

# 赖氨酸—木糖体系美拉德反应产物的 优化制备及抑菌性

## Optimized preparation of Maillard reaction products from Lysine and Xylose and its antibacterial properties

孙炜炜<sup>1,2</sup> 蔡超<sup>1,2</sup> 段丽萍<sup>1,2</sup> 陈胜<sup>1,2</sup>

SUN Wei-wei<sup>1,2</sup> CAI Cao<sup>1,2</sup> DUAN Li-ping<sup>1,2</sup> CHEN Sheng<sup>1,2</sup>

陈浩<sup>1,2</sup> 金皓<sup>1,2</sup> 朱杰<sup>1,2</sup>

CHEN Hao<sup>1,2</sup> JIN Hao<sup>1,2</sup> ZHU Jie<sup>1,2</sup>

(1. 武汉黄鹤楼香精香料有限公司, 湖北 武汉 430050; 2. 武汉黄鹤楼新材料科技开发有限公司, 湖北 武汉 430050)

(1. Wuhan Huanghelou Essence and Flavor Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430050, China; 2. Wuhan Huanghelou New Materials Science and Technology Development Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430050, China)

**摘要:**以木糖(Xylose)和赖氨酸(Lys)为原料,以美拉德反应褐变水平和美拉德反应产物(MRPs)的抗氧化力活性(通过 FRAP 值表征)为评价指标,结合响应面法优化并得到木糖—赖氨酸体系美拉德反应产物(XL-MRPs)的最佳制备条件,并对其抑菌性进行研究。结果表明,XL-MRPs 的最佳制备条件为:反应时间 120 min, pH 9.0, 反应温度 109 °C, 木糖与赖氨酸摩尔比 2.1 : 1.0, 该条件下 XL-MRPs 的抗氧化性最强, FRAP 值为  $1.33 \pm 0.16$ 。XL-MRPs 对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和枯草芽孢杆菌均具有抑菌作用,且 XL-MRPs 溶液的最小抑菌浓度为  $10^{-6}$ 。

**关键词:**木糖;赖氨酸;美拉德反应;抗氧化性;抑菌性

**Abstract:** In this study, Xylose and Lysine were used as raw materials. The browning level of Maillard reaction and the antioxidant activity of reaction products (MRPs) were taken as evaluation indexes, combined with response surface method to optimize and obtain optimal preparation conditions for Maillard reaction products (XL-MRPs) of the xylose-lysine system. In addition, the antibacterial properties of XL-MRPs have also been studied. The results showed that the optimal preparation conditions were: reaction time 120 min, pH 9.0, reaction temperature 109 °C, Xylose to Lys molar ratio of 2.1 : 1.0, XL-

MRPs had the strongest oxidation resistance, and FRAP value was  $1.33 \pm 0.16$ . XL-MRPs have antibacterial effects on *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis*, and the minimum inhibitory concentration of XL-MRPs solution was  $10^{-6}$ .

**Keywords:** Xylose; Lysine; Maillard reaction; antioxidant; bacteriostatic

为了防止食物变质,化学合成类防腐剂成为食品中必须添加的成分,但其若在人体内长期积累,则会具有一定的负面影响<sup>[1]</sup>。目前天然防腐剂主要来自于植物、动物和微生物产生的活性抑菌成分。如,植物源的黄酮类化合物用于水产品的保质、动物源的壳聚糖用于醋腌食品的防腐等<sup>[2]</sup>。但天然抗菌物质提取、分离纯化步骤复杂,技术要求较高等制约了其大规模的商业化应用<sup>[3]</sup>。

目前,美拉德反应产物(Maillard reaction products, MRPs)已被证实存在良好的抗菌性能<sup>[4]</sup>。美拉德反应是指氨基酸/蛋白质和还原糖之间发生的一种非酶褐变反应,又称羰氨反应。大多数食品中都含有羰基(源自糖或油脂氧化酸败等)和氨基(源自氨基酸、肽和蛋白质等),因此这类反应普遍存在于食品加工和贮存过程中。MRPs 主要包括香味物质、紫外吸收中间体和深棕色高分子化合物类黑素等,其赋予了食物诱人的色泽、浓郁的芳香和醇厚的滋味。但反应控制不当时,可产生一些危害衍生物如丙烯酰胺、杂环胺类、晚期糖基化末端终产物(AGEs,如羧甲基赖氨酸、戊糖甘素、3-脱氧葡萄糖酮酸、吡咯素、吡咯醛、丙酮醛等)等物质,可引起癌症及慢性疾病的发生<sup>[5]</sup>(人体动脉粥样硬化、视网膜病变、神经衰退

**作者简介:**孙炜炜,男,武汉黄鹤楼香精香料有限公司中级工程师,硕士。

**通信作者:**蔡超(1975—),男,武汉黄鹤楼香精香料有限公司中级工程师。E-mail:553180953@qq.com

**收稿日期:**2020-06-02

性疾病及糖尿病等)。已有研究<sup>[6-7]</sup>表明上述危害衍生物的形成都会受到抗氧化剂成分的抑制作用,主要包括自由基清除、羰基捕获和金属离子螯合3种机制。此外,赖氨酸—木糖体系美拉德反应产物(XL-MRPs)存在较强的抗氧化活性<sup>[8]</sup>。试验拟以木糖(Xylose)和赖氨酸(Lys)为原料,以抗氧化活性及褐变程度为评价指标,通过分别控制不同变量(反应时间、反应温度、反应 pH 和  $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}}$ )进行单因素试验,再以 FRAP 为响应值进行试验条件设计,优化木糖—赖氨酸体系美拉德反应的制备条件,旨在加深对 XL-MRPs 宏观特性的理解,并为天然防腐剂的开发应用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

木糖(Xylose):上海山浦化工有限公司;

赖氨酸(Lys):天津市光复精细化工研究所;

无水醋酸钠、冰乙酸、盐酸、硫酸亚铁、硫酸、碳酸氢钠、TPTZ、氯化钠等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

试验用 RO 水。

### 1.2 仪器与设备

可见分光光度计:722 型,天津冠泽科技有限公司;

分析天平:BS-210 型,德国 Sartorius Instruments 公司;

立式压力蒸汽灭菌锅:BXM-30R 型,上海博迅实业有限公司医疗设备厂。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 单因素试验

(1) 反应时间对 XL-MRPs 抗氧化活性及褐变程度的影响:将 Xylose 和 Lys 按  $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}} = 1 : 1$  称取,加入蒸馏水并定容至 100 mL,调节 pH 至 7.0,120 °C 下分别反应 0,30,60,90,120,150 min,反应产物于 4 °C 冰箱中备用,考察反应时间对褐变程度和 XL-MRPs 抗氧化活性的影响。

(2) 反应温度对 XL-MRPs 抗氧化活性及褐变程度的影响:将 Xylose 和 Lys 按  $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}} = 1 : 1$  称取,加入蒸馏水并定容至 100 mL,调节 pH 至 7.0,分别于 80,90,100,110,120,130 °C 下反应 120 min,考察反应温度对褐变程度和 XL-MRPs 抗氧化活性的影响。

(3) 反应 pH 对 XL-MRPs 抗氧化活性及褐变程度的影响:将 Xylose 和 Lys 按  $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}} = 1 : 1$  称取,加入蒸馏水并定容至 100 mL,分别调节 pH 为 5.0,6.0,7.0,8.0,9.0,110 °C 反应 120 min,考察 pH 对褐变程度和 XL-MRPs 抗氧化活性的影响。

(4)  $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}}$  对 XL-MRPs 抗氧化活性及褐变程度的影响:将 Xylose 和 Lys 分别按  $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}} = 1.0 :$

1.0,1.5 : 1.0,2.0 : 1.0,1.0 : 1.5,1.0 : 2.0 称取,加入蒸馏水并定容至 100 mL,调节 pH 至 9.0,110 °C 反应 120 min,考察  $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}}$  对褐变程度和 XL-MRPs 抗氧化活性的影响。

1.3.2 响应面试验设计 根据响应面法中 Box-Behnken 设计(BBD)原理,以反应时间、反应温度、反应 pH、 $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}}$  为试验因素,以 FRAP 为响应值,设计四因素三水平响应面试验优化 XL-MRPs 的制备条件<sup>[9]</sup>。

1.3.3 XL-MRPs 的抑菌性 采用抑菌圈法测定 XL-MRPs 对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌的抑菌作用<sup>[10]</sup>。

1.3.4 XL-MRPs 的抗氧化性能 以 FRAP 值作为抗氧化性能的考察指标,参照文献<sup>[11]</sup>的方法进行测定。

1.3.5 XL-MRPs 的褐变程度 采用吸光度法<sup>[12]</sup>。

1.3.6 数据处理 所有试验平行 3 次,结果取平均值。运用 Origin 2018、Design Expert 8.0.6 软件进行数据处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

由图 1 可知,当反应时间  $\leq 120$  min 时,XL-MRPs 的抗氧化活性及褐变程度均随反应时间的延长而增大,其中 FRAP 值由 0.23 增大至 0.73,抗氧化能力提升 3 倍以上,且反应体系前 30 min 产生褐变物质的速率最快(斜率最大);当反应时间  $> 120$  min 时,随着反应时间的延长,XL-MRPs 的抗氧化活性及褐变程度缓慢减小,说明 MRPs 中具有抗氧化活性的成分以及褐变物质易于在反应进行的前期阶段形成,反应过程中,中间产物经脱氢、缩合、分子重排生成的类黑精和挥发性杂环化合物增多,XL-MRPs 的抗氧化活性增强,褐变程度加深;反应后期,这些具有抗氧化活性的物质会继续反应而损失减少,可能是由于高温反应时间过长,生成的物质降解导致的<sup>[13]</sup>。故控制体系反应时间为 120 min 左右能产生最大的抗氧化能力和褐变程度。当反应温度由 90 °C 升高至 110 °C 时,体系褐变程度加深,抗氧化活性增强;当反应温度继续升高至 130 °C 时,XL-MRPs 的褐变值由 0.484 降至 0.308,FRAP 值由 0.69 降至 0.32。一般而言,高温有利于美拉德反应的进行,使得反应体系在较短时间内生成较多的还原酮杂合物和类黑精等化合物,这些物质对 MRPs 的还原力有重要贡献,XL-MRPs 的抗氧化活性增强;温度过高会使生成的中间产物发生分解,导致抗氧化活性降低<sup>[14]</sup>。因此控制体系反应温度为 109 °C,此时有最大的抗氧化能力和褐变程度。当反应体系初始 pH 从 5.0 上升至 9.0 时,FRAP 值及褐变吸光度均逐渐增大,体系抗氧化活性和褐变程度逐步增强,可能是由于参与美拉德反应的是胺离子,反应体系碱性越强,尤其是当 pH  $>$

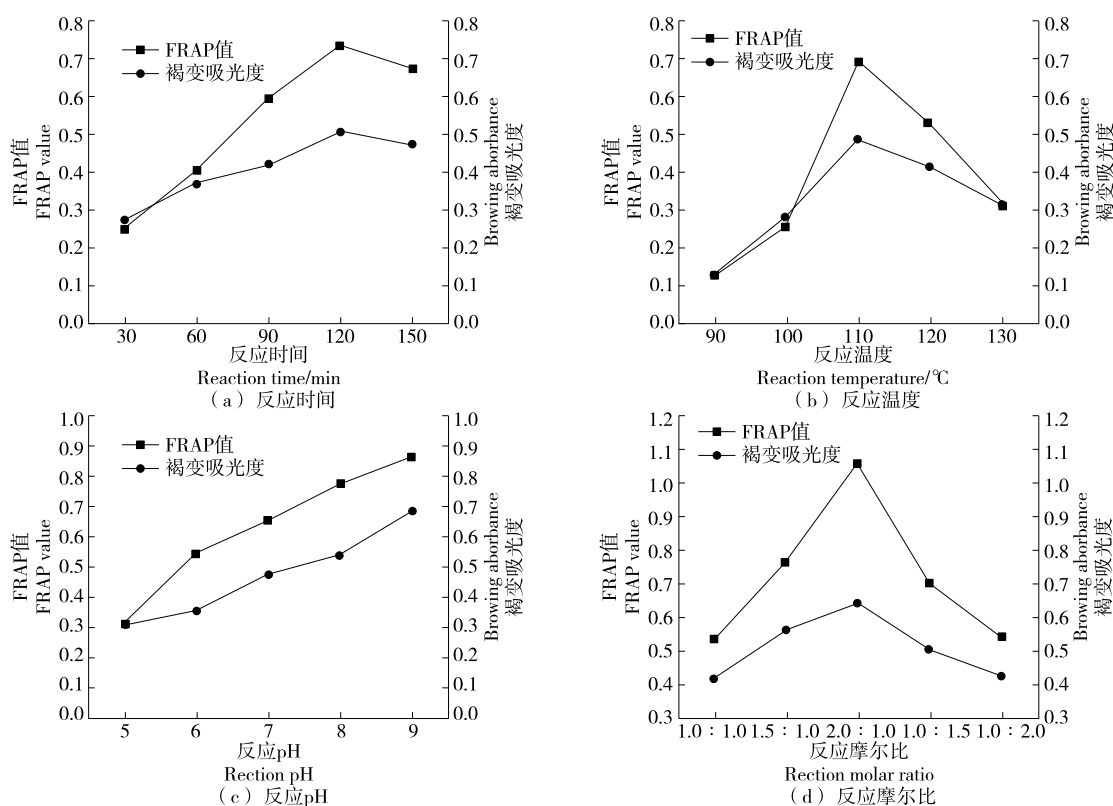


图 1 各因素对 XL-MRPs 褐变程度和抗氧化活性的影响

Figure 1 Effects of different conditions on the browning degree and antioxidant activity of XL-MRPs

7.0 时,胺离子的质子被释放,增加了参与美拉德反应的游离氨基的有效浓度,体系 pH 增加有利于 XL-MRPs 的形成,生成的类黑素等化合物含量较高,抗氧化活性增强。因此体系 pH 为 9.0 时,褐变程度和抗氧化活性均最大。当增加反应体系中木糖含量时,XL-MRPs 的 FRAP 值及褐变程度均明显提高;其中,当  $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}}$  为 2 : 1 时,XL-MRPs 的 FRAP 值最高,表现出较强的抗氧化活性,此时体系也有最大的褐变程度。综上,赖氨酸-木糖体系美拉德反应最佳制备条件为:反应时间 120 min, pH 9.0,反应温度 110 °C,  $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}}$  为 2 : 1。此外,褐变值和 FRAP 值总是同时达到最大,且同步增大和减小,表明体系美拉德反应进程中抗氧化产物和形成褐变的物质总是同步产生或损失。

## 2.2 响应面试验

在单因素试验基础上,采用 Box-Behnken 中心组合原理对 XL-MRPs 制备条件进行优化,试验因素和水平见表 1,试验设计与结果见表 2。

利用 Design-Expert 11.1.0.1 软件对响应面试验结果进行回归分析,得到 XL-MRPs 的 FRAP 值与各因素的回归方程:

$$Y = 1.29 + 7.285E - 003A + 0.092B + 0.042C + 0.13D + 0.013AB + 0.025AC - 0.051AD + 0.070BC +$$

$$0.013BD - 0.070CD - 0.094A^2 - 0.093B^2 - 0.14C^2 - 0.11D^2. \quad (1)$$

由表 3 可知,回归模型  $P < 0.0001$  表明此模型线性关系极显著,失拟项  $P = 0.9779 > 0.05$ ,不显著,说明该模型拟合性好;相关系数  $R^2 = 0.9776$ ,校正决定系数  $R_{\text{adj}}^2 = 0.9575$ ,说明该模型可靠,可用于预测 XL-MRPs 的 FRAP 值。一次项 B、C、D 以及二次项  $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$ 、 $D^2$  对 XL-MRPs 的 FRAP 值影响极显著。

经响应面分析得 XL-MRPs 的最佳制备条件为反应时间 119.87 min,反应 pH 8.97,反应温度 109.49 °C,  $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}} = 2.1 : 1.0$ ,此条件下 XL-MRPs 的预测 FRAP 值为 1.32。由于实际操作等因素影响,将最佳制备条件修正为反应时间 120 min,反应 pH 9.0,反应温度 109 °C,  $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}} = 2.1 : 1.0$ ,进行验证实验 ( $n = 3$ ),得实测 FRAP

表 1 响应面试验因素及水平表

Table 1 Experiment design of response surface factor

| 水平 | A 反应时间/min | B 反应温度/°C | C 反应 pH | D $n_{\text{木糖}} : n_{\text{赖氨酸}}$ |
|----|------------|-----------|---------|------------------------------------|
| -1 | 90         | 100       | 7.0     | 1.5 : 1.0                          |
| 0  | 120        | 110       | 8.0     | 2.0 : 1.0                          |
| 1  | 150        | 120       | 9.0     | 2.5 : 1.0                          |

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 Experiment design and results of response surface methodology

| 试验号 | A  | B  | C  | D  | FRAP 值    |
|-----|----|----|----|----|-----------|
| 1   | 0  | 0  | 1  | -1 | 1.02±0.03 |
| 2   | 0  | 0  | -1 | -1 | 0.77±0.01 |
| 3   | 0  | 0  | 0  | 0  | 1.25±0.04 |
| 4   | 0  | 0  | -1 | 1  | 1.15±0.02 |
| 5   | -1 | 0  | 0  | -1 | 0.91±0.01 |
| 6   | 0  | 1  | -1 | 0  | 1.07±0.03 |
| 7   | 0  | -1 | -1 | 0  | 1.01±0.03 |
| 8   | 1  | 1  | 0  | 0  | 1.22±0.04 |
| 9   | -1 | 0  | -1 | 0  | 1.04±0.02 |
| 10  | 1  | 0  | 0  | -1 | 1.03±0.02 |
| 11  | 0  | -1 | 0  | 1  | 1.14±0.03 |
| 12  | -1 | 0  | 1  | 0  | 1.08±0.02 |
| 13  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1.30±0.03 |
| 14  | -1 | -1 | 0  | 0  | 0.97±0.02 |
| 15  | 1  | -1 | 0  | 0  | 0.98±0.01 |
| 16  | 0  | 1  | 0  | -1 | 1.00±0.04 |
| 17  | 0  | -1 | 1  | 0  | 0.92±0.02 |
| 18  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1.32±0.04 |
| 19  | 0  | -1 | 0  | -1 | 0.89±0.02 |
| 20  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1.17±0.04 |
| 21  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1.10±0.03 |
| 22  | -1 | 1  | 0  | 0  | 1.16±0.03 |
| 23  | -1 | 0  | 0  | 1  | 1.29±0.02 |
| 24  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1.15±0.04 |
| 25  | -1 | 0  | 0  | 1  | 1.21±0.03 |
| 26  | 1  | 0  | 1  | 0  | 1.12±0.03 |
| 27  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1.26±0.03 |
| 28  | 1  | 0  | -1 | 0  | 0.98±0.02 |

值为(1.33±0.16),与预测值相符,证明用所建模型预测 XL-MRPs 的 FRAP 值是准确可行的。

2.3 XL-MRPs 的抑菌性

由表 4 可知,XL-MRPs 对 3 种供试菌均具有抑菌圈,同浓度下其对大肠杆菌的抑菌圈最大,金黄色葡萄球

表 4 XL-MRPs 稀释梯度对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌抑菌圈直径的影响<sup>†</sup>

Table 4 Effects of different concentration of XL-MRPs on the diameter of inhibition zone of *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* and *Bacillus subtilis*

| 供试菌     | 10 <sup>-1</sup> |       | 10 <sup>-2</sup> |       | 10 <sup>-3</sup> |       | 10 <sup>-4</sup> |       | 10 <sup>-5</sup> |      | 10 <sup>-6</sup> |     |
|---------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|------|------------------|-----|
|         | 对照组              | 试验组   | 对照组              | 试验组   | 对照组              | 试验组   | 对照组              | 试验组   | 对照组              | 试验组  | 对照组              | 试验组 |
| 大肠杆菌    | +                | 45.50 | +                | 25.40 | +                | 19.00 | +                | 10.40 | +                | 8.90 | —                | —   |
| 金黄色葡萄球菌 | +                | 26.20 | +                | 24.30 | +                | 12.60 | +                | 8.30  | +                | +    | —                | —   |
| 枯草芽孢杆菌  | +                | 23.60 | +                | 20.40 | +                | 10.93 | +                | 8.00  | +                | +    | —                | —   |

<sup>†</sup> +表示抑菌圈<7.0 mm;—表示抑菌圈不明显。

表 3 回归模型方差分析<sup>†</sup>

Table 3 Regression coefficient and variance analysis

| 来源             | 平方和        | 自由度 | 方差         | F 值    | P 值        |
|----------------|------------|-----|------------|--------|------------|
| 模型             | 0.500      | 14  | 0.035      | 26.01  | <0.000 1** |
| A              | 6.724E-004 | 1   | 6.724E-004 | 0.49   | 0.594 4    |
| B              | 0.100      | 1   | 0.100      | 74.11  | <0.000 1** |
| C              | 0.022      | 1   | 0.022      | 16.21  | <0.000 1** |
| D              | 0.210      | 1   | 0.210      | 155.41 | <0.000 1** |
| AB             | 6.250E-004 | 1   | 6.250E-004 | 0.46   | 0.509 8    |
| AC             | 2.500E-003 | 1   | 2.500E-003 | 1.84   | 0.198 3    |
| AD             | 0.012      | 1   | 0.012      | 8.97   | 0.050 4    |
| BC             | 0.020      | 1   | 0.020      | 14.41  | 0.052 2    |
| BD             | 6.250E-004 | 1   | 6.250E-004 | 0.46   | 0.509 8    |
| CD             | 0.023      | 1   | 0.023      | 17.06  | 0.051 2    |
| A <sup>2</sup> | 0.039      | 1   | 0.039      | 28.81  | <0.000 1** |
| B <sup>2</sup> | 0.038      | 1   | 0.038      | 27.77  | <0.000 1** |
| C <sup>2</sup> | 0.088      | 1   | 0.088      | 64.57  | <0.000 1** |
| D <sup>2</sup> | 0.058      | 1   | 0.058      | 41.83  | <0.000 1** |
| 残差             | 0.018      | 13  | 0.018      |        |            |
| 失拟项            | 0.011      | 10  | 0.011      | 0.47   | 0.977 9    |
| 纯误差            | 6.900E-003 | 3   | 6.900E-003 |        |            |
| 总计             | 0.510      | 27  |            |        |            |

<sup>†</sup> \*\*表示差异极显著(P<0.01);R<sup>2</sup>=0.977 6,R<sub>adj</sub><sup>2</sup>=0.957 5, CV=0.89%。

菌的次之,枯草芽孢杆菌的最小。3 种供试菌中,金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌为革兰氏阳性菌,大肠杆菌为革兰氏阴性菌,说明 XL-MRPs 对革兰氏阳性菌及阴性菌均有抑菌作用,且对革兰氏阴性菌的抑制作用强于阳性。随着 XL-MRPs 稀释梯度的增加,其对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌的抑制能力逐渐增强。当 XL-MRPs 稀释至 10<sup>-6</sup>梯度时,产生的抑菌圈直径均小于抑菌性判断标准的(7 mm),说明在此梯度下 XL-MRPs 没有抑菌性,故最小抑菌浓度为 10<sup>-6</sup>。

3 结论

以赖氨酸和木糖作为原料制备美拉德反应产物,其

评定中的气味和滋味的评分,对米饭食味品质的综合评价造成影响。因此,后续还需要将仪器法和部分指标法相结合,探究更加完善的米饭品质评价体系。

### 参考文献

- [1] 武晓智,曾庆四. 湖北稻米食味品质感官评价方法建立与应用[J]. 农村经济与科技, 2018, 29(23): 73-74.
- [2] 周治宝. 米饭食味特性与稻米理化指标的相关性研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2011: 6-10.
- [3] 赵春芳,姚妹,梁文化,等. 南粳系列水稻品种的食味品质与稻米理化特性[J]. 中国农业科学, 2019, 52(5): 909-920.
- [4] 夏凡,董月,朱蕾,等. 大米理化性质与其食用品质相关性研究[J]. 粮食科技与经济, 2018, 26(5): 105-112.
- [5] 吴青,项家红,稽慈华,等. 大米食味计的应用和研究[J]. 粮食与食品工业, 2000(4): 18-20.
- [6] 陈皓. 大米食味及食味计[J]. 粮食与饲料工业, 2000(4): 13-14.
- [7] 苏光辉,张洪伟,张丽娜,等. 米饭食味检测仪器评价优质稻米食味品质[J]. 北方水稻, 2019(4): 21-23.
- [8] 赖穗春,河野元信,王志东,等. 米饭食味计评价华南籼稻食味品质[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(4): 435-438.
- [9] 李苏红,李缓,董墨思,等. 大米食味品质仪器分析与感官评价的相关性[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(12): 36-39.
- [10] 邓灵珠. 大米蒸煮与米饭物性及食味形成机理[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012: 16-17.
- [11] 樊奇良,章垣. 不同米水比例对蒸煮米饭食味品质影响的研

究[J]. 粮食科技与经济, 2015, 40(6): 29-33.

- [12] 张玉荣,周显青,张秀华,等. 大米蒸煮条件及蒸煮过程中米粒形态结构变化的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2008(10): 1-4.
- [14] TURHAN M, SAYAR S, GUNASEKARAN S. Application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 53(2): 153-159.
- [15] WATANABE H, FUKUOKA M, TOMIYA A, et al. A new non-Fickian diffusion model for water migration in starchy food during cooking [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(1): 1-6.
- [16] 唐伟强,裴世涛,廖良银,等. 浸泡参数与米饭品质关系的研究[J]. 食品工业科技, 2010(2): 108-109, 112.
- [17] LEELAYUTHSOONTORN P, THIPAYARAT A. Textural and morphological changes of Jasmine rice under various elevated cooking conditions[J]. Food Chemistry, 2006, 96(4): 606-613.
- [18] 刘建伟,杨瑞征,毛根武,等. 米饭质构特性测定方法的研究 II [J]. 中国粮油学报, 2012(4): 1-4.
- [19] ZHANG Zhi-hang, SUN Da-wen. Effects of cooling methods on the cooling efficiency and quality of cooked rice[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(2): 269-274.
- [20] 袁超,任广旭. 米饭保温时间与品质变化的动态关系[J]. 食品安全质量检测学报, 2018(13): 36-39.
- [21] 余世锋,马莺. 米饭品质影响因素及其老化机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2008(12): 285-288.

(上接第 43 页)

最优制备条件为反应温度 109 °C,反应时间 120 min,反应 pH 9.0,木糖与赖氨酸摩尔比 2.1:1.0。此条件下木糖—赖氨酸体系美拉德反应产物的抗氧化性最强,FRAP 值为  $1.33 \pm 0.16$ 。木糖—赖氨酸体系美拉德反应产物对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和枯草芽孢杆菌均具有抑菌作用,且木糖—赖氨酸体系美拉德反应产物溶液的最小抑菌浓度为  $10^{-6}$ 。后续拟开展中试论证试验,设计赖氨酸—木糖美拉德反应产物的规模化生产工艺路线。

### 参考文献

- [1] 许海侠,程裕东,金银哲. 微波加热下食品美拉德反应研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(6): 214-219.
- [2] 范超,张梅,张晶. 天然防腐剂的进展[J]. 食品工业, 2017, 38(10): 200-203.
- [3] 田卫政,赵舒景. 天然防腐剂研究进展[J]. 食品安全导刊, 2020(9): 141-144, 146.
- [4] 邱婷婷,谭啸,李若男,等. 壳聚糖—单糖美拉德反应产物的制备及其在抗菌和抗氧化中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 327-333.
- [5] 时海波,邹烨,杨恒,等. 美拉德反应产物生物活性及衍生物危害物安全控制研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40

(22): 325-333.

- [6] 景雨纯,马霞,李小平,等. 多酚对美拉德反应中丙烯酰胺的抑制率研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(2): 141-146.
- [7] 杨楠,罗凡,费学谦,等. 油茶籽中美拉德反应产物的抗氧化性及其含量分析[J]. 林业科学研究, 2019, 32(3): 135-141.
- [8] 章银良,张陆燕. 4 种氨基酸与木糖美拉德反应产物的抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2014, 39(10): 65-69, 75.
- [9] 杨珮瑜,刘冬梅,阮关强,等. 黄卵蛋白水解液美拉德反应物的抑菌性及抗氧化性研究[J]. 中国食品学报, 2016, 16(4): 51-57.
- [10] 章银良,李鑫,蔡亚玲,等. 基于均匀试验设计优化美拉德反应产物抑菌性能的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 17-22.
- [11] 陈金斌,奚秀秀. 花蟹肉酶解多肽美拉德反应产物的抑菌性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(5): 88-92.
- [12] 倪孔巍,张萌,徐大伦,等. 花蟹肉酶解物美拉德反应产物的抗氧化性[J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(3): 239-245.
- [13] 孙福犁,徐慢,崔和平,等. 谷胱甘肽美拉德反应中间体的制备及风味形成能力研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 1-7.
- [14] 杨楠,罗凡,费学谦,等. 油茶籽美拉德反应产物及其抗氧化能力[J]. 食品与机械, 2019, 35(1): 69-74.