

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240226003

微波-热风联合干燥方法对兰州百合品质的影响

尹燕¹, 李霞², 李永才^{2*}, 王毅², 冯炜弘¹, 牛慧婷¹, 李爱兵¹, 刘娜娜¹

(1. 兰州市农业科技研究推广中心农产品加工与贮藏站, 兰州 730000;

2. 甘肃农业大学食品科学与工程学院, 兰州 730070)

摘要: **目的** 探究微波-热风联合干燥方法加工兰州百合的可行性, 并对加工的兰州百合干进行品质评价。**方法** 从干燥动力学、色泽 L^* 、复水比 3 个方面对热风干燥温度、微波干燥功率、微波-热风联合干燥的干燥顺序及含水量转换点进行考察, 筛选出兰州百合最优干燥工艺后, 对最优工艺干燥样品、硫熏样品和无硫样品的品质进行分析比较。**结果** 先 213 W 微波干燥, 后 60°C 热风干燥, 40% 的百合含水量转换点为微波-热风联合干燥最优工艺, 相较直接 60°C 热风干燥可缩短 33% 的干燥时间。相较硫熏样品, 微波-热风联合干燥样品的感官评分、复水比、蛋白质及维生素 C (vitamin C, VC) 含量分别提高了 16.93%、40.54%、25.72% 和 26.28%, 色泽 L^* 、 b^* 间差异不显著; 相较无硫样品, 微波-热风联合干燥样品的感官评分、色泽 L^* 、复水比、蛋白质及 VC 含量分别提高了 13.43%、3.97%、33.33%、24.44% 和 19.89%, 而 b^* 显著降低了 9.58%。**结论** 微波-热风联合干燥不仅可有效地缩短干燥时间, 还可获得高品质的百合干, 是一种具有发展前景的兰州百合干制方法。**关键词:** 兰州百合; 品质; 热风干燥; 微波干燥; 微波-热风联合干燥

Effect of microwave combined hot-air drying method on the quality of *Lilium davidii* var. unicolor

YIN Yan¹, LI Xia², LI Yong-Cai^{2*}, WANG Yi², FENG Wei-Hong¹, NIU Hui-Ting¹,
LI Ai-Bing¹, LIU Na-Na¹

(1. Agricultural Products Processing and Storage Station, Lanzhou Agricultural Science and Technology Research Extension Centre, Lanzhou 730000, China; 2. College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the feasibility of microwave combined hot-air drying for *Lilium davidii* var. unicolor, and evaluate the quality of processed lily. **Methods** The effect of drying temperature, microwave drying power, the drying sequence and water content conversion point of microwave combined hot-air drying on drying characteristics, color (L^*) and rehydration ratio were studied for screening optimal compound drying technology. Quality of the optimal process dried samples, sulfur-fumigated samples and sulfur-free samples were also comparatively analyzed. **Results** The results showed that the optimal compound drying process was 213 W microwave followed by hot-air drying at 60°C, and the water content conversion point of *Lilium davidii* var. unicolor was 40%, the drying time could be shorten by 33% than

基金项目: 兰州市青年科技人才创新项目(2023-QN-161)、甘肃省科技计划重大项目(21ZD4NA016)、甘肃省重点研发计划项目(22YF7NA028)

Fund: Supported by the Youth Science and Technology Talent Innovation Projects in Lanzhou (2023-QN-161), the Science and Technology Plan Major Projects in Gansu Province (21ZD4NA016), and the Key Research and Development Projects in Gansu Province (22YF7NA028)

***通信作者:** 李永才, 博士, 教授, 主要研究方向为采后生物学。E-mail: lyc@gsau.edu.cn

***Corresponding author:** LI Yong-Cai, Ph.D, Professor, College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China. E-mail: lyc@gsau.edu.cn

hot-air drying at 60°C. The sensory score, rehydration ratio, protein and vitamin C (VC) content of dried lily by microwave combined hot-air method were 16.93%, 40.54%, 25.72% and 26.28%, respectively, higher than that in sulfur-fumigated samples, there was no significant difference in L^* and b^* . Compared with the sulfur-free samples, the sensory score, L^* rehydration ratio, protein and VC content of lily dried by the microwave combined hot-air drying process was increased by 13.43%, 3.97%, 33.33%, 24.44% and 19.89%, respectively. Whereas b^* was significantly reduced by 9.58% than the sulfur-free samples. **Conclusion** Microwave combined hot-air drying can not only effectively shorten the drying time, but also obtain high-quality dried lily, which is a promising drying method for *Lilium davidii* var. unicolor.

KEY WORDS: *Lilium davidii* var. unicolor; quality; hot-air drying; microwave drying; microwave combined hot-air drying

0 引 言

兰州百合(*Lilium davidii* var. unicolor)为百合科百合属球根植物^[1], 集食用、药用、观赏于一体^[2]。作为全国唯一的甜百合, 因其优良的品质、独特的风味、洁白如玉的色泽, 享有“兰州百合甲天下”的美誉^[3], 先后被认定为我国地理标志产品和甘肃省名优特产^[4]。由于兰州百合含水率高、收获期短, 采收后极易发生褐变及腐烂变质^[5-6], 因此在常温下很难长时间保存。对兰州百合进行干制, 在便于包装和运输的基础上, 还可有效延长保存期。

在兰州百合产地大宗加工中, 主要采用 120°C 热风干燥的方法对百合进行干燥, 同时为了保持产品原有的色泽, 多通过添加含二氧化硫的护色剂来抑制褐变^[3]。经过此方法干制的产品存在复水性差、营养成分下降、二氧化硫残留等缺点^[7-8]。针对兰州百合干燥中存在的问题, 学者们还探索研究了低温真空冷冻干燥技术^[1,9]、热风薄层干燥技术^[7]、微波漂烫联用热风干燥技术^[6]、无硫护色热风干制技术^[3,5]等在兰州百合干制方面的应用, 这些技术为兰州百合干燥提供了新的思路与方法, 但仍不同程度地存在成本高、干燥时间长、难以规模化生产等问题。近年来, 研究发现将两种或两种以上的干燥技术联合应用, 不仅可有效克服单一技术的缺点, 还可达到优势互补、取长补短的效果^[10-11]。微波和热风联合干燥技术已在红枣^[12]、双孢蘑菇^[13]、灰枣^[14]、胡萝卜片^[15]、杏鲍菇^[16]、香葱^[17]、香菜^[18]、紫菜^[19]、莲藕^[20]、芦笋^[21]等多种果蔬上得到应用, 发现联合应用具有干燥效率高, 营养损失少等多种优点。但关于微波-热风联合干燥技术在兰州百合上的应用还未见相关报道。因此, 本研究以新鲜兰州百合为原料, 从干燥动力学、色泽(L^* 、 b^*)、复水比 3 个方面对热风干燥温度、微波干燥功率、微波-热风联合干燥的干燥顺序及含水量转换点进行考察的基础上, 得出最优工艺, 同时分析比较最优工艺干燥样品、硫熏样品和无硫样品的品质, 以期对兰州百合干加工提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

兰州百合采自兰州市西果园镇堡子村, 采收后随即

运至实验室冷库(-2~0°C)中贮藏备用。实验时选择大小基本一致、鳞片肥厚、无病虫害、无机械损伤的百合鳞茎。

氯化钠、抗坏血酸、柠檬酸、L-半胱氨酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 2,6-二氯酚(分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 维生素 C 标准品(分析纯, 上海麦克林生化科技股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

AE323 电子分析天平(精确度 0.001 g, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司); DHG-9620A 恒温干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司); WL700 型微波炉(广东格兰仕集团有限公司); SP62-色度测试仪(美国爱色丽股份有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 兰州百合预处理

参照李霞等^[3]的方法。鲜百合经剥片、清洗后在 100°C 水中热烫 2 min, 冷却后浸入无硫护色剂(0.65%氯化钠+0.3%抗坏血酸+0.3% L-半胱氨酸+0.8%柠檬酸)5 min, 捞出、漂洗、沥干。

1.3.2 干燥处理

(1) 热风干燥

参照朱文学等^[22]方法, 并做部分修改。将经预处理后的兰州百合鳞片, 分别在 50、60、70、80°C 的条件下进行热风干燥, 干至百合湿基含水量为 8%。干燥过程中, 每隔 30 min 取出百合片随后用电子分析天平称量, 并记录, 绘制干燥曲线和干燥速率曲线, 干基含水率和干燥速率分别按照公式(1)和(2)计算:

$$M_t = \frac{m_t - m_{db}}{m_t} \quad (1)$$

式(1)中, M_t 为 t 时刻百合干基含水率(g/g); m_t 为 t 时刻百合湿质量(g); m_{db} 为百合干基质量(g)。

$$D_R = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_1 - t_2} \quad (2)$$

式(2)中, D_R 为干燥速率[g/(g·h)]; M_{t1} 、 M_{t2} 分别为 t_1 、 t_2 时刻百合干基含水率(g/g)。

(2) 微波干燥

将经预处理后的兰州百合鳞片, 进行微波干燥, 干燥功率设定为 213、427 和 640 W, 干燥至百合湿基含水量为

8%。同 1.3.2(1)方法绘制干燥曲线和干燥速率曲线。

(3)微波-热风联合干燥

本研究设置百合湿基含水量 20%、30%和 40%为热风干燥与微波干燥方法的转换点,根据前期筛选的热风干燥温度和微波功率,进行热风(先)+微波(后)和微波(先)+热风(后)的两种干燥工艺,干燥至百合湿基含水量为 8%。其中用 HAMD 表示先热风后微波干燥、MHAD 表示先微波后热风干燥,HAMD20 表示先热风干燥至百合湿基含水量 20%,然后再微波干燥至百合湿基含水量为 8%,以此类推;MHAD20 表示先微波干燥至百合湿基含水量 20%,然后再热风干燥至百合湿基含水量为 8%,以此类推。同 1.3.2(1)方法绘制干燥曲线和干燥速率曲线。

(4)百合干显微结构观察

参照王雪媛等^[23]的方法,并做部分修改。将微波(213 W)干燥样品、60℃热风干燥样品及微波-热风联合干燥样品分别剪切成 3 mm×3 mm 的小块,之后将其贴到扫描样品台,在 IB-V 离子喷涂仪上镀膜,随后放入扫描电镜扫描观察,分别在放大 300 倍和 1000 倍的条件下进行拍照。

1.3.3 微波-热风联合干燥样品与硫熏样品及无硫样品的品质比较

(1)硫熏样品和无硫样品制备

硫熏样品制备:鲜百合经剥片、清洗后在 100℃水中热烫 2 min,冷却、沥干后按照硫磺与百合 1:25 的质量比密封熏蒸 12 h,之后在 120℃的热风条件下干燥至百合湿基含水量为 8%。

无硫样品制备:鲜百合经剥片、清洗后在 100℃水中热烫 2 min,冷却后浸入无硫护色剂(0.65%氯化钠+0.3%抗坏血酸+0.3% L-半胱氨酸+0.8%柠檬酸)5 min,捞出、漂洗、沥干,之后在 120℃的热风条件下干燥至百合湿基含水量为 8%。

(2)感官评定

将最优工艺所得样品、硫熏样品、无硫样品分别采用九分制,选取 9 个经过专门培训的感官评定员进行评分,最后计算平均值,满分为 45 分。依据食品安全地方标准—兰州百合的感官评价标准,并根据加工产品的实际情况,制定了如下评定标准,详见表 1。

(3)亮度值和黄蓝值的测定

将最优工艺所得样品、硫熏样品、无硫样品分别用色度测试仪测定其亮度值(L^*)和黄蓝值(b^*)。每个样品,选取 9 个百合干燥鳞片,并在每个百合鳞片表面取其 3 个点进行检测,测其百合鳞片的 L^* 和 b^* ,最后求其平均值。

(4)复水比的测定

最优工艺所得样品、硫熏样品、无硫样品的复水比测定参照巨浩羽等^[24]的方法,并做部分修改。将样品按照料液比 1:10 (g/mL)放入 40℃的恒温热水中浸泡 30 min,沥干水分后,紧接着用吸水纸吸取表面水分,称重,重复 3 次,按照公式(3)计算:

$$R=M_2/M_1 \tag{3}$$

式(3)中,R表示复水比; M_1 表示干制品质量(g); M_2 表示干制品复水后质量(g)。

(5)营养成分的测定

将最优工艺所得样品、硫熏样品、无硫样品分别依据 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法测定其脂肪含量,参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法测定蛋白质含量,按照曹建康等^[25]的方法,采用 2,6-二氯酚靛法测定其 VC 含量。

1.4 数据处理

实验结果采用 3 次重复平均值±标准偏差表示。应用 SPSS 20.0 对数据进行单因素方差分析,差异显著性分析采用 Duncan's 多重比较, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 热风干燥温度对兰州百合干燥特性和品质的影响

干燥特性曲线可以很好地反映物料水分含量与干制时间之间的关系^[26],产品色泽、复水性分别为评价果蔬干制品品质的关键指标之一,在一定程度上可以很好地反映消费者的接受程度^[27-28]。由图 1A 可知,随着干燥时间的延长,百合片干基含水率不断下降,且呈现出干燥温度越高干基含水率下降越快;由图 1B 可知,干燥速率随干燥温度的提高而增大,温度越高干燥时间越短。50、60、70、

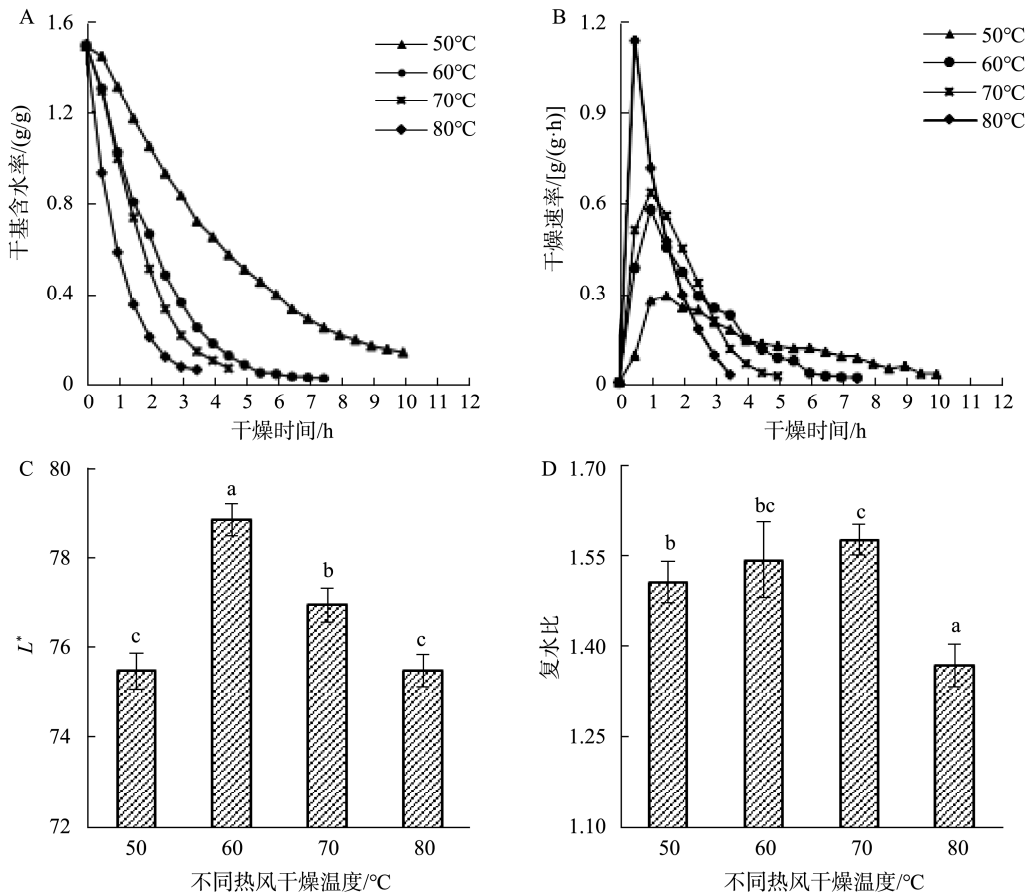
表 1 感官评定标准
Table 1 Standard of sensory evaluation

项目	分值/分		
	1~3	4~6	7~9
色泽	黄褐色,褐变较大	淡黄色,褐变较小	颜色较白,基本无褐变
形态	皱缩,气泡较多	平整,少量气泡	较平整,无气泡
气味	异味较浓	轻微异味	无异味
口感	少有百合清香、甜味	原百合清香、甜味淡	有原百合清香、甜味
质地	较硬,粘牙	疏松,粘牙	疏松,有咬劲

80℃热风条件下,百合干燥至湿基含水率 8%所需时间分别是 10.0、7.5、4.5、3.5 h。这是因为随着热风温度不断提高,百合内表温差不断加大,进而引起传热传质动力增加^[29-30]。在整个热风干燥过程中,百合没有出现恒速期,属于典型的降速干燥,朱文学等^[22]在研究预处理对兰州百合热风干燥特性的影响时,也发现了此种现象,这可能与百合的多孔结构有关,使其内部扩散控制占有主导地位^[31]。由图 1C 可知,热风干燥温度对百合干色泽影响比较大。热风干燥温度 60℃制得百合干色泽 L^* 显著高于其他温度,50℃和 80℃制得百合干色泽值较低。这可能是由于 50℃低温干燥所需干燥时间较长,百合长时间与氧接触发生了褐变反应,使得 L^* 降低^[32-33];高温 80℃可能使得百合在干燥过程中发生了美拉德反应,颜色加深,色泽值降低^[7,33]。由图 1D 可知,随着干燥温度的升高,复水比呈现先增大后减少的趋势,80℃制得的百合干复水比显著低于其他温度。这可能是由于高温造成兰州百合的结构发生很大变化,使其收缩率提高,孔隙率随之下降所致^[34]。综合不同干燥温度对百合干燥动力学、复水比及色泽 L^* 的影响,选择兰州百合热风干燥的温度为 60℃。

2.2 微波干燥功率对兰州百合干燥特性的影响

由图 2A 可知,随着干燥时间的延长,百合片干基含水率不断下降,且微波功率越大百合含水率下降越快;由图 2B 可知,百合片干燥速率随微波功率的增大而增大,微波功率越高干燥时间越短。在 213、427、640 W 功率下,百合湿基含水率下降至 8%所需时间分别是 44、12、8 min。从干燥时间上看,微波功率越高干燥时间越短。主要原因可能为随着微波功率提高,百合内部升温速度不断加快,使水分在百合内部的扩散及移动速率加快,进而使水分的移动蒸发加速,从而使其干燥速率得到提高^[19]。640 W 的高功率在短时间就可使百合湿基含水量降到 8%以下,但是制得的百合干出现了严重的焦糊现象;213 W 的低功率干燥时间远长于高功率干燥,但随着干燥时间的延长仍会出现百合干焦糊现象。在干燥过程中发现,640、427、213 W 微波功率下干燥,百合片表面出现焦糊现象时间分别是 4、8、36 min。因此单一的微波干燥很难获得质地均匀、质量较好的百合干。因此选择 213 W 的低功率结合热风进一步进行联合干燥实验。



注: 柱上字母不同表示组间具有显著性差异($P<0.05$), 图 3 同。

图 1 热风干燥温度对百合干燥特性(A 干燥曲线、B 干燥速率曲线)、色泽(C)及复水比(D)的影响

Fig.1 Effects of hot-air drying temperature on drying characteristics (A drying curve, B velocity curve), color (C) and rehydration ratio (D) of *Lilium davidii* var. *unicolor*

2.3 微波-热风联合干燥对兰州百合品质及干燥特性的影响

由图 3A 可知,先用微波干至百合水分含量为 40%后热风干燥,即 MHAD40 制得百合干 L^* 显著高于其他处理组;由图 3B 可知,微波、热风干燥顺序及含水量转换点对复水比的影响差异不明显;由图 3C 和 3D 可知,将百合含水量降到 40%左右(干基水分含量 0.7 左右),微波-热风联

合干燥用了 25 min,而热风恒温干燥用了将近 125 min。整个微波-热风联合干燥过程用了 300 min,相较于 60℃热风干燥 450 min 来说,缩短了 33%的干燥时间,同时又保持了产品色泽,避免了微波干燥过度而出现的百合干焦化、起泡等现象。综合比较,确定兰州百合微波-热风联合干燥条件为:先 213 W 微波后 60℃热风干燥,百合含水量转换点为 40%。

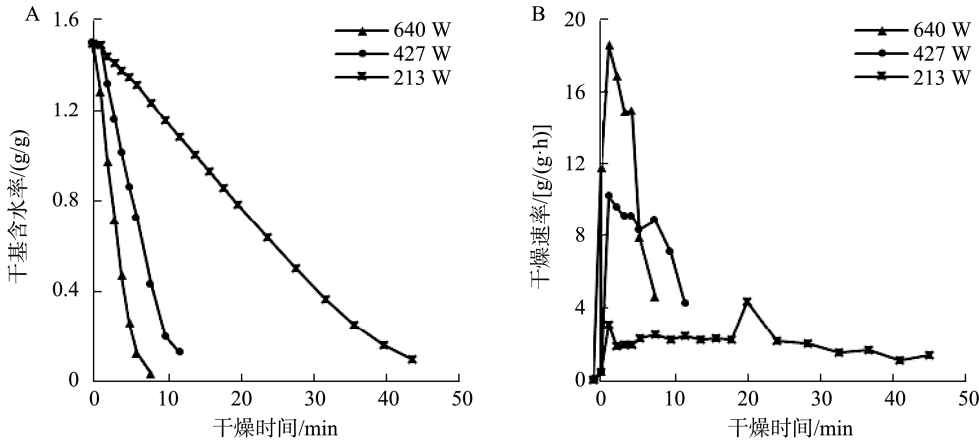


图 2 微波干燥功率对百合干燥曲线(A)及干燥速率曲线(B)的影响
Fig.2 Effect of different microwave power on drying curve (A) and velocity curve (B) of lily

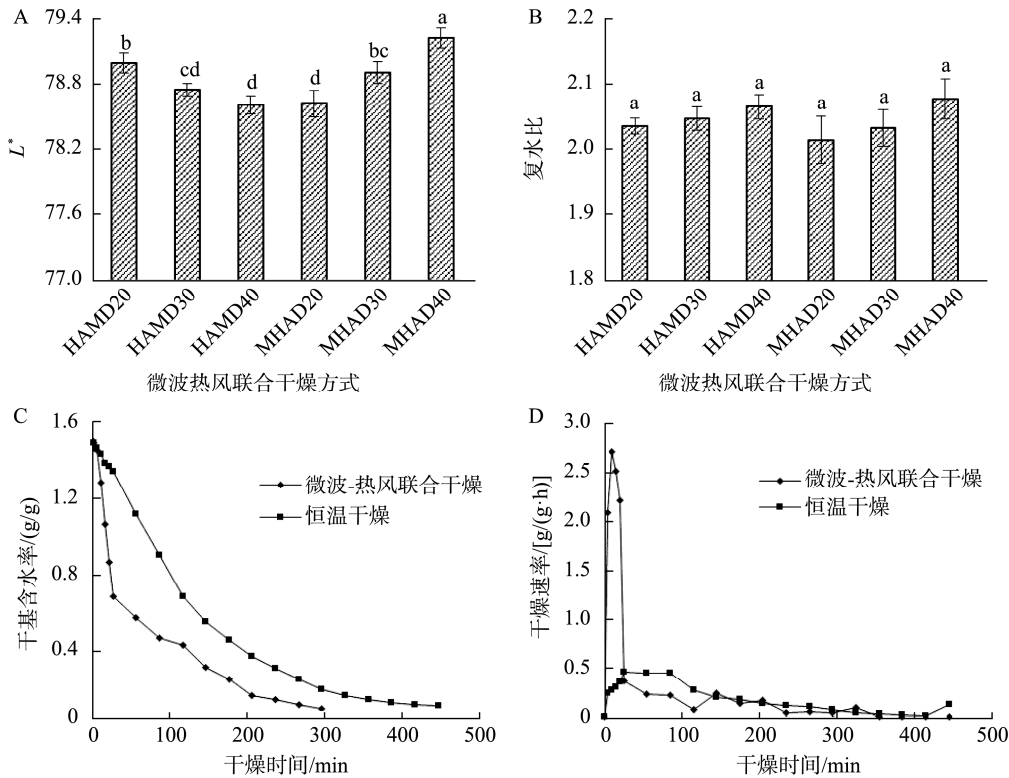


图 3 微波-热风联合干燥对百合色泽(A)、复水比(B)及干燥特性(C 干燥曲线、D 干燥速率曲线)的影响
Fig.3 Effects of microwave combined hot-air drying methods on color (A), rehydration ratio (B) and characteristics (C drying curve, D velocity curve) of *Lilium davidii* var. unicolor

2.4 不同干燥方式对百合干微观结构的影响

干燥条件的改变会对产品微观结构产生一定的影响^[35-36], 进而使产品的质量发生变化。由图 4 可以看出, 微波干燥(功率 213 W)对百合组织结构的破坏程度最为严重, 组织出现了严重的塌陷、收缩现象, 呈现出规则排列现象; 微波-热风联合干燥方式使百合干发生了一定程度的变形, 组织出现了塌陷、间隙率增大的现象; 而 60℃热风干燥组织排列较为规则紧密。微观结构的变化也很好地解释了产品的复水性, 相较 60℃热风干燥, 微波-热风联合干燥方式适当地引起了组织孔隙率的增加, 使得产品具有更高的复水性。

2.5 微波-热风联合干燥样品与硫熏样品及无硫样品品质比较

2.5.1 不同加工样品感官品质比较

由图 5 可知, 微波-热风联合干燥样品在色泽、质地、

形态、口感、气味方面的综合得分值(33.7 分), 显著高于硫熏样品(28.82 分)及无硫样品(29.71 分), 分别高出 16.93% 和 13.43%, 无硫样品在色泽、形态、口感、质地方面的得分值较低, 而硫熏样品在形态、气味、口感、质地方面的得分值较低。其中, 微波-热风联合干燥样品的色泽洁白, 形态较为平整、无气泡, 无异味, 具有原百合清香、甜味, 质地疏松、有咬劲; 无硫样品色泽为淡黄色, 形态平整、有少量气泡, 有原百合的清香味, 但甜味较淡, 质地疏松, 有黏牙的现象; 硫熏样品色泽洁白, 形态平整、有少量气泡, 有轻微的异味, 有原百合的清香味, 但甜味较淡, 质地疏松, 有黏牙的现象。在对龙井 43 号^[37]、桔子皮^[38]及蘑菇^[39]的干燥方法进行研究时, 均也发现微波-热风联合干燥可提高其产品的感官品质。

2.5.2 不同加工样品色泽及复水比比较

L^* 表示产品亮度, 数值越大, 表示产品越具有光泽, b^* 表示产品黄蓝值, 数值越大, 表示产品越黄。由表 2 可知,

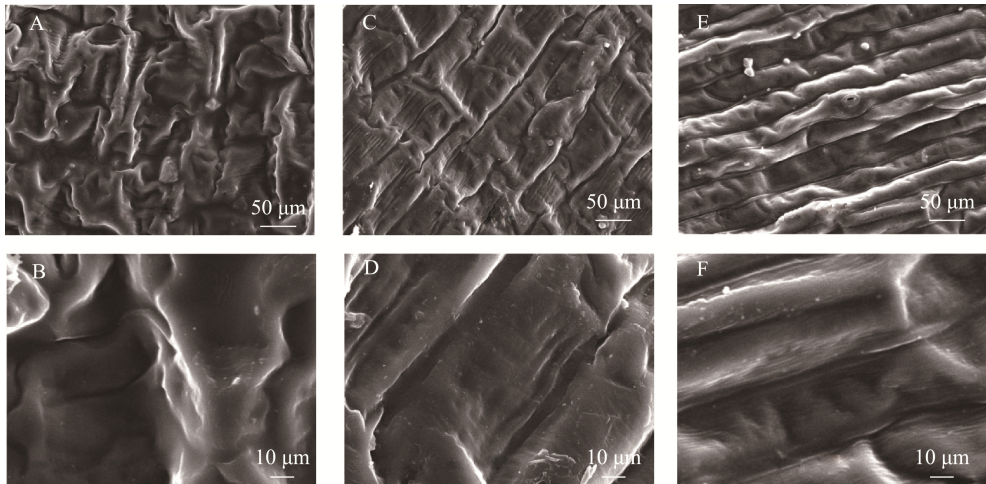


图 4 微波干燥[A(×300), B(×1000)]、微波-热风联合干燥[C(×300), D(×1000)]及热风干燥[E(×300), F(×1000)]对百合干微观结构的影响

Fig.4 Effects of microwave drying [(A (×300), B (×1000)], microwave combined hot-air drying [C (×300), D (×1000)] and hot-air drying [(E (×300), F (×1000)] on microstructures of *Lilium davidii* var. unicolor

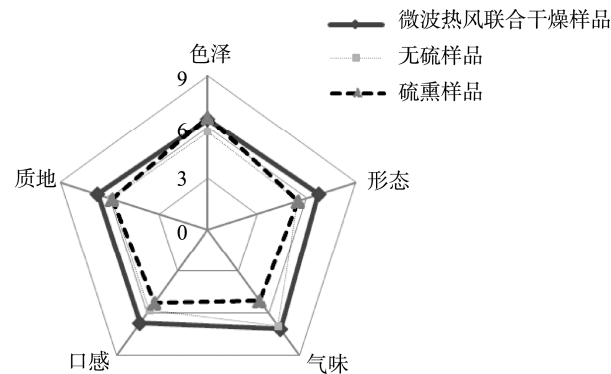


图 5 不同加工样品感官评定雷达图

Fig.5 Sensory evaluation radar chart of different processed samples

微波-热风联合干燥样品的 L^* 与硫熏样品相接近, 而显著高出无硫样品 3.97%; 微波-热风联合干燥样品的 b^* 与硫熏样品相接近, 而显著低于无硫样品 9.58%, 这可能由于较高温度(120℃)的热风干燥使得无硫处理的兰州百合组织发生非酶促褐变; 微波-热风联合干燥样品的复水比达到 2.08, 分别比硫熏样品及无硫样品高出 40.54%和 33.33%。硫熏样品及无硫样品复水比较低可能是干燥过程采用 120℃高温, 使物料组织结构破坏较为严重, 从而使其复水比较低。而微波-热风联合干燥使其组织发生了部分变形, 组织间隙增大(图 4), 反而有利于复水性能的提升。

2.5.3 不同加工样品营养成分比较

由表 3 可知, 相较硫熏样品, 微波-热风联合干燥样品的蛋白质及 VC 含量显著提高, 分别提高了 25.72%及

26.28%; 相较无硫样品, 微波-热风联合干燥样品的蛋白质及 VC 含量显著提高, 分别提高了 24.44%和 19.89%。而硫熏样品与无硫样品在脂肪、蛋白质及 VC 含量方面差异不显著。VC 的热稳定性差, 同时极易被氧化^[40]。所以, 硫熏样品及无硫样品因干燥温度较高, 造成产品 VC 损失率较大。微波-热风联合干燥样品 VC 含量显著提高, 一方面可能与其加热时间短(5.0 h)、处理速度快、加热温度较低有关, 另一方面前期的微波加热可能使物料的抗坏血酸氧化酶活性失活, 使得 VC 不易被氧化分解, 从而提高了其保留量^[18]; 与微波-热风联合干燥样品相比, 硫熏样品及无硫样品的蛋白质含量较低, 这可能是蛋白质在高温下, 结构发生了变化, 进而改变其化学性质, 从而导致硫熏样品及无硫样品蛋白质的溶解性能下降^[18]。

表 2 不同加工样品色泽及复水比
Table 2 The color and rehydration ratio of different processed samples

干燥样品	L^*	b^*	复水比
微波-热风联合干燥样品	78.55±0.79 ^a	22.27±0.14 ^a	2.08±0.03 ^a
无硫样品	75.55±0.82 ^b	24.63±0.04 ^b	1.56±0.07 ^b
硫熏样品	79.85±0.86 ^a	21.78±0.04 ^a	1.48±0.07 ^b

注: 同列不同小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$), 表 3 同。

表 3 不同加工样品营养成分含量
Table 3 Nutrient content of different processed samples

干燥样品	脂肪/%	蛋白质/(g/100 g)	VC/(mg/100 g)
微波-热风联合干燥样品	0.19±0.05 ^a	18.43±0.86 ^b	24.17±0.76 ^b
无硫样品	0.13±0.01 ^a	14.81±0.38 ^a	20.16±0.30 ^a
硫熏样品	0.12±0.01 ^a	14.66±0.89 ^a	19.14±0.46 ^a

3 结 论

本研究以干燥动力学、色泽 L^* 、复水比作为评价指标, 考察了热风干燥温度、微波干燥功率、微波-热风联合干燥顺序及含水量转换点对兰州百合品质及干燥动力学的影响, 发现先 213 W 微波后 60℃热风干燥, 百合含水量转换点为 40%的联合干燥工艺能更加有效地缩短干燥时间, 所得到的百合干的感官评分、复水比、蛋白质及 VC 含量均高于硫熏百合干及无硫百合干。通过对热风干燥、微波干燥及微波-热风联合干燥产品的显微结构观察, 也在一定程度上反映出联合干燥方式优于单一干燥方式。本研究进一步拓宽了兰州百合干燥方法, 为生产高品质的兰州百合干提供了新的思路, 干燥参数对后续的生产加工具有一定的指导意义, 但对于规模化生产的工艺条件还需进一步地探讨。

参考文献

[1] 毛耀杰, 晋小军, 刘鑫钰, 等. 不同干燥方法对兰州百合质量的影响[J/OL]. 中华中医药学刊, 1-10. [2023-10-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1546.R.20230816.1034.014.html>

MAO YJ, JIN XJ, LIU XY, *et al.* Effects of different drying methods on the quality of Lanzhou lily [J/OL]. Chin Arch Tradit Chin Med, 1-10. [2023-10-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1546.R.20230816.1034.014.html>

[2] 李雪萍, 张怡忻, 李建军, 等. 兰州百合防病促生细菌筛选及其效果评价[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(5): 1296-1307.

LI XP, ZHANG YX, LI JJ, *et al.* Screening of disease-control and growth-promoting bacteria and their effects on Lanzhou lily [J]. Chin J Biol Control, 2022, 38(5): 1296-1307.

[3] 李霞, 李永才, 毕阳, 等. 响应面法优化兰州百合干无硫护色剂配方[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 16-20.

LI X, LI YC, BI Y, *et al.* Formula optimization of non-sulfur color-protective agents for dried Lanzhou lily by response surface methodology [J]. Food Sci, 2014, 35(4): 16-20.

[4] 廉小亲, 陈群, 汤桑森, 等. 基于 NIR 和 SOM-RBF 网络的兰州百合关键营养物质定量分析方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(7): 2025-2032.

LIAN XQ, CHEN Q, TANG SM, *et al.* Quantitative analysis method of key nutrients in Lanzhou lily based on NIR and SOM-RBF [J]. Spectrosc Spec Anal, 2022, 42(7): 2025-2032.

[5] 高清雅. 兰州百合无硫干制及废弃鳞茎中多糖的提取、硫酸化修饰研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.

GAO QY. Research on non-sulfur of dried *Lilium davidii* var. *unicolor* Salisb and extraction, sulfated modification of polysaccharides from wastes bulbets [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2019.

[6] 王怡, 董继先, 王栋, 等. 微波烫漂预处理下百合热风干燥特性及动力学模拟[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 186-190, 200.

WANG Y, DONG JX, WANG D, *et al.* Drying characteristics and dynamic simulation of lily under microwave blanching pretreatment [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(3): 186-190, 200.

[7] 效碧亮, 孙静, 刘晓风. 百合热风薄层干燥特性及干燥品质[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 48-55, 218.

XIAO BL, SUN J, LIU XF. Drying characteristics and drying quality of Lilium by hot-air thin-layer drying [J]. Food Mach, 2020, 36(2): 48-55, 218.

[8] SAGAR VR, SURESH KUMAR P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review [J]. J Food Sci Tech Mys, 2010, 47(1): 15-26.

[9] 王博, 魏孔斌, 王雅, 等. 百合片真空低温干燥和热风干燥的品质比较[J]. 农产品加工, 2018, (9): 42-44.

WANG B, WEI KB, WANG Y, *et al.* Comparison of the quality of edible lily under the treatment of freeze-dried and hot-air dried [J]. Farm Prod Process, 2018, (9): 42-44.

[10] 李晓风, 杨琳, 王嘉祥, 等. 余甘子微波-热风分段联合干燥工艺优化及动力学模型研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(22): 131-139.

- LI XF, YANG L, WANG JX, *et al.* Study on process optimization and kinetic model of microwave-hot air combinatined drying for *Phyllanthus emblica* L [J]. Food Ferment Ind, 2023, 49(22): 131–139.
- [11] 程晶晶, 王军, 王崇. 紫薯片热风与微波联合干燥特性及品质评价[J]. 食品科技, 2015, 40(10): 39–44.
- CHENG JJ, WANG J, WANG C. Characteristics of combined hot-air and microwave drying for purple sweet potato slice and quality evaluation [J]. Food Sci Technol, 2015, 40(10): 39–44.
- [12] 贾文婷, 张冉冉, 李文琦, 等. 红枣热风微波耦合干燥工艺优化及干燥特性和微观结构研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(20): 269–278.
- JIA WT, ZHANG RR, LI WQ, *et al.* Optimization of hot air-microwave coupling drying process and study on drying characteristics and microstructure of *Ziziphus jujuba* Mill [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(20): 269–278.
- [13] LIU J, LI XL, YANG YM, *et al.* Optimization of combined microwave and hot air drying technology for purple cabbage by response surface methodology (RSM) [J]. Food Sci Nutr, 2021, 9(8): 4568–4578.
- [14] 关东, 陈丹, 崔梦迪, 等. 不同加热温度和处理方式对灰枣活性成分和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 113–121.
- GUAN D, CHEN D, CUI MD, *et al.* Effect of different heating temperatures and treatment methods on the active compounds and antioxidant activities of *Ziziphus Jujuba* cv. Huizao [J]. Sci Technol Food Ind, 2022, 43(20): 113–121.
- [15] 周韵, 宋春芳, 崔政伟. 热风微波耦合干燥胡萝卜片工艺[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 382–386.
- ZHOU Y, SONG CF, CUI ZW. Coupled hot air and microwave drying technology for carrot slices dehydration [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2011, 27(2): 382–386.
- [16] 陈健凯, 林河通, 李辉, 等. 杏鲍菇热风-微波真空联合干燥工艺参数优化[J]. 中国食品学报, 2014, 14(9): 131–140.
- CHEN JK, LIN HT, LI H, *et al.* Studies on optimized parameters of combined hot-air and microwave vacuum drying for *Pleurotus eryngii* [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2014, 14(9): 131–140.
- [17] 肖亚冬, 吴海虹, 田震, 等. 香葱叶片微波-热风联合干燥工艺优化及干燥动力学研究[J]. 农产品加工, 2023, (14): 6–12.
- XIAO YD, WU HH, TIAN Z, *et al.* Optimization of microwave combined hot-air drying process and drying dynamics model of chive leaf [J]. Farm Prod Process, 2023, (14): 6–12.
- [18] 刘艳红, 范美迪, 孙瑞雪, 等. 不同干燥方式对香菜品质及自由基清除能力的影响[J]. 中国调味品, 2022, 47(12): 61–65, 72.
- LIU YH, FAN MD, SUN RX, *et al.* Effects of different drying methods on quality and free radical scavenging ability of coriander [J]. China Cond, 2022, 47(12): 61–65, 72.
- [19] 林鹏程, 张钟元, 江宁, 等. 紫菜热风/微波联合干燥工艺优化及品质分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 215–225.
- LIN PC, ZHANG ZY, JIANG N, *et al.* Optimization of two step drying process of *Porphyra* by hot air and microwave and quality evaluation [J]. Sci Technol Food Ind, 2022, 43(2): 215–225.
- [20] MA Y, LIU D, ZHANG W, *et al.* Effects of hot-air coupled microwave on characteristics and kinetics drying of lotus root slices [J]. ACS Omega, 2021, 6(5): 3951–3960.
- [21] YU Q, DUAN JJ, YU N, *et al.* Enhancing the antityrosinase activity of saponins and polyphenols from *Asparagus* by hot air coupled with microwave treatments [J]. LWT, 2020, 124: 109174.
- [22] 朱文学, 黄敬, 刘云宏. 预处理对百合热风干燥特性及其品质的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 77–83, 120.
- ZHU WX, HUANG J, LIU YH. Effect of pretreatment on character and quality of lily by hot-air drying [J]. J Henan Univ Sci Technol (Nat Sci), 2017, 38(4): 77–83, 120.
- [23] 王雪媛, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 热风-脉动压差闪蒸干燥对苹果片水分及微观结构的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 287–293.
- WANG XY, CHEN QQ, BI JJ, *et al.* Effect of hot air-pulsed sudden decompression flashing drying on moisture and microstructure in apple slices [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2015, 31(20): 287–293.
- [24] 巨浩羽, 杨劲松, 赵海燕, 等. 真空-蒸汽脉动烫漂预处理对百合干燥特性的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 206–210, 216.
- JU HY, YANG JS, ZHAO HY, *et al.* The effect of vacuum steam pulsed blanching pretreatment on drying characteristics of *Lilium brownie* [J]. Food Mach, 2019, 35(11): 206–210, 216.
- [25] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- CAO JK, JIANG WB, ZHAO YM. Postharvest physiological and biochemical experiment guidance of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [26] 王存堂, 张译心, 李梦. 百合热风干燥动力学研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 74–78, 84.
- WANG CT, ZHANG YX, LI M. Hot-air drying kinetics of lily [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(18): 74–78, 84.
- [27] 金永学, 文爱华, 范郁冰, 等. 蒸汽烫漂结合真空微波干燥工艺对龙牙百合粉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 144–150.
- JIN YX, WEN AIH, FAN YB, *et al.* Effect of steam blanching combined with vacuum microwave drying on the quality of *Lilium brownii* var. *Viridulum* powder [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(6): 144–150.
- [28] 段续, 李格格, 李琳琳, 等. 基于转换点调控的怀山药多相态微波干燥及品质特性研究[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 134–143.
- DUAN X, LI GG, LI LL, *et al.* Multiphase microwave drying and quality characteristics of Chinese yam based on conversion point regulation [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2024, 40(2): 134–143.
- [29] KASSEM AS, SHOKR AZ, EI-MAHDY AR, *et al.* Comparison of drying characteristics of Thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying [J]. J Saudi Soc Agric Sci, 2011, 10(1): 33–40.
- [30] ARAL S, BESE AV. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity [J]. Food Chem, 2016, 210: 577–584.
- [31] TUNDE-AKINTUNDE TY. Effect of pretreatment on drying time and quality of chilli pepper [J]. J Food Process Pres, 2010, 34(4): 595–608.
- [32] VEGA-GÁLVEZ A, SCALA KD, RODRÍGUEZ K, *et al.* Effect of

- air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annuum*, L. var. *Hungarian*) [J]. Food Chem, 2009, 117(4): 647–653.
- [33] SOMKIAT P, PAVEENA P, SOMCHART S. Effective diffusivity and kinetics of urease inactivation and color change during processing of soybeans with superheated-steam fluidized bed [J]. Dry Technol, 2004, 22(9): 2095–2118.
- [34] SENADEERA W, ADILETTA G, ÖNAL B, *et al.* Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices [J]. Foods, 2020, 9(1): 101.
- [35] ABBASPOUR-GILANDEH Y, KAVEH M, FATEMI H, *et al.* Combined hot air, microwave, and infrared drying of hawthorn fruit: Effects of ultrasonic pretreatment on drying time, energy, qualitative, and bioactive compounds' properties [J]. Foods, 2021, 10(5): 1006.
- [36] LIU Q, CUI X, SONG ZB, *et al.* Coating shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) with a polysaccharide from *Oudemansiella radicata* improves product quality and flavor during postharvest storage [J]. Food Chem, 2021, 352: 129357.
- [37] SHI LZ, KIM E, YANG LY, *et al.* Effect of a combined microwave-assisted drying and air drying on improving active nutraceutical compounds, flavor quality, and antioxidant properties of *Camellia sinensis* L. (cv. Longjing 43) flowers [J]. Food Qual Saf 2021, 5: 1–7.
- [38] TALENS C, CASTRO-GIRALDEZ M, FITO PJ. Effect of microwave power coupled with hot air drying on sorption isotherms and microstructure of orange peel [J]. Food Bioprocess Tech, 2018, 11(4): 723–734.
- [39] DAS I, ARORA A. Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying [J]. J Food Eng, 2018, 223: 208–219.
- [40] 李宝玉. 不同干燥方式对香蕉产品品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 100–106.
- LI BY. Effects of different drying methods on quality of banana products [J]. Food Sci, 2016, 37(15): 100–106.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



尹 燕, 硕士, 高级农艺师, 主要研究方向为农产品加工及贮藏。
E-mail: 544895391@qq.com



李永才, 博士, 教授, 主要研究方向为采后生物学。
E-mail: lyc@gsau.edu.cn