

鸡肉蛋白抗氧化肽喷雾干燥工艺优化研究

裴小平 (中山市技师学院食品化工系, 广东中山 528429)

摘要 [目的]建立鸡肉蛋白抗氧化肽(APCP)在喷雾干燥条件下保持其活性的高效干燥工艺并明确其活性保持水平及理化特性。[方法]采用响应曲面法优化 APCP 喷雾干燥的最佳工艺条件,工艺优化过程中活性保持水平以清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力为衡量指标,最优工艺条件下活性保持水平以干燥样品清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力与冷冻干燥样品清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力比值为衡量指标,其中清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力测定采用 A052 抗超氧阴离子试剂盒法;以冷冻干燥样品为参照物,通过堆积密度、溶解性、吸湿性、感官色泽、清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力等指标考察喷雾干燥样品理化特性。[结果]建立 APCP 最佳喷雾干燥条件为进口温度 165 $^{\circ}C$,出口温度 104 $^{\circ}C$,进料流速 4.6 mL/min,在此条件下 APCP 清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力得到了很好地保持,保持率(90.67 \pm 5.53)%,水分含量(6.35 \pm 0.43)%;喷雾干燥样品的堆积密度变大、溶解时间延长、吸湿率降低、色泽稍微变白、清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力下降。[结论]在较高进口温度(165 $^{\circ}C$)、较低出口温度(104 $^{\circ}C$)及适当进料流速(4.6 mL/min)条件下 APCP 活性保持率可达(90.67 \pm 5.53)%,且所得 APCP 干燥效果良好,显示出较好的应用前景。

关键词 鸡肉蛋白;抗氧化肽;喷雾干燥;工艺;堆积密度;吸湿性;溶解性

中图分类号 TS201.1 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)29-0080-04

Optimization of Spray Drying Technology of Antioxidant Peptide of Chicken Protein

PEI Xiao-ping (Department of Food & Chemical Engineering, Zhongshan Technician College, Zhongshan, Guangdong 528429)

Abstract [Objective] To establish a highly efficient spray drying technology for preparing antioxidant peptide of chicken protein (APCP) under maximum extent keeping its activity, and determine its remain activity and physicochemical properties. [Method] Response surface methodology (RSM) was used to determine the optimal spray drying process. Residual activity was evaluated by superoxide anion free radical scavenging activity during spray drying process, and the ratio of superoxide anion free radical scavenging activity of spray drying APCP to that of freeze drying APCP was used to evaluate the remain antioxidant activity of APCP at optimum conditions. Taking freeze drying APCP as reference object, the stacking density, solubility, hygroscopicity, colour and free radical scavenging activity were chosen as indexes to investigate the physicochemical properties of the spray drying product. [Result] The optimum spray drying conditions: inlet temperature 165 $^{\circ}C$, outlet temperature 104 $^{\circ}C$, feed flow rate 4.6 mL/min, and the yield of keeping activity could reach up to (90.67 \pm 5.53)%, and water content only (6.35 \pm 0.43)% under such conditions. The stacking density of spray drying APCP increased, the soluble time prolonged, the hygroscopicity decreased, the color become a bit whiter, and the activity was lower. [Conclusion] The yield of keeping activity can reach up to (90.67 \pm 5.53)% on inlet temperature 165 $^{\circ}C$, outlet temperature 104 $^{\circ}C$ and feed flow rate 4.6 mL/min. Drying efficiency of APCP obtained in this way are satisfying, indicating assuring potential for applications.

Key words Chicken protein; Antioxidant peptide; Spray drying; Properties; Stacking density; Hygroscopicity; Solubility

抗氧化肽(APCP)具有清除自由基、保护机体、抗衰老等多种生物活性,在保健品和药品开发方面有广泛的应用前景,但 APCP 水溶液不便于常温贮藏和运输,将其干燥处理有利于工业化生产及应用。冷冻干燥能充分保持 APCP 的生物活性,但加工能耗高、生产成本贵,应用范围受限制;喷雾干燥能实现连续化生产且能耗较低,但存在喷雾干燥过程中高温对 APCP 生物活性影响的问题。

由于生物活性物质的活性易受加工条件和环境因素影响,研究其活性稳定性对于制定科学的生产工艺和应用方法具有重要的实际意义。许兵红等^[1]研究丝光绿蝇抗菌肽的热稳定性时发现,100 $^{\circ}C$ 处理 3 min 后活性完全丧失;谢海伟等^[2]发现,抗菌肽肽素分子一级结构在 120 $^{\circ}C$ 条件下处理 30 min 以上几乎被完全破坏;夏天瑶等^[3]将注射胸腺肽在自然光条件下温度(60 \pm 2) $^{\circ}C$ 热水中水浴 10 h 后仍然保持原有各项生物活性,表现出良好的热稳定性。在干燥效果最佳的前提下保持良好的生物活性及理化特性是 APCP 干燥过程中的关键问题。笔者在前人研究报道的基础上,采用响应曲面法优化 APCP 在较高进口温度下和较低出口温度下的喷雾干燥工艺条件,为其进一步应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料与主要试剂。APCP 水溶液:在 pH 6.7、温度 57 $^{\circ}C$ 、底物浓度 6.9%、酶解时间 5 h 的条件下,中性蛋白酶(E/S = 4 943 U/g)和木瓜蛋白酶(E/S = 5 988 U/g)同步水解脱脂鸡肉蛋白制得;A052 抗超氧阴离子自由基试剂盒,南京建成生物工程研究所,生化试剂;中性蛋白酶、木瓜蛋白酶,广州明远工贸有限公司等。

1.1.2 主要仪器。Labconco Free Zone 冷冻干燥机,美国 Labconco 公司;Büchi Mini Spray Dryer B-290 喷雾干燥机,瑞士 Büchi Labortechnik 公司;UV 1800 Pharmaspec 分光光度计,深圳市科美嘉仪器设备有限公司;TDL-5-A 台式离心机,上海安亭科学仪器厂;Sartorius 精密 pH 计,北京泽祥恒达科技发展有限公司;电热恒温水浴锅,上海悦丰仪器仪表有限公司;DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器,郑州长城科工贸有限公司等。

1.2 方法

1.2.1 进口温度对 APCP 抗氧化活性影响。APCP 水溶液 50 $^{\circ}C$,热空气流量 667 L/min,进料流速 6 mL/min,出口温度 80 $^{\circ}C$,进口温度分别为 130、140、150、160、170、180 $^{\circ}C$ 时将 APCP 水溶液进行喷雾干燥,对干燥产品进行清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力评价,筛选最佳进口温度。

1.2.2 出口温度对 APCP 抗氧化活性影响。APCP 水溶液

50 ℃,热空气流量 667 L/min,进料流速 6 mL/min,进口温度 160 ℃,出口温度分别为 70、80、90、100 ℃时对 APCP 水溶液进行喷雾干燥,对干燥产品进行清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力评价,筛选最佳出口温度。

1.2.3 进料流速对 APCP 抗氧化活性影响。APCP 水溶液 50 ℃,热空气流量 667 L/min,进口温度 160 ℃,出口温度 100 ℃,进料流速分别为 3.0、4.5、6.0、7.5、9.0 mL/min 时对 APCP 水溶液进行喷雾干燥,对干燥产品进行清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力评价,筛选最佳进料流速。

1.2.4 APCP 喷雾干燥工艺优化。根据单因素试验结果,利用响应曲面法(RSM)中 Box - Behnken 程序,进口温度、出口温度、进料流速 3 个因素为因变量,每个因素取 3 个水平,以 -1、0、1 编码,以 APCP 清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力为响应值,进行试验设计,采用 SAS9.0 软件对试验数据进行分析。

1.2.5 APCP 清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力测定。将 APCP 冷冻干燥和喷雾干燥样品配成 20 mg/mL 的溶液,试验准确移取 0.20 mL,采用 A052 抗超氧阴离子试剂盒测定其清除 $O_2^{\cdot-}$ 的能力。具体测定过程参考 A052 抗超氧阴离子自由基测试盒说明书。

清除率 = (对照管吸光度 - 测定管吸光度) / 对照管吸光度 × 100%

1.2.6 APCP 干燥样品活性保持评价。将同步酶解制得的 APCP 水溶液分成两部分,一部分通过冷冻干燥机制得冷冻干燥粉,另一部分通过喷雾干燥机在响应曲面优化最佳工艺条件下制得喷雾干燥粉,以得到的喷雾干燥粉和冷冻干燥粉清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力的比值来评价 APCP 抗氧化活性经喷雾干燥后的保持率。

APCP 活性保持率 = (喷雾干燥粉清除率 / 冷冻干燥粉清除率) × 100%

1.2.7 APCP 干燥样品理化特性评价。以 APCP 冷冻干燥样品为参照物,通过测定堆积密度^[4]、吸湿率^[5]、溶解性^[6]、感官色泽及清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力来评价 APCP 喷雾干燥样品理化特性。

1.2.8 APCP 水分含量测定。参照 GB 5009.3—2010 的方法测定。

2 结果与分析

2.1 进口温度对 APCP 抗氧化活性影响 如表 1 所示,进口温度越高,APCP 干燥粉清除 $O_2^{\cdot-}$ 的能力越低,这是由于温度提高会对 APCP 活性氨基酸残基产生破坏,甚至其一级结构遭到破坏,因此,在喷雾干燥过程中进口温度越低越好;另一方面,温度过低,热空气不能使喷雾干燥雾粒充分及时干燥,从而影响喷雾干燥效果。进口温度低于 140 ℃时得不到干燥产品,150 ℃时产品含水量极高,高于 170 ℃时壁上褐变逐渐严重。综合考虑,进口温度为 160 ℃既可以保证得到 APCP 喷雾干燥产品又最大限度地保持其抗氧化活性,因此,选择进口温度为 160 ℃。产品水分含量直接决定其品质和贮存时间,产品水分含量在 2% 以下最好,吴克刚等^[7]学者认为只要出风温度高于 80 ℃就可以保证喷雾干燥产品水分含量低于 2%。但该试验所得喷雾干燥产品都比较黏手、水分

含量较高,说明出口温度太低(80 ℃),下一步试验需提高出口温度。

表 1 喷雾干燥进口温度单因素选择

进口温度 Inlet temperature // ℃	清除率 Clearance rate // %	显著性(0.05 水平) Significance(0.05 level)
130	—	—
140	—	—
150	78.90 ± 0.41	a
160	78.76 ± 0.13	ab
170	78.20 ± 0.57	b
180	76.80 ± 0.42	c

2.2 出口温度对 APCP 抗氧化活性影响 如表 2 所示,随着出口温度升高,APCP 干燥粉清除 $O_2^{\cdot-}$ 的能力逐渐降低,这主要是因为出口温度过高使 APCP 长时间处在高温环境下而导致抗氧化活性丧失;但温度过低,又使 APCP 长时间处在湿润的环境中而得不到干燥产品。出口温度 70 ℃时得不到干燥产品,80、90 ℃时产品较湿润,100 ℃时才能得到较好干燥产品。这与吴克刚等^[7]学者认为出口温度为 80 ℃就可以使干燥产品水分含量低于 2% 不一致,主要是因为 APCP 具有良好的吸湿和保水特性,导致在较低出口温度下 APCP 既吸收湿润水蒸气又难以脱水而不能使产品充分干燥^[8]。综合考虑,选择出口温度为 100 ℃。

表 2 喷雾干燥出口温度单因素选择

出口温度 Outlet temperature // ℃	清除率 Clearance rate // %	显著性(0.05 水平) Significance(0.05 level)
70	—	—
80	78.76 ± 0.13	a
90	76.15 ± 0.50	b
100	72.38 ± 0.27	c

2.3 进料流速对 APCP 抗氧化活性影响 进料流速是喷雾干燥一个最重要的工艺参数,流速过高,热空气不能使过量雾粒充分脱水而得不到干燥产品;流速过低,既导致产品过度受热失活也影响喷雾干燥效率。如表 3 所示,进料流速高于 7.5 mL/min 时喷雾干燥产品水分含量极高甚至得不到干燥产品,低于 6.0 mL/min 时可以得到喷雾干燥产品,但伴随着褐变等不良现象产生,影响 APCP 的抗氧化活性。在 3.0~9.0 mL/min 范围内,随着进料流速的增加,APCP 清除 $O_2^{\cdot-}$ 能力先增大后减少,在 4.5 mL/min 时达到最大。综合考虑,选择 4.5 mL/min 为最佳进料流速。

表 3 喷雾干燥进料流速单因素选择

进料流速 Feed flow rate // mL/min	清除率 Clearance rate // %	显著性(0.05 水平) Significance(0.05 level)
3.0	67.30 ± 1.28	b
4.5	70.49 ± 1.52	a
6.0	68.94 ± 1.26	ab
7.5	68.12 ± 0.72	b
9.0	—	—

2.4 APCP 喷雾干燥工艺优化及理化特性分析

2.4.1 APCP 喷雾干燥响应曲面试验设计与结果。根据单因素试验结果,利用响应曲面法(RSM)中 Box - Behnken 程序理论,设计了响应曲面因素水平表,见表4。根据表4中的因素水平进行 Box - Behnken 试验,结果见表5。

表4 响应曲面因素水平设计

Table 4 The factors and levels design of RSM

水平 Level	间距 Spacing	进口温度 Inlet temperature (X_1)// $^{\circ}\text{C}$	出口温度 Outlet temperature (X_2)// $^{\circ}\text{C}$	进料流速 Feed flow rate (X_3)//mL/min
-1	5	160	100	3.0
0	5	165	105	4.5
1	1.5	170	110	6.0

表5 APCP 喷雾干燥工艺优化试验设计与结果

Table 5 Experimental design and results of spray drying of APCP

序号 No.	因素 Factor			清除率 Clearance rate//%	水分含量 Moisture content %
	进口温度 Inlet temperature	出口温度 Outlet temperature	进料流速 Feed flow rate		
1	-1	-1	0	74.40 ± 1.16	8.47 ± 0.35
2	-1	1	0	67.29 ± 2.39	7.65 ± 0.23
3	1	-1	0	71.17 ± 1.65	8.27 ± 0.16
4	1	1	0	67.49 ± 2.31	6.01 ± 0.13
5	0	-1	-1	62.83 ± 2.68	7.11 ± 0.11
6	0	-1	1	62.35 ± 1.68	7.59 ± 0.21
7	0	1	-1	63.53 ± 0.48	6.98 ± 0.22
8	0	1	1	63.17 ± 0.79	7.70 ± 0.16
9	-1	0	-1	61.53 ± 0.80	7.44 ± 0.09
10	1	0	-1	61.76 ± 0.44	6.79 ± 0.21
11	-1	0	1	65.37 ± 2.38	7.53 ± 0.33
12	1	0	1	66.38 ± 2.32	6.87 ± 0.26
13	0	0	0	75.51 ± 1.32	6.37 ± 0.17
14	0	0	0	75.46 ± 1.16	6.39 ± 0.21
15	0	0	0	75.64 ± 1.07	6.30 ± 0.07

2.4.2 喷雾干燥各因素对 APCP 抗氧化活性影响的回归模型分析。采用 SAS 统计软件,通过其响应曲面回归(RSREG)过程进行数据分析,建立关于喷雾干燥进口温度、出口温度、进料流速三者对 APCP 清除 $\text{O}_2\cdot^-$ 能力的二阶响应曲面模型,并进而寻求在喷雾干燥过程中既最大化保持 APCP 活性而又得到充分干燥产品的最优响应曲面因子水平。

方差分析显示, $F_{X_1} = 0.06218$, $P_{X_1} = 0.8130$; $F_{X_2} = 1.6778$, $P_{X_2} = 0.2518$; $F_{X_3} = 1.1323$, $P_{X_3} = 0.3360$; $F_{X_1^2} = 3.1306$, $P_{X_1^2} = 0.1371$; $F_{X_2^2} = 0.4605$, $P_{X_2^2} = 0.5275$; $F_{X_3^2} = 0.02374$, $P_{X_3^2} = 0.8836$; $F_{X_1X_2} = 5.6016$, $P_{X_1X_2} = 0.06421$; $F_{X_1X_3} = 0.000634$, $P_{X_1X_3} = 0.9809$; $F_{X_2X_3} = 51.4325$, $P_{X_2X_3} = 0.00082$; $F_{\text{模型}} = 6.5890$, $P_{\text{模型}} = 0.02575$ 。回归模型($P = 0.02575 < 0.05$)达到显著水平,误差项不显著,且回归方程相关系数 $R^2 = 0.9222$,说明回归方程与实际情况吻合很好,可以用此模型预测各因素对 APCP 在喷雾干燥中抗氧化活性的影响。通过对表5中的结果进

行回归分析得出回归方程为 $Y_1 = 75.5342 - 0.2231X_1 - 1.1591X_2 + 0.9522X_3 - 2.3305X_1^2 + 0.8588X_1X_2 + 0.195X_1X_3 - 3.1174X_2^2 + 0.03188X_2X_3 - 9.4461X_3^2$ 。根据回归方程各因素系数绝对值的大小,评价各因素对 APCP 抗氧化活性的影响程度,其大小顺序依次为进料流速、出口温度、进口温度。根据回归方程可以得出 APCP 抗氧化活性在喷雾干燥过程中损失最小的最佳因子水平为进口温度 164.59°C , 出口温度 104.02°C , 进料流速 4.57 mL/min 。为了操作方便,将最佳工艺调整为进口温度 165°C , 出口温度 104°C , 进料流速 4.6 mL/min 。此时 APCP 抗氧化活性损失最小,清除率达 75.68% 。喷雾干燥产品水分含量决定其品质和贮存时间,是喷雾干燥成功与否的关键。该试验对 APCP 干燥产品水分含量进行了测定,结果如表5,发现水分含量波动较大,最大值达 $(8.47 \pm 0.35)\%$, 此水分含量条件下不利于产品保存;最小值为 $(6.01 \pm 0.13)\%$, 远远低于水分含量 8% 的安全线^[9]。在最佳喷雾干燥工艺条件下,APCP 产品水分含量为 $(6.35 \pm 0.43)\%$ 。

2.4.3 APCP 活性保持分析。将喷雾干燥粉和冷冻干燥粉配成浓度为 20 mg/mL 的 APCP 水溶液,根据两者清除 $\text{O}_2\cdot^-$ 能力的比值,进一步考察通过喷雾干燥所得到 APCP 清除 $\text{O}_2\cdot^-$ 能力的保持水平,结果见表6。

表6 APCP 活性保持率

Table 6 Keeping activity of APCP

项目 Parallel	APCP 活性保持率 Keeping activity rate of APCP//%	水分含量 Moisture content//%
平行1 Parallel 1	96.05	6.75
平行2 Parallel 2	85.00	6.07
平行3 Parallel 3	90.96	6.34
平均值 Average value	90.67 ± 5.53	6.35 ± 0.43

由表6可知,APCP 在喷雾过程中其活性保持率为 $(90.67 \pm 5.53)\%$, 水分含量为 $(6.35 \pm 0.43)\%$, 进一步说明出口温度为 165°C , 出口温度 104°C , 进料流速 4.6 mL/min 的条件下既能得到 APCP 喷雾干燥粉,又能很好地保持其活性,此喷雾干燥工艺适合 APCP 进行工业化生产。

2.4.4 APCP 干燥样品理化特性分析。以冷冻干燥样品为参照物,评价经喷雾干燥后 APCP 的理化特性,结果如表7和图1。从表7中可见,经喷雾干燥后 APCP 堆积密度和溶解时间都变大,可能原因是 APCP 水溶液经雾化器喷成微小雾粒,经热风干燥成微小颗粒粉末,成品颗粒之间间隙变小,使得一定体积内能堆积更多的 APCP,造成堆积密度变大,也正是因为此,水中溶解时 APCP 粉末表面迅速吸水湿润,减缓水进入内部的速度而延长溶解时间;颜色存在变白趋势,可能是由于受高温、雾化和样品水分含量共同影响的结果,清除 $\text{O}_2\cdot^-$ 能力下降是高温导致活性氨基酸残基部分结构遭到破坏。图1中样品的吸湿曲线比冷冻干燥低,可能由于样品堆积密度变大,或高温破坏样品中部分亲水基团。

表 7 APCP 干燥样品理化特性分析

Table 7 Analysis on chemical and physical properties of APCP drying sample

样品 Sample	堆积密度 Stacking density g/mL	自然溶解 Natural dissolution s	搅拌溶解 Stirring and dissolving//s	感官色泽 Sensory color	清除 O ₂ ^{·-} 能力 Scavenging capacity of O ₂ ^{·-} //%
冷冻干燥样品 Freeze-dried sample	0.563	50	23	棕黄色	83.48
喷雾干燥样品 Spray drying sample	0.593	140	90	淡黄白色	75.68

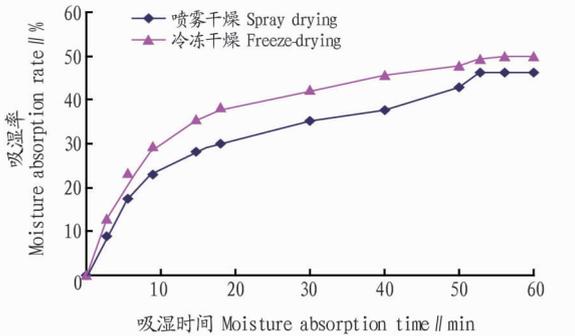


图 1 APCP 吸湿曲线

Fig. 1 Moisture adsorption curve of APCP

3 结论与讨论

喷雾干燥过程中,进出口温度增高、APCP 清除 O₂^{·-} 能力保持水平降低,如何保持 APCP 清除 O₂^{·-} 能力与制得优良品质的干粉是该试验研究的重点。出口温度为 80 ℃、进料流速 6 mL/min 时,进口温度 150 ℃ 的 APCP 干燥粉清除 O₂^{·-} 能力为(78.90 ± 0.41)%,当增加到 180 ℃ 时清除能力降低至(76.80 ± 0.42)%,经统计分析发现,两者差异显著($P < 0.05$);进口温度为 160 ℃、进料流速 6 mL/min 时,出口温度 80 ℃ 的 APCP 干燥粉清除 O₂^{·-} 能力为(78.76 ± 0.13)%,当增加到 100 ℃ 时清除能力降低至(72.38 ± 0.27)%,经 T 检验发现两者差异显著($P < 0.05$);可能是 180 ℃ 进口高温和 100 ℃ 出口高温破坏了清除 O₂^{·-} 能力强的活性氨基酸结构,从而降低了清除 O₂^{·-} 能力。APCP 处在喷雾干燥最佳进出口温度条件下(进口温度 165 ℃、出口温度 104 ℃),清除 O₂^{·-} 能力从 83.48% 降低到 75.68%,将近下降 10 个百分点。导致活性下降的原因可能是高温导致氢键断裂或清除 O₂^{·-} 能力强的活性氨基酸残基非化学键结构破坏,这与赵谋明等^[10] 学者研究有一致的结论,其通过进口温度 160 ℃,出口温度 90 ℃ 的喷雾干燥工艺制备了色泽较浅、粉末较细的蓝园鲈抗氧化肽粉剂,其活性保持率为(93.50 ± 2.30)%,也将近下降 7%;但与周雪松等^[11] 和姜瞻梅等^[12] 学者的结论不一致,周雪松通过进口温度为 160 ℃,出口温度为 90 ℃ 喷雾干燥工艺制备鸡肉蛋白酶解产物干燥粉,发现其清除 DPPH· 的活性和还原力与喷雾干燥前无显著差异($P > 0.05$),这可能是由于进口温度和出口温度都低于笔者的该试验,没有明显破坏清除 DPPH· 能力强和还原力强的活性氨基酸残基,但其没有研究清除 O₂^{·-} 能力是否降低;姜瞻梅等^[12] 将酪蛋白源 ACE 抑制肽通过进口温度 180 ℃,出口温度 100 ℃ 喷雾干燥时发现温度对其活性影响不显著,其进口温度比该试验高,却能完好地保持其 ACE 抑制活性,可能是由于 ACE 抑制肽结构与 APCP 不一致,其结构能提高耐高温能力。

O₂^{·-} 是生物体内一种重要的自由基,性质活泼,具有多种反应特性,具有很强的氧化性和还原性,它既可作为还原剂又可作为氧化剂,还可作为亲核物和配体参与反应。由于 O₂^{·-} 性质活泼,会攻击生命大分子物质及细胞壁,造成机体的多种损伤和病变,加速机体的衰老,如破坏核酸中的碱基而产生突变,攻击生物膜上的多不饱和脂肪酸发生脂质过氧化,导致细胞膜结构和功能改变,出现细胞坏死和变性。可见, O₂^{·-} 是生物体中具有典型代表的活性氧自由基,因此,该试验评价 APCP 抗氧化活性时以清除 O₂^{·-} 能力为指标。

APCP 水溶液喷雾干燥工艺优化数学回归模型为 $Y_1 = 75.5342 - 0.2231X_1 - 1.1591X_2 + 0.9522X_3 - 2.3305X_1^2 + 0.8588X_1X_2 + 0.195X_1X_3 - 3.1174X_2^2 + 0.03188X_2X_3 - 9.4461X_3^2$ 。采用此模型在该试验范围内能准确预测在喷雾干燥过程中各因素对 APCP 清除 O₂^{·-} 能力的影响。通过试验结果方差分析可知,在该试验范围内,各因素对 APCP 清除 O₂^{·-} 能力的影响作用大小顺序依次为进料流速、出口温度、进口温度。APCP 水溶液喷雾干燥最佳工艺为进口温度 165 ℃,出口温度 104 ℃,进料流速 4.6 mL/min,此时 APCP 清除 O₂^{·-} 能力保持最好,清除率达到 75.68%。APCP 经最佳干燥工艺干燥后清除 O₂^{·-} 能力得到很好地保持,其活性保持率为(90.67 ± 5.53)%,水分含量为(6.35 ± 0.43)%;干燥产品堆积密度变大、溶解时间延长、吸湿率降低、色泽稍微变白、清除 O₂^{·-} 能力下降 10% 左右。该方法具有耗能低、效率高、易连续化生产等优点,为 APCP 工业化生产和应用提供理论基础。

参考文献

- [1] 许兵红,曾莉萍,赵春澎,等. 丝光绿蝇抗菌肽的热稳定性研究[J]. 中国媒介生物学及控制杂志,2015,16(4):254-257.
- [2] 谢海伟,代建国,郭勇,等. 高效液相色谱法评定抗菌肽蜜素分子一级结构稳定性的研究[J]. 生物学杂志,2008,25(2):26-29.
- [3] 夏天瑶,白春杰,杨琳,等. 注射用胸腺肽热稳定性试验的观察[J]. 微生物学免疫学进展,2007,35(2):30-32.
- [4] 林弘通. 乳粉制造工程[M]. 北京:中国轻工业出版社,1980.
- [5] 皮钰珍,张奇,刘长江,等. 鹿胎盘肽微胶囊技术的研究[J]. 食品研究与开发,2008,29(5):28-32.
- [6] 陈清香. 番木瓜干燥特性及其粉体性质研究[D]. 广州:华南农业大学,2009.
- [7] 吴克刚,柴向华. 食品微胶囊技术[M]. 北京:中国轻工业出版社,2016.
- [8] 王层飞,李忠海,龚吉军,等. 生物活性肽的保健功能及其在食品工业中的应用研究[J]. 食品与机械,2008,24(3):128-132.
- [9] 徐蕾蕾,王卫国,李古军. 谷胱甘肽小肽液的喷雾干燥工艺参数研究[J]. 粮食与饲料工业,2008(5):34-35.
- [10] 赵谋明,何婷,赵强忠,等. 蓝园鲈抗氧化肽抗氧化稳定性研究[J]. 食品科学,2009,30(1):128-130.
- [11] 周雪松,赵谋明. 鸡肉蛋白酶解产物稳定性的研究[J]. 食品研究与开发,2007,28(8):1-4.
- [12] 姜瞻梅,迟涛,吴刚,等. 酪蛋白源 ACE 抑制肽干燥工艺的探讨[J]. 中国乳品工业,2007,35(7):23-24.