

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.01.034

基于产率优化的全蛋粉喷雾干燥数学模型

Mathematical model of spray drying of whole egg powder based on yield optimization

程方圆^{1,2} 周学永^{1,2} 刘艳美^{1,2} A. H. Rajasab³CHENG Fang-yuan^{1,2} ZHOU Xue-yong^{1,2} LIU Yan-mei^{1,2} RAJASAB A. H.³

(1. 天津市农副产品深加工技术工程中心, 天津 300384; 2. 天津农学院食品科学与生物工程学院,

天津 300384; 3. 古尔伯加大学科学技术学院, 印度 古尔伯加 585308)

(1. Tianjin Engineering and Technology Research Center of Agricultural Products Processing, Tianjin 300384,

China; 2. College of Food Science and Bioengineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384,

China; 3. Faculty of Science & Technology, Gulbarga University, Gulbarga 585308, India)

摘要:以干燥产率为优化目标,通过正交试验分析不同工艺参数下全蛋粉产率以及蛋白质、脂肪、磷脂和含水率等性能指标。利用 Matlab 软件构建喷雾干燥工艺参数与蛋粉产率、蛋白质和含水率之间的数学模型,并以蛋白质产量为核心指标对数学模型进行优化。结果表明,鸡蛋液喷雾干燥最佳工艺条件为:进风温度 180 ℃、蛋液浓度 0.25 g/mL、进料速度 7.4 g/min、抽气流量 10 L/min。在最佳工艺条件下蛋粉产率达到 78.64%,其蛋白质、水分、脂肪和磷脂含量分别为 40.28%, 1.71%, 54.53%, 7.16%。

关键词:全蛋粉; 喷雾干燥; 产率优化; 数学模型

Abstract: The aim of this experiment is to optimize the spray drying yield of egg liquid. The yield of whole egg powder and the function indexes of protein content, fat content, phospholipid content and water content of egg powder were obtained by orthogonal test under different processing parameters. The Mathematical model was established by Matlab software, which associated the processing parameters with the egg powder yield, protein content and water content. The mathematical models were optimized with the core index of protein yield. The optimum processing conditions for spray drying were: the inlet air temperature 180 ℃, the egg liquid concentration 0.25 g/mL, the feed rate 7.4 g/min, and the airflow rate 10 L/min. Under the optimized conditions, the yield of whole egg powder reached 78.64%.

基金项目:天津市科技支撑重点项目(编号:17YFZCNC00220, 18YFZCNC01270);国家外国专家局教科文卫高端外国专家项目(编号:GDW20171200099);天津农学院研究生创新培育项目(编号:2017YPY023)

作者简介:程方圆,女,天津农学院在读硕士研究生。

通信作者:周学永(1966—),男,天津农学院教授,博士。

E-mail: zhouxueyongts@163.com

收稿日期:2018-09-20

The contents of protein, water, fat and phospholipid in the whole egg powder were 40.28%, 1.71%, 54.53% and 7.16%, respectively.

Keywords: whole egg powder spray drying; yield optimum; mathematical model

禽蛋是人们普遍食用且营养价值很高的食品,也是广泛应用的烹饪原料,在中国的膳食中占有很重要的地位。2014 年中国全年禽蛋总消费量 2 880.0 万 t,人均消费 16 kg^[1]。禽蛋含有优质蛋白质,且蛋白质的消化率达 98%,居奶类、肉类、米饭、面包等食物之首;其蛋白质的生物价达 94,高于牛奶、牛肉和猪肉等^[2]。鸡蛋中除了含有大量的优质蛋白,还有供给能量的脂类,其中包括丰富的卵磷脂、脑磷脂等磷脂类物质。由于易碎的蛋壳给鸡蛋的运输和储存带来了不便,蛋粉制品的加工技术便应运而生^[3-4]。依据鸡蛋液脱水的特点,可以采取烘干^[5]、冷冻干燥^[6]和喷雾干燥^[7]3 种方式制备蛋粉,其中喷雾干燥因操作简便、节省时间而成为最常用的脱水方式。鸡蛋液在喷雾干燥过程中,不同的工艺条件会对蛋粉的性质产生不同程度的影响。

目前喷雾干燥技术在实际应用中依然存在着诸多问题。岳莲^[8]研究蛋清粉和奶粉脉动燃烧喷雾干燥试验时发现,颗粒团聚现象导致大量产品附着在干燥塔壁上,粘壁损失严重。刘殿宇^[9]认为喷头类型对喷雾干燥产率有较大影响,采用单喷头喷雾易使雾滴变大,产生线状液流,使塔壁结垢严重。此外,如果喷雾干燥塔的锥体内外温差过大,会产生容易挂壁的潮粉,导致产率降低^[10]。

近年来,有关蛋粉喷雾干燥的应用研究中,多关注喷雾干燥工艺参数对蛋粉性能的影响,例如对蛋粉溶解

度^[11-12]、蛋粉理化性质^[13]以及蛋清粉冲调效果的影响^[14-15],而很少关注喷雾干燥工艺参数对蛋粉产率的影响。本试验以优化蛋粉产率为目标,在正交试验基础上构建喷雾干燥工艺参数对蛋粉产率、蛋白质含量和含水率之间的数学模型,并以蛋白质产量为核心指标对数学模型进行优化,探索蛋粉生产的最佳工艺条件,并对数学模型的准确性进行验证,为蛋粉工业化生产提供技术支持。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

鲜鸡蛋:购于天津市物美超市;

浓硫酸、硫酸铜、硫酸钾、乙醚、三氯甲烷、甲醇、盐酸、钼酸铵、磷酸二氢钾:分析纯。

1.2 试验仪器

喷雾干燥仪:B-290 型,瑞士 Büchi 公司;

全自动凯氏定氮仪:UDK159 型,意大利 VELD 公司;

紫外可见分光光度计:UV-3100PC 型,上海美谱达仪器有限公司;

电阻炉: SX2-4-10 型箱式,上海一恒科学仪器有限公司;

电子分析天平: FA2204B 型,上海佑科仪器仪表有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱: DH-101 型,天津中环实验电炉有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程

挑选鸡蛋→清洁蛋壳→消毒→晾干→打碎→称取蛋液质量→按比例(质量比 1:1,1:2,1:3)加水稀释蛋液→充分搅拌→过滤→设置喷雾各参数(进风温度、进料速度、抽气流量)→喷雾干燥→收集鸡蛋粉末

1.3.2 正交试验设计 通过单因素试验发现当进风口温度低于 120℃时,会有湿粉产生;而当进风口温度高于 180℃时,蛋粉颜色加深,且粘壁物料在长时间的高温条件下容易降解变质。蛋液进料速度受进风口温度和蛋液浓度的双重制约,当蛋液浓度变低或进料速度变大时,进风口温度必须相应提高。经过试验观察,进风口温度在 120~180℃,蛋液浓度在 0.25~0.50 g/mL,进料速度在 7.4~14.8 g/min 时,可以达到稳定操作。抽气流量主要影响蛋粉引出速率和旋风分离效果,本研究所使用的喷雾干燥设备抽气流量最高为 10 L/min,当抽气流量低于最高流量的 80%时,蛋粉引出速率变慢,故本试验中选定的抽气流量范围为 8~10 L/min。根据单因素试验的研究结果,本研究采用四因素三水平正交试验对喷雾干燥工艺进行优化,因素水平见表 1。

1.3.3 蛋粉性能测试 对蛋粉分别进行蛋白质、脂肪、磷脂、水分等理化指标的测试。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels in the orthogonal test table

水平	进风温度/ ℃	蛋液浓度/ (g·mL ⁻¹)	进料速度/ (g·min ⁻¹)	抽气流量/ (L·min ⁻¹)
1	120	0.50	7.4	8
2	150	0.33	11.4	9
3	180	0.25	14.8	10

(1) 蛋白质含量测定:准确称取蛋粉 0.50 g,加入 5 g 硫酸钾、0.5 g 硫酸铜、10 mL 浓硫酸置消化炉进行消化,设置 3 个消化阶段:200℃维持 25 min,300℃维持 35 min,420℃维持 60 min,结束后用全自动凯氏定氮仪测定蛋白质含量。

(2) 脂肪含量测定:准确称取蛋粉 2.00 g,用干燥至恒重的滤纸包裹,搭好索氏提取架,用乙醚抽提脂肪 6~8 h,结束后转移样品至通风橱使乙醚挥发完全,烘干样品至恒重,称重并计算。

(3) 磷脂含量测定:按照文献[16]中的方法,并在其基础上,仅在测定吸光度值之前增加水浴加热步骤:水浴温度设为 90℃,时间为 15min。求得相应磷含量,并按式(1)计算样品的磷脂含量。

$$P = \frac{c \times n \times 25 \times 10^{-6}}{m} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

P ——磷脂含量,%

c ——依据回归方程计算出试样中的磷含量, μg ;

m ——样品称量的质量,g;

n ——稀释倍数;

25——磷换算成磷脂系数。

(4) 含水率的测定:烘培养皿至恒重,将 1.0 g 蛋粉均匀撒至培养皿,于 105℃烘箱烘 2~3 h 至样品恒重,计算含水率。

1.3.4 蛋粉产率的测定

(1) 蛋粉理论产量的测定:取鸡蛋液样品 100 g,充分搅拌均匀倒入 3 个平皿中,在-80℃冰箱冻 6~8 h,然后转入真空冷冻干燥机中连续冷冻干燥 24 h,得干燥的鸡蛋粉末,平行 3 次,计算 100 g 蛋液所得蛋粉理论产量 Y_T 并测定样品含水率 W_T 。

(2) 喷雾干燥实际产量的测定:取鸡蛋全蛋液 100 g,按比例稀释充分搅拌均匀,控制喷雾干燥器进风温度、进料速度、抽气流量等工艺参数进行雾化干燥,收集旋风分离器 and 收集瓶中的蛋粉,计算稀释前 100 g 蛋液喷雾干燥所得蛋粉产量 Y_S 并测定样品含水率 W_S 。

(3) 蛋粉产率的计算:

$$L_S = \frac{Y_S \times (1 - W_S)}{Y_T \times (1 - W_T)} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

L_s ——蛋粉产率,%;

Y_s ——喷雾干燥实际产量,g;

Y_T ——蛋粉理论产量,g;

W_s ——喷雾干燥蛋粉样品含水率,%;

W_T ——冷冻干燥样品含水率,%。

1.3.5 数据处理分析方法 Spss Statistics 17.0 统计软件和 Matlab 数学软件对数据进行方差分析和数据模型拟合。

2 结果与分析

按照表 1 中的因素水平进行正交试验,设置一次重复试验。蛋粉产率、含水率、蛋白质、脂肪、磷脂各指标结果见表 2。

表 2 正交试验对蛋粉产品指标的影响[†]

Table 2 Effect of the index of egg powder products on orthogonal test %

试验序号	产率	含水率	蛋白质	脂肪	磷脂
1	50.01	1.89	41.24	55.56	7.47
2	41.68	2.22	41.73	56.15	7.12
3	54.99	2.12	40.96	57.48	6.56
4	54.72	1.88	40.47	56.84	6.97
5	44.21	2.06	40.44	56.96	6.30
6	69.58	1.85	40.95	55.65	6.71
7	57.48	1.87	41.52	55.67	6.46
8	70.65	1.81	42.47	57.13	7.01
9	70.62	1.93	41.45	57.91	7.52

[†] 表中结果均为 2 次正交试验的平均值。

2.1 对蛋粉产率影响的正交试验

由表 3 可知:进风温度对蛋粉产率有极显著的影响($P < 0.01$),蛋液浓度对蛋粉产率有显著的影响($P < 0.05$),而进料速度、抽气流量对蛋粉产率无显著影响($P > 0.05$)。本试验的结果除了进料速度以外,进风温度和蛋液浓度影响趋势与谭佩毅等^[17]的试验结果一致。

2.2 对蛋粉性能影响的正交试验

2.2.1 对蛋粉含水率的影响 由表 4 可知:进风温度、进

表 3 喷雾干燥参数对蛋粉产率方差分析

Table 3 Variance analysis of egg powder yield on spray drying parameters

方差来源	偏差平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
进料温度	912.034	2	456.017	8.774	0.008
蛋液浓度	580.930	2	290.465	5.589	0.026
进料速度	393.930	2	196.965	3.790	0.064
抽气流量	87.094	2	43.547	0.838	0.464
误差	467.770	9	51.974		

料速度对蛋粉含水率的影响是显著的($P < 0.05$),而蛋液浓度、抽气流量对蛋粉含水率无显著影响($P > 0.05$)。

2.2.2 对蛋白质含量的影响 由表 5 可知:进风温度、蛋液浓度、进料速度、抽气流量 4 个因素对蛋白质含量均无显著影响($P > 0.05$)。

表 4 喷雾干燥参数对蛋粉含水率方差分析

Table 4 Variance analysis of egg powder water content on spray drying parameters

方差来源	偏差平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
进料温度	0.137	2	0.068	7.223	0.013
蛋液浓度	0.068	2	0.034	3.601	0.071
进料速度	0.105	2	0.052	5.526	0.027
抽气流量	0.005	2	0.002	0.256	0.780
误差	0.085	9	0.009		

表 5 喷雾干燥参数对蛋粉蛋白质含量方差分析

Table 5 Variance analysis of egg powder protein content on spray drying parameters

方差来源	偏差平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
进料温度	4.294	2	2.147	2.087	0.180
蛋液浓度	0.816	2	0.408	0.396	0.684
进料速度	1.029	2	0.514	0.500	0.622
抽气流量	0.402	2	0.201	0.195	0.826
误差	9.258	9	1.029		

2.2.3 对脂肪含量的影响 对蛋粉脂肪进行方差分析,结果见表 6。

由表 6 可知:进风温度、蛋液浓度、进料速度、抽气流量 4 个因素对脂肪含量均无显著影响($P > 0.05$)。

表 6 喷雾干燥参数对蛋粉脂肪含量方差分析

Table 6 Variance analysis of egg powder fat content on spray drying parameters

方差来源	偏差平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
进料温度	0.873	2	0.437	0.185	0.834
蛋液浓度	3.146	2	1.573	0.667	0.537
进料速度	2.313	2	1.156	0.490	0.628
抽气流量	5.714	2	2.857	1.211	0.342
误差	21.23	9	2.359		

2.2.4 对磷脂含量的影响 由表 7 可知:进风温度、蛋液浓度、进料速度、抽气流量 4 个因素水平变化对磷脂含量结果无显著影响($P > 0.05$)。

2.3 喷雾干燥数学模型

由表 3、4 可知,正交试验对蛋粉产率、含水率分别有极显著、显著影响,而对蛋粉蛋白质、磷脂、脂肪 3 个品质都没有显著影响,但鉴于蛋粉含有大量优质蛋白,则对蛋粉产率、含水率和蛋白质指标进行进一步分析。利用

表 7 喷雾干燥参数对蛋粉磷脂含量方差分析

Table 7 Variance analysis of egg powder phospholipid content on spray drying parameters

方差来源	偏差平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
进料温度	0.547	2	0.274	1.067	0.384
蛋液浓度	0.085	2	0.043	0.166	0.850
进料速度	1.988	2	0.994	3.873	0.061
抽气流量	0.365	2	0.183	0.711	0.517
误差	2.309	9	0.257		

Matlab 数学软件及式(3)形式通过 4 因素进风温度、蛋液浓度、进料速度、抽气流量对蛋粉的产率、蛋白质和含水率进行数据模型拟合描述。

$$Y = k \times T^a E^b V^c A^d, \quad (3)$$

式中:

Y——因变量(蛋粉产率、蛋白质和含水率);

T——进风温度,℃;

E——蛋液浓度,g/mL;

V——进料速度,g/min;

A——抽气流量,L/min;

k——系数。

将在各因素下所获得的试验数据代入式(3),分别得到:

$$Y_1 = 0.806 3 T^{0.740 9} E^{-0.242 5} V^{-0.287 1} A^{0.438 0}, \quad (4)$$

$$Y_2 = 35.543 3 T^{0.026 3} E^{-0.003 6} V^{-0.019 9} A^{0.027 7}, \quad (5)$$

$$Y_3 = 5.467 4 T^{-0.256 1} E^{-0.073 1} V^{0.127 4} A^{-0.059 9}, \quad (6)$$

式中:

Y₁——蛋粉产率,%;

Y₂——蛋白质含量,%;

Y₃——含水率,%。

由式(4)可知,对蛋粉产率的影响,蛋粉产率随着进风温度和抽气流量的升高而升高,即进风温度和抽气流量为正相关自变量;蛋粉产率随着蛋液浓度和进料速度的升高而降低,即蛋液浓度和进料速度为负相关自变量。

同理,对蛋白质含量的影响,进风温度和抽气流量为正相关自变量,蛋液浓度和进料速度为负相关自变量;对蛋粉含水率:进料速度为正相关变量,进风温度、蛋液浓度、抽气流量为负相关变量。

2.4 喷雾干燥工艺参数优化

优质蛋白质是蛋粉中的重要物质,如果以蛋粉中的蛋白质产量为考察目标,则必须使蛋粉产率与蛋粉蛋白质含量的乘积最大,则有:

$$Y_1 \times Y_2 = MAX. \quad (7)$$

式(4)、(5)带入式(7),得到:

$$Y_1 \times Y_2 = 28.659 1 T^{0.767 1} E^{-0.246 1} V^{-0.307 0} A^{0.465 8}. \quad (8)$$

基于以上公式,探索出高产率高蛋白蛋粉的最佳工艺条件为:进风温度 180 ℃、蛋液浓度 0.25 g/mL、进料速度 7.4 g/min、抽气流量 10 L/min。通过对比式(6)与式(8)可知,在模拟的最佳工艺条件下,进料速度(V)的指数由正变为负,恰好是有利于含水率降低的工艺条件。因此,利用本试验确立的优化工艺条件不仅可以使蛋粉产率达到最高,而且产品的含水率也较优化前降低,实现产量、质量共同提升的目的。

2.5 验证实验

采用模型优化后获得的喷雾干燥工艺参数进行验证实验,即:进风温度 180 ℃、蛋液浓度 0.25 g/mL、进料速度 7.4 g/min、抽气流量 10 L/min,验证结果见表 8。

表 8 验证实验结果对比

Table 8 Experimental results verification comparison

组别	蛋粉产率	蛋白质含量	含水率
模型值	81.64	41.93	1.80
实测值	78.64	40.28	1.71

由表 8 可知:对产率而言,蛋粉实测值达到模型值的 96.33%;蛋粉蛋白质含量实测值达到模型值的 96.05%;蛋粉含水率实测值达到模型值的 95.04%。通过分析可知,指标的实测值均达到模型值的(100±5)%,验证结果符合预期。

3 结论

本试验以蛋白质产量为核心指标对数学模型进行优化运算,探索出蛋粉的最佳工艺条件为:进风温度 180 ℃、蛋液浓度 0.25 g/mL、进料速度 7.4 g/min、抽气流量 10 L/min。验证实验表明,在最佳工艺条件下蛋粉产率与模型值接近,蛋粉各性能指标与模型值相符,蛋粉产率达到 78.64%,较优化前有较大幅度的提高。通过建立数学模型来优化喷雾干燥工艺参数具有准确、方便的特点,对蛋粉工业化生产具有重要的借鉴意义和应用价值。

参考文献

[1] 张超,李干琼,于海鹏,等.中国禽蛋市场回顾及未来 5 年展望[J].农业展望,2015(5):13-17.
 [2] 高道兴.畜产品加工学[M].北京:中国农业出版社,1995:172.
 [3] LIU Li-li, WANG Huan, REN Guang-yue. Effects of freeze-drying and spray drying processes on functional properties of phosphorylation of egg white protein [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8 (4): 116-123.
 [4] LECHEVALIER V, NAU F, JEANTET R. Powdered Egg[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013: 484-512.

(下转第 208 页)

塌陷、颗粒之间出现黏结现象;喷雾干燥复合粉颗粒大小适中,分布较均匀,整体呈球状,颗粒内部有空隙,有利于颗粒与水分接触,说明喷雾干燥复合粉溶解性较好。真空冷冻干燥耗时长,耗能大,水分含量高,而喷雾干燥耗时短,耗能小、水分含量低,因此喷雾干燥适用于工业生产,但大规模工业生产还有待研究。

参考文献

- [1] 黄黎慧, 黄群, 孙术国, 等. 核桃的营养保健功能与开发利用[J]. 粮食科技与经济, 2009, 34(4): 48-50.
- [2] 吴开志, 肖千文, 唐礼贵, 等. 核桃种仁粗脂肪和氨基酸含量的差异性分析[J]. 经济林研究, 2007, 25(2): 15-18.
- [3] 凌育赵, 刘经亮. 核桃果实各部位脂肪酸的组成与含量分析[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(10): 139-142.
- [4] 杨虎清, 席琦芳. 核桃的营养价值及其加工技术[J]. 粮油加工与食品机械, 2002(2): 47-49.
- [5] 杜蕾蕾, 郭涛, 万辉, 等. 冷榨核桃饼中核桃蛋白的提取与纯化的研究[J]. 粮油加工, 2008(10): 79-81.
- [6] 杨永祥, 陈锦屏, 吴曼. 红枣营养保健价值及其加工利用的研究进展[J]. 农产品加工, 2009(1): 52-53, 56.
- [7] 王富刚. 红枣营养功能性与复合蛋白饮料加工工艺影响因素研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012: 15.
- [8] 李媛萍, 徐怀德, 李翠平, 等. 全枣肉红枣粉加工技术研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(17): 194-199.
- [9] 张宝善, 陈锦屏, 李强, 等. 红枣汁的提取方法[J]. 食品与发酵工业, 2003, 29(12): 67-71.
- [10] 钟芳, 王璋, 许时婴. 喷雾干燥条件对豆粉速溶性的影响[J]. 食品工业科技, 2003, 24(12): 17-20.
- [11] 刘建学. 全藕粉喷雾干燥工艺试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 229-231.
- [12] 乔小全, 任广跃, 乔梦, 等. 干燥方式对黑枣粉品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 189-194, 220.
- [13] 陆建良, 梁月荣, 龚淑英, 等. 茶汤色差与茶叶感官品质相关性研究[J]. 茶叶科学, 2002, 22(1): 57-61.
- [14] 顾浩峰, 张富新, 张怡. 羊奶婴儿配方奶粉中蛋白质体外模拟消化研究[J]. 食品科学, 2013, 34(19): 302-305.
- [15] 唐辉, 钟瑞敏, 马金魁, 等. 冷冻干燥与喷雾干燥对岗稔果粉品质影响的比较[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 184-188.
- [16] 张彩虹, 黄立新, 刘伟, 等. 不同干燥方式制备白果粉的性能比较[J]. 生物质化学工程, 2009, 43(6): 27-30.
- [17] 郑唯, 朱丹, 牛广财, 等. 不同干燥方式对毛酸浆粉性质的影响[J]. 食品工业, 2017, 38(8): 27-30.
- [18] 王江涛, 于源, 刘家祥. 利用石英粉体休止角表征其团聚状态的研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(5): 49-52.
- [19] 张明, 周萍, 李新胜, 等. 不同干燥方式对金针菇根粉物理性质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 100-103, 108.
- [20] 宋玲霞, 陈义伦, 马超, 等. 干燥方式对枣粉物理特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(12): 89-93.
- [21] 沈青, 赵英, 迟玉杰, 等. 真空冷冻与喷雾干燥对鸡蛋全蛋粉理化性质及超微结构的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(1): 147-152.
- [22] BERMEJO P, PEA E M, DOMNGUEZ R, et al. Iron and zinc in hydrolysed fractions of human milk and infant formulas using an *in vitro* method[J]. Food Chemistry, 2002, 77(3): 361-369.
- [23] DEW C, RASMUSSEN J T, HEEGAARD C W, et al. *In vitro* digestion of novel milk protein ingredients for use in infant formulas: research on biological functions[J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(7): 373-383.
- [24] 林志鑫, 许原, 马春华, 等. 武夷岩茶热重(TGA)分析研究[J]. 云南民族大学学报: 自然科学版, 2016, 25(3): 211-214.
- [25] 王洪波, 郭军伟, 夏巧玲, 等. 部分国产烟草样品的热重分析[J]. 烟草科技, 2009(9): 47-49.
- [26] 刘洪, 敖波, 范淑辉, 等. 彝族植物药的热分析鉴别[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(20): 9400-9401.
- [5] 胥伟, 向涛, 王海滨. 不同干燥方式对蛋黄粉理化性质的影响[J]. 中国家禽, 2014, 36(4): 24-27.
- [6] MICHAEL Wenzel, INGRID Seuss-Baum, ELMAR Schlich. Influence of pasteurization, spray-and freeze-drying, and storage on the carotenoid content in egg yolk [J]. Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58: 1726-1731.
- [7] 赵媛, 苏宇杰, 杨严峻. 全蛋粉喷雾干燥工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(15): 243-246.
- [8] 岳莲. 蛋清粉和奶粉脉动燃烧喷雾干燥实验研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014: 47.
- [9] 刘殿宇. 多喷头压力喷雾干燥塔喷嘴的设计及注意事项[J]. 医药工程设计, 2013, 34(4): 1-3.
- [10] 刘殿宇. 喷雾干燥系统的保温及注意事项[J]. 化工装备技术, 2013, 34(6): 23-24.
- [11] 娄源功, 钱向明, 陈复生, 等. 专用鸡全蛋粉工业化生产新工艺研究[J]. 郑州粮食学院学报, 1997, 18(1): 14-19.
- [12] 刘静波, 马爽, 刘博群, 等. 喷雾干燥条件对高铁蛋粉溶解特性的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 365-371.
- [13] 刘云宏, 郭松旺, 张争艳. 鸡蛋蛋白粉的离心喷雾干燥研究[J]. 粮油食品科技, 2005, 13(2): 7-9.
- [14] 唐伟强, 郭松旺. 工艺参数对蛋白粉离心喷雾干燥质量问题的研究[J]. 食品工业科技, 2006, 27(2): 53-55.
- [15] 孙临政, 迟玉杰, 王欢, 等. 喷雾干燥条件对蛋清粉冲调效果的影响[J]. 中国家禽, 2014, 36(2): 29-34.
- [16] 李树立, 鞠国泉, 李会旋, 等. 食品中磷脂测定方法的探讨[J]. 食品工业科技, 2004, 25(9): 133-134.
- [17] 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): 269-275.

(上接第 196 页)