 3 所示。

此外, 为了进一步提高配送效率, 部分商家为了避免外卖员配送过程中出现问题, 采用全程无人机配送的方式配送外卖, 如图 4 所示。



图 3 无人机结合骑手配送外卖的方式

Fig.3 The method of combining drones with riders to deliver takeout

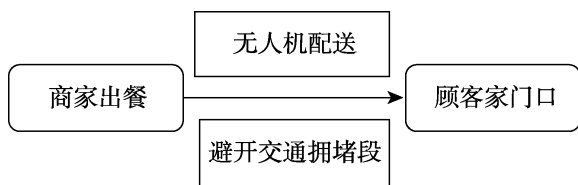


图 4 全程无人机配送外卖的方式

Fig.4 The method of delivering takeout with drones throughout the entire process

为了能够更加迅速地将外卖送到顾客手中,

需要通过机器学习算法对配送路径进行优化。例如, 李等<sup>[23]</sup>建立了一个无人机协同骑手送披萨外卖的模型, 并设计了蚁群算法 (Ant colony optimization, ACO)、模拟退火算法 (Simulate anneal arithmetic, SAA) 和遗传算法 (Genetic algorithm, GA) 以求解该模型, 发现引入无人机的模型相较于骑手单一配送模型, 成本减少了 65%。利用无人机配送外卖, 解决了传统人工配

送效率较低的问题，极大地缩短了送餐时间，提高了用户的满意度。

### 3.2 食品运输方面

所有的新鲜食品，包括肉、蛋、奶、蔬菜等，在生产、运输、储存阶段可能因为操作不善而造成品质损害的商品，均归类为易腐食品；这类食品因其保质期较短，在运输过程中花费的时间越长，腐败的风险越高，进而引发经济损失<sup>[24]</sup>。

传统运送这类物资的方法主要依赖于卡车、火车等交通工具或是牲畜；然而，面对复杂地形或自然灾害，尽管投入了大量努力以改善道路环境，但在复杂地形下的道路改造可能需数年时间

才能完成，期间物资运输的可靠性难以保障；因此，传统的交通工具往往难以实现及时配送，导致资源浪费。为此，现在在某些场景采用无人机运输能有效提升便捷性，并保证食品新鲜度。通过大型无人机从海南海口运输 500 kg 虾苗至广州珠海，仅耗时 3 h，不仅解决了传统跨海运的时效性问题，还实现了虾苗 100% 的存活率<sup>[25]</sup>。

此外，当灾害发生时，除了利用无人机勘探受灾环境外，也会采用无人机空投食品，以保障保证人民群众的生活质量。无人机配送食品类物资的方式如图 5 所示，通过卡车将物资运送到指定地点，再通过无人机将物资送到群众手中。

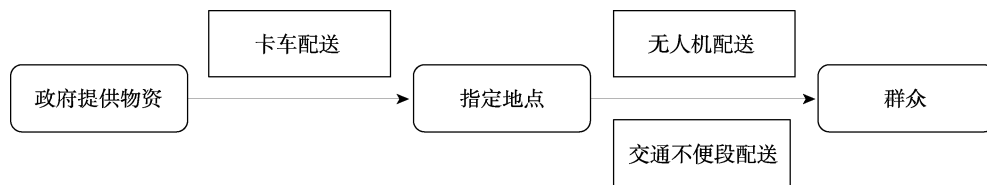


图 5 无人机-卡车运输救灾物资的方式

Fig.5 Drone truck transportation method for disaster relief supplies

同时，为了确保物资的即时送达，需对无人机的飞行路径和协同交通工具的行驶路径进行优化。例如，Zhang 等<sup>[26]</sup>利用卡车加无人机结合的方式进行易腐食品的配送，并利用改进的 K-means 聚类算法和扩展的非主导排序遗传算法（Extended non-dominated sorting genetic algorithm-II, ENSGA-II）规划配送路径，结果表明与仅使用车辆运送的传统路径相比，总成本减少了约 34.75%，价值损失减少了 25.64%。因此，采用无人机运输食品物资，不仅能够节约路途时间，确保食品质量，还能尽快将物资送至需求者手中。

## 4 发展低空经济可能会出现的问题

无人机在发展低空经济起着至关重要的作用；但是，如果无人机不符合规范要求，可能会出现一系列问题。

首先，对无人机的飞行高度和路径有一定的要求，如果不注意可能会涉及泄露机密、侵犯隐私权的问题，这意味着利用无人机观测农作物生长状况时，不能超出范围拍摄，避免泄露农户的私密信息，对飞行高度也要确定，避免飞

行高度过高，拍摄图像不清晰或是飞行高度过低，损害农作物。因此除了尼日利亚外，基本上所有国家都规定了无人机的禁飞区<sup>[27]</sup>；有些国家的法律还规定部分无人机飞行路径应该距离人约 30~50 m，以避免无人机飞行时伤害到人。某些国家，如智利还规定了无人机最长飞行时间为 60 min<sup>[28]</sup>。

其次，无人机本身的一些参数（无人机质量、飞行叶片材料等）也有相关规定；日本规定无人机的质量低于 200 g，则不需要受到相关无人机法律法规的约束，因无人机质量越重，其砸到人的风险就越高<sup>[29]</sup>，配送外卖或其他食品类物资时，也要考虑无人机最大承受质量，避免物资在半路丢失。

再者，对无人机操作人员也具有一定要求，若操作人员不够熟练可能在配送外卖或是其他食品物资的情况下造成配送物品丢失或是超时的情况、甚至造成无人机机身损害；因此，阿塞拜疆、英国和德国需要对操作人员的驾驶能力进行基本的确认，也有许多国家需要无人机操作人员取得相应的执照<sup>[28]</sup>；我国各地为此也有一系列的规定，例如，重庆要求在无人机飞行前必须登记，且无人机驾驶员必须具有相关驾驶资格文件<sup>[30]</sup>。

因此,在发展低空经济时,还需要考虑到无人机本身配置以及无人机飞行轨迹是否合理,避免产生一系列的法律问题。

## 5 结论

随着低空经济的发展,供给侧飞行器与食品产业的加快融合,“低空经济+食品”可能会成为人民生活的主要内容;在食品领域,低空经济被广泛应用于农作物监测、外卖配送、物流运输等方面。

然而,低空经济在食品领域中的发展仍处于起步阶段,在未来,可以探索以下方向以促进其发展:

(1) 进一步针对不同田间状况,开发出适用性更强的无人机,这将有助于农民更能确定作物的状态,并施行相应的对策。

(2) 探索更为先进的机器学习算法,以提升无人机识别目标、规划最优路径的能力。

(3) 食品产业与无人机产业的结合仅限于植物类食品原料生产,以及食品运输等方面;可以扩宽无人机的应用,如利用无人机全程监控食品加工过程,提升食品生产效率。

(4) 可对无人机结构进行合适的改装,使其能够具备更多功能,运输更多的食品类物资;对相关人员进行定期的专业培训,明确他们的职责范围。

(5) 需要继续出台相关法律法规以促进空域资源的高效利用;同时需要推动无人机产业与食品产业的进一步合作,相辅相成;法律法规的制定也要考虑到无人机相关参数是否符合食品产业的实际需求,确保各方的利益都能保障。

低空经济下食品领域的发展具有更为广阔的前景。通过鼓励相关业者继续向这个方向探索发展,促进相关合作,推动“低空经济+食品”的发展,为无人机产业以及食品产业将迎来更多的创新机会。

## 参考文献:

- [1] 张旭. 低空空域开发现状与低空经济发展策略[J]. 中国航空周刊, 2024(13): 57-59.  
ZHANG X. Current status of low altitude airspace development and low altitude economic development strategies[J]. China Aviation Weekly, 2024(13): 57-59.
- [2] 肖雅文. 低空经济离我们并不遥远[J]. 中国中小企业, 2024(4): 32-33.  
XIAO Y W. Low altitude economy is not far from us[J]. Chinese Small and Medium-sized Enterprises, 2024(4): 32-33.
- [3] 周思雨. 低空经济: 创新与机遇的交汇点[J]. 中国工业和信息化, 2024(5): 6-11.  
ZHOU S Y. Low-altitude economy: a meeting point for innovation and opportunity[J]. China Industry & Information Technology, 2024(5): 6-11.
- [4] 丁乙乙. 加快发展新质生产力 上海“低空经济”蓄势待飞[J]. 上海信息化, 2024(4): 6-11.  
DING Y Y. Accelerating the development of new quality productivity: Shanghai's "low altitude economy" is ready to fly[J]. Shanghai Informatization, 2024(4): 6-11.
- [5] 李健, 苏雁. 江苏南京: 打造低空经济新高地[N]. 光明日报, 2024-05-18.  
LI J, SU Y. Nanjing, Jiangsu province: creating a new highland for low altitude economy[N]. Guangming Daily, 2024-05-18.
- [6] 吴静, 卢志坤. 北京领跑低空经济新赛道 丰台率先吹响“集结号”[N]. 中国经营报, 2024-05-20.  
WU J, LU Z K. Fengtai takes the lead in blowing the "rallying cry"[N]. China Business Journal, 2024-05-20.
- [7] STÖCKER C, BENNETT R, NEX F, et al. Review of the current state of UAV regulations[J]. Remote Sensing, 2017,9(5): 459.
- [8] ELIJAH T, JAMISOLA R S, TJIPARURO Z, et al. A review on control and maneuvering of cooperative fixed-wing drones[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2021, 9(3): 1332-1349.
- [9] KIM M Y, LEE K H. Electrochemical sensors for sustainable precision agriculture—a review[J]. Frontiers in Chemistry, 2022, 10.
- [10] REJEB A, ABDOLLAHI A, REJEB K, et al. Drones in agriculture: a review and bibliometric analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107017.
- [11] AYAMGA M, AKABA S, NYAABA A A. Multifaceted applicability of drones: a review[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 167: 120677.
- [12] TIAN H K, WANG T, LIU Y, et al. Computer vision technology in agricultural automation - a review[J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 7(1): 1-19.
- [13] 应婧, 王攀, 卢营蓬, 等. 计算机视觉技术在农业上的应用初探[J]. 四川农业与农机, 2019(1): 25.  
YING J, WANG P, LU Y P, et al. Preliminary exploration of the application of computer vision technology in agriculture[J]. Sichuan Agriculture and Agricultural Machinery, 2019(1): 25.
- [14] APOLO-APOLO O E, MARTÍNEZ-GUANter J, EGEA G, et al. Deep learning techniques for estimation of the yield and size of citrus fruits using a UAV[J]. European journal of agronomy, 2020, 115: 126030.
- [15] HU G S, YE R H, WAN M Z, et al. Detection of tea leaf blight in low-resolution UAV remote sensing images[J]. IEEE transactions

- on geoscience and remote sensing, 2024, 62: 1-18.
- [16] DEMIR S, DEDEOĞLU M, BAŞAYIĞIT L. Yield prediction models of organic oil rose farming with agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) images and machine learning algorithms [J]. *Remote Sensing Applications*, 2024, 33: 101131.
- [17] CHEN R Q, ZHANG C J, XU B, et al. Predicting individual apple tree yield using UAV multi-source remote sensing data and ensemble learning[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 201: 107275.
- [18] ZHENG H B, ZHOU X, HE J Y, et al. Early season detection of rice plants using RGB, NIR-G-B and multispectral images from unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 169: 105223.
- [19] 闵强兵. 植保无人机在水稻栽培及病虫害防治中的应用[J]. *农业工程技术*, 2024, 44(2): 58-59.
- MIN Q B. The application of plant protection drones in rice cultivation and pest control[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2024, 44(2): 58-59.
- [20] 郭关柱, 杨李洋, 罗亚南, 等. 基于无人机平台的气振式核桃采收机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(1): 55-64.
- GUO G Z, YANG Y L, LUO Y N, et al. Design and validation of pneumatic vibration walnut picking machine carried by UAV[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(1): 55-64.
- [21] 龚心怡, 苏燕欣, 滕明宏, 等. 当前外卖配送模式中的问题及对策分析[J]. *中国商论*, 2019(3): 32-33.
- GONG X Y, SU Y X, TENG M H, et al. Analysis of problems and countermeasures in the current delivery mode of food delivery[J]. *Chinese Business Theory*, 2019(3): 32-33.
- [22] 赵强柱, 卢福强, 王雷震, 等. 无人机骑手联合外卖配送路径优化问题研究[J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(11): 269-278.
- ZHAO Q Z, LU F Q, WANG L Z, et al. Research on drones and riders joint take-out delivery routing problem[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2022, 58(11): 269-278.
- [23] 李言锋, 赵越, 何胜学. 无人机协同骑手的小城镇外卖配送路径规划[J]. *中国水运(下半月)*, 2023, 23(8): 50-52.
- LI Y F, ZHAO Y, HE S X. Planning of delivery routes for small town takeout using drone assisted riders[J]. *China Water Transport*, 2023, 23(8): 50-52.
- [24] FARAHANI P, GRUNOW M, GÜNTHER H O. Integrated production and distribution planning for perishable food products[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2012, 24(1): 28-51.
- [25] 李士萌. 二十城抢滩万亿市场, 低空经济如何“高飞”?[J]. *中国报道*, 2024(5): 80-83.
- LI S M. How can the low altitude economy soar as 20 cities seize the trillion dollar market?[J]. *China Report*, 2024(5): 80-83.
- [26] ZHANG J, LI Y F. Collaborative vehicle-drone distribution network optimization for perishable products in the epidemic situation[J]. *Computers & Operations Research*, 2023, 149: 106039.
- [27] KAMAL A, VIDAURRI J, RUBIO-MEDRANO C. No-fly-zone: regulating drone fly-overs via government and user-controlled authorization zones: proceedings of the twenty-fourth international symposium on theory, algorithmic foundations, and protocol design for mobile networks and mobile computing[C], 2023.
- [28] CRACKNELL A P. UAVs: regulations and law enforcement[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(8-10): 3054-3067.
- [29] KOH C H, DENG C, LI L, et al. Experimental and simulation weight threshold study for safe drone operations[M]// 2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech@ Aerospace. 2018: 1725.
- [30] 王雪玉. 工业级无人机飞行安全规制的反思与转型[J]. *行政与法*, 2022, (10): 121-129.
- WANG X Y. Rethinking and transforming flight safety regulation of industrial drones[J]. *Administration and Law*, 2022, (10): 121-129. 完
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。