

不同干燥方式下菠菜粉理化性质的比较

宋娟¹, 张海燕¹, 袁晶¹, 曾朝珍¹, 慕钰文¹, 康三江^{1*}, 李玉新¹, 苟丽娜^{1,2}

(1. 甘肃省农业科学院农产品贮藏加工研究所, 甘肃兰州 730070)

(2. 甘肃省农业大学食品科学与工程学院, 甘肃兰州 730070)

摘要:以菠菜为原料, 采用热风、太阳能、真空冷冻和喷雾干燥共4种干燥方式制备菠菜粉, 考察不同干燥方式对菠菜粉色泽、抗氧化活性、微观结构等理化性质的影响。结果表明: 喷雾干燥的L*值较高为33.28, a*值最小为-5.86, 对菠菜粉色泽影响较小; 与鲜样相比, 4种干燥方式制备菠菜粉的色泽、叶绿素、抗坏血酸、总酚、总黄酮的含量及抗氧化活性均有所降低, 而且4种干燥方式对菠菜粉抗氧化活性的影响较大, 喷雾干燥的抗氧化活性最高, 热风干燥的抗氧化活性最低; 相关性分析显示, 菠菜粉的总酚、总黄酮和抗坏血酸与其抗氧化活性显著正相关($p < 0.05$); 通过粒度分布仪和SEM分析, 喷雾干燥制备的菠菜粉中位粒径 $D_x(50)$ 减小至17.76 μm 、比表面积增大到228.3 m^2/kg 、跨度值减小为2.87, 菠菜粉呈短小的圆棒状或圆球状, 颗粒小且分布均匀, 部分表面较圆润, 细胞结构保持较好, 优于其它3种干燥方式。综合分析, 喷雾干燥是制备菠菜粉的最佳干燥方式, 较适于高抗氧化活性的菠菜粉的工业生产, 为菠菜粉产品的精深加工提供科学依据。

关键词: 喷雾干燥; 真空冷冻干燥; 菠菜粉; 抗氧化活性; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2021)09-207-215

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.9.0127

Comparison of Physicochemical Properties of Spinach Powder Using Different Drying Methods

SONG Juan¹, ZHANG Hai-yan¹, YUAN Jing¹, ZENG Chao-zhen¹, MU Yu-wen¹, KANG San-jiang^{1*}, LI Yu-xin¹,
GOU Li-na^{1,2}

(1. Agricultural Product Storage and Processing Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China) (2. College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Spinach powder was prepared by hot air drying, solar drying, vacuum freeze drying and spray drying. The effects of different drying methods on the color, antioxidant activity, microstructure and other physicochemical properties of spinach powder were investigated. The results showed that the L* value of spray drying was 33.28 and the a* value was -5.86, which had little effect on the color of spinach powder. Compared with the fresh control, the contents of chlorophyll ascorbic acid total phenols and total flavonoids and antioxidant activity of spinach powder prepared by four drying methods were decreased, and the four drying methods had a greater effect on the antioxidant activity of spinach powder, spray drying had the highest antioxidant activity, and hot air drying had the lowest antioxidant activity. Correlation analysis showed that the total phenols, flavonoids and ascorbic acid of spinach powder were significantly positively correlated with their antioxidant activity ($p < 0.05$). Through particle size distribution analyzer and SEM analysis, the median particle size $D_x(50)$ of spinach powder prepared by spray drying decreased to 17.76 μm , the specific surface area increased to 228.3 m^2/kg , and the span value decreased to 2.87. Spinach powder was a short round rod-shaped or spherical, the particles were small and evenly distributed, part of the surface was round, the cell structure was better maintained compared with the other three drying methods. Based on the comprehensive analysis, spray drying was the best drying method for

引文格式:

宋娟,张海燕,袁晶,等.不同干燥方式下菠菜粉理化性质的比较[J].现代食品科技,2021,37(9):207-215

SONG Juan, ZHANG Hai-yan, YUAN Jing, et al. Comparison of physicochemical properties of spinach powder using different drying methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(9): 207-215

收稿日期: 2021-02-03

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-27); 甘肃省农业农村厅科技计划项目 (GNKJ-2018-9)

作者简介: 宋娟 (1988-), 女, 助理研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: songjuan88126@126.com

通讯作者: 康三江 (1977-), 男, 研究员, 研究方向: 果蔬加工技术, E-mail: kang58503@163.com

preparing spinach powder, which was more suitable for industrial production of spinach powder with high antioxidant activity, and provided scientific basis for the deep processing of spinach powder products.

Key words: spray drying; vacuum freeze drying; spinach powder; antioxidant activity; microstructure

菠菜 (*Spinacia oleracea* L.) 又名波斯草, 苋科, 富含维生素和多种矿物质, 具有很高的营养价值和药理功能^[1,2]。由于菠菜水分大, 采收后易腐烂变质、货架期短, 降低了经济效益。目前由果蔬直接加工成果蔬粉已经成为新的趋势, 提高了果蔬原料的加工利用率, 被广泛应用在家庭调味品、快餐食品和方便食品^[3]。常见的菠菜粉加工方法一般包括喷雾干燥、超微粉碎 (微波真空干燥、热泵干燥、远红外干燥等)^[4]。

近年来, 诸多研究集中在比较不同干燥方式对菠菜粉理化品质的影响, 尤其是喷雾干燥对菠菜粉品质影响显著。Syamila 等^[5]研究发现和冷冻干燥相比, 喷雾干燥菠菜粉的干燥速度更快, 较好的保留 β -胡萝卜素 (2.64 mg/g) 和 α -生育酚 (1.02 mg/g) 的含量。Çalışkan 等^[6]研究表明喷雾干燥中不同的干燥剂 (麦芽糊精、乳清粉和阿拉伯胶) 和不同的进/出口空气温度 (160~200 °C/80~100 °C) 可以显著降低菠菜粉的总叶绿素、褐变指数、水分和总酚含量, 但是显著提高了菠菜粉的 pH 和总颜色变化 ($p < 0.05$)。Östbring 等^[7]采用滚筒干燥、冷冻干燥和喷雾干燥的方式研究了菠菜粉叶绿素含量, 结果表明, 滚筒干燥后菠菜粉的叶绿素受热降解, 叶绿素含量较低, 冷冻干燥叶绿素含量较高, 喷雾干燥的菠菜类囊体中叶绿素和乳化率最高。李昌文等^[8]研究了与真空和热风干燥相比, 喷雾干燥的菠菜粉的粉质特性和感官评价最好。然而, 国内外针对不同干燥方式对菠菜粉抗氧化活性、微观结构等理化性质影响的研究鲜有报道。

本试验以新鲜的菠菜为试材, 通过热风、太阳能、真空冷冻和喷雾干燥方式, 以理化性质作为检测指标, 采用粒度分析仪和扫描电镜, 分析不同干燥方式对菠菜粉粒径、抗氧化活性和微观结构的影响, 探究适合菠菜粉品质提升的干燥方式, 为高质量菠菜粉的产业化提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;试剂

1.1.1 材料

菠菜“绿神 1”, 采购于甘肃省永登县, 挑选无病虫害的植株, 清洗去根, 切分段 (3.0~4.0 cm), 然后进行不同干燥方式制备样品, 每次物料量为 1 kg, 平行测 3 次。

1.1.2 试剂

碳酸氢钠 (食品级): 河南华悦化工产品有限公司; 硫酸亚铁、氢氧化钠、丙酮、六水氯化铁、过氧化氢、乙醇、亚硝酸钠、盐酸、醋酸、草酸、氯化铝、碳酸钠、水杨酸: 天津市富宇精细化工有限公司; 石英砂: 天津大茂; 福林酚、 Fe^{3+} -三吡啶三吡嗪 (TPTZ)、水溶性维生素 E (Trolox)、2,6-二氯酚、没食子酸 (>99%)、芦丁: 美国 Sigma 生物科技有限公司。

1.2 试验仪器

DHG-9145A 型电热恒温鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; Scientz-10ND 原位普通型真空冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技有限公司; 自制太阳能干燥装置 (太阳能干燥装置主要由四部分组成, 基本构架部分、干燥室、太阳能接收部分和通风除湿及控制系统); SP-1500 实验型喷雾干燥机, 上海顺仪实验设备有限公司; WZJ-6BI 振动式药物超微粉碎机, 广州旭朗机械设备有限公司; CR-400 型色差计, 日本柯尼卡美能达公司; UV2400 紫外可见分光光度计, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司; TGL-16LM 高速冷冻离心机, 湖南星科科学仪器有限公司; BL-2200H 电子天平, 日本岛津仪器公司; Bettersize2600 激光粒度分布仪, 丹东市皓宇科技有限公司; JSM-6701F 冷场发射型扫描电镜, 日本电子光学公司。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程

(1) 新鲜菠菜 → 分选 → 清洗 → 去根 → 切段 → 漂烫 → 0.2% 无水碳酸氢钠溶液护色 → 热风/太阳能/真空冷冻干燥 → 粗粉碎 (用万能粉碎机对菠菜干制品进行粗粉碎, 过 60 目筛后得到粗粉) → 过筛 → 超微粉碎 (振荡式药物超微粉碎机, 对其进行干法粉碎 40 min, 过最细 160 目的滤网) → 样品

(2) 新鲜菠菜 → 分选 → 清洗 → 去根 → 切段 → 漂烫 → 0.2% 无水碳酸氢钠溶液护色 → 打浆 (1:1 加水) → 过胶体磨 → 均质 → 喷雾干燥 → 样品

1.3.2 干燥条件

(1) 热风干燥: 烘箱温度为 50 °C, 风速 1 m/s, 每 0.5 h 测定一次水分, 干燥到原料水分指标低于 8% (干基计);

(2) 太阳能干燥: 在自建的太阳能干燥车间进行昼夜连续干燥, 温度为 20 °C~50 °C, 风速 1 m/s, 每

0.5 h 测定一次水分,干燥到原料水分指标低于 8%(干基计);

(3) 真空冷冻干燥:用原位真空冷冻干燥机干燥样品,真空度 1.0 Pa,冷阱温度-58.7℃~-59.3℃;每 0.5 h 测定一次水分,干燥到原料水分指标低于 8%(干基计);

(4) 喷雾干燥:用喷雾干燥机干燥样品,菠菜汁进口温度 $T_i=160^\circ\text{C}$,出口温度 $T_0=70^\circ\text{C}\sim 72^\circ\text{C}$,蠕动泵流量 $S=50\text{ mL/min}$,风机频率 40 Hz,干燥到原料水分指标低于 8%(干基计)。

1.3.3 测定方法

1.3.3.1 粒径

采用激光粒度分布仪湿法测定,重复 5 次。

1.3.3.2 色泽

采用 CIELAB 表色系统测定样品的 L^* 、 a^* 和 b^* ,平行测 5 次。通过公式计算:

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

式中: L^* 、 a^* 和 b^* 是干燥样品的色泽值, L_0 、 a_0 和 b_0 是鲜样色泽值。

1.3.3.3 叶绿素

检测参考成启明等^[9]的方法:称 2 g 鲜样或者 1 g 干制品,用丙酮(80%)萃取到无色,定容于 50 mL 后避光放置 16 h,取上清液分别于 645 nm、663 nm 测定吸光值,实验重复 3 次取平均值。通过公式计算:

$$C_a(\text{mg/g DM}) = (12.7OD_{663} - 2.69OD_{645})V/1000m(1-G)$$

$$C_b(\text{mg/g DM}) = (22.9OD_{645} - 4.68OD_{663})V/1000m(1-G)$$

$$C_T(\text{mg/g DM}) = C_a + C_b$$

式中: C_a 为叶绿素 a 的浓度(mg/g DM); V 为容量瓶体积(L); m 为样品质量(g); G 为样品的含水量(%); C_b 为叶绿素 b 的浓度(mg/g DM); C_T 为总叶绿素浓度(mg/g DM)。

1.3.3.4 抗坏血酸

检测参考 Nizori 等^[10]的方法。称 2 g 鲜样或者 1 g 干制品,在 2%草酸溶液 5 mL 研磨,定容 25 mL,离心 4°C 、10000 r/min、15 min,吸上清液 20 mL 用 2,6-二氯靛酚溶液 15 s 内微红色不退色。

1.3.3.5 总酚

检测参考 Gallegos-Infante 等^[11]的方法,略有改动。称 2 g 鲜样或者 1 g 干制品,吸取 80%乙醇 20 mL,超声处理 30 min 的提取液浓缩到 25 mL。吸 1 mL 浓缩液,加入福林酚 1 mL,7.5% Na_2CO_3 溶液 3 mL 和蒸馏水 5 mL 混合后, 40°C 水浴 15 min,测定 765 nm 吸光值,平行测 3 次。

1.3.3.6 总黄酮

检测参考 Osae^[12]、聂继云等^[13]的方法,略有改动。

取上述总酚浓缩液 1 mL,加入 5%亚硝酸钠溶液 0.3 mL、蒸馏水 5 mL、10%铝盐溶液 0.3 mL、1 mol/L 氢氧化钠溶液 2 mL,混合均匀后定容到 10 mL,以芦丁为标样制作标准曲线,测定 510 nm 吸光值,平行测 3 次。

1.3.3.7 总抗氧化能力

检测参考 Duthie^[14]、Drakou 等^[15]的方法,略有改动。将上述提取液稀释至总酚浓度为 120 mg/L,取 20 μL 稀释后的提取液、去离子水 1 mL 和 FRAP 溶液(10 mmol/L TPTZ 溶液、20 mmol/L 六水氯化铁溶液、pH 3.6 的 0.3 mmol/L 醋酸缓冲液,采用 1:1:10 的比例配置) 1.8 mL, 37°C 孵化 10 min,检测 593 nm 的吸光值,平行测 3 次;以 Trolox 为标样制作标准曲线计算。

1.3.3.8 羟自由基清除率

试管中吸取 1.5 mL 样液,1 mL 硫酸亚铁(4.5 mmol/L),1 mL 水杨酸-乙醇溶液(4.5 mmol/L),10.5 mL 蒸馏水,1 mL H_2O_2 (10 mmol/L), 37°C 水浴 30 min,测定 510 nm 吸光度^[16]。通过公式计算:

$$\text{羟自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - (A_x - A_{x_0})}{A_0} \times 100\%$$

式中: A_x 指加样品的吸光值; A_0 指空白组的吸光值; A_{x_0} 指不加 H_2O_2 吸光值。

1.3.3.9 超氧阴离子清除能力

取 4.5 mL Tris-HCl 缓冲液(50 mmol/L, pH 8.2)和 4.2 mL 蒸馏水, 25°C 水浴 20 min,取出加入 0.3 mL 邻苯三酚(3 mmol/L),混匀,每隔 30 s,测定 325 nm 吸光度^[17]。通过公式计算:

$$\text{超氧阴离子清除率}(\%) = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\%$$

式中: A_0 指邻苯三酚的自氧化速率; A 指加入总多酚样液后邻苯三酚的氧化速率。

1.3.3.10 微观结构

为了分析不同干燥方式对菠菜粉组织结构的影响,通过扫描电镜(SEM)观察菠菜粉($\times 1000$ 倍)的微观结构。

1.3.3.11 微生物指标

菌落总数、大肠杆菌、沙门氏菌、至贺氏菌、金黄色葡萄球菌:分别参照中华人民共和国国家标准 GB 4789.2-2016、GB 4789.3-2016、GB 4789.4-2016、GB 4789.5-2016、GB 4789.10-2016,委托兰州中检检测技术有限公司依据相应标准进行判定。

1.4 数据方式

本实验所有指标测定均重复 3 次,所示数据均为 3 次平行的平均值。采用 Excel 2010、SPSS 22.0 对数

据进行整理与分析,采用 Origin 8.5 进行制图,方差分析结果用字母 a~d 表示,数据以(均值±标准差)表示。

2 结果与分析

2.1 干燥方式对菠菜粉理化性质的影响

2.1.1 粒径分布

从表 1 可以看出,不同干燥方式对菠菜粉粒径大小和比表面积的影响差异显著 ($p<0.05$)。其中,喷雾干燥的中位粒径 $Dx(50)$ 最小,比表面积最大,而热风干燥的 $Dx(50)$ 最大,比表面积最小。和其它 3 种干燥方式相比,喷雾干燥菠菜粉的中位粒径 $Dx(50)$ 降低

到 $17.76\ \mu\text{m}$, $D[3,2]$ 降低到 $24.36\ \mu\text{m}$, $D[4,3]$ 降低到 $9.75\ \mu\text{m}$, 比表面积增加到 $228.3\ \text{m}^2/\text{kg}$, 跨度减小到 2.87, 这表明喷雾干燥使菠菜粉粒径减小、比表面积增大、跨度值减小。这可能是由于热风和太阳能干燥时间较长,物料表面硬化及收缩,所以干燥后组织致密、硬,破碎难度大,粒径大棱角多,真空冷冻干燥的物料预冻和冷冻过程中均处于静止状态,真空冷冻干燥的样品体积保持较好,脆性好,易破碎,所以粒径小,棱角小;喷雾干燥过程中由于料液浓度、雾化时雾滴的大小等因素决定菠菜粉粒径较小,导致每单位重量的菠菜粉中含有更多的颗粒,使得与其他物质结合时接触面积更大,更容易混合均匀。

表 1 干燥方式对菠菜粉粒径的影响

Table 1 Influence of different drying methods on the particle size of spinach powder

干燥方式	D[3,2]/ μm	D[4,3]/ μm	$Dx(10)/\mu\text{m}$	$Dx(50)/\mu\text{m}$	$Dx(90)/\mu\text{m}$	比表面积/ (m^2/kg)	跨度(SPAN)	遮光率/%
热风干燥	114.53 ± 0.38^a	18.00 ± 0.59^a	6.54 ± 0.22^b	69.95 ± 0.58^a	287.93 ± 0.67^a	123.47 ± 0.47^c	4.02 ± 0.12^b	2.07 ± 0.01^b
太阳能干燥	128.19 ± 0.26^a	19.49 ± 0.37^a	7.07 ± 0.34^a	70.35 ± 0.37^a	291.06 ± 0.51^b	137.91 ± 0.77^c	4.61 ± 0.3^a	2.18 ± 0.09^a
真空冷冻干燥	64.92 ± 0.38^b	12.37 ± 0.42^b	5.62 ± 0.29^b	38.91 ± 0.46^b	159.81 ± 0.42^c	189.36 ± 0.67^b	3.09 ± 0.28^c	1.49 ± 0.04^c
喷雾干燥	24.36 ± 0.27^c	9.75 ± 0.51^b	4.08 ± 0.18^c	17.76 ± 0.36^c	55.12 ± 0.52^d	228.3 ± 0.21^a	2.87 ± 0.05^d	1.15 ± 0.03^d

注:同一列数据后不同小写字母表示样品间差异显著 ($p<0.05$); $D[3,2]$ 为表面积平均粒径, $D[4,3]$ 为体积平均粒径, $Dx(10)$ 、 $Dx(50)$ 、 $Dx(90)$ 分别为粉体粒径累计分布达到 10%、50%、90% 时对应的粒径。

2.1.2 色泽

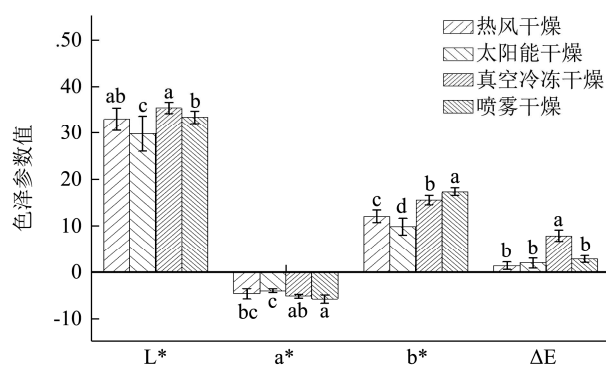


图 1 干燥方式对菠菜粉色泽的影响

Fig.1 Effects of different drying methods on the color of spinach powder

注:图中字母相同表示不同干燥方式对菠菜粉色泽的差异不显著 ($p>0.05$), 不同则表示差异显著 ($p<0.05$), 图 1~6 同。

从菠菜粉色泽测定结果如图 1, 不同干燥方式下的菠菜粉的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值差异显著, 温度越高产品 L^* 值越大, 亮度越高, a^* 值越小, 绿越深, ΔE 值越小, 与鲜样颜色越接近。热风、太阳能、真空冷冻干燥和喷雾干燥的样品间色泽值存在显著差异 ($p<0.05$)。其中, 真空冷冻干燥 ΔE 值最大为 7.82,

与鲜样原色差异较大, 色泽不佳; 热风干燥、太阳能干燥和喷雾干燥 ΔE 值较低, 且不同干燥处理之间无显著差异 ($p>0.05$), 但喷雾干燥的 L^* 值较高为 33.28, a^* 值最小为 -5.86, 太阳能干燥的 L^* 值最低为 29.73, a^* 值最大为 -4.1, 表明喷雾干燥制备的菠菜粉, 颜色较绿, 与原色最接近, 这与蒋鹏飞等^[18]的研究结果一致, 可能是由于干燥方式中干燥温度和干燥时间的不同, 使菠菜粉发生不同程度的酶促褐变和非酶褐变, 从而引起菠菜粉色泽的变化。

2.1.3 叶绿素含量

从图 2 可以看出, 相对于新鲜菠菜, 不同干燥方式均会使菠菜粉的叶绿素含量显著降低 ($p<0.05$)。不同干燥方式对菠菜粉的叶绿素含量由大到小为: 喷雾干燥 ($6.85\ \text{mg/g}$) > 真空冷冻干燥 ($5.24\ \text{mg/g}$) > 热风干燥 ($4.48\ \text{mg/g}$) > 太阳能干燥 ($4.12\ \text{mg/g}$), 其中喷雾干燥与热风、太阳能和真空冷冻干燥样品的叶绿素含量均存在显著差异 ($p<0.05$)。这与王冬梅^[19]等的研究结果类似, 干燥后菠菜粉的叶绿素含量减少除了损耗外, 可能还有干燥后物料性质变化导致提取困难的原因, 而且叶绿素是非常不稳定的非水溶性色素物质, 热风、太阳能、真空冷冻干燥过程中可能由于干燥时间过长导致叶绿素降解, 使得检测到叶绿素含量很少,

然而喷雾干燥的时间短,环境密闭且菠菜粉雾化后水分含量比较高,避免叶绿素的降解或变质,可以保持样品原色,这与图1变化趋势相符。

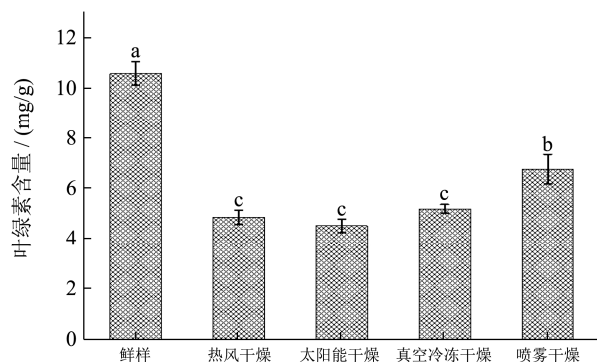


图2 干燥方式对菠菜粉叶绿素含量的影响

Fig.2 Effects of different drying methods on on the content of chlorophyll in spinach powder

2.1.4 抗坏血酸含量

从图3可以看出,相对于新鲜菠菜,不同干燥方式均会使菠菜粉的抗坏血酸含量显著降低 ($p<0.05$)。不同干燥方式对菠菜粉抗坏血酸含量由大到小为:真空冷冻干燥 (883.94 $\mu\text{g/g}$) > 喷雾干燥 (862.82 $\mu\text{g/g}$) > 太阳能干燥 (694.83 $\mu\text{g/g}$) > 热风干燥 (561.68 $\mu\text{g/g}$), 其中,喷雾干燥与热风、太阳能干燥样品的抗坏血酸含量存在显著差异 ($p<0.05$),而与真空冷冻干燥样品的抗坏血酸含量不存在显著差异 ($p>0.05$)。这与雷湘兰等^[20]研究结果是一致的,抗坏血酸是一种热敏感化合物,尤其在热风、太阳能和喷雾干燥的高温环境中容易分解,导致抗坏血酸含量降低,然而在低温和真空条件下的真空冷冻干燥对菠菜粉的抗坏血酸的降解较少,对抗坏血酸的保留效果最佳。

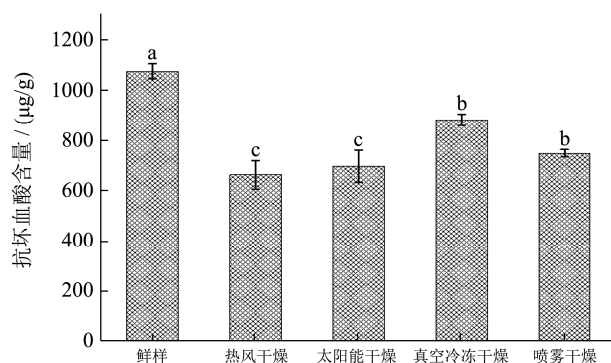


图3 干燥方式对菠菜粉抗坏血酸含量的影响

Fig.3 Effects of different drying methods on the content of ascorbic acid in spinach powder

2.1.5 总酚含量

酚类物质是果蔬中常见的一类重要的抗氧化物质。由图4可知,相对于新鲜菠菜,不同干燥方式均会使菠菜粉的总酚含量显著降低 ($p<0.05$)。不同干

燥处理菠菜粉的总酚含量大小关系是:喷雾干燥 (14.10 mg/g) > 真空冷冻干燥 (12.53 mg/g) > 热风干燥 (11.81 mg/g) > 太阳能干燥 (11.74 mg/g)。和鲜样相比,经热风、太阳能、真空冷冻干燥和喷雾干燥样品的总酚分别损失了 40.93%、41.22%、37.30%、30.01%;喷雾干燥与热风、太阳能和真空冷冻干燥样品的总酚存在显著差异 ($p<0.05$),这与康志敏等^[21]的研究结果相符。产生显著差异的原因一方面是损耗和干燥后导致酚类物质提取困难,另一方面是热风与太阳能干燥的样品由于较高温度促进原料发生氧化反应,真空冷冻样品由于低温产生的冰晶造成细胞结构破损,导致总酚含量流失,然而喷雾干燥的菠菜汁雾化后水分含量比较高,有效防止热敏性物质的分解,保护易氧化成分,致使菠菜粉的总酚含量损失较小。结果表明,喷雾干燥对菠菜粉的总酚的保护效果最好。

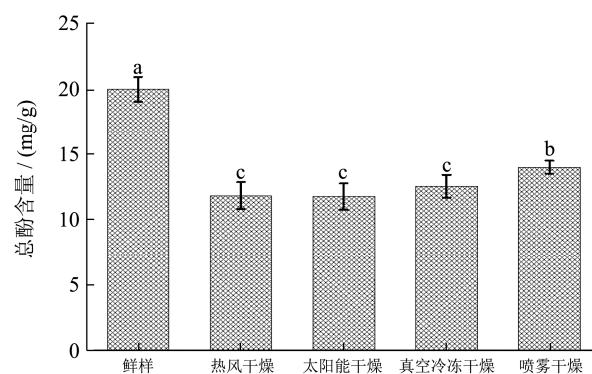


图4 干燥方式对菠菜粉总酚含量的影响

Fig.4 Effects of different drying methods on total phenol content of spinach powder

2.1.6 总黄酮含量

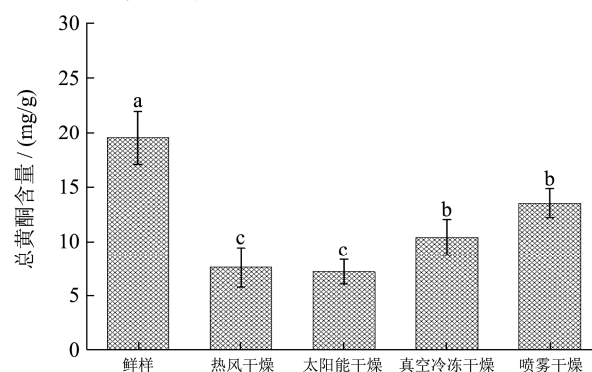


图5 干燥方式对菠菜粉总黄酮含量的影响

Fig.5 Effects of different drying methods on total flavonoids content in spinach powder

从图5可知,相对于新鲜菠菜,不同干燥方式均会使菠菜粉的总黄酮含量显著降低 ($p<0.05$)。4种干燥方式对菠菜粉总黄酮含量由大到小为:喷雾干燥 (13.49 mg/g) > 真空冷冻干燥 (10.36 mg/g) > 热风干

燥 (7.56 mg/g) > 太阳能干燥 (7.14 mg/g)。和鲜样相比, 经热风、太阳能和真空冷冻干燥样品的总黄酮含量分别损失了 61.20%、63.37%、46.87%、41.07%。其中, 喷雾干燥与热风、太阳能干燥样品的总黄酮含量存在显著差异 ($p < 0.05$), 而与真空冷冻干燥样品的总黄酮含量不存在显著差异 ($p > 0.05$)。这与潘少香^[22]等的研究报道类似, 可能因为干燥后物料性质变化导致提取困难和损耗外, 还有热风与太阳能干燥过程中由于高温促使热敏性物质发生氧化反应, 导致黄酮大量损失, 然而喷雾干燥和真空冷冻干燥在低温条件下使得物料的总黄酮保留较好。

2.2 抗氧化活性

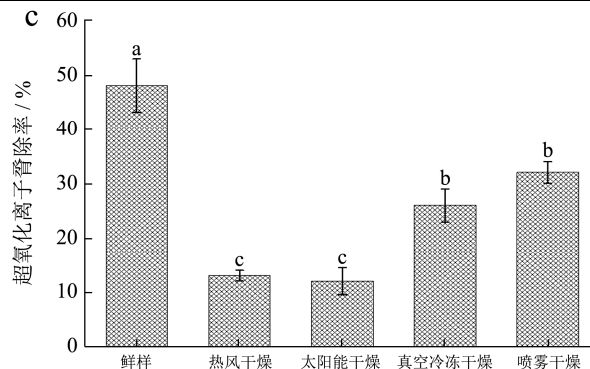
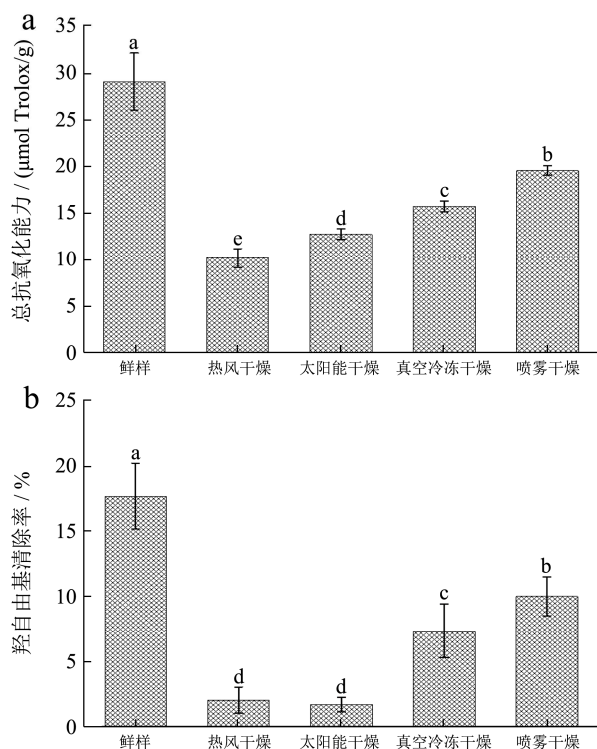


图 6 干燥方式对菠菜粉抗氧化活性的影响

Fig.6 Effects of different drying methods on antioxidant activity of spinach powder

注: (a) 干燥方式对菠菜粉总抗氧化能力的影响; (b) 干燥方式对菠菜粉羟自由基清除率的影响; (c) 干燥方式对菠菜粉超氧阴离子清除率的影响。

由图 6 可知, 相对于新鲜菠菜, 不同种干燥方式均会使菠菜粉的抗氧化活性显著降低 ($p < 0.05$)。其中, 喷雾干燥处理的菠菜粉抗氧化活性最高。和鲜样相比, 经热风、太阳能、真空冷冻和喷雾干燥样品的总抗氧化能力分别损失了 65.27%、56.43%、46.08%、33.01%, 羟自由基清除率分别损失了 88.96%、90.56%、58.49%、43.39%, 超氧阴离子清除率分别损失了 88.96%、90.56%、58.49%、43.39%。这与于漫漫^[23]等的研究结果类似, 可能是因为喷雾干燥的菠菜汁雾化后水分含量比较高, 有效防止抗氧化物质的降解; 真空冷冻干燥在真空和低温条件下隔绝了氧气, 氧化反应减少了, 使得抗氧化活性较高; 然而热风干燥与太阳能干燥方式的样品在干燥过程中的由于高温使得原料发生氧化反应, 促进了抗氧化物质的降解, 一定程度上降低了抗氧化活性。结果表明, 喷雾干燥的菠菜粉具有更好的抗氧化能力。

表 2 相关性分析

Table 2 Correlation analysis

指标	总酚	总黄酮	抗坏血酸	总抗氧化能力	羟自由基清除率	超氧阴离子清除率
总酚	1.00					
总黄酮	0.968**	1.00				
抗坏血酸	0.899*	0.824	1.00			
总抗氧化能力	0.966**	0.943*	0.931*	1.00		
羟自由基清除率	0.946*	0.881*	0.943*	0.984**	1.00	
超氧阴离子清除率	0.931*	0.861	0.941*	0.977**	0.991**	1.00

说明: **表示在 0.01 水平显著相关, *表示在 0.05 水平显著相关。

2.3 相关性分析

由相关性分析可知, 菠菜粉的总酚、总黄酮、抗坏血酸与总抗氧化能力、羟自由基清除率以及超氧阴

离子清除率均呈显著正相关 ($p < 0.05$)。其中, 总酚与菠菜粉总抗氧化能力之间的相关性最高为 0.966 ($p < 0.01$), 总黄酮与菠菜粉总抗氧化能力之间的相关性为 0.943 ($p < 0.05$), 抗坏血酸与菠菜粉羟自由基清

除率之间的相关性为 0.943 ($p < 0.05$), 说明总酚、总黄酮和抗坏血酸对菠菜粉的抗氧化活性相关性贡献较大。

2.4 微观结构

利用扫描电镜 (SEM) 对放大 1000 倍的菠菜粉进行观察发现, 不同干燥方式对菠菜粉微观结构影响很大。由图 7 可知, 热风 and 太阳能干燥的菠菜粉存在较大的组织碎块, 颗粒表面粗糙且出现棱角和裂纹、呈不规则片状结构、分布不均, 可能是热风与太阳能干燥使样品表面硬化和收缩, 所以干燥后样品致密, 硬度大, 破碎难, 所以粒径大, 棱角多 (图 7a、b); 真空冷冻干燥的菠菜粉大小和分布不均匀, 表面结构较圆润, 可能与其物料在低温状态下形成冰晶的相互作用使物料随意组合有关, 样品硬度小, 易破碎, 所以粒径小, 棱角小 (图 7c); 喷雾干燥的菠菜粉组织细小, 基本呈短小的圆棒状或圆球状, 颗粒饱满, 大小和分布相对较均匀, 有许多乳状突起, 部分表面光滑圆润, 部分颗粒表面有凹陷孔洞, 部分粉体之间更易发生粘团聚聚现象, 这与李明娟^[24]、石云娇等^[25]的研究结果类似, 由于喷雾干燥的料液流动性好, 雾化出的雾滴较小, 导致喷雾干燥制备的菠菜粉粒径小, 细胞结构较好, 且变小的粒径具有更强的吸附作用, 这种表现形态有助于改善菠菜粉的粉质特性 (如溶解性、复水性), 而且食用方便, 便于贮藏和运输 (图 7d)。

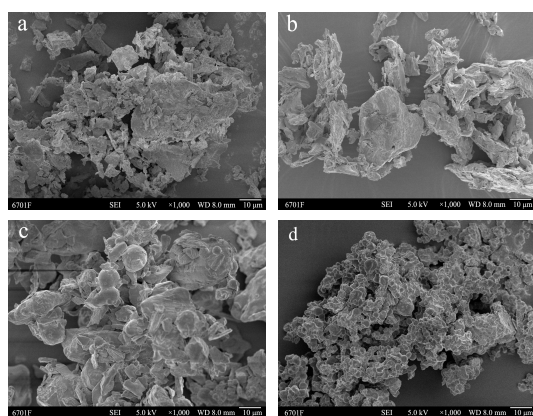


图 7 干燥方式对菠菜粉微观结构的影响

Fig.7 Effects of different drying methods on the microstructure of spinach powder

注: a 为热风干燥菠菜粉; b 为太阳能干燥菠菜粉; c 为真空冷冻干燥干燥菠菜粉; d 为喷雾干燥菠菜粉。

2.5 微生物指标

对喷雾干燥制备的菠菜粉样品进行微生物指标检测, 从表 3 的检测和判定结果可以看出, 喷雾干燥菠

菜粉各项指标均达到食品安全国家标准的要求, 因此采用喷雾干燥制备菠菜粉是可行的, 所得产品安全健康。

表 3 微生物指标检测

Table 3 Microbial index detection

项目	计量单位	方式要求	检测结果	单项判定
菌落总数	CFU/g	$\leq 2.0 \times 10^4$	110	符合
大肠杆菌	MPN/g	< 3.0	< 3.0	符合
沙门氏菌	/25 g	不得检出	未检出	符合
志贺氏菌	/25 g	不得检出	未检出	符合
金黄色葡萄球菌	/25 g	不得检出	未检出	符合

3 结论

3.1 与新鲜菠菜相比, 经过热风、太阳能、真空冷冻和喷雾干燥制备的菠菜粉色泽、叶绿素、抗坏血酸、总酚、总黄酮、抗氧化活性均有所下降, 微观结构也出现不同程度的形变。同其它 3 种干燥方式相比, 喷雾干燥制备的菠菜粉的色泽与鲜样较接近 (L^* 值较高为 33.28, a^* 值最小为 -5.86), 而真空冷冻干燥的菠菜粉 ΔE 值最大为 7.82, 色泽不佳; 喷雾干燥菠菜粉的叶绿素含量最高为 6.85 mg/g, 抗氧化活性最强, 而真空冷冻干燥的抗坏血酸含量最高为 883.94 $\mu\text{g/g}$; 通过激光粒度分布仪分析, 喷雾干燥制备的菠菜粉粒径中位粒径 $D_x(50)$ 减小至 17.76 μm 、比表面积增大到 228.3 m^2/kg 、跨度值减小为 2.87; 通过 SEM 观察出喷雾干燥制备的的菠菜粉呈短小的圆棒状或圆球状, 颗粒小且大小和分布相对较均匀, 部分表面光滑圆润, 部分颗粒表面有凹陷孔洞, 细胞结构保持较好。

3.2 虽然, 真空冷冻干燥处理的菠菜粉抗坏血酸活性保留最好, 但是色泽不佳, 从耗时长、成本高、能耗大角度考虑, 真空冷冻干燥不适合菠菜粉工业化生产; 喷雾干燥对菠菜粉的色泽、叶绿素、总酚、总黄酮含量的保留效果好, 抗氧化活性最高, 而且操作简单、干燥时间短、投资小, 具有很好的应用前景, 是制备高质量菠菜粉产品的较优的一种方法。但是, 喷雾干燥过程中不可避免会有设备堵塞或老化, 物料挂壁等问题, 导致果蔬粉的制备效率降低, 本课题组将会深入研究不同喷雾干燥参数对果蔬有效营养成分和集粉率的影响, 构建干燥数学模型, 添加辅料复配功能性果蔬粉, 建立品质评价体系, 以期提高菠菜粉的附加值, 为喷雾干燥制备功能性复配果蔬粉的精深加工提供数据支持和理论依据。

参考文献

[1] Liu X, Lu L, Chen Q, et al. Ammonium reduces oxalate

- accumulation in different spinach (*Spinacia oleracea* L.) genotypes by inhibiting root uptake of nitrate [J]. Food Chemistry, 2015, 186: 312-318
- [2] 徐悦.菠菜(*Spinacia oleracea* L.)毛状根诱导与高效基因组编辑体系的建立[D].哈尔滨:东北林业大学,2019
XU Yue. Spinach (*Spinacia oleracea* L.) hairy root induction and establishment of efficient genome editing system [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019
- [3] Shende D, Datta A K. Refractance window drying of fruits and vegetables: a review [J]. Journal of The Science of Food and Agriculture, 2019, 99(4): 1449-1456
- [4] Dadali G, Ozbek B. Kinetic thermal degradation of vitamin C during microwave drying of okra and spinach [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2009, 60(1): 21-31
- [5] Syamila M, Gedi M A, Briars R, et al. Effect of temperature, oxygen and light on the degradation of β -carotene, lutein and α -tocopherol in spray-dried spinach juice powder during storage [J]. Food Chemistry, 2019, 284: 188-197
- [6] Çalışkan K G, Nur D S. Spray drying of spinach juice: characterization, chemical composition, and storage [J]. Food Science, 2017, 82(12): 2873-2884
- [7] Östbring K, Sjöholm I, Sörenson H, et al. Characteristics and functionality of appetite-reducing thylakoid powders produced by three different drying processes [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(4): 1554-1565
- [8] 李昌文,纵伟,陈俊锋.不同干燥工艺对菠菜粉品质的影响[J].北方园艺,2013,23:152-154
LI Chang-wen, ZONG Wei, CHEN Jun-feng. Effects of different drying methods on the quality of spinach powder [J]. Northern Horticulture, 2013, 23: 152-154
- [9] 成启明,刘丽英,格根图,等.不同收获期苜蓿干燥过程中叶绿素含量的变化规律研究[J].黑龙江畜牧兽医,2019,20: 109-113,117
CHENG Qi-ming, LIU Li-ying, GE Gen-tu, et al. Study on the variation of chlorophyll content during alfalfa drying in different harvesting periods [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2019, 20: 109-113, 117
- [10] Nizori A, Bui L T T, Jie F, et al. Spray-drying microencapsulation of ascorbic acid: impact of varying loading content on physicochemical properties of microencapsulated powders [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(11): 4165-4171
- [11] Gallegos-Infante J A, Rocha-Guzman N E, González-Laredo R F, et al. Effect of air flow rate on the polyphenols content and antioxidant capacity of convective dried cactus pear cladodes (*Opuntia ficus indica*) [J]. Food Science and Nutrition, 2009, 2: 80-87
- [12] Osae R, Zhou C, Xu B, et al. Effects of ultrasound, osmotic dehydration, and osmosonication pretreatments on bioactive compounds, chemical characterization, enzyme inactivation, color, and antioxidant activity of dried ginger slices [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(5): 1-14
- [13] 聂继云,吕德国,李静,等.分光光度法测定苹果果实总黄酮含量的条件优化[J].果树学报,2010,27(3):466-470
NIE Ji-yun, LYU De-guo, LI Jing, et al. Condition optimization for spectrophotometric method of total flavonoids in apple fruit [J]. Journal of Fruit Science, 2010, 27(3): 466-470
- [14] Duthie G, Campbell F, Bestwick C, et al. Antioxidant effectiveness of vegetable powders on the lipid and protein oxidative stability of cooked Turkey meat patties: implications for health [J]. Nutrients, 2013, 5(4): 1241-1252
- [15] Drakou M, Birmpa A, Koutelidakis A E, et al. Total antioxidant capacity, total phenolic content and iron and zinc dialyzability in selected Greek varieties of table olives, tomatoes and legumes from conventional and organic farming [J]. Food Science and Nutrition, 2015, 66(2): 197-202
- [16] 罗敬文,司风玲,顾子玄,等.3种木耳多糖的抗氧化活性与抑菌能力比较分析[J].食品科学,2018,39(19):64-69
LUO Jing-wen, SI Feng-ling, GU Zi-xuan, et al. Antioxidant and antimicrobial activities of polysaccharides from three species of *Auricularia* [J]. Food Science, 2018, 39(19): 64-69
- [17] Bai K, Hong B, He J, et al. Antioxidant capacity and hepatoprotective role of chitosan-stabilized selenium nanoparticles in concanavalin A-induced liver injury in mice [J]. Nutrients, 2020, 12(3): 857
- [18] 蒋鹏飞,王赵改,史冠莹,等.不同干燥方式的苦瓜粉品质特性及香气成分比较[J].现代食品科技,2020,36(3):234-244
JIANG Peng-fei, WANG Zhao-gai, SHI Guan-ying, et al. Quality characteristics and aroma components of bitter melon (*Momordica charantia* L.) powder dried by different methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(3): 234-244
- [19] 王冬梅,江连洲,赵晓燕,等.干燥过程中甘蓝叶绿素降解动力学研究[J].食品科学,2012,33(17):64-67
WANG Dong-mei, JIANG Lian-zhou, ZHAO Xiao-yan, et al. Kinetic modeling of chlorophyll degradation in cabbages during vacuum drying [J]. Food Science, 2012, 33(17): 64-67

- [20] 雷湘兰,孙倩,王宇鸿.不同干燥方式对佛手瓜全粉品质的影响[J].现代食品,2016,15:82-85
LEI Xiang-lan, SUN Qian, WANG Yu-hong. Effect of different drying methods on the quality of chayote powder [J]. Modern Food, 2016, 15: 82-85
- [21] 康志敏,郭东旭,何梦影,等.不同干燥工艺对鲜玉米粉品质及风味的影响[J].食品工业科技,2020,41(18):58-63,69
KANG Zhi-min, GUO Dong-xu, HE Meng-ying, et al. Effect of different drying methods on the quality and flavor profiles of fresh corn flour [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(18): 58-63, 69
- [22] 潘少香,郑晓冬,刘雪梅,等.热风干燥和喷雾干燥对果蔬粉品质的影响[J].中国果菜,2019,39(2):6-9,14
PAN Shao-xiang, ZHENG Xiao-dong, LIU Xue-mei, et al. Effect of hot air drying and spray drying technology on fruit and vegetable powder quality [J]. China Fruit Vegetable, 2019, 39(2): 6-9, 14
- [23] 于漫漫.喷雾干燥工艺和贮藏条件对草莓粉抗氧化性的影响[D].扬州:扬州大学,2016
YU Man-man. Effect of spray drying and storage conditions on antioxidant activity of strawberry powder [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016
- [24] 李明娟,张雅媛,游向荣,等.不同干燥方式对核桃蛋白粉品质特性及微观结构的影响[J].食品科学,2021,42(5):92-98
LI Ming-juan, ZHANG Ya-yuan, YOU Xiang-rong, et al. Effects of different drying techniques on quality characteristics and microstructure of walnut protein powder [J]. Food Science, 2021, 42(5): 92-98
- [25] 石云娇,张华江,牟钰德,等.喷雾干燥对骨多肽粉理化性质及微观结构影响[J].食品工业,2015,36(10):210-213
SHI Yun-jiao, ZHANG Hua-jiang, MU Yu-de, et al. Effects of spray-drying on the physicochemical properties and microscopic structure of bone protein polypeptide powder [J]. The Food Industry, 2015, 36(10): 210-213

(上接第 199 页)

- [17] 吴西芝,刘宝林,樊海涛.低场核磁共振分析仪研究添加剂对冷冻面团持水性的影响[J].食品科学,2012,33(13): 21-25
WU You-zhi, LIU Bao-lin, FAN Hai-tao. Effect of food additives on water-holding capacity of frozen dough examined by NMR [J]. Food Science, 2012, 33(13): 21-25
- [18] 顾丰颖,马想琴,王小鹤,等.微波加工全玉米发糕的研究[J].沈阳农业大学学报,2017,48(5):547-553
GU Feng-ying, MA Xiang-qin, WANG Xiao-he, et al. Technology and properties of whole maize steamed sponge cake cooked by microwave [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(5): 547-553
- [19] 刘彦,黄卫宁,贾春利,等.阿拉伯胶和羧甲基纤维素钠对荞麦面团发酵流变学及烘焙特性的影响[J].食品科学,2013, 34(17):5-9
LIU Yan, HUANG Wei-ning, JIA Chun-li, et al. Effects of Arabic gum and carboxymethyl cellulose on rheological and baking properties of buckwheat dough [J]. Food Science, 2013, 34(17): 5-9
- [20] 仰思颖.发酵糙米糕工艺研究及品质改良[D].无锡:江南大学,2017
YANG Si-ying. Study on the process and quality improvement of fermented brown rice steam sponge cake [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017

(上接第 241 页)

- [34] 刘西海.金属离子对蛋清蛋白质结构的影响研究[J].中国家禽,2012,1:27-31
LIU Xi-hai. Effect of metal ions on protein structure of egg white in salted duck eggs [J]. Chinese Poultry, 2012, 1: 27-31
- [35] Rigane E, Dutoit R, Matthijs S, et al. Characterization of putative virulence factors of pseudomonas aeruginosa strain rbs isolated from a saltern, Tunisia: effect of metal ion cofactors on the structure and the activity of LasB [J]. BioMed Research International, 2020, 2020
- [36] Totosaus A, Montejaño J G, Salazar J A, et al. A review of physical and chemical protein-gel induction [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2002, 37(6): 589-601