



热风-真空冷冻联合干燥对脆性龙眼果干品质及益生活性的影响

邓媛元, 杨婧, 魏振承, 张雁, 刘光, 张瑞芬, 唐小俊, 王佳佳, 廖娜, 张名位

(广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所/农业农村部功能食品重点实验室/广东省农产品加工重点实验室, 广州 510610)

摘要:【目的】研究热风-真空冷冻联合干燥对脆性龙眼果干品质及益生活性的影响, 为高品质龙眼果干工业化节能干燥模式提供理论依据。【方法】以热风干燥、真空冷冻干燥龙眼果干为对照, 比较分析热风-真空冷冻联合干燥对脆性龙眼果干水分含量、水分活度、皱缩率、复水比等理化特性和总糖、多糖等营养品质的影响。同时采用 GC-MS 测定风味物质变化, 电量表测定能源消耗量。并选用植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌发酵龙眼果干, 比较发酵过程中活菌数、总糖、还原糖以及短链脂肪酸的变化, 评价热风-真空冷冻联合干燥对龙眼体外益生活性的影响。【结果】热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干的水分含量、水分活度和皱缩率显著低于热风干燥, 而复水比显著高于热风干燥。在总糖、多糖含量以及挥发性风味物质种类和总量上, 热风-真空冷冻联合干燥低于真空冷冻干燥而高于热风干燥。在能源消耗上, 热风-真空冷冻联合干燥比真空冷冻干燥节约干燥时间 12.16%, 节约单位能耗 25.40%。在益生活性方面, 植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌均能通过发酵龙眼干增加活菌数量, 利用龙眼干中的总糖产生短链脂肪酸, 降低发酵液 pH, 且益生效果受干燥方式和菌株种类的影响较大。当植物乳杆菌发酵热风-真空冷冻干燥的龙眼果干 48 h 后, 活菌数生长最多可达 $12.40 \lg \text{cfu/mL}$, 高于真空冷冻干燥、热风干燥和新鲜龙眼。嗜酸乳杆菌发酵 48 h 后, 热风-真空冷冻联合干燥活菌数达 $11.84 \lg \text{cfu/mL}$, 与真空冷冻干燥接近, 低于热风干燥, 但高于新鲜龙眼。【结论】热风-真空冷冻联合干燥结合了热风干燥和真空冷冻干燥两种干燥方式的特点, 可以显著缩短干燥时间, 节约能耗, 提高干燥效率和果干品质。

关键词: 热风-真空冷冻联合干燥; 龙眼; 果干; 品质; 益生活性

Effects of Hot Air-Vacuum Freeze Combined with Drying on Physical Properties and Prebiotic Activities of Brittle Dried Longan

DENG YuanYuan, YANG Jing, WEI ZhenCheng, ZHANG Yan, LIU Guang, ZHANG RuiFen,
TANG XiaoJun, WANG JiaJia, LIAO Na, ZHANG MingWei

(Sericultural & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610)

Abstract: 【Objective】The effects of hot air-vacuum freeze combined with drying (HA-VFCD) on the physical properties and prebiotic activities of high-quality brittle dried longan were investigated in the present study, so as to provide a theoretical basis for the optimal industrialized energy-saving drying mode. 【Method】In present study, the effect of HA-VFCD on the physicochemical and nutritional characteristics, such as moisture content, water activity, shrinkage rate, water rehydration ratio, total sugar and polysaccharide contents of brittle dried longan, were compared with that of individual hot air drying (HAD) and vacuum freeze

收稿日期: 2019-09-20; 接受日期: 2019-12-26

基金项目: 广州市科技计划(201803010079, 201803020014, 201704020039)、广东特支计划项目(2019BT02N112)、广东省省级科技计划(2017B090907022)

联系方式: 邓媛元, Tel: 020-87032667; E-mail: yuanyuan_deng@yeah.net. 通信作者张名位, Tel: 020-87237865; E-mail: zhangmingwei@gdaas.cn

drying (VFD) longan samples. The flavor substance changes and the energy consumption were also evaluated by GC-MS and ammeter, respectively. Furthermore, the dried longan was fermented by *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus acidophilus* to investigate the content changes of viable bacteria, total sugar, reducing sugar and short-chain fatty acid, thus evaluating the effect of HA-VFCD on the *in vitro* prebiotic activities of longan. 【Result】 Longan dried by HA-VFCD showed significantly lower moisture content, water activity and shrinkage rate, but higher rehydration ratio, compared with the HAD counterparts. The content of total sugar, polysaccharide, and the types and amounts of volatile flavor of longan dried by HA-VFCD were lower than those of VFD samples, but higher than that of HAD counterparts. In addition, HA-VFCD process could save 12.16% of drying time and 25.40% of unit energy consumption, compared with VFD process. Both *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus acidophilus* could increase the number of viable bacteria through fermentation of dried longan, which were used the total sugar in dried longan to produce short-chain fatty acids and to reduce the pH of fermentation broth. And the prebiotic activities of dried longan after fermentation were remarkably affected by the drying methods and the strain types of bacteria. After fermentation by the *Lactobacillus plantarum* for 48 hours, the viable bacteria number of longan dried by HA-VFCD achieved the highest value of 12.40 lg cfu/mL, which was higher than that of HAD, VFD and fresh longan samples. After fermentation by the *Lactobacillus acidophilus* for 48 hours, the viable bacteria number of longan dried by HA-VFCD reached 11.84 lg cfu/mL, which was close to that of VFD samples, lower than HAD samples but higher than that of fresh longan. 【Conclusion】 The HA-VFCD process combined both the advantages of HAD and VFD, which could remarkably shorten the drying time, lower the energy consumption, and improve the drying efficiency and quality of dried longan.

Key words: hot air-vacuum freeze combined with drying; longan; dried fruit; quality; prebiotic activity

0 引言

【研究意义】龙眼 (*Dimocarpus longan* Lour.) 又称桂圆, 为无患子科龙眼属的亚热带常绿果树, 我国的龙眼种植面积和产量位居世界第一^[1-2]。龙眼风味独特, 含有丰富的糖类、氨基酸、多肽类、多酚类、脂类和微量元素等成分, 可以抗氧化、抗衰老、抗肿瘤、免疫调节、改善学习记忆及调节肠道菌群等, 具有较高的营养价值和保健功效^[3-4]。然而, 龙眼成熟于高温高湿季节, 鲜果易腐烂, 贮藏保鲜难度大。干制是龙眼最主要的加工方式^[5-6], 且干制龙眼(桂圆肉)被卫计委认定为“药食同源”原料^[7-8]。已有研究表明不同的干燥方式对果蔬的品质及其生物活性影响较大^[9]。因此, 建立理想的干燥方式, 并明确其对产品品质和生物活性的影响, 对龙眼产品的开发具有重要意义。【前人研究进展】热风干燥是龙眼传统的干燥方式, 该方式设备投资小、能耗较低, 并且有利于提高龙眼果肉多糖的免疫调节活性^[10-11]。但该方式较易破坏龙眼质构, 果干褐变严重, 感官品质不高^[12]。CHUNTHAWORN 等^[13]研究指出, 龙眼属于高糖水果, 在热风干燥过程中易受温度和时间的影响发生褐变。龙眼果肉在 60—100℃ 热风干燥过程中, 前 180 min 内亮度缓慢增加, 之后随着干燥时间的增加, 亮度急剧下降。若干燥温度上升到 110—130℃, 亮度降低时间则提前至干燥开始后的 60 min。NATHAKARANAKULE 等^[14]采用远红外辐射辅助热风或热泵干燥龙眼。该技术有利于缩短干燥

时间, 提高干燥效率。并且在远红外辐射过程中容易形成多孔结构, 可以降低果干的皱缩率和硬度, 增强复水性和韧性。但该技术仍然需要 10 h 以上的热处理过程, 对果干色泽及风味影响较大。真空冷冻干燥技术能够较好地保持龙眼原有的外观形状、色泽、风味及生物活性, 并且果干质地较脆。但该方式设备投资高, 干燥时间长且能耗大^[15]。田玉庭等^[16]采用热风干燥、真空干燥、微波干燥、微波真空干燥和真空冷冻干燥来干燥龙眼, 发现真空冷冻干燥龙眼果肉品质最佳, 其次为微波真空干燥。RAJKUMAR 等^[17]研究了热风干燥和真空冷冻干燥工艺对甘蓝片品质、挥发性风味物质及感官评分的影响。结果表明, 与热风干燥产品相比, 真空冷冻干燥能更好的保留甘蓝片的风味物质, 且具有较高的感官评分和整体可接受性。SZYCHOWSKI 等^[18]研究结果表明, 真空冷冻干燥的木瓜抗氧化活性最高, 其次是微波真空干燥, 对流干燥和对流-微波真空干燥两者相当且都较低。WOJDYLO 等^[19]干燥红枣也得出相似的结论。【本研究切入点】不同干燥方式因干燥温度、氧浓度等条件的不同, 对果蔬的营养品质、外观、风味及生物活性的影响不同。联合干燥是结合不同干燥方式进行分阶段干燥的一种复合技术, 可以综合多种干燥方式的优点, 弥补单一方式的不足。【拟解决的关键问题】通过以热风干燥、真空冷冻干燥为对照, 明确热风-真空冷冻联合干燥对脆性龙眼果干品质、风味及益生活性的影响, 旨在为龙眼干燥工艺的优选提供理论依据。

1 材料与方法

试验于 2018 年 9 月至 2019 年 3 月在广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所/农业农村部功能食品重点实验室/广东省农产品加工重点实验室进行。

1.1 试验材料

‘储良’龙眼购于广东省高州晟丰水果专业合作社。环己酮为色谱纯试剂, 购于天津市大茂化学试剂厂。乙酸、丙酸、正丁酸、异丁酸、正戊酸、异戊酸标准品, 购于美国 Sigma 公司。MRS 琼脂培养基、MRS 肉汤培养基, 购自广东环凯微生物技术有限公司。植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum*, 编号: GIM 1.191) 和嗜酸乳杆菌 (*Lactobacillus acidophilus*, 编号: GIM 1.321), 均购于广东省微生物菌种保藏中心。

1.2 仪器与设备

FDU-2100 真空冷冻干燥机, 东京理化器械株式会社; LabSwift-Novasina 便携式水分活度仪, 瑞士 Novasina 公司; 电热恒温鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; SPX-250B-Z 高压蒸汽灭菌锅, 上海博讯实业有限公司; PB-10 pH 计, 德国 Sartorius 公司; LRH-250 生化培养箱, 上海一恒科技有限公司; GC-2010 Plus 气相色谱仪, 日本岛津公司; 超净工作台, 江苏安泰空气技术有限公司; 6890N/5975B GC-MS 气质联用仪, 美国 Agilent 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 龙眼果干的制备 热风-真空冷冻联合干燥 (hot air-vacuum freeze combined drying, HA-VFCD): 挑选 2.4 kg 新鲜龙眼果肉双层平铺于托盘内, 在 100℃ 温度下进行热风预干燥。干燥 3 h (期间每 0.5 h 翻动一次), 之后停止干燥并分装, -20℃ 预冻 12 h。预干燥的龙眼果干放入容量为 2.4 kg 的真空冷冻干燥进行满负荷干燥, 腔内压强 3—4 Pa, 低温-80℃, 连续干燥 50 h, 水分含量达 7% 左右, 得到热风-真空冷冻联合干燥龙眼干。

热风干燥 (hot air drying, HAD): 2.4 kg 新鲜龙眼果肉双层平铺于托盘内, 采用电热鼓风干燥箱干燥。温度为 65℃, 干燥时间 20 h, 期间每 3 h 翻动一次。热风干燥龙眼果干水分含量为 14.53%, 与市售龙眼干干燥温度和品质相当。

真空冷冻干燥 (vacuum freeze drying, VFD): 2.4 kg 新鲜龙眼果肉放入-20℃ 冰箱预冷冻 12 h, 之后

采用真空冷冻干燥机满载干燥, 腔内压强 3—4 Pa, 低温-80℃, 连续干燥 62 h, 龙眼干水分含量 7.46%。

1.3.2 水分含量 采用直接干燥法, 参照 GB 5009.3—2016 完成。

1.3.3 水分活度 使用便携式水分活度仪测定。将 2 g 龙眼果干剪碎后置于水分活度仪测量皿中测定。

1.3.4 收缩率 采用正庚烷体积置换法测定龙眼干收缩率^[20]。以正庚烷为替代品, 以加入龙眼干正庚烷的体积与未加入龙眼干正庚烷体积差为龙眼干体积。10 个样品进行检测并求平均值。收缩率计算公式如下:

$$\text{收缩率}(\%) = \frac{\text{干燥前的体积} - \text{干燥后的体积}}{\text{干燥前的体积}} \times 100$$

1.3.5 复水比 龙眼干置于初始温度为 90℃ 的热水中复水。以 1 min 为时间间隔测定龙眼再水化质量的变化, 测定时间 10 min^[6]。干燥后龙眼复水比计算公式如下:

$$\text{复水比}(\%) = \frac{\text{复水后的重量} - \text{原始重量}}{\text{原始重量}} \times 100$$

1.3.6 总糖及多糖含量 称取 50 g 的龙眼果干或 250 g 的新鲜龙眼果肉, 加入 1 L 80% 的乙醇浸泡过夜, 打浆获得龙眼果浆。在 4 000 r/min 的转速下离心 10 min, 获得沉淀, 重复 2—3 次, 除去多酚、单糖等。将所得沉淀按料液比 1:20 (g·mL⁻¹) 加入蒸馏水, 在 90℃ 下浸提 4 h, 用纱布趁热过滤, 将滤液在 65℃ 的真空浓缩至原体积的 1/5, 获得龙眼多糖溶液。取多糖溶液, 加入 1/4 体积的 Sevag 溶液 (氯仿: 正丁醇=4:1) 脱蛋白, 中低速磁力搅拌 15 min, 在 4 000 r/min 的转速下离心 10 min 脱除蛋白, 收集上清液, 重复 3 次, 将上清液中的有机试剂在 55℃ 下旋蒸去除。取多糖溶液, 加入乙醇并搅拌, 使体系中乙醇最终浓度达到 80%, 4℃ 静置过夜, 抽滤获得沉淀, 用无水乙醇溶液清洗沉淀。将乙醇沉淀的多糖用蒸馏水溶解后真空冷冻干燥, 获得龙眼多糖冻干粉^[21]。

总糖采用苯酚-硫酸法测定, 称取龙眼多糖冻干粉溶于去离子水中, 制备为龙眼多糖溶液。龙眼多糖溶液按照一定倍数稀释后取 1 mL 稀释液置于 25 mL 试管中。随后加入 0.5 mL 质量分数为 6% 的苯酚溶液和 2.5 mL 浓硫酸, 采用漩涡振荡器混合均匀, 并室温静置 30 min。紫外分光光度计在 490 nm 波长处测吸光度。以去离子水代替多糖溶液作为空白对照。

还原糖采用 3,5-二硝基水杨酸 (DNS) 法测定^[22]。1 mL 龙眼多糖稀释液置于 25 mL 试管中, 加入 0.75 mL

DNS 溶液，采用漩涡震荡器混合均匀后沸水浴 5 min，之后采用流水冲洗试管外壁迅速冷却，再加入 10.75 mL 去离子水，混合均匀，540 nm 处测吸光度。以去离子水代替多糖溶液作为空白对照。

多糖含量=总糖含量-还原糖含量

1.3.7 单位能耗 电热恒温鼓风干燥箱和真空冷冻干燥机分别安装专用电表，测定其耗电量。干燥能源效率用单位能耗（SEC）表示^[20]，计算公式如下：

单位能耗=干燥过程中使用的总能源（kj）/龙眼水分损失的总质量（kg）

1.3.8 风味物质 采用顶空-固相微萃取法^[23]。将一定量的龙眼干粉碎，称取 1 g 左右的粉碎样品装入 15 mL 的顶空瓶中，再加入 5 μL 0.2 mg·mL⁻¹ 的环己酮（内标物），拧紧瓶盖，顶空瓶放入 50℃ 的热水中平衡 30 min 后，使用 DVB/CAR/PDMS 50/30 μm 的萃取头插入顶空瓶，30 min 后抽回萃取头，插入进样器，解析 8 min。

气相色谱条件：Agilent 6890 N 气相色谱仪，弹性石英毛细管柱 HP-5 MSUI，30 m×0.25 mm×0.25 μm，He 流量 1 mL·min⁻¹，不分流进样，进样口温度 250℃。起始柱温 35℃ 保持 2 min，然后以 5℃/min 的升温速率升温到 250℃，保持 5 min。

质谱条件：Agilent 5975 MSD 质谱，电离方式 EI，电子能量 70 eV，电子倍增器电压 1 000 V，灯丝发热电流 0.25 mA，接口温度 250℃，离子源温度 200℃，扫描速度全程（40—550）AMU/sec。

1.3.9 龙眼果干益生活性的测定

1.3.9.1 龙眼干果浆的制备 热风干燥、真空冷冻干燥、热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干（干重均为 100 g）置于 1 L 的烧杯中，加蒸馏水至 500 mL，浸泡 2 h 后家用打浆机打浆；新鲜龙眼 500 g（干重 100 g）用打浆机打浆后补充蒸馏水至 500 mL，再继续打浆混匀。4 种果浆按照每瓶 100 mL 标准分装到 250 mL 锥形瓶中，纱布和封口膜封口后 121℃ 高压蒸汽灭菌锅灭菌 15 min，取出备用^[24]。

1.3.9.2 龙眼果浆乳酸菌发酵 龙眼果浆按照 6 lg cfu/mL 接种量接种培养至稳定期的乳酸菌，37℃ 摇床培养箱中分别培养 0、6、12、24 和 48 h 后进行检测^[24]。

1.3.9.3 菌落数的测定 参考 GB 4789.35—2016 执行。

1.3.9.4 pH 的测定 取 5 mL 发酵液用 pH 计测定，每个样品重复测定 3 次。

1.3.9.5 总糖及还原糖的测定 发酵液中总糖含量采用苯酚-硫酸法测定^[21]。取 1 mL 发酵液以 4 000 r/min 离心 10 min，上清液用蒸馏水稀释至合适的浓度，按照前述总糖测定方法进行。发酵液中还原糖含量按照前述 DNS 法进行。

1.3.9.6 短链脂肪酸的测定 短链脂肪酸的测定按照如下方法进行。10 mL 发酵果浆 10 000 r/min 离心 15 min 后，注射器吸取 1 mL 发酵上清液过 0.22 μm 滤膜后装入气相瓶，采用气相色谱分析。色谱条件如下：DB-FFAP 色谱柱，载气为 N₂，流速 30.0 mL·min⁻¹，分流比 1：9，空气流速 400 mL·min⁻¹，H₂ 流速 30 mL·min⁻¹。检测器 FID，检测温度 240℃，进样口温度 240℃，升温程序 70℃—240℃。样品进样量 1 μL，测定时间 42.47 min。同时以乙酸、丙酸、正丁酸、异丁酸、正戊酸和异戊酸为标准品，按上述操作绘制标准曲线^[24]。

1.4 数据分析

用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 进行结果分析。风味物质经 GC-MS 分析鉴定后，其结果用计算机谱库（NIST 05/WILEY）检索和人工图谱解析，并结合相关文献共同分析。

2 结果

2.1 热风-真空冷冻联合干燥对脆性龙眼果干品质的影响

2.1.1 水分含量、水分活度、皱缩率 热风-真空冷冻联合干燥的龙眼果干水分含量、水分活度和皱缩率均低于热风干燥而高于真空冷冻干燥（表 1）。在水

表 1 热风-真空冷冻联合干燥对龙眼果干水分含量、水分活度和皱缩率的影响

Table 1 Effect of hot air-vacuum freeze combined with drying on moisture content, moisture activity and shrinkage of longan fruit

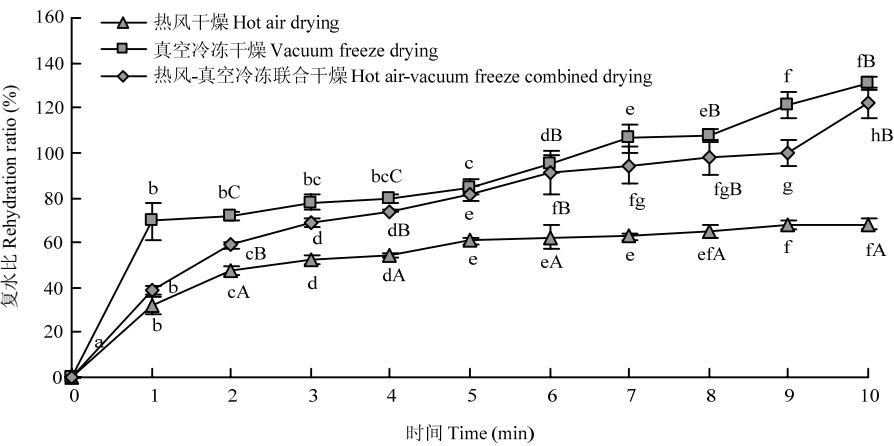
干燥方式 Drying method	水分含量 Water content (%)	水分活度 Water activity	皱缩率 Shrinkage rate (%)
热风干燥 Got air drying	14.53±0.59b	0.63±0.01b	76.43±2.13c
真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	7.46±0.31a	0.41±0.01a	39.21±1.68a
热风-真空冷冻联合干燥 Hot air-vacuum freeze combined drying	8.02±0.01a	0.42±0.00a	47.25±1.28b

不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下同 Different lowercase letters indicate significant difference (P<0.05). The same as below

分含量和水分活度上,热风-真空冷冻联合干燥的龙眼果干与真空冷冻干燥的龙眼果干无显著性差异。在皱缩率上,热风-真空冷冻联合干燥介于两者之间,说明热风-真空冷冻联合干燥相对于热风干燥在一定程度上降低了皱缩率。

2.1.2 复水比 复水比是评价干制品品质的重要指标,它可以反映物料由干燥引起的结构变化和细胞破坏程度。热风-真空冷冻联合干燥的龙眼果干在不同时间复水比均高于热风干燥而低于真空冷冻干燥。热风

干燥的龙眼果干复水比在浸泡 5 min 后变化较小,其复水性较差。热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干复水比介于两者之间,更接近于真空冷冻干燥的龙眼果干。在 2—4 min 内,3 种干燥方式的龙眼果干复水比存在显著性差异。其中,热风-真空冷冻联合干燥的龙眼果干复水比高于热风干燥而低于真空冷冻干燥。然而,当 6 min 后,热风-真空冷冻联合干燥与真空冷冻干燥的龙眼果干复水比无显著性差异,且均高于热风干燥的龙眼果干(图 1)。



不同小写字母表示同一干燥方式不同复水时间的数值差异显著 ($P<0.05$); 不同大写字母表示相同时间不同干燥方式复水比的数值差异显著 ($P<0.05$)

Different lowercase letters indicate significant difference in rehydration time of the same drying method ($P<0.05$); Different capital letters indicate significant difference of rehydration ratio with different drying methods at the same time ($P<0.05$)

图 1 热风-真空冷冻联合干燥对龙眼果干复水比的影响

Fig. 1 Effect of hot air-vacuum freeze combined with drying on rehydration ratio of longan fruit

2.1.3 风味物质 热风-真空冷冻联合干燥对龙眼果干挥发性风味物质的影响见表 2。结果表明,热风干燥、真空冷冻干燥、热风-真空冷冻联合干燥分别检测出 17、34 和 23 种物质,物质种类共 44 种,包括烷烃类 12 种,烯烃类 11 种,醇类 5 种,酯类 2 种,醛类 13 种,酸类 1 种。其中 10 种挥发性风味物质为 3 种干燥方式所共有。这些挥发性物质按照一定的比例构成了龙眼的特有风味。

就挥发性物质种类及含量而言,热风干燥检出的挥发性物质种类最少,其中最多的是烷烃类 8 种,最少的是烯烃类和酸类,均为 1 种;相对含量最高的烷烃类为 $2.65 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,最低的酸类为 $0.07 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。真空冷冻干燥中最多的是醛类,共 13 种;最少的是酯类,为 1 种;相对含量最高的为烯烃类 ($17.50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),最低的为醛类 ($0.52 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)。热风-真空冷冻联合干

燥中最多的是烷烃类和烯烃类,均为 9 种,最少的是酯类,为 1 种;相对含量最高的是烯烃类 ($22.62 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),最低的是醛类。热风-真空冷冻联合干燥的龙眼果干中烃类物质含量最多,其中别罗勒烯的异构体化合物含量最高,占挥发性物质总量的 85.17%。就挥发性物质的总量而言,热风-真空冷冻联合干燥 ($26.56 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 高于热风干燥 ($4.4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),低于真空冷冻干燥 ($37.06 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)。表明热风-真空冷冻联合干燥的龙眼果干在风味上优于热风干燥,更接近于真空冷冻干燥。

2.1.4 总糖及多糖含量 热风-真空冷冻联合干燥龙眼眼中总糖及多糖含量见表 3。其中,热风-真空冷冻联合干燥的龙眼果干中总糖及多糖含量分别为 $2.23 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ DW}$ 和 $1.96 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ DW}$,低于真空冷冻干燥,而高于新鲜龙眼和热风干燥的含量。

表 2 热风-真空冷冻联合干燥对龙眼果干挥发性风味物质的影响

Table 2 Effect of hot air-vacuum freeze combined drying on volatile flavor substances of longan

挥发性物质 Volatile flavor substances	热风干燥 Hot air drying	真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	热风-真空冷冻联合干燥 Hot air-vacuum freeze combined with drying
烷烃类 Alkane			
三氯甲烷 Trichloromethane	—	0.75±0.09	0.25±0.04
十一烷 Undecane	0.16±0.01	—	0.08±0.01
十二烷 Dodecane	0.08±0.01	0.52±0.02	0.19±0.13
十三烷 Tridecane	—	0.41±0.11	0.20±0.02
十四烷 Tetradecane	0.06±0.01	0.45±0.00	0.21±0.02
八甲基环四硅氧烷 Octamethyl cyclotetrasiloxane	—	0.18±0.11	—
十甲基环五硅氧烷 Decamethyl cyclopentasiloxane	0.44±0.23	1.30±0.30	0.99±0.04
十二甲基环六硅氧烷 Dodecymethyl cyclohexasiloxane	1.05±0.11	1.65±0.11	1.03±0.08
十四甲基环七硅氧烷 Tetradecyclic heptasiloxane	0.69±0.11	0.86±0.06	0.54±0.01
十六烷基环八硅氧烷 Hexadecyl cyclooctasiloxane	0.09±0.11	0.09±0.01	0.13±0.01
正十九烷 Nonadecane	0.08±0.01	—	—
十八甲基环九硅氧烷 Octadecymethyl cyclodoxy siloxane	—	0.21±0.02	—
烷烃类总量 Total alkane	2.65±0.12	6.42±0.37	3.61±0.25
烯烃类 Olefin			
罗勒烯异构体混合物 Mixture of basil isomers	0.10±0.26	15.89±0.86	20.07±4.62
(E)-B-罗勒烯(E)-B-ocimene	—	0.36±0.04	0.60±0.11
别罗勒烯 Alloocimene	—	—	0.71±0.19
反式石竹烯 Trans carnation	—	0.13±0.00	0.10±0.03
古巴烯 Cuba ene	—	0.14±0.02	—
2,6-二甲基-1,3,5,7-辛四烯 2,6-dimethyl-1,3,5,7-octatetracene	—	—	0.13±0.01
α-法呢烯 α-farnesene	—	0.16±0.02	0.19±0.02
(6E)-7,11-二甲基-3-亚甲基-1,6,10-十二碳三烯	—	0.28±0.02	0.55±0.07
(6E)-7,11-dimethyl-3-methylene-1,6,10-dodecatriene	—	—	—
2,6-二乙基吡嗪 2,6-diethylpyrazine	—	0.55±0.05	—
2,6-二甲基-6-(4-甲基-3-戊基)双环[3.1.1]七碳-2-烯	—	—	0.11±0.03
2,6-dimethyl-6-(4-methyl-3-pentenyl)-bicyclo [3.1.1]hept-2-ene	—	—	0.16±0.11
3,7,11-三甲基-1,3,6,10-十二碳-四烯(E,E)-α-farnesene	—	—	—
烯烃类总量 Total olefin	0.10±0.26	17.50±0.87	22.62±4.96
醇类 Alcohol			
(2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇(R,R)-2,3-butanediol	0.39±0.07	—	0.14±0.02
2,3-丁二醇 2,3-butanediol	0.72±0.24	0.92±0.05	0.14±0.01
环己醇 Cyclohexanol	0.07±0.01	—	—
芳樟醇 Linalool	—	2.03±0.34	—
苯乙醇 Phenethyl alcohol	—	0.37±0.04	—
醇类总量 Total alcohol	1.19±0.32	3.32±0.03	0.13±0.18
酯类 Ester			
水杨酸甲酯 Methyl salicylate	0.12±0.01	1.53±0.09	—
软脂酸乙酯 Ethyl palmitate	0.07±0.00	1.05±0.03	0.07±0.02
月桂酸乙酯 Ethyl laurate	—	2.45±0.07	0.04±0.01
烟酸甲酯 Methyl nicotinate	—	1.13±0.06	—

续表 2 Continued table 2

挥发性物质 Volatile flavor substances	热风干燥 Hot air drying	真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	热风-真空冷冻联合干燥 Hot air-vacuum freeze combined with drying
苯甲酸乙酯 Ethyl benzoate	—	0.53±0.12	—
烟酸乙酯 Nicotinic acid ethyl ester	—	0.28±0.13	—
乙酸乙酯 Ethyl acetate	—	0.12±0.01	—
(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸甲酯 2,6-octadienoic acid,3,7-dimethyl-, methyl ester	—	0.20±0.17	—
癸酸乙酯 Ethyl caprate	—	0.66±0.06	—
月桂酸甲酯 Methyl laurate	—	0.32±0.05	—
十四酸乙酯 Ethyl myristate	—	0.76±0.11	—
14-甲基十五烷酸甲酯 Methyl 14-methylpentadecanoate	—	0.18±0.03	—
油酸乙酯 Ethyl oleate	—	0.10±0.01	—
酯类总量 Total ester	0.19±0.01	9.30±0.24	0.11±0.01
醛类 Aldehyde			
壬醛 Nonanal	0.12±0.03	0.52±0.13	0.09±0.02
癸醛 Capraldehyde	0.07±0.01	—	—
醛类总量 Total aldehyde	0.20±0.14	0.52±0.13	0.09±0.02
酸类 Acid			
壬酸 N-nonanoic acid	0.07±0.00	—	—
酸类总量 Total acids	0.07±0.00	—	—

“—”表示未检测到 “-” indicates no detection

表 3 热风-真空冷冻联合干燥龙眼中总糖及多糖含量

Table 3 The content of total sugar and polysaccharide in longan by hot air-vacuum freezing combined with drying

干燥方式 Drying method	总糖 Total sugar (mg·g ⁻¹ DW)	多糖 Polysaccharide (mg·g ⁻¹ DW)
新鲜龙眼 Fresh logan	1.72±0.15a	1.55±0.15a
热风干燥 Hot air drying	1.86±0.09a	1.52±0.09a
真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	3.15±0.17c	2.76±0.18c
热风-真空冷冻联合干燥 Hot air-vacuum freeze combined drying	2.23±0.12b	1.96±0.13b

2.2 热风-真空冷冻联合干燥对能源消耗与干燥时间的影响

干燥相同重量的新鲜龙眼，热风-真空冷冻联合干燥比真空冷冻干燥节约干燥时间 12.16%，节约单位能

耗 25.40%。热风干燥效率高，但其产品品质较差。真空冷冻干燥时间长，能耗大，但品质较好。热风-真空冷冻联合干燥结合两种干燥方式的特点，实现了干燥时间的缩短和能耗的节约，提高了干燥效率（表 4）。

表 4 热风-真空冷冻联合干燥对龙眼果干单位能耗和干燥时间的影响

Table 4 Effects of hot air - vacuum freezing combined drying on energy consumption and drying time of longan fruit

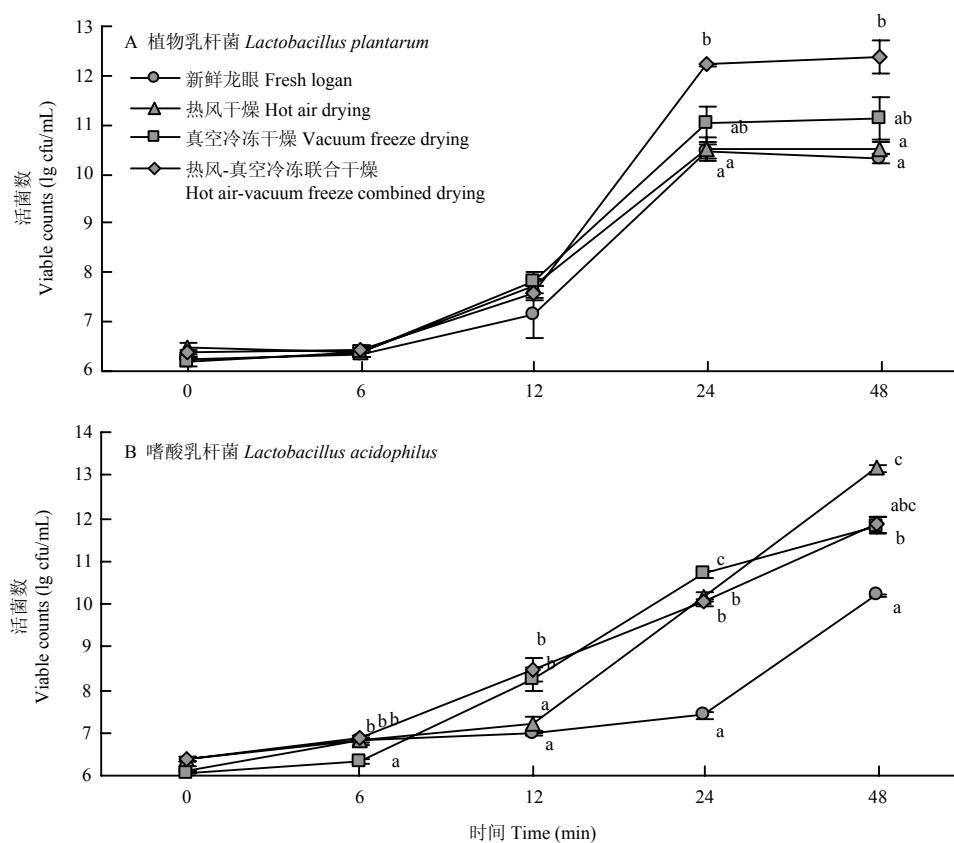
干燥方式 Drying method	干燥 2.4 kg 龙眼时间 Drying time of 2.4 kg longan (h)			单位能耗 Unit energy consumption (mj·kg ⁻¹)		
	热风干燥阶段 Hot air drying period	真空冷冻阶段 Vacuum freeze drying period	总耗时 Total time	热风干燥阶段 Hot air drying period	真空冷冻阶段 Vacuum freeze drying period	总单位能耗、 Total unit energy consumption
热风干燥 Hot air drying	20.00	—	20.00	7.90	—	7.90
真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	—	74.00	74.00	—	108.09	108.09
热风-真空冷冻联合干燥 Hot air-vacuum freeze combined with drying	3.00	62.00	65.00	4.68	75.96	80.64

2.3 热风-真空冷冻联合干燥对脆性龙眼果干益生活性的影响

2.3.1 活菌数 新鲜龙眼和不同干燥方式的龙眼果干均可以促进植物乳杆菌生长。当植物乳杆菌开始发酵 6 h 时活菌数无显著变化,处于迟滞期,12 h 时活菌数提高,24 h 时活菌数显著提高,达到对数生长期,48 h 以后活菌数变化稳定。热风-真空冷冻干燥龙眼果干发酵 48 h 后活菌数生长最多可达 12.40 lg cfu/mL,其次是真空冷冻干燥 (11.14 lg cfu/mL) 和热风干燥 (10.51 lg cfu/mL),新鲜龙眼最低 (图 2-A)。嗜酸乳杆菌发酵新鲜龙眼和不同干燥方式的龙眼果干,48 h 仍未达到稳定期。热风干燥的龙眼在发酵 48 h 后活菌数达到最大值 (13.17 lg cfu/mL),显著高于其余 3 种。热风-真空冷冻干燥 (11.84 lg cfu/mL) 和真空冷冻干燥 (11.83 lg cfu/mL) 活菌数无显著差异,新鲜龙

眼活菌数最低 (图 2-B)。结果表明,新鲜和干制龙眼果干都能增殖植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌,但不同菌种和不同干燥方式对活菌数的影响不同。干制可以提高龙眼对益生菌的增殖能力。

2.3.2 总糖 植物乳杆菌发酵过程中随着发酵时间的延长,总糖含量持续下降,24 h 后开始趋于稳定,发酵 48 h 后,总糖含量与发酵前相比显著降低;发酵 48 h 后热风干燥龙眼干总糖含量最低,真空冷冻干燥龙眼干的总糖含量显著高于其他干燥方式 (图 3-A)。嗜酸乳杆菌发酵过程中前 12 h 总糖变化无显著性差异,12 h 以后总糖持续下降且未出现稳定期,与嗜酸乳杆菌活菌数的变化呈负相关关系;发酵 48 h 后,新鲜龙眼和热风干燥龙眼总糖含量显著低于热风-真空冷冻联合干燥,真空冷冻干燥龙眼总糖含量则显著高于热风-真空冷冻联合干燥 (图 3-B)。

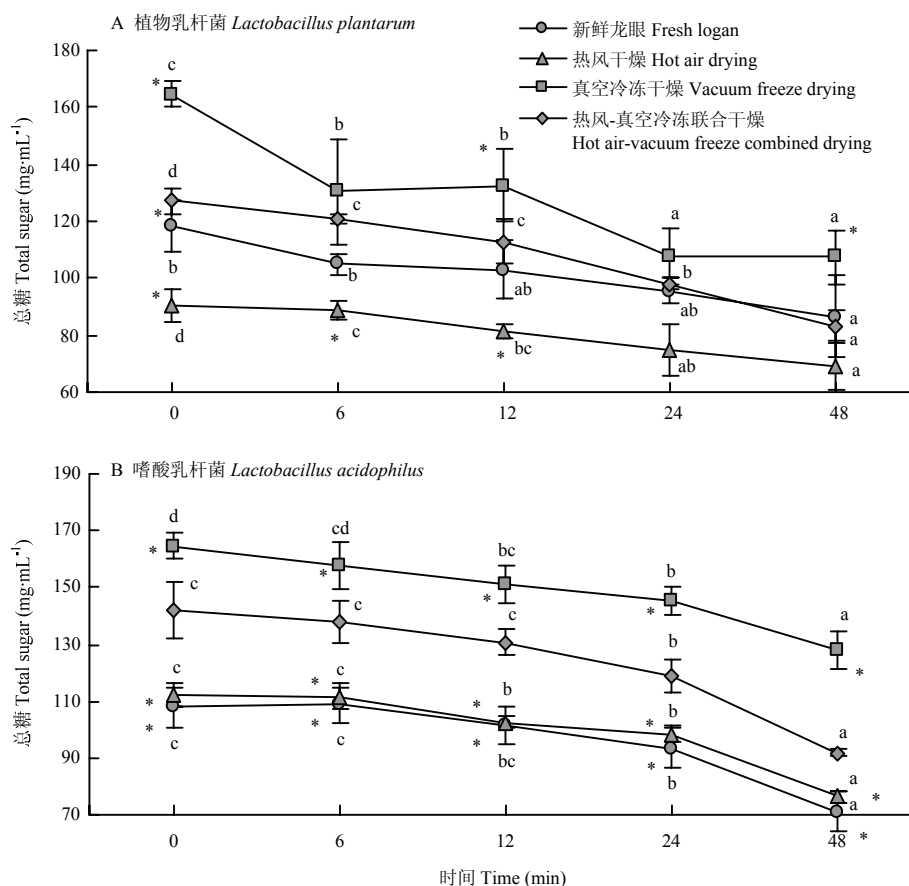


不同小写字母表示不同干燥方式在同一发酵时间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant difference among different drying methods at the same fermentation time ($P < 0.05$). The same as below

图 2 热风-真空冷冻联合干燥的龙眼果干发酵过程中活菌数的变化

Fig. 2 The change of the number of viable bacteria during the fermentation of dried longan fruit by hot air-vacuum freeze combined with drying



不同小写字母表示同一干燥方式不同发酵时间差异显著 ($P < 0.05$); *表示同一发酵时间其他干燥方式与热风-真空冷冻干燥相比差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant difference of different fermentation time of the same drying method ($P < 0.05$); * indicate significant difference between other drying methods and hot air-vacuum freeze combined drying at the same fermentation time ($P < 0.05$). The same as below

图3 热风-真空冷冻联合干燥的龙眼果干发酵过程中总糖的变化

Fig. 3 The change of the total sugar during the fermentation of dried longan fruit by hot air-vacuum freeze combined with drying

2.3.3 还原糖 植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌发酵后呈现较为相似的变化 (图 4)。随着发酵时间的延长,真空冷冻干燥和热风-真空冷冻联合干燥的龙眼干还原糖均呈上升趋势,而新鲜龙眼和热风干燥龙眼干发酵后还原糖含量降低。

2.3.4 短链脂肪酸 不同干燥方式的龙眼果干经植物乳杆菌发酵 48 h 后的短链脂肪酸相对于新鲜龙眼显著提高,且不同干燥方式龙眼果干经植物乳杆菌发酵产生的短链脂肪酸的含量差异较大。4 种龙眼果干经发酵后均能产生较高含量的乙酸,其次是异戊酸、丙酸、正丁酸,而异丁酸和正戊酸含量较低。其中,热风-真空冷冻联合干燥产生的乙酸 ($148.92 \mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}$) 显著低于热风干燥,与真空冷冻干燥相当。热风-真空冷冻联合干燥的龙眼果干经发酵产生的异丁酸 (0.84

$\mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}$) 含量最高。不同干燥方式的龙眼果干经发酵产生的丙酸、异戊酸、正戊酸含量无显著性差异 (表 5)。

4 种龙眼果干经嗜酸乳杆菌发酵后均能产生较高含量的乙酸,其次是异戊酸、丙酸、正丁酸,而异丁酸和正戊酸含量较低。其中,新鲜和不同干燥方式的龙眼果干经发酵产生的乙酸、正戊酸含量无显著性差异。热风-真空冷冻联合干燥的脆性龙眼干经发酵产生的丙酸 ($11.35 \mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}$)、异丁酸 ($1.80 \mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}$)、异戊酸 ($9.27 \mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}$) 含量显著高于新鲜、热风干燥、真空冷冻干燥 (表 6)。表明不同干燥方式龙眼果干经嗜酸乳杆菌发酵产生的短链脂肪酸含量差异较大,且益生效果受菌株种类的影响较大。

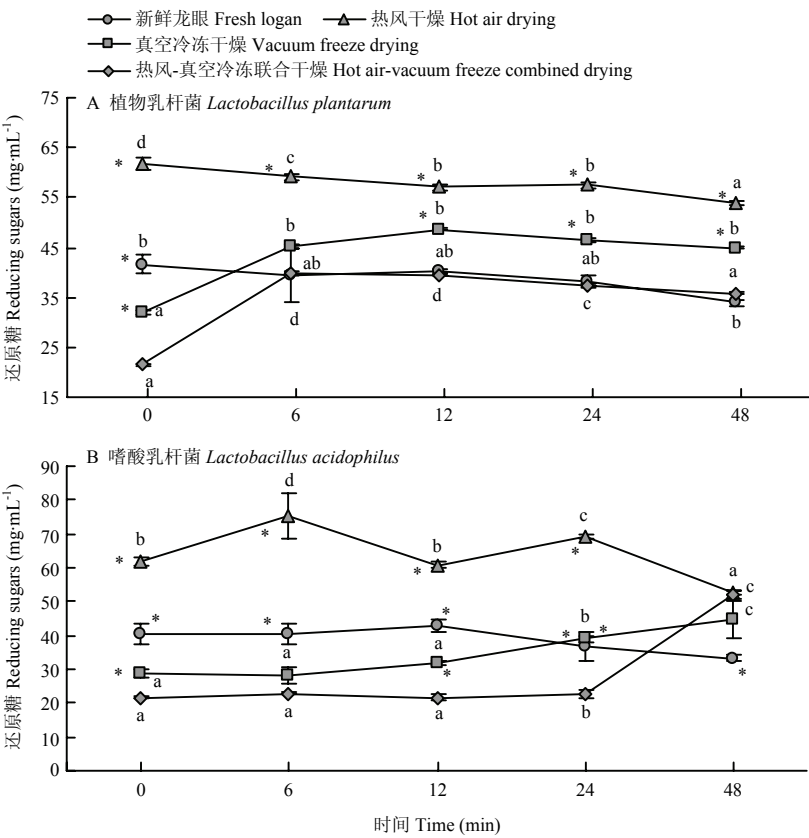


图 4 热风-真空冷冻联合干燥的龙眼果干发酵过程中还原糖的变化

Fig. 4 The change of the reducing sugars during the fermentation of dried longan fruit by hot air-vacuum freeze combined with drying

表 5 热风-真空冷冻干燥的龙眼果干经植物乳杆菌发酵 48 h 后短链脂肪酸含量变化

Table 5 The change of contents of short-chain fatty acids in longan fruits fermented by *Lactobacillus plantarum* for 48 h by hot air-vacuum freeze combined drying ($\mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}$)

干燥方式	乙酸	丙酸	异丁酸	正丁酸	异戊酸	正戊酸
Drying method	Acetic acid	Propionic acid	Isobutyric acid	N-butyric acid	Isovaleric acid	Pentanoic acid
新鲜龙眼 Fresh logan	125.92±4.38a	2.68±0.19a	0.68±0.03ab	2.65±0.09a	4.80±2.51a	0.28±0.03a
热风干燥 Hot air drying	163.34±7.82c	5.61±1.02b	0.78±0.16b	6.26±0.41c	6.98±0.57ab	0.42±0.02b
真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	157.89±2.32bc	4.65±0.52b	0.53±0.03a	4.38±0.66b	12.14±0.98b	0.41±0.01ab
热风-真空冷冻联合干燥	148.92±4.63b	5.90±0.75b	0.84±0.07b	3.26±0.24a	8.65±4.66ab	0.42±0.12b
Hot air-vacuum freeze combined drying						

表 6 热风-真空冷冻干燥的龙眼果干经嗜酸乳杆菌发酵 48 h 后短链脂肪酸含量变化

Table 6 The change of contents of short-chain fatty acids in longan fruits fermented by *Lactobacillus acidophilus* for 48 h by hot air-vacuum freeze combined drying ($\mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}$)

干燥方式	乙酸	丙酸	异丁酸	正丁酸	异戊酸	正戊酸
Drying method	Acetic acid	Propionic acid	Isobutyric acid	N-butyric acid	Isovaleric acid	Pentanoic acid
新鲜龙眼 Fresh logan	138.18±31.16a	4.41±0.75a	0.74±0.33a	3.38±1.48ab	8.02±0.06ab	0.42±0.04a
热风干燥 Hot air drying	179.08±14.05a	5.47±0.33a	0.85±0.03a	4.64±0.43b	7.60±0.26a	0.60±0.03a
真空冷冻干燥 Vacuum freeze drying	145.61±24.34a	5.47±0.68a	1.41±0.07a	3.37±0.26ab	7.19±0.24a	0.49±0.09a
热风-真空冷冻联合干燥	177.03±27.10a	11.35±2.12b	1.80±0.34b	2.95±0.39a	9.27±1.31b	0.68±0.38a
Hot air-vacuum freeze combined drying						

3 讨论

热风-真空冷冻联合干燥结合了真空冷冻干燥和热风干燥的特点,且由于其热风干燥时间较短,因此其品质更接近于真空冷冻干燥产品品质。真空冷冻干燥的龙眼果干疏松多孔呈海绵状,亲水性好,复水率高。而热风干燥过程中龙眼果肉内部细胞组织结构塌陷^[25],收缩并形成致密结构,这使得产品在再水化期间持水保留的能力较低。张群等^[26]研究表明在热风干燥蓝莓的过程中,表面温度高于内部温度将造成表面水分迅速迁移并形成一层硬膜,内部呈现出内裂空隙现象,使热风干燥后的产品干瘪,口感坚硬,复水性差。采用本研究工艺制备的龙眼干色泽微黄,口感较脆硬,咀嚼过程中略带韧性,与市售传统热风干燥产品相比,品质有明显提升。此外,联合干燥脆性龙眼果干水分活度保持在 0.6 以下,可以认为其不受常见微生物损害,有利于长期保存。

在挥发性风味物质上,CHANG 等^[27]从龙眼中分离出来的挥发性物质主要为醇、醛、酮、酯、烷烃、酸、多酚、呋喃和混杂化合物 9 类,与本研究结果一致。这些挥发性物质按照一定比例形成了龙眼的特殊风味。其中龙眼烯烃类物质含量最高,依次是烷烃类、酯类,而罗勒烯的异构体化合物含量最高,这与胡文舜等^[28]用 DVB/CAR/PDMS 萃取头检测‘晚香’龙眼含量最高的香气成分是罗勒烯异构体混合物为 74.1%的结果一致。真空低温的条件下营养物质的破坏较小,风味保留较好,因此真空冷冻干燥相对于热风干燥挥发性物质的种类更高^[29-30]。本研究发现热风-真空冷冻联合干燥相对于热风干燥同样保留了更多的挥发性风味物质种类和含量,略低于真空冷冻干燥。因此,联合干燥在风味上优于热风干燥的产品,更接近于真空冷冻干燥龙眼果干。

本研究比较不同干燥方式龙眼果干对植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌的增殖效果,发现发酵过程中两种益生菌的活菌数和部分短链脂肪酸在 48 h 后显著升高,pH 和总糖含量降低,说明龙眼干具有较好的益生活性。笔者课题组前期研究表明,将龙眼干打浆后灌胃小鼠,可以显著提高小鼠肠道内的乳杆菌数量,且对小鼠肠道黏膜免疫系统具有正向调节作用^[24]。有研究表明,植物多糖对肠道菌群的组成和代谢产物有显著的影响,特定的多糖可被益生菌分泌的细菌糖苷酶水解成单糖,然后单糖被细菌代谢降解成短链脂肪酸以及气体,导致发酵液的 pH 显著降低^[31]。ALAVIJEH 等^[32]

研究表明开心果果壳多糖可以促进植物乳杆菌和鼠李糖乳杆菌的增殖且能提高发酵液中乙酸、丙酸和丁酸的含量。HU 等^[33]研究发现车前子种子多糖可部分被人体粪便微生物利用,体外发酵过程中总 SCFA、乙酸、丙酸和正丁酸的产量均显著增加,其单糖组成决定了其短链脂肪酸的产生。AHMADI 等^[34]研究指出,热风干燥会引起多糖高分子聚合链的构象改变,结晶度和功能团变化,进而影响其益生活性变化。因此,推测不同干燥方式下龙眼果干的益生活性差异可能是由于不同加工方式引起多糖的理化性质和结构差异所致。此外,多糖选择性地利用肠道中的益生菌,并通过增加肠道中益生菌的数量和调节其代谢物来发挥其健康益处^[35]。同一种多糖对不同乳酸菌增殖效果也存在差异,WANG 等^[36]研究表明,油菜籽不同级分的多糖 CRP1 和 CRP2 都能促进双歧杆菌和乳杆菌的增殖,且不同级分的多糖增殖效果不同,表明微生物对多糖的利用程度具有差异性。综上,干燥方式造成的多糖结构变化和微生物对多糖的差异化利用造成了龙眼果浆发酵植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌过程中活菌数、pH、总糖、还原糖、短链脂肪酸变化的差异较大。

4 结论

热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干的水分含量、水分活度和皱缩率显著低于热风干燥,复水比显著高于热风干燥。联合干燥龙眼果干的总糖含量、多糖含量以及挥发性风味物质种类和总量均低于真空冷冻干燥,而高于热风干燥。热风-真空冷冻联合干燥比真空冷冻干燥节约干燥时间 12.16%,节约单位能耗 25.40%。此外,植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌均能通过发酵龙眼干增加活菌数量,产生短链脂肪酸,降低发酵液 pH。龙眼干的益生效果受干燥方式和菌株种类的影响较大。综合考虑,热风-真空冷冻联合干燥结合了热风干燥和真空冷冻干燥两种干燥方式的优点,可以显著缩短干燥时间、节约能耗、提高干燥效率和龙眼果干品质。

References

- [1] WU Y L, YI G J, ZHOU B R, ZENG J W, HUANG Y H. The advancement of research on litchi and longan germplasm resources in China. *Scientia Horticulturae*, 2007, 114(3): 143-150.
- [2] 齐文娥,陈厚彬,彭朵芬,晏发发. 中国龙眼产业发展现状、问题与对策建议. *广东农业科学*, 2016, 43(8): 169-174.
- [3] QI W E, CHEN H B, PENG D F, YAN F F. Present situation, problems and suggestions of the development of Chinese longan

- industry. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2016, 43(8): 169-174. (in Chinese)
- [3] 白亚娟, 刘磊, 张瑞芬, 邓媛元, 黄菲, 张名位. 龙眼果肉提取物改善东莨菪碱诱导小鼠学习记忆功能. *中国农业科学*, 2016, 49(21): 4203-4213.
- BAI Y J, LIU L, ZHANG R F, DENG Y Y, HUANG F, ZHANG M W. Longan pulp extracts ameliorate scopolamine-induced learning and memory of impairment mice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21): 4203-4213. (in Chinese)
- [4] RONG Y, YANG R L, YANG Y Z, WEN Y Z, LIU S X, LI C F, HU Z Y, CHENG X R, LI W. Structural characterization of an active polysaccharide of longan and evaluation of immunological activity. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 213: 247-256.
- [5] YANG K M, CHIANG P Y. Effects of smoking process on the aroma characteristics and sensory qualities of dried longan. *Food Chemistry*, 2019, 287: 133-138.
- [6] APINYAVISIT K, NATHAKARANAKULE A, MITTAL G S, SOPONRONNARIT S. Heat and mass transfer properties of longan shrinking from a spherical to an irregular shape during drying. *Biosystems Engineering*, 2018, 169: 11-21.
- [7] 陈彦林. 不同干燥方式龙眼果肉主要活性物质的比较[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- CHEN Y L. Comparison of different drying methods on main active substances in longan (*Dimocarpus longan* Lour.) pulp [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [8] 苏东晓, 张名位, 廖森泰, 侯方丽, 张瑞芬, 唐小俊, 魏振承, 张雁, 池建伟, 邓媛元. 龙眼果肉水溶性提取物对正常小鼠免疫调节作用的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(9): 1919-1925.
- SU D X, ZHANG M W, LIAO S T, HOU F L, ZHANG R F, TANG X J, WEI Z C, ZHANG Y, CHI J W, DENG Y Y. Effects of water soluble extracts from longan on immune regulation in normal mice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(9): 1919-1925. (in Chinese)
- [9] LI X, WANG L, WANG Y, XIONG Z H. Effect of drying method on physicochemical properties and antioxidant activities of *Hohenbuehelia serotina* polysaccharides. *Process Biochemistry*, 2016, 51(8): 1100-1108.
- [10] 韩苗苗, 姚娟, 易阳, 黄菲, 王丽梅. 龙眼果肉干燥过程中多糖的理化特征与活性变化规律. *食品科学*, 2017, 38(21): 67-73.
- HAN M M, YAO J, YI Y, HUANG F, WANG L M. Changes of polysaccharides in longan pulp during drying: Physicochemical properties and biological activities. *Food Science*, 2017, 38(21): 67-73. (in Chinese)
- [11] YI Y, ZHANG M W, LIAO S T, ZHANG R F, DENG Y Y, WEI Z C, TANG X J, ZHANG Y. Structural features and immunomodulatory activities of polysaccharides of longan pulp. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87(1): 636-643.
- [12] 王亚鸽, 支龙飞, 张益涵, 蒙源, 钟钦权, 杨志伟. 龙眼真空冻干与热风干燥品质比较研究. *轻工科技*, 2012, 28(5): 24-25.
- WANG Y G, ZHI L F, ZHANG Y H, MENG Y, ZHONG Q Q, YANG Z W. Comparative study on quality of longan vacuum freeze-drying and hot air-drying. *Light Industry Science and Technology*, 2012, 28(5): 24-25. (in Chinese)
- [13] CHUNTHAWORN S, ACHARIYAVIRIYA S, ACHARIYAVIRIYA A, NAMSANGUAN K. Color kinetics of longan flesh drying at high temperature. *Procedia Engineering*, 2012, 32: 104-111.
- [14] NATHAKARANAKULE A, JAIBOON P, SOPONRONNARIT S. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *Journal of Food Engineering*, 2010, 100(4): 662-668.
- [15] 庄培荣. 龙眼肉微波真空干燥技术的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- ZHUANG P R. Studies on the microwave vacuum drying of arillus longan [D]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2011. (in Chinese)
- [16] 田玉庭, 陈洁, 李淑婷, 庄培荣, 庄玮婧, 郑宝东. 不同干燥方法对龙眼果肉品质特性的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(8): 161-165.
- TIAN Y T, CHEN J, LI S T, ZHUANG P R, ZHUANG W J, ZHENG B D. Effect of different drying methods on the quality of longan (*Dimocarpus longan* Lour.) pulp. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(8): 161-165. (in Chinese)
- [17] RAJKUMAR G, SHANMUGAM S, GALVAO M D S, DUTRA-SANDES R D, LEITE-NETA M T S, NARAIN N, MUJUMDAR A S. Comparative evaluation of physical properties and volatiles profile of cabbages subjected to hot air and freeze drying. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 80: 501-509.
- [18] SZYCHOWSKI P J, LECH K, SENDRA-NADAL E, HEMNANDEZ F, FIGIEL A, WOJDYLO A, CARBONELL-BARRACHINA Á A. Biocompounds, antioxidant activity, and sensory attributes of quinces as affected by drying method. *Food Chemistry*, 2018, 255: 157-164.
- [19] WOJDYLO A, FIGIEL A, LEGUA P, LECH K, CARBONELL-BARRACHINA Á A, HEMNANDEZ F. Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method. *Food Chemistry*, 2016, 207: 170-179.
- [20] NATHAKARANAKULE A, JAIBOON P, SOPONRONNARIT S. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *Journal of Food*

- Engineering*, 2010, 99(4): 662-668.
- [21] HUANG F, LIU H J, ZHANG R F, DONG L H, LIU L, MA Y X, JIA X C, WANG G J, ZHANG M W. Physicochemical properties and prebiotic activities of polysaccharides from longan pulp based on different extraction techniques. *Carbohydrate Polymers*, 2019b, 206: 344-351.
- [22] KONG F L, ZHANG M W, KUANG R B, YU S J, CHI J W, WEI Z C. Antioxidant activities of different fractions of polysaccharide purified from pulp tissue of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). *Carbohydrate Polymers*, 2010, 81(3): 612-616.
- [23] ZHANG Y, GAO B, ZHANG M W, SHI J, XU Y J. Headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry analysis of the volatile components of longan (*Dimocarpus longan* Lour.). *European Food Research and Technology*, 2009, 229(3): 457-465.
- [24] 俞憬. 龙眼果干乳酸菌发酵工艺优化及肠道菌群调节作用的研究 [D]. 广州: 广东药科大学, 2018.
- YU J. Study on process optimization of longan pulps fermented by lactobacillus and regulation of intestinal flora [D]. Guangzhou: Guangdong Pharmaceutical University, 2018. (in Chinese)
- [25] WANG H, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Comparison of three new drying methods for drying characteristics and quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*). *Drying Technology*, 2014, 32(15): 1791-1802.
- [26] 张群, 刘伟, 袁洪燕. 不同温度热风干燥对蓝莓果干品质的影响. 湖南农业科学, 2018(6): 79-83.
- ZHANG Q, LIU W, YUAN H Y. Effects of hot-air-drying at different temperatures on blueberry quality. *Hunan Agricultural Sciences*, 2018(6): 79-83. (in Chinese)
- [27] CHANG C Y, CHANG C H, YU T H. The effect of drying treatment on the flavor and quality of longan fruit. *Development of Food Science*, 1998, 40: 353-367.
- [28] 胡文舜, 蒋际谋, 黄爱萍, 郑少泉. ‘晚香’龙眼果实香气成分的 3 种萃取头 GC-MS 效果分析. 福建农业学报, 2015, 30(12): 1497-1154.
- HU W S, JIANG J M, HUANG A P, ZHENG S Q. GC-MS analysis on aromatics of ‘Wanxiang’ longans using different extraction fiber. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 30(12): 1497-1154. (in Chinese)
- [29] 邓媛元, 张雁, 汤琴, 张瑞芬, 魏振承, 马永轩, 张名位, 张惠娜. 干燥方式对苦瓜茶感官品质及挥发性物质的影响. 中国食品学报, 2019, 19(2): 173-184.
- DENG Y Y, ZHANG Y, TANG Q, ZHANG R F, WEI Z C, MA Y X, ZHANG M W, ZHANG H N. Effect of drying methods on the sensory characteristics and volatile compounds of *Momordica charantia* tea. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(2): 173-184. (in Chinese)
- [30] RAJKUMAR G, SHANMUGAM S, GALVAO M D S, DUTRA-SANDES R D, LEITE-NETA M T S, NARAIN N, MUJUMDAR A S. Comparative evaluation of physical properties and volatiles profile of cabbages subjected to hot air and freeze drying. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 80: 501-509.
- [31] YANG B, PRASAD K N, XIE H H, LIN S, JIANG Y M. Structural characteristics of oligosaccharides from soy sauce lees and their potential prebiotic effect on lactic acid bacteria. *Food Chemistry*, 2011, 126(2): 590-594.
- [32] AKBARI-ALAVIJEH S, SOLEIMANIAN-ZAD S, SHEIKH-ZEINODDIN M, HASHMI S. Pistachio hull water-soluble polysaccharides as a novel prebiotic agent. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 107: 808-816.
- [33] HU J H, NIE S P, LI C, XIE M Y. *In vitro* fermentation of polysaccharide from the seeds of *Plantago asiatica* L. by human fecal microbiota. *Food Hydrocolloid*, 2013, 33(2): 384-392.
- [34] AHMADI S, SHEIKH-ZEINODDIN M, SOLEIMANIAN-ZAD S, ALIHOSSEINI F, YADAV H. Effects of different drying methods on the physicochemical properties and antioxidant activities of isolated acorn polysaccharides. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 100: 1-9.
- [35] LOVEGROVE A, EDWARDS C H, NONI I D, PATEL H, EI S N, GRASSBY T. Role of polysaccharides in food, digestion and health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(2): 237-253.
- [36] WANG X, HUANG M, YANG F, SUN H J, ZHOU X X, GUO Y, WANG X L, ZHANG M L. Rapeseed polysaccharides as prebiotics on growth and acidifying activity of probiotics *in vitro*. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 125(1): 232-240.

(责任编辑 赵伶俐)