

# 航空食品的特殊性及加工储运过程与品质控制

张倩<sup>1</sup> 袁源<sup>2</sup> 陶源<sup>2</sup> 闫博文<sup>2</sup>

(1. 无锡职业技术学院汽车与交通学院, 江苏 无锡 214121; 2. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:**为全面提升航空食品流程效率与质量,探讨了高空条件下航空食品在营养、安全与风味方面的特殊性,尤其是乘客对食品感知的差异性变化。系统阐述了航空食品在加工、冷链物流直至成品监管的全链条品质控制新技术与新举措,并展望了航空食品行业在原材料溯源、智能化生产模式、功能性包装创新以及复热技术开发的发展趋势。

**关键词:**航空食品;加工过程;冷链监测;品质控制

## Special characteristics of airline food and quality control during processing, transportation, and storage

ZHANG Qian<sup>1</sup> YUAN Yuan<sup>2</sup> TAO Yuan<sup>2</sup> YAN Bowen<sup>2</sup>

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Wuxi Institute of Technology, Wuxi, Jiangsu 214121, China;

2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** To comprehensively improve the whole-process efficiency and quality of airline food, this paper introduced the special characteristics of airline food regarding the nutrition, safety, and flavor under high altitude conditions, especially the changes in passengers' perception of food. The novel technologies and initiatives for quality control throughout the entire supply chain, from processing to cold chain logistics and to the supervision of finished products were described systematically. Furthermore, the development trends of the airline food industry were discussed, including raw material traceability, intelligent production modes, functional packaging innovation, and development of reheating technology.

**Keywords:** airline food; processing; monitoring of cold-chain logistics; quality control

航空食品是供航空旅客及机组人员在民用航空器上食用或饮用的食品,分为航空配餐和外购即食食品两类。航空配餐食品通常是在地面上的厨房制备,然后在航班上加热或再加工。而外购即食食品是在航班上直接发放食用,无需加热或再加工。中国的航空食品行业起源于20世纪初。最初航空公司提供的食物很简单,此外,还会发放口香糖让旅客在咀嚼中缓解乘坐飞机时的不适。新加坡航空公司于1998年便成立了国际烹饪顾问团并引进各国厨师,旨在提供更高标准和品质的国际化航空餐点服务<sup>[1]</sup>。南方航空公司陆续引进先进的生产设备提高航空食品的生产效率,充分利用国内外100余个配餐点的资源,为旅客提供多元健康的餐食体验<sup>[2]</sup>。自2003年东航食品公司组建以来,东方航空公司不断打造品牌特色餐饮并探索航空配餐生产的新模式,以航空配餐为主,集半成品制作和预制餐食供应为一体的综合性企业,逐步成

为中国规模最大的航空配餐板块之一<sup>[3]</sup>。高质量和多样化的航空食品对于提升乘客体验、树立航空公司良好形象具有重要意义。

### 1 航空食品营养、安全与风味的特殊性

#### 1.1 航空食品的特殊营养要求

飞行过程中,乘客需要适当的营养支持以应对高海拔、气压变化以及长时间飞行而产生的旅途疲惫感,因此提供健康和均衡的航空食品非常必要。此外,在高空飞行状态下,特别是夜间,噪声作为一种非特异性压力源,可激活自主神经系统和内分泌信号,引发一系列情绪反应<sup>[4]</sup>。也有研究表明长时间的噪声暴露会产生过量的活性氧,从而增加动脉高血压、中风等心脏代谢疾病的风险,而口服抗氧化维生素C可改善氧化应激状况<sup>[5-6]</sup>。多个时区的联程航班极易引发乘客的睡眠障碍和情绪变化<sup>[7]</sup>。轻度缺氧和低湿度的舱内环境加之活动范围受限,

通信作者:闫博文(1987—),男,江南大学副研究员,博士。E-mail: yanbowen@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2024-09-12 改回日期:2024-12-03

长途飞行也可能增加形成静脉血栓和水肿的风险<sup>[8]</sup>。由此可见,航空食品具备能量和营养供给作用的同时,对保障旅客生命健康有重要意义。

## 1.2 航空食品的安全性要求

与地面普通食品不同,并非所有的食品原料都可以成为航空食品的原材料。这是因为:① 飞行过程中经常出现颠簸,而飞机上医疗保障水平有限,因此含有常见致敏原的食品、有骨头或鱼刺的肉制品通常不被纳入;② 飞机内空间狭小、人员聚集,空气循环不畅,因此,一些有强烈味道的食品或佐料也会被排除在外,例如大葱、大蒜、洋葱、酸笋、臭豆腐、臭鳊鱼、榴莲等具有刺激味道食品及佐料。航空食品在确保原材料新鲜、产品不宜变质腐败外,一些汤类、羹类及类似液体的餐点(酸奶、牛奶等饮料除外),由于存在外流、飞溅的可能,往往也会被排除。

## 1.3 高空环境中乘客嗅觉、味觉等感知变化

飞行过程中环境噪声、气流颠簸、高空低压等因素都会引发人嗅觉和味觉发生选择性变化,从而对食品感知产生差异。有研究<sup>[9]</sup>发现,在低压(约 1 945 m 高空)环境下,白噪声刺激会损害人体对酸味和甜味的敏感性。此外,在巡航阶段的 0.08 MPa 低气压环境也会损害味觉功能。研究者<sup>[10]</sup>通过调节湿度、温度和压力等相关参数来模拟飞行巡航阶段的状态,嗅闻和品尝不同食品的结果证实在 0.76 MPa 的低压条件下,多数食品具有更高的味道和气味阈值,盐、糖、谷氨酸和大多数气味阈值明显增加,清淡和新鲜的味道减少,而浓郁的味道则持续存在。基于上述研究,近年来多家航空公司也不断推出独具风味的航空美食。四川航空充分挖掘地方文化特色,精细调味成功将川菜的咸香麻辣与航空食品融合,为旅客打造万米高空的味蕾享受<sup>[11]</sup>。

值得注意的是,客舱的空气质量会对乘客的飞行体验造成重要影响,恶劣的空气条件会导致乘客头痛、疲劳和注意力分散等。有研究<sup>[12]</sup>发现,在飞机起飞至巡航阶段,机舱内的二氧化碳含量显著增加,呼吸产生的二氧化碳分散到整个机舱,平均体积分数可达 1.399%。而二氧化碳体积分数在 1.000% 及以上常被视为低质量空气<sup>[13]</sup>,长时间处于低质量空气中,乘员的身体状态、嗅觉、味觉乃至听觉会产生何种变化,目前尚未见报道,需要科研人员深入研究,并根据乘客的身体状态研制相应的航空食品,以改善乘员的航空体验。

## 2 航空食品加工流程

相比于日常食用的食品,航空食品的消费场景特殊,加工过程和相关的卫生标准更加严苛。不同于市售的预制食品,贮藏时效短,每一份航空食品都需要更精准的质量控制和统一性。受限于高空的物理环境和机舱有限的复热手段,食材选择会尽可能避免易引发过敏、复热后食用品质变差的原料。航空食品的标准生产流程(如图 1 所示):原料经采购和验收之后,通常经低温贮藏维持其新

鲜程度以满足后续加工需求;工作人员根据航班信息和具体需求制定餐谱,根据餐谱将相关的原料解冻或回温并进行初步加工和热加工;加工完成的食品需在规定的时间内速冻/速冷至指定温度,随后在低温环境下对餐食进行分装及装配。

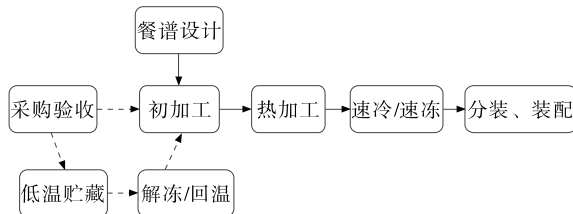


图 1 航空食品的标准生产流程

Figure 1 General production process of airline food

## 2.1 原料选择和采购

原料的选择和采购是航空食品加工的第一环节,高标准的采购和验收有利于提高航空食品的安全性。同时,根据航班时间,航空食品通常会提前在指定的中央厨房制备并经速冻或速冷后在低温下贮藏,后在航班上进行复热或再加工。上述特殊的降温 and 升温过程会影响食品品质,由此限制了航空食品原料选择的范围。例如,高含水量的食品在冷冻过程中易形成冰晶从而破坏细胞结构,在后续加工过程中易发生大量汁液流失的现象,影响其营养和感官品质。因此,航空食品原料的选择需充分考虑原料的加工特性和耐受性。

## 2.2 航空食品加工过程

根据航班既定的餐谱,工作人员将严格按照相关标准对食品进行初加工、热加工和速冻/速冷。

**2.2.1 初加工** 航空食品原料的初加工包括洗净、切分等,在此过程中需要充分防止微生物交叉污染。例如,禽蛋使用前应经过清洗和消毒、不同类型原料(如动物性原料和植物性原料)的清洗和加工的器具不得混用等。此外,由于航空食品批次生产的特性,冷藏技术在航空食品初加工过程中扮演着重要角色<sup>[14]</sup>。针对高蛋白质或碳水化合物食品原料以及低酸性原料,尤其应严格控制其在常温下的暴露时长,初加工后应及时进行后续加工操作或对其进行冷藏处理。

**2.2.2 热加工** 根据航空食品的卫生规范,热加工应确保食品的中心温度达到规定的最低温度限制并至少维持 15 s。在达到熟化和杀菌的条件下,食品中营养素的减损保护是航空配餐公司尤其需要关注的方向。此外,也需考虑热加工对食品感官品质的影响。蔬菜水分析出及色泽变化<sup>[15]</sup>、肉制品过熟味<sup>[16]</sup>等问题是航空食品普遍面临的品质问题。采用合适的热加工工艺或者外源添加天然抗氧化剂可以有效保持食品营养成分在热加工过程中不被破坏<sup>[17]</sup>并维持食品的感官品质。

**2.2.3 速冷/速冻** 室温条件下微生物易繁殖,所以冷链

食品热加工后须立即进行速冷或速冻,后进行冷藏或冷冻保藏。工作人员应记录速冷/速冻初始和结束的时间及温度,以确保该过程符合安全规范。研究表明,不同速冷/速冻工艺及条件会影响食品的营养及感官品质。例如, -18℃冷冻虾肉的组织破坏严重,解冻损失大、复热后质构较差;而更低的冷冻温度有助于维持虾肉的弹性、咀嚼性等质构特性<sup>[18]</sup>。米饭冷却时淀粉老化会导致其出现质地变硬、干裂粗糙等品质劣变,在一定程度上提高冷冻速率可以降低淀粉老化程度,提升口感和消化率<sup>[19]</sup>。除传统冷冻工艺外,近年来一些新型冷冻技术已被应用于冷冻食品的品质改良,如磁场辅助冷冻<sup>[20-21]</sup>、静电场辅助冷冻<sup>[22]</sup>等技术,其在缩短冷冻时间、减小冰晶尺寸等方面具有显著优势。未来可推广上述技术在航空食品方面的应用,从而提高航空食品的品质。

### 2.3 分装与装配

根据国家标准<sup>[23]</sup>,航空食品分装、装配应在清洁的专间进行,其中冷链食品应根据操作间的环境温度限定食品出冷藏库到操作完毕入冷藏库的时长。在保障航空食品卫生安全的同时,需保持餐食分装与装配的质量和品类统一化。因此,每份餐食在分装过程都需要提前进行称量后分装。不同舱位的食品和定制的特殊餐食在包装和标签等方面需进行差异化区分。自动化<sup>[24]</sup>或半自动化分装设备、基于质量和图像的传感器<sup>[25]</sup>可用于提高航空食品分装效率、降低批次餐食的差异、提升航空食品装配质量。

## 3 航空食品的储运要求

由于高空中食品复热条件的限制,为提供高品质的飞行体验,航空食品的储运显得尤为关键。在面对多程餐或航班延误等复杂情况,严格的储运标准是保障航空食品安全的基本要求<sup>[26]</sup>,符合标准的冷链运输和时间控制能够有效保障其安全性和高品质。图2是航空食品从成品到装机验收的标准流程。

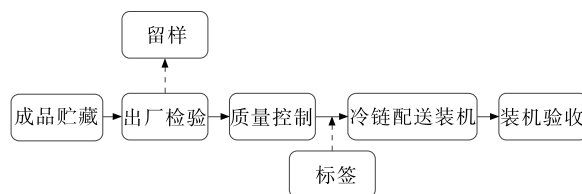


图2 航空食品储运的标准流程

Figure 2 General process of storage and transportation of airline food

遵守冷链运输标准对于保持航空食品的安全性和质量至关重要。航空公司和供应商应确保食品在整个运输过程中保持适当的温度控制,而且在运输过程中应进行适时的监测和记录,提供食品的可追溯性,并确认其符合相关的安全标准。全球范围内现行的一些适用于航空餐成品冷链运输的标准见表1。在中国,根据食品的类型,冷链航空食品在配送和装机过程中,其所处环境温度应低于5℃,自出成品冷库到旅客食用的时限应不超过24 h<sup>[23]</sup>。若储运温度升高,则出冷库到食用的时限也应随之缩短。因此,航空食品的储运应根据航班计划和实际情况确定适当的温度范围,以防止食品品质劣变。此外,标准规定航空食品必须使用适当的密封包装,以防止外界空气、湿气和细菌的进入<sup>[27]</sup>。即便飞机上存储空间有限,航空食品在储运过程中仍应与其他物品、化学品或有害物质分开贮藏,以避免交叉污染。

## 4 品质控制和安全管理的新技术

航空食品的品质控制和安全管理的新技术。有效的安全管理可提升乘客满意度,避免经济损失,维护航空公司声誉。通过严格的品质控制,航空公司能够提供高质量的餐饮服务,增强乘客的旅行体验。

### 4.1 加工端——杀菌技术

如何能高效杀菌并维持产品品质一直是食品行业关

表1 各国航空食品冷链运输标准

Table 1 Standards for cold-chain transportation of airline food in some countries

| 颁布主体            | 标准名称                                | 主要内容                                        |
|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| 中国国家食品药品监督管理总局  | 航空食品卫生规范<br>(GB 31641—2016)         | 航空食品的原料和成品采购、加工、贮藏、运输及机上供餐服务等环节的操作规范及卫生控制要求 |
| 加拿大食品检验局(CFIA)  | Safe Food for Canadians Regulations | 针对加拿大食品供应链中的安全食品法规,建立追溯系统,能够快速确定食品的来源和分销情况  |
| 新加坡民航总局(CAAS)   | Civil Aviation Regulations          | 针对新加坡境内运营的航空公司,规范航空食品运输和贮藏,包括食品卫生和包装等方面的要求  |
| 澳大利亚民航安全局(CASA) | Civil Aviation Order (CAO) 20.16.3  | 关于航空食品运输的指令,包括食品贮藏、食品接触材料等方面的要求             |
| 美国联邦航空管理局(FAA)  | Advisory Circular (AC) 121          | 航空公司在美国境内、国际和补充航线运营时的食品卫生和安全要求              |
| 英国零售商协会(BRC)    | Global Standard for Food Safety     | 针对食品安全的全球标准,包括食品供应链中的冷链运输和贮藏的要求             |

注的焦点,也是保证航空食品安全和质量的关键。传统采用热蒸汽进行杀菌,但高温往往会带来过熟味等品质下降。目前,已有相关研究报道了微波/射频加热、低温等离子、光动力杀菌等技术应用于食品杀菌。

微波是一种频率在 300 MHz~300 GHz 的电磁波<sup>[28]</sup>,食品加工中的常用频率为 915,2 450 MHz。在此频率范围内微波能量与食品中分子发生作用,引发分子之间的摩擦、碰撞和旋转产生热量,导致食品中微生物的细胞结构受损、胞内核酸及蛋白质等活性物质失活。微波加热常用于预包装均质和非均质食品杀菌<sup>[29]</sup>。相比于微波段,射频段电磁波因具备更深的穿透深度,更适合大体积食品的杀菌,其目前已被广泛应用于预包装食品杀菌<sup>[30]</sup>。微波和射频杀菌技术具有快速、高效等特点,但由于电磁波与食品本身存在交互作用,需根据相应食材调整对应杀菌时间和温度,以保证杀菌效果。

低温等离子体处理是一种新兴的冷杀菌技术,其通过高频电场和低温气体的互作产生活性粒子,活性粒子能与细菌和病毒表面的有机物质发生反应并破坏其核酸结构,从而引起食品中微生物的死亡<sup>[31]</sup>。由于低温等离子体杀菌在常温常压下进行,经过该技术处理的果蔬营养物质保留率显著高于传统热处理<sup>[32-33]</sup>。此外,有研究<sup>[34]</sup>表明,低温等离子体对抑制鱼肉等食品中脂质氧化也具有良好的效果。就技术可普及度和经济性而言,低温等离子体处理操作简单且效率高,是一种经济友好的杀菌技术<sup>[33]</sup>。

光动力杀菌技术需在氧气存在的环境中应用,其利用光源激活食品中存在的或外源性光敏剂以生成活性氧,活性氧产生氧化应激破坏食品中微生物的细胞结构和代谢过程从而导致微生物在短时间内不可逆死亡。该技术应用于食品领域的最大优势之一在于不易使有害微生物产生耐受性<sup>[28]</sup>。在实际应用中,姜黄素、赤藓红、核黄素等是天然且安全性高的食品级光敏剂。例如,在肉制品中添加低剂量的姜黄素并将其暴露在 LED 等光源中,可实现肉制品的杀菌<sup>[35]</sup>。此外,光动力杀菌技术对果蔬的杀菌效率较高<sup>[36-37]</sup>,将该技术应用于航空食品水果切块及冷盘蔬菜中也具有较大的潜力,可在保持其营养和感官品质的同时实现高效杀菌。

未来,可将上述杀菌技术单独或协同应用于航空食品中,严格按照航空食品的杀菌要求控制工艺参数,以确保杀菌效果和对食品品质的影响满足相关安全标准。

#### 4.2 物流端——温度监控

航空食品储运工程中的温度波动会增加微生物繁殖的风险,同时也对食品感官品质存在负面影响<sup>[38]</sup>。稳定的储运温度是航空食品品质控制的重要因素。因此,在储运过程中对其温度、湿度等因素进行实时监控非常必要。

红外线传感器、温度传感器等技术现已被广泛应用

于航空食品的储运过程,上述技术能够精准调控温度以达到多种食品贮藏的最优温度,保障航空食品的品质控制。例如,三亚汉莎航空食品有限公司研发了一种能够对冷库内温度环境状态实时监测的航空食品冷库控制系统,可对存放在不同冷库间的食品进行冷冻解冻或低温贮藏<sup>[39]</sup>。红外成像技术能够实时地获取食品的温度分布图像<sup>[40]</sup>,相比于单点的温度传感器,其监测范围更广,是可应用于航空食品储运过程温度检测的潜在技术。此外,超声波技术可用于检测食品冻结状态,其在冷冻加工领域已得到广泛应用<sup>[41]</sup>。未来可将其用于监测航空食品储运过程中的冻结状态,以作为温度的侧面验证指标。同时,上述技术应提供可追溯性的数据记录,方便监管机构对航空食品储运过程的监管和审核。

#### 4.3 监管端——无损快速检测

食品快速检测技术因具有实时性、高灵敏度、非破坏性等优势备受关注。航空食品行业受到严格的法规和监管约束,开发适用于航空食品的快速检测技术可以提高工作效率和检测的精度和可信度。

高光谱成像技术通过采集食品的高光谱图像,可以获取食品在不同波段下的光谱特征,其中包含了色彩、反射率、吸收率等信息,通过分析光谱数据,可以识别食品的成分、判定食品的新鲜程度、检测食品的污染等<sup>[42-43]</sup>。例如,通过数字图像提取被测样品的特征并进行鉴别,能够实现对新鲜鱼片和冷冻—解冻鱼片精准分类<sup>[44]</sup>。高光谱成像技术具有高分辨率、高灵敏度和高准确性,且能够实现对多个样品的同时检测,提高检测的效率。目前,已有监管部门应用该技术检测来保障航空食品安全。

计算机视觉系统是利用数字图像处理和模式识别方法,通过计算机的图像分析和算法处理,实现对食品质量和安全性的快速、准确评估。计算机视觉系统在食品无损检测中已有广泛报道<sup>[45-46]</sup>,例如鱼肉的新鲜度评估、果蔬的外观检测和分级、米饭和面粉的杂质检测等。同时,计算机视觉技术还可以应用于食品包装的检测,确保包装完整性和真实性<sup>[47]</sup>。然而,计算机视觉系统在使用过程中仍面临一些挑战。食品的多样性和复杂性可能导致算法的适用性和可靠性有所不足,仍需大量试验数据来优化模型的准确性和稳定性。已有少量监管部门将计算机视觉系统应用于航空食品的检测,其在批量化检测方面具有较大优势。对于多批次航空食品质量的检测还需要借助数据分析和模式识别技术,可提高食品生产效率和品质控制,同时为食品质量追溯提供重要的数据支持。

### 5 未来发展趋势

航空旅客对食品安全、营养和美味的多重需求与日俱增。为满足这些需求,航空食品行业的未来发展应着重于下述方向。

#### 5.1 原料溯源

航空食品供应链的可追溯性是确保食品原材料来源

可靠和质量稳定的关键因素之一。对于原材料溯源策略的重视不仅有助于确保食品的安全和质量,还提高了航空公司的声誉和客户满意度。在中国,建立航空食品供应链的可追溯性已有一定的技术基础。通过引入新技术和加强行业合作,中国航空食品行业正朝着更具可追溯性和持续性的原材料供应链方向发展。

区块链技术可以提供去中心化和不可篡改的记录,荷兰某航空公司已将区块链用于食品供应链<sup>[48]</sup>,增强食品原材料从来源到运输过程的透明度和可信度。此外,提供跨界合作渠道是加强航空食品溯源的有效策略,航空公司与食品供应商、农场、生产商等相关责任方建立数据共享的协作机制,密切合作以确保食品原材料从生产到运输的全链路溯源。

## 5.2 智能化生产

航空食品的智能化生产具有巨大发展潜力。航空食品公司通过引入自动化设备和机器人技术,可实现生产线的自动化或半自动化<sup>[49-50]</sup>,从而提高生产效率<sup>[51]</sup>,推动航空食品行业向更智能和可持续的发展方向迈进。

智能化生产与供应链管理整合可以提高供应链的可见性和效率。利用物联网技术和传感器能够实时追踪食品原材料的温度和湿度等信息,实现供应链的实时监控和协调<sup>[52]</sup>。利用先进的数据分析技术,可以监测和优化航空食品的生产过程,实现更高效的生产和资源利用。基于实时监控数据,工作人员能够迅速作出调整和决策,从而优化食品质量和供应链效率。

此外,智能化生产还能够实现旅客饮食的多元化需求。根据旅客的口味偏好和营养需求,定制专属的航空食品,真正实现个性化服务,提供更加满意的航空食品。将3D打印技术应用于开发航空食品具有巨大的潜力,其可根据设定的程序实现自动操作,减少人员接触,提高航空食品制作过程的安全性和标准化程度<sup>[53]</sup>。前期研究<sup>[54]</sup>表明,微波3D打印技术与酶法协同作用可提高鱼糜制品的成型质量,实现打印过程的自凝胶化。因此,3D打印技术联合其他生物或化学技术未来可应用于航空食品中,有望提高定制化航空食品的生产效率和品质。但是,目前3D打印技术成本普遍较高、打印复杂结构食品耗时较长,并且公众对3D打印食品的接受度存在差异,将其应用于航空食品智能化生产仍需航空食品公司和3D打印技术开发人员的共同努力。

## 5.3 新型包材和涂层开发

目前,航空食品的包装普遍以镀铝膜为主,镀铝膜不透明且不适宜用于微波加工,资源和能源消耗量大,无法回收。因此,开发新型包材和涂层应满足航空食品行业对可靠、卫生和环保的包装需求。中国航天科技集团某研究所报道了一种可用于食品包装的具有高透明度和柔性的透明阻隔膜,该材料能有效防止氧气等气体渗透,从而抑制好氧微生物的生长,达到食品保鲜的效果<sup>[55]</sup>。随

着其生产成本的降低,将该材料应用于航空食品包装具有良好前景。功能性可食用涂层作为一种环境友好的材料是食品加工和包装行业的热点<sup>[56]</sup>,其已被广泛应用于包装果蔬、乳制品、水产品 and 肉制品,达到抗菌和抗氧化的目的,能有效保留食品的营养价值<sup>[57]</sup>。但在航空食品中应用功能性涂层需要考虑其在温度波动时的稳定性。

包材和涂料的环保性也是必须考虑的方面。随着全民环保意识的增强,航空食品也在朝着更可持续和生态友好的方向发展。可降解包装材料具有环境友好性,可以在一定期限内分解为可再利用的物质,有助于减少航空食品产生的废弃物,减少对环境的负面影响<sup>[58]</sup>。例如由蚕丝和玻璃纤维共混制备的抗霉菌航空食品袋不仅结构强度大、耐水耐油,同时废弃后在富氧及微生物的作用下会自动分解生成二氧化碳和水,不会造成环境负担<sup>[59]</sup>。

## 5.4 复热新技术开发

目前,民航飞机上复热航空食品最成熟的工具是热对流式的烤箱或餐车内置电热板。新技术的开发及应用可以提高航空食品的复热效率、加热均匀性和品质。缩短复热时间并保证复热食品的营养和口感是复热新技术的未来发展方向。同时,改进复热设备设计、使用节能材料和优化加热工艺等方式可以减少能源消耗并降低对飞机系统的负荷<sup>[60]</sup>,提高航空食品复热加工的可持续性。

红外加热技术是一种非接触加热方式,在食品加工中主要应用在干燥和灭菌等领域,其加热过程不需要传热介质,可以避免介质因素引发的热量散失。因其具有较高的加热速率,辅助传统的食品加热工艺可以极大降低能耗<sup>[61-62]</sup>。此外,红外加热设备的自动化控制程序高且设备结构紧凑,在飞机上使用该技术存在较大优势。但是不同食物组分对红外吸收效率的差异可能会导致食品加热不均匀,热量在食品中传递速率的差异也会影响红外加热效果。因此,若未来将其应用在航空食品加热时,需针对特定的食品种类设定对应的红外加热工艺参数。

相比于红外加热,微波技术在食品复热中的应用更加广泛。优化微波的功率和时间能够提高食品加热均匀性并维持食品品质。数学建模和仿真模拟可以精准预测食品加热过程,基于模拟技术针对微波炉的设计与改良可以在很大程度上提升加热均匀性<sup>[63]</sup>。此外,自适应谐振频率策略能够针对性地选择微波频率,在提高加热效率的同时加强能量利用效率<sup>[64]</sup>。虽然微波加热技术具有上述优势,但飞行过程中过载和高频振荡带来的冲击等情况限制了微波技术大规模用于航空食品的复热。据官方报道<sup>[65]</sup>,2018年南方航空波音787-9飞机首次配置了微波炉用于提供单独加热服务,但是相比于外置烤箱批量加热航空食品的效率,小型微波炉仍存在明显差距。因此,开发微波满载大容量加热设备用以复热航空食品是未来的发展趋势。

## 6 结语

良好的航空食品品质可以为乘客提供舒适和愉快的旅行体验,从而提升航空公司的形象和竞争力。中国航空食品行业仍在发展阶段,并且具有极大的发展空间。更高效多元的航空食品加工方式,更安全智能的冷链运输技术和更快捷精准的食品检测手段必然进一步促进航空食品行业的蓬勃进步,给予航空服务业和航空旅客更多信任和选择。同时,开发具有特殊功能(如抗疲劳、高维生素、低糖低脂等)的航空食品具有重要意义;利用可再生资源 and 环保材料来生产航空食品,以及如何减少生产过程中的废弃物和能源消耗也是未来的研究方向。

### 参考文献

- [1] CHANG Z Y, YEONG W Y, LOH L. Critical success factors for inflight catering services: singapore airport terminal services' practices as management benchmarks[J]. The Tqm Magazine, 1997, 9(4): 255-259.
- [2] 刘建学. 南航配餐, 打造优质安全的“空中美餐”: 走进中国南航公司航空食品部郑州航空食品厂[J]. 空运商务, 2009(16): 40-43.  
LIU J X. China southern airline catering, creating high-quality and safe "meals in the air": into zhengzhou aviation food factory of China southern airline's aviation food dept[J]. Air Transport & Business, 2009(16): 40-43.
- [3] 任腾飞. 东航食品: 从品牌突围到品牌进阶[J]. 国资报告, 2020(1): 91-94.  
REN T F. China Eastern Airlines Co Ltd: from brand breakout to brand advancement[J]. State-Owned Assets Report, 2020(1): 91-94.
- [4] SCHMIDT F P, BASNER M, KROGER G, et al. Effect of nighttime aircraft noise exposure on endothelial function and stress hormone release in healthy adults[J]. European Heart Journal, 2013, 34(45): 3 508-3 514.
- [5] THOMAS M, METTE S, FRANK S, et al. The adverse effects of environmental noise exposure on oxidative stress and cardiovascular risk[J]. Antioxidants & Redox Signaling, 2018, 28(9): 873-908.
- [6] SAID M A, EL-GOHARY O A. Effect of noise stress on cardiovascular system in adult male albino rat: implication of stress hormones, endothelial dysfunction and oxidative stress[J]. General Physiology and Biophysics, 2016, 35(3): 371-377.
- [7] WATERHOUSE J, REILLY T, ATKINSON G, et al. Jet lag: trends and coping strategies[J]. The Lancet, 2007, 369(9 567): 1 117-1 129.
- [8] MITTERMAYER M, FRIES D, INNERHOFER P, et al. Formation of edema and fluid shifts during a long-haul flight[J]. Journal of Travel Medicine, 2003, 10(6): 334-339.
- [9] VERONIKA S, TORSTEN R, ROBERT K, et al. Does ambient noise or hypobaric atmosphere influence olfactory and gustatory function?[J]. PLoS One, 2018, 13(1): 1-8.
- [10] ANDREA B F, DINO B, FLORIAN M, et al. Odor and taste perception at normal and low atmospheric pressure in a simulated aircraft cabin[J]. Journal Für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 2011, 6(1): 95-109.
- [11] 民航资源网. 舌尖上的旅程: 四川航空公司餐食管理侧记[EB/OL]. (2021-10-25) [2024-10-23]. <https://news.carnoc.com/list/571/571663.html>.  
Civil Aviation Resource Net of China. A culinary journey: a side note on Sichuan airlines' meal management. [EB/OL]. (2021-10-25) [2024-10-23]. <https://news.carnoc.com/list/571/571663.html>.
- [12] DEMIRARSLAN K O, BASAK S. Evaluation of cabin air quality in terms of CO<sub>2</sub> and temperature for different commercial aircrafts[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 21(2): 1 865-1 874.
- [13] TUDIWER D, KORJENIC A. The effect of an indoor living wall system on humidity, mould spores and CO<sub>2</sub>-concentration [J]. Energy and Buildings, 2017, 146: 73-86.
- [14] ZONG L, GAO H, CHEN C W, et al. Effects of starch/polyvinyl alcohol active film containing cinnamaldehyde on the quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) proteins during frozen storage[J]. Food Chemistry, 2022, 389: 133065.
- [15] WILLIAMS P G, ROSS H, MILLER J C B. Ascorbic acid and 5-methyltetrahydrofolate losses in vegetables with cook/chill or cook/hot-hold foodservice systems[J]. Journal of Food Science, 1995, 60(3): 541-546.
- [16] KERLER J, GROSCH W. Odorants contributing to warmed-over flavor (WOF) of refrigerated cooked beef[J]. Journal of Food Science, 1996, 61(6): 1 271-1 275.
- [17] AKBIYIK T, SONMEZOGLU I, GUCLU K, et al. Protection of ascorbic acid from copper(II)-catalyzed oxidative degradation in the presence of fruit acids: citric, oxalic, tartaric, malic, malonic, and fumaric acids[J]. International Journal of Food Properties, 2012, 15(2): 398-411.
- [18] 张强, 代文婷, 金新文. 不同贮藏温度对凡纳滨对虾理化性质的影响[J]. 上海农业学报, 2016, 32(1): 37-42.  
ZHANG Q, DAI W T, JIN X W. Effects of different storage temperature on the physical and chemical properties of *Litopenaeus vannamei*[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2016, 32(1): 37-42.
- [19] 黄梅花. 速冻调理米饭套餐配菜品质控制技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 28-30.  
HUANG M H. Study on quality control technology of quick-frozen instant rice with dishes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 28-30.
- [20] RUAN J W, WANG H Q, ZHAO J P, et al. Effect of magnetic field on frozen food quality characteristics[J]. Food Engineering Reviews, 2024, 16(3): 396-421.
- [21] 周荣梅, 苏伟, 母应春. 电磁场保鲜和冷冻贮藏对贵州黄牛肉品质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(4): 14-19.

- ZHOU R M, SU W, MU Y C. Effects of electromagnetic field preservation and frozen storage on the quality of Guizhou yellow beef[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2022, 58(4): 14-19.
- [22] ZHANG Y Y, ZHANG S Q, WANG B R, et al. Effects of electrostatic field-assisted freezing on the functional properties and aggregation behavior of gluten[J]. Food Physics, 2024, 1: 100004.
- [23] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 航空食品卫生规范: GB 31641—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Medical Products Administration. National food safety standard-hygienic specification for in-flight meal: GB 31641—2016[S]. Beijing: China Quality and Standards Press, 2016.
- [24] PHANDEN R K, CHAUDHARY T, SRIVASTAVA P, et al. Design of a robotic arm equipped fully automated burger assembly machine[C/OL]// Second International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication Sustainable Technologies. (2002-07-01) [2024-10-23]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9807651>.
- [25] 陈卫东, 刘超, 王莹, 等. 基于机器视觉的食品瓶罐包装缺陷检测研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 185-191.
- CEHN W D, LIU C, WANG Y, et al. Research progress on inspecting food bottle and can packaging shortcomings based on machine vision[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 185-191.
- [26] 崔璟润. HU 不正常航班管理问题及应对策略研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023: 10-12.
- CUI J R. Research on management problems and countermeasures of Hainan airlines non-normal[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023: 10-12.
- [27] 贝荣华, 段逸品, 林洁, 等. 利用真空衰减法测试预包装食品密封性[J]. 包装工程, 2024, 45(3): 147-152.
- BEI R H, DUAN Y P, LIN J, et al. Test on integrity of packaging for prepackaged foods by vacuum decay method[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(3): 147-152.
- [28] HONG Y K, LIU F, TANG Z W, et al. A simplified approach to assist process development for microwave assisted pasteurization of packaged food products[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 68: 102628.
- [29] SONIA A, SMITH C J, THOMPSON D A, et al. Microwave-induced thermal sterilization: a review on history, technical progress, advantages and challenges as compared to the conventional methods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 433-442.
- [30] WANG J, KUNCHALEE L, WANG Y F, et al. Radio-frequency heating of heterogeneous food-meat lasagna[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 183-193.
- [31] SAKUDO A, YAGYU Y, ONODERA T. Disinfection and sterilization using plasma technology: fundamentals and future perspectives for biological applications[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(20): 5 216.
- [32] 田真. 低温等离子体(PAW-DBD)对蓝莓杀菌效能及贮藏品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2022: 5.
- TIAN Z. Effects of cold plasma (PAW-DBD) on sterilization efficiency and storage quality of blueberry[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022: 5.
- [33] 李芮. 低温等离子体活化水对鲜切莲藕贮藏品质的影响及机理初探[D]. 南京: 南京农业大学, 2022: 67-68.
- LI R. Preliminary study on the effects and mechanism of plasma-activated water on preservation of fresh-cut lotus root [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022: 67-68.
- [34] 符婉丽, 桑晓涵, 陈姑, 等. 低温等离子体对金鲳鱼蛋白质和脂质氧化的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(22): 15-22.
- FU W L, SANG W L, CHEN G, et al. Effects of cold plasma treatment on protein and lipid oxidation of *Trachinotus ovatus* [J]. Food Research and Development, 2022, 43(22): 15-22.
- [35] CORREA T Q, BLANCO K C, GARCIA É B, et al. Effects of ultraviolet light and curcumin-mediated photodynamic inactivation on microbiological food safety: a study in meat and fruit[J]. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, 2020, 30: 101678.
- [36] LUKSIENE Z, BROVKO L. Antibacterial photosensitization-based treatment for food safety[J]. Food Engineering Reviews, 2013, 5(4): 185-199.
- [37] TORTIK N, SPAETH A, PLAETZER K. Photodynamic decontamination of foodstuff from *Staphylococcus aureus* based on novel formulations of curcumin[J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2014, 13(10): 1 402-1 409.
- [38] GAO Z W, ZHANG D Q, WU R Y, et al. Fluctuation of flavor quality in roasted duck: the consequences of raw duck preform's repetitive freeze-thawing[J]. Food Research International, 2024, 187: 114424.
- [39] 焦建鹏, 刘伟民, 李根, 等. 一种航空食品冷库控制系统: CN212778189U[P]. 2021-03-23.
- JIAO J P, LIU W M, LI G, et al. An aviation food cold storage control system: CN212778189U[P]. 2021-03-23.
- [40] VADIVAMBAL R, JAYAS D S. Applications of thermal imaging in agriculture and food industry: a review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(2): 186-199.
- [41] DAS K, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Ultrasound generation and ultrasonic application on fresh food freezing: effects on freezing parameters, physicochemical properties and final quality of frozen foods[J]. Food Reviews International, 2023, 39(7): 4 465-4 495.
- [42] SUN D W, PU H B, YU J X. Applications of hyperspectral imaging technology in the food industry[J]. Nature Reviews Electrical Engineering, 2024, 1: 251-263.
- [43] PATEL D, BHISE S, KAPDI S S, et al. Non-destructive hyperspectral imaging technology to assess the quality and safety of food: a review[J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2024, 6(1): 69.
- [44] OTTAVIAN M, FASOLATO L, SERVA L, et al. Data fusion

- for food authentication: fresh/frozen-thawed discrimination in west African goatfish (*Pseudupeneus prayensis*) fillets[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(4): 1 025-1 036.
- [45] MADHUBHASHINI M N, LIYANAGE C P, ALAHAKOON A U, et al. Current applications and future trends of artificial senses in fish freshness determination: a review[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(1): 33-50.
- [46] HONG H M, YANG X L, YOU Z H, et al. Visual quality detection of aquatic products using machine vision[J]. Aquacultural Engineering, 2014, 63: 62-71.
- [47] 何昊. 基于机器视觉的食品包装印刷缺陷检测关键技术研究及应用[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023: 57-58.
- HE H. Key technology research on printing defect detection of food packaging based on machine vision research and applications[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023: 57-58.
- [48] WEI K J, LU S. On german cold-chain logistics management and its reference function to China's logistics[J]. Journal of Guangxi Vocational and Technical College, 2012, 5(6): 34-39.
- [49] 陈廷峰. 用于航空食品中烟熏鸡扒的生产工序的烟熏炉: CN201822014243.7[P]. 2019-08-16.
- CHEN Y F. Smoking ovens for the production process of smoked chicken steaks for airline foodstuffs: CN201822014243.7[P]. 2019-08-16.
- [50] 陈廷峰. 用于航空食品中日式烟肉的生产工序的斩拌机: CN201822041558.0[P]. 2019-09-06.
- CHEN Y F. Chopper for the production process of Japanese-style smoked meat in aviation food products: CN201822041558.0[P]. 2019-09-06.
- [51] 王瑛. 一种航空食品油炸设备: CN115253513A[P]. 2022-11-01.
- WANG Y. An aviation food frying equipment: CN115253513A [P]. 2022-11-01.
- [52] CHEN Q. The application of adaptive operation decision technology and optimization algorithm model of smart supply chain oriented to the internet of things[J]. IETE Journal of Research, 2021: 1-12.
- [53] GUO J, ZHANG M, LAW C L, et al. 3D printing technology for prepared dishes: printing characteristics, applications, challenges and prospects[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(31): 11 437-11 453.
- [54] ZHAO Z L, WANG Q, YAN B W, et al. Synergistic effect of microwave 3D print and transglutaminase on the self-gelation of surimi during printing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 67: 102546.
- [55] 中国航天报. 航天科技五院 510 所自主研发透明氧化物高阻隔产品侧记[EB/OL]. (2024-04-08) [2024-10-23]. <https://m.spacechina.com/n2014789/n2014809/c4080142/content.html>.
- China Space News. Sidelines on transparent oxide high barrier products independently developed by institute 510 of the fifth academy of aerospace science and technology[EB/OL]. (2024-04-08) [2024-10-23]. <https://m.spacechina.com/n2014789/n2014809/c4080142/content.html>.
- [56] POP O L, POP C R, DUFRECHOU M, et al. Edible films and coatings functionalization by probiotic incorporation: a review [J]. Polymers, 2019, 12(1): 1-6.
- [57] SHEN C, CHEN W Q, LI C Z, et al. Topical advances of edible coating based on the nanoemulsions encapsulated with plant essential oils for foodborne pathogen control[J]. Food Control, 2023, 145: 109419.
- [58] 陈彤, 江贵长, 张德浩, 等. 可降解包装材料现状研究与展望 [J]. 塑料工业, 2020, 48(1): 1-6.
- CHEN T, JIANG G Z, ZHANG D G, et al. Research of the status quo and prospect of degradable packaging materials[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(1): 1-6.
- [59] 杨雪梅, 王维佳. 一种蚕丝—玻璃纤维共混抗霉菌航空食品袋及其制备方法: CN201610624370.1[P]. 2016-12-07.
- YANG X M, WANG W J. A silk-glass fiber co-blended mold-resistant aviation food bag and its preparation method: CN201610624370.1[P]. 2016-12-07.
- [60] 汝晓鹏, 段涛, 谢佳. 某型飞机负载分配均衡性研究[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(6): 142-144.
- RU X P, DUAN T, XIE J. Research on the balance of load distribution of a certain type of aircraft[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(6): 142-144.
- [61] 于贤龙, 褚斌, 肖红伟, 等. 红外辐射食品热处理机制及应用研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 213-219.
- YU X L, ZHU B, XIAO H W, et al. Advance in research on heat treatment mechanism of infrared radiation and its application in foods[J]. Food & Machinery, 2022, 38(4): 213-219.
- [62] MEESO N, NATHAKARANAKULE A, MADHIYANON T, et al. Different strategies of far-infrared radiation application in paddy drying[J]. International Journal of Food Engineering, 2008, 4(3): 1 267.
- [63] ALTIN O, SKIPNES D, SKARA T, et al. A computational study for the effects of sample movement and cavity geometry in industrial scale continuous microwave systems during heating and thawing processes[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 77: 102953.
- [64] KALINKE I, PUSL F, HADERLE F, et al. A comparative study of frequency-shifting strategies for uniform and energy-efficient microwave heating in solid-state microwave systems [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 86: 103388.
- [65] 中国民航网. 南航梦想机队再添新成员 舒适客舱设备亮点多多 [EB/OL]. (2018-08-31) [2024-10-23]. [http://www.caacnews.com.cn/1/6/201808/t20180831\\_1254984.html](http://www.caacnews.com.cn/1/6/201808/t20180831_1254984.html).
- Civil Aviation Administration of China News. China southern's dreamliner fleet adds new members with comfortable cabin equipment highlights[EB/OL]. (2018-08-31) [2024-10-23]. [http://www.caacnews.com.cn/1/6/201808/t20180831\\_1254984.html](http://www.caacnews.com.cn/1/6/201808/t20180831_1254984.html).