

食用菌干燥技术及其干制品的储藏研究进展

倪旭东, 周化斌, 杨海龙*

(温州大学生命与环境科学学院, 温州 325035)

摘要: 食用菌营养丰富, 味道鲜美, 富含多种生物活性物质, 但是新鲜的食用菌代谢旺盛、含水量高, 不耐贮藏, 因此通常需要对食用菌进行干燥处理, 以降低其生理活性及水分活度, 延长食用菌的货架期。本研究综述了食用菌的干燥技术及其干制品储藏的研究现状, 并对未来的发展趋势进行了展望, 以为食用菌干制技术的科技创新和产业发展提供参考。

关键词: 食用菌; 干燥技术; 干制品; 储藏

Research progress on the drying technology of edible fungus and the storage of its dried products

NI Xu-Dong, ZHOU Hua-Bin, YANG Hai-Long*

(School of Life & Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

ABSTRACT: Edible fungus are rich in nutrition, has delicious taste and various biologically active substances. However, the metabolism of fresh edible fungus is vigorous, the moisture content is high, so it is hard for storage. Therefore, it is usually necessary to dry the edible fungus to reduce their physiological activity and moisture activity, to extend the shelf life. This paper summarized the research status of edible mushrooms drying technology and the storage of dried products, and prospected the future development trend, in order to provide a reference for scientific and technological innovation and industrial development of edible fungus drying technology.

KEY WORDS: edible fungus; drying technology; dried products; storage

1 引言

食用菌(edible fungus)是一类以担子菌为主的, 子实体硕大、可食用的天然营养体, 富含碳水化合物, 蛋白质和多种氨基酸, 具有丰富的营养和药用价值^[1]。常见的食用菌种类有: 双孢菇 (*Agaricus bisporus*)、金针菇 (*Flammulina velutipes*)、香菇 (*Lentinus edodes*)、秀珍菇 (*Pleurotus geesteranus*)、杏鲍菇 (*Pleurotu seryngii*)等, 菇体

中的可溶性糖、多元醇、游离氨基酸、5'-核苷酸和有机酸等成分赋予食用菌丰富的滋味^[2-4]。同时, 食用菌存在大量的多糖、多酚、萜类、甾体类化合物以及维生素、膳食纤维等生物活性物质, 具有提高人体免疫、抗肿瘤、抗氧化、抗炎、抗疲劳、抗衰老、抑菌、降血糖、护肝等多种药理作用^[5-8]。

食用菌深受人们的喜爱, 我国每年平均每人食用菌的消耗量可达 20~24 kg^[9]。但新鲜食用菌含水量高, 仅含

基金项目: 浙江省科技计划项目(2018C02005)

Fund: Supported by the Science and Technology Plan of Zhejiang (2018C02005)

*通讯作者: 杨海龙, 教授, 主要研究方向为微生物技术研究。E-mail: 00121049@wzu.edu.cn

*Corresponding author: YANG Hai-Long, Professor, College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China. E-mail: 00121049@wzu.edu.cn

有约 10%的干物质^[10],而且代谢旺盛,在严格控制周围环境的温度和湿度情况下,储存期也只能达到 3 周左右^[11]。食用菌采后一段时间内仍会发生呼吸作用、蒸腾作用等,相应物质的含量也会发生变化,降低食用菌新鲜度及食用品质。因此食用菌采后需要进行及时处理,以延长食用菌保存期限,目前常见的采后处理有保持鲜菇特性的保鲜处理,制成干品的干燥处理,以及增加活性成分的发酵处理等。其中干燥处理可以有效延长食用菌的货架期,并且可防止腐败微生物的生长,减慢酶的活性以及许多水分介导的反应。此外,一直以来,人们认为干燥食用菌具有较高的营养价值。例如,干香菇比新鲜蘑菇具有更多的某些营养素,如维生素 D₂。干香菇还具有独特的鲜味,这种味道源于干燥过程中蛋白质分解为氨基酸以及一些醇类、酯类、醛类物质的形成。干燥技术在食用菌的储存中起着至关重要的作用,可显著延长食用菌货架期,提高经济效益。食用菌的干燥方法主要包括热风干燥、真空干燥、微波干燥、微波真空干燥和太阳能干燥等^[12]。在干燥后,其成品相比于鲜品更易储藏,但其储藏期限同样受环境因素及自身包装因素影响,并且出厂的食用菌干制品并不会立刻被消费掉,而需要在运输、仓库储藏等环节上经历不同的时间,因此温度湿度等环境因素与包装工艺也决定了其储藏期限的长短。本研究综述了食用菌的干燥技术及其干制品储藏的研究现状,并对未来的发展趋势进行了展望,以期对食用菌干制技术的科技创新和产业发展提供参考。

2 食用菌干燥技术

2.1 热风干燥技术

热风干燥是利用空气作为介质,使用风机或加热器将热空气不断吹入干燥室内,达到对干燥室内的食品物料进行干燥的方式^[13]。热风干燥的原理是基于热量传递系统,将食品表面的温度提高,随后热量在物体内外进行循环,形成温度梯度,最终使物料中的水分被蒸发^[14]。热风干燥技术成本低、干燥效率高,适合用于大批量食用菌的干燥,在工业上应用十分广泛^[15]。

吴方宁等^[16]使用热风干燥和真空干燥 2 种方式处理白玉菇,结果显示在热风环境下干燥的白玉菇可溶性糖、呈味氨基酸以及有机酸含量低于真空干燥处理的组分;而一些不容易受到温度影响的成分如呈味核苷酸 5'-AMP、5'-GMP 和 5'-IMP 等物质含量高于真空干燥组分。因此热风干燥在处理挥发性物质含量较少的食品具有更加明显的优势;Guo 等^[17]采用 6 种不同的热风干燥方法处理香菇,发现不均匀的间歇干燥取得较好的综合效果,其干制品具有较高的活性成分与最高的复水率,进一步使用 9 种经典

数学模型获得水分数据,发现可以通过 Midili-kucuk 模型来描述干燥过程;王娅等^[18]对比 3 种不同的干燥方式对香菇理化性质及成分的影响,结果发现使用热风干燥技术处理的香菇干品收缩率、复水比及硬度均低于真空干燥及太阳能干燥处理。热风干燥可以提高香菇的总氨基酸含量,同时热风干燥相较于冷冻干燥与膨化干燥这 2 种干燥方式具有能耗低、干燥时间短的优势,因此在现代能源紧缺的环境下,可以对热风干燥进行改良,以适应更多食品的加工处理^[19];麦馨允等^[20]采用单因素试验确定热风干燥白玉菇最佳参数,结果表明在热风温度为 60 °C、切片厚度为 2 mm,装载量为 15 g/dm²的条件下,白玉菇干品品质最佳,复水性好。

2.2 真空冷冻干燥

真空冷冻技术最早于 20 世纪 60 年代应用于食品行业^[21]。真空冷冻干燥对食材成分破坏较小,是食品工业中用于保持或改善食品质量的一种保存方法。在干燥过程中,物料的温度降低到其凝固点以下,并且通过在低于水的三相点的压力下将冰升华成水蒸气而除去水。低温和低压的结合可以很好地保留最终干燥产品的形状、颜色和风味^[22]。真空冷冻干燥技术是目前最先进的食品保鲜技术之一,由于具有出色的保持物料结构和保存食物中生物活性成分和调味成分的能力,因此可以生产出较高质量的干燥产品^[23]。但是,真空干燥设备成本高、能耗大,适用于附加值较高的产品^[24]。

真空冷冻干燥技术处理食用菌需要经过以下几个流程,分别是预处理、冷冻、干燥、包装。张艳荣等^[25]采用真空冷冻干燥技术加工姬松茸,发现姬松茸中的挥发性化合物在真空条件下处理与鲜姬松茸含量差距不大,说明使用真空干燥技术可以很好的保证食品的原有风味;赵丹等^[26]采用不同干燥方式处理白牛肝菌和鸡枞菌,结果表明真空冷冻干燥处理的食用菌在色泽、微观结构、复水性明显优于热风干燥与微波热风联合干燥这 2 种处理方式;李峰^[27]对比几种干燥技术对姬松茸多糖含量的影响,结果表明真空冷冻干燥获得的多糖含量显著高于空气干燥及真空干燥。

2.3 微波干燥技术

微波干燥技术的原理是利用高频微波电场使食品物料内部的水分子高速运转,分子间相互摩擦碰撞,最终使动能转化为热能,从而使食品干燥^[28]。微波干燥常与其他常规干燥方法结合使用,如微波辅助热风干燥^[29]、微波真空干燥^[30]和微波冷冻干燥^[31]。

微波干燥的优点是可以缩短干燥时间并提高产品质量,从而提高工作效率,并获得高营养和感官质量的产品

[32]。湿物料吸收的能量取决于其水分分布,这会导致其内部零件的选择性加热,从而保护低水分部分(例如物料表面)过热。此外,微波加热会引起体积加热,因此产品内部会产生蒸汽,形成内部压力梯度,从而导致水从内部流到物料表面。通过这种方式,减少了食物的收缩,可以保证食用菌完整的菌菇形态[33]。但是微波干燥的缺点在于,微波干燥器内部固有的电磁场缺乏均匀性,这会导致加热不均匀[34]。在真空下进行微波加热可提高干燥效率,同时防止或减少氧化效应,保留产品的颜色,质地和风味,与冷冻干燥产品相比,可提供质量更高的产品。Su 等[35]研究了微波热风滚轧干燥技术(microwave-hot-airflow rolling drying, MARD)对杏鲍菇的干燥特性和品质的影响,将杏鲍菇在 3 W/g 的微波功率下干燥,干燥时间为 0~12 min,发现热风和滚动床可以提高微波干燥的干燥均匀性,在干燥过程中,发现游离水转化为固定水和结合水,在最后阶段,仅少量的水留在干燥后的杏鲍菇中,说明 MARD 处理可以显著改善杏鲍菇成品的均一性。

2.4 太阳能干燥技术

太阳能干燥技术(solar drying, SD)是一种将太阳能转化为热能,进而将食品干燥的一种方法[36]。由于传统的晒干过程相对较慢,可能会对食品物料造成较大的经济损失。此外,由于虫害、酶促反应、微生物生长和霉菌毒素的产生,也会导致产品质量下降。食品行业中用于食用菌干燥的太阳能技术是一种较为成熟先进的干燥手段,从节能的角度来看,太阳能干燥机是一种节能环保的设备[37]。太阳能干燥机规避了传统干燥的一些主要缺点,它不仅可以节省能源,而且节省大量时间,占用更少的面积,提高了产品质量,使过程更有效[38]。太阳能干燥可用于整个干燥过程或用于补充人工干燥系统,从而减少所需的总燃料能量。

姚利利[39]利用太阳能干燥技术处理香菇制品,结果显示太阳能干燥速率、干燥温度及干燥量对香菇的品质特性影响最为明显,实验确定太阳能干燥最佳参数为:干燥风速 8 m/s,干燥量 8 kg,干燥温度 55 °C。太阳能干燥技术具有节能环保的优势,还可以完整的保留食用菌的营养成分。但太阳能干燥技术容易受到环境温度、湿度以及空气质量的影响,可控性较差,因此很少单独使用太阳能干燥技术处理食用菌。

2.5 联合干燥技术

干燥方式的不同会导致干制食用菌营养成分及品质特性差异性。单一的干燥技术往往无法保证食用菌的品质和营养成分的完整性,因此经常采用 2 种或 2 种以上干燥技术联合使用的方式对食用菌进行干燥。这样不仅可以提高干燥速

率,而且可以使食用菌干品品质更好,更有利于保存[40]。

孙静儒[41]采用微波-真空冷冻干燥联合技术处理平菇,结果表明制得的平菇干品复水性良好、硬度适中、菌菇形态完整、感官评分较高。并且发现采用微波-真空冷冻干燥技术联合的方法可以有效利用微波干燥对食用菌形态保持完整性的特质,经过单因素实验结果显示最佳联合工艺参数为:微波功率 300 W、真空冷冻干燥时间为 11 h,以上参数最终可以获得含有丰富的蛋白质、优质脂肪酸及多糖的平菇干品;张慧等[42]使用热风-微波联合干燥技术处理香菇,通过单因素实验确定最佳工艺参数为:热风温度 60.60 °C、微波功率为 30.00 W/g、干基转换点含水率为 4.20 g/g,在此参数干燥的香菇干品中挥发性成分、多糖物质及维生素含量高,极大地缩短了食用菌的干燥时间;Wang 等[43]评估了热风-微波干燥联合技术(intermittent microwave & hot-air drying, IM & AD)对干燥香菇营养成分的影响,结果表明在使用 IM & AD 时,香菇多糖保留率最高,产品营养价值最高,此外,在用 IM & AD 处理的干香菇中,硫代芳香族化合物的种类和数量居多。Li 等[44]研究发现 IM & AD 干燥产品中的醛和酮类物质含量适中,可以增强菌菇的鲜味,采用热风-微波干燥技术联合可以极大程度的提高香菇干制品的品质和理化性质;Giri 等[45]控制干燥系统的参数变化范围在 115~285 W 的微波功率范围,6.5~23.5 kPa 的压力范围内运行,双孢菇菌片的厚度为 6~14 mm,与不同温度(50、60 和 70 °C)下的对流空气干燥相比,微波真空干燥使干燥时间减少了 70%~90%,并且干燥后的产品具有更好的复水特性及品质特性。

Tian 等[14]评估了热风、真空、微波和微波真空干燥技术对香菇干品重要品质和挥发性化合物的影响,这 4 种干燥方法均显著($P < 0.05$)增加了干产品中总游离氨基酸的含量和硫化物的相对含量,其中微波真空干燥有助于保持味觉活性氨基酸的稳定性,并提高了营养保留和菌菇色泽,同时微波真空干燥会产生少量均匀蜂窝状网络,从而保持高的复水率,确定微波真空干燥应该是获得高质量干蘑菇的潜在方法。

2.6 干燥技术总结

根据上文所述,不同的干燥技术都有其各自的特点,对于不同种类的食用菌也因选择合适的干燥技术加以处理,否则会造成资源上的浪费。按食用意义上的分类,需求最大的是食用类,如香菇、秀珍菇、木耳等,此类食用菌可直接鲜食,但因产量巨大,需要大批量的干燥处理延长其消费期,因此工艺成熟的热风干燥及其联合干燥方式是此类食用菌的不二之选。受健康生活理念的倡导,食药兼具类受到大众的追捧,例如对消化系统疾病有显著疗效的猴

头菇, 此类食用菌则需品质优先, 可以考虑红外干燥及其联合干燥方式。而对于一些药用种类, 还需进一步细分, 做成药剂的蛹虫草等则需要用到工业发酵的菌丝体, 而非干燥处理。灵芝等切片处理做成饮片的则适合选择真空冷冻干燥处理保证子实体的完整性与美观性。提取加工成中成药的食用菌则需优先考虑不同干燥方式对其特定药理活性成分含量的影响。对于目前市场上流行的食用菌脆片等即食类休闲食品, 则较符合膨化干燥等特定干燥方式, 普适性的干燥方式无法满足其酥脆度与口感上的要求^[46]。

3 食用菌干制品储藏技术

脱水制品在储藏期间会发生各种理化反应, 如挥发性物质的逸散、颜色改变、质量下降、营养物质含量改变等。有研究表明, 许多干制品在储藏期间会发生严重的褐变现象, 这种褐变现象会导致产品的颜色变化, 影响其感官品质及营养价值^[47]。因此为了保证干制品在储藏期内的食用品质, 需要根据干制品类型的不同制定不同的储藏条件及包装工艺。

3.1 储存条件对食用菌干制品储藏的影响

储藏期干制食用菌的质量同样会受到储藏温度、储藏湿度、氧气浓度及光照等环境因素的影响, 一些理化性质和表观特性随时间会发生改变, 如菌菇的色泽、重量、表观状态等, 合适的储藏环境可以延长食用菌的货架期, 减少环境对食用菌干制品的影响。通常采用避光储藏或低温储藏方式可以较好地保持干制食用菌的营养价值和风味, 提高其货架期。

张珏等^[48]对不同保存年限绒柄牛肝菌进行理化成分分析, 结果表明随着储藏时间的延长, 该类食用菌的糖类、蛋白质、氨基酸和维生素等化合物变化较为明显; 朱丹实等^[49]对比不同温度及湿度环境下香菇干制品品质特性的变化, 结果发现在低温条件下随着储藏时间的逐渐延长, 香菇的总氨基酸含量有所升高, 而色度值则变化程度不大, 因此香菇干制品可采用低温冷藏的方式进行保藏; Slawinska 等^[50]研究了香菇在干燥保存过程中维生素 D₂ 含量及稳定性的变化, 结果表明在香菇干制品贮藏过程中, 维生素 D₂ 的含量不断升高; Kortei 等^[51]对伽马辐射后脱水平菇各种维生素及矿物质含量的研究表明, 干平菇经过 12 个月保存后几种重要维生素如 VA、VC、VD 含量明显升高, 矿物质含量变化不大; 徐晓飞等^[52]评估了在常温(25 °C)常压、常温真空及低温环境(-4 °C)几种储藏条件对于香菇品质特性的影响, 结果表明在真空及低温环境下储藏的干香菇水分含量、干物质及多糖含量变化不大, 而色度值变化较为明显; 而低温储藏对于香菇感官质量的保存

性更好, 因此采用-4 °C环境下储藏香菇干制品是一种较好的储藏方式; Jaworska 等^[53]评估了干燥后牛肝菌在 4 与 20 °C下经过 24 个月储藏后维生素和干物质含量的变化, 结果表明在储藏期内干菌菇的 VC、VE 含量没有明显变化, 可以说明储藏对菌菇营养成分的影响不大。

食用菌除了含有多种营养物质外, 还具有特殊的菌菇风味成分。风味成分是区别食用菌干品与鲜品最重要的品质属性之一, 这有助于提高食用菌的消费。Wang 等^[54]对冻干双孢蘑菇在不同储藏条件下的颜色变化和风味品质进行了分析, 几种储藏条件分别为恒定的高温高湿 HT(37 °C, 85%)、恒定的室温和湿度 RT(25 °C, 55%)、可变的环境温度和湿度 AT(12~28 °C, 50%~90%), 结果发现 HT 样品的微观结构更稀疏、更小, 而 AT 样品的孔隙更致密、更小。RT 和 AT 处理后的样品与 HT 样品相比仍保持良好的外观。RT 和 AT 是较好的保存挥发性化合物的条件。因此综合几项评估指标可以判定 RT(25 °C, 55%)是较好的贮藏条件, 可以很好保持干蘑菇在储藏过程中的理化性质和感官特性。

3.2 包装工艺对食用菌干制品储藏的影响

干制品的主要包装方式包括常压包装、真空包装和改性空气包装。在常压包装中, 食物周围模拟空气的组成比例, 包括 78%的氮气(N₂), 21%的氧气(O₂), 以及少量的二氧化碳(CO₂), 水蒸气和其他气体^[55]。真空包装是除去食物周围的空气, 使用低透气性的薄膜来进行包装。通过这种方法, 可以防止由于接触 O₂ 而导致的食物变质^[56]。目前食用菌干品常用的包装方式为食品级塑料薄膜包装, 防潮隔湿。赵理^[57]考证了包装对袋内湿度的影响, 由于单层食品包装袋与多层共挤膜、袋的透湿系数的不同, 银耳干品的水分含量经过一段时间的储藏后也会产生差异。而新型的低密度聚乙烯薄膜、纳米复合材料等包装与氩气气调包装等多用于食用菌鲜品的保藏, 还未见有用于干品储藏的研究, 可以进一步探究。

4 展望

中国是食用菌消费大国, 食用菌的干燥工艺是决定食用菌品质的关键因素之一, 尽管食用菌干燥工艺很多, 但如何高效、低成本地保持干制食用菌的品质仍然需要不断进行改进, 同时对食用菌干制品储藏技术的研究也需加强。

①不断更新和改进联合干燥技术。食用菌品种繁多, 性质不一, 不同的食用菌种类往往所含的营养成分和活性成分有很大差异。因此采用联合干燥方式对采后食用菌进行处理, 可以发挥不同干燥技术的优势, 提高干燥速率,

保证食用菌的品质色泽及营养价值。

②基于食用菌不同部位进行深入研究。食用菌的菌盖与菌柄通常含有不同的营养成分, 菌盖水分含量较高, 菌柄水分含量低, 因此在干燥过程中菌柄经常会出现过度失水的情况。因此, 应进一步优化干燥工艺, 提高食用菌不同部位的干燥品质, 着重研究食用菌干燥过程中的水分损失率及复水率, 为食用菌市场提供理论指导。

③借鉴食品储藏期研究思路。目前关于食用菌干制品的储藏研究还非常有限, 但食品类已经建立了一套完整的储藏体系, 可以借鉴其研究思路, 对其各类环境因素对食用菌干制品的影响进行有体系的研究, 共同推动食用菌干制品的发展, 提供给消费者品质更佳的食用菌干品。

④提高食用菌干品储藏包装工艺技术。食用菌干燥后仍然需要进行严格的储藏和包装工艺, 才可以延长食用菌货架期和保质期。国内外已有对农产品高阻隔、吸氧、吸湿包装技术的相关研究以及开发出不少针对食品的智能包装材料, 因此未来可以参考相关研究并将这些创新型包装技术应用于食用菌干品的储藏。

5 结论与讨论

本研究食用菌的干燥技术及其干制品储藏的研究现状进行了综述。针对不同需求可以选择特定的干燥方式进行处理。例如想要获得接近鲜菇表观的可以选择真空干燥或者真空冷冻干燥; 想要大批量处理可以选择热风干燥及其联合干燥以在保证品质的前提下尽可能节约能耗; 想要短时间获得干品则需要选择微波干燥及其联合干燥方式; 膨化干燥等新型干燥方式则适合某些食用菌脆片的生产; 联合干燥则是许多高品质生产的基础。每一种干燥方式都有其存在不可替代的意义, 即使是传统的自然晒干如今也以纯天然加工而受到一些消费者的喜爱。

随着食用菌干品的需求逐年增加, 干品的储藏也将成为下一个研究热点, 相较于环境因素的影响研究, 包装工艺对干品的影响研究少之又少, 因此可以借鉴食用菌鲜品的包装工艺, 在不大幅增加包装费用的前提下, 使用不同的包装方式与包装材料, 例如减压包装与铝箔材料、纳米复合材料等进行相关研究, 以提高食用菌干制品的保鲜效果。

参考文献

- [1] Beluhan S, Ranogajec A. Chemical composition and non-volatile components of Croatian wild edible mushrooms [J]. Food Chem, 2011, 124(3): 1076–1082.
- [2] Kala P. A review of chemical composition and nutritional value of wild-growing and cultivated mushrooms [J]. J Sci Food Agric, 2013, 93(2): 209–218.
- [3] Kim MY, Chung IM, Lee SJ, et al. Comparison of free amino acid, carbohydrates concentrations in Korean edible and medicinal mushrooms [J]. Food Chem, 2009, 113(2): 386–393.
- [4] Reis FS, Barros L, Martins A, et al. Chemical composition and nutritional value of the most widely appreciated cultivated mushrooms: An inter-species comparative study [J]. Food Chem Toxicol, 2012, 50(2): 190–197.
- [5] Taofiq O, Martins A, Barreiro MF, et al. Anti-inflammatory potential of mushroom extracts and isolated metabolites [J]. Trends Food Sci Technol, 2016, 50(4): 193–210.
- [6] Zeng D, Zhu SM. Purification, characterization, antioxidant and anticancer activities of novel polysaccharides extracted from Bachu mushroom [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 107(2): 1086–1092.
- [7] Xu XF, Yan HD, Tang J, et al. Polysaccharides in *Lentinus edodes*: Isolation, structure, immunomodulating activity and future prospective [J]. Crit Rev Food Sci, 2014, 54(4):474–487.
- [8] Zhang Y, Li HT, Hu T, et al. Metabonomic profiling in study hepatoprotective effect of polysaccharides from *Flammulina velutipes* carbon tetrachloride-induced acute liver injury rats using GC-MS [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 110(6): 285–293.
- [9] Zhang D, Frankowska A, Jarzyńska G, et al. Metals of king bolete (*Boletus edulis*) collected at the same site over two years [J]. Afr J Agric Res, 2010, 22(5): 3050–3055.
- [10] Wang XM, Zhang J, Wu LH, et al. A mini-review of chemical composition and nutritional value of edible wild-grown mushroom from China [J]. Food Chem, 2014, 151(10): 279–285.
- [11] Fernandes A, Barros L, Barreira JCM, et al. Effects of different processing technologies on chemical and antioxidant parameters of *Macrolepiota procera* wild mushroom [J]. LWT Food Sci Technol, 2013, 54(2): 493–499.
- [12] Garcia-Segovia P, Andrés-Bello A, Martínez-Monzó J. Rehydration of air-dried shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps: Comparison of conventional and vacuum water immersion processes [J]. LWT Food Sci Technol, 2011, 44(2): 480–488.
- [13] 于蒙杰, 张学军, 牟国良, 等. 我国热风干燥技术的应用研究进展[J]. 农业科技与装备, 2013, 230(8): 14–16.
- Yu MJ, Zhang XJ, Mou GL, et al. Research progress on the application of hot air drying technology in China [J]. Agric Sci Technol Equip, 2013,

- 230(8): 14–16.
- [14] Tian YT, Zhao YT, Huang JJ, *et al.* Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms [J]. *Food Chem*, 2015, 197(8): 714–722.
- [15] Omari A, Behroozi-Khazaei N, Sharifian F. Drying kinetic and artificial neural network modeling of mushroom drying process in microwave-hot air dryer [J]. *J Food Process Eng*, 2018, 41(7): 1–10.
- [16] 吴方宁, 裴斐, 李丹, 等. 两种干燥方式对白玉蕈非挥发性风味物质的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(17): 62–66, 70.
- Wu FN, Pei F, Li D, *et al.* The influence of two drying methods on non-volatile taste components of white *Hypsizygus marmoreus* [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(17): 62–66, 70.
- [17] Guo XH, Xia CY, Tan YR, *et al.* Mathematical modeling and effect of various hot-air drying on mushroom (*Lentinu sedodes*) [J]. *J Integr Agr*, 2014, 13(1): 207–216.
- [18] 王妮, 姚利利, 王颖, 等. 不同干燥方式对香菇品质影响的研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(19): 38–41, 58.
- Wang Y, Yao LL, Wang J, *et al.* Study on the effect of different drying methods on the quality of dried mushrooms [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(19): 38–41, 58.
- [19] 郭婷, 黎文清, 叶姗丹, 等. 热风干燥温度对香芋产品品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(3): 5–8.
- Guo T, Li WQ, Ye SD, *et al.* Effect of temperature on the product quality of hot air drying for taro [J]. *Food Res Dev*, 2017, 38(3): 5–8.
- [20] 麦馨允, 曾维标, 吴健. 白玉菇热风干燥工艺优化及其对品质的影响[J]. *中国食用菌*, 2019, 38(7): 71–78.
- Mai XY, Zeng WB, Wu J. Optimization of hot air drying of white *Hypsizygus marmoreus* and its effect on quality [J]. *Edible Fungi China*, 2019, 38(7): 71–78.
- [21] Zhao R, Gao TH. Research progress of hot air drying technology for fruits and vegetables [J]. *Adv J Food Sci Technol*, 2016, 10(3): 160–166.
- [22] Lammerskitten A, Wiktor A, Siemer C, *et al.* The effects of pulsed electric fields on the quality parameters of freeze-dried apples [J]. *J Food Eng*, 2019, 252(13): 36–43.
- [23] Jiang H, Zhang M, Mujumdar AS, *et al.* Comparison of drying characteristic and uniformity of banana cubes dried by pulse-spouted microwave vacuum drying, freeze drying and microwave freeze drying [J]. *J Sci Food Agric*, 2014, 94(9): 1827–1834.
- [24] 徐冲, 陈杰, 陈丽媛, 等. 真空冷冻干燥技术在食用菌加工中的应用研究[J]. *微生物学杂志*, 2015, 35(6): 96–99.
- Xu C, Chen J, Chen LY, *et al.* Application of vacuum freeze-drying technology in edible fungi processing [J]. *J Microbiol*, 2015, 35(6): 96–99.
- [25] 张艳荣, 吕呈蔚, 刘通, 等. 不同干燥方式对姬松茸挥发性风味成分分析[J]. *食品科学*, 2016, 37(10): 116–121.
- Zhang YR, Lv CW, Liu T, *et al.* Effect of different drying methods on volatile flavor components in *Agaricus blazei* [J]. *Food Sci*, 2016, 37(10): 116–121.
- [26] 赵丹, 徐倩儒, 马崧松, 等. 干燥方法对白牛肝菌和鸡枞菌品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(5): 83–86, 92.
- Zhao D, Xu QR, Ma YS, *et al.* Effect of drying methods on the quality characteristics of *Boletus albus* Peck and *Termitomyces albuminosus* [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(5): 83–86, 92.
- [27] 李峰. 姬松茸多糖不同提取与干燥方法的比较研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- Li F. Physicochemical properties and biological activities of polysaccharides obtained from *Agaricus blazei* Murrill [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [28] Chandrasekaran S, Ramanathan S, Basak T. Microwave food processing: A review [J]. *Food Res Int*, 2013, 52(1): 243–261.
- [29] Monteiro RL, Carciofi BAM, Marsaioli A, *et al.* How to make a microwave vacuum dryer with turntable [J]. *J Food Eng*, 2015, 166(23): 276–284.
- [30] Li LL, Zhang M, Wang WQ. A novel low-frequency microwave assisted pulse-spouted bed freeze-drying of Chinese yam [J]. *Food Bioprod Process*, 2019, 118(6): 217–226.
- [31] Liu WC, Duan X, Ren GY, *et al.* Optimization of microwave freeze drying strategy of mushrooms (*Agaricus bisporus*) based on porosity change behavior [J]. *Dry Technol*, 2017, 35(11): 1327–1336.
- [32] Jiang H, Zhang M, Liu Y, *et al.* The energy consumption and color analysis of freeze/microwave freeze banana chips [J]. *Food Bioprod Process*, 2013, 91(4): 464–472.
- [33] Benlloch-Tinoco M, Kaulmann A, Corte-Real J, *et al.* Chlorophylls and carotenoids of kiwifruit puree are affected similarly or less by microwave than by conventional heat processing and storage [J]. *Food Chem*, 2015, 187(15): 254–262.
- [34] Porciuncula BDA, Segura LA, Laurindo JB. Processes for controlling the structure and texture of dehydrated banana [J]. *Dry Technol*, 2016, 34(2): 167–176.
- [35] Su DB, Lv WQ, Wang Y, *et al.* Drying characteristics and water dynamics during microwave hot-air flow rolling drying of *Pleurotus eryngii* [J]. *Dry*

- Technol, 2019, (8): 1048291.
- [36] Ma ZJ, Ren HS, Lin WY. A review of heating, ventilation and air conditioning technologies and innovations used in solar-powered net zero energy solar decathlon houses [J]. J Clean Prod, 2019, 240(35): 1–17.
- [37] Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S. State of the art on solar drying technology: A review [J]. Int J Renew Energ Technol, 2012, 3(2): 107–141.
- [38] Luna D, Nadeau JP, Jannot Y. Solar timber kilns: State of the art and foreseeable developments [J]. Renew Sust Energ Rev, 2009, 13(6–7): 1446–1455.
- [39] 姚利利. 香菇太阳能干燥工艺及动力学模型研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- Yao LL. Study on the solar drying process and dynamic model of shiitake mushrooms [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.
- [40] 苏丹, 李树君, 赵凤敏, 等. 农产品联合干燥技术的研究进展[J]. 农机化研究, 2014, 59(11): 236–240.
- Su D, Li SJ, Zhao FM, *et al.* Advances in the combined drying technology of agricultural products [J]. J Agric Mach Res, 2014, 59(11): 236–240.
- [41] 孙静儒. 平菇微波-真空冷冻干燥工艺研究及其脆皮的研制[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- Sun JR. Studying of the combined microwave-vacuum freezing drying process and crispy development of *Pleurotus ostreatus* [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019.
- [42] 张慧, 张裕仁, 杨佳, 等. 响应面法优化香菇热风-微波联合干燥工艺[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 214–221, 232.
- Zhang H, Zhang YR, Yang J, *et al.* Optimization of hot air-microwave combined drying process of shiitakes by response surface method [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(14): 214–221, 232.
- [43] Wang QF, Li S, Han X, *et al.* Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave-assisted drying methods [J]. LWT Food Sci Technol, 2019, 107(9): 236–242.
- [44] Li WY, Wang JL, Hu HP, *et al.* Functional polysaccharide lentinan suppresses human breast cancer growth via inducing autophagy and caspase-7-mediated apoptosis [J]. J Funct Foods, 2018, 45(6): 75–85.
- [45] Giri SK, Prasad S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms [J]. J Food Eng, 2007, 78(2): 512–521.
- [46] 马征祥, 王文亮, 石贤权, 等. 食用菌脆片休闲食品的加工工艺研究现状及展望[J]. 中国食物与营养, 2016, 22(1): 30–34.
- Ma ZX, Wang WL, Shi XQ, *et al.* Research status and prospect of edible fungi chip leisure food [J]. Food Nutr China, 2016, 22(1): 30–34.
- [47] 吴群芳. 牡蛎干制加工与贮藏过程中的品质变化及其控制研究[D]. 厦门: 集美大学, 2015.
- Wu QF. Studying on the change and control of the processing and storage quality of driedoysters [D]. Xiamen: Jimei University, 2015.
- [48] 张钰, 李杰庆, 李涛, 等. 不同储藏年限绒柄牛肝菌紫外与红外光谱数据融合鉴别研究[J]. 现代食品科技, 2018, 34(2): 218–224, 245.
- Zhang Y, Li JQ, Li T, *et al.* Research on identification of *Boletus tomentipes* with different storage period by UV and FT-IR combined with data fusion [J]. Mod Food Sci Technol, 2018, 34(2): 218–224, 245.
- [49] 朱丹实, 刘贺. 不同的温度、湿度条件对部分食用菌干品贮藏的影响[J]. 食品工业科技, 2008, (9): 252–254, 257.
- Zhu DS, Liu H. Effect of different temperature and humidity conditions on preservations of the part dried edible mushroom [J]. Sci Technol Food Ind, 2008, (9): 252–254, 257.
- [50] Slawinska A, Fornal E, Radzki W, *et al.* Study on vitamin D₂ stability in dried mushrooms during drying and storage [J]. Food Chem, 2016, 199(10): 203–209.
- [51] Kortei NK, Odamtten GT, Obodai M, *et al.* Influence of low dose of gamma radiation and storage on some vitamins and mineral elements of dried oyster mushrooms (*Pleurotus ostreatus*) [J]. Food Sci Nutr, 2017, 5(3): 570–578.
- [52] 徐晓飞, 向莹, 陈健. 不同贮藏条件对干香菇活性成分及感官特性的影响[J]. 食用菌, 2012, 34(4): 62–65.
- Xu XF, Xiang Y, Chen J. Effects of different storage conditions on the active components and sensory characteristics of dried *Lentinula edodes* [J]. Edible Fungi, 2012, 34(4): 62–65.
- [53] Jaworska G, Pogoń K, Bernaś E, *et al.* Effect of different drying methods and 24-month storage on water activity, rehydration capacity, and antioxidants in *Boletus edulis* mushrooms [J]. Dry Technol, 2014, 32(3): 291–300.
- [54] Wang LQ, Hu QH, Pei F, *et al.* Influence of different storage conditions on physical and sensory properties of freeze-dried *Agaricus bisporus* slices [J]. LWT Food Sci Technol, 2018, 97(11): 164–171.
- [55] 李慧玲, 徐长妍, 蒋少华. 功能包装材料的发展现状与趋势[J]. 中国材料进展, 2019, 38(12): 1135–1144, 1134.
- Li HL, Xu CY, Jiang SH. Development status and tendency of functional packaging materials [J]. Mater China, 2019, 38(12): 1135–1144, 1134.
- [56] Esmaili S, Barzegar M, Sahari MA, *et al.* Effect of gamma irradiation

under various atmospheres of packaging on the microbial and physicochemical properties of turmeric powder [J]. Radiat Phys Chem, 2018, 148(7): 60-67.

[57] 赵理. 银耳干品水分含量与温度, 湿度及包装方法关系的研究[J]. 价值工程, 2015, 30(2): 176-177.

Zhao L. Research on the relationship between the moisture content and temperature, humidity and packing method of dried tremella [J]. Value Eng, 2015, 30(2): 176-177.

(责任编辑: 李磅礴)

作者简介



倪旭东, 硕士研究生, 主要研究方向为生物活性大分子。

E-mail: nixudong1995@outlook.com

杨海龙, 教授, 主要研究方向为微生物技术研究。

E-mail: 00121049@wzu.edu.cn

“食品生物技术”专题征稿函

食品生物技术是生物技术在食品原料生产、加工和制造中的应用的一个学科。它包括了食品发酵和酿造等最古老的生物技术加工过程, 也包括了应用现代生物技术来改良食品原料的加工品质的基因、生产高质量的农产品、制造食品添加剂、植物和动物细胞的培养以及与食品加工和制造相关的其他生物技术, 如酶工程、蛋白质工程和酶分子的进化工程等。生物技术在食品领域中日益显示其巨大的作用与意义。

鉴于此, 本刊特别策划“食品生物技术”专题。专题将围绕基因工程、细胞工程、蛋白质工程、酶工程、分子生物学技术、免疫学技术、基因芯片和生物传感器等生物技术在食品加工生产与食品保鲜及食品安全检测与控制的应用等方面展开, 基于技术原理、技术特点、优势与局限性、影响因素、工艺及设备、应用实践等各个方面展开讨论, 同时该专题也关注转基因食品的安全性评价与管理, 本专题计划在 2020 年 11 月出版。

鉴于您在该领域的成就, 学报主编国家食品安全风险评估中心吴永宁研究员及编辑部全体成员特别邀请有关食品领域研究人员为本专题撰写稿件, 以期进一步提升该专题的学术质量和影响力。综述及研究论文均可, 请在 2020 年 9 月 30 日前通过网站或 E-mail 投稿。我们将快速处理并经审稿合格后优先发表。

同时烦请您帮忙在同事之间转发一下, 希望您能够推荐该领域的相关专家并提供电话和 E-mail。再次感谢您的关怀与支持!

投稿方式(注明专题食品生物技术)

网站投稿: www.chinafoodj.com(备注投稿请登录食品安全质量检测学报主页-作者登录-注册投稿-投稿选择“专题: 食品生物技术”)

邮件投稿: E-mail: jfoodsqa@126.com(备注: 食品生物技术专题投稿)

《食品安全质量检测学报》编辑部