

何茸茸, 牛丽影, 李大婧, 等. 草莓脯恒温与分阶烘干过程中水分迁移特性与品质比较 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(16): 51–58.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100090

HE Rongrong, NIU Liying, LI Dajing, et al. Moisture Distribution and Migration of Preserved Strawberries During Hot Air Drying at Constant and Gradient Temperature[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(16): 51–58. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100090

· 研究与探讨 ·

草莓脯恒温与分阶烘干过程中水分迁移特性与品质比较

何茸茸^{1,2}, 牛丽影², 李大婧², 胡丽丽³, 王 锐^{1,2}, 张钟元², 刘春菊², 肖亚冬², 聂梅梅², 肖丽霞^{1,*}

(1.扬州大学食品科学与工程学院, 江苏扬州 225000;

2.江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014;

3.豆源和(山东)食品饮料有限公司, 山东济南 250000)

摘要: 为了研究干燥过程对草莓脯水分迁移及品质的影响, 对渗透脱水后的草莓脯采用恒温 (60 °C-12 h, 干至 6 h 翻面) 与分阶 (65 °C-2 h, 60 °C-2 h, 55 °C-2 h; 翻面; 65 °C-2 h, 60 °C-2 h, 55 °C-2 h) 2 种方式烘干。采用低场核磁共振技术 (Low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 研究草莓脯中水分分布和迁移规律, 并对 2 种干燥方式得到的草莓脯理化 (质构、 V_C 、总酚) 和感官品质 (风味、组织形态、口感、色泽) 进行了比较。结果表明: 随着干燥时间延长, 草莓脯干基含水量逐渐降低, 但分阶干燥的速率高于恒温干燥。LF-NMR 的 T_2 反演图谱及峰面积的变化显示渗透脱水后的草莓中自由水为水分主要形态, 还有少量结合水和不易流动水, 2 种干燥方式下草莓脯的 T_2 值均随干燥时间延长逐渐减小, 水分流动性降低, 但至干燥结束时, 恒温干燥和分阶干燥的总弛豫峰面积分别下降至初始水平的 31.3% 和 26.4%, 分阶干燥较恒温干燥具有更高的干燥效率。核磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 显示在干燥过程中, 草莓中水分最初向破损的果蒂端富集并散失, 中期则以经果皮失水为主, 最后水分主要残留在髓部。从成像结果看, 2 种干燥方式的主要区别在于恒温干燥的草莓脯在干燥 6 h 时存在明显的均湿现象, 即水分在果脯内重新均匀分布, 而在分阶干燥中未出现此过程。另外, 分阶干燥后的草莓脯 V_C 和总酚含量显著高于恒温干燥 ($P<0.05$), 为恒温干燥的 1.89 倍和 1.14 倍, 而粘力、硬度、咀嚼性则显著低于恒温干燥 ($P<0.05$); 分阶干燥的草莓脯质地、外观、口感以及整体评分均显著高于恒温干燥 ($P<0.05$), 为恒温干燥的 31.3%、41.3%、40.2%。总体而言, 分阶干燥的干燥效率更高, 并且获得的草莓脯品质更优。

关键词: 干燥过程, 草莓脯, 低场核磁共振, 水分迁移, 品质比较

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)16-0051-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100090



本文网刊:

Moisture Distribution and Migration of Preserved Strawberries During Hot Air Drying at Constant and Gradient Temperature

HE Rongrong^{1,2}, NIU Liying², LI Dajing², HU Lili³, WANG Rui^{1,2}, ZHANG Zhongyuan², LIU Chunju²,
XIAO Yadong², NIE Meimei², XIAO Lixia^{1,*}

(1.College of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225000, China;

2.Institute of Agricultural Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;

3.Bean Source and (Shandong) Food & Beverage Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: In order to discover the moisture distribution and migration during the drying process of strawberries at constant or gradient temperatures and the effect on the quality of dried strawberries, the strawberries which had experienced osmotic

收稿日期: 2022-10-12

基金项目: 江苏省重点研发项目 (BE2021316); 芜湖市科技计划项目 (2021cg05)。

作者简介: 何茸茸 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品质量与安全控制, E-mail: 18893248689@163.com。

* 通信作者: 肖丽霞 (1966-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: Lxxiao@yzu.edu.cn。

dehydration were dried under constant temperatures (60 °C-12 h, flip it over when dry to 6 h) and gradient temperature (65 °C-2 h, 60 °C-2 h, 55 °C-2 h, flip it over, 65 °C-2 h, 60 °C-2 h, 55 °C-2 h) during hot air drying. Low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) was used and the physicochemical (texture, V_C , total phenols) and sensory qualities (flavor, texture, taste, color) of the preserved strawberries obtained by the two drying programs were compared. The results showed that the water content of the dry base of strawberries at both programs decreased with time extending gradually, but the rate of gradient temperature was higher than that of constant temperature drying. From the T_2 inversion spectra and peak areas of LF-NMR, it illustrated that the free water was the main form of water in the osmotically dehydrated strawberries, and there were also a small amount of bound water and immobile water. With the drying procedure proceeded, the T_2 peak of the strawberry gradually decreases, which indicates a decrease in the mobility of the water. However, the total relaxation peak area of constant temperature drying and gradient drying was reduced to 31.3% and 26.4% of the original at the end of the drying programs, which showed that the gradient drying had higher drying efficiency. Magnetic resonance imaging (MRI) showed that the water in strawberries was firstly enriched to the broken tip of the fruit and dispersed, then in the medium of the drying process, the peel took the main position for the water evaporation, and finally some water left in the pith. From the imaging results, the main difference between the two drying programs was that there was an obvious homogeneous wetness phenomenon in the strawberries after 6 h drying i.e. the water was redistributed evenly in the fruit at that time, while this process did not appeared in the gradient drying. In addition, the V_C and total phenolic contents of dried strawberries were significantly higher ($P<0.05$) using the gradient program than those under constant temperature drying, which were 1.89 and 1.14 times higher ($P<0.05$). Moreover, significantly lower ($P<0.05$) values of the viscosity, hardness, and chewiness were obtained by the persevered strawberries. For the sensory scores, the gradient program resulted in considerably better ($P<0.05$) texture, appearance, taste, and overall ratings for dried strawberries than constant temperature drying which were 31.3%, 41.3%, and 40.2%. Overall, the drying efficiency of step drying was higher and the quality of the dried strawberries obtained was better.

Key words: drying process; dried strawberries; low field NMR; water migration; quality comparison

草莓脯是将草莓通过糖渍、烘干等工艺制成的部分脱水产品,其口感酸甜、韧弹,方便贮运,广受消费者的喜爱^[1]。热风干燥是草莓脯常用的干燥方式,在干燥过程中物料的温度梯度和水分梯度是相反的,温度对干燥效率起着决定性作用。据报道,干燥温度、时间以及是否设置梯度对果蔬水分迁移以及果脯产品品质会产生不同的影响^[2-4],除影响干燥效率外,还会影响活性成分的保留以及感官品质的变化^[5]。

低场-核磁共振技术(LF-NMR)是近年来兴起的一种快速、无损检测分析技术。是利用磁性原子核在外加磁场中吸收一定频率的射频脉冲能量,在相邻能级之间发生跃迁,产生共振,捕捉信号并加以分析检测^[6]。广泛应用于食品干燥、贮藏、复水及品质监控等方面^[6]。经过 LF-NMR 研究发现香菇和木瓜等样品在复水过程存在 3 种状态的水,即结合水,不易流动水和自由水,干燥主要脱除了自由水和不易流动水^[7]。而且不同品种的样品在同一干燥阶段水分的流失速度也不同^[8]; LF-NMR 可以迅速直接的揭示玉米种子在萌发过程中水分的分布以及变化规律,如不易流动水随着萌发时间的延长逐渐增加,自由水先降低后增加而结合水先增加后降低^[9];而 MRI 可以清晰的发现物料内部水的空间分布和加工过程中内部水分轮廓线特征和变化规律,以及物料的结构变化^[10]。所以利用此方法测定农产品复水过程中的水分状态具有可行性,但是关于草莓脯在干燥过程中水分迁移特性的研究尚未见报道。

本研究分别采用恒温 and 分阶干燥制作草莓脯,比较了在 2 种干燥过程中草莓中水分的迁移特性和

草莓脯的理化和感官品质,以期对草莓脯干燥工艺优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

速冻草莓 产自云南省曲靖县的“蒙特瑞”;亚硫酸钠、蔗糖、偏磷酸、2,6-二氯酚、福林酚、碳酸钠 国药集团化学试剂有限公司。

MesoMR23-060H-1 低场核磁共振分析仪 苏州纽迈分析仪器股份有限公司;CT3 质构仪 美国 Brookfield 公司;DH6-9073BS-III 电热恒温鼓风干燥箱 上海新苗医疗器械制造有限公司;TG16-WS 台式高速离心机 上沙湘仪离心机仪器有限公司;TU-1810 紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限公司;安捷伦 1200 高效液相色谱仪 美国 Agilent 公司;HH-8 数显恒温水浴锅 上海江星仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 草莓脯渗透脱水 参考胡丽丽^[11]的方法稍作修改,用浓度为 0.3% 的亚硫酸钠浸泡 4 h 后取出,添加草莓质量的 40% 的蔗糖浸渍 72 h。

1.2.2 干燥条件 参考胡丽丽^[11]和卢映洁等^[12]的相关参考文献并经过大量预试验最终确定干燥条件,即为将渗透脱水后的草莓分成两份进行干燥,a.恒温干燥:60 °C 下保温 6 h 后上下翻面,继续烘 6 h;b.分阶干燥:在 65 °C 干燥 2 h,随后降至 60 °C 并保持 2 h,然后降至 55 °C 干燥 2 h,上下翻面后重复一次上述三阶干燥程序。干燥过程中每隔 1 h 进行称重,并进

行低场核磁共振检测。干燥后的草莓脯密封包装,待测,每种干燥方式分三组重复。

草莓脯 t 时刻干基含水量和干燥速率的计算公式如下:

$$M_t = \frac{m_t - m_g}{m_g}$$

式中: M_t 为草莓脯干燥至 t 时刻的干基含水量, g/g; m_t 为草莓脯干燥至 t 时刻的质量, g; m_g 为草莓脯干燥至恒重的质量, g。

$$V_t = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t}$$

式中: V_t 为草莓脯干燥速率, g/(g·min); M_t 为草莓脯干基含水量, g/g; Δt 为干燥时间, min。

1.2.3 低场核磁分析 参考 Carnero 等^[13] 的测定方法,并稍作修改。将草莓脯放在 60 mm 核磁专用聚四氟乙烯管上,将其置于设好参数的磁场中心区域。在 FIR 序列下确定中心频率及脉冲宽度,在 CPMG 序列下对草莓脯进行扫描,收集弛豫信号。做三次重复扫描,使用 Multi Exp Inv Analysis 软件,结合迭代重建技术(SIRT)对 CPMG 弛豫数据进行多指数拟合,迭代次数为 100000,将结果反演得到 T_2 弛豫反演图谱。

通过核磁共振成像系统自旋回波成像序列进行,利用成像软件获得磁共振图像^[13-14]。使用 SE 成像序列获得质子密度加权图像。使用以下扫描方案: Read size=256; Phase size=192, 切片宽度=2.0 mm, 层数=6, 回波时间(TE)为 20 ms, 重复时间(TR)为 500 ms。

1.2.4 草莓脯理化品质的测定

1.2.4.1 质构特性测定 参考胡丽丽^[11] 方法稍作修改,将草莓脯视为由果蒂至果顶的纵向轴为对称结构,以其对称轴中点为中心点,测试时将果脯中心点对应质构仪探头圆形截面的中心点。以草莓脯中心点为中心,采用 TA11 探头,纵向受力方向进行测定,参数设置均为 1.0 mm/s,触发力为 5 g,压缩距离为 2 mm,循环次数为 2 次,做 6 次重复试验。

1.2.4.2 V_C 含量的测定 参考朱志红等^[15] 方法稍作修改,取冷冻干燥后的草莓 5.00 g,至于研钵中,加入 0.25% 的偏磷酸溶液或草酸溶液,迅速捣成匀浆。准确称取 1.00 g 匀浆样品于烧杯中,用偏磷酸溶液或草酸溶样品转移至 100 mL 量瓶,并稀释至刻度,摇匀后过滤。若滤液有颜色,可按每克样品加 0.40 g 白陶土脱色后再过滤,再准确吸取 10mL 滤液于 50 mL 锥形瓶中,用标定过的 2, 6-二氯酚酚溶液滴定,直至溶液呈现粉红色 15 s 不褪色为止,同时做空白实验。

1.2.4.3 总酚含量的测定 参考 Kowalska 等^[3] 的测定方法稍做修改,取冷冻干燥后的草莓果脯 5.00 g,置于研钵中,加入液氮快速研磨,准确称取 1.00 g

匀浆于 25 mL 具塞试管内。加入 10 mL 的乙腈-水($v:v=1:9$)溶液,涡旋 10 s,超声提取 30 min,在离心机上转速为 10000 r/min,离心 5 min,取上清液,制得供试溶液。精确量取供试液 2 mL,加入 5 mL 福林酚试剂混匀,静置 4 min 后加 4 mL 7.50 g/100 mL 的 Na_2CO_3 溶液。室温静置避光放置 60 min 后,在 765 nm 处测定吸光值。将没食子酸标准品配制成浓度为 0.0、10.0、20.0、30.0、40.0、50.0 $\mu\text{g/mL}$ 的标准溶液绘制标准曲线。回归方程为 $y=0.0077x+0.0542$, $R^2=0.9996$ 。

1.2.5 草莓脯的感官评价 参考黄涵年等^[16] 的感官测定方法,选取 10 名感官评价专业人员组成评审小组。通过对草莓脯的风味、组织形态、口感、色泽等方面进行综合评定。草莓脯的感官评分标准如表 1 所示。

表 1 草莓脯感官评分标准		
Table 1 Sensory score of preserved strawberry		
感官评定项目	评价	评分(分)
色泽(30分)	有光泽,透亮	20~30
	无光泽,较透亮	10~19
	色泽暗淡,褐变严重	0~9
组织形态(30分)	饱满,干爽,形态完整	20~30
	较饱满,较干爽,形态完整	10~19
	不饱满,粘手,形态不完整	0~9
口感(30分)	不粘牙,软硬适中,有韧性	20~30
	不粘牙,软硬一般,无韧性	10~19
	粘牙,软硬适中,无韧性	0~9
风味(10分)	酸甜适中,无异味,草莓味浓郁	7~10
	甜酸味较浓或较淡,风味较差,无回味	4~6
	过酸或过甜,风味差	0~3

1.3 数据处理

数据的平均值与标准偏差分析在 Excel 表格执行;采用 SPSS 17 进行显著性差异性分析,设定 $P<0.05$ 为显著差异;使用 Oringin 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 2 种干燥过程中草莓脯含水率的变化

图 1(a)为 2 种干燥过程中草莓脯干基含水量的变化情况,可以看出分阶干燥的干基含水量变化曲线始终低于恒温,说明草莓脯分阶干燥较恒温干燥草莓脯水分含量更低。干燥至 12 h 即干燥结束时,恒温干燥和分阶干燥的草莓脯中干基含水量分别为 1.07 g/g 和 0.24 g/g。说明草莓脯在不同的干燥过程中水分的迁移效率不同,显然,分阶干燥的草莓脯的水分迁移效率更高。图 1(b)为 2 种方式下草莓脯的干燥速率曲线,在整个过程中分阶干燥的速率均高于恒温。在 2 种干燥过程中,3 h 之前水分的干燥速率较快,并且失水速率差别较大。至 6 h 时 2 种过程的干燥速率均出现小幅上升,然后继续下降,10 h 后变化平缓,直至结束干燥速率分别为 0.04 g/(g·min)和 0.07 g/(g·min)。

据报道,果蔬在热风干燥过程中,水分往往由内而外经由表皮逸散,但表皮失水后会收缩致密,影响

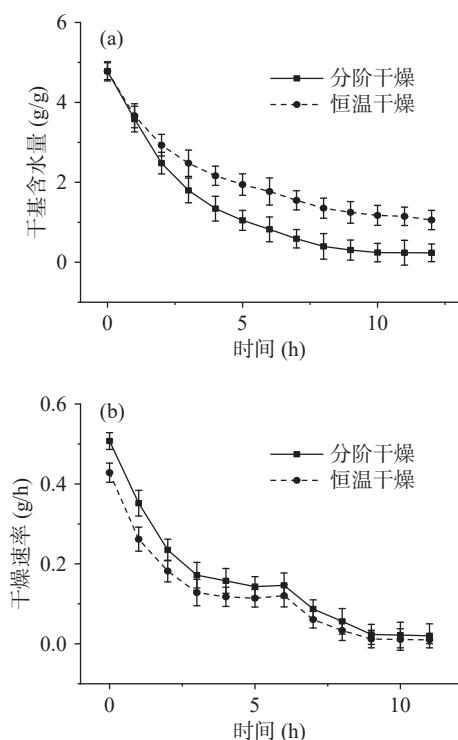


图1 不同干燥过程中含水量变化情况

Fig.1 Changes of water content under different drying processes

注: a: 干基含水量; b: 干燥速率。

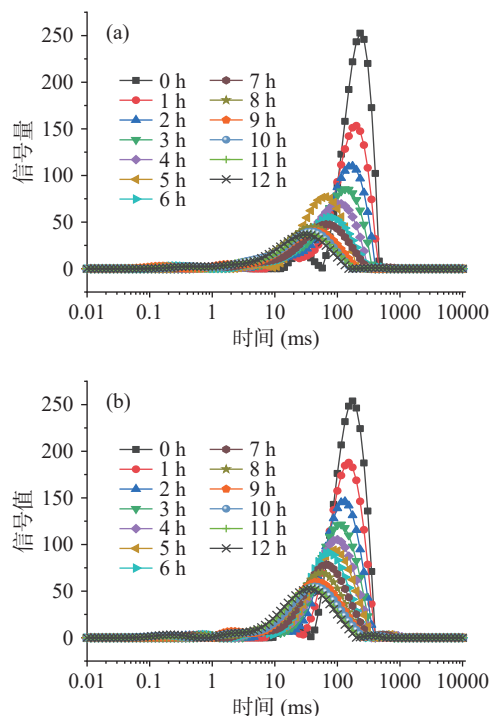
水分的进一步挥发^[17], 所以干燥速率随时间延长呈降低趋势。另外, 在干燥 6 h 时两种干燥过程的干燥速率均出现上升, 可能是因为干燥至 6 h 的上下翻面加快了整体水分挥发。恒温和分阶干燥过程中干基含水量和干燥速率出现这种差异, 可能是因为不同的干燥温度对草莓脯内部水分的迁移与分布情况影响不同^[18], 改变了草莓脯内部与外界温湿度差, 进而影响草莓脯内部的热推动力和传质推动力和干燥速率^[19]。

2.2 2 种干燥过程中草莓脯的水分迁移规律

2.2.1 干燥过程中不同状态水的弛豫图谱分析

低场核磁共振技术可以非破坏性的监测物料内部水分分布状态的变化情况^[12]。由图 2 可知, 2 种干燥过程中草莓脯的 T_2 反演图谱均存在三个峰, 弛豫时间分别为 0.1~1 ms (T_{21})、1~10 ms (T_{22})、10~1000 ms (T_{23}), 表示存在三种状态的水。从左到右依次为结合水、不易流动水和自由水。结合水主要指的存在于细胞间隙中的水; 不易流动水指的存在于细胞质中的水; 自由水指的是存在于细胞间隙的游离程度较好的自由水^[20]。 T_{23} 的峰最大, T_{21} 和 T_{22} 的峰较小, 表明自由水是草莓脯的水分中主要的存在状态, 而结合水和不易流动水较少。

不同状态水的含量变化以及分布变化情况主要由对应的 T_2 峰位置的变化进行反映^[21], 2 种干燥过程中草莓脯的 T_2 反演图均表现为随着干燥时间的延长, 峰高逐渐降低, 这说明在干燥过程草莓脯中水分含量随着时间的延长逐渐降低^[22], 并且是随着干燥

图2 不同干燥过程中草莓脯横向弛豫时间 T_2 反演谱Fig.2 Transverse relaxation time T_2 inversion spectra of dried strawberry preserved in different drying processes

注: a: 恒温干燥; b: 分阶干燥; 图 4 同。

时间的延长, T_2 值逐渐减小, 说明在干燥过程中水分的流动性在逐渐减小。据报道, 高自由度的水向低自由度的水分进行迁移, 主要是因为随着水分含量的降低, 水与物料的结合更加紧密, 流动性逐渐下降^[23]。但是相比分阶干燥的峰高持续降低, 恒温干燥的样品在干燥至 6 h 时出现自由水峰高上升现象, 说明干燥至 6 h 时均对草莓脯进行降温翻面, 可能导致了不同形态水的重新分布。分阶干燥这种干燥方式能够更好地控制草莓脯的水分损失率。

2.2.2 干燥过程中不同状态水核磁共振峰面积的分析

T_2 反演图谱上峰面积的大小和变化情况可以反映物料不同状态水的量及水分迁移的变化情况^[21]。图 3(a)~图 3(c)为草莓脯中三种状态水峰面积变化趋势图, 图 3(d)和图 3(e)为草莓脯在 2 种干燥过程中不同状态水峰面积变化的百分比堆积条形图。自由水、不易流动水、结合水对应的峰面积分别为 A_{23} 、 A_{22} 和 A_{21} 。综合以上五张图可以看出, 在干燥前 A_{23} 的峰面积占比最大, 分别为 94.79% 和 95.53%, A_{22} 的占比均为 4.43% 和 3.18%, 说明在干燥前草莓中的水以自由水为主。至干燥结束时, 恒温和分阶 2 种干燥过程中 A_{23} 峰面积变化最明显, 分别由 94.79% 和 95.53% 降低至 0.82% 和 0.96%, 但 A_{22} 不降反升, 其峰面积分别由 4.43% 和 3.18% 升高至 95.12% 和 95.81%。相比之下, A_{21} 的变化幅度较小, 分别由初始值的 0.78% 和 0.65% 升高 4.01% 和 3.22%。在干燥过程中, 2 种干燥过程中的 A_{23} 在干燥前期整体表现为下降趋势, 并且分别是在 8 h 和

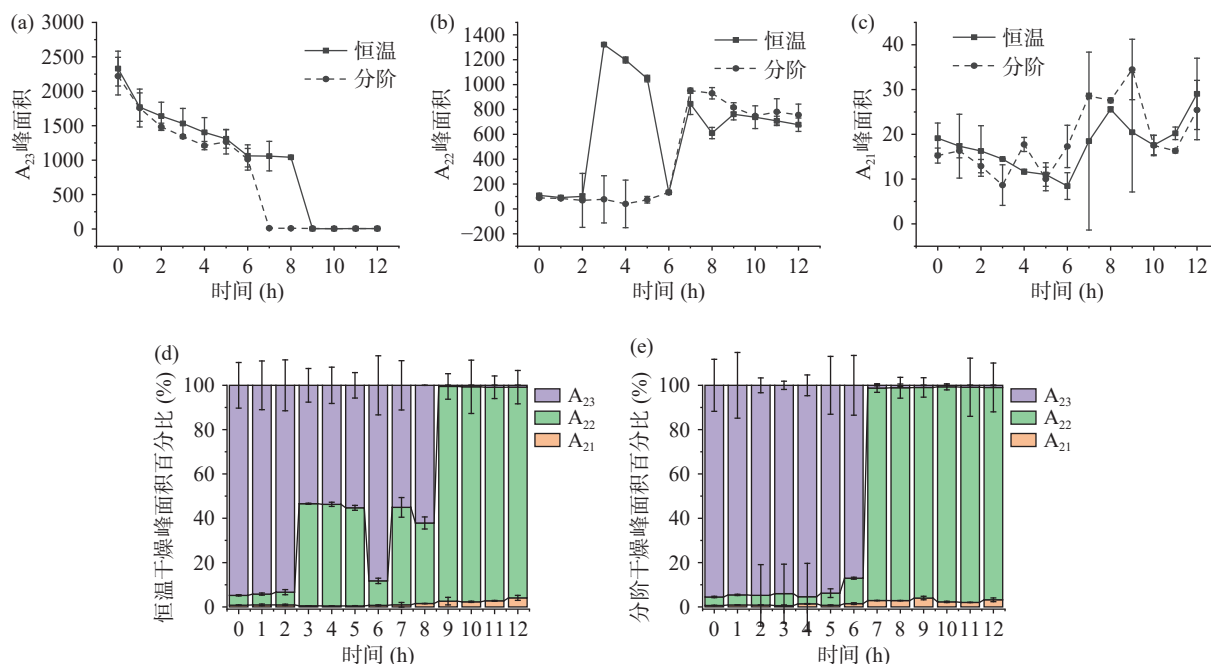


图3 不同干燥过程中草莓脯核磁共振峰面积的变化

Fig.3 Changes of strawberry preserved NMR peak area in different drying processes

注: a: 自由水(A_{23}); b: 不易流动水(A_{22}); c: 结合水(A_{21}); d: 恒温干燥峰面积百分比; e: 分阶干燥峰面积百分比。

6 h 呈现断崖式下降, 分别由 62.11% 和降至 0.50% 和 87.04% 降低至 1.22%, 随后变化不显著($P>0.05$)。 A_{22} 随时间延长则呈波动变化, 存在下降后又上升的现象, 恒温干燥的波动更加明显, 说明草莓脯在分阶干燥过程中内部水分迁移的均匀性优于恒温干燥。据报道, 自由水主要存在于液泡、原生质和细胞间隙中, 离胶粒较远, 是可以自由移动的, 所以容易去除^[24], 结合水主要存在于溶质附近, 与溶质分子之间通过化学键结合, 不易流动, 难以散失^[25]。2 种干燥过程中均为 A_{23} 初始峰面积占比最大, 下降幅度最大, 体现了自由水易失去的特点, 但 A_{21} 与 A_{22} 在干燥后期均出现了上升趋势, 这可能说明部分自由水转化为不易流动水和结合水。另据报道, 草莓中的果胶为高甲酯化果胶^[26], 而高甲酯化果胶可在一定浓度的糖存在下与水结合形成凝胶^[27], 因此推测干燥后期 (6 h 后) A_{23} 的断崖式下降与 A_{21} 、 A_{22} 的上升与干燥过程中, 水的流动性降低可能是因为此时草莓果胶、糖、水三者形成凝胶结构有关^[28]。另外, 果蔬中的水分在干燥过程可重新分布, 不同状态的水可相互转化^[29]。

草莓脯在干燥过程 A_{22} 和 A_{23} 峰面积占比均出现断崖式下降, 并且恒温干燥的 A_{23} 峰面积占比出现断崖式下降的时间与 A_{22} 、 A_{21} 峰面积占比的最低值出现时间均滞后于分阶干燥, 说明其自由水的脱除较分阶干燥慢。另外, 恒温干燥的 A_{22} 在 3~5 h 时明显高于分阶干燥, 可能是因为恒温干燥的草莓脯细胞结构破坏程度较分阶干燥更为严重, 草莓脯本身含有的不易流动水也从细胞中脱除, 使得恒温干燥中 A_{22} 峰面积变化大于分阶干燥。其最高值为最低值的

14.42 倍, 高于分阶干燥中的 12.32 倍, 说明恒温干燥过程中水分的散失与形态转化相比分阶干燥稳定性略弱^[30]。

2.3 不同干燥过程对低场核磁成像结果的影响

MRI 可以对样品的任意层面进行检测^[31], 从而分析样品内部水分梯度的变化以及加工过程中结构的变化情况^[32]。氢质子的密度越大, 信号越强, 样品中的水分含量越高, 图片中红色区域越多^[33]。图 4 为 2 种干燥过程中草莓脯的 MRI 成像伪彩图, 以蓝

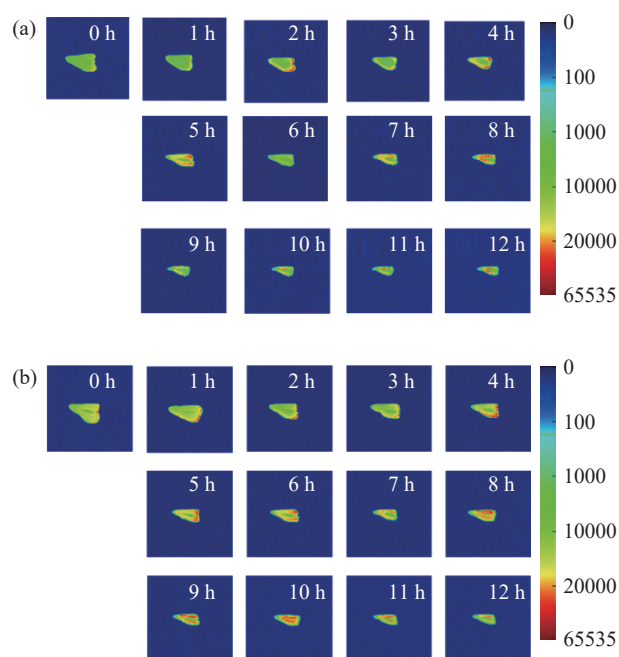


图4 干燥过程中草莓的成像图

Fig.4 Imaging of strawberries during drying

色为背景,红色代表水分富集,水分含量的高低按照红-黄-绿-蓝排列。由图可知,干燥前水分在草莓中分布较为均匀,红色区域不明显。随着干燥时间的延长,水分首先向果蒂端富集,4 h 转为四周果皮边缘部位出现红色,8 h 后果脯边缘转为绿色,而红色主要分布于髓部。并且随着时间的延长,草莓脯体积逐渐缩小,这可能说明最初由于草莓冷冻处理中除去果蒂时形成的损伤(缺口)形成了水分快速逸散通道,失水至一定程度后,由表皮失水成为主要方式,而随着水分的进一步减少与表皮的皱缩^[34],最后仅在髓部残留少量水分。结合恒温干燥和分阶干燥中自由水 A_{23} 峰面积出现断崖式下降的时间为 8 和 6 h,可以看到对应时间的伪彩图与前后图片相比色彩界限相对模糊,可能与此时不同形态水之间的转化有关。

但是,从成像图也可以看出 2 种干燥方式下草莓脯的水分在草莓组织中迁移特性也存在不同。首先,恒温干燥的草莓脯在 6 h 时内部出现均湿现象,呈现均匀的绿色,分阶干燥的草莓脯则未出现此现象;其次图 4(a)中 5 h 的图与图 4(b)中 6 h 的图最为相似。结合水分弛豫峰面积变化中 3~5 h 恒温干燥的草莓脯中 A_{22} 高于分阶干燥分析,可能此段时间为水分散失由蒂部为主转为表皮散失的转折期,在热风恒温干燥的湿热差作用下,草莓内形成更多的不易流动水,至 6 h 由于翻面作用水分重新分布。阶梯降温干燥过程中因温度是变化的,其成像图的色彩分布呈持续变化,红色部位由蒂部转至四周,然后近表皮开始出现绿色并拓宽,同时伴随果实变小,其水分散失与转化在前期末出现明显的转折点。这说明水分流动性的改变了与水分散失途径^[35]的改变有关。另一方面,恒温干燥 5 h 的图与分阶干燥 6 h 的图最为相似,这个时间恰恰对应着 A_{21} 最低值(恒温)或

A_{21} 次低值(分阶)的时间,这说明由于恒温干燥的干燥温度较高,由自由水或不易流动水转为结合水出现的较早。

2.4 不同干燥方式对草莓质地、营养指标及感官评价的影响

干燥过程中可能会破坏草莓脯中的热不稳定成分^[36],并且导致溶质迁移和硬壳的形成,进而影响产品的口感与品质,但不同的干燥方式影响程度不同^[37]。如表 2 可见,2 种干燥过程获得的草莓脯的总酚、 V_C 、粘力、硬度和咀嚼性均存在显著差异($P<0.05$),但弹性和内聚性差异不显著($P>0.05$)。分阶干燥后的草莓脯 V_C 和总酚含量较高,分别为恒温干燥的 1.89 倍和 1.14 倍,但其粘力、硬度和咀嚼性则较低,分别为恒温干燥的 31.3%、41.3%、40.2%。

表 3 为 2 种干燥过程下草莓脯的感官评价结果,恒温干燥草莓脯的感官综合得分为 77.90,而分阶干燥草莓脯的感官综合得分为 91.50。分阶干燥得到的草莓脯的风味、组织形态、口感、色泽均优于恒温干燥得到的草莓脯,说明分阶段干燥得到的草莓脯质地韧,外观饱满,口感佳。色泽与风味二者差异不显著($P>0.05$),说明 2 种干燥方式对草莓脯的色泽与风味影响较小。

草莓脯在口感、组织形态方面差别较大,色泽和风味较为接近。出现以上差距的原因是干燥会使多酚等抗氧化活性物质降解^[38],细胞结构破坏^[39],利用分阶干燥将温度进行调控,使得果脯内部水分的迁移更加匀速、抗氧化活性物质损失减少、对草莓脯内相关成分的破坏性减小。所以分阶干燥后的草莓脯口感评分最好,韧性和弹性也较好,色泽和风味差距不明显,所以整体而言分阶干燥的干燥效果更好。

表 2 干燥方式对草莓脯营养指标和质构特性的影响

Table 2 Effect of drying method on the nutritional and textural characteristics of dried strawberries

指标	营养指标		质构特性				
	$V_C(\mu\text{g/g})$	总酚(mg/g)	粘力(g)	弹力(g)	硬度(g)	内聚性	咀嚼性(mJ)
恒温干燥	90.00±1.70 ^a	10.27±0.04 ^a	9.20±2.68 ^b	0.30±0.02 ^a	291.60±19.18 ^b	0.74±0.06 ^a	4.38±2.90 ^b
分阶干燥	170.00±0.20 ^b	10.45±0.03 ^b	2.88±1.04 ^a	0.35±0.01 ^a	120.4±17.91 ^a	0.71±0.08 ^a	1.76±0.23 ^a

注: 同列均值有不同上标字母者表示差异显著($P<0.05$), 同列均值有共同上标字母者表示差异不显著($P>0.05$)。

表 3 两种干燥方式对草莓脯感官评分的影响

Table 3 Effect of two drying methods on sensory scores of dried strawberries

感官指标	色泽	组织形态	口感	风味	总分
恒温干燥	24.30±1.15 ^a	24.30±0.57 ^a	21.30±0.57 ^a	8.00±1 ^a	77.90±0.92 ^a
分阶干燥	27.60±1.52 ^a	28.60±0.57 ^b	27.00±0.6 ^b	8.30±0.87 ^a	91.50±0.6 ^b

注: 同列均值有不同上标字母者表示差异显著($P<0.05$), 同列均值有共同上标字母者表示差异不显著($P>0.05$)。

3 结论

渗透脱水后的草莓脯主要含有三种状态的水,并以自由水为主,干燥中脱除的主要为自由水,自由水含量至干燥结束为初始值的 0.25%、0.34%;结合

水在干燥过程含量变化最高值为最低值的 3.45、3.30 倍,至干燥结束时显著高于干燥前($P<0.05$);不易流动水则呈现先下降后上升的趋势,说明三种形态的水存在相互转化。但是自由水的核磁共振峰面积

占比出现断崖式下降,并且出现断崖式下降的时间与 A_{22} 、 A_{21} 峰面积占比的最低值出现时间均滞后于分阶干燥,说明其自由水的脱除较分阶干燥慢,水分形态转换时间出现的较晚。2种干燥方式中,分阶干燥的草莓脯内部水分更加容易聚集与逸散,干燥效率高于恒温干燥;草莓脯整体的质地评分与综合感官评分均显著高于恒温干燥($P<0.05$),内部含有的营养物质如 V_C 、总酚含量显著高于恒温干燥后的草莓脯($P<0.05$),表面的粘力、硬度、咀嚼性均低于恒温干燥,说明较低的粘力和硬度,更便于咀嚼,具有更好的感官接受度。但在弹力、内聚性、外观、香气、滋味上未表现出显著差异($P>0.05$),总之,分阶干燥具有更高的干燥效率,并使草莓脯具有更好的品质,研究结果为草莓脯的工艺优化与质量控制提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] PELLICHER J A, FOETEA M I, TRABAL J, et al. Stability of microencapsulated strawberry flavour by spray drying, freeze drying and fluid bed[J]. *Powder Technology*, 2019, 34(7): 179–85.
- [2] WANG J, YANG X H, MUGUMDAR A S, et al. Effects of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment on the change of antioxidant capacity, the degradation kinetics of red pigment, ascorbic acid in dehydrated red peppers during storage[J]. *Food Chemistry*, 2018, 25(9): 65–72.
- [3] KOWALSKA J, KOWALSKA H, MARZEC A, et al. Dried strawberries as a high nutritional value fruit snack[J]. *Food Sci Biotechnol*, 2018, 27(3): 799–807.
- [4] DENG Z, LI M, XING T, et al. A literature research on the drying quality of agricultural products with using solar drying technologies[J]. *Solar Energy*, 2021, 22(9): 69–83.
- [5] HAMMAMI C, RENE F. Determination of freeze-drying process variables for strawberries[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 32(1): 33–54.
- [6] HATZAKIS E. Nuclear Magnetic Resonance (NMR) spectroscopy in food science: A comprehensive review[J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2019, 18(1): 189–220.
- [7] 石芳,肖星凝,李瑶,等.食用菌恒温干燥过程中MRI成像及水分迁移变化[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(7): 98–104. [SHI F, XIAO X N, LI Y, et al. MRI imaging and water migration changes of edible mushroom during constant temperature drying[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2017, 43(7): 98–104.]
- [8] 崔莉,杜利平,闫慧娇,等.皱皮木瓜真空冻干工艺优化及LF-NMR技术的复水特性研究[J]. *中国食品学报*, 2022, 19(6): 124–33. [CUI L, DU L P, YAN H J, et al. Optimization of vacuum freeze-drying process of wrinkled papaya and study on the rehydration characteristics of LF-NMR technology[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2022, 19(6): 124–33.]
- [9] 宋平,彭宇飞,王桂红,等.玉米种子萌发过程内部水分流动规律的低场核磁共振检测[J]. *农业工程学报*, 2022, 34(10): 274–281. [SONG P, PENG Y F, WANG G H, et al. Detection of low-field nuclear magnetic resonance imaging of water flow laws within maize seed germination process[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 34(10): 274–281.]
- [10] 汪楠,邵小龙,时小转,等.稻谷低温低湿干燥特性与水分迁移分析[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(5): 114–119. [WANG N, SHAO X L, SHI X Z, et al. Characteristics of low temperature and low humidity drying and water migration analysis of rice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(5): 114–119.]
- [11] 胡丽丽.草莓果脯加工及贮藏过程中品质变化研究[D].扬州:扬州大学,2021. [HU L L. Study on the quality changes of dried strawberry fruits during processing and storage[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.]
- [12] 卢映洁,任广跃,续段,等.基于温度梯度的带壳鲜花生热风干燥收缩模型研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(8): 148–154. [LU Y J, REN G Y, XU D, et al. Research on hot-air drying shrinkage model of shelled fresh flowers based on temperature gradient[J]. *Food and Machinery*, 2019, 35(8): 148–154.]
- [13] CARNERO C D S, MÁRSICO E T, RIBEIRO R D O R, et al. Low-Field Nuclear Magnetic Resonance (LF NMR 1H) to assess the mobility of water during storage of salted fish (*Sardinella brasiliensis*)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 16(9): 321–335.
- [14] MCCARTHY M J, LASSEX D, MANEVAL J E. NMR imaging in the study of diffusion of water in foods[J]. *Journal of Food Engineering*, 1994, 22(1-4): 211–214.
- [15] 朱志红,伍柏坚,郑荣波,等.刺梨及果脯的维生素C分析研究[J]. *饮料工业*, 2021, 24(2): 40–44. [ZHU Z H, WU B J, ZHENG R B, et al. Analysis of vitamin C in prickly pear and preserved fruit[J]. *Beverage Industry*, 2021, 24(2): 40–44.]
- [16] 黄涵年,李柳颖.蓝莓果脯制备及工艺优化研究[J]. *工艺技术*, 2020, 20(31): 110–115. [HUANG H N, LI L Y. Preparation and process optimization of blueberry preserved fruit[J]. *Process Technology*, 2020, 20(31): 110–115.]
- [17] COCUSSE M, ROSALES M, MAILLET B, et al. Two-step diffusion in cellular hygroscopic (vascular plant-like) materials[J]. *Science Advances*, 2022, 8(19): 7830.
- [18] WANG J, MUJUMDAR A S, WANG H, et al. Effect of drying method and cultivar on sensory attributes, textural profiles, and volatile characteristics of grape raisins[J]. *Drying Technology*, 2020, 39(4): 495–506.
- [19] 高志强,沈夏筠,林育钊,等.荔枝果实热风干燥特性研究[J]. *农业与技术*, 2022, 43(8): 15–27. [GAO Z Q, SHEN X J, LIN Y Z, et al. Study on the characteristics of hot air drying of litchi fruit[J]. *Agriculture and Technology*, 2022, 43(8): 15–27.]
- [20] 薛广,李敏,关志强,等.基于低场核磁共振的罗非鱼片微波真空干燥过程水分变化规律[J]. *广东海洋大学学报*, 2020, 40(6): 123–129. [XUE G, MIN L, GUAN Z Q, et al. Moisture change law of tilapia fillets during wave vacuum drying based on low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020, 40(6): 123–129.]
- [21] 王永瑞,薛美芳,罗方平.羊肉烤制过程中水分的分布和迁移规律[J]. *中国食品学报*, 2022, 20(3): 297–308. [WANG Y R, XUE M F, LUO F P. Moisture distribution and migration during roasting of mutton[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2022, 20(3): 297–308.]
- [22] LI L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. LF-NMR online detection of water dynamics in apple cubes during microwave vacuum drying[J]. *Drying Technology*, 2018, 36(16): 10–15.
- [23] LI C, YAN C, SUN Q, et al. Proteomic profiling of *Arachis hypogaea* in response to drought stress and overexpression of AhLEA2 improves drought tolerance[J]. *Plant Biol (Stuttg)*, 2022, 24(1): 75–84.
- [24] CORRÊA J L G, PEREIRA L M, VIEIRA G S, et al. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 96(4): 498–504.

- [25] AMAMI E, KHEZAMI W, MEZRIGUIS S, et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry[J]. *Ultrason Sonochem*, 2017, 36(10): 286–300.
- [26] RAO M A, COOLEY H J. Dynamic rheological measurement of structure development in high-methoxyl pectin/fructose gels[J]. *Journal of Food Science*, 1993, 58(4): 876–879.
- [27] 刘施琳, 朱丰, 林圣楠, 等. 琼脂凝胶强度及弛豫特性的研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(13): 85–89. [LIU S L, ZHU F, LIN S N, et al. Study on the strength and relaxation properties of agar gel[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2017, 38(13): 85–89.]
- [28] 程一鑫. 超声波对高甲氧基果胶 NMR 转折点蔗糖浓度及其结构的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2014. [CHENG Y X. Effect of ultrasound on the sucrose concentration and its structure at the NMR turning point of high methoxy pectin[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.]
- [29] 吕豪, 崔政伟, 吕为乔, 等. 不同微波环境下苹果片干燥特性分析[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 433–439. [LÜ H, CUI ZH W, LÜ W Q, et al. Analysis of drying characteristics of apple slices under different microwave environments[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 433–439.]
- [30] PIOTROWSKI D, KOSTYRAE E, GRZEGORY P, et al. Influence of drying methods on the structure, mechanical and sensory properties of strawberries[J]. *European Food Research and Technology*, 2021, 247(8): 59–67.
- [31] 卢琪, 薛淑静, 杨德, 等. 不同干燥条件下福白菊花茶风味品质的比较分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(20): 249–255. [LU Q, XUE S J, YANG D, et al. Comparative analysis of flavor quality of Fubai chrysanthemum tea under different drying conditions[J]. *Food Science*, 2020, 41(20): 249–255.]
- [32] GHOSH P K, JAYAS D S, GRUWEL M L H, et al. A magnetic resonance imaging study of wheat drying kinetics[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 97(2): 189–199.
- [33] XU F, JIN X, ZHANG L, et al. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods[J]. *Food Res Int*, 2017, 96(3): 191–197.
- [34] XU B, TILIWA E S, YAN W, et al. Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: A review[J]. *Food Research International*, 2022(Feb.): 152.
- [35] XING S, CHEN K, ZHU H, et al. Fine-tuning sugar content in strawberry[J]. *Genome Biol*, 2020, 21(1): 230–240.
- [36] MINUYE M, GETACHEW P, LAILLOU A, et al. Effects of different drying methods and ascorbic acid pretreatment on carotenoids and polyphenols of papaya fruit in Ethiopia[J]. *Food Sci Nutr*, 2021, 9(6): 346–353.
- [37] 耿阳阳, 胡伯凯, 王纪辉, 等. 贵州不同地区核桃果实特性分析及加工适宜性分类[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(15): 184–192. [GENG Y Y, HU B K, WANG J H, et al. Characteristic analysis and processing suitability classification of walnut fruits in different regions of Guizhou[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(15): 184–192.]
- [38] OZCAN M M, ALJUHAIMI F, AHMED I A M, et al. Effect of microwave and oven drying processes on antioxidant activity, total phenol and phenolic compounds of kiwi and pepino fruits[J]. *Food Sci Technol*, 2020, 57(1): 233–42.
- [39] 谭颢, 彭思维, 李玮轩, 等. 不同干燥方式对龙眼多酚及抗氧化活性的影响[J]. *果树学报*, 2021, 38(3): 411–420. [TAN S, PENG S W, LI W X, et al. Effects of different drying methods on polyphenols and antioxidant activity of longan[J]. *Journal of Fruit Trees*, 2021, 38(3): 411–420.]