

江 宁,戚思影,韩吉平,等.不同预处理对干制双孢菇品质及风味的影响[J].江苏农业科学,2023,51(2):188-195.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.02.028

# 不同预处理对干制双孢菇品质及风味的影响

江 宁<sup>1,2,3</sup>,戚思影<sup>1,2</sup>,韩吉平<sup>2,3</sup>,千春录<sup>1</sup>,张钟元<sup>2</sup>,牛丽影<sup>2</sup>,孙英杰<sup>2,3</sup>

(1.扬州大学食品科学与工程学院,江苏扬州 225127; 2.江苏省农业科学院农产品加工研究所,江苏南京 210014;  
3.江苏大学食品与生物工程学院,江苏镇江 212013)

**摘要:**为提高双孢菇干制品品质及风味,采用超声、热水烫漂、超声联合烫漂 3 种方式对双孢菇进行预处理,并研究热风干燥后,对双孢菇干制品的色泽、抗氧化、营养物质、可溶性糖及多元醇、挥发性风味物质指标的影响。结果表明:超声结合热风干燥处理能显著提高双孢菇的  $L^*$  值、抗氧化活性以及多酚含量。与其他预处理相比,超声结合热风干燥处理的双孢菇中甘露醇和海藻糖含量最高,扫描电镜结果表明,超声结合热风干燥处理所得样品具有明显且排列均匀的孔状结构。此外,超声处理制备所得的双孢菇特征性风味物质种类多于其他预处理组,并且醇类物质的相对含量显著高于其他处理组,为 73.85%。因此,超声预处理结合热风干燥可以制备得到更高品质的双孢菇干制品,可为双孢菇干制品的技术研究提供理论基础和数据支撑。

**关键词:**超声;烫漂;热风干燥;双孢菇;风味;抗氧化

**中图分类号:**TS255.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)02-0188-07

双孢蘑菇(*A. bisporus*)是世界上种植面积最大、产量最丰富的食用菌<sup>[1]</sup>,但新鲜的双孢蘑菇容易受到机械损伤和微生物侵袭,并导致一系列品质问题,例如色泽降低和产生异味,从而影响适销性和消费者的接受度<sup>[2]</sup>。干燥可以通过减少水分含量和降低水分活度来降低酶的活性和抑制微生物的生长,从而延长产品保质期和提高食品安全性。此外,双孢菇干制品由于质量更轻,其运输和储存成本得到降低<sup>[3-4]</sup>。在目前报道的各种食用菌干燥技术中,热风干燥由于其操作简单和低能耗受到广泛应用<sup>[5]</sup>,但传统热风干燥的蘑菇品质较差,无法满足消费者对高质量脱水产品的要求<sup>[6]</sup>。

为去除产品中水分,并改善其营养特性和感官特性,通常会在农产品干燥前进行预处理<sup>[7]</sup>,如热水烫漂、超声等。热水烫漂作为最广泛应用的技术<sup>[8-9]</sup>,具有许多作用,如热水烫漂可通过钝化过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)来减少酶促褐变并起到颜色保护的作用<sup>[10]</sup>。Wang 等研究发现,热水烫煮会降低新鲜辣椒的品质,降低 PPO 和 POD

的活性<sup>[9]</sup>。超声作为非热处理在食品加工中越来越受欢迎。在超声处理过程中会发生 2 种主要现象:第 1 种现象称为“海绵效应”,即声波穿透植物组织并反复挤压和释放材料;第 2 种现象是空化现象,即气泡的形成、生长和破裂,是由于材料中压力和温度的突然局部升高而产生的。超声波会在物料内部形成微观通道并改变食物特性<sup>[11-12]</sup>。超声预处理对胡萝卜组织的结构特征有明显的影响,并且在内部会形成微通道<sup>[13]</sup>。超声与其他处理方法的结合可以减少处理时间并提高食品内酶的灭活效率。例如,内源性酶(如蘑菇 PPO、柠檬果胶酯酶、番茄汁果胶甲基酯酶、聚半乳糖醛酸酶和水芹过氧化物酶)通过热超声处理后显著灭活<sup>[14]</sup>。目前,大多数研究主要集中在超声或超声辅助干燥过程的动力学模型建立<sup>[15-16]</sup>,而超声、烫漂尤其是超声与烫漂结合使用对热风干燥双孢菇的风味物质影响的研究较少。因此,本研究通过分析干燥速率、微观结构、营养成分和风味成分的变化来探讨超声、烫漂以及超声联合烫漂的组合预处理对热风干燥双孢菇切片品质的影响以期获得营养价值高、品质好的干制双孢菇,为双孢菇的精加工开辟一条新的途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

新鲜的双孢菇来自南京苏果超市,并于 4℃冷

收稿日期:2021-05-07

基金项目:国家重点研发计划子课题(编号:2018YFD0400203)。

作者简介:江 宁(1983—),男,江苏南京人,博士,副研究员,研究方向为生鲜食品保鲜与加工。E-mail:jaas\_jiangning@163.com。

通信作者:千春录,博士,副教授,研究方向为果蔬加工。E-mail:clqian@yzu.edu.cn。

藏,于 2020 年 12 月在扬州大学进行试验。在预处理之前,先将双孢菇洗净,去掉茎,并用切片机将双孢菇切至 5 mm 厚。

1.2 试剂及仪器

气质联用仪(7890A),购自美国安捷伦科技有限公司;色差仪(WSC-S),购自上海精密科学仪器有限公司;紫外-可见分光光度计(TU-1810),购自北京普析通用仪器有限公司;电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9073B5-Ⅲ),购自上海新苗医疗器械制造有限公司;台式高速离心机(TG16-WS),购自长沙湘仪离心机仪器有限公司;扫描电子显微镜(Quanta-200),购自美国 FEI 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 双孢菇预处理 对双孢菇预处理的参数见表 1。(1)超声处理:将 400 g 双孢菇切片放入 8 L 蒸馏水的超声浴中,并在 40 min、200 W 和 40 kHz 的优化参数下经受超声波处理(US)。(2)热水烫漂处理:将 400 g 双孢菇切片置于 90 ℃ 水温的超声浴中 3 min(HWB)。(3)US 结合 HWB 处理:将 400 g 双孢菇切片放入 8 L 热水(90 ℃)中漂烫 3 min,并在 40 min、200 W 和 40 kHz 的优化参数下经受超声波处理(US-HWB)。(4)将未经任何预处理的双孢菇切片用作对照样品(CK)。

表 1 预处理参数

处理方法	超声时间 (min)	超声功率 (W)	烫漂时间 (min)	烫漂温度 (℃)
CK	—	—	—	—
US	40	200	—	—
HWB	—	—	3	90
US-HWB	40	200	3	90

初步结果表明,200 W、40 min(US)和 90 ℃、3 min(HWB)处理在保持优质热风干燥双孢菇方面比其他参数更有效(数据未显示)。因此,本研究选择了 200 W 持续 40 min(US)和 90 ℃持续 3 min(HWB)。

1.3.2 双孢菇的干燥 预处理后,将双孢菇切片放在电热恒温鼓风炉中的带孔托盘上,并在(65±2)℃下干燥。每 0.5 h 称质量干燥样品 1 次,直至水分含量保持不变。

1.3.3 水分含量的测定 双孢菇水分含量的测定参照 Xu 等的方法<sup>[17]</sup>进行。

1.3.4 微观结构的观察 双孢菇微观结构的拍摄参照 Krishnan 等的方法<sup>[18]</sup>。使用扫描电子显微镜

(SEM)观察干燥双孢菇的微观结构,将 1 mm 厚的干燥样品放在 SEM 存根上,用金进行溅射镀膜。在高真空条件下以 20.0 kV 的加速电压观察样品的微观结构。

1.3.5 色泽的测定 使用色差仪测定粉碎后新鲜双孢菇和干燥双孢菇的色泽<sup>[9]</sup>。参照 Zhang 等的方法<sup>[12]</sup>,并使用以下公式计算总色差 ΔE 和褐变指数 BI。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (B^* - b_0^*)^2}。$$

(1)

式中:L<sub>0</sub>、a<sub>0</sub> 和 b<sub>0</sub> 是新鲜双孢菇的值。

$$BI = [100(x - 0.31)]/0.172；$$

(2)

$$x = (a^* + 1.75L^*)/(5.64L^* + a^* - 3.012b^*)。$$

(3)

式中:L\* 为亮度/暗度;a\* 为红色/绿色;b\* 为黄色/蓝色。

1.3.6 总糖含量的测定 干燥双孢菇的总糖含量使用苯酚-硫酸法<sup>[19]</sup>测定。称取 250 mg 干双孢菇,放入 250 mL 锥形瓶中。将 50 mL 蒸馏水和 15 mL 浓盐酸加入烧瓶中,在沸水浴中水解 3 h。反应混合物过滤后,加入蒸馏水制成 250 mL。随后,移取 0.2 mL 溶液加入到 10 mL 的试管中,用蒸馏水配制成 1.0 mL 体积。加入 1.0 mL 5% 苯酚溶液,再加入 5.0 mL 浓硫酸。静置 10 min,拌匀后 30 ℃ 水浴 20 min。取适量的反应溶液,在 490 nm 处测定吸光度。以无水葡萄糖为标准,计算总糖含量。

1.3.7 总酚含量的测定 双孢菇中总酚含量测定采用 Folin-Ciocalteu 法<sup>[20]</sup>。将 0.1 mL 双孢菇提取液和 GA(标准酚类化合物)提取物与 0.1 mL Folin Ciocalteu 试剂(预先用蒸馏水稀释 3 倍)混合。将溶液在室温下混合 3 min。然后,加入 0.3 mL 2% 碳酸钠溶液,并孵化 2 h。在 760 nm 处测量所有样品的吸光度,结果以 mg GA 当量(GAE)/g 样品表示。

1.3.8 ABTS 的测定 ABTS 的测定采用 Tsai 等的方法<sup>[21]</sup>并进行了一些修改。样品(0.1 μmL)或参比(Trolox)加入到 3.9 mL ABTS<sup>+</sup>溶液中。使混合物反应 10 min,然后在 734 nm 处测定吸光度。

1.3.9 FRAP 的测定 FRAP 的测定采用 Chen 等的方法<sup>[22]</sup>。FRAP 试剂由 0.1 mol/L 乙酸缓冲液(pH 值 3.6)、10 mmol/L TPTZ 和 20 mmol/L 氯化铁按体积比 10:1:1 配制而成。向 1 mL 样品中加入约 0.5 mL 的 FRAP 试剂,于 37 ℃ 下孵育 10 min 后,在 593 nm 处测定反应产物的吸光度。

1.3.10 可溶性糖和多元醇的测定 双孢菇中可溶性糖和多元醇的提取采用 Vahid 等的方法<sup>[23]</sup>。用 50 mL 80% 的乙醇水溶液提取双孢菇粉(600 mg)。将该悬浮液在室温下振荡 45 min,并通过 Whatman No.4 滤纸过滤。将残余物用另外的 25 mL 的 80% 乙醇洗涤 5 次。然后将合并的滤液在 40 ℃ 旋转蒸发,并重新溶解在去离子水中至最终体积为 10 mL。将水提取物通过 Millex-HV 过滤器,并在注入高效液相色谱仪之前使用 0.45 μm 滤膜进行过滤。

HPLC 系统包括 Shimadzu LC-10ATVP 泵、Rheodyne 7725i 进样器、20 μL 样品定量环、Shimadzu RID-10A 检测器和 Sep-NH 色谱柱(4.6 m × 250 mm, 5 μm, Separation Inc., Norwalk, CT)。流动相为乙腈/去离子水,体积比为 85:15,流速为 1.0 mL/min。使用真实的糖或多元醇鉴定每种糖或多元醇,并通过真实化合物的校准曲线进行定量。

1.3.11 挥发性风味物质的测定 称取 1.5 g 经预处理后的双孢菇,并放入 50 mL 螺旋口的样品瓶中,加入 12 mL 去离子水和 3 g NaCl 后,采用聚四氟乙烯垫片密封,用电磁搅拌器在 60 ℃ 水浴平衡,然后将提取头插入样品中吸附 5 min,解析 40 min。

色谱柱为安捷伦 HP-5ms 非极性毛细管柱(60 m × 250 μm × 0.25 μm);流速 1.0 mL/min,不分流;程序的初始温度为 40 ℃。以 3 ℃/min 的速率升温至 90 ℃ 后保持 5 min,然后升温至 260 ℃ 后保持 1 min。入口温度:250 ℃;离子源温度为 230 ℃;四极温度为 150 ℃。电离 EI 模式,电子能量是 70 eV,电压 350 V,界面温度 280 ℃,质谱扫描范围 50~450 AMU/SEC。

从 NIST08 数据库中定性检索后,采用同一积分参数的峰面积归一化方法对各组分进行定量分析。

#### 1.4 数据处理

试验进行 3 次重复,并使用 SPSS 22.0 统计软件分析结果。组间统计学比较采用单因素方差分析(ANOVA)。数据以“平均值 ± 标准差”表示。在 5% 水平下,均数差异被认为是显著的。使用 Qrigin 2016 制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同预处理对双孢菇水分含量的影响

由图 1 可见,在所有样品中,双孢菇的水分含量在干燥的前期均迅速降低,但当干燥时间大于 3 h

后,下降速率逐渐减小。此外,US-HWB 处理的双孢菇干燥时间最短,其次是 HWB、US 和 CK。当湿基的水分含量小于 5 mL 时,US-HWB 样品所需的时间为 5.5 h,比 HWB 样品的时间减少 8.33%,比 US 样品的时间减少 15.38%,比未经预处理的样品减少 26.67%。因此,US-HWB 技术制备双孢菇,能耗最少,效率最高。Jiang 等也报道了类似的结果,他们发现烫漂处理和超声处理可以缩短白菜的脱水时间<sup>[8]</sup>。US 能提高双孢菇的干燥速度可能归因于海绵(一系列快速的交替压缩和膨胀)和超声波的空化作用。HWB 加强双孢菇的干燥过程可能是因为 HWB 能降低细胞膜和细胞壁对水分运动的抵抗力。此外,HWB 处理双孢菇的干燥时间比 US 处理的时间短,这表明在选定的强度范围内,在加速双孢菇的对流干燥方面,热烫比超声更有效。由图 1 可知,US-HWB 处理的双孢菇表现出最高的干燥效率,这是因为一方面 US 诱导了固体基质中水分子空化的形成,另一方面 HWB 改变了双孢菇的质地,从而大大改善了干燥过程中的传质性能。

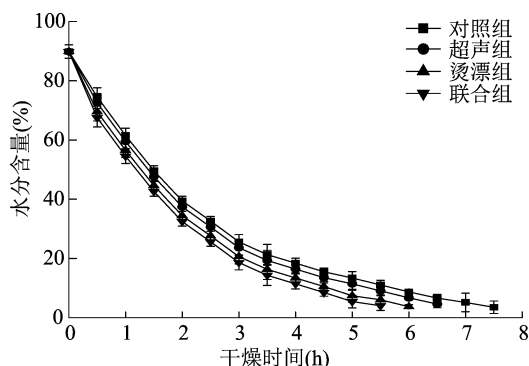


图1 不同预处理对双孢菇水分含量的影响

### 2.2 不同预处理对双孢菇微观结构的影响

双孢菇切片的微观结构变化可能是由于水分迁移和细胞破裂所致,导致双孢菇细胞不同程度收缩和结构塌陷。由图 2-a 可见,CK 呈现出不明显的多孔聚合物结构、层状纤维和塌陷的细胞壁结构,这表明 CK 结构在干燥过程中细胞遭到破坏。与 CK 相比,用超声处理的双孢菇显微图像显示出明显的多孔细胞结构。这可能是因为超声预处理具有在双孢菇内部形成微观结构、扩大双孢菇表面空隙的作用。许多研究已表明,由于超声辐射产生的空化效应,组织和细胞遭到破坏以及微通道的形成<sup>[16,24]</sup>。经过 HWB 预处理后,干燥的双孢菇表面紧缩,细胞壁结构严重塌陷。这可能是由于 HWB 过程中材料结构的软化、体积收缩、膜通透性增加

以及对双孢菇内部结构的严重破坏所致。此外,图 2 - d 表明用超声联合烫漂预处理的干双孢菇显微图像呈现出一种介于超声预处理和烫漂预处理之

间的状态,且微观结构与图 2 - c 相似,这可能是因为在选定超声和烫漂参数范围内,烫漂处理对双孢菇组织结构的影响更大。

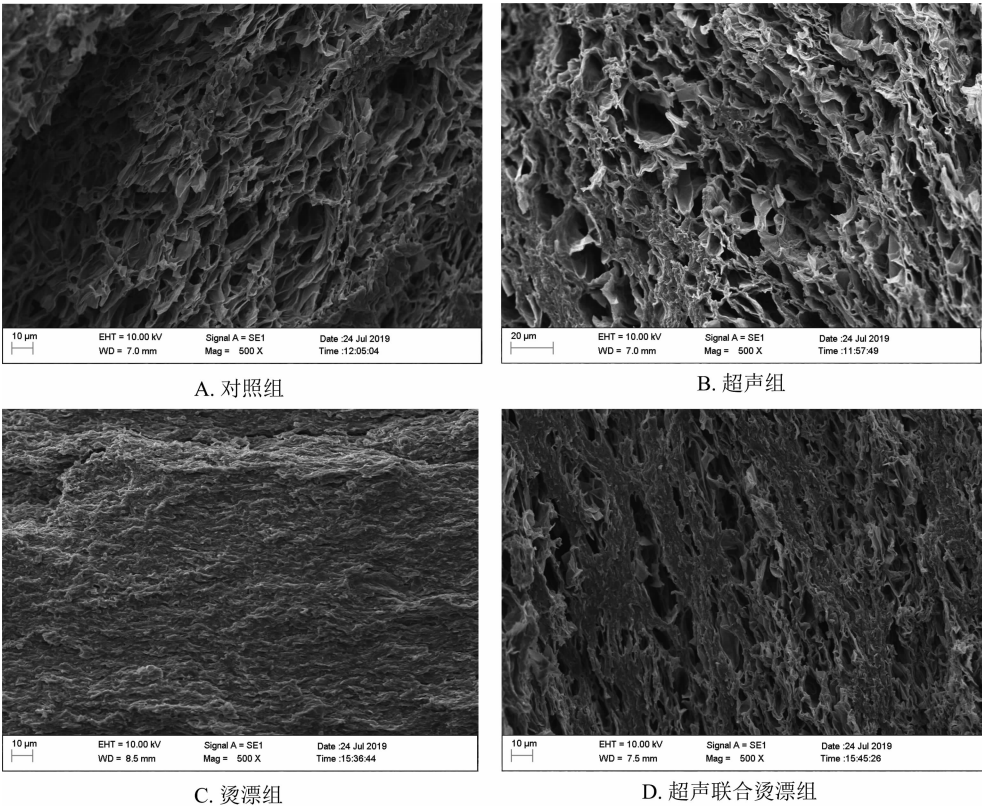


图2 不同预处理对双孢菇微观结构的影响

2.3 不同预处理对双孢菇表面色泽的影响

颜色是影响消费者接受度和产品市场接受度的关键质量参数之一。最高的  $L^*$  值和最低的色差 ( $\Delta E$ ) 值通常被认为是干制食用菌颜色质量的行业基准<sup>[25]</sup>。由表 2 可见,US 处理后双孢菇的  $L^*$  值最高,为 26.48,US - HWB 处理的双孢菇  $\Delta E$  值最低,为 29.63,而未经处理的双孢菇  $L^*$  值最低, $\Delta E$  值最高,这表明采用 US 和 US - HWB 处理可以更好地保

护样品的颜色。US - HWB 处理的双孢菇色泽更佳,这可能是因为高温对一些酶存在灭活作用从而抑制了酶促反应。 $BI$  代表棕色的纯度,是涉及酶促或非酶促褐变过程中的重要参数。与对照组样品的  $BI$  值(65)相比,超声、烫漂处理的双孢菇分别下降了 10.77%、13.85%。 $BI$  值的这些变化可能是由于通过美拉德反应(MR)或酚类化合物的氧化而形成的棕色聚合物的出现。

表 2 不同预处理对双孢菇表面色泽的影响

处理方法	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$	$BI$
CK	22.32 ± 2.45a	1.59 ± 0.27a	8.13 ± 0.94a	48.50 ± 3.91	65 ± 14b
US	26.48 ± 2.53b	2.61 ± 0.58b	7.54 ± 1.08b	43.34 ± 3.82	58 ± 13a
HWB	23.59 ± 0.22a	1.34 ± 0.09a	12.26 ± 0.16a	42.55 ± 1.93	56 ± 7a
US - HWB	23.46 ± 1.33ab	1.90 ± 0.46ab	13.63 ± 1.01ab	29.63 ± 2.49	72 ± 13a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。表 3 至表 5 同。

2.4 不同预处理对双孢菇营养物质的影响

由表 3 可知,经预处理的双孢菇可溶性糖含量明显低于 CK( $P < 0.05$ )。未经预处理的双孢菇可

溶性糖含量最高,为 1.23 mg/g,而 US - HWB 组含量最低,为 1.12 mg/g。这可能是因为烫漂过程中较高的温度下美拉德反应的发生,此外水分的减少

导致某些营养成分如可溶性糖的流失。

对照组、US、HWB、US－HWB 处理的多酚含量分别为 1.290%、1.730%、1.265%、1.268%。HWB 和 US－HWB 处理的双孢菇多酚含量显著低于 US 组,这可能是因为酚类物质由于其热敏性易在高温下降解,这与 Huang 等的研究结果<sup>[14]</sup>类似。在不同的预处理条件下,可溶性固形物含量变化的趋势并不明显,对照、US、HWB、US－HWB 分别为 1.340 4%、1.340 6%、1.337 8%、1.33 9%。超声处理组可溶性固形物含量高于其他处理组。

表 3 不同预处理对双孢菇营养物质的影响			
处理方法	可溶性糖含量 (mg/g)	多酚含量 (%)	可溶性固形物 含量(%)
CK	1.23 ± 0.06a	1.290 ± 0.18b	1.340 4 ± 0.05c
US	1.19 ± 0.04b	1.730 ± 0.02a	1.340 6 ± 0.09c
HWB	1.17 ± 0.02b	1.265 ± 0.08c	1.337 8 ± 0.01a
US－HWB	1.12 ± 0.04c	1.268 ± 0.10c	1.339 ± 0.05b

2.5 不同预处理对双孢菇抗氧化性能的影响

对产品抗氧化活性的评估一般需要 2 种或更多种分析方法。本研究选用了 ABTS<sup>+</sup> 和 FRAP 清除测定法来测定不同预处理双孢菇的抗氧化能力。由表 4 可知,与 CK 相比,超声处理组双孢菇具有较高的抗氧化活性,而热处理组双孢菇的抗氧化能力较低。超声处理可能会破坏细胞壁,使双孢菇结合酚释放,增加了可生物利用的抗氧化剂化合物的储备。然而热处理尽管在一定程度上破坏细胞壁,释

放抗氧化合物,但较高的温度也会导致双孢菇中的多酚被破坏。与烫漂组相比,超声联合烫漂处理双孢菇的 ABTS<sup>+</sup> 清除能力显著增加,这可能是因为超声处理可以破坏热处理未能破坏的细胞壁,使酚类物质游离出来。

表 4 不同预处理对双孢菇抗氧化性能的影响		
处理方法	FRAP (mmol/L)	ABTS <sup>+</sup>
CK	4.08 ± 0.05b	0.77 ± 0.01b
US	6.62 ± 0.17c	0.78 ± 0.01b
HWB	3.42 ± 0.46a	0.68 ± 0.04a
US－HWB	3.61 ± 0.16ab	0.76 ± 0.02b

2.6 不同预处理对双孢菇可溶性糖和多元醇含量的影响

由表 5 可知,与 CK 相比,超声预处理的双孢菇甘露醇含量较高,而烫漂和超声联合烫漂预处理的较低。超声处理组甘露醇含量的增加可能是由于超声处理过程中产生的热效应,即样品温度(40 ℃)的升高促进酶的活化,从而促进了大分子糖类的代谢,最终导致了甘露醇含量的增加。烫漂和超声联合烫漂处理双孢菇中甘露醇含量的降低可能是由于较高的温度(90 ℃)引起热敏性物质的热分解所致。但与 CK 相比,处理组的 D－果糖、肌醇含量水平呈下降趋势,这可能是由于在热处理过程中发生了美拉德反应,导致果糖和多元醇等总可溶性糖减少了。

表 5 不同预处理对双孢菇可溶性糖和多元醇含量的影响				
处理方法	D－果糖含量 (mg/g)	甘露醇含量 (mg/g)	肌醇含量 (mg/g)	海藻糖含量 (mg/g)
CK	1.42 ± 0.11c	9.39 ± 0.06c	1.58 ± 0.09d	1.68 ± 0.20b
US	1.30 ± 0.04c	9.49 ± 0.02c	1.03 ± 0.04a	2.06 ± 0.14c
HWB	0.77 ± 0.02a	8.45 ± 0.08a	1.27 ± 0.04b	1.32 ± 0.10a
US－HWB	0.91 ± 0.03b	8.96 ± 0.04b	1.29 ± 0.04b	1.64 ± 0.05b

2.7 不同预处理对双孢菇挥发性风味物质含量的影响

由表 6 可知,通过 GC－MS 初步鉴定出总共 45 种主要挥发性化合物。所有这些挥发性成分均归类为以下几类:醇类化合物(12)、醛类和酮类(8)、酯类(5)、其他(20)。在对照、超声、烫漂、超声联合烫漂处理的双孢菇中分别鉴定出了 24、27、23、21 种成分。

由表 6 可知,醇类物质是双孢菇中的主要挥发性风味成分。挥发性化合物主要来自不饱和脂肪酸的化学或酶促氧化作用,以及与蛋白质、肽和游离氨基酸的进一步相互作用。其他挥发性化合物是由游离氨基酸的 Strecker 降解和美拉德反应引起的<sup>[26]</sup>。4 种预处理的双孢菇醇类物质的相对含量分别为 48.64%、73.85%、62.61%、56.33%。其中超声处理组中醇类物质相对含量最高,在这些挥发

表 6 不同预处理对双孢菇挥发性风味物质种类和含量的影响

种类	序号	保留时间 (min)	名称	相对含量(%)			
				对照	超声	烫漂	超声联合烫漂
醇类	1	8.72	1-辛稀-3-醇	26.04	39.34	30.68	8.93
	2	8.19	3-辛醇	4.78	19.81	19.03	13.74
	3	11.42	壬醇	4.82	ND	ND	ND
	4	10.17	2-乙基正己醇	6.77	1.86	2.96	ND
	5	10.30	苯甲醇	5.75	5.09	4.12	9.57
	6	5.73	正己醇	ND	0.50	ND	ND
	7	28.79	山梨醇	ND	4.50	ND	ND
	8	28.88	D-甘露醇	ND	2.75	ND	ND
	9	2.92	二苯基硅二醇	ND	ND	3.17	12.69
	10	11.35	2-辛稀-1-醇	0.48	ND	2.72	0.99
	11	3.15	3-甲基正丁醇	ND	ND	ND	7.81
	12	11.43	1-辛醇	ND	ND	ND	0.97
	小计			48.64	73.85	62.61	56.33
醛酮类	1	1.56	正己醛	4.07	0.94	0.73	ND
	2	8.54	苯甲醛	11.07	7.11	7.06	8.58
	3	1.58	3-辛酮	0.98	2.84	4.08	3.61
	4	2.22	苯乙醛	1.79	1.98	3.00	1.91
	5	0.16	壬醛	0.48	0.84	0.87	0.38
	6	1.88	3,5-二甲基苯甲醛	2.55	1.65	ND	ND
	7	2.30	3-甲基正丁醛	ND	0.43	2.04	5.05
	8	15.58	2,4-二甲基苯甲醛	ND	ND	2.96	ND
	小计			20.46	15.79	17.78	19.53
酯类	1	11.70	壬酸甲酯	0.74	0.28	0.13	1.08
	2	12.83	十二酸甲酯	0.28	ND	ND	ND
	3	25.41	辛酸甲酯	0.40	0.46	0.72	0.57
	4	15.77	乙酸乙酯	ND	0.22	1.27	0.76
	5	1.86	甲酸乙酯	ND	ND	ND	6.95
	小计			1.42	0.96	2.12	9.36
其他	1	3.56	甲苯	15.00	2.60	3.47	ND
	2	14.01	十二烷	1.29	ND	ND	ND
	3	4.78	六甲基环三硅氧烷	4.17	1.67	2.71	ND
	4	6.62	丁基羧基甲苯	3.19	ND	ND	ND
	5	9.40	十八烷	3.66	ND	ND	ND
	6	14.65	萘	0.54	0.40	0.26	0.44
	7	15.40	十一烷	0.65	1.11	0.26	ND
	8	17.21	十三烷	0.42	ND	ND	ND
	9	18.79	十四烷	0.45	ND	ND	ND
	10	9.42	八甲基环四聚二甲基硅氧烷	ND	1.81	1.68	ND
	11	11.42	环庚烷	ND	0.53	ND	ND
	12	11.66	吡嗪	ND	0.28	ND	ND
	13	16.40	4-甲基噻唑	ND	0.17	ND	ND
	14	17.73	2-甲基萘	ND	0.18	0.23	ND
	15	18.79	十二甲基环己硅氧烷	ND	0.27	ND	ND
	16	1.12	吡啶	ND	ND	2.60	ND

表 6(续)

种类	序号	保留时间 (min)	名称	相对含量(%)			
				对照	超声	烫漂	超声联合烫漂
其他	17	14.74	1,2,3-三甲基苯	ND	ND	ND	0.30
	18	15.58	苯并噻唑	ND	ND	ND	6.00
	19	22.01	正葵稀	ND	ND	ND	0.24
	20	2.34	三氯甲烷	ND	ND	ND	3.47
	小计			29.37	9.02	11.21	10.45

注:ND 表示未检出。

性物质中,1-辛烯-3-醇是主要的挥发性物质。1-辛烯-3-醇也被称为蘑菇醇,是蘑菇中发现的主要挥发性物质<sup>[25]</sup>,带有强烈的草本色调,具有强烈、甜美和泥土味,使产品具有甜美的草味。此外在 4 种处理下的双孢菇中还检测到了 3-辛酮。3-辛酮散发着甜美、水果、泥土、奶酪的香气以及奶酪和蘑菇的味道<sup>[25]</sup>,对双孢菇的风味有着重要贡献。

3 结论

超声预处理的双孢菇呈现出的  $L^*$  值较高,褐变值较低,抗氧化能力以及总酚含量最高,此外,该处理下的双孢菇中甘露醇和海藻糖含量较高,其微观结构具有明显孔状结构,且排列均匀。超声预处理的双孢菇特征性风味物质(醇类物质、1-辛烯-3-醇)相对含量高于其他 2 个处理组。

参考文献:

[1] Jiang T J,Zheng X L,Li J R,et al. Integrated application of nitric oxide and modified atmosphere packaging to improve quality retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*)[J]. Food Chemistry,2011,126(4):1693-1699.

[2] Gholami R,Ahmadi E,Farris S. Shelf life extension of white mushrooms (*Agaricus bisporus*) by low temperatures conditioning, modified atmosphere, and nanocomposite packaging material[J]. Food Packaging and Shelf Life,2017,14:88-95.

[3] Grant-Preece P,Barril C,Schmidtke L M,et al. Impact of fluorescent lighting on the browning potential of model wine solutions containing organic acids and iron[J]. Food Chemistry,2018,243:239-248.

[4] Prosapio V,Norton I. Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze drying performance[J]. LWT,2017,80:401-408.

[5] Xu W X,Song C F,Li Z F,et al. Temperature gradient control during microwave combined with hot air drying [J]. Biosystems Engineering,2018,169:175-187.

[6] Das I,Arora A. Alternate microwave and convective hot air

application for rapid mushroom drying [J]. Journal of Food Engineering,2018,223:208-219.

[7] Lyu J,Yi J Y,Bi J F,et al. Effect of sucrose concentration of osmotic dehydration pretreatment on drying characteristics and texture of peach chips dried by infrared drying coupled with explosion puffing drying[J]. Drying Technology,2017,35(15):1887-1896.

[8] Jiang N,Liu C Q,Li D J,et al. Effect of blanching on the dielectric properties and microwave vacuum drying behavior of *Agaricus bisporus* slices[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies,2015,30:89-97.

[9] Wang J,Yang X H,Mujumdar A S,et al. Effects of various blanching methods on weight loss, enzymes inactivation, phytochemical contents, antioxidant capacity, ultrastructure and drying kinetics of red bell pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. LWT,2017,77:337-347.

[10] Nowacka M,Laghi L,Rybak K,et al. Water state and sugars in cranberry fruits subjected to combined treatments:cutting,blanching and sonication[J]. Food Chemistry,2019,299:125122.

[11] Nowacka M,Wedzik M. Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue[J]. Applied Acoustics,2016,103:163-171.

[12] Zhang Z Y,Niu L Y,Li D J,et al. Low intensity ultrasound as a pretreatment to drying of daylilies; impact on enzyme inactivation, color changes and nutrition quality parameters [J]. Ultrasonics Sonochemistry,2017,36:50-58.

[13] Jiang Q Y,Zhang M,Xu B G. Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: a review [J]. Ultrasonics Sonochemistry,2020,69:105261.

[14] Huang D,Men K Y,Li D P,et al. Application of ultrasound technology in the drying of food products [J]. Ultrasonics Sonochemistry,2020,63:104950.

[15] Pei F,Shi Y,Gao X Y,et al. Changes in non-volatile taste components of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during different stages of freeze drying and freeze drying combined with microwave vacuum drying[J]. Food Chemistry,2014,165:547-554.

[16] Zielinska M,Markowski M,Zielinska D. The effect of freezing on the hot air and microwave vacuum drying kinetics and texture of whole cranberries[J]. Drying Technology,2019,37(13):1714-1730.

[17] Xu L,Fang X J,Wu W J,et al. Effects of high-temperature pre-drying on the quality of air-dried shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*)[J]. Food Chemistry,2019,285:406-413.

陈元震,胡昕迪,方旭波,等. 超微粉碎对牛蒡根粉多酚及抗氧化活性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(2):195-201.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.02.029

# 超微粉碎对牛蒡根粉多酚及抗氧化活性的影响

陈元震<sup>1,2</sup>, 胡昕迪<sup>2</sup>, 方旭波<sup>1</sup>, 黄午阳<sup>2</sup>, 李莹<sup>2</sup>, 陈小娥<sup>1</sup>

(1. 浙江海洋大学食品与药学专业, 浙江舟山 316022; 2. 江苏省农业科学院, 江苏南京 210014)

**摘要:**采用超微粉碎和普通粉碎 2 种技术制备 6 种牛蒡根粉,研究粒径大小对牛蒡根多酚(游离酚、结合酚)的含量、抗氧化性及在体外模拟消化过程中生物利用度的影响。结果表明,超微粉碎显著降低了牛蒡根粉的粒径,使粉末的粒径分布和比表面积发生显著变化;使牛蒡根多酚(BRPP)的溶出率、抗氧化活性和生物利用度显著增加。超微粉碎时间在 30 min,粒径为 14.16  $\mu\text{m}$  时,粉末的均一性最强;此时,游离态和结合态多酚含量分别增加 19.01%、23.23%;DPPH 自由基清除力分别提高 28.07%、22.15%;ABTS 阳离子自由基清除力分别提高 36.78%、32.42%;铁离子还原能力也分别提高 34.31%、27.13%;多酚生物可及性提高 20.08%。因此,超微粉碎技术可用作制备牛蒡根粉的前处理加工手段。

**关键词:**物理特性;游离酚;结合酚;抗氧化;生物利用度

**中图分类号:**TS201.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)02-0195-07

自然界植物中含有丰富的酚类物质,天然酚酸通常以游离态和结合态存在于植物的皮、根、木、叶

和果实中<sup>[1]</sup>。大量试验数据证明,植物中的酚类物质具有多种生物活性,在抗氧化、抗菌、抗虫、抗病毒等方面发挥着重要作用。这类化合物包括黄酮类化合物和羟基肉桂酸等,牛蒡是这 2 种化合物的重要天然来源。牛蒡(*Arctium lappa* L.)别称牛蒡子(burdock),是桔梗目菊科二年生草本植物,在亚洲已有 3 000 多年种植历史。因具有保肝、抗炎和抗氧化的潜在治疗特性而被作为一种营养和功能食品广泛推广<sup>[2]</sup>。与市面上使用的灵芝、人参等名贵药材相比,牛蒡不仅具有多种食用和治疗价值,且价格低廉易于栽培<sup>[3]</sup>。目前,在我国牛蒡根主要以

收稿日期:2022-02-19

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(19)2006];江苏省重点研发计划面上项目(编号:BE2020382);农业农村部农产品加工重点实验室基金(编号:S2021KFKT-04);白马未来食品研究院揭榜挂帅项目(编号:JBGS-2021-004)。

作者简介:陈元震(1995—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要从事食品加工与安全的研究。E-mail:chenyuanzhen0803@163.com。  
通信作者:李莹,博士,研究员,主要从事营养与健康的研究, E-mail:hijoly@163.com;陈小娥,博士,教授,主要从事水产加工与贮藏的研究, E-mail:xiaoechen@163.com。

[18] Krishnan K R, Rayaguru K, Nayak P K. Ultra-sonicated vacuum drying's effect on antioxidant activity, TPC, TFC and color of elephant apple slices[J]. Food Bioscience, 2020, 36:100629.

[19] Zhang J T, Dong Y S, Nisar T, et al. Effect of superfine-grinding on the physicochemical and antioxidant properties of *Lycium ruthenicum* Murray Powders[J]. Powder Technology, 2020, 372: 68-75.

[20] Bolanos de la Torre A A S, Henderson T, Nigam P S, et al. A universally calibrated microplate ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay for foods and applications to Manuka honey[J]. Food Chemistry, 2015, 174:119-123.

[21] Tsai S Y, Tsai H L, Mau J L. Non-volatile taste components of *Agaricus blazei*, *Agrocybe cylindracea* and *Boletus edulis*[J]. Food Chemistry, 2008, 107(3):977-983.

[22] Chen Z G, Guo X Y, Wu T. A novel dehydration technique for carrot slices implementing ultrasound and vacuum drying methods

[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 30:28-34.

[23] Vahid B, Michael N, Mehrdad N. Effects of ultrasound and infrared assisted conductive hydro-drying, freeze-drying and oven drying on physicochemical properties of okra slices[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2020, 63:102313.

[24] Li X B, Feng T, Zhou F, et al. Effects of drying methods on the tasty compounds of *Pleurotus eryngii*[J]. Food Chemistry, 2015, 166: 358-364.

[25] Siegmund B. Biogenesis of aroma compounds [M]//Flavour development, analysis and perception in food and beverages. Amsterdam: Elsevier, 2015:127-149.

[26] Hiraide M, Miyazaki Y, Shibata Y. The smell and odorous components of dried shiitake mushroom, *Lentinula edodes* I: relationship between sensory evaluations and amounts of odorous components[J]. Journal of Wood Science, 2004, 50(4):358-364.