

干燥方式对大球盖菇品质及挥发性风味成分的影响

Effects of different drying methods on the quality and volatile flavor components of *Stropharia rugosoannulata*

吴坤龙¹ 李彦坡^{2,3} 刘 标¹ 陈知龙¹ 徐仰丽^{2,3}

WU Kunlong¹ LI Yanpo^{2,3} LIU Biao¹ CHEN Zhilong¹ XU Yangli^{2,3}

(1. 文成县现代农业与康养产业研究院, 浙江 温州 325300; 2. 温州市农业科学研究院, 浙江 温州 325006; 3. 温州市特色食品资源工程技术研究中心, 浙江 温州 325006)

(1. Wencheng Institution of Modern Agriculture and Healthcare Industry, Wenzhou, Zhejiang 325300, China; 2. Wenzhou Academy of Agriculture Science, Wenzhou, Zhejiang 325006, China; 3. Wenzhou Specialty Food Resources Engineering Technology Research Center, Wenzhou, Zhejiang 325006, China)

摘要:目的: 筛选最为合适的大球盖菇干燥方式。方法: 选用冷冻干燥、热泵干燥、热风干燥和微波干燥对新鲜大球盖菇进行干燥处理, 考察其理化性质。结果: 粗蛋白、粗脂肪、灰分、钾、钙、总黄酮、必需氨基酸、呈味氨基酸以及总氨基酸含量方面以冷冻干燥的最高, 16种氨基酸总量为 16.88 g/100 g; 复水率、色泽方面均为冷冻干燥的最佳; DPPH 自由基清除率为热风干燥的最高达 61.14%, 清除率大小依次为热风干燥>热泵干燥>微波干燥>冷冻干燥; ABTS 自由基清除率为热泵干燥的最高达 67.97%, 清除率大小依次为热泵干燥>热风干燥>微波干燥>冷冻干燥; 大球盖菇单糖主要由葡萄糖和半乳糖组成, 其中, 冷冻干燥的葡萄糖含量最多, 占总糖的 36.79%; 大球盖菇单糖分子量最大的为冷冻干燥的; 不同干燥方式下大球盖菇挥发性风味存在差异, 且与新鲜大球盖菇的差异较大, 冷冻干燥大球盖菇中挥发性成分种类最丰富、部分成分含量较高。结论: 冷冻干燥在营养成分、复水率、色泽、风味等方面较其他干燥方式均有优势, 对大球盖菇品质影响最小, 是最为合适的干燥方式。

关键词: 大球盖菇; 干燥方式; 营养成分; 多糖; 挥发性风味

Abstract: Objective: This study aims to investigate the effect of

different drying methods on the drying characteristics and volatile flavor of *Stropharia rugosoannulata* as raw material. **Methods:** The fresh *S. rugosoannulata* was dried by freeze-drying, heat pump drying, hot air drying, and microwave drying, and then the physical and chemical indexes were investigated. **Results:** The contents of crude protein, crude fat, ash, potassium, calcium, total flavonoids, essential amino acids, flavor amino acids and total amino acids are the highest in freeze drying. The sixteen amino acids achieved 16.88 g/100 g in the freeze-drying. The rehydration rate and color all play the best performance in freeze drying. The scavenging rate of DPPH radical of *S. rugosoannulata* polysaccharide reached 61.14% in hot air drying; The rate was hot air drying>heat pump drying>microwave drying>freeze drying. Similarly, the scavenging rate of ABTS radical reached 67.97% in heat pump drying; The rates were heat pump drying>hot air drying>microwave drying>freeze drying. The monosaccharide of *S. rugosoannulata* is mainly composed of glucose Glc and Galactose gal, among which the content of freeze-dried glucose Glc is the most, accounting for 36.79% of the total sugar; The maximum molecular weight of *S. rugosoannulata* was freeze-drying; The volatile flavor of *S. rugosoannulata* different under different drying methods, and the volatile flavor of *S. rugosoannulata* after drying is quite different from that of fresh *S. rugosoannulata*. The volatile components in freeze-dried *S. rugosoannulata* are the most abundant, and some components are high. **Conclusion:** Freeze-drying has advantages over other drying methods in terms of nutritional composition, rehydration rate, color, and flavor. It has the least impact on the quality of *S. rugosoannulata* and is the most suitable drying

基金项目: 温州市重大科技创新攻关项目(编号: ZF2022007); 文成县科技计划项目(编号: 2021NKY10)

作者简介: 吴坤龙, 男, 文成县现代农业与康养产业研究院助理研究员。

通信作者: 徐仰丽(1981—), 女, 温州市农业科学研究院高级实验师, 硕士。E-mail: xuyangli@163.com

收稿日期: 2023-09-27 **改回日期:** 2024-01-11

method.

Keywords: *Stropharia rugosoannulata*; drying method; nutritional components; polysaccharide; volatile flavor

大球盖菇(*Stropharia rugosoannulata*),隶属于球盖菇属(*Stropharia*)^[1],是联合国粮农组织向发展中国家推荐栽培的食用菌种类之一^[2-3],1980年,上海农科院从波兰引进菌种并试种成功,后续在福建、浙江、广西等地种植成功。大球盖菇口味鲜美,含有丰富的蛋白质、多糖、微量元素、风味物质等,具有抗氧化、抗炎、抗菌、抗肿瘤等活性。但新鲜大球盖菇水分含量较高,容易变质、腐烂^[4]。

干燥作为一种可有效延长食用菌货架期的加工方式,会引起食用菌风味物质的种类和含量发生变化,进而使食用菌呈现出与新鲜状态下不同的风味特征,对产品风味具有重要影响^[5]。目前,常采用自然风干、热风干燥、真空冷冻干燥等方式干燥大球盖菇。自然风干和热风干燥耗时长,营养成分流失严重;真空冷冻干燥能很好地保留营养物质,但该技术投资成本高,干燥效率较低;热泵干燥可以提供可控的干燥环境,以低能耗获得更好的产品质量^[6],但也存在烘干时间过长,受外界环境影响大等缺点;微波干燥速度快、效率高,但由于加热迅速容易导致内外干燥不均匀,局部温度过高易烧焦,产品质地差。

研究拟采用冷冻干燥(FD)、热泵干燥(HPD)、热风干燥(HD)和微波干燥(MD)4种方式对大球盖菇进行干燥,分析干制品品质(复水率、色泽、外观)和不同水溶性多糖理化性质、生物活性及挥发性风味物质的变化情况,揭示不同干燥方式之间的品质差异,筛选最为合适的大球盖菇干燥方式,以期获得更高品质的大球盖菇产品提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜大球盖菇:用清水除去附着杂质,用吸水纸吸干表面水分后进行后续处理,市售。

1.2 试剂与仪器

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH):分析纯,美国Sigma-Aldrich公司;

2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

D-葡萄糖、D-半乳糖、L-阿拉伯糖、L-鼠李糖、D-木糖、D-甘露糖、L-岩藻糖、D-半乳糖醛酸、D-葡萄糖醛酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

真空冷冻干燥机:LGJ-12型,北京松源华兴科技发展有限公司;

热泵干燥机:MYR18Z型,杭州贝能环境设备有限公司;

电热鼓风恒温干燥箱:101-1BS型,绍兴市苏珀仪器有限公司;

格兰仕微波炉:G70F20CN1L-DG型,广东格兰仕微波生活电器制造有限公司;

色差仪:3NH型,深圳三恩时科技有限公司;

超声提取器:KQ-500DE型,昆山市超声仪器有限公司;

高效液相色谱仪:1525型,包括2487紫外检测器、717plus自动进样器及Breeze工作站,沃特世科技(上海)有限公司;

气相色谱—离子迁移谱(GC-IMS):FlavourSpec®型,中国海能仪器股份有限公司;

电子天平:MS105DU型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-2型,江阴市保利科研器械有限公司;

超纯水仪:Milli-Q型,德国MILLIPORE公司。

1.3 试验方法

1.3.1 大球盖菇干燥 将大球盖菇统一切片(厚度4 mm),使用4种不同的干燥方式将其湿基含水量降至10%以下。

(1) 冷冻干燥(FD):根据文献[7]并修改,大球盖菇于-18℃预冷24 h,并于-56℃下真空冷冻干燥。

(2) 热泵干燥(HPD):根据文献[8]并修改,当烘房温度预热至38℃时,大球盖菇入室开始干燥,升温速度为2℃/h,38~40℃干燥6 h,40~60℃干燥18 h;70℃干燥2 h。

(3) 热风干燥(HD):根据文献[9]并修改,65℃电热鼓风恒温干燥箱中干燥10 h。

(4) 微波干燥(MD):根据文献[10]并修改,微波功率为1 kW,每加热10 min取出翻动一次。

1.3.2 基本营养成分测定

(1) 水分含量:按GB 5009.3—2016执行。

(2) 粗蛋白含量:按GB 5009.5—2016执行。

(3) 粗脂肪含量:按GB 5009.6—2016执行。

(4) 灰分含量:按GB 5009.4—2016执行。

(5) 多糖含量:按NY/T 1676—2008执行。

(6) 钾含量:按GB 5009.91—2017执行。

(7) 钙含量:按GB 5009.92—2016执行。

(8) 镁含量:按GB 5009.241—2017执行。

(9) 铁含量:按GB 5009.90—2016执行。

(10) 锌含量:按 GB 5009.14—2017 执行。

(11) 总黄酮含量:采用可见分光光度法。

(12) 氨基酸组成:按 GB 5009.124—2016 执行。

1.3.3 复水率(RR)测定 根据文献[11]并修改。将 2 g 干燥样品浸入 100 mL 50 °C 蒸馏水中,每隔 30 min 记录样品的重量,直到恒重。取出后用吸水纸吸走附着水分,称重。按式(1)计算复水率。

$$R_R = W_1 / W_2, \quad (1)$$

式中:

R_R ——复水率, %;

W_1 、 W_2 ——再水化和干燥样品的质量, g。

1.3.4 色差(ΔE)测定 使用 3NH 色差仪测定,记录 L^* (亮度/暗度)、 a^* (红色/绿色)和 b^* (黄色/蓝色)值。按式(2)计算 ΔE [12]。

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

1.3.5 大球盖菇多糖的提取和分离 根据文献[13]并修改。取 30 g 大球盖菇粉末置于圆底烧瓶,按料液比 1 : 30 (g/mL)加入 95% 乙醇,搅匀,80 °C 冷凝回流 3 h,过滤,除去滤液,重复两次,充分脱去脂质和色素。合并滤渣,料液比 1 : 30 (g/mL)加入蒸馏水,浸泡过夜,80 °C 热水提取 4 h,过滤,收集滤液,滤渣重复提取两次。合并 3 次滤液,65 °C 旋转蒸发浓缩至黏稠状,加入 95% 乙醇至醇终体积分数为 75%,过夜。4 500 r/min 离心 15 min,沉淀冷冻干燥,得大球盖菇多糖。

1.3.6 抗氧化活性

(1) DPPH 自由基清除率:根据文献[14]。

(2) ABTS 自由基清除率:根据文献[15]。

1.3.7 大球盖菇多糖单糖组成 根据文献[16]并修改。取 6 mg 样品于水解瓶中,加入 3 mL 三氟乙酸溶液 (2 mol/L),120 °C 水解 1 h,倒入装有 5 mL 无水乙醇的蒸发皿中,70 °C 下干燥直至除尽三氟乙酸。向干燥的样品中加入 1.5 mL 浓度为 0.3 mol/L 的 NaOH 溶液,随后进行单糖衍生化。色谱条件:流动相 A 为磷酸缓冲盐溶液 (0.1 mol/L, pH 6.9),流动相 B 为乙腈, $V_{A相} : V_{B相} = 83 : 17$,流速 0.8 mL/min,进样量 20 mL,检测波长 254 nm,柱温 25 °C。

1.3.8 分子量测定 根据文献[17]并修改。准确称取 10 mg 样品,加入 2 mL 浓度为 0.1 mol/L 的 Na_2SO_4 溶液,准确称取不同分子量的右旋糖酐标准品 10 mg,溶于 2 mL 浓度为 0.1 mol/L 的 Na_2SO_4 溶液中,用 0.22 μm 过滤膜过滤,待 HPLC 检测。

1.3.9 GC-IMS 测定挥发性风味成分 采用气相色谱—离子迁移谱(GC-IMS)联用技术进行分离鉴定[18]。顶空孵化温度 50 °C;孵育时间 20 min;转速 250 r/min;进样

针温度 55 °C;进样速度 60 mL/min;进样体积 0.5 mL,不分流模式。GC 条件:色谱柱温度 60 °C;运行时间 25 min;载气为高纯 N_2 (纯度 $\geq 99.99\%$);初始流速 2.0 mL/min,保持 2 min,25 min 内增至 150 mL/min。IMS 条件:极性柱 (15 m, 0.53 mm ID, 1 μm df);漂移气 N_2 (纯度 $\geq 99.99\%$);流速 150 mL/min;IMS 温度 60 °C。

1.3.10 统计分析 所有试验重复 3 次,统计分析采用邓肯检验和方差分析(ANOVA), $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义;GC-IMS 数据利用设备自带 Laboratory Analytical Viewer(LAV)分析软件和 3 款插件(Reporter 插件、GalleryPlot 插件、Dynamic PCA 插件)以及 GC $\times$ IMS Library Search 定性分析软件分别从不同角度对大球盖菇挥发性有机物进行采集和分析。

2 结果与分析

2.1 基本营养成分、复水率、色差及外观分析

由表 1 可知,干燥方式会影响大球盖菇基本营养成分含量,其中粗蛋白、粗脂肪、多糖及总黄酮含量均以冷冻干燥的最高;粗蛋白含量高主要是因为蛋白水解酶在低温环境下活性受到抑制,分解蛋白质的能力下降[19],说明低温的烘干方式能有效避免大球盖菇蛋白质变性。粗脂肪含量为冷冻干燥的最高,热风干燥的最低,可能是由于脂肪酶活性在高温促进下活性提高,加速了脂肪氧化[20]。从多糖含量来看,热风干燥和微波干燥的均不高,主要是因为长时间高温干燥过程中,大球盖菇中的一些多糖在美拉德反应和焦糖化反应下转化为低聚糖和部分焦糖,这也是两种干燥方式色泽表现较差的重要原因。总黄酮含量为冷冻干燥的最高,热泵干燥的最低,可能是热泵干燥过程时间最长,造成部分黄酮类物质发生转化或热降解[21]。干燥后大球盖菇中钾含量变化最大,含量最高,可以补充人体钾元素,有效预防心肌受损、维持酸碱平衡[22]。

由表 2 可知,大球盖菇的复水率大小为冷冻干燥 > 热泵干燥 > 热风干燥 > 微波干燥,可能是冷冻干燥后大球盖菇纤维结构仍保持相对完整的状态,内部结构疏松多孔,复水及容纳水分的能力较强,复水率最高[23]。微波干燥较热泵干燥、热风干燥加热过程更为激烈,大球盖菇内部结构更为紧密,复水过程中水分难以渗入,同时加热也使大球盖菇细胞壁的渗透性损坏,部分蛋白质发生变性再吸水能力大幅下降,所以微波干燥的复水率最低。干燥后,大球盖菇的 L^* 值均有所下降,冷冻干燥的 ΔE 值最小,微波干燥的 ΔE 值最大,说明冷冻干燥后的大球盖菇颜色与新鲜大球盖菇最接近,微波干燥的大球盖菇颜色变化最大;冷冻干燥下菇体保持最为完整,色泽亮;热风干燥和微波干燥下菇体体积收缩变化最大,且色泽暗。大球盖菇色泽的变化主要是干制过程中的褐变。低

表 1 不同干燥方式下大球盖菇的营养成分

Table 1 Results of nutritional components of <i>S. rugosoannulata</i> in different drying methods					
干燥方式	粗蛋白/ (10 ⁻² g · g ⁻¹)	粗脂肪/ (10 ⁻² g · g ⁻¹)	灰分/ (10 ⁻² g · g ⁻¹)	多糖/ (mg · kg ⁻¹)	钾/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)
FD	27.2	1.5	8.6	1.33×10 ⁵	3.65×10 ³
HPD	22.5	1.1	7.7	1.27×10 ⁵	3.12×10 ³
HD	21.0	1.0	7.9	1.08×10 ⁵	3.28×10 ³
MD	26.0	1.2	10.2	9.01×10 ⁴	3.43×10 ³
干燥方式	钙/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)	镁/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)	铁/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)	锌/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)	总黄酮/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)
FD	16.10	80.1	18.6	4.46	1.9×10 ²
HPD	6.68	65.8	16.4	3.37	5.1×10 ¹
HD	8.94	77.6	20.4	3.97	1.7×10 ²
MD	13.40	82.8	29.7	4.48	1.4×10 ²

表 2 不同干燥方式下大球盖菇的复水率及色差

Table 2 Rehydration rate and color difference results of *S. rugosoannulata* under different drying methods

干燥方式	复水率	色差值			
		<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	Δ <i>E</i>
新鲜大球盖菇		76.67	0.31	4.28	
FD	7.77	73.46	2.02	10.72	7.39
HPD	4.71	71.26	2.32	12.11	9.27
HD	2.96	65.51	3.67	15.93	16.48
MD	2.31	56.28	7.10	21.21	27.36

温能够有效抑制多酚氧化酶活性,显著降低酶促褐变,非酶褐变由于美拉德反应在较低温度下不易发生,所以低温条件也能够降低非酶促褐变,这也是冷冻干燥能够保持较好的菇体和色泽的主要原因。

2.2 氨基酸组成分析

由表 3 可知,新鲜和干燥后的大球盖菇中均检出 16 种氨基酸,其中含量最高的均为谷氨酸(2.45 ~ 3.20 g/100 g),其次为天冬氨酸、亮氨酸和丙氨酸;冷冻干燥大球盖菇的各种氨基酸含量及氨基酸总量均最高,与其高蛋白质含量的结论一致,表明冷冻干燥的低温环境可能抑制了蛋白质和氨基酸与糖类之间的美拉德反应^[24],能够更好地保留氨基酸。干燥后的大球盖菇必需氨基酸/非必需氨基酸值分别为 0.75,0.74,0.77,0.77,符合 FAO/WHO 要求^[25],进一步证明大球盖菇是一种高品质食物来源。

2.3 抗氧化活性

由图 1 可知,不同干燥方式下,大球盖菇多糖的 DPPH 自由基清除率存在差异,其中热风干燥的最高为 61.14%,其清除率大小依次为热风干燥>热泵干燥>微

表 3 不同干燥方式下大球盖菇氨基酸组成及含量[†]

Table 3 Amino acid composition and content of *S. rugosoannulata* in different drying methods

氨基酸	g/100 g			
	干燥方式			
	FD	HPD	HD	MD
天冬氨酸	1.73	1.60	1.40	1.41
苏氨酸*	1.04	0.87	0.87	0.89
丝氨酸	0.96	0.82	0.80	0.81
谷氨酸	3.20	2.67	2.45	2.47
甘氨酸	0.88	0.76	0.80	0.82
丙氨酸	1.21	1.07	1.23	1.26
缬氨酸*	1.04	0.87	0.90	0.92
蛋氨酸*	0.33	0.29	0.29	0.29
异亮氨酸*	0.82	0.70	0.73	0.75
亮氨酸*	1.47	1.25	1.29	1.33
酪氨酸	0.55	0.44	0.41	0.41
苯丙氨酸*	0.90	0.75	0.76	0.77
组氨酸**	0.47	0.40	0.36	0.38
赖氨酸*	1.08	0.94	0.92	0.94
精氨酸**	0.77	0.72	0.56	0.57
脯氨酸	0.43	0.30	0.39	0.39
必需氨基酸	6.68	5.67	5.76	5.89
半必需氨基酸	1.24	1.12	0.92	0.95
非必需氨基酸	8.96	7.66	7.48	7.77
(必需氨基酸/总氨基酸)/%	39.57	39.24	40.68	40.59
必需氨基酸/非必需氨基酸	0.75	0.74	0.77	0.77
呈味氨基酸含量	8.47	7.29	7.05	7.24
16 种氨基酸总量*	16.88	14.45	14.16	14.51

† * 为必需氨基酸; ** 为半必需氨基酸。

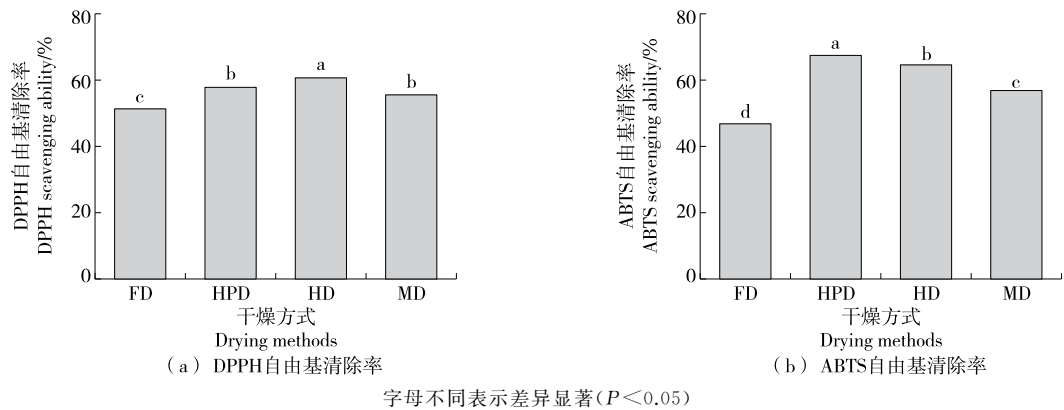


图 1 不同干燥方式下大球盖菇的抗氧化活性

Figure 1 Antioxidant activity of *S. rugosoannulata* in different drying methods

波干燥>冷冻干燥。热泵干燥样品的 ABTS 自由基清除率最高为 67.97%，其清除率大小依次为热泵干燥>热风干燥>微波干燥>冷冻干燥。热泵干燥下，大球盖菇多糖的 DPPH 自由基、ABTS 自由基清除率均保持较高的水平。食用菌多糖具有很好的抗氧化和降血糖作用，能够清除活性氧、抑制脂质过氧化、提高抗氧化酶活性。从多糖含量来看，热泵干燥和热风干燥的多糖含量高于微波干燥的，低于冷冻干燥的。多酚类化合物也是重要的抗氧化成分，石芳等^[26]研究发现，热风干燥后的松茸总酚含量明显高于冻干组，推测干燥过程可能有助于结合酚向游离酚转变，且高温可能促进酚类物质的前体物质发生非酶转化，生成新的酚类物质^[27]。有关热泵干燥对薰衣草生物活性的研究^[28]也表明，热泵干燥下，薰衣草的抗氧化能力(DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除率)可以达到最高值，这可能是由于热泵干燥过程最为温和，更好地保留了其生物活性物质。

2.4 单糖组成及分子量分析

由表 4 可知，干燥方式对大球盖菇单糖组成无影响，但对其含量存在影响。不同干燥方式下，大球盖菇中均检出 6 种单糖，其中葡萄糖含量最高，其次为半乳糖，表明大球盖菇单糖主要由葡萄糖和半乳糖组成；冷冻干燥的葡萄糖含量最多，占总糖的 36.79%，单糖含量的差异可能与氧气和环境温度有关，热泵干燥的葡萄糖含量低于其他方式，可能是由于干燥过程中多糖的羟基氧化和分子间氢键的断裂，从而使单糖含量发生变化^[29]。经冷冻干燥、热泵干燥、热风干燥及微波干燥后，大球盖菇的分子量分别为 958.89, 277.89, 365.24, 313.97 kDa。干燥方式对大球盖菇多糖分子量存在一定影响，分子量最高的为冷冻干燥，可能是由于热处理干燥时，大球盖菇多糖分子会发生降解^[30-31]，导致分子量小，由于冷冻干燥是在低温下进行，所以分子量高于其他 3 种热处理干燥。

表 4 不同干燥方式下大球盖菇的单糖组成

Table 4 Monosaccharide composition of *S. rugosoannulata* in different drying methods %

单糖组成	FD	HPD	HD	MD
Man	4.13	6.29	6.94	6.47
Rha	2.56	3.18	1.21	5.84
GlcUA	—	—	—	—
GalUA	0.86	0.19	0.29	0.74
Glc	36.79	22.07	32.47	34.76
Gal	13.16	18.62	22.95	12.84
Xyl	1.64	2.64	3.41	3.44
Ara	0.56	0.89	1.04	0.87
Fuc	—	—	—	—

2.5 GC-IMS 分析

2.5.1 风味成分谱图 由图 2 可知，不同干燥方式下，GC-IMS 能够分离大球盖菇中的不同挥发性风味物质，且这些物质含量存在差异。图 3 为扣除与新鲜大球盖菇相同部分得到的差异图。由图 3 可知，干燥后大球盖菇的风味物质与新鲜大球盖菇的差异较大。

2.5.2 GC-IMS 风味成分定性分析 由表 5 可知，不同干燥方式下大球盖菇的 49 个信号峰中鉴定出 46 种挥发性风味物质，其中醇类物质 10 种，醛类物质 10 种，酮类物质 7 种，酯类物质 5 种，烯类物质 3 种，呋喃类物质 2 种，其他物质 9 种。

2.5.3 挥发性成分指纹图谱分析 由图 4 可知，干燥后的大球盖菇挥发性成分与新鲜大球盖菇的差异较大，干燥过程中挥发性化合物组成及含量存在明显差异，多种化合物在干燥过程中生成，又被快速消耗，说明干燥是一个复杂的过程，并伴随多种化合物的代谢^[32]，其中，异戊醛、三乙胺、异戊酸、2-萜烯、 α -水芹烯、 α -蒎品烯等物质在新鲜大球盖菇中含量较高，但在 4 种干燥方式的大球盖菇中几乎没有；其中冷冻干燥大球盖菇中所含红点最多，

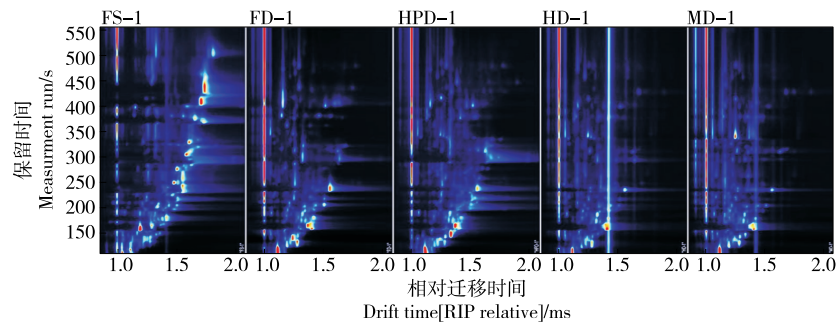


图 2 不同干燥方式下大球盖菇中挥发性物质成分的 GC-IMS 二维图谱

Figure 2 GC-IMS two-dimensional chromatogram of volatile components in *S. rugosoannulata* under different drying methods

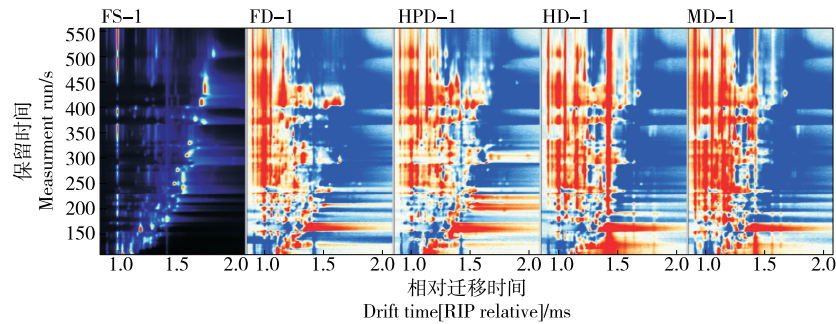


图 3 不同干燥方式下大球盖菇中挥发性物质成分差异对比图

Figure 3 Comparison of volatile components in *S. rugosoannulata* under different drying methods

表 5 不同干燥方式下大球盖菇中挥发性风味物质的定性分析

Table 5 Qualitative analysis results of volatile flavor substances in *S. rugosoannulata* under different drying methods

种类	化合物	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms	种类	化合物	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms
醇类	2-丁氧基乙醇	911.9	329.705	1.597 7	酮类	3-羟基-2-丁酮	703.5	190.106	1.059 9
	4-甲基-1-戊醇	856.0	283.652	1.618 0		乙偶姻	702.0	189.387	1.329 3
	2-甲基丁醇	773.4	227.954	1.467 5		2,3-戊二酮	671.0	175.005	1.310 6
	3-甲基-1-丁醇	735.1	206.279	1.494 4	酯类	丙酮	497.9	114.582	1.116 9
	异戊醇	763.8	222.274	1.246 3		乙酸乙酯	602.7	147.476	1.329 4
	2-甲基丙醇	608.2	149.507	1.360 2		异丁酸乙酯	963.8	379.691	1.556 1
	丙醇	575.8	138.064	1.243 3		丙酸乙酯	965.2	381.175	1.453 8
	异丙醇	545.2	128.193	1.184 1		戊酸乙酯	902.7	321.593	1.689 2
	正己醇	878.9	301.642	1.317 0		异戊酸乙酯	858.8	285.806	1.257 9
醛类	异丙醇	930.4	346.674	1.239 2	烯类	2-蒎烯	953.2	368.877	1.727 6
	异戊醛	643.6	163.309	1.198 9		α -水芹烯	990.9	408.960	1.696 3
	异戊醛	684.1	180.922	1.412 9		α -蒎品烯	1 015.7	437.754	1.726 5
	己醛	795.0	241.242	1.551 8	呋喃类	2-正戊基呋喃	972.0	388.311	1.256 2
	异戊醛	698.5	187.726	1.195 4		2-正戊基呋喃	996.3	415.073	1.244 4
	丁醛	557.7	132.141	1.273 4	其他	三乙胺	809.8	250.883	1.478 1
	己醛	813.6	253.397	1.258 1		异戊酸	846.5	276.548	1.497 8
	苯甲醛	965.7	381.660	1.144 5		己腈	884.6	306.249	1.575 8
	庚醛	904.3	323.005	1.324 8		己酸	960.4	376.222	1.648 0
	异戊醛	947.5	363.156	1.190 5		2,4,5-三甲基噻唑	983.8	400.992	1.563 8
	丁醛	592.7	143.889	1.276 3		N-亚硝基二丙胺	1 065.6	501.954	1.796 1
酮类	2-戊酮	678.0	178.151	1.375 7		1,4-二氧六环	1 072.6	511.641	1.322 6
	乙偶姻	728.8	202.913	1.337 4		2,4,5-三甲基噻唑	991.8	409.933	1.150 5
	2-庚酮	892.9	313.215	1.253 8		己酸	1 017.9	440.357	1.291 9

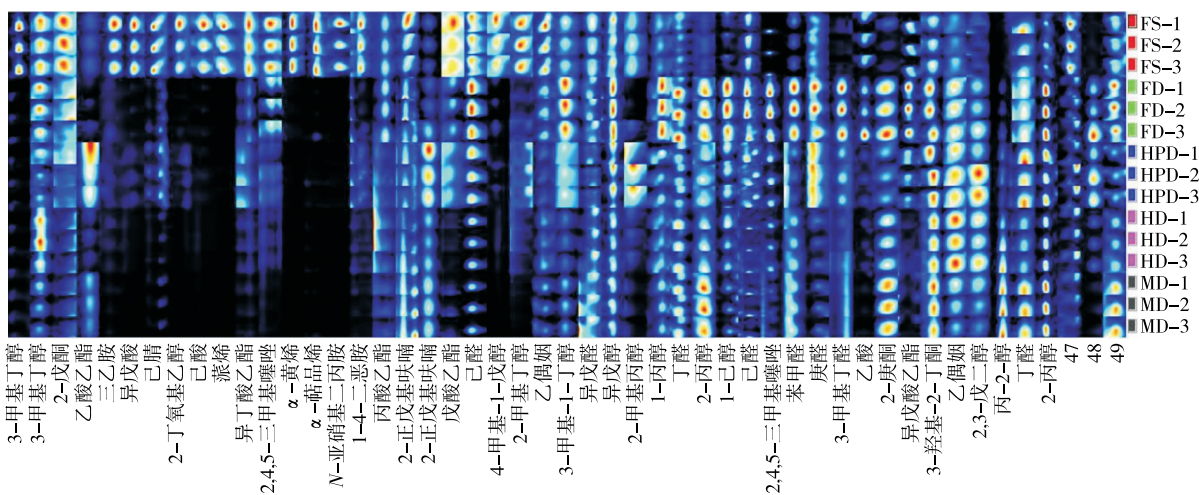


图 4 不同干燥方式下大球盖菇中挥发性物质成分指纹图谱

Figure 4 Fingerprint of volatile components in *S. rugosoannulata* under different drying methods

含挥发性成分种类最丰富、部分成分含量较高。这可能是冷冻干燥虽然温度低,真空环境下不利于氨基酸、脂肪酸的氧化,对挥发性风味物质产生了抑制^[33],但经冷冻干燥后的大球盖菇内部结构更为疏松、孔隙率高^[34],有利于挥发性风味物质的释放,对检测有正增益。己醛、3-甲基-1-丁醇、丙醇、异戊醛及苯甲醛含量在冷冻干燥大球盖菇中较高,且多为小分子挥发性物质,部分为氨基酸的降解产物。苯甲醛为苯丙氨酸典型分解产物之一,有独特的苦杏仁香及麦芽香气^[35],己醛是一种可以赋予大球盖菇水果香气的挥发性物质^[36],与冷冻干燥大球盖菇氨基酸含量趋势保持一致。其中热风干燥和微波干燥大球盖菇的挥发性成分种类较相似。

2.5.4 PCA 主成分分析 由图 5 可知,不同干燥方式下大球盖菇挥发性风味物质图谱之间存在明显差异,其中微波干燥和热风干燥的挥发性风味物质数据相距较近,且 4 种干燥方式与新鲜大球盖菇的挥发性风味物质数据相距较远,说明干燥后大球盖菇的挥发性风味物质种类及含量变化较大,干燥不仅会改变食用菌的风味物质组分,还会显著改变其香气特征,如香菇的浓郁之香,干燥后更为突出^[37]。主成分 1 和主成分 2 的累计贡献率为 74%,且同一干燥方式下的大球盖菇样品基本聚在一起,能够较好地反映不同干燥方式下大球盖菇中挥发性风味物质之间的差异,说明 PCA 能够较好地区分不同干燥方式下的大球盖菇样品。

3 结论

干燥方式对大球盖菇基本营养成分、色泽、多糖活性及挥发性风味成分等存在一定的影响。冷冻干燥的大球盖菇粗蛋白、粗脂肪、总黄酮、必需氨基酸、呈味氨基酸、总氨基酸及葡萄糖含量均为最高;冷冻干燥后的大球盖菇复水率最高,色泽与新鲜大球盖菇最为接近,且菇体保

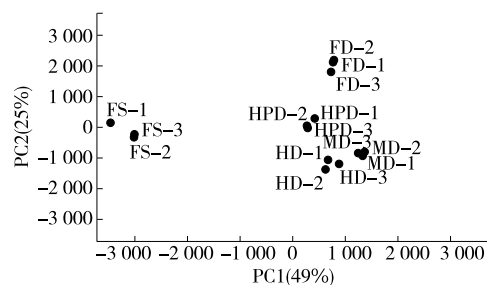


图 5 不同干燥方式下大球盖菇中挥发性物质成分的主成分分析图

Figure 5 Principal component analysis of volatile components in *S. rugosoannulata* under different drying methods

持完整;热风干燥大球盖菇多糖的 DPPH 自由基清除率最高,热泵干燥大球盖菇多糖的 ABTS 自由基清除率最高;干燥后的大球盖菇与新鲜大球盖菇的挥发性风味差异较大,且不同干燥方式下大球盖菇的挥发性风味也存在差异,其中,冷冻干燥大球盖菇中挥发性成分种类最丰富,部分成分含量较高。综上,冷冻干燥在营养成分、复水率、色泽、风味等方面较其他干燥方式有优势,对大球盖菇品质影响最小,是最为合适的干燥方式。在未来的研究中,可以利用联合干燥技术干燥大球盖菇,进一步提高干燥速率,探索能效比更高的干燥方式。同时可以对大球盖菇干制品的风味物质进行进一步的研究,拓宽大球盖菇在调味品方面的应用路径。

参考文献

- [1] 陈荣荣, 李文, 吴迪, 等. 大球盖菇生长发育过程中营养、质构和滋味特征的动态变化[J]. 食用菌学报, 2022, 29(4): 42-54.
- CHEN R R, LI W, WU D, et al. Nutrients, texture and taste characteristics of *Stropharia rugosoannulata* during growth and

- development[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2022, 29(4): 42-54.
- [2] AMARESAN N, KUMAR M S, ANNAPURNA K, et al. Beneficial microbes in agro-ecology[M]. New York: Academic Press, 2020: 695-706.
- [3] 黄美仙, 岑燕霞, 孙朋, 等. 大球盖菇研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2021(12): 124-129.
- HUANG M X, CEN Y X, SUN P, et al. Research progress on *Stropharia rugosoannulata* [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2021(12): 124-129.
- [4] 常堃, 向世标, 李慧, 等. 大球盖菇干制加工技术[J]. 江苏调味副食品, 2022(2): 27-29.
- CHANG K, XIANG S B, LI L, et al. Dry processing technology of *Stropharia rugosoannulata* [J]. *Jiangsu Condiment and Subsidiary Food*, 2022(2): 27-29.
- [5] 侯会, 陈鑫, 方东路, 等. 干燥方式对食用菌风味物质影响研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(15): 4 877-4 883.
- HOU H, CHEN X, FANG D L, et al. Research progress on influence of drying methods on flavor compounds of edible fungus[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2019, 10(15): 4 877-4 883.
- [6] ZHAO H, WU K. Annual performance analysis of heat pump drying system with waste heat recovery [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 53: 102625.
- [7] 韩骞, 李梅, 曹放, 等. 不同预处理方式对冷冻干燥大球盖菇脆片品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(6): 53-57.
- HAN Q, LI M, CAO F, et al. Effects of different pretreatment methods on the quality of freeze-dried *Stropharia rugosoannulata* crisps[J]. *Storage and Process*, 2022, 22(6): 53-57.
- [8] 张荔喆, 张学军, 范誉斌, 等. 热泵干燥技术研究进展及其在香菇干燥中的应用[J]. 制冷与空调, 2019, 19(7): 77-83, 87.
- ZHANG L Z, ZHANG X J, FAN Y B, et al. Research progress of heat pump drying technology and its application in drying of shiitake mushrooms[J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2019, 19(7): 77-83, 87.
- [9] 胡思, 黄文, 王益, 等. 大球盖菇粉的热风干燥工艺研究[J]. 食品科技, 2020, 45(3): 135-141.
- HU S, HUANG W, WANG Y, et al. Process on hot air drying of *Stropharia rugoso-annulata* powder [J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(3): 135-141.
- [10] 朱铭亮. 大球盖菇微波真空干燥工艺的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012: 9-10.
- ZHU M L. Study on the technology of microwave vacuum drying about *Stropharia rugoso-annulata*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012: 9-10.
- [11] YAN J, WU L, QIAO Z, et al. Effect of different drying methods on the product quality and bioactive polysaccharides of bitter melon (*Momordica charantia* L.) slices[J]. *Food Chemistry*, 2019, 271: 588-596.
- [12] ZHAO X T, DONG Q Y, ZHOU H B, et al. Drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant activity and antidiabetic potential of *Sargassum fusiforme* processed under four drying techniques[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 163: 113578.
- [13] 矫丽曼. 羊肚菌胞内多糖的提取及单糖组成分析[J]. 西部林业科学, 2016, 45(4): 130-135.
- JIAO L M. Extraction and monosaccharide composition of intracellular polysaccharide of *Morchella conica* Fr[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2016, 45(4): 130-135.
- [14] DZIECIOŁ M, WRÓBLEWSKA A, MILCZAREK J K. Comparative studies of DPPH radical scavenging activity and content of bioactive compounds in maca (*Lepidium meyenii*) root extracts obtained by various techniques[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(8): 26-33.
- [15] JENSON G, DAVID E, SHARON P, et al. Evaluation of antioxidant capacity (ABTS and CUPRAC) and total phenolic content (folin-ciocalteu) assays of selected fruit, vegetables, and spices[J]. *International Journal of Food Science*, 2022, 2 022: 47-63.
- [16] 李伟, 张旭, 吴明江. HPLC 法分析羊栖菜与铜藻多糖的单糖组成[J]. 高师理科学刊, 2015, 35(7): 49-53.
- LI W, ZHANG X, WU M J. Analysis of the monosaccharide composition of polysaccharides from *Sargassum fusiforme* and *Sargassum horneri* by HPLC[J]. *Journal of Science of Teachers' College and University*, 2015, 35(7): 49-53.
- [17] 焦旭雯, 梁蔚阳. HPGPC 法测定麦芽糖铁糖分子量与分子量分布[J]. 中国生化药物杂志, 2015, 35(10): 131-133.
- JIAO X W, LIANG W Y. Determination of molecular weight and weight distribution in iron maltose syrup by HPGPC[J]. *Chinese Journal of Biochemical and Pharmaceuticals*, 2015, 35(10): 131-133.
- [18] LI M, YANG R, ZHANG H, et al. Development of a flavor fingerprint by HS-GC-IMS with PCA for volatile compounds of *Tricholoma matsutake* Singer [J]. *Food Chemistry*, 2019, 290: 79-84.
- [19] BELUHAN S, RANOJAJEC A. Chemical composition and non-volatile components of croatian wild edible mushrooms[J]. *Food Chemistry*, 2010, 124(3): 1 076-1 082.
- [20] REID T, MUNYANYI M, MDULUZA T. Effect of cooking and preservation on nutritional and phytochemical composition of the mushroom *Amanita zambiana*[J]. *Food Science & Nutrition*, 2017, 5(3): 538-544.
- [21] 李程勋, 徐晓俞, 李爱萍. 不同干燥温度对玫瑰花茶外观和总黄酮含量的影响[J]. 食品工业, 2022, 43(9): 44-46.
- LI C X, XU X Y, LI A P. Effects of different drying processes on apparent and total flavonoids in rose tea[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(9): 44-46.
- [22] 吴茂江. 钾与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 2011, 28(6): 61-62.
- WU M J. Potassium and human health [J]. *Studies of Trace*

- Elements and Health, 2011, 28(6): 61-62.
- [23] 陈晓麟, 王强. 不同干制方式对香菇甲醛及复水性的影响研究[J]. 食品科技, 2013, 38(9): 61-64.
- CHEN X L, WANG Q. Analysis of rehydration and formaldehyde in the *Lentinus edodes* by different dried methods[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(9): 61-64.
- [24] YIN M, MATSUOKA R, YANAGISAWA T, et al. Effect of different drying methods on free amino acid and flavor nucleotides of scallop (*Patinopecten yessoensis*) adductor muscle[J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133620.
- [25] FAO/WHO, Hoc Expert Committee. Energy and protein requirement[R]. Rome: World Health Organization, FAO, 1973: 3-6.
- [26] 石芳, 李瑶, 杨雅轩, 等. 不同干燥方式对松茸品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 141-147.
- SHI F, LI Y, YANG Y X, et al. Effect of different drying methods on the quality of *Tricholoma matsutake*[J]. Food Science, 2018, 39(5): 141-147.
- [27] BOUDHRIOUA N, BAHLOUL N, BEN SLIMEN I, et al. Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves[J]. Industrial Crops and Products, 2009, 29(2): 412-419.
- [28] MÉLANIE N F, MATTEO C, SONIA D, et al. Heat pump drying of lavender flowers leads to decoctions richer in bioactive compounds[J]. Agronomy, 2022, 12(12): 122-129.
- [29] ZHANG M, WANG F, LIU R, et al. Effects of superfine grinding on physicochemical and antioxidant properties of *Lycium barbarum* polysaccharides[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 58(2): 594-601.
- [30] XU K, MARTINEZ M M, YANG B, et al. Finestructure, physicochemical and antioxidant properties of LM-pectins from okra pods dried under different techniques [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241: 116272.
- [31] XIN X, LEI Z, YAGOUB A E A, et al. Effects of ultrasound, freeze-thaw pretreatments and drying methods on structure and functional properties of pectin during the processing of okra[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106965.
- [32] ONWUDE D I, HASHIM N, CHEN G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 57: 132-145.
- [33] FERNANDES A, BARROS L, BARREIRA J C M, et al. Effects of different processing technologies on chemical and antioxidant parameters of *Macrolepota procera* wild mushroom[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 54(2): 493-499.
- [34] ZHANG J, YAGOUB A E 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.
- [35] 李佳霖, 杨焱, 李文, 等. 大球盖菇干制过程香气变化规律及与关键酶促反应的关联性[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(1): 30-42.
- LI J L, YANG Y, LI W, et al. Aroma change and its relationship with key enzymatic reactions in drying process of *Stropharia rugoso-annulata*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(1): 30-42.
- [36] 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 S Q, LIU X M, CHI J W, et al. Effects of different drying methods on quality and volatile components of *Pleurotus eryngii* [J]. Food Science, 2016, 37(4): 25-30.
- [37] 张乐, 李鹏, 王赵改, 等. 不同干燥方式对香菇品质的影响[J]. 天津农业科学, 2015, 21(7): 149-154.
- ZHANG L, LI P, WANG Z G, et al. Effects of different drying methods on quality of *Lentinus edodes* [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2015, 21(7): 149-154.
-
- (上接第 124 页)
- [9] 韩佳伟, 赵春江, 杨信廷, 等. 送风风速对苹果差压预冷性能的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 280-289.
- HAN J W, ZHAO C J, YANG X T, et al. Effect of air-inflow velocity on cooling efficiency during forced-air precooling of apples [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 280-289.
- [10] AMIT K, RAVI K, SUDHAKAR S. Numerical modeling of forced-air pre-cooling of fruits and vegetables: A review[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 145: 217-232.
- [11] 李博. 苹果的垂直送风差压预冷数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 4-6.
- LI B. Numerical simulation of the forced-air precooling of apple with vertical air supply[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 4-6.
- [12] 胡时发, 张晨阳, 王达. 荔枝差压预冷的数值模拟与实验研究[J]. 中国果菜, 2021, 41(9): 21-26.
- HU S F, ZHANG C Y, WANG D. Simulation and experimental study of Litchi's forced-air pre-cooling [J]. China Fruit & Vegetable, 2021, 41(9): 21-26.
- [13] 宫亚芳. 苹果差压预冷过程模拟及包装箱优化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020: 20-74.
- GONG Y F. A numerical study on the forced-air precooling of apple and the optimization of packaging box [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020: 20-74.
- [14] HAN J W, QIAN J P, ZHAO C J, et al. Mathematical modelling of cooling efficiency of ventilated packaging: Integral performance evaluation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 111(8): 386-397.
- [15] 贺红霞. 垂直送风差压预冷技术研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2019: 5-10.
- HE H X. Research on forced-air precooling technology of vertical air supply [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2019: 5-10.