

糖基化改性对酪蛋白酶解产物抗氧化活性的影响

Effects of glycosylation modification on the antioxidant activity of casein-enzymatic hydrolysate

赵玉滨 穆秋霞 曲柳青 崔素萍

ZHAO Yu-bin MU Qiu-xia QU Liu-qing CUI Su-pin

(黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江 大庆 163319)

(College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

摘要:为了提高酪蛋白酶解产物的抗氧化活性,将酶解产物分别与葡萄糖、木糖、果糖进行糖基化改性。在酶解产物与糖质量比为 1:2 的条件下,研究改性条件对产物抗氧化活性的影响。结果表明,酶解产物与木糖、果糖改性后的产物,在 pH 7.0 时羟基自由基清除率达到最大,分别为 38.63%、32.82%(均高于对照);pH 7.0 时,葡萄糖、木糖糖基化产物的还原能力最强。随着反应温度升高,酶解产物与 3 种糖的糖基化产物的抗氧化活性不断增强,在 120、130 °C 时,3 种糖的糖基化产物的羟基自由基清除率和还原力均高于对照。在反应 4 h 时,酶解产物与木糖、果糖及葡萄糖糖基化后的羟基自由基清除率都达到最大(分别为 66.57%、83.33%、42.00%,均高于对照),还原力最大分别为 1.12、1.14、1.05(均高于对照)。糖基化改性可以提高酪蛋白酶解产物的抗氧化活性,其中酶解产物与木糖的糖基化产物的抗氧化活性最高,其最佳糖基化反应条件为 pH 7.5、温度 130 °C、时间 4 h。

关键词:酪蛋白酶解产物;还原糖;糖基化反应;抗氧化活性;羟基自由基清除率;还原力

Abstract: In order to enhance the antioxidant activity of the casein hydrolysate, the enzymatic hydrolysate was modified by glycosylation with glucose, xylose and fructose, respectively. The effects of modification conditions on the antioxidant activity of the product were investigated under the mass ratio of enzymatic hydrolysate to sugar 1:2. The results showed that the hydroxyl radical clearance rate reached the maximum at pH 7.0, which were 38.63% and 32.82%, respectively, and each was

higher than the control. At pH 7.0, the reducing ability of the enzymatic hydrolysate was the strongest when modified by glycosylation with glucose or xylose. As the reaction temperature increased, the antioxidant activity of the glycosylation products of the enzymatic hydrolysate and three sugars were continuously enhanced. At the temperature of 120 and 130 °C, the hydroxyl radical scavenging rate and reducing power of the glycosylation products of the three sugars were higher than the control. At 4h, the hydroxyl radical scavenging rate of the glycosylation products of the enzymatic hydrolysate and xylose, fructose and glucose reached the maximum, i.e. 66.57%, 83.33% and 42.00%, respectively, which were higher than the control; the maximum reducing power were 1.12, 1.14 and 1.05, respectively, which were higher than the control. Glycosylation can improve the antioxidant activity of the enzymatic hydrolysis products of casein, among which the glycosylation products of enzymatic hydrolysis products and xylose have the highest antioxidant activity. The optimal glycosylation reaction conditions are pH 7.5, temperature 130 °C and time 4 h.

Keywords: casein enzymatic hydrolysate; reducing sugar; glycosylation reaction; hydroxyl radical scavenging rate; reducing power

美拉德反应(Maillard reaction, MR)是指食品中羰基化合物与氨基化合物发生的羰氨缩合反应^[1],又称蛋白质或氨基酸的糖基化改性反应。美拉德反应不但可以改善食品的颜色和风味,而且其反应产物还具有抗氧化活性等,Hodge^[2]认为美拉德反应会生成类黑精色素及其他高分子杂环化合物;孙常雁等^[3]研究发现乳清蛋白肽的美拉德反应产物(MRPs)具有较强的总还原力、羟基自由基清除能力,且抗氧化活性随着乳清蛋白肽美拉德反应产物质量浓度的增加而加强;刘蒙蒙^[4]研究发现罗非鱼皮胶原蛋白肽—葡萄糖 MRPs 抗氧化活性随加热时间的延长以及葡萄糖浓度增加而提高,且在碱性介质中产物

基金项目:黑龙江省农垦总局重点科研计划项目(编号:HKKYZD190710);黑龙江省教育厅 2017 年度教改项目(编号: SJGY20170446)

作者简介:赵玉滨,男,黑龙江八一农垦大学在读硕士研究生。

通信作者:崔素萍(1968—),女,黑龙江八一农垦大学教授,博士。

E-mail: cuisup@163.com

收稿日期:2019-05-15

活性较高;钱森和等^[5]发现美拉德反应能够有效增强芝麻多肽的抗氧化活性;项惠丹等^[6]研究发现大豆分离蛋白与还原糖反应的 MRPs 抗氧化性均低于酪蛋白制备的 MRPs,且两种 MRPs 都有较强的抗氧化活性;Lertittikul 等^[7]在研究猪血红蛋白和葡萄糖发生美拉德反应后,发现不同 pH 和加热时间对 MRPs 的抗氧化能力都有显著影响。Dong 等^[8]研究发现水解 β -乳球蛋白与葡萄糖经美拉德反应后,MRPs 的抗氧化能力显著提高。

现有研究主要集中在某单一的反应物种类及反应条件对 MRPs 的抗氧化活性的影响,尚未见对反应物种类和反应条件对 MRPs 抗氧化活性的影响进行系统研究的报道。试验拟将酪蛋白碱性蛋白酶的酶解产物与还原糖(葡萄糖、果糖、木糖)在不同反应 pH、温度和时间下建立糖基化反应体系,系统分析还原糖种类和反应条件对酪蛋白碱性蛋白酶的酶解产物糖基化产物的抗氧化活性的影响,并优化反应条件,以期对今后的糖基化产物的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

酪蛋白:生化试剂,天津市大茂化学试剂厂;

2709 碱性蛋白酶(2.0×10^5 U/g):生化试剂,北京鸿润宝顺科技有限公司;

葡萄糖、果糖、木糖:分析纯,山东省龙力生物科技股份有限公司;

水杨酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

硫酸亚铁、抗坏血酸、磷酸盐缓冲液、铁氰化钾、三氯乙酸、氯化铁、过氧化氢:分析纯,天津市大茂化学试剂厂。

1.2 试验仪器

紫外分光光度计:INESA-L5 型,上海仪电分析仪器有限公司;

油浴锅:DF-1 型,金坛市虹盛仪器厂;

分析天平:BSA124S 型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;

水浴锅:XMTD-204 型,江苏科析仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 酪蛋白碱性蛋白酶酶解产物的制备 将酪蛋白与蒸馏水配制成质量浓度为 5% 的溶液,然后用 1 mol/L NaOH 调 pH 至 10,加入 4 000 U/mL 的碱性蛋白酶,在 55 °C 酶解 3 h,然后在 90 °C 水浴 10 min,即得酪蛋白酶解液,酶解液冷冻干燥备用。

1.3.2 糖基化改性的单因素试验设计 以反应产物抗氧化活性为指标,进行单因素试验条件的筛选。按糖与酪蛋白质量比为 2:1 的比例,准确称量 2 g 葡萄糖、木糖和果糖分别溶于酪蛋白碱性蛋白酶酶解产物溶液中,进行

糖基化改性。待完全溶解后调 pH 为 7.0,8.0,9.0,10.0,在 110 °C 下反应 2 h,确定最佳 pH;调 pH 为 10.0,在 100,110,120,130 °C 恒温下反应 2 h,确定最佳反应温度;调 pH 为 10.0,在 110 °C 恒温下反应 2,3,4,5 h,确定最佳反应时间。以上每个处理做 3 次重复。

1.3.3 正交试验设计 在单因素试验的基础上,选取最优还原糖、pH、温度和时间,每个单因素确定 3 个较优水平。采用三因素三水平正交试验设计,以选择最优抗氧化的糖基化反应条件。

1.3.4 糖基化改性产物抗氧化活性的测定

(1) 清除羟基自由基活性:取 50 μ L 糖基化反应产物(0.05 g/mL),加水定容至 2 mL,稀释 40 倍,剩余步骤见文献^[9]。

(2) 还原力:取 20 μ L 糖基化反应产物(0.05 g/mL),加水定容至 2 mL,稀释 100 倍,剩余步骤见文献^[9]。

以未经处理的酪蛋白酶解液为对样品。

1.3.5 统计分析方法 用 Microsoft Excel 2010 及 IBM SPSS Statistics 22.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 pH 对糖基化产物羟基自由基清除率和还原力的影响

如表 1 所示,酶解产物与木糖、果糖的糖基化产物的羟基自由基清除能力在 pH 7.0 时最高,分别是 38.63% 和 32.82%,高于对照且与其他试验组差异显著($P < 0.05$)。与葡萄糖的糖基化产物的羟基自由基清除能力随 pH 的升高变化无规律,其中 pH 7.0 和 pH 9.0 之间差异不显著($P > 0.05$),而 pH 9.0 和 pH 10.0 之间差异显著($P < 0.05$);在 pH 10.0 时清除率最高为 25.67%,但仍低于对照,说明葡萄糖和酪蛋白酶解物糖基化产物的自由基清除率较低。可以初步推断,葡萄糖并不适于通过糖基化来提高酪蛋白水解产物抗氧化性。综上所述,pH 7.0 是木糖和果糖通过糖基化来提高酪蛋白水解产物抗氧化

表 1 pH 对不同还原糖糖基化产物羟基自由基清除率的影响[†]

Table 1 Effects of pH on the scavenging rate of hydroxyl radicals of different reducing sugars glycosylation products %

pH 值	葡萄糖	木糖	果糖
7.0	20.87 $\pm$ 0.49 ^b	38.63 $\pm$ 3.70 ^a	32.82 $\pm$ 1.46 ^a
8.0	23.13 $\pm$ 3.09 ^{ab}	32.67 $\pm$ 1.79 ^b	22.80 $\pm$ 1.97 ^b
9.0	20.33 $\pm$ 0.40 ^b	30.90 $\pm$ 1.55 ^b	18.27 $\pm$ 6.88 ^b
10.0	25.67 $\pm$ 0.68 ^a	33.00 $\pm$ 2.46 ^b	24.13 $\pm$ 4.06 ^b

[†] 对样品对羟基自由基清除率为(29.02 $\pm$ 1.57)%;同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

性的最佳 pH。

从表 2 可以看出,酪蛋白酶解物与 3 种糖的糖基化产物的还原能力在试验 pH 范围内差异基本不显著($P>0.05$)(果糖在 pH 7.0 还原力偏低)。结合表 1、2,pH 7.0 是葡萄糖、木糖通过糖基化来提高酪蛋白水解产物抗氧化性的最佳 pH。

表 2 pH 对不同还原糖糖基化产物还原能力的影响[†]
Table 2 Effects of pH on the reducing power of different reducing sugars glycosylation products

pH 值	葡萄糖	木糖	果糖
7.0	0.71±0.01 ^a	0.75±0.20 ^a	0.46±0.05 ^b
8.0	0.93±0.45 ^a	0.87±0.16 ^a	0.67±0.13 ^{ab}
9.0	0.74±0.04 ^a	0.93±0.03 ^a	0.85±0.12 ^a
10.0	0.79±0.13 ^a	0.84±0.15 ^a	0.76±0.16 ^a

† 对照样品还原力 0.63±0.03;同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 温度对糖基化产物羟基自由基清除率和还原能力的影响

由表 3、4 可知,当温度由 100 ℃ 升至 110 ℃ 时,酪蛋白酶解物与 3 种糖的糖基化产物羟基自由基清除率随温度的提高变化差异基本不显著(除果糖略有差异外),还原能力随温度的变化差异也不显著;但均显著低于 120 ℃ 和 130 ℃ 的结果($P>0.05$);3 种糖的糖基化产物的羟基自由基清除率均低于对照,而还原能力低于或略大于对照。当温度由 120 ℃ 升至 130 ℃ 时糖基化产物的羟基自由基清除率和还原力均高于对照。

章银良等^[10]研究温度对酪蛋白—木糖美拉德反应产物抗氧化性的影响时,发现随着温度的升高,糖基化产物的羟基自由基清除能力和还原力都增强;刘海梅等^[11]发现,随着温度的升高,葡萄糖—牡蛎酶解液的糖基化产物还原力增强,与试验结果基本一致。综上所述,120~130 ℃ 是葡萄糖、木糖和果糖通过糖基化来提高酪蛋白

表 3 温度对不同还原糖糖基化产物羟基自由基清除率的影响[†]
Table 3 Effects of temperature on hydroxyl radical scavenging rate of different reducing sugars glycosylation products %

温度/℃	葡萄糖	木糖	果糖
100	24.27±2.56 ^c	24.63±0.61 ^b	23.10±2.17 ^b
110	21.87±1.20 ^c	25.63±4.29 ^b	27.47±1.54 ^{ab}
120	41.77±1.11 ^b	58.77±7.19 ^a	48.27±1.89 ^{ab}
130	76.40±4.59 ^a	67.17±10.03 ^a	56.27±31.52 ^a

† 对照样品对羟基自由基清除率为(29.02±1.57)%;同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 4 温度对不同还原糖糖基化产物还原能力的影响[†]
Table 4 Effects of temperature on the reducing power of different reducing sugars glycosylation products

温度/℃	葡萄糖	木糖	果糖
100	0.51±0.09 ^b	0.97±0.17 ^c	0.64±0.12 ^b
110	0.54±0.15 ^b	0.56±0.14 ^c	0.64±0.17 ^b
120	1.73±0.07 ^a	1.45±0.39 ^b	0.82±0.18 ^{ab}
130	2.00±0.26 ^a	2.24±0.05 ^a	1.09±0.34 ^a

† 对照样品还原力 0.63±0.03;同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

水解产物抗氧化性的最适温度范围。

2.3 反应时间对糖基化产物羟基自由基清除率和还原能力的影响

反应时间对糖基化产物的羟基自由基清除率和还原能力的影响见表 5、6。在反应前 4 h 内,酪蛋白酶解物与 3 种糖的糖基化产物的羟基自由基清除率和还原力基本随反应时间的延长而增加;在 4 h 时,3 种糖的糖基化产物的羟基自由基清除率和还原力均达到最高,且均显著高于对照($P<0.05$)。3 种糖的糖基化产物,在反应 3 h 和 4 h 时的羟基自由基清除率均高于对照,虽然果糖 3 h 的糖基化产物在检测羟基自由基清除率是误差较大,但是与还原力检测结果一致,在反应 2~3 h 时都无显著差异($P>0.05$);在反应 2~5 h 时的还原能力均高于对照。这是因为美拉德反应达到一定时间后,美拉德反应中间产物与氨基化合物进行醛基—氨基反应最终生成类黑精,类黑精具有抗氧化等活性。4 h 后有所下降,可能是长时间加热后导致还原性物质分解所致^[12]。江连洲等^[13]研究葡聚糖糖基化处理对绿豆蛋白抗氧化性影响时,发现反应开始时羟自由基清除能力迅速提升,之后随着反应时间的延长呈现下降趋势。赵晶等^[14]发现,随着时间的延长,酪蛋白酶解物与还原糖糖基化产物的还原力呈现先增加后降低的趋势。两者研究结果与试验结果一致。综上所述,反应时间 4 h 时,3 种糖与酪蛋白酶解物的糖

表 5 时间对不同还原糖糖基化产物羟基自由基清除率的影响
Table 5 Effects of time on hydroxyl radical scavenging rate of different reducing sugars glycosylation products %

时间/h	葡萄糖	木糖	果糖
2	21.87±1.20 ^b	25.63±4.29 ^c	27.47±1.54 ^b
3	33.20±2.65 ^{ab}	59.60±2.93 ^a	54.60±36.47 ^{ab}
4	42.00±14.89 ^a	66.57±4.58 ^a	83.33±1.06 ^a
5	25.03±3.23 ^b	38.00±9.37 ^b	28.80±4.39 ^b

† 对照样品对羟基自由基清除率为(29.02±1.57)%;同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 6 时间对不同还原糖糖基化产物还原能力的影响[†]
Table 6 Effects of time on the reducing power of different reducing sugars glycosylation products

时间/h	葡萄糖	木糖	果糖
2	0.80±0.16 ^b	0.83±0.19 ^b	0.90±0.13 ^{ab}
3	0.78±0.14 ^b	0.88±0.11 ^b	0.83±0.19 ^b
4	1.05±0.15 ^a	1.12±0.05 ^a	1.14±0.19 ^a
5	0.55±0.02 ^b	0.70±0.05 ^b	0.64±0.04 ^b

[†] 对照样品还原力 0.63±0.03;同列字母不同表示差异显著 (P<0.05)。

基化产物的羟基自由基清除率和还原能力最优。

2.4 糖基化改性工艺的优化

Wang 等^[15]研究发现乳清蛋白分离物与 6 种糖(葡萄糖、乳糖、木糖、果糖、蔗糖、麦芽糖)进行美拉德反应后,乳清蛋白分离物与木糖产生的糖基化产物抗氧化活性最高,其研究结果与试验结果一致。所以正交试验选用木糖与酪蛋白酶解物进行糖基化反应。正交试验因素水平取值见表 7,试验设计及结果见表 8。

由表 8 可知:影响糖基化产物羟基自由基清除率的主次因素为 C>B>A。影响糖基化产物还原力的主次因素为 B>C>A。酪蛋白酶解产物与木糖反应产生糖基化产物羟基自由基清除率和还原能力的优化水平分别为 A₂B₃C₂和 A₂B₂C₂。

分别在温度 130℃、pH 7.5、时间 4 h(A₂B₃C₂)和温度 130℃、pH 7.0、时间 4 h(A₂B₂C₂)的条件下进行 3 次平行验证实验。结果表明,A₂B₃C₂的羟基自由基清除率为 82%,还原率为 1.489;A₂B₂C₂的羟基自由基清除率为 71%,还原率为 1.340。因此,确定抗氧化活性最强的反应条件为 A₂B₃C₂,即温度 130℃、pH 7.5、时间 4 h。

3 结论

研究结果表明,通过糖基化改性可以提高酪蛋白酶解物的抗氧化性;酪蛋白酶解产物与木糖糖基化改性产物的抗氧化活性最强,最优的抗氧化反应条件为温度 130℃、pH 7.5、时间 4 h。试验所涉及到的单糖种类较少,未来还可以利用其他糖类,例如半乳糖、麦芽糖、乳糖、淀粉、纤维素等进行深入研究,从而将酪蛋白水解物

表 7 正交试验因素水平表
Table 7 Orthogonal factor level table

水平	A 温度/℃	B pH	C 时间/h
1	125	6.5	3.5
2	130	7.0	4.0
3	135	7.5	4.5

表 8 正交试验设计及结果分析表
Table 8 Orthogonal experimental design and results analysis table

试验号	A	B	C	羟基自由基清除率/%	还原力
1	1	1	1	29.93	1.225
2	1	2	2	70.40	1.251
3	1	3	3	53.96	1.246
4	2	1	2	69.38	1.268
5	2	2	3	74.95	1.326
6	2	3	1	50.40	1.257
7	3	1	3	40.14	1.029
8	3	2	1	29.84	1.308
9	3	3	2	81.65	1.379
羟基	k ₁	51.43	46.48	36.72	
自由	k ₂	64.91	58.40	73.81	
基清	k ₃	50.54	62.00	56.35	
除率	R	14.37	15.52	37.09	
	k ₁	1.241	1.174	1.263	
还原	k ₂	1.284	1.295	1.299	
力	k ₃	1.239	1.294	1.200	
	R	0.045	0.121	0.099	

的抗氧化性提高,充分发挥酪蛋白水解物的抗氧化性在各类食品中的作用。

参考文献

[1] JAEGER H, JANOSITZ A, KNORR D. The Maillard reaction and its control during food processing: The potential of emerging technologies[J]. Pathologie Biologie, 2010, 58(3): 207-213.

[2] HODGE J E. Dehydrated foods, Chemistry of browning reactions in model systems[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1953, 1(1): 625-651.

[3] 孙常雁, 李德海, 刘骞, 等. 乳清蛋白肽美拉德反应产物的抗氧化活性与稳定性[J]. 食品科学, 2014, 35(1): 104-109.

[4] 刘蒙蒙. 罗非鱼皮胶原蛋白肽—葡萄糖在不同体系中美拉德反应的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014: 37-45.

[5] 钱森和, 王洲, 魏明, 等. 美拉德反应对芝麻多肽抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 24-28, 88.

[6] 项惠丹, 许时婴, 王璋. 蛋白质与还原糖美拉德反应产物的抗氧化活性[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 52-57.

[7] LERTITTIKUL W, BENJAKUL S, TANAKA M. Characteristics and antioxidative activity of Maillard reaction products from a porcine plasma protein-glucose model system as influenced by pH[J]. Food Chemistry, 2007, 100(2): 669-677.

(下转第 231 页)

此,耐氧青春双歧杆菌特性良好。后续可进一步对多种低聚糖共同影响青春双歧杆菌的增殖效应,以及改善耐氧青春双歧杆菌生长条件进行研究。

参考文献

- [1] ZHOU Sheng-min, WANG Yue-qiang, JIANG Yuan-rong, et al. Dietary intake of structured lipids with different contents of medium-chain fatty acids on obesity prevention in C57BL/6J mice[J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(8): 1 968-1 977.
 - [2] QIAO Yi, SUN Jin, DING Yin-yi, et al. Alterations of the gut microbiota in high-fat diet mice is strongly linked to oxidative stress[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2013, 97(4): 1 689-1 697.
 - [3] XU Peng-fei, FAN Hong, WANG Jia-lin, et al. DBZ is a putative PPAR δ agonist that prevents high fat diet-induced obesity, insulin resistance and gut dysbiosis[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 2017, 1 861(11): 2 690-2 701.
 - [4] LEE N K, KIM S Y, HAN K J, et al. Probiotic potential of *Lactobacillus* strains with anti-allergic effects from kimchi for yogurt starters[J]. *Food Science and Technology*, 2014, 58(1): 130-134.
 - [5] KIM H J, KIM H Y, LEE S Y, et al. Clinical efficacy and mechanism of probiotics in allergic diseases[J]. *Korean Journal of Pediatrics*, 2013, 56(9): 369-376.
 - [6] WANG Jing-hua, BOSE S, KIM G C, et al. Flos Lonicera ameliorates obesity and associated endotoxemia in rats through modulation of gut permeability and intestinal microbiota[J]. *Plos One*, 2014, 9(1): e86117.
 - [7] 李少慧, 张英春, 张兰威, 等. 乳酸菌及其代谢产物对肠道炎症的调控作用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(18): 366-369.
 - [8] FLANAGAN L, SCHMID J, EBERT M, et al. Fusobacterium nucleatum associates with stages of colorectal neoplasia development, colorectal cancer and disease outcome[J]. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 2014, 33(8): 1 381-1 390.
 - [9] 汪孟娟, 徐海燕, 辛国芹, 等. 人体益生菌种类及其功能的最新研究[J]. *畜牧与饲料科学*, 2013, 34(1): 62-66.
 - [10] 徐营, 李霞, 杨利国. 双歧杆菌的生物学特性及对人体的生理功能[J]. *微生物学通报*, 2001, 28(6): 94-96.
 - [11] 居述林, 王雪奇, 马向前, 等. 两歧双歧杆菌培养基成分的改进[J]. *复旦学报: 自然科学版*, 1998(2): 186-190.
 - [12] 文姝, 刘欣, 袁杰利, 等. 乳酸杆菌、双歧杆菌代谢产物气相色谱分析[J]. *中国微生态学杂志*, 2004, 16(4): 221-221.
 - [13] 黄红莹, 马远方, 杜耀武, 等. 青春型双歧杆菌的抗菌作用及其成分分析[J]. *中国微生态学杂志*, 2006, 18(2): 100-101.
 - [14] PEREZCONESA D, LOPEZ G, ROS G. Fermentation capabilities of bifidobacteria using nondigestible oligosaccharides, and their viability as probiotics in commercial powder infant formula[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 70(6): 279-285.
 - [15] 李平兰. 长寿老人源双歧杆菌优良菌株的筛选及生理功能研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004: 8-9.
 - [16] 孟祥晨. 双歧杆菌生理功能特性及其应用的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2002: 5-8.
 - [17] 张芩花, 于湛, 王滨蕾, 等. 双歧杆菌厌氧培养及耐氧驯化的研究[J]. *中国乳品工业*, 1996(3): 13-15.
 - [18] 沈永才, 袁佩娜. 16S rRNA 荧光定量 PCR 法检测双歧杆菌[J]. *中国微生态学杂志*, 2001, 13(2): 66-69.
 - [19] 刘晨明, 曹宏斌, 曹俊雅, 等. 梯度洗脱高效液相色谱法快速检测厌氧菌代谢物中的有机酸[J]. *分析化学*, 2006, 34(9): 1 231-1 234.
 - [20] CRITTENDEN R, KARPPINEN S, OJANEN S, et al. In vitro fermentation of cereal dietary fibre carbohydrates by probiotic and intestinal bacteria[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2010, 82(8): 781-789.
 - [21] 龚芳红, 张德纯. 功能性低聚糖及其检测方法研究的现状[J]. *中国微生态学杂志*, 2009, 21(2): 177-180.
 - [22] 徐海燕, 辛国芹, 曹银生, 等. 低聚木糖对益生菌及人肠道菌群的影响[J]. *药学研究*, 2013, 32(9): 500-503.
-
- (上接第 226 页)
- [8] DONG Shi-yuan, PANYA Atikorn, ZENG Ming-yong, et al. Corrigendum to "Characteristics and antioxidant activity of hydrolyzed β -lactoglobulin-glucose Maillard reaction products" [Food Research International 46 (2012) 55-61][J]. *Food Research International*, 2013, 51(2): 992-992.
 - [9] 刘玥, 刘晓兰, 郑喜群, 等. 复合蛋白酶水解玉米谷蛋白产物的抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2015, 31(1): 141-145.
 - [10] 章银良, 张陆燕, 周文权, 等. 不同温度对酪蛋白-木糖模式美拉德反应产物抗氧化性的影响[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(4): 211-219.
 - [11] 刘海梅, 陈静, 郝良文, 等. 葡萄糖-牡蛎酶解液美拉德反应体系的抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2018, 39(17): 47-52.
 - [12] 王军, 王忠合, 傅力, 等. 美拉德反应对金带细鲈鱼肉蛋白酶解物体内抗氧化性的影响[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(4): 38-45.
 - [13] 江连洲, 张满元, 伍丹, 等. 葡聚糖糖基化处理对绿豆蛋白抗氧化性影响研究[J]. *中国食物与营养*, 2017, 23(10): 63-67.
 - [14] 赵晶, 马丹雅, 张筠, 等. 酪蛋白与还原糖美拉德反应产物抗氧化性的研究[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(12): 187-189, 293.
 - [15] WANG Win-qiong, BAO Yi-hong, HEN Ying. Characteristics and antioxidant activity of water-soluble Maillard reaction products from interactions in a whey protein isolate and sugars system[J]. *Food Chemistry*, 2013, 139(1/2/3/4): 355-361.