

# 喷雾干燥在果粉加工过程中的研究现状及应用前景

纪嘉豪<sup>1</sup>, 王凯<sup>1</sup>, 胡卓炎<sup>1</sup>, 刘旭炜<sup>1</sup>, 闫景坤<sup>2</sup>, 赵雷<sup>1\*</sup>

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)(2. 东莞理工学院生命健康技术学院, 广东东莞 523808)

**摘要:** 喷雾干燥是水果加工的一种重要方法, 因其制备的果粉稳定性高、溶解性好等优点被广泛应用于食品加工中。但在实际生产过程中还是会遇到一系列挑战。一方面, 水果中丰富的低分子糖和有机酸导致了果粉较低的玻璃化转变温度, 造成粘壁现象从而降低果粉产率; 另一方面, 喷雾干燥过程中较高的温度会导致水果中热敏成分的损失, 造成果粉品质的下降。针对这些技术难点, 本文通过总结归纳近年来的解决方案并提出新的思路, 通过添加助剂、筛选水果品种、益生菌发酵预处理和低温喷雾干燥技术等改善果粉的玻璃态转化温度和减少热损失, 从而提高果粉的产率及品质。在此基础上对果粉未来加工方向进行展望, 以期能为喷雾干燥制备高品质果粉提供一定的理论支持。

**关键词:** 喷雾干燥; 果粉; 玻璃化转变温度; 热敏成分

文章编号: 1673-9078(2025)05-354-363

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0511

## Research Status and Application Prospect of Spray Drying in Fruit Powder Processing

JI Jiahao<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, HU Zhuoyan<sup>1</sup>, LIU Xuwei<sup>1</sup>, YAN Jingkun<sup>2</sup>, ZHAO Lei<sup>1\*</sup>

(1. College of Food Science and Technology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2. School of Life and Health Technology, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

**Abstract:** Spray drying is an important method of fruit processing, which is widely used in the food processing industry due to its advantages such as high stability and good solubility of the prepared fruit powder. However, there are still a number of challenges encountered in the actual production process. On the one hand, the abundance of low-molecular-weight sugars and organic acids in fruits leads to a low glass transition temperature of fruit powder, resulting in sticking to the spray dryer wall thereby reducing the yield of fruit powder; on the other hand, the higher temperature in the process of spray drying leads to the loss of heat-sensitive components in fruits, resulting in the decrease of fruit powder quality. In view of these technical difficulties, this paper summarizes the solutions in recent years and puts forward new ideas, such as adding drying aid(s), screening fruit varieties, probiotic fermentation pretreatment and low-temperature spray-drying technology, to increase the glass transition temperature of fruit powder and reduce heat loss, thereby improving the yield and quality of fruit powder. On this basis, the future direction for processing fruit powder is prospected, in order to provide certain theoretical support for the preparation of high-quality fruit powder by spray drying.

**Key words:** Spray drying; fruit powder; glass transition temperature; heat-sensitive components

引文格式:

纪嘉豪,王凯,胡卓炎,等.喷雾干燥在果粉加工过程中的研究现状及应用前景[J].现代食品科技,2025,41(5):354-363.

JI Jiahao, WANG Kai, HU Zhuoyan, et al. Research status and application prospect of spray drying in fruit powder processing [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(5): 354-363.

收稿日期: 2024-04-18

基金项目: 广州市科技计划项目(2023B01J2004); 广州市重点研发计划(2024B03J1307); “十四五”广东省农业科技创新十大主攻方向项目(2022SDZG04)

作者简介: 纪嘉豪(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工, E-mail: 644578054@qq.com

通讯作者: 赵雷(1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: scauzl@scau.edu.cn

水果中富含维生素、矿物质、碳水化合物以及多种活性物质,是人类营养摄入的重要来源。由于大部分水果采后贮藏期较短且易腐烂变质,对水果进行加工是延长其贮藏期和满足市场需求的一种有效的方法。将水果加工成果粉具有贮藏期长、稳定性高、包装成本低、便于储藏和运输等优点,因此其具有良好的经济潜力和广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。喷雾干燥是制备果粉常用的一种方法,其通过高温空气与雾化后的液体物料进行大面积接触从而使物料迅速完成干燥。因其干燥效率高、成本低且省去粉碎等工艺流程,被广泛应用于食品加工和制药行业<sup>[2]</sup>。

然而,在喷雾干燥制备果粉的过程中仍会遇到一些困难。一方面,大部分水果中富含低分子糖和有机酸,这些组分导致果粉的高粘性和低玻璃化转变温度,使果粉在喷雾干燥过程产生严重的粘壁现象,从而降低了果粉的产率<sup>[2]</sup>;另一方面,喷雾干燥的最佳进风温度一般设置在140~220℃之间,虽然干燥时间短,但较高的温度仍会导致部分营养成分和风味物质的损失,从而降低果粉的品质<sup>[3]</sup>。

传统喷雾干燥过程中普遍需添加助干剂,通过助干剂对物料进行包埋,减少干燥过程中高温环境对产品活性物质的不利影响,从而提高最终粉末的品质。而水果中富含低分子糖和有机酸,这会导致喷雾干燥制备果粉的过程中发生较为严重的粘壁现象,通过助干剂的高分子量、高玻璃化转变温度、低粘性等优越的物理性质可以提高果粉的产率和品质,同时助干剂的添加可以有效地减少果粉中营养成分和风味物质等热敏性成分的损失<sup>[4]</sup>。喷雾干燥过程中常见的助干剂主要有麦芽糊精、阿拉伯胶、改性淀粉、壳聚糖、乳清蛋白、大豆蛋白和酪蛋白等<sup>[5]</sup>。目前对于喷雾干燥过程中助干剂的相关综述较为全面系统,而对于其他解决对策的总结分析尚待完善。因此,本文综述了喷雾干燥果粉过程中的主要解决方案,同时对基于水果品种特性差异和益生菌发酵预处理提升果粉玻璃化转变温度的机制进行了总结归纳,以期食品工业中喷雾干燥制备高产率和高品质果粉提供一定的技术参考。

## 1 果粉在喷雾干燥加工过程中的主要问题及解决思路

### 1.1 果粉的低玻璃化转变温度

果粉在喷雾干燥过程中容易出现粘壁现象,其

主要原因归结于果粉本身较低的玻璃化转变温度<sup>[6]</sup>。同时,玻璃化转变温度也是评价果粉物理品质的主要因素之一,当果粉玻璃化转变温度较低时往往表现出较强的吸湿性,导致其在储存过程中更易粘结成团<sup>[2]</sup>。在实际加工过程中,当温度上升到比果粉的玻璃化转变温度高出10~20℃的范围内时,就会发生玻璃化转变<sup>[7]</sup>。因此,为了减少喷雾干燥过程中粘壁现象的发生,当雾滴中水分大部分蒸发完时,物料的温度应低于玻璃化转变温度。图1为水果中常见糖酸组分的玻璃化转变温度<sup>[4]</sup>,由图可知,葡萄糖、果糖和蔗糖的玻璃化转变温度仅为32、5、62℃,这三种糖在水果中占比较大<sup>[8]</sup>。水果中常见的有机酸玻璃化转变温度均低于36℃。因此,在不添加助干剂的情况下很难直接对水果物料进行喷雾干燥<sup>[9]</sup>。

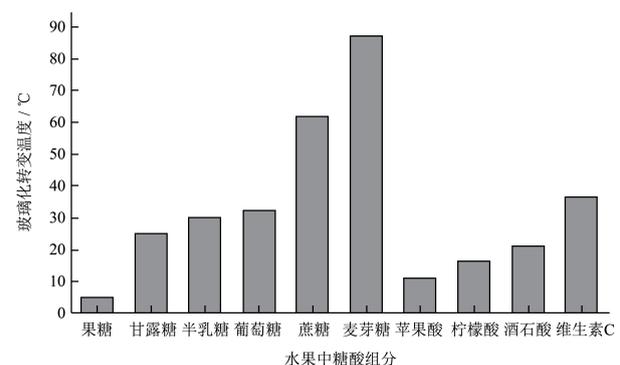


图1 水果中常见糖酸组分的玻璃化转变温度

Fig.1 Glass transition temperatures of common sugar-acid fractions in fruits

### 1.2 果粉在喷雾干燥过程中热敏成分的损失

在喷雾干燥制备果粉的过程中,水果物料与热空气接触时间较短,但是其入口温度(通常在140~220℃之间)较高,这不可避免地会造成果粉中一些热敏成分(如酚类、抗坏血酸、番茄红素、风味物质等)的损失。

### 1.3 主要解决思路

目前对于果粉低玻璃化转变温度的解决方法通常是添加助干剂,通过助干剂提高果粉的玻璃化转变温度,减少粘壁现象的发生,从而提高产率<sup>[9]</sup>。基于水果物料的品种特性差异以及对水果进行发酵降糖的预处理也能提升喷雾干燥过程中果粉的玻璃化转变温度。添加助干剂和低温喷雾干燥技术可以减少水果物料中热敏成分的损失。以下针对这些问题的解决方法进行了总结归纳。图2为喷雾干燥制备果粉的主要问题及其解决方法示意图。

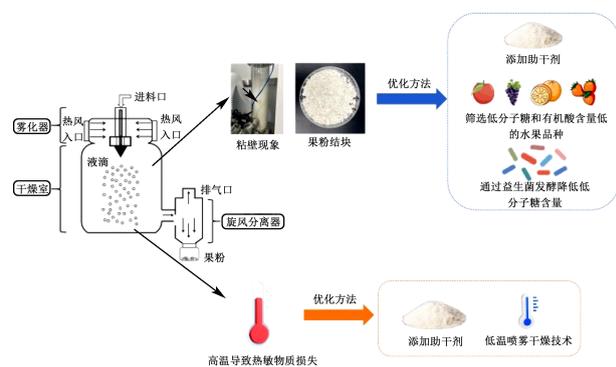


图2 喷雾干燥制备果粉的主要问题及其解决方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of the main problems and their solutions in the preparation of fruit powder by spray drying

## 2 提升果粉低玻璃化转变温度

### 2.1 添加助干剂提升果粉的玻璃化转变温度

喷雾干燥的进风温度通常设置在 140 °C 以上, 这个温度远远高于果粉本身的玻璃化转变温度。因此在喷雾干燥前往往都会在水果物料中添加适量的助干剂, 通过助干剂提高果粉的玻璃化转变温度, 减少果粉在干燥室中的粘壁现象, 从而提高最终果粉的产率<sup>[9]</sup>。目前在水果喷雾干燥中使用的助干剂主要为碳水化合物和蛋白质, 例如麦芽糊精、阿拉伯胶、分离乳清蛋白、大豆分离蛋白等。这些助干剂都有一些共同的特点, 例如玻璃化转变温度高、溶解性好、安全性高、粘性和吸湿性低等<sup>[10]</sup>。图3为喷雾干燥中常见助干剂的玻璃化转变温度<sup>[4]</sup>, 由图可知, 这些常见助干剂的玻璃化转变温度都在 110 °C 以上。目前, 已有许多研究探讨了助干剂对果粉产率以及玻璃化转变温度的影响。Gong 等<sup>[11]</sup>对草莓果浆喷雾干燥时发现, 当不添加助干剂时草莓果浆无法直接进行喷雾干燥, 这是由于草莓粉的玻璃化转变温度较低, 导致喷雾干燥过程中严重的粘壁现象。而在草莓果浆中添加了 39% 质量分数的麦芽糊精和 1% 质量分数的分离乳清蛋白后, 草莓粉的产率达 56.50%, 此时草莓粉的玻璃化转变温度为 36.91 °C。Leyva-Porras 等<sup>[12]</sup>在草莓粉的研究中同样发现, 当进风温度为 185 °C, 麦芽糊精添加量的质量分数由 5% 升高至 10% 时, 草莓粉的玻璃化转变温度由 10.33 °C 升至 21 °C。Muzaffar 等<sup>[13]</sup>在石榴汁喷雾干燥过程中也观察到类似的现象, 当麦芽糊精添加量的质量分数由 5% 升高至 25% 时, 石榴粉的玻璃化转变温度由 38.23 °C 升至 71.61 °C, 产率也由 9.48% 提升至 62.59%。因此, 助干剂的添加可以

显著提高果粉的玻璃化转变温度和产率。

此外, 助干剂的添加可以提升最终果粉的品质。其主要受助干剂本身的物理特性所影响, 如溶解性好、安全性高、粘性及吸湿性低等<sup>[14]</sup>。而各个助干剂的主要优势有所不同, 表1列举了常用助干剂及其特性<sup>[15]</sup>。麦芽糊精因其吸湿率低、溶解性好、价格低廉等优点, 是喷雾干燥制备果粉中最常用的碳水化合物类助干剂<sup>[16]</sup>, 但其在乳化性和成膜性方面的表现较差; 分离乳清蛋白因其乳化性和成膜性优异, 且营养价值较高, 是常用的蛋白质类助干剂之一<sup>[17]</sup>, 然而在其他物理性质(如吸湿率、溶解性等)上的表现不及麦芽糊精。因此单一助干剂无法满足果粉所有的物理性质, 一般喷雾干燥过程中均采用复合助干剂。Kingwatee 等<sup>[18]</sup>使用喷雾干燥制备荔枝果粉, 发现麦芽糊精和菊粉作为复合助干剂时所制备的荔枝果粉比纯麦芽糊精制备荔枝果粉的吸湿性更低, 且玻璃化转变温度和总酚含量更高。

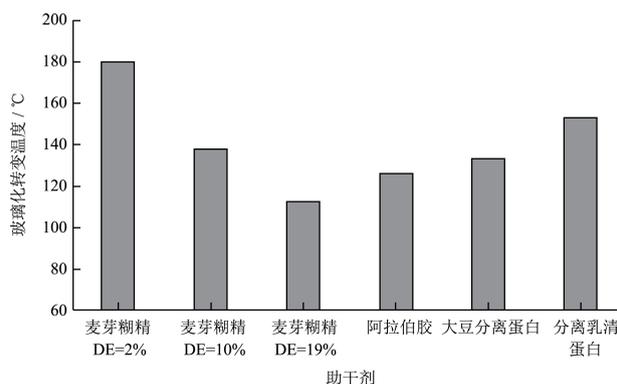


图3 喷雾干燥中常见助干剂的玻璃化转变温度

Fig.3 Glass transition temperatures of common drying aids in spray drying

注: DE 表示葡萄糖当量。

助干剂在果汁喷雾干燥中有着不可替代的地位, 但是过量地添加助干剂可能会掩盖水果原有的天然风味。因此, 为了克服这一缺点并达到更为理想的干燥效果, 可以通过针对性地筛选水果品种和发酵处理等方法降低水果物料本身的低分子物质(如葡萄糖、果糖、蔗糖和有机酸等)的含量, 从而提升其果粉的玻璃化转变温度, 减少助干剂的使用量, 进一步提高产品的综合品质。

### 2.2 基于不同品种水果加工特性提升果粉的玻璃化转变温度

影响果粉玻璃化转变温度的主要因素为温度、湿度和组分<sup>[19]</sup>。在确保喷雾干燥工艺条件一致的前提下

下,果粉内在组分的差异是影响其玻璃化转变温度的核心要素。在果粉的组分中,低分子糖(葡萄糖、果糖、蔗糖)和有机酸等由于其分子量较小,是导致果粉玻璃化转变温度较低的主要原因<sup>[20]</sup>,且果粉中低分子糖和有机酸均源自水果本身。因此,根据不同品种水果的加工特性筛选低分子糖和有机酸含量较低的品种。不同品种的水果其低分子糖和有机酸含量差异较大,如温靖等<sup>[21]</sup>对不同品种荔枝的低分子糖(葡萄糖、果糖、蔗糖)含量进行了比较,发现“荔红”的低分子糖含量(174.25 g/L)与“荔枝王”的低分子糖含量(96.10 g/L)相差接近1倍。汪平<sup>[22]</sup>研究了不同品种蓝莓糖酸组分的差异,发现不同品种蓝莓之间总糖含量最大差值达4.07 g/100 g,总酸含量最大差值达8.96 g/kg,且测定品种的葡萄糖和果糖占其总糖含量的比例在79.82%~98.31%(质量分数)之间。通过筛选低分子糖和有机酸含量相对较低的品种,可以有效地降低果粉中这两种成分的含量,减少喷雾干燥过程中果粉在干燥室中的粘壁现象,从而提高果粉的产率。

表1 常用助干剂及其特性

| Table 1 Commonly used drying aids and their properties |              |                  |  |
|--|--------------|------------------|--|
| 助干剂类别  | 常用助干剂        | 优点               | 共同点  |
| 碳水化合物  | 麦芽糊精         | 水溶性好、吸湿性低        | 1. 提高果粉的玻璃化转变温度和溶解度;<br>2. 降低果粉的粘性和吸湿性;<br>3. 有一定的成膜能力;<br>4. 热稳定性好;<br>5. 可以被人体食用 |
|  | 阿拉伯胶         | 乳化性、成膜性好,易溶于水    |  |
|  | 改性淀粉         | 玻璃化转变温度高,具有抗粘附能力 |  |
|  | $\beta$ -环糊精 | 可用于易挥发且不溶于水的呈味物质 |  |
|  | 壳聚糖          | 抗菌,具有良好生物黏附性     |  |
| 蛋白质  | 纤维素          | 具有良好的成膜性,生物相容性好  |  |
|  | 大豆蛋白         |                  |  |
|  | 乳清蛋白         | 营养价值高,乳化性、成膜性良好  |  |
|  | 酪蛋白          |                  |  |
|  | 明胶           |                  |  |

目前,已有研究验证了不同品种水果经喷雾干燥制成果粉后,其产率和物理品质存在较大差异。胡雪梅等<sup>[23]</sup>对4个不同品种的无花果进行喷雾干燥,发现“甜城红”的产率(60.75%)显著高于“芭劳奈”(52.20%)、“布朗瑞克”(46.50%)和“波姬红”(40.00%),且“甜城红”制备的果粉溶解性好、吸

湿性低、分散性好、花青素包埋率较高,是4种无花果中最适合喷雾干燥制备无花果粉的品种。同时,“甜城红”的果肉可溶性固形物含量约为15%(质量分数),均低于“芭劳奈”(质量分数为18.00%)“布朗瑞克”(质量分数为18%~20.00%)和“波姬红”(质量分数为16.00%~20.00%)<sup>[24-26]</sup>。因此,不同品种无花果果粉的产率与其可溶性固形物含量可能具有一定的负相关性。不同品种无花果的可溶性固形物含量及其可溶性糖含量呈正相关性<sup>[27]</sup>。水果中的可溶性糖主要为葡萄糖、果糖和蔗糖等低分子糖<sup>[24]</sup>。这进一步证实筛选低分子糖(葡萄糖、果糖、蔗糖)含量较低的品种更有利于提高喷雾干燥制备果粉的产率。

筛选品种时还应考虑水果中低分子糖和有机酸等各个组分之间的比例。在水果常见的低分子糖中,果糖的玻璃化转变温度仅为5℃(由图1可知),这一特性可能使其对果粉玻璃化转变温度的影响更大。因此,在总糖含量相同的情况下,果糖的比例越高,果粉的玻璃化转变温度更低。以荔枝为例,王丹<sup>[28]</sup>根据还原糖与蔗糖的比例将荔枝品种分为蔗糖积累型(还原糖/蔗糖<1)、中间类型(1<还原糖/蔗糖<2)和还原糖积累型(还原糖/蔗糖>2)。荔枝中的葡萄糖和果糖是其还原糖的主要成分,且葡萄糖(32℃)和果糖(5℃)的玻璃化转变温度均远低于蔗糖(62℃)的玻璃化转变温度(由图1可知)。此外,荔枝中的可滴定酸含量较低,温靖等<sup>[29]</sup>测定了17个荔枝品种的总酸度,发现测定品种荔枝的总酸含量均低于0.35%(质量分数)。因此,低分子糖是影响荔枝果粉玻璃化转变温度的主要成分。在筛选适宜的荔枝品种进行喷雾干燥时,应优先选择果糖比例较低的蔗糖积累型荔枝,旨在提高果粉的玻璃化转变温度,减少干燥过程中的粘壁现象,从而提升产率。

不同品种水果的筛选指标也不仅局限于低分子糖和有机酸含量,在保证果粉产率的情况下,还应考虑果粉的营养品质和抗氧化能力。于漫漫等<sup>[30]</sup>探究了采用喷雾干燥制备的不同品种草莓粉的总酚含量及其抗氧化能力,结果表明,5个测定品种草莓粉的总酚含量和抗氧化能力之间差异较大( $P<0.05$ )。其中“美13”所制备的果粉表现出最强的清除DPPH能力和总抗氧化能力(FRAP),且无论是鲜果状态还是经过喷雾干燥所制备的果粉形态,其总酚含量在5个品种中均处于最高水平。

综上所述, 筛选低分子糖和有机酸含量较低的品种可以提高喷雾干燥制备果粉的产率。同时, 还应考虑水果中低分子糖和有机酸等各个组分之间的比例。在保证果粉产率和物理性质的前提下, 可以优先选择总酚含量和抗氧化能力较强的水果品种, 进一步提高果粉的综合品质。在水果制粉产业中需要考虑时间成本、经济成本、生产效率等因素, 适宜的品种可以降低时间和经济成本、提高生产效率, 达到事半功倍的效果。目前针对不同水果品种喷雾干燥制备果粉的产率及品质差异的研究尚不充分, 亟需进一步拓展研究的深度和广度, 以揭示各类品种鲜果的加工特性与其果粉在喷雾干燥过程中的产率和品质之间的内在规律和调控机制。

### 2.3 益生菌发酵改善果粉玻璃化转变温度的作用机制

益生菌发酵具有提高食品营养价值、产生风味物质、降低含糖量、延长食品保质期等优点, 已被广泛运用于食品加工<sup>[31]</sup>。其中, 发酵果汁已成为水果加工中的一个新趋势。目前已有大量研究报道了多种发酵果汁的制备, 如发酵荔枝汁、发酵苹果汁、发酵猕猴桃汁等。发酵果汁在喷雾干燥制备果粉中具有一定优势, 一方面, 部分益生菌在发酵过程中会消耗果汁中的低分子糖, 这可以提高果粉的玻璃化转变温度。另一方面, 益生菌本身具有调节人体肠道菌群平衡、改善消化、提高免疫力、降低胆固醇、降血压、抗癌等作用<sup>[32]</sup>。此外, 益生菌发酵果汁可以提高果汁的营养价值<sup>[33]</sup>。因此, 益生菌发酵果汁所制备的果粉相比于原果汁果粉更具营养价值, 更符合现代消费者对健康食品的需求, 且发酵后的果汁更有利于喷雾干燥工艺制备果粉。

目前, 应用于果汁发酵的主要菌种有酵母菌、乳酸菌、醋酸菌等<sup>[34]</sup>。通过益生菌发酵可以有效地降低果汁的低分子糖含量。Wang 等<sup>[35]</sup>使用植物乳杆菌 HU-C2W 对荔枝汁进行发酵, 发酵 40 h 后荔枝汁的总碳水化合物含量由 182.90 mg/mL 下降至 136.76 mg/mL, 蔗糖含量由 59.07 mg/g 下降至 21.17 mg/g。陈智慧等<sup>[36]</sup>探究了乳酸菌和酵母菌发酵桑葚全浆的降糖效果, 在有氧条件下使用乳酸菌和酵母菌对桑葚全浆进行偶联发酵 6 h 后, 果糖和葡萄糖的脱糖率均达到 100%。此外, 益生菌在发酵过程中会生成产物, 这可能会对喷雾干燥制备果粉造成一定的影响。酵母菌在进行无氧发酵过程中

会产生酒精, 而过高的酒精含量会改变果粉原有的天然风味。因此, 在利用酵母菌进行发酵时, 应通过调控发酵条件以抑制酒精的过度生成, 在最大程度上减少其对果粉风味品质的影响。乳酸菌在发酵过程中会产生一定量的乳酸<sup>[37]</sup>, 且乳酸含量的增加可能会导致果粉的玻璃化转变温度下降。因此, 在使用乳酸菌进行发酵时应优先考虑低产乳酸且降糖效率高的菌株, 同时可以通过优化发酵工艺参数(如发酵时间、发酵温度、发酵方式等)减少发酵过程中乳酸的生成。醋酸菌是酿造果醋的主要菌种, 其在发酵过程中的主要产物是醋酸<sup>[34]</sup>, 醋酸的强烈风味会对果粉原有风味造成较大影响, 因此醋酸菌不适合用于发酵果汁的喷雾干燥。目前已有许多对益生菌发酵果汁进行喷雾干燥的相关研究, 表 2 列举了近年来发酵果汁喷雾干燥的条件及效果。由表可知, 发酵果汁喷雾干燥的研究主要集中在不同助干剂种类及含量对果粉中益生菌存活率的影响, 对于果汁发酵前后喷雾干燥所制备的果粉在产率和品质上的研究尚不充分。

## 3 减少热敏成分损失的解决方法

### 3.1 针对水果特性选择适宜助干剂以有效保护热敏成分

助干剂的添加可以有效减少喷雾干燥过程中果粉热敏成分的损失, Moreno 等<sup>[45]</sup>用乳清蛋白、豌豆蛋白、麦芽糊精分别对葡萄多酚提取物进行喷雾干燥, 发现使用乳清蛋白和豌豆蛋白作为助干剂所制备的葡萄粉总酚含量和花青素含量均优于麦芽糊精。石启龙等<sup>[46]</sup>用麦芽糊精和乳清蛋白对桑葚进行喷雾干燥时发现了相反的结果, 通过麦芽糊精所制备的桑葚粉的总酚含量高达 791.42 mg/100 g, 而使用乳清蛋白作为助干剂时的总酚含量仅为 610.82 mg/100 g。这可能是由于各类水果中酚类物质的主要类别和含量不同。在喷雾干燥过程中, 碳水化合物类助干剂对亲水性物质的保护能力更强<sup>[47]</sup>, 这一优势的主要原因可能是碳水化合物类助干剂通常包含大量的亲水官能团(如羟基、极性基团等), 这些亲水基团与亲水性物质通过氢键紧密结合, 形成相对稳定的复合结构, 提高了果粉的整体稳定性, 减少了亲水性物质在喷雾干燥过程中与高温环境的接触面积和氧化损失。相反, 蛋白质类助干剂为疏水性物质提供了更好的保护<sup>[47]</sup>, 这可能与蛋白质本身良好的乳化性有关。蛋白质分子结构中包含亲水和疏水区域,

相比于碳水化合物，蛋白质的疏水性较强，其疏水基团更易与疏水性物质相结合，减少了疏水性物质暴露于喷雾干燥的高温环境中，使疏水性物质得到较好的保护。此外，Fang 等<sup>[48]</sup>分别使用分离乳清蛋白和麦芽糊精对杨梅汁进行喷雾干燥时发现，在喷

雾干燥过程中蛋白质因其较好的成膜性优先迁移到雾滴表面形成薄膜，麦芽糊精则与杨梅粉中的成分形成混合物，这进一步阐明了碳水化合物类和蛋白质类助干剂在喷雾干燥过程中不同的包埋机制。

表 2 发酵果汁喷雾干燥的条件及效果

Table 2 Conditions and effects of spray drying of fermented fruit juices

| 水果 / 水果制品   | 益生菌种类  | 发酵条件  | 喷雾干燥条件   | 果粉品质  |
|---|--|---|--|---|
| 葡萄干 <sup>[38]</sup>                                 | 凝结芽孢杆菌                                       | 果汁 pH 值为 5.7, 发酵温度 32 °C, 发酵时间 30 h                 | 助干剂条件: 质量分数 0%~20% 的麦芽糊精、质量分数 0%~10% 的果胶, 进风温度 150 °C, 进料速率 10 mL/min, 热风流量 5 m <sup>3</sup> /h, 雾化空气流量: 70 m <sup>3</sup> /h 出口温度 90 °C                   | 质量分数 10% 的麦芽糊精 + 质量分数 5% 的果胶所制备的果粉在益生菌存活率 (6.07 log CFU/g)、水分含量、溶解度、总酚含量、色泽等方面具有较好的表现   |
| 黄色百香果 <sup>[32]</sup>                               | 罗伊氏乳杆菌 (DSM 17938)                           | 果浆 pH 值为 3.18、5.5、6.5, 发酵温度: 10、20、30 °C, 发酵时间 48 h | 助干剂条件: 质量分数 15% 的麦芽糊精, 质量分数 0%~2% 的明胶, 雾化空气流量: 2~4 kg/h, 进风温度 112 °C, 进料速率 3 kg/h, 热风流量 430 kg/h, 出口温度 74 °C   | 1. 罗伊氏乳杆菌最佳生长条件为 30 °C、pH 值为 3.18; 2. 在喷雾干燥过程中, 明胶与麦芽糊精联合使用比单独麦芽糊精所制备的粉末具有更高的酚类化合物保留率   |
| 朱萨拉果实 <sup>[39]</sup> (Juçara)                      | 罗伊氏乳杆菌 LR92 (DSM 26866)                      | 果汁 pH 值为 5.7, 发酵温度 32 °C, 发酵时间 30 h                 | 助干剂条件: 分别添加质量分数 10% 的麦芽糊精、质量分数 10% 的阿拉伯胶和质量分数 10% 的明胶, 进风温度 150 °C, 进料速率 0.52 L/h, 热风流量 60 m <sup>3</sup> /h, 雾化器压力 0.11 MPa                               | 用明胶所制备的粉末的益生菌存活率较高 (8.63 log CFU/g)。而阿拉伯胶和麦芽糊精所制备的粉末具有较高的产率 (分别为 57% 和 63%) 和溶解度 (分别为 92.46% 和 91.25%)  |
| 金虎尾果实 (Acerola), 苏里格拉果实 (Ciriguela) <sup>[40]</sup> | 鼠李糖乳杆菌 LPAA 01, 干酪乳杆菌 LPAA 02, 植物乳杆菌 LPAA 03 | 微生物接种量为 1%, 发酵时间 24 h                               | 助干剂条件: 分别添加 DE 为 5%、10% 和 15% 的麦芽糊精, 助干剂为 10% 质量分数的麦芽糊精, 进风温度 140 °C, 出口温度 90 °C, 进料速率 0.60 L/h, 热风流量 30 m <sup>3</sup> /h, 雾化器压力 0.6 MPa                  | DE 分别为 5%、10% 和 15% 的麦芽糊精所制备的果粉均对益生菌提供了较好的保护 (益生菌数量均高于 10 <sup>6</sup> CFU/g), 且三种果粉均具有较好的品质  |
| 金虎尾果实 (Acerola), 苏里格拉果实 (Ciriguela) <sup>[41]</sup> | 鼠李糖乳杆菌 LPAA 01, 干酪乳杆菌 LPAA 02, 植物乳杆菌 LPAA 03 | 微生物接种量, 每种微生物接种 1%, 发酵温度 35 °C, 发酵时间 24 h           | 助干剂条件: 质量分数 10% 的麦芽糊精, 进风温度 140 °C, 进料速率 0.60 L/h, 热风流量 30 m <sup>3</sup> /h, 雾化器压力 0.6 bar  | 1. 果粉的含水率为 3.74%, 复水时间为 135.66 s, 且果粉中富含多种酚类物质; 2. 果粉在 5 °C 下储存 20 d 和 25 °C 下储存 14 d 后, 益生菌数量仍高于 6 log CFU/g, 且 3 种菌均存活  |
| 尼泊尔樱花果实 <sup>[42]</sup> (Prunus nepalensis)         | 植物乳杆菌 MCC 2974                               | 发酵温度 37 °C, 发酵时间 72 h, 乳杆菌接种浓度 6 log CFU/mL         | 助干剂条件: 质量分数 12%~25% 的麦芽糊精, 进风温度 120~140 °C, 进料速率 120~240 mL/h  | 在质量分数 12% 的麦芽糊精、进风温度 120 °C 和进料速率 201 mL/h 条件下所制备的益生菌果粉最佳, 此时果粉产率为 57.68%, 包封率为 85.75%, 含水率为 3.95%  |
| 尼泊尔樱花果实 <sup>[43]</sup> (Prunus nepalensis)         | 植物乳杆菌  | 发酵温度 37 °C, 发酵时间 72 h                               | 助干剂条件: 质量分数 12% 的麦芽糊精, 进风温度 120 °C, 进料速率 201 mL/h  | 果粉中的益生菌在储存期间得到了较好的保护, 在 25 °C 和 50% 湿度下储藏 36 d 时的益生菌数量为 6.12 log CFU/g, 且果粉的色泽、堆积密度 (0.686 g/cm <sup>3</sup> )、卡尔指数 (21.132)、豪斯纳比 (1.268)、吸湿性和水分含量在 36 d 内均在可接受范围 |
| 番石榴 <sup>[44]</sup>                                 | 植物乳杆菌  | 果汁 pH 值为 6.4, 发酵温度 30 °C, 发酵时间 72 h                 | 助干剂条件: 分别添加质量分数 20% 的麦芽糊精、质量分数 20% 的菊粉、质量分数 10% 的麦芽糊精 + 质量分数 10% 的菊粉, 进风温度 120 °C, 进料流量 0.3 L/h, 热风流量 3.0 m <sup>3</sup> /min, 雾化气流速度 30 L/min, 出口温度 75 °C | 质量分数 20% 的麦芽糊精所制备的益生菌果粉的产率最高, 水分活度和复水时间最低, 而质量分数 10% 的麦芽糊精 + 质量分数 10% 的菊粉所制备的果粉在储藏期间表现出最高的益生菌存活率  |

表 3 喷雾干燥过程中助干剂对常见水果中活性物质的影响

Table 3 Effect of drying aid during spray drying on active substances in common fruits

| 水果类别                | 助干剂类别                                    | 助干剂比例及添加量   | 对活性物质的影响  |
|---------------------|--|---|---|
| 蓝莓 <sup>[49]</sup>  | 高甲基果胶 (HMP)、大豆分离蛋白 (SPI)、WPI             | 10% WPI+1% HMP, 10% WPI+2% HMP, 10% WPI+4% HMP, 4% SPI+1% HMP, 4% SPI+2% HMP, 4% SPI+4% HMP, 4% SPI, 10% WPI (均为质量分数) | SPI 和 HMP 的组合的蓝莓花青素包封率比 SPI、WPI 以及 WPI 和 HMP 的组合更高, 当添加 4% 质量分数的 SPI+2% 质量分数的 HMP 时, 蓝莓花青素的包封率 (93.5%) 最高               |
| 酸樱桃 <sup>[50]</sup> | MD (DE: 4%~7%)、MD( DE 13%~17%)、阿拉伯胶 (GA) | 3 种助干剂与果汁固形物之比为 1:1、2:1、3:1   | MD (DE: 13%~17%) 按 3:1 比例添加时的酚酸和花青素的保留率最高, 分别为 93.31 和 88.68%。而黄酮醇糖苷的保留率 (84.01%) 在 GA 以 2:1 比例添加时最高                    |
| 苹果 <sup>[51]</sup>  | MD、GA                                    | MD:GA=2:3   | 花青素包封率在 93.84%~96.85% 之间  |
| 葡萄 <sup>[52]</sup>  | GA、部分水解瓜尔胶 (PHGG)、聚葡萄糖 (PD)              | 10% GA, 10% PHGG, 5% GA+5% PD, 5% PHGG+5% PD (均为质量分数)   | 5% 质量分数的 GA+5% 质量分数的 PD 下的总酚含量 (26.26 mg/g) 及总花青素含量 (21.15 mg/g) 最高   |
| 桑葚 <sup>[46]</sup>  | MD、WPI                                   | MD/WPI 的质量比在 35:0~0:35 之间   | 仅使用 MD 作为助干剂时的果粉总酚含量 (791.42 mg/100 g) 最高, MD/WPI 的质量比为 34.75:0.25、34.5:0.5 和 34:1 时与单独使用 MD 的总酚含量无显著性差异 ( $P > 0.05$ ) |
| 番石榴 <sup>[53]</sup> | MD                                       | MD 添加量的质量分数在 50%~75% 之间   | 当 MD 添加量的质量分数为 75% 时, 抗坏血酸保留率 (90%) 最高  |
| 西瓜 <sup>[54]</sup>  | MD                                       | MD 添加量的质量分数在 3%~5% 之间   | 果粉番茄红素含量随 MD 添加量的增加呈下降趋势  |

综上所述, 在喷雾干燥过程中, 碳水化合物类助干剂对亲水性热敏成分 (如维生素 C、花青素和没食子酸等) 的保护效果更好, 蛋白质类助干剂更适于维生素 A、 $\beta$ -胡萝卜素、番茄红素、儿茶素、姜黄素和白藜芦醇等疏水性热敏成分的包埋。然而, 在大多数水果中亲水性和疏水性的热敏活性物质往往是共同存在的。因此, 根据水果中亲水性和疏水性活性物质的含量及比例将碳水化合物类助干剂和蛋白质类助干剂进行一定比例的复配, 可以在最大程度上对水果中的热敏活性物质进行保留。表 3 汇总了喷雾干燥过程中助干剂对常见水果中活性物质的影响, 目前喷雾干燥果粉中活性物质的研究主要集中在酚类物质和抗坏血酸, 这是因为酚类物质和抗坏血酸是大部分水果中极其重要的活性物质。

### 3.2 低温喷雾干燥技术

中国在喷雾干燥技术领域的研究大约有 70 年历史。目前我国的喷雾干燥设备仍然是以合金钢、碳钢等作为主要生产原料<sup>[55]</sup>, 这些材料所制作的干燥室内壁较为粗糙, 在一定程度上影响了干燥效率与产品质量, 且在干燥过程中无法对物料进行可视化监测。同时, 国内喷雾干燥机的部件质量较大, 这降低了日常维护和清洁的效率。国外的喷雾干燥

设备更多的采用耐高温的玻璃材质作为干燥室的主要原料, 这使干燥室内壁更为光滑, 且操作者可以直接观察物料的干燥过程。此外, 国外喷雾干燥机在设备材料、结构和布局上充分考虑了设备维护和清洗的环节, 使这一过程更为方便快捷。随着中国科技的不断发展, 喷雾干燥的设备和技术水平均有较大提升, 在制药、食品等多个领域中有了广泛的应用。未来中国的喷雾干燥技术应逐步加强对生产材料和技术的研究, 提高喷雾干燥的生产效率和操作便捷性。通过科技创新推动喷雾干燥技术在环保、节能、智能化等多个方向持续发展, 提升国产喷雾干燥设备在国内外市场的竞争力与影响力。

传统的喷雾干燥技术因其雾化方式不同, 主要分为旋转式、气流式和压力式<sup>[56]</sup>。然而传统喷雾干燥技术的温度较高, 这会导致水果在加工过程中热敏物质的损失<sup>[57]</sup>。目前, 低温喷雾干燥技术已运用于食品行业, 例如真空喷雾干燥<sup>[58]</sup>、喷雾冷冻干燥<sup>[3]</sup>等。这些技术解决了传统喷雾干燥中高温所带来的负面影响, 进一步减少了干燥过程中热敏成分的损失。Islam 等<sup>[59]</sup>对橙汁进行喷雾干燥过程中发现, 使用真空喷雾干燥所制备的果粉其抗坏血酸含量、总酚含量、总黄酮含量均高于传统喷雾干燥制备的果粉。Dolly 等<sup>[60]</sup>对喷雾冷冻干燥和传统喷雾干燥

所制备的植物乳杆菌粉进行比较,发现喷雾冷冻干燥所制备的植物乳杆菌粉的生物活性比传统喷雾干燥所制备的粉末高20%,且喷雾冷冻干燥的粉末具有更好的复水能力。低温喷雾干燥技术在国内外已有大量研究,但是其运行成本相对较高,更多的被应用于高价值产品中。因此亟需加强低温喷雾干燥技术的研究,通过技术创新降低生产成本,尽早实现该技术在果粉行业的规模化生产。

#### 4 结论

本文针对喷雾干燥过程中果粉的低玻璃化转变温度和热敏物质损失等问题,综述了其解决方法。助干剂在喷雾干燥果粉中发挥着重要的作用,一方面,助干剂的添加提高了果粉的玻璃化转变温度,减少了果粉在干燥室中粘壁现象的发生,从而提高了果粉的产率及其物理品质;另一方面,添加适宜的助干剂有效减少了喷雾干燥过程中水果物料中热敏物质的损失,提升了果粉的营养品质。但是过量的助干剂会对果粉的风味产生较大影响,因此喷雾干燥前可通过筛选低分子糖和有机酸含量较低的品种和益生菌发酵处理等方法提升果粉的玻璃化转变温度,从而提升果粉的产率和综合品质。同时,在食品产业中可以加强对低温喷雾干燥技术的研究和应用,解决传统喷雾干燥技术中高温所带来的负面影响,进一步减少水果中营养物质和风味物质的损失。

#### 参考文献

- [1] MAHALAKSHMI M, MEGHWAL M. Microencapsulation of fruit juices: Techniques, properties, application of fruit powder [J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(2): e14226.
- [2] SOBULSKA M, ZBICINSKI I. Advances in spray drying of sugar-rich products [J]. Drying Technology, 2021, 39(12): 1774-1799.
- [3] SINGH P, PANDEY V K, SINGH R, et al. Spray-freeze-drying as emerging and substantial quality enhancement technique in food industry [J]. Food Science and Biotechnology, 2024, 33(2): 231-243.
- [4] SRIVASTAVA S, BANSAL M, JAIN D, et al. Encapsulation for efficient spray drying of fruit juices with bioactive retention [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(5): 3792-3814.
- [5] ĐORĐEVIĆ V, PARASKEVOPOULOU A, MANTZOURIDOU F, et al. Encapsulation Technologies for Food Industry [M]// Emerging and Traditional Technologies for Safe, Healthy and Quality Food. Cham: Springer International Publishing, 2016: 329-382.
- [6] ARYAEE H, ARIAI P, ZARE D, et al. Evaluation of the physicochemical characteristics of a blend fruit juice powder mixed with *Lactiplantibacillus plantarum*: A comparison of spray drying and freeze drying [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2023, 2023: 5597647.
- [7] CAPARINO O A, NINDO C I, TANG J, et al. Rheological measurements for characterizing sticky point temperature of selected fruit powders: An experimental investigation [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 195: 61-72.
- [8] JAFARI S M, GHALENOEI M G, DEHNAD D. Influence of spray drying on water solubility index, apparent density, and anthocyanin content of pomegranate juice powder [J]. Powder Technology, 2017, 311: 59-65.
- [9] SANTHALAKSHMY S, DON BOSCO S J, FRANCIS S, et al. Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray-dried jamun fruit juice powder [J]. Powder Technology, 2015, 274: 37-43.
- [10] 范方宇,杨宗玲,李晗,等.喷雾干燥条件对果蔬粉加工特性影响研究进展[J].食品研究与开发,2020,41(9):169-176.
- [11] GONG Z Q, YU M M, WANG W L, et al. Functionality of spray-dried strawberry powder: effects of whey protein isolate and maltodextrin [J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 2229-2238.
- [12] LEYVA-PORRAS C, SAAVEDRA-LEOS M Z, LÓPEZ-MARTINEZ L A, et al. Strawberry juice powders: Effect of spray-drying conditions on the microencapsulation of bioactive components and physicochemical properties [J]. Molecules, 2021, 26(18): 5466.
- [13] MUZAFFAR K, WANI S A, DINKARRAO B V, et al. Determination of production efficiency, color, glass transition, and sticky point temperature of spray-dried pomegranate juice powder [J]. Cogent Food & Agriculture, 2016, 2(1): 1144444.
- [14] SHELKE G, KAD V, PANDISELVAM R, et al. Physical and functional stability of spray-dried jamun (*Syzygium cumini* L.) juice powder produced with different carrier agents [J]. Journal of Texture Studies, 2023, 54(4): 560-570.
- [15] 纪嘉豪,刘旭炜,王凯,等.喷雾干燥果蔬粉研究现状[C].健康食品研发与产业技术创新高峰论坛暨2022年广东省食品学会年会、潮州市第二届食品产业技术高峰论坛,中国广东潮州,2023: 5.
- [16] ÇALIŞKAN KOÇ G, TEKGÜL Y, YÜKSEL A N, et al. Recent development in foam-mat drying process: Influence of foaming agents and foam properties on powder properties [J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2022, 25(5): 539-557.
- [17] BHAT S, SAINI C S, KUMAR V, et al. Spray drying of bottle gourd juice: Effect of different carrier agents on physical, antioxidant capacity, reconstitution, and morphological properties [J]. ACS Food Science & Technology, 2021, 1(2):

- 282-291.
- [18] KINGWATEE N, APICHAHARTSRANGKOON A, CHAIKHAM P, et al. Spray drying *Lactobacillus casei* 01 in lychee juice varied carrier materials [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1): 847-853.
- [19] INTIPUNYA P, BHANDARI B R. 22-Chemical Deterioration and Physical Instability of Food Powders [M]. Chemical Deterioration and Physical Instability of Food and Beverages. Woodhead Publishing, 2010: 663-700.
- [20] GEORGE S, THOMAS A, KUMAR M V P, et al. Impact of processing parameters on the quality attributes of spray-dried powders: a review [J]. European Food Research and Technology, 2023, 249(2): 241-257.
- [21] 温靖,徐玉娟,肖更生,等.不同品种荔枝果实制汁特性比较研究[J].农产品加工(学刊),2012,9:5-7.
- [22] 汪平.不同品种蓝莓理化品质分析及果汁贮藏稳定性研究[D].合肥:安徽农业大学,2021.
- [23] 胡雪梅,罗芳耀,李金平,等.无花果果粉喷雾干燥工艺优化及加工适宜性品种筛选[J].食品科技,2023,48(11):73-81.
- [24] 崔银仓,勉玉虎,刘浩阳,等.水果中可溶性糖研究进展[J].新疆农业科技,2019,2:44-46.
- [25] 王蓬,王海荣,韩文玲.无花果优良品种介绍[J].河北果树, 2022,3:59-60.
- [26] 王景周.介绍几个优良无花果品种[J].农业知识,2013, 28:21-23.
- [27] 袁朝阳.新疆设施无花果优良品种的生长结果习性及其品质的综合评价[D].阿拉尔:塔里木大学,2023.
- [28] 王丹.荔枝不同品种果实糖分积累差异关键基因的筛选 [D].广州:华南农业大学,2018.
- [29] 温靖,徐玉娟,肖更生,等.广东省17个不同荔枝品种果实品质比较分析[J].食品科学技术学报,2016,34(2):39-45.
- [30] 于漫漫,王文亮,弓志青,等.不同品种喷雾干燥草莓粉抗氧化物质及其活性研究[J].山东农业科学,2017,49(2):59-63.
- [31] RODRIGUEZ L G R, GASGA V M Z, PESCUA M, et al. Fruits and fruit by-products as sources of bioactive compounds. Benefits and trends of lactic acid fermentation in the development of novel fruit-based functional beverages [J]. Food Research International, 2021, 140: 109854.
- [32] MONTEIRO S S, BESERRA Y A S, OLIVEIRA H M L, et al. Production of probiotic passion fruit (*Passiflora edulis* Sims f. *flavicarpa* Deg.) drink using *Lactobacillus reuteri* and microencapsulation via spray drying [J]. Foods, 2020, 9(3): 335.
- [33] 郑若宇.益生菌发酵苹果汁工艺优化及发酵过程中风味物质和功能性成分的变化[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [34] 马路凯,卢晓丽,何秋璇,等.发酵果汁的研究进展与展望 [J].食品研究与开发,2021,42(18):182-189.
- [35] WANG D, WANG Y, LAN H, et al. Enhanced production of gamma-aminobutyric acid in litchi juice fermented by *Lactobacillus plantarum* HU-C2W [J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101155.
- [36] 陈智慧.益生菌生物转化制备低糖型桑椹精粉的加工技术研究[D].广州:华南农业大学,2016.
- [37] TANG Z, ZHAO Z, WU X, et al. A review on fruit and vegetable fermented beverage-benefits of microbes and beneficial effects [J]. Food Reviews International, 2023, 39(8): 4835-4872.
- [38] NAZARI KERMANSHAHI S, SHARIFAN A, YOUSEFI S. Physicochemical, microstructural, bioactivity and viability characteristics of probiotic spray-dried raisin powder [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(1): 633-642.
- [39] GUERGOLETTO K B, BUSANELLO M, GARCIA S. Influence of carrier agents on the survival of *Lactobacillus reuteri* LR92 and the physicochemical properties of fermented jucara pulp produced by spray drying [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 80: 321-327.
- [40] SOUZA M, MESQUITA A, VERISSIMO C, et al. Microencapsulation by spray drying of a functional product with mixed juice of *acerola* and *ciriguela* fruits containing three probiotic *lactobacilli* [J]. Drying Technology, 2022, 40(6): 1185-1195.
- [41] SOUZA M, MESQUITA A, SOUZA P, et al. New functional non-dairy mixed tropical fruit juice microencapsulated by spray drying: Physicochemical characterization, bioaccessibility, genetic identification and stability [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 152: 112271.
- [42] VIVEK K, MISHRA S, PRADHAN R C. Optimization of spray drying conditions for developing nondairy based probiotic *sohiong* fruit powder [J]. International Journal of Fruit Science, 2021, 21(1): 193-204.
- [43] VIVEK K, MISHRA S, PRADHAN R C. Characterization of spray dried probiotic Sohiong fruit powder with *Lactobacillus plantarum* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020,117: 108699.
- [44] UPADHYAY R, DASS J P F. Physicochemical analysis, microbial survivability, and shelf life study of spray-dried synbiotic guava juice powder [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021,45(2): e15103.
- [45] MORENO T, de PAZ E, NAVARRO I, et al. Spray drying formulation of polyphenols-rich grape marc extract: Evaluation of operating conditions and different natural carriers [J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(12): 2046-2058.
- [46] 石启龙,王瑞颖,赵亚,等.乳清蛋白对以麦芽糊精为助剂桑葚汁喷雾干燥性能影响[J].农业机械学报,2017,48(9): 337-343.

- [47] LU W, YANG X, SHEN J, et al. Choosing the appropriate wall materials for spray-drying microencapsulation of natural bioactive ingredients: Taking phenolic compounds as examples [J]. Powder Technology, 2021, 394: 562-574.
- [48] FANG Z, BHANDARI B. Comparing the efficiency of protein and maltodextrin on spray drying of bayberry juice [J]. Food Research International, 2012, 48(2): 478-483.
- [49] PAN L, CHEN L, WU C, et al. Microencapsulation of blueberry anthocyanins by spray drying with soy protein isolates/high methyl pectin combination: Physicochemical properties, release behavior *in vitro* and storage stability [J]. Food Chemistry, 2022, 395(30): 133626.
- [50] GAROFULIC I E, ZORIC Z, PEDISIC S, et al. Retention of polyphenols in encapsulated sour cherry juice in dependence of drying temperature and wall material [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 83: 110-117.
- [51] XUE J, SU F, MENG Y, et al. Enhanced stability of red-fleshed apple anthocyanins by copigmentation and encapsulation [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(7): 3381-3390.
- [52] KUCK L S, NOREÑA C P Z. Microencapsulation of grape (*Vitis labrusca* var. Bordo) skin phenolic extract using gum Arabic, polydextrose, and partially hydrolyzed guar gum as encapsulating agents [J]. Food Chemistry, 2016, 194: 569-576.
- [53] ARAGUEZ-FORTES Y, ROBAINA-MORALES L M, PINO J A. Optimization of the spray-drying parameters for developing guava powder [J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(6): e13230.
- [54] SINGLA M, SIT N. Characterization of spray dried watermelon juice powder dried at different conditions and effect of incorporation of freeze-dried extract of papaya peel on phytochemical content of reconstituted juice [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(3): 1922-1932.
- [55] 陈玉妹,陈文杰,张丽文,等.喷雾干燥技术的研究进展[J].山东化工,2023,52(4):92-94.
- [56] 闫丙宏,韩韵佳,杨华,等.喷雾干燥技术及其工业应用分析[J].机电信息,2022,12:86-88.
- [57] DE MOHAC L M, RAIMI-ABRAHAM B, CARUANA R, et al. Multicomponent solid dispersion a new generation of solid dispersion produced by spray-drying [J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2020, 57: 101750.
- [58] ISLAM M Z, KITAMURA Y, YAMANO Y, et al. Effect of vacuum spray drying on the physicochemical properties, water sorption and glass transition phenomenon of orange juice powder [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 169: 131-140.
- [59] ISLAM M Z, KITAMURA Y, KOKAWA M, et al. Effects of micro wet milling and vacuum spray drying on the physicochemical and antioxidant properties of orange (*Citrus unshiu*) juice with pulp powder [J]. Food and Bioprocess Processing, 2017, 101: 132-144.
- [60] DOLLY P, ANISHAPARVIN A, JOSEPH G S, et al. Microencapsulation of *Lactobacillus plantarum* (mtcc 5422) by spray-freeze-drying method and evaluation of survival in simulated gastrointestinal conditions [J]. Journal of Microencapsulation, 2011, 28(6): 568-574.