

干燥方式对黑塌菜粉品质的影响

Effect of different drying methods on the quality of Rugao black pakchoi

杜欣雨¹ 万金庆^{1,2,3} 王园园¹

DU Xin-yu¹ WAN Jin-qing^{1,2,3} WANG Yuan-yuan¹

王友君¹ 孙晓琳¹ 童 年⁴

WANG You-jun¹ SUN Xiao-lin¹ TONG Nian⁴

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心,

上海 201306; 3. 农业部水产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室, 上海 200000;

4. 安徽宜康高新农业科技有限公司, 安徽 六安 237000)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Shanghai Aquatic Products and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306,
China; 3. Laboratory of Aquatic Products Storage and Preservation Quality Safety Risk Assessment,
Ministry of Agriculture, Shanghai 200000, China; 4. Anhui Yikang High-tech Agricultural Science
and Technology Co., Ltd., Lu'an, Anhui 237000, China)

摘要:目的:以如皋市特产富硒黑塌菜为原料,研究冰温真空干燥对黑塌菜粉品质的影响。方法:将新鲜黑塌菜预处理后,冰温真空干燥至含水率 $(5.0 \pm 0.5)\%$,并以热风干燥、真空干燥和冷冻真空干燥为对照组,考察其理化指标。结果:冰温真空干燥维生素 C 含量为 554.60 mg/100 g,保留率达 83.96%,较热风干燥、真空干燥和冷冻真空干燥分别提高了 43.11%, 33.57%, 1.61%;谷胱甘肽过氧化物酶酶活损失较小,纯度维持最好;总酚和总黄酮保留率分别为 59.69% 和 60.58%,整体优于其他 3 组;微观结构方面,冰温真空干燥组菜粉粉末分布均匀,表面光滑平整、碎屑少;相较其他 3 组,冰温真空干燥组菜粉能够保持原有深绿色泽,复水性和溶解度相较于热风干燥和真空干燥有所提高。结论:冰温真空干燥对黑塌菜粉品质影响最小,营养品质最高。

关键词:黑塌菜;冰温真空干燥;维生素 C 含量;谷胱甘肽过氧化物酶;抗氧化性

Abstract: Objective: This study aimed to investigate the effect of ice-temperature vacuum drying on the powder quality of selenium-rich Rugao black pakchoi. Methods: After pretreatment, the fresh black pakchoi was dried to the moisture content of $(5.0 \pm 0.5)\%$, and the physical and chemical indexes

were investigated, comparing to the control groups of hot-air drying, vacuum drying and freeze-vacuum drying. Results: The vitamin C content of vacuum drying at ice temperature was 554.60 mg/100 g, and the retention rate reached 83.96%, which was 43.11%, 33.57% and 1.61% higher than that of hot-air drying, vacuum drying and freeze-vacuum drying, respectively. Glutathione peroxidase had little activity loss and the best purity maintenance. The retention rates of total phenols and total flavonoids were 59.69% and 60.58%, respectively, which were better than the other three groups. In terms of microstructure, the powder of ice-temperature vacuum drying group was well-distributed, with a smooth and flat surface and less debris. Compared with the other three groups, the ice-temperature vacuum drying group could maintain the original dark green color, and the rehydration and solubility were improved. Conclusion: The ice-temperature vacuum drying process can minimally affect the Rugao black pakchoi powder, and the nutritional quality of this powder is the highest.

Keywords: black pakchoi; ice-temperature vacuum drying; V_C content; glutathione peroxidase; antioxidant properties

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:31171764)

作者简介:杜欣雨,女,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:万金庆(1964—),男,上海海洋大学教授,博士。

E-mail: jqwan@shou.edu.cn

收稿日期:2022-10-11 **改回日期:**2023-03-07

黑塌菜又名塌棵菜、乌塌菜,由芸薹进化而来,是十字花科白菜亚种的变种之一。其中江苏如皋特有的黑塌菜品种叶片肥厚、肉质鲜美,富含大量抗坏血酸(V_C)和硒元素。维生素 C 能促进胶原蛋白合成、预防坏血病及动脉粥样硬化,并能够通过清除自由基达到抗氧化的效果^[1]。硒元素参与形成谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)

及硒蛋白,与人体内抗氧化系统相关。二者通过酶的作用共同参与植物体内抗坏血酸—谷胱甘肽循环(AsA-GSH 循环),抑制脂质氧化、清除过量 H_2O_2 [2],提高机体的抗氧化能力,从而达到保护细胞、抗衰老的目的[3]。受季节影响,如皋黑塌菜一般于 12 月至翌年 2 月集中上市,多以鲜销为主,部分通过速冻的加工方式进行贮藏。新鲜黑塌菜体积较大且含水量较高,贮运过程中极易损耗。而将黑塌菜通过合适的方式进行干燥并制粉,不但能减小黑塌菜的体积、延长其保质期,还能作为配料或功能性添加剂应用于食品工业当中,可显著提高工厂的加工效率及自身的经济价值[4]。

冰温是指 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下到食品冻结之间的温度区间,在此区间细胞代谢及有害微生物的活动能够得到抑制。在冰温带由于食品不会结冰,避免了水分及营养组分随解冻液流失,细胞结构也能够得到保护[5]。冰温真空干燥即在冰温条件下对食品物料进行脱水干燥。在传统热风干燥过程中,食品因高温不可避免地出现严重皱缩,抗坏血酸、黄酮等活性成分损失严重等问题[6]。而冰温真空干燥能够大大减少因温度造成的营养损失,使得物料有可能达到接近或优于冷冻干燥产品的品质[7]。

目前有关如皋黑塌菜的研究多集中于生产与种植方面,加工贮藏方面仅有少量关于速冻技术的报道,干燥方式对黑塌菜粉品质的影响尚不清楚。而对冰温真空干燥技术的研究也多集中于苹果[8]、猕猴桃[9]等少量水果及部分水产品。研究拟利用冰温真空干燥处理如皋黑塌菜并制粉,研究菜粉品质变化情况,并与热风干燥、真空干燥及冷冻干燥作对比,揭示不同干燥方式之间的品质差异,以期为蔬菜粉的冰温干制提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

如皋黑塌菜:市售;

草酸、2,6-二氯酚靛酚钠盐、福林酚、无水乙醇:分析纯,上海泰坦科技股份有限公司;

抗坏血酸标准品、没食子酸标准品、芦丁标准品、碳酸钠、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

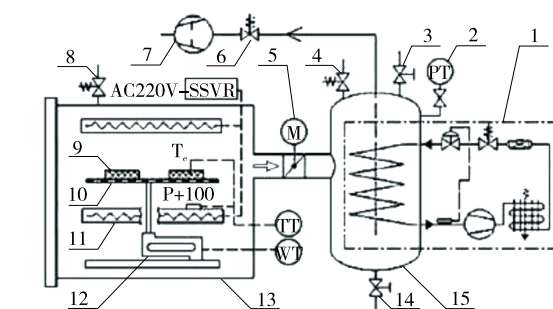
1.2 仪器与设备

冰温真空干燥试验设备(见图 1):该试验装置由制冷系统、真空系统、加热系统和控制系统组成,采用模糊控制技术将物料温度波动始终控制在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,真空压力为 $100\sim 3\,000\text{ Pa}$,通过质量传感器实现物料含水率的在线检测,实验室自行研制[10];

温度采集仪:Agilent-34972A 型,美国安捷伦公司;

冷冻真空干燥机:Minifast-04 型,爱德华天利(北京)制药系统有限公司;

电热鼓风干燥箱:DHG-9053A 型,上海一恒科学仪器有限公司;



1. 冷阱制冷机组 2. 真空压力变送器 3. 手阀 4. 放气阀
5. 电动蝶阀 6. 止油阀 7. 真空泵 8. 漏气阀 9. 物料
10. 托盘 11. 电加热板 12. 质量传感器 13. 真空箱 14. 排水阀 15. 冷阱

图 1 冰温真空干燥装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of ice-temperature vacuum-drying device

超声波均质机:XEBJ-1000 型,济宁谐成超声波设备有限公司;

速冻机:UF-RH2280LFJ 型,大连三洋压缩机有限公司;

紫外分光光度计:UV-1102 型,上海天美仪器有限公司;

色彩色差计:CR-400 型,日本柯尼卡美能达公司;

扫描电子显微镜:SU-5000 型,日本日立公司;

酶标仪:ELx-800 型,美国 Biotek 公司;

高速冷冻离心机:GL-12A 型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

恒温水浴锅:CU-420 型,常州金坛良友仪器有限公司;

多功能料理机:HCP-A6 型,中山市东风镇豪创电器厂。

1.3 试验方法

1.3.1 黑塌菜粉制备工艺流程

分选→清洗→分叶→漂烫($80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 60 s)→沥干→不同方式干燥→冰浴粉碎→过 80 目筛

(1) 热风干燥:将黑塌菜均匀平铺于盘中,热风干燥温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,干燥时间 7 h,每小时翻动一次,含水率达到 $(5.0\pm 0.5)\%$ 时停止干燥。

(2) 真空干燥:将黑塌菜均匀平铺于盘中,真空干燥温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,干燥时间 15 h,每 2 h 翻动一次,含水率达到 $(5.0\pm 0.5)\%$ 时停止干燥。

(3) 冰温真空干燥:冷阱温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,真空度 $200\sim 300\text{ Pa}$,干燥时间 24 h,由 PLC 自动控制程序控制物料温度处于 $(-1.0\pm 0.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ (测得如皋黑塌菜冰点温度为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$),含水率达到 $(5.0\pm 0.5)\%$ 时停止干燥。

(4) 冷冻真空干燥:干燥前先将黑塌菜放入速冻机中预冻 2 h,速冻机温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (测得如皋黑塌菜共晶点温度为 $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$)。将预冻好的黑塌菜平铺于物料盘中,迅

速放入冷冻真空干燥机内,冷阱温度 -40°C ,真空压力 $20\sim 30\text{ Pa}$,干燥时间 48 h ,升华干燥板层温度 -30°C ,解析干燥板层温度 15°C ,当含水率达到 $(5.0\pm 0.5)\%$ 时停止干燥。

1.3.2 抗坏血酸含量测定 按 GB 5009.86—2016 执行。

1.3.3 谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活力和比活力测定 参照谷胱甘肽过氧化物酶检测试剂盒(NADPH 法)说明书测定酶活力和比活力。

1.3.4 总酚与总黄酮含量

(1) 提取液的制备:参照文献[11]。

(2) 总酚含量测定:采用福林酚法[12],绘制的标准曲线方程为 $y=0.107\ 2x+0.057\ 9(R^2=0.998\ 6)$ 。

(3) 总黄酮含量测定:采用亚硝酸钠法[13],绘制的标准曲线方程为 $y=3.227\ 4x+0.069\ 3(R^2=0.993\ 2)$ 。

1.3.5 微观结构 将黑塌菜粉均匀铺在样品台的导电胶上,用洗耳球吹去多余粉末后喷金处理。设置加速电压 5 kV ,分别放大 $500,1\ 000$ 倍进行观察分析。

1.3.6 物理特性分析

(1) 复水性:参照文献[14],按式(1)计算复水比。

$$X=\frac{m_2-m_1}{m_1}, \quad (1)$$

式中:

X ——复水比;

m_1 ——复水前黑塌菜粉的质量,g;

m_2 ——复水后黑塌菜粉的质量,g。

(2) 溶解度:参照文献[15],按式(2)计算黑塌菜粉溶解度。

$$Y=\frac{(m_3-m_2)\times V_1}{m_1\times(1-w)\times V_2}\times 100\%, \quad (2)$$

式中:

Y ——溶解度,%;

m_1 ——黑塌菜粉样品的质量,g;

m_2 ——干燥玻璃皿的质量,g;

m_3 ——干燥后玻璃皿与固体残渣的总质量,g;

V_1 ——加入蒸馏水的体积,mL;

V_2 ——吸取上清液的体积,mL;

w ——黑塌菜粉含水率。

(3) 堆积密度:参照文献[16],按式(3)计算黑塌菜粉堆积密度。

$$Z=\frac{m_2-m_1}{10}, \quad (3)$$

式中:

Z ——堆积密度,g/mL;

m_1 ——量筒质量,g;

m_2 ——量筒和黑塌菜粉总质量,g。

(4) 色差:利用色差仪测量新鲜黑塌菜及黑塌菜粉的明暗度(L^*)、红绿度(a^*)及黄蓝度(b^*),并按式(4)计算总色差值。

$$\Delta E=\sqrt{(L^*-L_0^*)^2+(a^*-a_0^*)^2+(b^*-b_0^*)^2}, \quad (4)$$

式中:

ΔE ——总色差值;

L^*, a^*, b^* ——黑塌菜粉样品色值;

L_0^*, a_0^*, b_0^* ——新鲜黑塌菜色值。

(5) 冰点:将中心部位已插入热电偶的黑塌菜于一 20°C 冷冻,温度采集仪每 5 s 自动记录一次温度数据,直至黑塌菜中心温度降至 -18°C 以下,绘制冻结曲线[8]。

(6) 共晶点:采用电阻法[17]。

(7) 含水率:按 GB 5009.3—2016 执行。

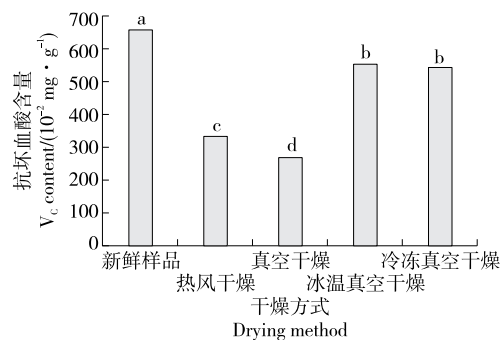
1.4 数据处理

所有试验进行3次平行,利用 Excel 2019 及 SPSS 26 软件进行数据处理与分析,利用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 对菜粉抗坏血酸含量的影响

由图 2 可知,4 种干燥方式得到的黑塌菜粉抗坏血酸含量均有不同程度的损失。新鲜黑塌菜中抗坏血酸含量(以干基计)为 $(660.55\pm 7.94)\text{ mg}/100\text{ g}$,而冰温真空干燥、冷冻真空干燥、热风干燥及真空干燥组的分别为 (554.60 ± 3.01) , (543.96 ± 7.18) , (332.82 ± 11.73) , $(269.82\pm 4.98)\text{ mg}/100\text{ g}$,保留率分别为 83.96% , 82.35% , 50.39% , 40.85% ,表明冷冻干燥和冰温真空干燥组的抗坏血酸含量显著高于热风干燥组和真空干燥组($P<0.05$)。抗坏血酸对热敏感,受光照、氧气及温度等因素影响极易分解,冰温条件有利于黑塌菜粉抗坏血酸的保留,与王丰等[18]的研究结果一致。冷冻干燥的抗坏血酸含量略低于冰温真空干燥,可能是在解析干燥阶段,加热板温度的升高导致抗坏血酸分解。此外,抗坏血酸含量可能还受干燥时间的影响,虽然真空干燥温度比热风干燥的低,冷冻干燥平均温度比冰温真空干燥的低,但干燥时间均延长了1倍以上,这可能是冰温真空干燥组的抗坏血酸保留率较高的原因之一。



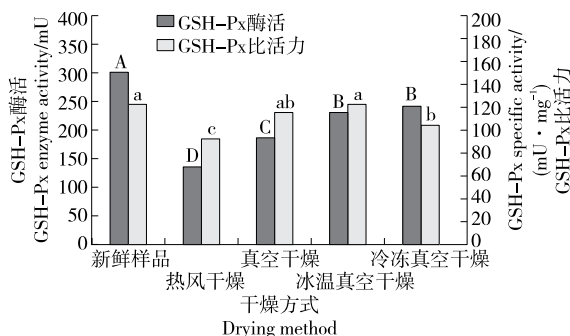
字母不同代表组间具有显著性差异($P<0.05$)

图 2 干燥方法对抗坏血酸含量的影响

Figure 2 Effects of different drying methods on the content of ascorbic acid

2.2 对菜粉 GSH-Px 活力的影响

由图 3 可知,冰温真空干燥组的 GSH-Px 活力较热风干燥组和真空干燥组的高,且具有显著性差异($P < 0.05$)。冰温真空干燥组的 GSH-Px 比活力与新鲜样品的基本保持一致,即酶的纯度基本不受影响,其他 3 组的比活力均有不同程度下降,其中热风干燥组和冷冻干燥组相较冰温真空干燥组具有显著性差异($P < 0.05$)。推测热风干燥组是由于高温破坏酶的结构,从而导致 GSH-Px 纯度降低。冷冻干燥组则可能是由于黑塌菜冻结过程中生成的冰晶刺破细胞膜,导致细胞内容物流出,降低了 GSH-Px 的纯度。此外,冷冻可能导致酶蛋白的立体结构被破坏,尽管其一级结构保持不变,但已不具备原先的生理功能,使得有效酶的浓度下降,酶的纯度降低。而冰温真空干燥组的黑塌菜全程处于低温但不冻结的状态,不但最大程度降低了温度对酶的影响,还较好地维持了细胞的结构,使 GSH-Px 的酶活和纯度均处于一个较高的水平。因此,冰温真空干燥更适合对黑塌菜的干燥处理。



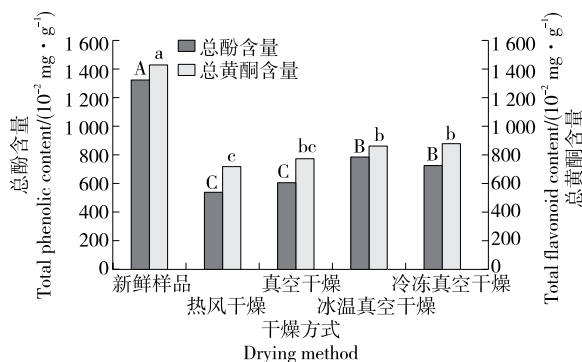
字母不同代表组间具有显著性差异($P < 0.05$)

图 3 干燥方法对 GSH-Px 酶活及比活力的影响

Figure 3 Effects of different drying methods on the enzymatic activity and specific activity of GSH-Px

2.3 对菜粉总酚、总黄酮含量的影响

由图 4 可知,新鲜黑塌菜中总酚、总黄酮含量(以干基计)分别为 1 324.42, 1 426.56 mg/100 g;不同干燥方式得到的黑塌菜粉中的总酚和总黄酮含量均有所损失(以干基计),其中冰温真空干燥组的黑塌菜粉总酚保留率最高为 59.69%,黄酮保留率为 60.50%;热风干燥得到的黑塌菜粉酚类物质与黄酮类物质损失最为严重,总酚保留率仅为 40.99%、总黄酮保留率为 50.30%。低温低压为酚类物质的保留创造了良好的条件,提高了黑塌菜粉的抗氧化性。但低压条件并不能消除氧气,干燥时间过长,菜粉中酚类物质容易被氧化从而造成损失,因此冷冻干燥得到的菜粉相较新鲜样品总酚含量仍有显著下降。此外,冰温真空干燥能够较好地维持黑塌菜细胞的完整性,而冷冻干燥过程中的冰晶升华导致物料比表面积增大,这也是冷冻干燥得到的黑塌菜粉总酚含量降低的原因。影响黄酮类物质的重要因素除温度以外还有干燥时间和



字母不同代表组间具有显著性差异($P < 0.05$)

图 4 干燥方法对总酚、总黄酮含量的影响

Figure 4 Effects of different drying methods on contents of total phenols and total flavones

真空压力,低温虽然能够保留更多的黄酮类物质,但长时间的干燥也会导致总黄酮含量降低^[19]。不同干燥组别之间黄酮含量的差异相对较小,但相对于热风干燥组和真空干燥组,冰温真空干燥组的总黄酮含量仍相对较高。相较于冷冻干燥组,冰温真空干燥组在保留率仅相差 1.22% 的情况下,节省了 1/2 以上的干燥时间,大大降低了能耗,提高了干燥效率。综合来看,冰温更有利于富含酚类、黄酮类蔬菜的干燥。

2.4 对菜粉微观结构的影响

由图 5 可知,冰温真空干燥组与冷冻干燥组的微观结构呈现出相似的表现,两组菜粉颗粒较小且分布较均匀,颗粒表面光滑平整,仅附着少量细小碎片。这可能是由于低温减缓了叶片表层的干燥速率,使得水分迁移速度与表面水分逸出速度能够长时间保持在一个平衡状态,减小了组织细胞塌陷的程度,因此叶片硬度较小,更容易破碎成细腻的粉末。而较小的粒径和光滑的表面能够提高菜粉的流动性、改善溶解性及复水性等粉质特性。冷冻干燥组颗粒表面相对碎屑更多,可能是由于干燥过程中细胞内部产生的不规则冰晶对细胞壁和细胞膜等组织造成一定的损伤,细胞破损和内容物流出。冰晶升华后,破损的细胞碎片附着在叶片上形成了碎屑。而冰温真空干燥组叶片中的自由水始终处于不冻结的状态,细胞具有更完整的结构,减少了出现碎屑的可能。热风干燥组菜粉粉末不均匀,较大块的颗粒边缘多棱角,颗粒表面粗糙不平,附着大量片状碎屑。这可能是由于热风干燥过程中,黑塌菜叶片表面温度较高、干燥速率快,迅速在表面形成了一层致密的硬壳。在内部水分向外迁移的过程中不断收缩塌陷,最终导致黑塌菜堆叠成坚硬的组织结构,不利于破碎成细腻均匀的蔬菜粉末。真空干燥组的黑塌菜粉表面裂纹和棱角相较于热风干燥组有所减少,但真空干燥组由于干燥时间过长,样品塌陷程度较高,结块现象明显,导致干燥后的叶片质地坚硬,难以破碎,真空干燥组较其他 3 组粉末颗粒更大、质感更为粗

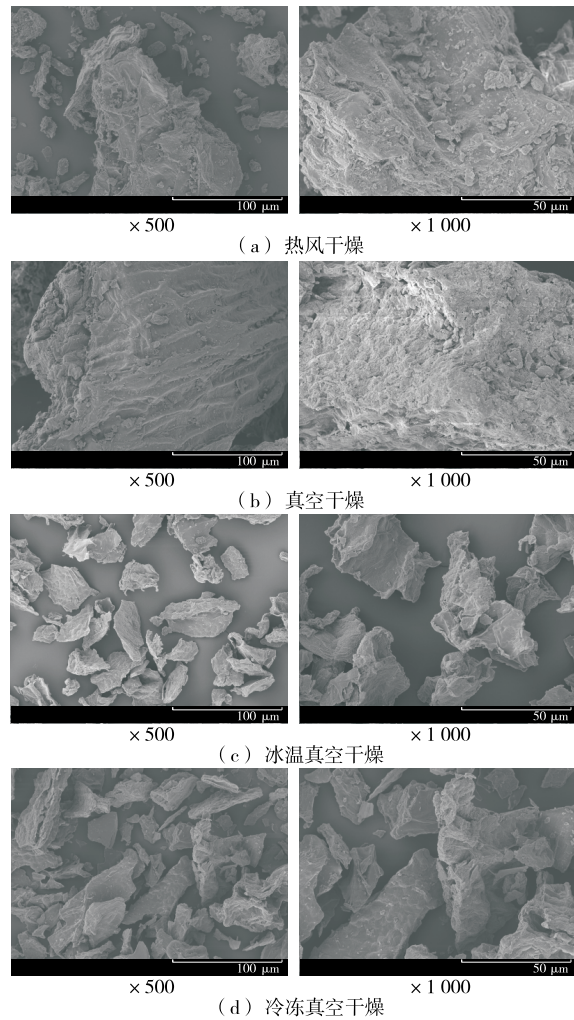


图 5 不同干燥方法制得菜粉的微观结构
Figure 5 Microstructure of vegetable powder obtained by different drying methods

糙。冰温真空干燥得到的黑塌菜粉从外观、质地和细腻程度相较其他 3 组均要好。

2.5 对菜粉粉质的影响

由表 1 可知,冷冻干燥组的复水效果最好,与其他 3 组相比具有显著性差异($P<0.05$);冰温真空干燥组的复水性与热风组、真空组的差异不明显。在溶解度方面,4 种干燥方式表现出了与复水性相同的趋势,其中冰温真

空干燥相较于热风干燥和真空干燥均表现出显著性差异($P<0.05$)。高温干燥初期,干燥速率快、细胞失水速率高,细胞会快速收缩塌陷,使细胞间空隙减小,所得干制品质地坚硬,复水性差。此外,长时间的高温还会使蔬菜中的果胶等亲水性物质性状发生改变,进一步降低了蔬菜干制品的复水率。坚硬的质地使蔬菜打粉时更难破碎成细小的粉末,导致溶解度降低。低温则避免了亲水性物质的变性与损失,使得蔬菜干燥后的质地更加蓬松酥脆,更易打粉,并提高了菜粉的溶解度。冷冻干燥过程主要是冰晶直接升华而除去水分,避免了细胞失水时的塌陷,细胞间保留了较大的孔隙,形成了疏松多孔的组织结构,因而复水和溶解时更易结合水分子。因此,冰温真空干燥得到的黑塌菜粉的复水性和溶解度略低于冷冻干燥。

冰温真空干燥和冷冻干燥得到的蔬菜粉堆积密度基本一致,且与热风干燥和真空干燥得到的蔬菜粉差异显著($P>0.05$)。这可能是由于较低温度下得到的蔬菜粉颗粒间空隙更大、低密度纤维更多,导致冰温真空干燥和冷冻干燥得到的蔬菜粉堆积密度更小。

表 1 干燥方式对菜粉粉质的影响[†]

Table 1 Effects of drying methods on the quality of vegetable flour

干燥方式	复水性	溶解性/%	堆积密度/ ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)
热风干燥	3.10 ± 0.55^b	22.08 ± 0.68^c	0.60 ± 0.02^a
真空干燥	2.53 ± 0.66^b	20.40 ± 1.92^c	0.63 ± 0.02^a
冰温真空干燥	4.17 ± 0.06^b	30.25 ± 2.03^b	0.41 ± 0.01^b
冷冻真空干燥	9.09 ± 1.77^a	35.59 ± 1.97^a	0.41 ± 0.02^b

[†] 字母不同代表组间具有显著性差异($P<0.05$)。

2.6 对菜粉色差的影响

由表 2 可知,不同干燥方式均会提高黑塌菜粉的明度,且温度越低,明度值改变越小、颜色保留越好。在绿度方面,低温组与高温组之间具有明显差异,推测可能是干燥过程中受温度影响,叶绿素大量损失,使最终干燥所得的塌菜粉的颜色向黄褐色发展。此外,高温下发生的美拉德反应等非酶促褐变也会导致菜粉最终颜色的劣

表 2 干燥方式对菜粉色差的影响[†]

Table 2 Effects of drying methods on the color of vegetable flour

干燥方式	L^*	a^*	b^*	ΔE
新鲜样品	38.96 ± 1.02^d	-11.51 ± 0.83^c	13.06 ± 1.84^b	—
热风干燥	60.59 ± 0.72^a	-5.66 ± 0.12^a	17.52 ± 0.31^a	23.19 ± 0.71^a
真空干燥	60.67 ± 0.76^{ab}	-5.94 ± 0.05^a	14.48 ± 0.62^b	22.46 ± 0.77^a
冰温真空干燥	59.20 ± 0.35^{bc}	-9.49 ± 0.38^b	13.64 ± 0.48^b	20.39 ± 0.67^b
冷冻真空干燥	58.20 ± 0.96^c	-10.06 ± 0.65^b	13.87 ± 1.23^b	19.34 ± 0.99^b

[†] 字母不同代表组间具有显著性差异($P<0.05$)。

变^[20]。低温除了尽可能保留叶绿素外,还抑制了多酚氧化酶等酶的酶活,减少了酶促褐变的发生,使得最终菜粉颜色能够保持鲜绿色。从总色差值来看,冰温真空干燥组的 ΔE 也相对较小,说明低温条件下干燥得到的菜粉成品更接近于新鲜样品原有的色泽。且冰温真空干燥组得到的黑塌菜粉无论从明度、绿度还是总色差方面,都极为接近冷冻干燥组的品质。

3 结论

研究了不同干燥方式对如皋黑塌菜粉理化性质及功能活性组分的影响。结果表明,冰温真空干燥所得菜粉在抗坏血酸、总酚含量的保留上表现得最好,保留率分别为 83.96% 和 59.69%;在总黄酮含量上,冰温真空干燥组所得菜粉品质接近冻干组水平,远优于其他两组;在 GSH-Px 活性方面,冰温真空干燥组酶活损失较小、酶的比活力最高。即冰温真空干燥能够有效保留菜粉中的活性组分、降低 GSH-Px 的损失,保持了酶的纯度;从外观上看,冰温真空干燥组菜粉粉质细腻均匀,表面光滑平整;菜粉具有浓绿的色泽。在复水性和溶解度方面,冰温真空干燥虽略逊于冷冻干燥,但仍比传统热风干燥提高了约 35%。此外,更小的堆积密度使得其在分售时能够以同样的质量在视觉上呈现出更大的体积,有效提高其经济价值。当前研究表明冰温干燥技术能更好地保留黑塌菜的活性组分、维持其理化特性,但并未对活性组分的效果进行进一步探究。综合来看,冰温干燥技术为未来多种果蔬的干燥提供了更多的可能,未来可以对冰温干燥果蔬的抗氧化活性及贮藏特性进行进一步研究。

参考文献

- [1] 刘馥源, 黄占旺, 沈勇根, 等. 香菇多酚超声波提取工艺及抗氧化性分析[J]. 中国调味品, 2022, 47(3): 14-20.
LIU F Y, HUANG Z W, SHEN Y G, et al. Ultrasonic extraction technology and antioxidant activity of polyphenols from *Lentinus edodes*[J]. Food & Machinery, 2022, 47(3): 14-20.
- [2] HASANUZZAMAN M, NAHAR K, ANEE T I, et al. Exogenous silicon attenuates cadmium-induced oxidative stress in *Brassica napus* L. by modulating AsA-GSH pathway and glyoxalase system [J]. Frontiers in Plant Science, 2017(8): 01061.
- [3] SUN Y H, WANG H Z, ZHOU L, et al. Distribution characteristics of organic selenium in Se-enriched *Lactobacillus* (*Lactobacillus paracasei*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 165: 113699.
- [4] KARAM M C, PETIT J, ZIMMER D, et al. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 188: 32-49.
- [5] 冷平. 冰温贮藏水果、蔬菜等农产品保鲜的新途径[J]. 中国农业大学学报, 1997(3): 79-83.
LENG P. Controlled freezing-point storage: A new approach for fresh-keeping fruits and vegetables[J]. Journal of China Agricultural

University, 1997(3): 79-83.

- [6] LUIS V, RAGYA K, BORIS N, et al. Application of different drying methods for evaluation of phytochemical content and physical properties of broccoli, kale, and spinach[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 155: 112892.
- [7] 鲁晓翔, 张平, 王世军. 果蔬冰温贮藏及其关键技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2010, 10(6): 1-5.
LU X X, ZHANG P, WANG S J. Research progress of controlled freezing-point storage and its key technology of fruits and vegetables[J]. Storage and Process, 2010, 10(6): 1-5.
- [8] 邢娜, 万金庆, 厉建国, 等. 不同干燥方法对苹果片品质及微观结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(16): 148-154.
XING N, WAN J Q, LI J G, et al. Effects of different drying methods on the quality and microstructure of apple slices[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(16): 148-154.
- [9] 康方圆, 申江, 张川. 冰温真空干燥压力对猕猴桃切片干燥品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(24): 191-193, 200.
KANG F Y, SHEN J, ZHANG C. Effects of ice-temperature vacuum drying pressure on quality of kiwifruit slices [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(24): 191-193, 200.
- [10] 杨帆, 万金庆, 厉建国, 等. 盐渍冰温脱水虾仁的贮藏性研究[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 447-454.
YANG F, WAN J Q, LI J G, et al. Storage properties of shrimp muscle under low salt-controlled freezing-point dehydration [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(3): 447-454.
- [11] 高欣月, 万金庆, 厉建国, 等. 两种浓缩工艺对苹果浊汁贮藏期品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 114-120, 135.
GAO X Y, WAN J Q, LI J G, et al. Effects of different concentration processes on quality and antioxidant activity of apple turbid juice[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(14): 114-120, 135.
- [12] LIN L, ZHAO H, DONG Y, et al. Macroporous resin purification behavior of phenolics and rosmarinic acid from *Rabdosia serra*, (MAXIM.) HARA leaf [J]. Food Chemistry, 2011, 130(2): 417-424.
- [13] 杨春艳, 邹兰, 叶玉华, 等. 刺梨原汁酒中总黄酮的测定[J]. 现代食品, 2020(3): 185-187.
YANG C Y, ZOU L, YE Y H, et al. Determination of total flavonoids in *rosa roxburghii* juice wine [J]. Modern Food, 2020(3): 185-187.
- [14] KIM S H, CHOI Y J, LEE H, et al. Physicochemical properties of jujube powder from air, vacuum, and freeze drying and their correlations [J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2012, 55(2): 271-279.
- [15] 林炎娟, 周丹蓉, 吴如健, 等. 不同干燥方式对橄榄果粉品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 90-97.
LIN Y J, ZHOU D R, WU R J, et al. Effects of different drying methods on the quality characteristics of olive powder [J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 90-97.

(下转第 160 页)

- 统[J]. 农机化研究, 2021, 12(5): 235-239.
- ZHOU W, XU Y R. Intelligent control system of fruit classification based on PLC and image processing[J]. Agricultural Mechanization Research, 2021, 12(5): 235-239.
- [13] 赵小霞, 李志强. 基于 PLC 和机器视觉的水果自动分级系统研究[J]. 农机化研究, 2021, 12(8): 75-79.
- ZHAO X X, LI Z Q. Research on automatic fruit grading system based on PLC and machine vision[J]. Agricultural Mechanization Research, 2021, 12(8): 75-79.
- [14] 海潮, 赵凤霞, 孙烁. 基于 Blob 分析的红枣表面缺陷在线检测技术[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 126-129.
- HAI C, ZHAO F X, SUN S. On-line detection technology of red jujube surface defects based on Blobanalysis [J]. Food & Machinery, 2018, 34(1): 126-129.
- [15] 杨双艳, 杨紫刚, 张四伟, 等. 基于近红外光谱和 PSO-SVM 算法的烟叶自动分级方法[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(12): 141-144.
- YANG S Y, YANG Z G, ZHAGN S W, et al. Automatic tobacco grading method based on near infraredspectroscopy and PSO-SVM algorithm [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2018, 46(12): 141-144.
- [16] 王阳阳, 黄勋, 陈浩, 等. 基于同态滤波和改进 K-means 的苹果分级算法研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 47-51, 112.
- WANG Y Y, HUANG X, CHEN H, et al. Apple grading algorithm based on homomorphic filtering and improved K-means[J]. Food & machinery, 2019, 35(12): 47-51, 112.
- [17] 王立扬, 张瑜, 沈群, 等. 基于改进型 LeNet-5 的苹果自动分级方法[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(7): 105-110.
- WANG L Y, ZHANG Y, SHEN Q, et al. Automatic apple classification method based on improvedlenet-5[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanochemistry, 2020, 41(7): 105-110.
- [18] 于蒙, 李雄, 杨海潮, 等. 基于图像识别的苹果的等级分级研究[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(7): 39-43.
- YU M, LI X, YANG H C, et al. Apple grading based on image recognition[J]. Automation and Instrumentation, 2019, 34(7): 39-43.
- [19] 樊泽泽, 柳倩, 柴洁玮, 等. 基于颜色与果径特征的苹果果实检测与分级[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(9): 1 599-1 607.
- FAN Z Z, LIU Q, CHAI J W, et al. Apple fruit detection and grading based on color and fruit diameter characteristics [J]. Computer Engineering and Science, 2020, 42(9): 1 599-1 607.
- [20] 王冉冉, 刘鑫, 尹孟, 等. 面向苹果硬度检测仪的声振信号激励与采集系统设计[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(1): 111-118.
- WANG R R, LIU X, YIN M, et al. Design of acoustic vibration signal excitation and acquisition system for apple hardness tester [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences Edition), 2020, 46(1): 111-118.
- [21] 刘英, 周晓林, 胡忠康, 等. 基于优化卷积神经网络的木材缺陷检测[J]. 林业工程学报, 2019, 4(1): 115-120.
- LIU Y, ZHOU X L, HU Z K, et al. Wood defect detection based on optimized convolutional neural network [J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4(1): 115-120.
- [22] 王泽霞, 陈革, 陈振中. 基于改进卷积神经网络的化纤丝饼表面缺陷识别[J]. 纺织学报, 2020, 41(4): 39-44.
- WANG Z X, CHEN G, CHEN Z Z. Surface defect recognition of chemical fiber cake based on improved convolutional neural network[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(4): 39-44.
- [23] 王志中. 基于改进蚁群算法的机器人路径规划研究[J]. 机械设计与制造, 2018, 12(1): 242-244.
- WANG Z Z. Research on mobile robot path planning based on improved ant colony algorithm [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2018, 12(1): 242-244.
- [24] 杨志锐, 郑宏, 郭中原, 等. 基于网中网卷积神经网络的红枣缺陷检测[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 140-145, 181.
- YANG Z R, ZHENG H, GUO Z Y, et al. Defect detection of jujube based on convolutional neural network of net in net[J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 140-145, 181.
- [25] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1 137-1 149.
- (上接第 154 页)
- [16] ZHAO X, YANG Z, GAI G, et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 217-222.
- [17] 许晴晴, 陈杭君, 邵海燕. 真空冷冻和热风干燥对蓝莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 64-68.
- XU Q Q, CHEN H J, GAO H Y. Effects of vacuum freeze-drying and hot-air drying on the quality of blueberry fruits [J]. Food Science, 2014, 35(5): 64-68.
- [18] 王丰, 李保国, 申江, 等. 胡萝卜冰温干燥实验研究[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(1): 101-104.
- WANG F, LI B G, SHEN J, et al. Study oncontrolled freezing-point dried processing of carrot [J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(1): 101-104.
- [19] 李恩婧, 李次力, 王吉, 等. 干燥方式对野生蒲公英品质的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(6): 70-73.
- LI E J, LI C L, WANG J, et al. Effect of dryingmethods on the physico-chemical and sensory quality of taraxacum officinale[J]. Food & Machinery, 2012, 28(6): 70-73.
- [20] 李静, 李顺峰, 王安建, 等. 适宜热烫条件保持双孢蘑菇片品质和颜色[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 268-273.
- LI J, LI S F, WANG A J, et al. Appropriate water blanching treatment to keep quality and color of agaricus bisporus slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 268-273.