

喷雾干燥对蛋黄粉功能特性的影响

Effect of spray drying on the functional properties of egg yolk powder

昂媛¹ 段续^{1,2} 曹伟伟¹ 任广跃^{1,2} 王喆¹ 李琳琳¹

ANG Yuan¹ DUAN Xu^{1,2} CAO Wei-wei¹ REN Guang-yue^{1,2} WANG Zhe¹ LI Lin-lin¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 粮食储藏安全河南省协同中心, 河南 郑州 450001)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. Henan Cooperation Center for Grain Storage Security, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:目的:开发蛋黄粉在饲料领域、功能性食品及生物制药领域的应用。方法:以鲜鸡蛋为原料,采用喷雾干燥制备蛋黄粉,并分析不同参数对蛋黄粉卵黄抗体(IgY)含量、蛋白质结构和功能特性的影响。结果:综合考虑蛋黄粉抗体含量、理化特性和功能特性,当进口风温为140℃、进料流量为600 mL/h时,蛋黄粉的IgY含量为17.71 mg/g,溶解度为61.97%,出粉率为36.46%,水分含量为3.8%,表面疏水性为106.67 μg,持水性为3.63 g/g,持油性为3.03 g/g,乳化性为27.15%,乳化稳定性为24.48%,整体品质最好。结论:改变喷雾干燥参数在保证IgY含量较高的情况下,能保持蛋黄粉的结构完整并提高蛋黄粉的理化特性和功能特性。

关键词:卵黄抗体;蛋黄粉;喷雾干燥;抗体

Abstract: **Objective:** This study aimed to develop the application of egg yolk powder in the field of feed, functional food and biopharmaceuticals. **Methods:** Using fresh eggs as raw materials, yolk powder was prepared by spray drying, and the effects of different parameters on the content of yolk antibody (IgY), protein structure and functional properties of egg yolk powder were analyzed. **Results:** Considering the antibody content, physicochemical properties and functional properties of egg yolk powder comprehensively, when the inlet air temperature was 140℃ and the feed flow rate was 600 mL/h, the IgY content of egg yolk powder was 17.71 mg/g, and the solubility was 61.97% respectively. The powdery rate and water content was 36.46% and 3.8% respectively, and the surface hydrophobicity, water holding capacity and oil holding capacity was 106.67 μg, 3.63 g/g

and 3.03 g/g respectively. The emulsifying property was 27.15%, and the emulsifying stability was 24.48%. The overall quality is optimum. **Conclusion:** Changing the spray drying parameters can keep the structure of egg yolk powder intact and improve the physicochemical and functional properties of egg yolk powder, as well as ensure the high IgY content.

Keywords: immunoglobulin of yolk; egg yolk powder; spray drying; antibody

蛋黄是鸡蛋中带有胚盘的部分,又称卵黄。蛋黄中含有丰富的脂肪,包括中性脂肪、卵磷脂、胆固醇等,也含有丰富的钙、磷、铁等矿物质和维生素^[1]。此外,蛋黄中还含有丰富的蛋白质,其中的卵黄抗体(Immunoglobulin of yolk, IgY)即卵黄免疫球蛋白,是一种高生物价的蛋白质,被广泛应用于医学和生物领域,可用于治疗和预防人类及动物疾病^[2-4]。

蛋黄液中含有大量的水,将蛋黄液中的水分降至极低的水平不仅能抑制微生物的生长和减慢化学反应的速度,解决新鲜鸡蛋容易变质和破损的问题,脱水后还便于贮藏和运输,降低了销售成本^[5-6]。蛋黄粉是以新鲜蛋黄为原料,采用干燥技术制备而成的粉制品,是卵黄抗体粉开发的重要形式,具有广泛的用途^[7]。目前主要采用喷雾干燥和真空冷冻干燥来制备蛋黄粉,少部分采用真空干燥、托盘干燥和滚筒干燥^[8]。刘静波等^[9]制备了一种速溶蛋黄粉,当喷雾流量为17.37 mL/min,进料温度为35.65℃,进风温度为185.36℃时,速溶蛋黄粉溶解度为98.74 g/100 g,且颗粒结构较完整,稳定性较好,具有良好的复水性;王清平等^[10]研究发现,经巴氏杀菌(65℃下灭菌5 min)后进行喷雾干燥(进风温度170℃,出口风温68~70℃),此时对IgY活性的影响非常小,且蛋黄粉水分含量达标;程方圆^[11]发现,喷雾干燥蛋黄粉的最佳工艺参数为进口风温180℃、蛋液质量浓度0.25 g/mL、进料流

基金项目:河南省引进国外智力专项(外国专家项目)计划(编号: HNGD2021040)

作者简介:昂媛,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:段续(1973—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: duanxu_dx@163.com

收稿日期:2022-04-15 **改回日期:**2022-09-08

量 7.4 g/min、抽气流量 10 L/min。目前,有关喷雾干燥制备蛋黄粉的研究主要考察溶解度、出粉率、蛋白质含量和磷脂含量等指标,对 IgY 含量、表面疏水性、持油性及持水性、乳化能力及乳化稳定性等功能特性的研究较少。

研究拟以鲜鸡蛋为原料,采用喷雾干燥方法制备蛋黄粉,分析不同干燥参数对蛋黄粉中 IgY 抗体含量及其结构的影响;分析不同工艺条件对蛋黄粉溶解度和乳化性等功能特性的影响,以期对蛋黄粉在饲料领域、功能性食品及生物制药领域的开发应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红壳鸡蛋:未受精,单个约 60 g,市售;

ELISA 试剂盒:中国上海钰博生物技术有限公司;

PBS(pH 7.4)、溴酚蓝(分析纯):中国天津迪安化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

喷雾干燥机:YC-015 实验型,上海雅程仪器设备有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:101-2 型,北京科伟永兴仪器有限公司;

台式高速离心机:TG16-WS 型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-2600 型,龙尼柯(上海)仪器有限公司;

数显磁力加热搅拌器:HJ-6A 型,常州普天仪器制造有限公司;

扫描电子显微镜:TM3030Plus 型,日本日立高新技术公司;

电子天平:A.2003N 型,上海佑科仪器仪表有限公司;

酶标仪:Multiskan FC 型,赛默飞世尔仪器有限公司;

色差仪:Xrite color i5 型,美国爱色丽公司。

1.3 试验方法

1.3.1 蛋黄预处理

红壳鸡蛋→洗净→打蛋、蛋清分离→加水搅拌($V_{\text{蛋黄液}}:V_{\text{蒸馏水}}$ 为 1:2)→喷雾干燥→出粉→冷却→包装

1.3.2 喷雾干燥单因素试验及组合试验 控制进料流量 600 mL/h,调节进口风温为 100,120,140,160,180 ℃进行单因素试验;控制进口风温 140 ℃,调节进料流量为 400,500,600,700,800 mL/h 进行单因素试验。在单因素试验基础上按表 1 进行最优参数组合试验,以 IgY 含量和溶解度为指标。

1.3.3 IgY 含量测定 采用酶联免疫分析试剂盒进行测定。

表 1 组合试验参数

Table 1 Combined test parameters

试验号	进口风温/℃	进料流量/(mL·h ⁻¹)
1	120	500
2	120	600
3	120	700
4	140	500
5	140	600
6	140	700
7	160	500
8	160	600
9	160	700

1.3.4 溶解度测定 根据 GB 5413.29—2010 并稍作修改,按式(1)计算样品溶解度。

$$X=100-\frac{(m_2-m_1)\times 100}{(1-0.038)\times m}, \quad (1)$$

式中:

X ——样品溶解度,g/100 g;

m ——样品质量,g;

m_1 ——称量皿质量,g;

m_2 ——称量皿和不溶物干燥后质量,g。

1.3.5 水分含量测定 根据 GB 5009.3—2016 中的直接干燥法。

1.3.6 出粉率测定 根据陈珂等^[12]的方法并稍作修改,按式(2)计算出粉率。

$$c=\frac{m_1}{m_2}\times 100\%, \quad (2)$$

式中:

c ——样品出粉率,%;

m_1 ——干燥后粉末固形物质量,g;

m_2 ——进料溶液中总固形物质量,g。

1.3.7 微观结构表征 采用 TM3030 Plus 扫描电子显微镜进行测定,用镊子将待测蛋黄粉均匀涂在粘有双面胶的测量台上,用镀膜仪进行离子溅射喷金,将处理好的蛋黄粉在 15 kV 加速电压下进行微观结构表征^[9]。

1.3.8 色差测定 采用色差仪测定干燥后样品的 L^* (亮度)、 a^* (红绿值)和 b^* (黄蓝值),每组样品测定 3 次,取平均值。

1.3.9 傅里叶变换中远红外法(FT-IR) 将蛋黄粉样品按质量比 1:100 加入到研磨好的干燥溴化钾中,在钨光灯下研磨均匀,用便携式压片机压成均匀透明的圆状薄片,用傅里叶变换中远红外仪进行红外光谱全波段扫描(4 000~400 cm⁻¹),扫描频次 64 次,分辨率 4 cm⁻¹,每个样品测定 3 次。

1.3.10 表面疏水性测定 根据 Shen 等^[13]的方法并稍作

修改。取 1 mL 溶解后的蛋黄粉液加入 200 μ L 溴酚蓝溶液(1 mg/mL)涡旋混匀,室温下静置 10 min,作为样品组。用 1 mL 去离子水代替 1 mL 溶解后的蛋黄粉溶液和 200 μ L 溴酚蓝溶液涡旋混匀,作为空白对照组。10 000 r/min 离心 15 min,取上清液稀释 10 倍,测定 595 nm 处吸光值,按式(3)计算表面疏水性。

$$X = 200 \times \frac{A_0 - A_1}{A_0}, \quad (3)$$

式中:

X ——溴酚蓝结合量, μ g;

A_0 ——空白组吸光度;

A_1 ——样品组吸光度。

1.3.11 持水性及持油性测定 根据 Hadnadev 等^[14]的方法并稍作修改。准确称取 0.2 g 蛋黄粉于 10 mL 离心管中,加入 2 mL 去离子水或大豆油,涡旋 10 min,静置 30 min,5 000 r/min 离心 20 min,除去上层液体并用棉棒擦净管壁,准确称量离心管和沉淀的质量,并按式(4)计算持水性和持油性。

$$\omega = \frac{m_2 - m_1}{0.2}, \quad (4)$$

式中:

ω ——持水性或持油性,g/g;

m_1 ——离心管和样品的质量,g;

m_2 ——离心后离心管和沉淀的质量,g。

1.3.12 乳化能力及乳化稳定性测定 根据王家镔等^[15]的方法并稍作修改。取 0.5 g 蛋黄粉,加入 10 mL 水。移取 1 mL 蛋黄粉液和 1 mL 氯化钠溶液,加入 0.5 mL 色拉油,加塞,涡旋 3 min 使其形成乳化液。3 000 r/min 离心 10 min,记录乳化层体积。测定 3 次取平均值,并按式(5)计算乳化性。

$$W = \frac{V_1}{V_2} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

W ——乳化性,%;

V_1 ——乳化层体积,mL;

V_2 ——总体积,mL。

将上述乳化液于 60 $^{\circ}$ C 水浴 30 min,静置,冷却,3 000 r/min 离心 10 min,记录乳化层体积。测定 3 次取平均值,并按式(6)计算乳化稳定性。

$$E = \frac{V_1}{V_2} \times 100\%, \quad (6)$$

式中:

E ——乳化稳定性,%;

V_1 ——乳化层体积,mL;

V_2 ——总体积,mL。

1.4 数据处理与分析

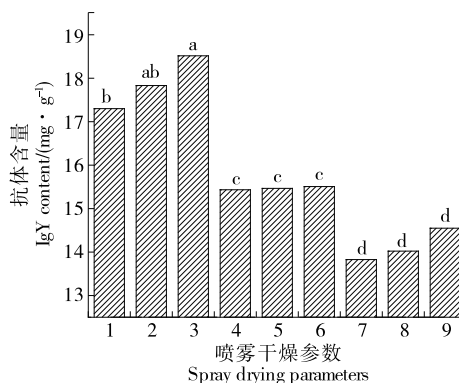
使用 Excel 2019、Origin 2018 软件进行试验数据处

理和分析,结果以平均值或平均值 $\pm$ 标准差表示;使用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行显著性分析和相关性分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 蛋黄粉的 IgY 含量

由图 1 可知,随着进口风温的升高,IgY 含量逐渐降低;随着进料流量的增加,IgY 含量逐渐升高。在 120 $^{\circ}$ C、700 mL/h 下,IgY 含量最高[(18.51 $\pm$ 0.24) mg/g];在 160 $^{\circ}$ C、500 mL/h 下,IgY 含量最低[(13.82 $\pm$ 0.46) mg/g]。当进口风温为 140 $^{\circ}$ C 时,随着进料流量的升高,IgY 含量略有升高,但无显著性变化($P > 0.05$),与谭佩毅等^[16]的结果一致,主要是因为进口风温高、进料流量小时,蛋黄粉受热面积大、时间长易产生焦糊现象,蛋白质变性增多,抗体损失严重,影响品质;而进口风温低、进料速度快时,蛋黄粉的受热时间短,蛋白质变性减少,对抗体含量的影响减小,但蒸发效果不彻底会导致蛋黄粉的出粉率较低。



字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图 1 喷雾干燥参数对蛋黄粉 IgY 含量的影响

Figure 1 Effects of different spray drying parameters on IgY content of egg yolk powder

2.2 理化特性

由表 2 可知,蛋黄粉的溶解性在不同喷雾干燥参数下发生了显著性变化。随着进口风温和进料流量的逐渐升高,蛋黄粉的溶解度呈先快速增加后下降的趋势,在 120 $^{\circ}$ C、500 mL/h 下,溶解度为(43.19 $\pm$ 0.74)%;在 140 $^{\circ}$ C、160 mL/h 下,溶解度达最大值(62.02 $\pm$ 0.56)%,与 120 $^{\circ}$ C、500 mL/h 时相比提高了 18.83%。这可能是当进口风温过低、进料流量过快时,蛋黄粉受热不充分,喷雾干燥不彻底,部分半干颗粒含水率较高,易结块难溶解;当温度升高时,高温会在一定程度上诱导蛋白质变性,一定程度上增加其溶解性;当进口风温过高、进料流量过小时,蛋黄粉长时间暴露于高温下,更多的蛋白质展开,疏水性基团暴露,从而降低蛋黄粉的溶解性^[17]。

由表 2 可知,随着进口风温的升高,蛋黄粉的水分含量显著降低;随着进料流量的增大,蛋黄粉的水分含量显著升高。所有参数下蛋黄粉水分含量均 $<5.5\%$,不利于微生物生长,延长了蛋黄粉的贮藏时间。在 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 600 mL/h 下,出粉率最高($72.63\pm0.42\%$),是因为进料流量过小会导致蛋黄粉受热时间长,蛋白质变性使料液黏稠,而进料流量过快则会导致蛋黄粉干燥不彻底,含水率高而结块,两种情况均会使蛋黄粉粘壁而降低出粉率。

2.3 微观结构

由图 2 可知,喷雾干燥得到的蛋黄粉粉体为球状,表面整体结构完整,可观察到球形蛋黄粉颗粒。 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,蛋黄粉颗粒大小不均匀,表面出现较大的团聚体,相互堆

积紧密结合,导致蛋黄粉易结块溶解度低; $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,蛋黄粉颗粒分布均匀且粉体间具有大小适中的孔隙,对水具有较好的容纳能力,因此具有良好的溶解度和分散性^[18]; $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,由于温度过高,部分不可溶性颗粒溶出,使蛋黄粉溶解度下降。部分颗粒表面凹陷呈类红细胞状,可能是由于喷雾干燥瞬时温度高,颗粒水分迅速蒸发而导致蛋黄粉内部结构受损,为喷雾干燥常见的问题。王家镔等^[15]发现,冷冻干燥得到的蛋黄粉粉体为不规则块状,表面粗糙,大小分布不均匀且分子间孔隙较大,而喷雾干燥蛋黄粉颗粒分布均匀,为球体状,颗粒之间空隙大小适中,与试验结果相同。

2.4 色差分析

由表 3 可知,随着进口风温的升高, L^* 值呈上升趋势,说明进口风温的升高显著提高了蛋黄粉的亮度, a^* 值和 b^* 值呈下降趋势,表明蛋黄粉的颜色变浅;随着进料流量的增加, L^* 值呈下降趋势,是因为进料流量高导致水分分布不均匀,蛋黄粉局部焦糊颜色变暗, a^* 值和 b^* 值呈先上升后下降趋势,说明蛋黄粉的颜色由深变浅^[19]。

表 3 不同喷雾干燥参数下蛋黄粉的色泽[†]

Table 3 Color of egg yolk powder under different spray drying parameters

试验号	L^* 值	a^* 值	b^* 值
1	$94.87\pm0.06^{\text{bcd}}$	$2.28\pm0.04^{\text{bc}}$	$20.92\pm0.18^{\text{b}}$
2	$94.69\pm0.17^{\text{cd}}$	$2.57\pm0.04^{\text{a}}$	$22.40\pm0.51^{\text{a}}$
3	$94.66\pm0.03^{\text{d}}$	$2.54\pm0.07^{\text{a}}$	$21.96\pm0.33^{\text{a}}$
4	$95.17\pm0.06^{\text{ab}}$	$2.21\pm0.08^{\text{cd}}$	$20.76\pm0.37^{\text{b}}$
5	$94.96\pm0.33^{\text{bcd}}$	$2.36\pm0.07^{\text{b}}$	$21.78\pm0.34^{\text{a}}$
6	$94.71\pm0.21^{\text{cd}}$	$2.27\pm0.05^{\text{bc}}$	$20.73\pm0.16^{\text{b}}$
7	$95.32\pm0.09^{\text{a}}$	$2.10\pm0.02^{\text{d}}$	$20.11\pm0.09^{\text{b}}$
8	$95.04\pm0.01^{\text{abc}}$	$2.16\pm0.01^{\text{cd}}$	$20.41\pm0.23^{\text{b}}$
9	$94.76\pm0.01^{\text{cd}}$	$2.23\pm0.06^{\text{c}}$	$20.72\pm0.63^{\text{b}}$

† 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.5 二级结构分析

傅里叶变换红外光谱(FT-IR)是一种研究蛋白质化学成分和构象结构的方法,通常由酰胺 I 带($1\text{ }700\sim1\text{ }600\text{ cm}^{-1}$)的拉曼特征峰确定^[20-21]。酰胺 I 带包含了 $\text{C}=\text{O}$ 键和 $\text{C}-\text{N}$ 键的伸缩振动及较弱的 $\text{N}-\text{H}$ 面内弯曲振动,并对主要由氢键维持的二级结构变化非常敏感,其各子峰归属为: β -折叠 $1\text{ }600\sim1\text{ }640\text{ cm}^{-1}$,无规则卷曲 $1\text{ }640\sim1\text{ }650\text{ cm}^{-1}$, α -螺旋 $1\text{ }650\sim1\text{ }660\text{ cm}^{-1}$, β -转角 $1\text{ }660\sim1\text{ }700\text{ cm}^{-1}$ ^[22]。

由表 4 可知,不同喷雾干燥参数下,蛋白质 α -螺旋和无规则卷曲含量变化明显, β -折叠及 β -转角含量无明显变化。这是因为高温使蛋白分子相邻肽链之间的氢键受

表 2 喷雾干燥参数对蛋黄粉理化特性的影响[†]

Table 2 Effects of spray drying parameters on the physicochemical properties of egg yolk powder %

试验号	溶解度	水分含量	出粉率
1	$43.19\pm0.74^{\text{h}}$	$3.82\pm0.03^{\text{e}}$	$67.48\pm0.23^{\text{d}}$
2	$50.84\pm0.12^{\text{f}}$	$4.53\pm0.03^{\text{c}}$	$69.89\pm0.22^{\text{c}}$
3	$49.43\pm0.52^{\text{g}}$	$5.02\pm0.01^{\text{a}}$	$68.08\pm0.32^{\text{d}}$
4	$55.39\pm0.24^{\text{d}}$	$3.33\pm0.04^{\text{f}}$	$70.31\pm0.42^{\text{c}}$
5	$62.02\pm0.56^{\text{a}}$	$3.79\pm0.02^{\text{e}}$	$71.62\pm0.38^{\text{b}}$
6	$59.22\pm0.47^{\text{b}}$	$4.64\pm0.02^{\text{b}}$	$70.29\pm0.27^{\text{c}}$
7	$53.86\pm0.84^{\text{e}}$	$2.18\pm0.02^{\text{h}}$	$71.20\pm0.34^{\text{b}}$
8	$58.59\pm0.33^{\text{b}}$	$3.03\pm0.03^{\text{g}}$	$72.63\pm0.42^{\text{a}}$
9	$57.24\pm0.74^{\text{c}}$	$3.99\pm0.02^{\text{d}}$	$71.24\pm0.21^{\text{b}}$

† 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

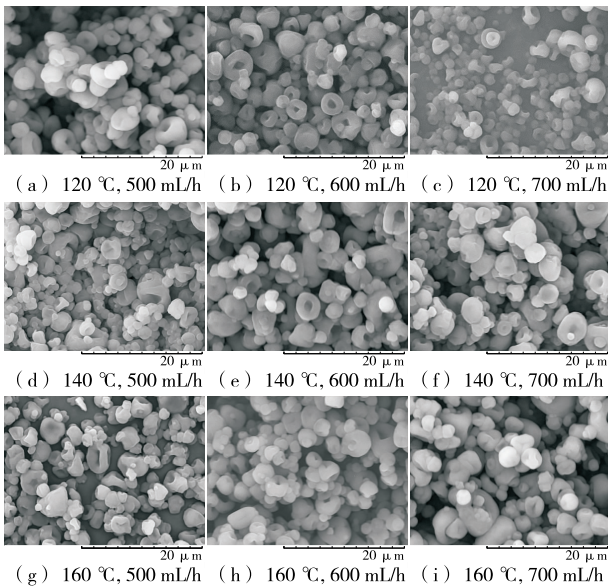


图 2 不同喷雾干燥参数下蛋黄粉的扫描电镜图

Figure 2 SEM images of egg yolk powder under different spray drying parameters

表 4 不同喷雾干燥参数下蛋白质的二级结构变化

Table 4 Changes in protein secondary structure under different spray drying parameters %

试验号	β -折叠	无规则卷曲	α -螺旋	β -转角
1	28.44	11.64	28.31	31.61
2	28.15	11.47	29.03	31.35
3	27.51	11.67	29.08	31.73
4	27.42	26.84	13.41	32.33
5	28.48	27.45	13.12	30.96
6	27.25	26.59	13.49	32.66
7	28.30	27.83	13.07	30.79
8	31.31	28.69	11.88	28.12
9	27.78	26.33	13.32	32.57

到破坏,蛋白质分子内 α -螺旋结构随之展开并形成松散的无规则卷曲结构^[23]。结合图 1 可知,抗体含量的变化与蛋黄粉二级结构的变化密切相关,随着进口风温的升高,蛋白质中 α -螺旋结构展开,IgY 含量逐渐下降,说明抗体含量的变化与蛋白质二级结构中 α -螺旋含量有关。结合表 5 可知,无规则卷曲含量越小, α -螺旋含量越高,表面疏水性越低;无规则卷曲含量越高, α -螺旋含量越小,表面疏水性越高^[24]。抗体含量变化与无规则卷曲含量变化呈负相关(相关系数为-0.93),与 α -螺旋含量变化呈正相关(相关系数为 0.93);表面疏水性变化与无规则卷曲含量变化呈正相关(相关系数为 0.78),与 α -螺旋含量变化呈负相关(相关系数为-0.75);抗体含量和表面疏水性与 β -折叠和 β -转角含量变化均无明显线性关系。

2.6 功能特性分析

2.6.1 表面疏水性 由表 6 可知,表面疏水性随进口风温的增加呈上升趋势,可能是因为 120 ℃时,蛋黄粉分子间表面脂蛋白聚集,部分疏水基团被包裹在蛋白内部导致表面疏水性低^[25],随着进口风温的升高,蛋白质变性,

表 5 相关性分析

Table 5 Correlation analysis

指标	表面疏水性	抗体含量	无规则卷曲	α -螺旋含量
表面疏水性	—			
抗体含量	-0.79	—		
无规则卷曲含量	0.78	-0.93	—	
α -螺旋含量	-0.75	0.93	-1.00	—

结构发生改变,维持蛋白质空间构象的作用力逐渐减弱,蛋白质缓慢展开,分子内部的疏水性氨基酸残基暴露,这些疏水性基团暴露在蛋白质表面,显著增加了蛋黄粉的表面疏水性,说明热处理过程中蛋白表面疏水性的变化开始为随温度的升高逐渐增大,当疏水性残基完全暴露于极性环境后,表面疏水性变化不再显著,与 Benjakul 等^[26]的结果一致。

2.6.2 持水性及持油性 由表 6 可知,在 140 ℃、500 mL/h 时,持水性和持油性均最高,分别为(3.87±0.01),(3.19±0.03) g/g。这是因为受热温度高、受热时间长会使蛋白质分子解聚形成较小颗粒的亚基粒子,这些亚基粒子在一定程度上延伸,暴露出蛋白质内部的极性基团,增强了蛋白质分子的表面电荷分布,改变了蛋白分子表面的持水/持油性,增加了蛋白质分子的粒径和促进了油滴的聚集。

2.6.3 乳化能力及乳化稳定性 由表 6 可知,随着进口风温和进料流量的增大,蛋黄粉的乳化性和乳化稳定性均呈上升趋势。这可能是由于 120 ℃时,蛋白质亚基以聚集形式存在于界面上,蛋白质堆积导致乳化性及乳化稳定性低,而进口风温升高至 160 ℃时,蛋白质变性结构发生明显变化,蛋白质展开露出疏基和疏水基团,促进乳液中油滴形成凝胶网状结构,从而提高了蛋黄粉的乳化能力和乳化稳定性^[27]。Kiosseoglou^[28]认为,除蛋白质本身性质外,蛋白质排列变为无序状态时可以更有效地参

表 6 喷雾干燥参数对蛋黄粉功能特性的影响[†]

Table 6 Effects of spray drying parameters on the functional properties of egg yolk powder

试验号	表面疏水性/ μg	持水性/($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	持油性/($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	乳化性/%	乳化稳定性/%
1	81.67±0.19 ^h	3.61±0.02 ^{fg}	3.03±0.05 ^{cd}	23.58±0.46 ^d	19.38±0.50 ^f
2	85.47±0.10 ^g	3.59±0.01 ^{cd}	2.96±0.04 ^{bc}	26.47±0.53 ^e	22.31±0.54 ^e
3	97.68±0.28 ^f	3.52±0.02 ^a	2.93±0.03 ^{de}	26.47±0.40 ^e	23.84±0.31 ^d
4	101.12±0.19 ^d	3.67±0.02 ^g	3.16±0.02 ^b	26.86±0.23 ^e	23.85±0.65 ^d
5	106.67±0.19 ^e	3.63±0.02 ^h	3.03±0.02 ^a	27.15±0.25 ^{bc}	24.48±0.46 ^{cd}
6	99.35±0.09 ^e	3.57±0.01 ^{ef}	2.81±0.02 ^a	27.76±0.40 ^{ab}	25.52±0.40 ^b
7	123.98±0.09 ^a	3.87±0.01 ^b	3.19±0.03 ^{bc}	28.13±0.23 ^a	25.35±0.27 ^{bc}
8	115.10±0.10 ^b	3.71±0.02 ^{de}	3.17±0.01 ^e	28.58±0.36 ^a	26.35±0.48 ^b
9	99.72±0.09 ^e	3.66±0.02 ^{bc}	3.09±0.03 ^e	28.62±0.47 ^a	27.85±0.36 ^a

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

与油水界面膜的形成,有利于蛋白质乳化活力的提高,与试验结果一致。

3 结论

蛋黄粉的卵黄抗体含量随进口风温的升高呈下降趋势,表明高温使蛋白质变性,抗体含量损失严重,喷雾干燥蛋黄粉的最佳参数为进口风温 140 ℃、进料流量 600 mL/h。该条件下,蛋黄粉的卵黄抗体含量为 17.71 mg/g,溶解度为 61.97%,出粉率为 36.46%,水分含量为 3.8%,且粉体结构完整,可观察到球形蛋白质分子聚合物,分布均匀且孔隙间距适中,同时表现出良好的表面疏水性、持水性及持油性和乳化能力及乳化稳定性等功能特性,说明通过改变喷雾干燥参数,能够在保证蛋黄粉抗体含量的同时,使蛋黄粉保持良好的理化性质和功能特性,切实提高了喷雾干燥蛋黄粉的品质。此外,添加热保护剂可以对蛋黄粉中活性物质进行保护,从而提高活性 IgY 的保留量,维持蛋黄粉中蛋白质的结构稳定。后续将进一步研究添加不同热保护剂对喷雾干燥蛋黄粉抗体含量、结构和功能特性的影响。

参考文献

- [1] 张江. 鸡蛋改善人类健康的研究和技术新进展(综述)[J]. 国外畜牧学(猪与禽), 2018, 38(8): 62-65.
ZHANG J. What's new in chicken egg research and technology for human health promotion?: A review[J]. Foreign Animal Husbandry (Swine and Poultry), 2018, 38(8): 62-65.
- [2] KOVACS-NOLAN J, MINE Y. Egg yolk antibodies for passive immunity[J]. Annu Rev Food Sci Technol, 2012, 3: 163-182.
- [3] 安芳兰, 李菁, 张荣, 等. 卵黄抗体在疾病防治中应用的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(5): 68-71.
AN F L, LI J, ZHANG R, et al. Research progress of egg yolk antibody in the prevention and treatment of various diseases[J]. Journal of Anhui Agri, 2016, 44(5): 68-71.
- [4] 元秀晔, 宋翔, 王业华, 等. 卵黄抗体在疾病防治中的应用研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2017, 44(9): 2 767-2 772.
QI X Y, SONG X, WANG Y H, et al. Research progress on immunoglobulin of yolk in the prevention and treatment of various diseases[J]. Chinese Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2017, 44(9): 2 767-2 772.
- [5] SANE S U, WONG R, HSU C C. Raman spectroscopic characterization of drying-induced structural changes in a therapeutic antibody: Correlating structural changes with long-term stability[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2004, 93(4): 1 005.
- [6] MAHLER H C, MULLER R, FRIESS W, et al. Induction and analysis of aggregates in a liquid IgG1-antibody formulation[J]. Eur J Pharm Biopharm, 2005, 59(3): 407-417.
- [7] VAILLANT A A J. Use of dot blots analysis in the separation of anti-HIV antibodies in animals[J]. Journal of Chromatography & Separation Techniques, 2013, 4(5): 1 805-1 812.
- [8] 要志宏, 关倩倩, 聂相珍, 等. 食品干燥技术研究进展[J]. 农业与技术, 2016, 36(16): 249-250.
YAO Z H, GUAN Q Q, NIE X Z, et al. Research progress of food drying technology[J]. Agriculture and Technology, 2016, 36(16): 249-250.
- [9] 刘静波, 马爽, 林松毅, 等. 速溶蛋黄粉喷雾干燥工艺优化及其特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(5): 1 336-1 342.
LIU J B, MA S, LIN S Y, et al. Optimum spray-drying technology and properties of instant egg yolk powder[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(5): 1 336-1 342.
- [10] 王清平, 彭志伟, 刘晓婷, 等. 蛋黄粉生产工艺优化研究[J]. 湖南饲料, 2021(2): 37-39.
WANG Q P, PENG Z W, LIU X T, et al. Research on optimization of production process of egg yolk powder[J]. Hunan Feed, 2021(2): 37-39.
- [11] 程方圆. 鸡蛋液喷雾干燥工艺参数优化研究[D]. 天津: 天津农学院, 2019: 22-32.
CHENG F Y. Optimization of process parameters of egg liquid spray drying[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2019: 22-32.
- [12] 陈珂, 刘丽莉, 孟圆圆, 等. 鸡蛋清蛋白喷雾干燥工艺优化及特性变化[J]. 食品与机械, 2019, 35(1): 197-203, 231.
CHEN K, LIU L L, MENG Y Y, et al. Optimization of egg white protein spray drying process and its characteristics[J]. Food & Machinery, 2019, 35(1): 197-203, 231.
- [13] SHEN H, ZHAO M M, SUN W Z. Effect of pH on the interaction of porcine myofibrillar proteins with pyrazine compounds[J]. Food Chemistry, 2019, 287: 93-99.
- [14] HADNADEV M, DAPCEVIC-HADNACEV T, LAZARIDOU A, et al. Hempseed meal protein isolates prepared by different isolation techniques Part I: Physicochemical properties[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 526-533.
- [15] 王家镔, 林军, 曲可欣, 等. 喷雾干燥与冷冻干燥鸡蛋粉特性研究[J]. 食品科技, 2020, 45(3): 80-86.
WANG J B, LIN J, QU K X, et al. Comparison of microstructure and physicochemical properties of spray drying and freeze-dried egg powder[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(3): 80-86.
- [16] 谭佩毅, 黄秀锦. 卵黄抗体鸡蛋粉喷雾干燥工艺研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(20): 269-272, 275.
TAN P Y, HUANG X J. Preparation of yolk immunoglobulin-rich egg powder by spray-drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(20): 269-272, 275.
- [17] 夏轩泽, 李言, 钱海峰, 等. 改性处理对豌豆蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(5): 32-38, 48.
XIA X Z, LI Y, QIAN H F, et al. Effects of modification treatment on the structure and functional properties of pea protein[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(5): 32-38, 48.

(下转第 205 页)

工艺、化学成分及其影响因素进行深入探讨,为产品深加工提供依据。

参考文献

- [1] 班强, 王萍娟, 李志华, 等. 废烟末与脯氨酸的卷烟增香美拉德反应条件筛选[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(3): 497-500, 505.
BAN Q, WANG P J, LI Z H, et al. Screening of Maillard reaction conditions of tobacco wastes and proline in cigarette flavor enhancement[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(3): 497-500, 505.
 - [2] 陈群. 甘氨酸与烟草直接反应制备烟用香精及其致香成分分析研究[J]. 食品工业, 2010, 31(4): 36-38.
CHEN Q. Study on the preparation of the direct reaction between L-glycine with tobacco and its aroma components analysis[J]. The Food Industry, 2010, 31(4): 36-38.
 - [3] 游霞, 刘彩红, 崔步云, 等. 复合酶处理废弃烟末制备烟用美拉德香精[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(10): 1114-1119.
YOU X, LIU C H, CUI B Y, et al. Preparation of Maillard tobacco flavoring with tobacco waste by complex enzymatic extraction[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(10): 1114-1119.
 - [4] 刘彩红. 烟草废弃物酶解与 Maillard 反应及在烟草加香中的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016: 34-54.
LIU C H. Studies on enzymatic hydrolysis and Maillard reaction with tobacco waste for tobacco flavoring [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016: 34-54.
 - [5] 张翼鹏, 陶鹰, 李源栋, 等. K326 烤烟花蕾 Maillard 反应烟用香料 GC-MS 分析及卷烟加香应用研究[J]. 香精香料化妆品, 2018(1): 13-16.
ZHANG Y P, TAO Y, LI Y D, et al. The research on GC-MS analysis and cigarette flavoring of K326 tobacco bud maillard reaction products[J]. Flavour Fragrance Cosmetics, 2018(1): 13-16.
 - [6] 李林林, 王荣浩, 陈栋, 等. 基于模糊数学综合评价雪茄烟用美拉德反应产物的加香效果[J]. 烟草科技, 2019, 52(11): 41-49.
LI L L, WANG R H, CHEN D, et al. Comprehensive evaluation of flavoring effects of Maillard reaction products on cigars by fuzzy mathematics[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(11): 41-49.
 - [7] 徐秀娟, 鲁平, 史清照, 等. 雪茄烟叶精油主要成分分析及作用评价[J]. 烟草科技, 2021, 54(11): 59-68, 83.
XU X J, LU P, SHI Q Z, et al. Chemical analysis and sensory evaluation of main components in essential oil of cigar tobacco[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(11): 59-68, 83.
 - [8] 徐秀娟, 茅中一, 杨春强, 等. 基于烟草水提物的 Maillard 反应产物影响因素[J]. 烟草科技, 2022, 55(3): 39-49.
XU X J, MAO Z Y, YANG C Q, et al. Factors influencing Maillard reaction products based on aqueous extracts of tobacco[J]. Tobacco Science & Technology, 2022, 55(3): 39-49.
 - [9] 寇明钰, 汪长国, 戴亚, 等. 不同产地和等级的雪茄烟叶中游离氨基酸含量分析[J]. 西南农业学报, 2013, 26(3): 963-967.
KOU M Y, WANG C G, DAI Y, et al. Analysis on free amino in cigar tobacco of different habitats and grades[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(3): 963-967.
 - [10] 朱龙杰, 张华, 吴洋, 等. 碱性体系下美拉德反应产物中关键香味成分的种类及质量分数[J]. 烟草科技, 2020, 53(6): 41-47, 80.
ZHU L J, ZHANG H, WU Y, et al. Types and contents of key aroma components produced by alkaline Maillard reaction[J]. Tobacco Science & Technology, 2020, 53(6): 41-47, 80.
-
- (上接第 189 页)
- [18] RAO Q, LABUZA T P. Effect of moisture content on selected physicochemical properties of two commercial hen egg white powders[J]. Food Chem, 2012, 132(1): 373-384.
 - [19] RANNOU C, QUEVEAU D, BEAUMAL V, et al. Effect of spray-drying and storage conditions on the physical and functional properties of standard and n-3 enriched egg yolk powders[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 154: 58-68.
 - [20] ULRICHS T, DROTTLEFF A M, TERNES W. Determination of heat-induced changes in the protein secondary structure of reconstituted livetins (water-soluble proteins from hen's egg yolk) by FTIR[J]. Food Chem, 2015, 172: 909-920.
 - [21] GUAN J J, ZHANG T B, HUI M, et al. Mechanism of microwave-accelerated soy protein isolate-saccharide graft reactions[J]. Food Research International, 2011, 44(9): 2647-2654.
 - [22] ELLEPOLA S W, CHOI S M, MA C Y. Conformational study of globulin from rice (*Oryza sativa*) seeds by Fourier-transform infrared spectroscopy[J]. Int J Biol Macromol, 2005, 37(1/2): 12-20.
 - [23] HOU D H J, CHANG S K C. Structural characteristics of purified glycinin from soybeans stored under various conditions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(12): 3792-3800.
 - [24] 曾琪, 胡森, 王欢, 等. pH 值处理对黑豆分离蛋白结构、流变特性及乳化性能的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(22): 15-21.
ZENG Q, HU M, WANG H, et al. Effect of pH treatment on structure, rheological properties and emulsifying properties of black bean protein isolate[J]. Food Science, 2020, 41(22): 15-21.
 - [25] JIANG S, DING J, ANDRADE J, et al. Modifying the physicochemical properties of pea protein by pH-shifting and ultrasound combined treatments [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 835-842.
 - [26] LI Q Q, ZHANG X Y, TANG S T, et al. Improved effect of ultrasound-assisted enzymolysis on egg yolk powder: Structural properties, hydration properties and stability characteristics[J]. Food Chemistry, 2022, 382: 132549.
 - [27] KEERATI-U-RAI M, CORREDIG M. Heat-induced changes in oil-in-water emulsions stabilized with soy protein isolate[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(8): 2141-2148.
 - [28] KIOSSEOGLOU V. Egg yolk protein gels and emulsions [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2003, 8(4/5): 365-370.