



引用格式:章银良,蔡亚玲,李鑫.*L*-赖氨酸-*D*-阿拉伯糖美拉德反应产物自由基清除活性及其反应条件的优化[J].轻工学报,2017,32(5):1-7.

中图分类号:TS201.2 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.5.001

文章编号:2096-1553(2017)05-0001-07

L-赖氨酸-*D*-阿拉伯糖美拉德反应产物 自由基清除活性及其反应条件的优化

Free radical scavenging activity and reaction conditions optimization of Maillard reaction products derived from *L*-lysine-*D*-arabinose

章银良^{1,2},蔡亚玲^{1,2},李鑫^{1,2}

ZHANG Yin-liang^{1,2},CAI Ya-ling^{1,2},LI Xin^{1,2}

1. 郑州轻工业学院 食品与生物工程学院,河南 郑州 450001;

2. 食品生产与安全河南省协同创新中心,河南 郑州 450001

1. School of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. Collaborative Innovation Center for Food Production and Safety in He'nan Province, Zhengzhou 450001, China

关键词:

L-赖氨酸;*D*-阿拉伯糖;美拉德反应产物;自由基清除活性

Key words:

L-lysine; *D*-arabinose; Maillard reaction product; free radical scavenging activity

摘要:以*L*-赖氨酸和*D*-阿拉伯糖为底物制备MRPs,以羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$)和DPPH自由基(DPPH \cdot)清除能力为评价指标,研究反应温度、加热时间、反应初始pH值和反应底物摩尔比对3种自由基清除率的影响,并在单因素试验基础上通过均匀试验优化反应条件,在最佳工艺条件下,MRPs对 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和DPPH \cdot 的清除率分别为47.28%,75.16%和89.81%。因此,*L*-赖氨酸和*D*-阿拉伯糖的MRPs不仅可以用于食品着色与风味增强,而且有助于预防体内多种自由基损伤引起的疾病。

收稿日期:2017-05-26

基金项目:河南省科技攻关项目(122102110055);“食品生产与安全河南省协同创新中心”研究生创新基金项目(FCICY201610);郑州轻工业学院大学生科技活动项目

作者简介:章银良(1963—),男,浙江省上虞市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为食品品质控制与食品安全。

Abstract: The scavenging effects of Maillard reaction products (MRPs) derived from *L*-lysine-*D*-arabinose against on hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$), superoxide anion radical ($\text{O}_2^{\cdot-}$) and DPPH radical (DPPH \cdot) under different reaction temperatures, reaction times, initial pH values and substrate molar ratios were investigated, and the reaction conditions were optimized by uniform optimized experiment. Under the optimum conditions, the free radical scavenging rates for MRPs against $\cdot\text{OH}$, $\text{O}_2^{\cdot-}$ and DPPH \cdot were 47.28%, 75.16% and 89.81%, respectively. Therefore, the MRPs derived from *L*-lysine-*D*-arabinose could not only be used for food coloring and flavor enhancement, but also help to prevent the diseases caused by various free radical damages *in vivo*.

0 引言

美拉德反应 MR (Maillard reaction) 是一种非酶促褐变反应, 它是一类含羰基化合物(如还原糖、醛或酮)、含氨基化合物(如氨基酸、蛋白质)或任何含氮化合物之间的一种非常复杂的反应^[1]. 在食品的加工和储藏过程中, MR 能够产生许多改进食品风味和颜色的物质, 称为美拉德反应产物 MRPs (Maillard reaction products)^[2]. 研究表明, MRPs 具有许多有益的作用, 如清除自由基^[3-4], 较强的还原力和抗氧化能力^[5-6], 抑制脂质氧化等^[7].

D-阿拉伯糖是一种功能性还原糖, 为白色结晶体, 易溶于水, 是 *D*-核糖的戊糖类似物^[8]. MR 中五碳糖的褐变速度是六碳糖的 10 倍, 其中 *D*-阿拉伯糖仅次于 *D*-核糖. 赖氨酸是一种碱性氨基酸, 为人体必需的氨基酸之一, 其对温度非常敏感, 极易发生 MR. 刘海燕等^[9]以阿拉伯糖与赖氨酸或甘氨酸为原料, 制备了一系列不同反应条件下的 MRPs, 采用硫氰酸铁法, 以合成抗氧化剂 TBHQ 为对照, 探讨 MRPs 的体外抗氧化活性. 结果发现, 用阿拉伯糖-赖氨酸体系制备的 MRPs 的抗氧化活性高于用阿拉伯糖-甘氨酸体系制备的 MRPs 的抗氧化活性, 且在最佳反应条件下, 模拟体系所制备的 MRPs 的抗氧化能力优于 TBHQ.

目前, 学界对 MRPs 抗氧化能力的研究主要集中在模拟体系中不同糖与氨基酸组合 MRPs 的抗氧化活性比较和工艺研究、实际体系中 MRPs 的抗氧化活性研究、各种加工技术

对模拟体系 MRPs 抗氧化活性的影响研究等, 而针对不同的自由基, MRPs 对其清除的条件是否具有特异性尚鲜见报道. 基于此, 本研究拟以 *L*-赖氨酸-*D*-阿拉伯糖为 MR 底物, 在单因素试验基础上通过均匀试验优化反应条件, 采用分光光度法考察 MRPs 对羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$), 超氧阴离子自由基 ($\text{O}_2^{\cdot-}$) 和 DPPH \cdot 自由基的清除能力和最佳工艺条件, 旨在为 *L*-赖氨酸-*D*-阿拉伯糖的 MRPs 深度研究和综合利用提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

L-赖氨酸、*D*-阿拉伯糖, Solarbio 试剂公司产; 无水乙醇、DPPH (1,1-二苯基-2-苦肟基自由基)、邻二氮菲、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、硫酸亚铁、过氧化氢、三(羟甲基)氨基甲烷、盐酸和邻苯三酚等, 均为分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司产.

1.2 仪器与设备

SQP 电子天平, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司产; HJ-3 恒温磁力加热搅拌器, 常州国华电器有限公司产; pH 计, 瑞士梅特勒-托利多公司产; HH-1 智能型数显恒温油浴槽, 巩义市予华仪器有限责任公司产; HH 恒温水浴锅, 江苏金坛市中大仪器厂产; T6 新世纪紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司产.

1.3 实验方法

1.3.1 MRPs 的制备及其自由基清除率的单

因素试验 在基本试验条件为反应温度 105 ℃,加热时间 30 min,反应初始 pH 值为 9.0,反应底物摩尔比 $n(L\text{-赖氨酸}) : n(D\text{-阿拉伯糖}) = 1 : 1$ 的情况下,分别对反应温度(45 ℃,60 ℃,75 ℃,90 ℃,105 ℃,120 ℃和 135 ℃)、加热时间(20 min,30 min,60 min,90 min,120 min,150 min,180 min,210 min 和 240 min)、反应初始 pH 值(5.0,6.0,7.0,8.0,9.0,10.0,11.0,12.0 和 13.0)和反应底物摩尔比 $n(L\text{-赖氨酸}) : n(D\text{-阿拉伯糖})$ (1 : 1, 1.5 : 1,2 : 1,2.5 : 1,3 : 1,1 : 3,1 : 2.5,1 : 2 和 1 : 1.5)进行单因素试验,不同条件下制备的 MRP_s 经 10 倍稀释用于分析各单因素对 ·OH, O₂^{-·} 和 DPPH· 这 3 种自由基的清除能力。

1.3.2 MRP_s 对自由基清除率的均匀试验与验证 在单因素试验的基础上,选择对自由基清除能力影响较大的因素进行均匀试验与优化,求出 MRP_s 清除 3 种自由基的最佳工艺条件,并按照优化后的条件对其清除自由基能力进行验证试验。

1.3.3 ·OH 清除率的测定 MRP_s 对 ·OH 清除能力的测定参考许丹等^[10] 的方法。取 0.6 mL 5 mmol/L 邻二氮菲溶液于试管中,依次加入 0.4 mL 0.2 mol/L 磷酸缓冲溶液(pH = 7.4) 和 0.6 mL 5 mmol/L FeSO₄ 溶液,混合均匀后,加入不同条件下制备的 MRP_s 各 2 mL 和 0.4 mL 0.1% (体积分数)的 H₂O₂,于 37 ℃ 恒温水浴中反应 60 min,在 536 nm 处测定其吸光度值 $A_{\text{样}}$ 。相同操作条件下,以去离子水代替 MRP_s,测定吸光度值 $A_{\text{损}}$;以去离子水分别代替 MRP_s 和 H₂O₂,测定吸光度值 $A_{\text{未损}}$ 。MRP_s 对 ·OH 的清除率用下式计算:

$$\cdot\text{OH 清除率} = \frac{(A_{\text{样}} - A_{\text{损}})}{(A_{\text{未损}} - A_{\text{损}})} \times 100\%$$

1.3.4 O₂^{-·} 清除率的测定 MRP_s 对 O₂^{-·} 清除能力的测定参考赵晶等^[11] 的方法,并稍作

修改。将 4.5 mL 0.1 mol/L Tris-HCl 缓冲液 (pH = 8.2)、不同条件下制备的 MRP_s 样液 1 mL 和蒸馏水 2.4 mL 依次加入到离心管中混匀,在 25 ℃ 恒温水浴锅中反应 10 min 后加入 0.1 mL 6 mmol/L 邻苯三酚,摇匀,反应 3 min 后再加入 0.1 mL 10 mol/L HCl 溶液,终止反应,以去离子水为参比,在 325 nm 处测定吸光度值 A_i 。MRP_s 对 O₂^{-·} 的清除率用下式计算:

$$\text{O}_2^{\cdot-} \text{清除率} = \frac{A_0 - A_i}{A_0} \times 100\%$$

式中, A_0 为用去离子水代替 MRP_s 时测得的吸光度, A_i 为加 MRP_s 测得的吸光度与加 MRP_s 但未加邻苯三酚时测得的吸光度差。

1.3.5 DPPH· 清除率的测定 MRP_s 对 DPPH· 清除率的测定参考 S. M. Mohsen 等^[12] 的方法,并稍作修改。取 1 mL 不同条件下制备的 MRP_s 和 2 mL DPPH· 无水乙醇溶液 (0.1 mmol/L, 现用现配),充分混匀,室温条件下避光反应 30 min,在 517 nm 处测定其吸光度值,记为 $A_{\text{样品}}$ 。相同操作条件下,以去离子水代替 MRP_s,作为空白组,测定吸光度值 $A_{\text{空白}}$;以无水乙醇代替 DPPH· 无水乙醇溶液,作为对照组,测定吸光度值 $A_{\text{对照}}$ 。MRP_s 对 DPPH· 清除率用下式计算:

$$\text{DPPH}\cdot \text{清除率} = \left[1 - \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}}{A_{\text{空白}}} \right] \times 100\%$$

2 结果与分析

2.1 MRP_s 对 3 种自由基清除率影响的单因素试验分析

2.1.1 反应温度的影响 不同反应温度下 MRP_s 对 3 种自由基清除率的影响如图 1 所示。由图 1 可知,随着反应温度的升高,MRP_s 对 3 种自由基的清除率均呈现逐渐上升的趋势。DPPH· 清除率在 75 ℃ 之后增长迅速,在 105 ℃ 时其 DPPH· 清除率约是 90 ℃ 时的 2.5 倍,在 120 ℃ 时其 DPPH· 清除率达到最大

值 76.16%。在反应温度 45 ~ 135 °C 范围内, MRP_s 对 O₂⁻· 清除率要高于 ·OH 的清除率, 但在 135 °C 时 MRP_s 对 ·OH 的清除率迅速增加至 70.6%, 略高于其对 O₂⁻· 的清除率, 这可能是由于较高温度下产生的 MRP_s 中含有更多的清除 ·OH 的物质。

2.1.2 加热时间的影响 不同加热时间下 MRP_s 对 3 种自由基清除率的影响如图 2 所示。由图 2 可知, 随着加热时间的延长, MRP_s 对 DPPH· 清除率先迅速增加, 由 20 min 时的 45.2% 增加到 60 min 时的 76.51%, 而在 60 min 之后增长速度较为缓慢; MRP_s 对 ·OH 和 O₂⁻· 清除率的影响则随着时间的延长呈现缓慢增加的趋势。这说明 MRP_s 中具有抗氧化活性的物质在反应初期就已形成, 并随反应时间的延长持续保持相对稳定的状态。

2.1.3 反应初始 pH 值的影响 不同反应初始 pH 值下 MRP_s 对 3 种自由基清除率的影响如图 3 所示。由图 3 可知, 不同初始 pH 值下 MRP_s 对 3 种自由基清除率的影响具有特异性。这是由于 MRP_s 对 3 种自由基的清除机理不同, 因此不同自由基所达到的最大清除率也不相同。从图 3 可以看出, 初始 pH 值为 8.0 时对 DPPH· 清除率的影响达到最大值 60.5%; 对 O₂⁻· 的最大清除率对应初始 pH 值为 12.0; 当初始 pH = 11.0 时, 对 ·OH 清除率达到最大。虽然 3 种自由基所对应的最佳初始 pH 值各不相同, 但从总体上来说, 碱性条件下生成的 MRP_s 具有更好的抗氧化活性。

2.1.4 底物摩尔比的影响 不同反应底物摩尔比条件下 MRP_s 对 3 种自由基清除率的影响如图 4 所示。由图 4 可知, 不同底物摩尔比对 3 种自由基清除率的影响具有特异性。从对 DPPH· 的清除率来看, 随着反应体系中 D-阿拉伯糖含量的增加, DPPH· 自由基清除率明显优于以 L-赖氨酸为主的反应体系; 底物摩尔比对 O₂⁻·

和 ·OH 清除率的影响相对较小。

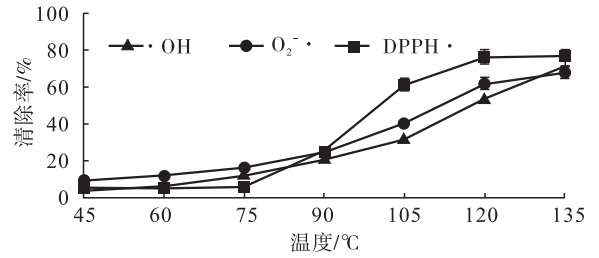


图 1 不同反应温度下 MRP_s 对 3 种自由基清除率的影响

Fig. 1 The scavenging effect of MRP_s against ·OH, O₂⁻· and DPPH· free radicals under different reaction temperatures

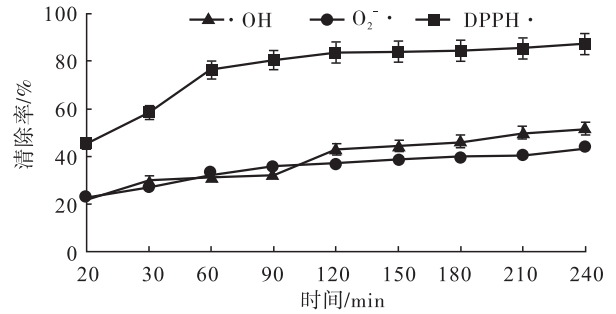


图 2 不同加热时间下 MRP_s 对 3 种自由基清除率的影响

Fig. 2 The scavenging effect of MRP_s against ·OH, O₂⁻· and DPPH· free radicals under different heating times

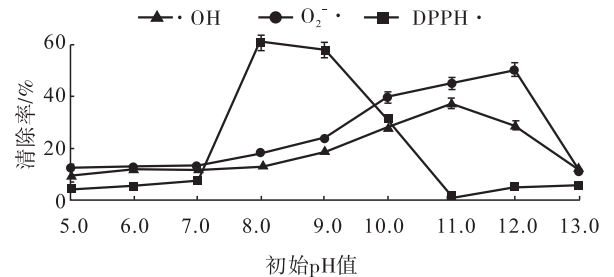


图 3 不同初始 pH 值下 MRP_s 对 3 种自由基清除率的影响

Fig. 3 The scavenging effect of MRP_s against ·OH, O₂⁻· and DPPH· free radicals under different pH values

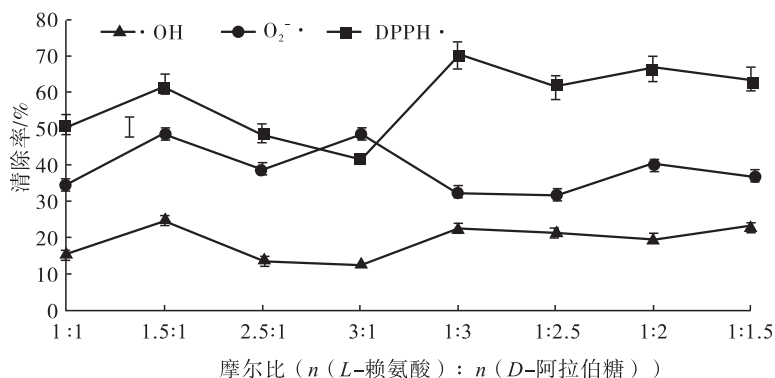


图4 不同反应底物摩尔比下MRPs对3种自由基清除率的影响

Fig. 4 The scavenging effect of MRPs against $\cdot\text{OH}$, $\text{O}_2^{\cdot-}$ and DPPH \cdot free radicals under different molar ratios

2.2 MRPs对3种自由基清除活性的均匀试验分析

通过单因素试验,选取合适的加热时间(X_1)、底物摩尔比(X_2)、反应初始pH值(X_3)和反应温度(X_4)4个因素,采用 $U_7^*(7^4)$ 均匀试验表进行4因素7水平的均匀试验,其设计如表1所示,试验结果见表2,采用Mathematics 4.0软件分析结果见表3和表4。

由软件分析结果可知,L-赖氨酸-D-阿拉伯糖MRPs对 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和DPPH \cdot 清除率影响的主次顺序分别为: $X_4 > X_3 > X_1 > X_2$; $X_4 > X_2 > X_1 > X_3$; $X_3 > X_4 > X_1 > X_2$ 。其中,反应温度与反应初始pH值对 $\cdot\text{OH}$ 和DPPH \cdot 清除率具有极显著的交互作用;加热时间与底物摩尔比,反应温度与底物摩尔比对 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 清除率均具有极显著的交互作用;加热时间与反应温度对DPPH \cdot 清除率也具有极显著的交互作用。

回归方程如下:

$$Y(\cdot\text{OH清除率}) = 57.452 - 2.684 \times 10^{-6} X_1^3 - 0.067 X_3 X_4 + 3.296 \times 10^{-5} X_4^3$$

$$Y(\text{O}_2^{\cdot-}\text{清除率}) = 58.575 + 1.785 X_2^4 +$$

$$0.085 X_1 X_2 - 0.38 X_2 X_4 + 4.783 \times 10^{-5} X_4^3$$

$$Y(\text{DPPH}\cdot\text{清除率}) = 210.009 + 14.854 X_1^{0.2} -$$

$$0.0001142 X_1^2 X_4 + 0.2700 X_3^2 - 0.0009251 X_3^{1.1} X_4^2$$

从回归方程可得到MRPs清除 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和DPPH \cdot 自由基的最佳条件,从反应温度、加热时间、反应初始pH值和底物摩尔比依次分别为:110℃,60min,7.0和1.5:1;110℃,60min,12.0和1.5:1;110℃,68min,8.0和1:2。从理论上可计算出此条件下MRPs对 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和DPPH \cdot 自由基的清除率分别为49.15%、76.22%和93.51%;经实际试验验证,在此优化条件下得到的MRPs对 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和DPPH \cdot 自由基的清除率分别为47.28%、75.16%和89.81%,与理论值的相对误差分别为1.87%、1.06%和3.70%。这说明以

表1 $U_7^*(7^4)$ 均匀试验因素水平表Table 1 The factors and levels of $U_7^*(7^4)$ uniform experiment

水平	X_1/min	X_2	X_3	$X_4/^\circ\text{C}$
1	30(1)	2:1(3)	11.0(5)	135(7)
2	60(2)	1:2(6)	8.0(2)	120(6)
3	90(3)	1:1(1)	13.0(7)	105(5)
4	120(4)	2.5:1(4)	10.0(4)	90(4)
5	150(5)	1:1.5(7)	7.0(1)	75(3)
6	180(6)	1.5:1(2)	12.0(6)	60(2)
7	210(7)	1:2.5(5)	9.0(3)	45(1)

表2 均匀试验结果

Table 2 The results of uniform experiment

试验号	X_1/min	X_2	X_3	$X_4/^\circ\text{C}$	自由基清除率 $Y/\%$		
					$\cdot\text{OH}$	$\text{O}_2^{\cdot-}$	DPPH \cdot
1	30(1)	2 : 1(3)	11.0(5)	135(7)	43.00	50.38	22.42
2	60(2)	1 : 2(6)	8.0(2)	120(6)	44.60	62.98	80.69
3	90(3)	1 : 1(1)	13.0(7)	105(5)	2.61	17.94	24.20
4	120(4)	2.5 : 1(4)	10.0(4)	90(4)	9.60	42.75	31.85
5	150(5)	1 : 1.5(7)	7.0(1)	75(3)	36.00	8.78	27.31
6	180(6)	1.5 : 1(2)	12.0(6)	60(2)	3.16	9.54	17.79
7	210(7)	1 : 2.5(5)	9.0(3)	45(1)	5.17	6.49	27.76

表3 回归参数表

Table 3 The regression parameter table

$\cdot\text{OH}$ $\text{O}_2^{\cdot-}$ $\text{DPPH}\cdot$	估计值			标准差			观察值			显著性					
	$\cdot\text{OH}$	$\text{O}_2^{\cdot-}$	DPPH \cdot	$\cdot\text{OH}$	$\text{O}_2^{\cdot-}$	DPPH \cdot	$\cdot\text{OH}$	$\text{O}_2^{\cdot-}$	DPPH \cdot	$\cdot\text{OH}$	$\text{O}_2^{\cdot-}$	DPPH \cdot			
1	1	1	1	57.452	58.575	210.009	16.589	7.732	30.157	3.460	-0.076	6.964	0.041	0.947	0.020
X_1^3	X_2^4	$X_1^{0.2}$		-2.684×10^{-6}	1.785	14.853	1.726×10^{-6}	0.365	11.856	-1.555	4.894	1.253	0.218	0.039	0.337
X_3X_4	X_1X_2	$X_1^2X_4$		-0.067	0.085	-1.142×10^{-4}	0.016	0.047	3.8325×10^{-6}	-4.158	1.795	-29.791	0.025	0.214	0.001
X_4^3	X_2X_4	X_3^2		3.296×10^{-5}	-0.380	0.270	7.546×10^{-6}	0.074	0.030	4.368	-5.160	9.059	0.022	0.036	0.012
	X_4^3	$X_3^{1.1}X_4^2$		4.783×10^{-5}	-9.251×10^{-4}		6.862×10^{-6}	4.601×10^{-5}		6.971	-20.105		0.020	0.002	

表4 回归方差分析表

Table 4 The regressive variance analysis table

项目	自由度			偏差平方和			均方			方差比			显著性		
	$\cdot\text{OH}$	$\text{O}_2^{\cdot-}$	DPPH \cdot	$\cdot\text{OH}$	$\text{O}_2^{\cdot-}$	DPPH \cdot	$\cdot\text{OH}$	$\text{O}_2^{\cdot-}$	DPPH \cdot	$\cdot\text{OH}$	$\text{O}_2^{\cdot-}$	DPPH \cdot	$\cdot\text{OH}$	$\text{O}_2^{\cdot-}$	DPPH \cdot
回归模型	3	4	4	2 117.450	3 156.620	2 753.030	705.818	789.154	688.258	11.486	27.070	453.844	0.038	0.036	0.002
残差	3	2	2	184.345	58.305	3.033	61.448	29.153	1.516						
总和	6	6	6	2 301.80	3 214.92	2 756.06									

均匀试验优化后的反应条件组合制备的 MRPs 具有较强的自由基清除能力,且优化结果可靠。

3 结论

本文以 *L*-赖氨酸与 *D*-阿拉伯糖为底物制备 MRPs,在单因素试验的基础上,通过均匀试验确定了 MRPs 对 $\cdot\text{OH}$, $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 DPPH \cdot 自由基清除率的影响因素大小顺序与最佳工艺条件如下。

1) MRPs 对 $\cdot\text{OH}$ 清除率的影响因素大小顺序和最佳反应条件为: $X_4 > X_3 > X_1 > X_2$,即以反应温度为 110°C ,加热时间 60 min,初始 pH 值为 7.0 和底物摩尔比 1.5 : 1 的条件下,

MRPs 对 $\cdot\text{OH}$ 的清除率最高,可达 47.28%。

2) MRPs 对 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 清除率的影响因素大小顺序和最佳反应条件为: $X_4 > X_2 > X_1 > X_3$,即以反应温度为 110°C ,加热时间 60 min,初始 pH 值为 12.0 和底物摩尔比 1.5 : 1 的条件下,MRPs 对 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的清除率最高,可达 75.16%。

3) MRPs 对 DPPH \cdot 清除率的影响因素大小顺序和最佳反应条件为: $X_3 > X_4 > X_1 > X_2$,即以反应温度为 110°C ,加热时间 68 min,初始 pH 值为 8.0 和底物摩尔比 1 : 2 的条件下,MRPs 对 DPPH \cdot 的清除率最高,可达 89.81%。

由此可知,MRPs 能够有效地抑制自由基的产生,从而起到抗氧化作用.因此 *L*-赖氨酸

与 *D*-阿拉伯糖的 MRP 不仅可以用于食品着色与风味增强,而且有助于预防体内多种由自由基损伤引起的疾病,具有一定的保健作用.

参考文献:

- [1] LIU J, RU Q, DING Y. Glycation a promising method for food protein modification: Physico-chemical properties and structure, a review [J]. Food Research International, 2012, 49 (1): 170.
- [2] JUNG W K, PARK P J, AHN C B, et al. Preparation and antioxidant potential of Maillard reaction products (MRPs) from chitooligomer [J]. Food Chemistry, 2014, 145(4): 173.
- [3] HWANG I G, KIM H Y, WOO K S, et al. Biological activities of Maillard reaction products (MRPs) in a sugar-amino acid model system [J]. Food Chemistry, 2011: 221.
- [4] MORALES F J, JIMÉNEZ-PÉREZ S. Free radical scavenging capacity of Maillard reaction products as related to colour and fluorescence [J]. Food Chemistry, 2001, 72(1): 119.
- [5] GU F L, JINMOON K, HAYAT K, et al. Characteristics and antioxidant activity of ultrafiltrated Maillard reaction products from a casein-glucose model system [J]. Food Chemistry, 2009, 117(1): 48.
- [6] YU X, ZHAO M, HU J, et al. Correspondence analysis of antioxidant activity and UV-Vis absorbance of Maillard reaction products as related to reactants [J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46(1): 1.
- [7] CHAWLA S P, CHANDER R, SHARMA A. Antioxidant formation by γ -irradiation of glucose-amino acid model systems [J]. Food Chemistry, 2007, 103(4): 1297.
- [8] 周生民, 冯文红, 张玲, 等. *D*-阿拉伯糖结晶影响因素分析 [J]. 生物技术进展, 2015, 5(6): 451.
- [9] 刘海燕, 李卫宁, 刘伟华. 阿拉伯糖与赖氨酸或甘氨酸的模式 Maillard 反应产物抗氧化性研究 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(10): 6077.
- [10] 许丹, 龚燕丹, 沈燕飞, 等. 反应温度对鸡骨蛋白酶解液美拉德产物光谱特性和抗氧化活性的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(7): 126.
- [11] 赵晶, 张宏坤, 马丹雅, 等. 葡萄糖与赖氨酸美拉德反应产物的抗氧化性研究 [J]. 食品工业科技, 2013, 34(11): 92.
- [12] MOHSEN S M, AMMAR A S M. Total phenolic contents and antioxidant activity of corn tassel extracts [J]. Food Chemistry, 2009, 112(3): 595.