

不同干燥方法对杏鲍菇结构及品质特性的影响

陈健凯

Effects of Different Drying Methods on the Structure and Quality of *Pleurotus eryngii*

CHEN Jiankai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

杏鲍菇多糖研究进展

Research progress on polysaccharides from *Pleurotus eryngii*

食品工业科技. 2017(21): 347-351 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.21.067>

干燥方法对细菌纤维素膜特性及结构的影响

Effect of drying method on properties and structure of bacterial cellulose film

食品工业科技. 2017(03): 91-96 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.03.009>

干燥方法对速食薏米粉干燥特性与品质的影响

Effect of Drying Methods on Drying Characteristics and Quality of Instant Coix Seed Flour

食品工业科技. 2020, 41(13): 22-26,31 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.13.004>

栀子药材不同干燥方法水分动态过程模拟及其对多元活性成分的影响

Modelling of the Moisture Dynamic Process and Effects on Multiple Functional Components of *Gardenia jasminoides* Ellis with Different Drying Methods

食品工业科技. 2019, 40(12): 51-57,64 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.12.009>

不同干燥方法对金针菇多糖抗氧化活性的影响

Effect of different drying methods on antioxidant activities of polysaccharides extracted from *Flammulina velutipes*

食品工业科技. 2017(18): 40-44 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.18.008>

多糖基水凝胶载体及其干燥方式研究进展

Research Progress of Polysaccharide - Based Hydrogel Carriers and Their Drying Method

食品工业科技. 2021, 42(23): 438-446 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120172>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈健凯. 不同干燥方法对杏鲍菇结构及品质特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 221-228. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050128

CHEN Jiankai. Effects of Different Drying Methods on the Structure and Quality of *Pleurotus eryngii*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 221-228. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050128

· 工艺技术 ·

不同干燥方法对杏鲍菇结构及品质特性的影响

陈健凯

(漳州职业技术学院食品工程学院, 福建漳州 363000)

摘要:为探讨不同干燥方法对杏鲍菇干制品组织结构和品质的影响,以干制品微观形貌、收缩率、复水比、色泽、氨基酸含量、多糖含量、感官评价为评价指标,选取热风干燥、微波真空干燥、间歇微波真空干燥、热风-微波真空联合干燥、真空冷冻干燥 5 种方法对杏鲍菇进行干燥。结果表明,组织结构完整性保持最好的是真空冷冻干燥,其收缩率最小(30.2%),复水比最大(3.03),复原效果最好,多糖含量最高(13%)。热风-微波真空联合干燥氨基酸含量最高(560.94 mg/100 g),感官评价最高(9.4 分),收缩率(55.43%)、复水比(1.83)、色差(76.29)、多糖(11.8%)仅次于真空冷冻干燥。热风干燥多糖含量最低(5.4%),感官评价最低(4.4 分)。综合外观、营养成分及感官评价,热风-微波真空联合干燥是最适合于杏鲍菇等一类菌丝体构成组织、含水量大的食用菌的一种干燥方法。

关键词:杏鲍菇,干燥方法,组织结构,氨基酸,多糖

中图分类号:TS255.52

文献标识码:B

文章编号:1002-0306(2023)23-0221-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050128



本文网刊:

Effects of Different Drying Methods on the Structure and Quality of *Pleurotus eryngii*

CHEN Jiankai

(College of Food Engineering, Zhangzhou Vocational and Technical College, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: In order to explore the effects of different drying methods on the microstructure and quality of dried products of *Pleurotus eryngii*, five methods were selected to dry the dried products: Hot air drying, microwave vacuum drying, intermittent microwave vacuum drying, hot air-microwave combined drying and vacuum freeze-drying, and the micromorphology, shrinkage rate, rehydration ratio, color, amino acid content, polysaccharide content and sensory evaluation of dry products were used as evaluation indexes. The results showed that vacuum freeze-drying was the best to maintain the integrity of tissue structure, with the smallest shrinkage rate (30.2%), the largest rehydration ratio (3.03), and the best recovery effect, the highest polysaccharide content (13%). The amino acid (560.94 mg/100 g) and sensory evaluation (9.4 points) of hot air-microwave combined drying were the highest, and the shrinkage rate (55.43%), rehydration ratio (1.83), color (76.29) and polysaccharide (11.8%) were the second highest after vacuum freeze-drying. The content of polysaccharide in hot air drying was the lowest (5.4%), and the sensory evaluation was the lowest (4.4 points). Comprehensive appearance, nutritional composition and sensory evaluation, hot air-microwave combined drying was a drying method most suitable for edible fungi with mycelium constitutes tissue and large water content such as *P. eryngii*.

Key words: *Pleurotus eryngii*; drying methods; tissue structure; amino acid; polysaccharide

食用菌因其高营养、高附加值而深受种植者及消费者喜爱。杏鲍菇是近几年发展迅猛的食用菌,是

收稿日期: 2023-05-12

基金项目: 福建省教育厅中青年教育科研项目(科技类)(JAT191402);福建省漳州市食品产业技术研究院开发基金项目(ZSY2021102)。

作者简介: 陈健凯(1969-),女,硕士,副教授,研究方向:农产品加工与贮藏,E-mail: 1047731562@qq.com。

集食用、药用于一体的珍稀食用菌新品种,其菌肉肥厚,质地脆嫩,特别是菌柄组织致密、结实、乳白,可全部食用,且菌柄比菌盖更脆滑、爽口,被称为“平菇王”、“干贝菇”,具有愉快的杏仁香味及如鲍鱼的口感,适合保鲜、加工^[1-3]。

随着产量不断上升,杏鲍菇等食用菌加工涌现出诸多生产技术,使食用菌产品更加多样化、个性化,成为国民经济发展的“新兴产业”和新的经济增长点^[4]。目前包括杏鲍菇在内的食用菌深加工的出口品种主要是菇罐头及干制品。对于杏鲍菇等食用菌这类含水量大、富含蛋白、多糖的农产品,干制是一种很合适的深加工方法。近几年,不少学者对杏鲍菇等食用菌的干制方法进行了研究探讨^[5-6]。食品干燥的常见方法主要有热风干燥、微波真空干燥、红外线干燥、热泵干燥、真空冷冻干燥,以及以上各种干燥方法组合的联合干燥^[7],不同干燥方法对物料的复水性、色泽及营养成分等有不同影响^[8-10]。唐秋实等^[11]选用热泵、热风、真空冷冻和真空微波4种干燥工艺对新鲜杏鲍菇进行干燥处理,分析不同干燥方法对杏鲍菇主要营养成分、色度、糖(糖醇)和挥发性风味成分的影响。张苗青等^[12]应用热风、远红外和真空冷冻干燥三种方法对杏鲍菇干制产品品质的影响进行研究;刘鑫焯等^[13]研究了冷冻干燥、热风干燥中短波红外干燥和微波真空干燥4种干燥方式对杏鲍菇滋味成分的影响。陈君琛等^[14]探讨研究热风-真空联合干燥优化工艺生产即食杏鲍菇休闲产品。但是通过电镜扫描,从干制品的微观组织结构变化结合主要几项品质指标来分析不同干燥方法对杏鲍菇干制品品质影响的研究,目前比较少。

本文选取热风干燥、微波真空干燥、间歇微波真空干燥、热风-微波真空联合干燥、真空冷冻干燥对杏鲍菇进行干燥,从内部结构(超显微视角)及外观品相、营养成分分析研究不同干燥方法对杏鲍菇干制品质量的影响,为杏鲍菇等食用菌最适干燥加工方法提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

杏鲍菇 超市购买,选取菇柄直径4~5 cm的新鲜杏鲍菇;茚三酮、磺基水杨酸、苯酚、正丙醇、正丁醇、乙酸、乙酸钠、95%乙醇、硫酸、葡萄糖 分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司。

WZD3S型微波真空干燥机 南京三乐微波技术发展有限公司;DHG-9055A鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司;Gamma1-16LSCplus真空冷冻干燥机 德国Christ公司;4-16KS大容量高速冷冻离心机 Sigma;JX300型超微粉碎机 天津市易斯仪器有限公司;ADCI系列全自动色差计 北京盛名扬科技开发有限公司;PTT-A+200型电子天平 华志电子科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 物料处理 沿菇长方向取材,切取1 cm厚度

圆饼状。每组物料干燥至湿基含水率约13%时终止干燥^[15]。以下每个实验组物料的量均为800 g。

1.2.2 热风干燥 根据前期完成的杏鲍菇热风干燥特性实验,选用较佳的热风干燥工艺参数组合:风速1.2 m/s,热风温度70℃,物料厚度1 cm^[15]。

1.2.3 微波真空干燥 前期完成了杏鲍菇微波真空干燥特性及基于品质的优化参数组合实验,选用组合较好的参数条件:微波功率2 kW,腔体绝对压力16 kPa,物料厚度1 cm^[16]。

1.2.4 间歇微波真空干燥 微波真空干燥杏鲍菇分二段式进行,两段微波真空干燥的参数与1.2.3相同,中间间歇停止微波加热10 min,间歇点的控制以干燥的物料水分含量达30%时停止加热,10 min后再继续微波加热至含水率13%。

1.2.5 热风-微波真空联合干燥 选用前期已完成的品质优化的最优联合干燥参数组合:热风温度73℃、转换含水率60%、微波功率2.65 kW,微波真空干燥的真空度16 kPa^[17]。

1.2.6 真空冷冻干燥工艺 杏鲍菇片→清洗→晾干→切片→装盘→预冻→真空干燥。

操作要点:将装有杏鲍菇片的冻干盘在-45℃条件预冻3 h,恒温4 h。随即进行真空干燥,加热板温度55℃,冻干压力90 Pa,冻干时间18 h。

1.3 指标测定

1.3.1 微观结构观察 采用扫描电镜观察杏鲍菇干制品微观组织结构。杏鲍菇干制样品切成4 mm×4 mm×4 mm丁块状,固定在样品模子上镀铂后,在20 kV电压下放大500倍观察^[18-19]。

1.3.2 收缩率的测定 鲜菇体积测定,将每组800 g鲜菇用游标卡尺量取每个菇片直径,再计算圆饼面积乘以菇片厚度1 cm。干制品体积测定,将每组干燥得到的干制品,放入盛有600 mL水的1000 mL量筒,将样品装入小铁丝笼子,压入量筒水里,1 min内读出体积变化量,每组重复三次,取平均值^[20-21]。收缩率计算公式如下:

$$S(\%) = \frac{V_0 - V_d}{V_0} \times 100$$

式中,S表示收缩率(%); V_0 和 V_d 分别为鲜菇及干品样品的体积,mL。

1.3.3 复水比的测定 将称好的定量样品放入装有40℃蒸馏水的烧杯里。复水30 min后,取出样品沥干20 min,拭干其表面水分,称重。每组进行3次平行实验,结果取平均值^[17,21]。复水比大,反映产品复水性能好。复水比计算公式如下:

$$R_r = M_f / M_g$$

式中, R_r :复水比; M_f :产品复水沥干后的质量,g; M_g :复水前产品的质量,g。

1.3.4 色差分析 色差采用色差计测出L、a、b值^[17],

计算亨特白度 $Wh = 100 - \sqrt{[(100 - L)^2 + (a^2 + b^2)]}$ 。本实验对每个处理组的每个产品取不同部位测试, 每个处理组探测 10 次, 计算出亨特白度, 取其平均值^[17]。

1.3.5 氨基酸含量测定 干燥样品粉碎, 称量, 采用茚三酮显色法^[16,22]测定试品氨基酸含量。由以下公式计算出氨基酸含量:

$$\text{游离氨基酸总量}(\text{mg}/100\text{g}) = \frac{m' \times v}{v_s \times m \times 1000} \times 100$$

式中, m' : 从标线查得的氨基酸质量, μg ; v : 样品提取液总体积, mL ; v_s : 测定时, 样品提取液体积, mL ; m : 样品质量, g 。

1.3.6 多糖测定 干燥样品粉碎, 称量, 采用苯酚-硫酸法^[22]测定试品多糖含量。由下公式计算出多糖含量:

$$\text{可溶性糖含量}(\%) = \frac{m' \times v \times N}{v_s \times m \times 10^6} \times 100$$

式中, m' : 从标线查得的蔗糖质量, μg ; v : 样品提取液总体积, mL ; N : 样品提取液稀释倍数; v_s : 测定时样品提取液体积, mL ; m : 样品质量, g 。

1.3.7 感官评价 感官评价指标有干制品的色泽、形状、气味、口感, 其中口感评价的样品制作是选取 100 g 干制品先复水后在沸水中煮制 10 min 捞起滤干水分备用^[21]。从消费者角度赋予各指标分数值, 对杏鲍菇干制品的感官质量进行评价, 分数值如表 1, 满分为 10 分。邀请 10 位感官评定员, 在评定前进行基本的杏鲍菇干制品相关的感官属性培训, 确保评价员客观进行评价^[21]。感官评价标准如下:

表 1 杏鲍菇干制品的感官质量评价标准

Table 1 Sensory evaluation scale for dried *Pleurotus eryngii*

评价指标	干制品状态	分数值
色泽 (2分)	色泽洁白	2
	微褐色	1.1~1.9
	深褐色至焦化	0.5~1
形状 (2分)	完整圆形边缘, 体积无明显收缩	2
	边缘完整, 体积收缩	1.1~1.9
	收缩严重, 塌陷变形	0.5~1
气味 (3分)	气味香浓, 有杏鲍菇特有的杏仁香味	2.1~3
	有香气, 气味寡淡	1.1~2
	无香气, 焦化味	0.5~1
口感 (3分)	入口鲜、甜, 咀嚼有弹性	2.1~3
	入口有甘甜, 较淡, 咀嚼无弹性	1.1~2
	入口味道寡淡, 咀嚼无弹性	0.5~1

1.4 数据处理

每组数据重复 3 次实验, 采用 graphpad prism 8.0 进行数据处理和方差分析, $P < 0.01$ 表示差异显著, $P < 0.0001$ 差异极显著。

2 结果与分析

2.1 几种干燥方法对杏鲍菇组织结构的影响

不同的干燥处理方式对杏鲍菇组织结构的影响差别很大。这从杏鲍菇干制品超显微扫描图可看

出。图 1A2 显示, 热风干燥后菌丝舒展扩张, 膨化效果明显, 生成蜂窝状结构, 但孔隙小, 局部结构由于加热时间过长, 温度高, 产生结块, 结块的产生阻碍了后续进一步脱水干燥, 使得干燥时间长, 结构受破坏严重, 图中看出菌丝断裂, 结构碎而不完整, 其干制品外观(图 1A1)变形、焦化, Zhang 等^[23] 在研究香菇干燥动力学中也有这样的观点, 加热时间过长温度过高对物料结构破坏大。

图 1B2 中, 微波真空干燥后样品组织内部较多的蜂窝状孔隙, 内外部均匀, 但孔隙小, 膨化效果较差, 菌丝舒展局限, 接近表面产生结块较多, 部分结构

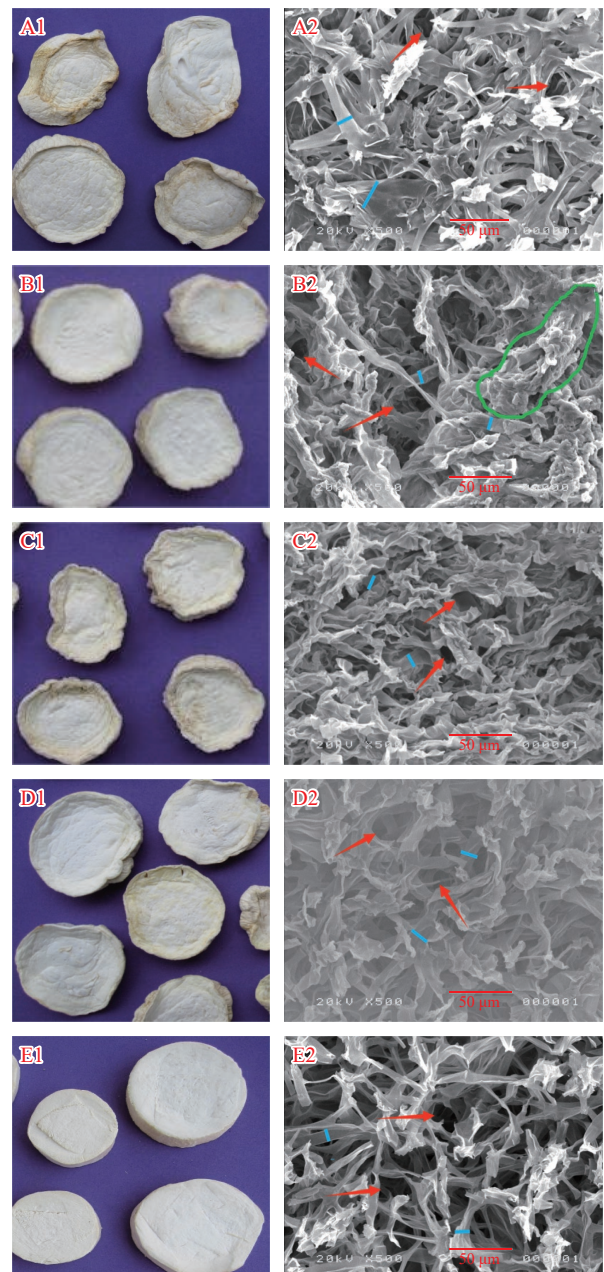


图 1 五种干燥方法制得的杏鲍菇干制样品及微观结构图(500×)

Fig.1 Dry samples and microstructure pictures of dried *Pleurotus eryngii* by five drying methods (500×)

注: A 为热风干燥, B 为微波真空干燥, C 为间歇微波真空干燥, D 为热风-微波真空联合干燥, E 为真空冷冻干燥。

塌陷,影响了其膨化效果,Xu^[24]在利用微波真空干燥银耳实验中也提出同样观点,微波真空干燥膨化效果较差。这可能与加热原理有关,热能内外部传导,但水分的蒸发从内部向外扩散,这导致外部组织产生局部过热,结成块状。图1B1外观图显示微波真空干燥干制品形状保持较好,但收缩严重。

图1C2中,间歇微波真空干燥膨化效果较差,菌丝舒展局限,孔隙较小,但由于避免了局部高温,菌丝无断裂现象,菌丝结块较少较小,整个组织结构保持完整无塌陷。外观图C1与B1比较,C1中样品收缩比B1略大,产生轻微焦化现象,色泽比B1差,但组织结构图C2对比B2显示,间歇微波真空干燥菌丝无结块,结构完整无坍塌现象。

图1D2中,热风-微波真空联合干燥综合了热风干燥和微波真空干燥的优点,膨化效果好,孔隙大且均匀,干制品从内到外均匀膨化,菌丝舒展开且保持完整不断裂。整个组织结构保持膨化且完整,也无局部结块焦化现象。外观图片(如图1D1)可看出外形保持良好,干燥后的收缩不明显,无产生表面焦化变形现象。

图1E中,真空冷冻干燥干制品膨化效果好,孔隙大且均匀,菌丝舒展充分无断裂(如图1E2),组织结构保持完整,无结块现象。外观图片(如图1E1)显示样品无皱缩变形,较好地保持干燥前形状,色泽洁白。

综上,膨化效果好,形成的孔隙大而均匀的,分别为:真空冷冻干燥>热风干燥>热风-微波真空联合干燥>间歇微波真空干燥>微波真空干燥。真空冷冻干燥、热风-微波真空联合干燥、间歇微波真空干燥组织结构保持完整,菌丝断裂少,微波真空干燥干燥时间短,但水分在短时间内蒸发,导致表面菌丝结块、焦化、断裂,结构破坏较大,外形收缩明显。热风干燥水分靠湿度差从内向外迁徙蒸发,时间长,菌丝断裂严重,结构塌陷现象严重。

2.2 不同干燥方法对杏鲍菇收缩率和复水比的影响

由1.3.2收缩率计算公式可知,干制品 V_d 越小,收缩率 S 越大,收缩越厉害。收缩率比较,间歇微波真空干燥>微波真空干燥>热风干燥>热风-微波真空联合干燥>真空冷冻干燥。间歇微波真空干燥收缩最明显,其次是微波真空干燥,两者差异性不显著($P>0.05$),真空冷冻干燥收缩率最小,收缩显著优于其他四组($P<0.0001$)。

不同干燥方法处理的杏鲍菇的复水比依次是真空冷冻干燥>热风-微波真空联合干燥>间歇微波真空干燥>热风干燥>微波真空干燥。真空冷冻干燥复水比最大,与其他四组差异极显著($P<0.0001$)。

本实验结果中,真空冷冻干燥收缩率最小(30.2%),复水比最大(3.03),复原效果最好。但间歇微波真空干燥、微波真空干燥、热风干燥的收缩率与其复水比则不呈相关性。热风干燥样品的收缩率

(65.43%),与热风-微波真空联合干燥样品收缩率(55.43%)比较,效果差异显著($P<0.001$),但复水比(1.40)与热风-微波真空联合干燥样品(1.83)比较,效果差异极显著($P<0.0001$),显示其干燥时收缩并不严重,但复原性能较差。分析这一现象,与杏鲍菇组织结构特点及几种干燥方式的水分蒸发方式有关。杏鲍菇菌肉主要是菇柄,菇柄由菌丝缠绕成菌丝体,水分含量大^[1,25]。热风干燥水分蒸发方式是物料外部温度高,水分优先蒸发,当外部水分蒸发到一定程度,内部水分再迁徙到外部而蒸发。由于杏鲍菇菌丝体的结构特点,水分由内部向外部迁徙较顺畅,热风的水分蒸发方式也较温和,所以干制品收缩并不严重。本实验过程显示,当内部水分降至30%以下时,水分的蒸发速度变得很慢,而热能继续供予,物料温度快速升高,蒸发掉剩余水分至样品水分含量13%花费了较长加热时间,这阶段干燥对物料组织结构的破坏比较大。从热风干燥杏鲍菇样品的超显微图片可看出(图1A2),菌丝膨化效果好,舒展充分,孔隙多且大,收缩率为65.43%,收缩情况在五种干燥方法比较中属中等,如图2,但菌丝断裂多,复原较差,仅次于复原性最差的微波真空干燥。微波真空干燥原理是内外部同时加热,所以水分的蒸发是内外部同时完成迁徙蒸发^[26]。杏鲍菇组织由菌丝体缠绕而成,含水量大,微波真空干燥短时间内即完成了物料水分的蒸发,这容易在物料组织内形成局部热点高温,使菌丝结块焦化,破坏了组织结构。从微波真空干燥样品超显微图片(图1B2)可看出,菌丝结块多,断裂多,出现坍塌现象,组织结构破坏大,膨化效果一般,相比较五种干燥方法,菌丝舒展程度一般(图1B2),复原性差^[27],复水比在五种干燥方法中最低($P<0.0001$)。

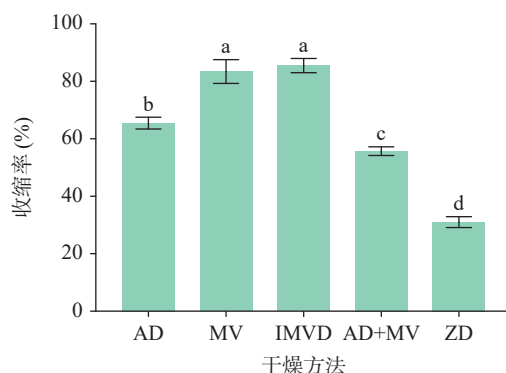


图2 不同干燥方法对杏鲍菇收缩率的影响
Fig.2 Effects of different drying methods on shrinkage of dried *Pleurotus eryngii*

注:AD为热风干燥,MV为微波真空干燥,IMVD为间歇微波真空干燥,AD+MV为热风-微波真空联合干燥,ZD为真空冷冻干燥;小写字母不同表示差异显著 $P<0.0001$;图3~图6同。

间歇微波真空干燥在物料水分降至30%时间间歇10min再继续干燥,间歇的目的就是使物料品温降下来后再继续加热干燥。由于其水分蒸发至一个阶段被动停止加热10min后再继续干燥,其膨化效

果不如微波真空干燥,这可从图 1B2、图 1C2 超显微图片看出,菌丝舒展不如微波真空干燥,产生的孔隙小于微波真空干燥,所以其收缩比微波真空干燥严重,但两者相差不显著,但间歇微波真空干燥由于间歇 10 min 停止加热降低品温后再继续干燥,菌丝结块少,断裂少,整个组织结构保持完整,这从实验结果也可得到证实,间歇微波真空干燥收缩率(85.2%),微波真空干燥收缩率(83.53%),两者收缩效果差异不显著($P>0.05$),如图 2,但间歇微波真空干燥复水比(1.72),与微波真空干燥(1.21)比较,两者复水效果差异极显著($P<0.0001$),如图 3。

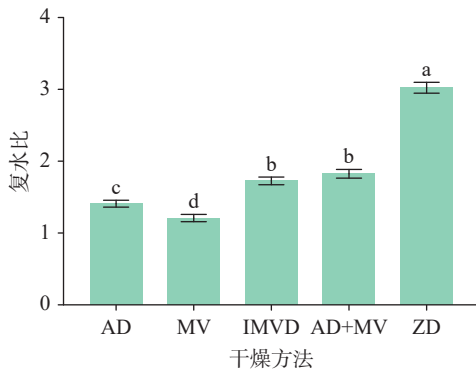


图 3 不同干燥方法对杏鲍菇复水比的影响

Fig.3 Effects of different drying methods on rehydration ratio of dried *Pleurotus eryngii*

热风-微波真空联合干燥,采用较温和的热风温度 73 °C,将杏鲍菇的水分蒸发掉 60%、再利用微波真空方式蒸发掉剩余水分至 13%。如前面提到,杏鲍菇组织结构由菌丝缠绕特点,水分含量大,因此热风干燥这段,水分蒸发温和顺畅,后边采用微波方式,将内部水分蒸发,时间短,避免了采用单一微波真空干燥所出现的由于菌丝局部高温产生结块现象,这从超显微图片(图 1D2)可看出,整个组织结构保持膨化充分且组织结构完整,无结块焦化,外形接近真空冷冻干燥(图 1D1)。其收缩小(55.43%),仅次于真空冷冻干燥(30.2%),收缩率比微波真空干燥、间歇微波真空干燥、热风干燥小,与微波真空干燥、间歇微波真空干燥比较,效果相差极显著($P<0.0001$),与热风干燥比较,效果相差显著($P<0.001$)。

真空冷冻干燥由于水分蒸发温和,干燥过程品温低,其收缩小,复原性好,与其他四组对比,实验结果相差极显著($P<0.0001$),如图 2~图 3。从其超显微图片(图 1E2)显示,菌丝膨化效果好,菌丝舒展开,孔隙大且多,组织结构保持完整^[26,28]。

综合几种干燥方法的水分蒸发原理及实验结果表明,水分蒸发过快,易使含水量高的菌菇类在干燥过程中收缩严重,收缩率大,如微波真空干燥。干燥过程品温过高,易使物料组织结构受破坏,菌丝断裂,导致复原性差,复水比低,如热风干燥和微波真空干燥。热风-微波真空联合干燥运用热风 and 微波结合,干燥过程水分蒸发顺畅温和,对结构破坏小,复原效

果好。真空冷冻干燥由于水分蒸发温和,品温低,组织结构保持完整,所以其收缩最小,复原效果最好。陈健凯等^[17]、Jayaraman 等^[29]也认为在干燥过程中果蔬细胞组织遭受物理因素破坏,失去原有完整的结构,果蔬毛细管收缩较大从而使水分进入组织的阻力增加,降低其吸水性能,故复水性下降。

2.3 不同干燥方法对杏鲍菇色泽的影响

几种不同干燥方法对样品色泽的影响如图 4,亨特白度 Wh 分别为:真空冷冻干燥(80.68)>热风-微波真空联合干燥(76.29)>热风干燥(73.6)>微波真空干燥(72.15)>间歇微波真空干燥(69.13)。真空冷冻干燥干制品色泽最好,与微波真空干燥和间歇微波真空干燥效果相差显著($P<0.05$),与热风干燥和热风-微波真空联合干燥效果差异不显著($P>0.05$)。其他四种干燥方法的样品色泽相差不显著($P>0.05$)。间歇微波真空干燥色泽最差,这可能是由于间歇降温后又继续加热干燥过程中,产生较多酶促褐变和美拉德反应,致使样品变黄,色泽较差。热风干燥时间长,产生较多酶促褐变和美拉德反应,样品产生轻微焦化现象^[30-32](如图 1A1)。微波真空干燥由于水分集中蒸发导致局部品温高,产生部分结块,边缘轻微焦化,洁白度降低。热风-微波真空联合干燥结合热风 and 微波真空,缩短干燥时间,避免品温过高,样品色泽接近真空冷冻干燥($P>0.05$)。真空冷冻干燥在真空且低温环境下进行干燥,酶促褐变和美拉德反应条件大大降低,亦无焦化现象产生,干制品色泽洁白。陈健凯等^[17]、Somkiat 等^[33]研究结果也提出,干燥过程的温度和干燥时间是影响物料色差的主要因素,干燥温度越高或干燥时间越长,其褐变越大,色差变化越大。

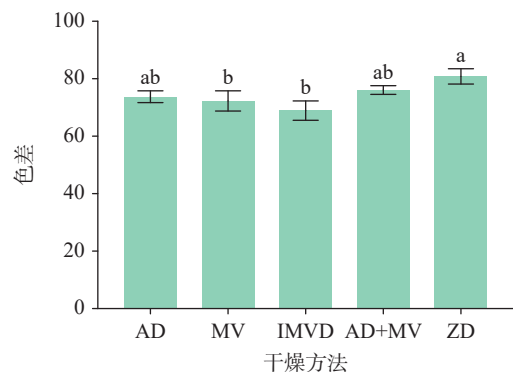


图 4 不同干燥方法对杏鲍菇色差的影响

Fig.4 Effects of different drying methods on color variation of dried *Pleurotus eryngii*

2.4 不同干燥方法对杏鲍菇氨基酸含量和多糖含量的影响

如图 5,干燥后杏鲍菇氨基酸的含量由高到低分别为:热风-微波真空联合干燥(560.94 mg/100 g)>热风干燥(380.17 mg/100 g)>微波真空干燥(366.87 mg/100 g)>真空冷冻干燥(321.51 mg/100 g)>间歇微波真空干燥(311.03 mg/100 g)。热风-微波真空联合干

燥方法制得的干制品氨基酸含量最高,与其它四种干燥方法对比相差极显著($P < 0.0001$),而真空冷冻干燥和间歇微波真空干燥方法制得的干制品氨基酸含量均较低,两者间效果相差不显著($P > 0.05$),与热风-微波真空联合干燥、热风干燥、微波真空干燥相差显著($P < 0.01$)。分析其原因,热风-微波真空联合干燥方法干燥杏鲍菇,干燥过程品温合适,干燥过程测其品温在 50~65 °C 之间,这个温度范围有利于将蛋白质分解为氨基酸,且不至于由于品温过高使蛋白质、氨基酸变性。真空冷冻干燥,干燥过程中品温较低,不利于蛋白质转化为氨基酸,故氨基酸含量低。间歇微波真空干燥在干燥过程中,间歇过程的降温和升温,发生较多的美拉德反应,使氨基酸含量降低^[34]。

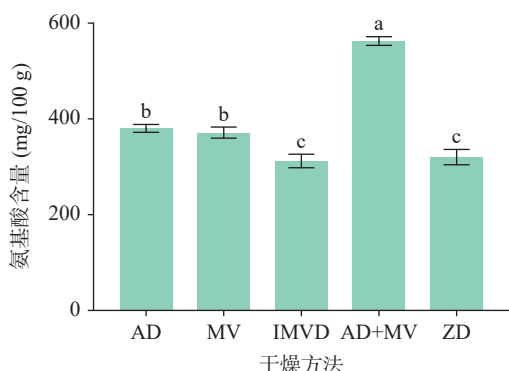


图 5 不同干燥方法对杏鲍菇氨基酸含量的影响
Fig.5 Effects of different drying methods on amino acid of dried *Pleurotus eryngii*

几种干燥方法制得的干制品粗多糖含量如图 6。真空冷冻干燥制得的干制品多糖含量最高,为 13%,比其它四种干燥方法的样品多糖含量相差极显著($P < 0.0001$)。热风-微波真空联合干燥制得的干制品多糖含量为 11.8%,与间歇微波真空干燥、微波真空干燥、热风干燥相差极显著($P < 0.0001$)。其他几种干燥方法制得的干制品多糖含量,分别为间歇微波真空干燥(8.1%)>微波真空干燥(6%)($P < 0.0001$),微波真空干燥(6%)>热风干燥(5.4%)($P < 0.05$)。实验结果显示,热风干燥方法对食用菌多糖破坏较大,分析其原因是热风干燥(70 °C)时间长,干燥至 13% 含水率经历较长时间,对多糖破坏比较大,这样的干燥条件促成更多的美拉德反应和焦糖化现象,使多糖含量降低,与其他四组比较相差显著($P < 0.01$)。微波真空干燥虽然真空环境降低了酶促褐变反应,但水分急速集中蒸发造成品温高,使得美拉德反应增加,造成多糖含量减少。间歇微波真空干燥样品多糖含量高于微波真空干燥($P < 0.0001$),而氨基酸含量低于微波真空干燥($P < 0.01$),分析其原因,可能是由于干燥过程的品温造成,微波真空干燥过程造成短时间品温过高,促成更多的美拉德反应和焦糖化现象,同时多糖结构受破坏而降低含量,这与张海伟等^[19]在研究干燥方式对香菇品质影响的结果一致,他认为干燥温度高且时间过长,导致物料呼吸强度会短时增加,消耗

糖,同时物料内的还原糖与氨基酸类物质发生美拉德反应,从而降低多糖类和氨基酸含量。同时一定的高温也使得部分蛋白质分解成氨基酸,使微波真空干燥氨基酸含量高于间歇微波真空干燥。

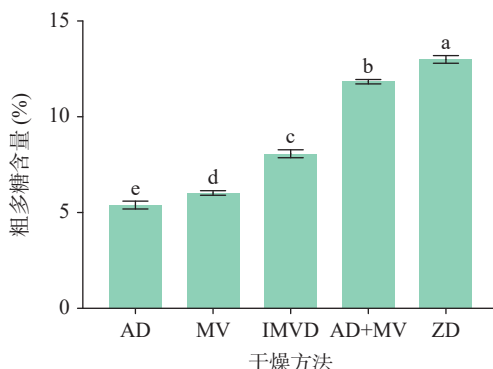


图 6 不同干燥方法对杏鲍菇粗多糖含量的影响
Fig.6 Effects of different drying methods on polysaccharide of dried *Pleurotus eryngii*

2.5 不同干燥方法对杏鲍菇干制品感官品质的影响

如图 7,真空冷冻干燥干制品在色泽、形状方面都是最佳的,但在气味和口感上较差。热风-微波真空联合干燥在气味和口感均较佳,色泽、形状方面接近真空冷冻干燥。微波真空干燥干燥时间短,效率高,但对于含水量高的食用菌来讲,会产生较大的收缩,当物料量大、堆积干燥时易产生水汽堆积使局部物料产生高温,导致焦化,色泽差,而这点采用间歇微波真空干燥,可以克服干燥时物料量大导致物料品温高产生焦化结块。热风干燥感官品质评分最低,主要是形状变形较厉害、部分焦化现象(如图 1A1),营养破坏大,这与蒋齐翻等^[35]利用微波-热风、热风-微波、热风、自然阴干对杜仲鲜叶进行干燥的感官评价结果一样,热风干燥最差,其色泽及形状发生严重改变,品相较差。采用热风-微波真空联合干燥杏鲍菇,品质优于其它几种干燥方法,文献 [36-38] 在热风与

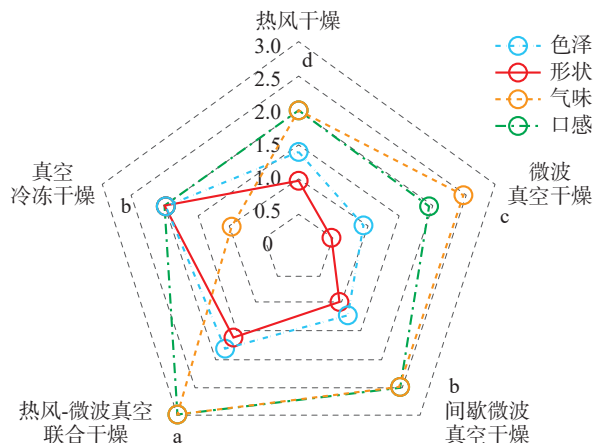


图 7 不同干燥方法对杏鲍菇干制品的感官品质影响
Fig.7 Effects of different drying methods on sensory quality of dried *Pleurotus eryngii*

注:小写字母 a、b、c、d 按感官质量评分从高到低顺序标号,且字母不同表示差异显著($P < 0.01$);表 2 同。

微波联合干燥应用中也有类似结果。综合评分,如表 2,热风-微波真空联合干燥感官品质最佳,与综合评分第二的间歇微波真空干燥和真空冷冻干燥感官品质比较,评分结果相差显著($P<0.01$),微波真空干燥感官品质综合评分比前三种干燥方法差,结果相差显著($P<0.01$),热风干燥(4.4 分)感官品质最差,与其它四种干燥方法比较,结果相差显著($P<0.01$)。

表 2 杏鲍菇干制品的感官质量评分结果
Table 2 Sensory quality scores of dried *Pleurotus eryngii*

干燥方法	色泽	形状	气味	口感	综合分数
热风干燥	1.4±0.01	1±0.01	2±0.06	2±0.06	4.4 ^d
微波真空干燥	1±0.01	0.5±0.03	2.5±0.07	2±0.09	6 ^c
间歇微波真空干燥	1.2±0.02	1±0.04	2.5±0.05	2.5±0.08	7.2 ^b
热风-微波真空联合干燥	1.8±0.01	1.6±0.02	3±0.04	3±0.05	9.4 ^a
真空冷冻干燥	2±0.01	2±0.01	1±0.03	2±0.07	7 ^b

3 结论

真空冷冻干燥干制品组织结构完整性保持最好,其次是热风-微波真空联合干燥,微波真空干燥与热风干燥干制品结构破坏较大,菌丝断裂,出现部分结构塌陷。真空冷冻干燥干制品收缩最小、复原最好,其次是热风-微波真空联合干燥,微波真空干燥收缩率大,复水比最小。真空冷冻干燥干制品色泽最好,其次是热风-微波真空联合干燥。氨基酸含量最高的是热风-微波真空联合干燥(560.94 mg/100 g),其次是热风干燥(380.17 mg/100 g);多糖含量最高的是真空冷冻干燥(13%),其次是热风-微波真空联合干燥(11.8%)。间歇微波真空干燥克服了微波真空干燥短时间快速水分蒸发导致的品温过高,其干制品结构完整性优于微波真空干燥,复水比(1.72)高于微波真空干燥(1.21)、多糖含量(8.1%)高于微波真空干燥(6%),两者收缩率差异不显著,氨基酸含量(311.03 mg/100 g)小于微波真空干燥(366.87 mg/100 g)。感官评价最佳的是热风-微波真空联合干燥。综合外观、营养品质、感官评价,热风-微波真空联合干燥是最适合于杏鲍菇等一类菌丝体构成组织结构、含水量大的物料的一种加工方法。

参考文献

- [1] 王路朋,刘凌云,姚澜,等.人工疏蕾对杏鲍菇产量及品质的影响[J].微生物学通报,2022,49(10):4186-4193. [WANG Lupeng, LIU Lingyun, YAO Lan, et al. Effect of artificial bud thinning on yield and quality of *Pleurotus eryngii*[J]. Microbiology China, 2022, 49(10): 4186-4193.]
- [2] KUMAR K, MEHRA R, GUINÉ R P F, et al. Edible mushrooms: A comprehensive review on bioactive compounds with health benefits and processing aspects[J]. Foods, 2021, 10(12): 2996.
- [3] 杨华,喻歆茹,钱德康,等.超高压处理对鲜杏鲍菇品质的影响[J].现代食品科技,2014,30(12):164-169. [YANG Hua, YUN Xinru, QIAN Dekang, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on quality of fresh *Pleurotus eryngii*[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(12): 164-169.]
- [4] 张晴丹.科技促食用菌加工异军突起[N].中国科学报,2018-

10-17(007). [ZHANG Qingdan. The processing of edible fungi by science and technology is suddenly emerging[N]. Chinese Journal of Science, 2018-10-17 (007).]

[5] 孟令帅,王瑞,郑婷婷,等.不同干燥方法对红托竹荪感官品质的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(7):249-255. [MENG Lingshuai, WANG Rui, ZHENG Tingting, et al. Effects of different drying methods on sensory quality of *Dictyophora rubrovalvata*[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(7): 249-255.]

[6] 马琦.不同干燥方法和熟化温度对杏鲍菇风味成分的影响研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019. [MA Qi. Effects of different drying methods and curing temperature on the flavor composition of *Pleurotus eryngii*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.]

[7] 郭婷,白向丽,陈益能,等.干燥方式对大果山楂粉干燥速率及品质的影响[J].食品与机械,2019,35(10):122-125,188. [GUO Ting, BAI Xiangli, CHEN Yineng, et al. Effect of drying method on drying rate and quality of large fruit hawthorn powder[J]. Food and Machinery, 2019, 35(10): 122-125, 188.]

[8] YAO L Y, FAN L P, DUAN Z H. Effect of different pretreatments followed by hot-air and far-infrared drying on the bioactive compounds, physicochemical property and microstructure of mango slices[J]. Food Chemistry, 2020, 305: 125477.

[9] GÓMEZ-NARVÁEZ F, PEREZ-MARTINEZ L, CONTRERAS-CALDERON J. Usefulness of some Maillard reaction indicators for monitoring the heat damage of whey powder under conditions applicable to spray drying[J]. International Dairy Journal, 2019, 99: 104553.

[10] 刘含龙,王金庆,杨帆,等.不同干燥方式对草菇切片品质的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(6):160-168. [LIU Hanlong, WAN Jinqing, YANG Fan, et al. The effect of different drying methods on the slice quality of *Volvariella volvacea*[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(6): 160-168.]

[11] 唐秋实,刘学铭,池建伟,等.不同干燥工艺对杏鲍菇品质和挥发性风味成分的影响[J].食品科学,2016,37(4):25-30. [TANG Qiushi, LIU Xueming, CHI Jianwei, et al. Effects of different drying methods on quality and volatile components of *Pleurotus eryngii*[J]. Food Science, 2016, 37(4): 25-30.]

[12] 张苗青,程菲儿,常明昌,等.不同干燥方法对非硫护色后杏鲍菇干制品品质的影响[J].现代食品科技,2017,12(25):162-169. [ZHANG Miaoqing, CHENG Feier, CHANG Mingchang, et al. Effects of different drying methods on the quality of *Pleurotus eryngii* dried product after non-sulfite color protection[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 12(25): 162-169.]

[13] 刘鑫焯,李蕴澍,马琦,等.不同干燥方式对杏鲍菇滋味成分的影响研究[J].食品研究与开发,2020,41(16):8-13. [LIU Xinye, LI Yunshu, MA Qi, et al. Effect of different drying treatments on the non-volatile flavor components in *Pleurotus eryngii* [J]. Food Research and Development, 2020, 41(16): 8-13.]

[14] 陈君琛,杨艺龙,翁敏韵,等.即食杏鲍菇热风-真空联合干燥工艺优化[J].农业工程学报,2014,30(14):331-338. [CHEN Junchen, YANG Yilong, WENG Minjie, et al. Optimization of combined hot-air and vacuum drying technology for instant *Pleurotus eryngii*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 331-338.]

[15] 陈健凯,林河通,李辉,等.杏鲍菇的热风干燥特性与动力学模型[J].现代食品科技,2013,29(11):2692-2699,2579. [CHEN Jiankai, LIN Hetong, LI Hui, et al. Hot-air drying characteristics and kinetics model of *Pleurotus eryngii*[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(11): 2692-2699, 2579.]

- [16] 陈健凯, 林河通, 林艺芬, 等. 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 277-284. [CHEN Jiankai, LIN Hetong, LIN Yifen, et al. Optimized technology of *Pleurotus eryngii* by icrowave-vacuum drying based on quality and energy consumption[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(3): 277-284.]
- [17] 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): 139-148. [CHEN Jiankai, LIN Hetong, LI hui, et al. Studies on optimized parameters of combined hot-air and microwave vacuum drying for *Pleurotus eryngii*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(9): 139-148.]
- [18] 许洋, 徐茂, 蒋和体. 不同干燥方法对香菇片品质及微观结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 189-197. [XU Yang, XU Mao, JIANG Heti. Effects of different drying methods on the quality and microstructure of shiitake slices[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(14): 189-197.]
- [19] 张海伟, 鲁加惠, 张雨露, 等. 干燥方式对香菇品质特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 150-156. [ZHANG Haiwei, LU Jiahui, ZHANG Yulu, et al. Effects of drying methods on the quality characteristics and microstructure of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*)[J]. Food Science, 2020, 41(11): 150-156.]
- [20] TANER B, FILIZ I, SEDA E, et al. Effect of microwave and inf rared drying on the quality of carrot and garlic[J]. European Food Research Technology, 2006, 218: 68-73.
- [21] 王绍青. 番木瓜热风与微波真空联合干燥工艺研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012. [WANG Shaoqing. Study on combined drying technology of papaya with hot air and microwave vacuum [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.]
- [22] 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. [CHAO Jiankang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yumei. Postharvest physiological and biochemical experiments guidance [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.]
- [23] ZHANG J, YAGOUB A E G A, SUN Y, et al. Role of thermal and non-thermal drying techniques on drying kinetics and the physicochemical properties of shiitake mushroom[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(1): 214-222.
- [24] XU J, WANG D, LEI Y, et al. Effects of combined ultrasonic and microwave vacuum drying on drying characteristics and physicochemical properties of *Tremella fuciformis*[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 84: 105963.
- [25] 常晓宁, 郭纹余, 郑素月, 等. 杏鲍菇软腐病研究进展[J]. 中国食用菌, 2021, 40(8): 5-8. [CHANG Xiaoning, GUO Wenyu, ZHENG Suyue, et al. Research progress on soft rot disease of *Pleurotus eryngii*[J]. Edible Fungi of China, 2021, 40(8): 5-8.]
- [26] 张 魁, 徐艳阳, 孙金才. 国内外果蔬联合干燥技术的研究进展[J]. 无锡轻工大学学报, 2003, 22(6): 103-106. [ZHANG Min, XU Yanyang, SUN Jincai. Research developments of combination drying technology for fruits and vegetables at home and abroad[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2003, 22(6): 103-106.]
- [27] 杜茜茜, 易建勇, 毕金峰, 等. 果胶对真空冷冻干燥重组苹果块质构和吸湿特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 54-60. [DU Qianqian, YI Jianyong, BI Jinfeng, et al. Effect of pectin on the texture and hygroscopic properties of freeze-dried reconstituted apple cubes[J]. Food Science, 2021, 42(24): 54-60.]
- [28] 赵圆圆, 易建勇, 毕金峰, 等. 干燥方式对复水香菇感官、质构及营养品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 101-108. [ZHAO Yuanyuan, YI Jianyong, BI Jinfeng, et al. Sensory, texture and nutritional quality of dried shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) as affected by different drying methods[J]. Food Science, 2019, 40(3): 101-108.]
- [29] JAYARAMAN K S, DAS GUPTA D K, BABU RAO N. Effect of pretreatment with salt and sucrose on the quality and stability of dehydrated cauli flower[J]. International Journal of Food Science & Technology, 1990, 25(1): 47-60.
- [30] 吕莹, 陈芹芹, 李璇, 等. 干燥对果蔬加工色泽影响的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 368-377. [LÜ Ying, CHEN Qinqin, LI Xuan, et al. Progress in the effects of drying on color of processed fruits and vegetables[J]. Food Science, 2023, 44(13): 368-377.]
- [31] BAI Junwen, PENG Zekang, WU Xuecen, et al. Color prediction and quality analysis of *Ginkgo biloba* seeds under medium and short wave infrared drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(12): 269-274, 280.
- [32] FRIED R, OPREA L, FLECK K, et al. Biogenic colourants in the textile industry-A promising and sustainable alternative to synthetic dyes[J]. Green Chemistry. doi: 10.1039/d1gc02968a.
- [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]. Drying Technology, 2004, 22(9): 2095-2118.
- [34] 张 魁. 生鲜食品保质干燥新技术理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. [ZHANG Min. New drying technology's theory and practice of fresh foods [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.]
- [35] 蒋齐翻, 张 凯, 周明干, 等. 杜仲叶微波热风组合干燥工艺研究[J]. 真空电子技术, 2020, 03(3): 77-81. [JIAN Qifan, ZHANG Kai, ZHOU Minggan, et al. Study on microwave and hot-air combination drying process of *Eucommia ulmoides* leaves[J]. Vacuum Electronics, 2020, 03(3): 77-81.]
- [36] SHI L Z, KIM E Y, YANG L Y, 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 Quality and Safety, 2021, 5: 1-7.
- [37] TALENS C, CASTRO-GIRALDEZ M, FITO P J. Effect of microwave power coupled with hot air drying on sorption isotherms and microstructure of orange peel[J]. Food & Bioprocess Technology, 2018, 11(4): 723-734.
- [38] DAS I, ARORA A. Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 223(APR.): 208-219.