

## 美拉德反应改善熟化马铃薯冻融酶解汁液风味

李 娇<sup>1,2</sup>, 周志帅<sup>1</sup>, 申光辉<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>四川农业大学食品学院 四川雅安 625014

<sup>2</sup>农业农村部农产品加工与营养健康重点实验室 四川雅安 625014)

**摘要** 以熟化马铃薯冻融酶解汁液为原料,通过添加外源糖类进行美拉德反应,改善其风味。以感官评分和美拉德反应强度为指标,使用单因素结合正交设计法优化酶解汁液反应条件,比较反应前、后汁液中的香气成分、游离氨基酸含量及其体外抗氧化活性变化。结果表明:美拉德反应最优条件为:以木糖和果糖为复配外源糖,质量比 1:3,复配外源糖添加量 3.0%,反应体系初始 pH 6.0,110 °C 反应 50 min。该条件下制备的马铃薯美拉德反应液挥发性物质种类显著增加,烃类物质、醇类物质含量减少甚至消失,生成较多的糠醛、二甲基丁醛、苯甲醛、苯乙醛等挥发性香气成分及吡嗪、吡啶等坚果香、烤肉香气杂环类化合物;游离氨基酸总含量减少 22.52%,鲜味氨基酸和甜味氨基酸相对含量分别提高了 2.88% 和 0.85%,苦味氨基酸相对含量降低了 3.72%;美拉德反应汁液体外抗氧化活性增强,总还原力提高 3.35 倍,DPPH 自由基清除率和 ABTS 自由基清除率分别提高了 55.82% 和 33.12%。添加外源木糖和果糖进行美拉德反应可改善马铃薯酶解液风味,增强体外抗氧化活性。

**关键词** 马铃薯; 酶解汁液; 美拉德反应; 风味; 游离氨基酸; 抗氧化活性

**文章编号** 1009-7848(2022)11-0190-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.11.021

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是仅次于小麦、玉米、水稻的世界第四大粮食作物<sup>[1]</sup>。我国从 2015 年开始大力实施马铃薯主食化战略,以马铃薯全粉为原料开发了马铃薯面包、马铃薯馒头、马铃薯面条等主食<sup>[2-5]</sup>。传统马铃薯全粉生产工艺能耗大,成本高,冻融预处理虽可降低马铃薯全粉干燥时间,降低能耗<sup>[6]</sup>,但同时会产生总质量约 30% 富含淀粉、蛋白质、游离氨基酸、小分子还原糖等成分的马铃薯汁液副产物,将其直接排放会造成资源浪费和水体环境污染等问题。如何转化利用马铃薯汁液副产物,是该技术推广应用的关键。目前受到马铃薯汁液感官风味的制约,尚未实现汁液副产物资源的完全再利用。本课题组前期通过果胶酶结合糖化酶和  $\alpha$ -淀粉酶水解处理,虽在一定程度上改善了马铃薯汁液的风味接受度,但仍存在香气成分不足,感官接受度不够理想的问题<sup>[7]</sup>,如何进一步提升马铃薯酶解汁液感官风味品质,是开展汁液副产物资源完全加工利用亟需解

决的问题。

美拉德反应是一种羰基化合物和氨基化合物之间的非酶褐变反应,产生各种高级化合物、中间产物、褐变产物和荧光产物,增强反应物香气和滋味<sup>[8]</sup>,增强抗氧化、抗菌等活性<sup>[9]</sup>,在新型食用香精和调味品制备等方面备受关注<sup>[10-12]</sup>。罗伟等<sup>[13]</sup>使用木瓜蛋白酶水解制备贻贝煮汁酶解液,联合脱腥后结合美拉德反应,提高了氨基酸态氮含量,改善了汁液色泽风味,为新型贻贝调味品的制备提供了原料。Habinshtuti 等<sup>[14]</sup>以甘薯蛋白水解物为底物,通过超声辅助酶解技术增强了美拉德反应产物的香味、鲜味、甜味及酸味,降低其苦味,同时提高了抗氧化活性。刘培基<sup>[15]</sup>研究了美拉德反应对香菇柄酶解液风味及抗氧化性的影响,结果发现美拉德反应对香菇柄酶解液风味和抗氧化性有明显的提升作用。

本文通过向冻融分离的马铃薯酶解汁液中添加外源糖类进行美拉德反应,改善其风味、滋味,并比较反应前、后马铃薯汁液挥发性风味物质、游离氨基酸组成和含量及体外抗氧化活性的变化,为解决以马铃薯汁液为原料加工的相关产品风味接受度问题提供新途径。

**收稿日期:** 2021-11-19

**基金项目:** 四川省科技计划项目(2017NZ0019);四川省大学生创新创业训练计划项目(202010626116)

**第一作者:** 李娇,女,硕士生

**通信作者:** 申光辉 E-mail:shenghuishen@163.com

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

马铃薯, 荷兰 15 号(山东临沂); 食品级耐高温  $\alpha$ -淀粉酶(5 万 U/g)、糖化酶(5 万 U/g), 北京索莱宝科技有限公司; 果胶酶(5 万 U/g), 宁夏和氏璧生物技术有限公司; 蔗糖、麦芽糖、葡萄糖、果糖、木糖、核糖(食品级), 山东百龙创园生物科技股份有限公司; 邻二氯苯(99.9%, 内标), 美国 Sigma-Aldrich 公司; 柠檬酸(食品级), 潍坊英轩实业有限公司; 碳酸钠(食品级), 天津渤化永利化工股份有限公司; 磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、三氯化铁、铁氰化钾、三氯乙酸等试剂(分析纯级), 茂名市雄大化工有限公司东莞分公司; 乙腈、甲醇和丙酮(色谱纯级), 成都科龙化工试剂厂。

### 1.2 仪器与设备

SS300 型三足式上部卸料离心机, 张家港市永泰离心机制造有限公司; CP225D 型电子天平, 德国赛多利斯公司; SHZ-III 型循环水真空泵, 上海亚荣生化仪器厂; UV-1800PC 型紫外分光光度计, 上海美谱达仪器有限公司; HWS-12 型数显恒温水浴锅, 山东博科科学仪器有限公司; 7890B-5977B 型气质联用仪, 美国安捷伦科技有限公司; L-8900 型氨基酸自动分析仪, 日本日立公司。

### 1.3 方法

**1.3.1 马铃薯酶解汁液的制备** 马铃薯经清洗、去皮后, 切成 2 mm 厚度的薄片, 蒸汽处理 15 min,  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  冻藏 24 h, 取出室温解冻, 1 500 r/min 离心 10 min, 收集离心汁液并抽滤获得马铃薯汁液。调整汁液 pH 值至 4.5, 添加质量分数 0.5% 的果胶酶, 在  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下进行酶解 5 h, 抽滤, 向滤液中添加质量分数 0.75% 的  $\alpha$ -淀粉酶和 0.25% 糖化酶,  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  酶解 4 h, 加热至沸腾后保持 5 min, 使酶失活, 离心获得酶解汁液<sup>[16]</sup>。

#### 1.3.2 美拉德反应条件单因素

**1.3.2.1 外源糖种类对反应的影响** 取 40 g 马铃薯酶解汁液, 分别添加质量分数为 3.0% 的麦芽糖、葡萄糖、蔗糖、核糖、木糖、果糖, 调整 pH 值至 7.0,  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  反应 20 min, 冷却至室温后, 以美拉德反应液感官评分和  $A_{420\text{nm}}$  为评价指标, 比较 6 种不同外源糖对美拉德反应程度的影响。

**1.3.2.2 木糖与果糖添加比例** 取 40 g 马铃薯酶

解汁液, 外源糖总添加质量分数 3.0%, 分别按木糖与果糖质量比为 1:4, 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1, 4:1 加入, 调整 pH 值至 7.0,  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下反应 20 min, 冷却至室温后, 以美拉德反应液感官评分和  $A_{420\text{nm}}$  为评价指标, 比较不同木糖与果糖复配比例对美拉德反应程度的影响。

**1.3.2.3 外源糖添加量** 取 40 g 马铃薯酶解汁液, 分别添加质量分数 1.5%, 2.0%, 2.5%, 3.0%, 3.5%, 4.0% 的复配外源糖(木糖与果糖质量比为 1:3), 调整 pH 值至 7.0,  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下反应 20 min, 冷却至室温后, 以美拉德反应液感官评分和  $A_{420\text{nm}}$  为评价指标, 比较复配外源糖不同添加量对美拉德反应程度的影响。

**1.3.2.4 反应温度** 取 40 g 马铃薯酶解汁液, 添加质量分数 3.0% 的复配外源糖(木糖与果糖质量比为 1:3), 调整 pH 值至 7.0, 分别在 80, 90, 100, 110,  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下反应 20 min, 冷却至室温后, 以美拉德反应液感官评分和  $A_{420\text{nm}}$  为评价指标, 分析不同反应温度对美拉德反应程度的影响。

**1.3.2.5 反应时间** 取 40 g 马铃薯酶解汁液, 添加质量分数 3.0% 的复配外源糖(木糖与果糖质量比为 1:3), 调整 pH 值至 7.0, 在  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下分别反应 10, 20, 30, 40, 50 min, 冷却至室温后, 以美拉德反应液感官评分和  $A_{420\text{nm}}$  为评价指标, 分析不同反应温度对美拉德反应程度的影响。

**1.3.2.6 初始 pH 值** 取 40 g 马铃薯酶解汁液, 添加质量分数 3.0% 的复配外源糖(木糖与果糖质量比为 1:3), 分别调整体系 pH 值至 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 于  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  反应 40 min, 冷却至室温后, 以美拉德反应液感官评分和  $A_{420\text{nm}}$  为评价指标, 分析不同反应 pH 值对美拉德反应程度的影响。

**1.3.3 美拉德反应条件正交试验优化** 在单因素实验结果的基础上, 选择对美拉德反应影响较大的外源糖添加量、反应温度、反应时间和体系 pH 值, 按照表 1 因素水平表设计  $L_9(3^4)$  正交试验, 对美拉德反应条件进行优化, 以感官评价作为考察指标, 进行结果分析。

**1.3.4 感官评定** 由 10 名食品专业研究生组成评定小组, 评定前统一进行培训, 按照表 2 对反应前、后马铃薯酶解汁液的风味和滋味进行感官评价<sup>[15]</sup>。

表1 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交试验因素水平表Table 1 Levels of key factors using L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) orthogonal array design

水平	外源糖添加量/%	反应温度/℃	反应时间/min	体系 pH 值
1	2.5	90	30	6.0
2	3.0	100	40	7.0
3	3.5	110	50	8.0

表2 马铃薯酶解汁液感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria for potato juice

指标	分值				
	1分	2分	3分	4分	5分
腥味	腥味重,不能接受	腥味较重,可以接受	有腥味,能接受	有轻微能感知到的腥味	没有腥味
糊味或其它刺激性气味	糊味或其它刺激性气味重,不能接受	糊味或其它刺激性较重,可以接受	有糊味或有刺激性气味,能接受	有轻微能感知到的糊味或其它异味	没有糊味或其它刺激性气味
烘烤香气	无烘烤香气	烘烤香气轻微,可以感知	烘烤香气较淡	烘烤香气较强	烘烤香气浓郁
甜味	无甜味	轻微的甜味,可以感知	甜味较淡	甜味较强	甜味浓郁
苦味	苦味明显,不能接受	苦味较重,可以接受	有苦味,可以接受	有轻微能感知到的微苦味	无苦味
咸、鲜味	无咸鲜味	有轻微能感知到的咸鲜味	咸鲜味较淡	咸鲜味较强	咸鲜味浓郁

1.3.5 美拉德反应强度的测定 取反应液 30 mL,在 4 000 r/min 条件下进行离心 10 min,获得离心液,稀释 10 倍后于波长 420 nm 处测定其吸光度,结果以  $A_{420\text{nm}}$  表示<sup>[17]</sup>。

1.3.6 酶解汁液挥发性风味物质分析 参考陆占国等<sup>[18]</sup>并稍加修改,取 5.0000 g 汁液,加入 10  $\mu\text{L}$  质量浓度 0.1306 mg/mL 的邻二氯苯内标溶液(溶于甲醇),样品置于 60  $^{\circ}\text{C}$  水浴中平衡 30 min,插入 50  $\mu\text{m}$  DVB/CAR/PDMS 萃取头,60  $^{\circ}\text{C}$  吸附 30 min 后,插入气质联用仪解析 5 min。GC-MS 分析条件:色谱柱 DB-WAX UI,离子源类型:EI;发射能量:70 eV;离子源温度:230  $^{\circ}\text{C}$ ;四级杆温度:150  $^{\circ}\text{C}$ ;进样口温度:250  $^{\circ}\text{C}$ ;连接线温度:250  $^{\circ}\text{C}$ ;载气:He;进样模式:不分流进样;载气流速:1.0 mL/min,升温程序:40  $^{\circ}\text{C}$  保持 2 min,以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升到 120  $^{\circ}\text{C}$ ,以 2.5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升到 150  $^{\circ}\text{C}$  后保持 5 min,以 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升到 230  $^{\circ}\text{C}$  后保持 10 min。

通过计算机 NIST11L 谱库将色谱峰和质谱图串联检索,并以人工进行进一步比对解析,统计匹配度大于 80(最大值 100)的组分,以邻二氯苯为

内标进行半定量分析,按式(1)计算含量。

$$C_i (\text{mg}/\text{kg}) = \frac{A_i}{A_s} \times \frac{C_s \times V_s}{1000 \times m} \quad (1)$$

式中, $C_i$ ——目标物质含量,mg/kg; $A_i$ ——目标化合物峰面积,mAU·min; $A_s$ ——内标物峰面积,mAU·min; $C_s$ ——内标物质量浓度,mg/mL; $V_s$ ——内标物添加体积, $\mu\text{L}$ ; $m$ ——样品质量,g。

1.3.7 气味活度值的计算 根据鉴定出的香气成分含量及其在水中的嗅觉阈值,按式(2)计算气味活度值(OAV)<sup>[17,19]</sup>。OAV  $\geq 1.0$  为关键风味物质,0.1  $\leq$  OAV  $< 1.0$  为修饰性风味物质,OAV  $< 0.1$  为潜在修饰风味物质。

$$\text{OAV} = \frac{c}{\text{OT}} \quad (2)$$

式中, $c$ ——化合物的绝对含量, $\mu\text{g}/\text{kg}$ ; $\text{OT}$ ——该化合物在水溶液中的嗅觉阈值, $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

1.3.8 游离氨基酸含量的测定 参考裴继伟等<sup>[20]</sup>的方法进行测定。向待测样品加入等体积质量分数为 20% 的三氯乙酸溶液振荡混合均匀,室温下静置 2 h,5 000 r/min 离心 30 min,取上清液加 6



mol/L 的 HCl 溶液水解后使用氨基酸自动分析仪进行检测分析。

### 1.3.9 酶解汁液体外抗氧化能力分析

1.3.9.1 总还原能力 参照周际松等<sup>[21]</sup>的方法并稍作修改,取 2.5 mL 样品溶液,加入 pH 6.6 的磷酸盐缓冲液 2.5 mL,摇匀后加入 2.5 mL 1% 的铁氰化钾溶液,充分混匀后于 50 °C 反应 20 min。再加入 10% 三氯乙酸 2.5 mL,3 000 r/min 条件下进行离心 10 min,取上清液 5 mL,加入 5 mL 蒸馏水和 1 mL 0.1% 三氯化铁溶液,空白对照将 2.5 mL 样品溶液替换为等体积的蒸馏水,于波长 700 nm 处测定吸光度。按式(3)计算总还原力。

$$\text{总还原能力} = A_1 - A_2 \quad (3)$$

式中, $A_1$ ——混合溶液吸光度值; $A_2$ ——不含  $\text{FeCl}_3$  混合溶液吸光度值。

1.3.9.2 DPPH 自由基清除率 参照 Li 等<sup>[22]</sup>的方法并稍作修改,取 1 mL 样品,加入 2 mL 0.2 mmol/L DPPH 无水乙醇,避光反应 30 min,10 000 r/min 离心 1 min,取上清液于波长 517 nm 处测定吸光值。空白组以等体积无水乙醇代替 DPPH 溶液,对照组以等体积蒸馏水代替样品溶液。按式(4)计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_0}\right) \times 100 \quad (4)$$

式中, $A_0$ ——对照组吸光度值; $A_i$ ——样品组吸光度值; $A_j$ ——空白组吸光度值。

1.3.9.3 ABTS 自由基清除率 参考杨楠等<sup>[23]</sup>的方法并稍作修改,取 1 mL 样液,加入 ABTS 工作液 3 mL,漩涡振荡 10 s,以甲醇做参比,于波长 734 nm 处测定吸光度,按式(5)计算 ABTS 自由基清除率。

$$\text{ABTS 自由基清除率}(\%) = \frac{A_{\text{空白}} - A_{\text{样品}}}{A_{\text{空白}}} \times 100 \quad (5)$$

式中, $A_{\text{空白}}$ ——空白溶液吸光度值; $A_{\text{样品}}$ ——样品溶液吸光度值。

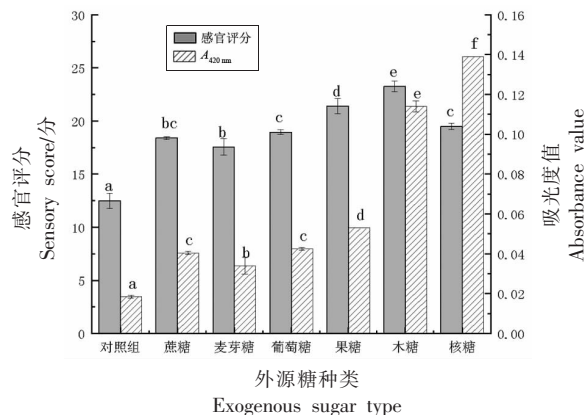
## 1.4 数据分析

所有指标均重复测定 3 次,结果以平均值 $\pm$ 标准偏差的形式表示。以软件 SPSS 22.0 进行显著性( $P < 0.05$ )分析,软件 Origin 2017 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 美拉德反应单因素实验条件的确定

2.1.1 外源糖种类 外源糖的种类是影响美拉德反应强度的关键性因素<sup>[24]</sup>,由图 1 可知,添加核糖的反应液  $A_{420\text{nm}}$  值最大,表明其发生美拉德反应的程度最高。添加麦芽糖的汁液美拉德反应程度最低;添加果糖及葡萄糖组的美拉德反应程度低于木糖、核糖;整体来看,添加蔗糖、麦芽糖、葡萄糖和果糖 4 种外源糖的汁液美拉德反应进行不彻底,其整体反应程度较低。不同外源糖具有不同的结构,影响美拉德反应进行的速度和反应的彻底程度。在美拉德反应过程中,单糖的反应速度大于双糖,五碳糖大于六碳糖糖。作为五碳糖的木糖、核糖反应速度最快,反应程度更高,而果糖、葡萄糖为六碳糖,麦芽糖、蔗糖为双糖,参与美拉德反应的活性较弱<sup>[25]</sup>。



注:不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

图 1 外源糖种类对美拉德反应汁液感官评分和吸光度值( $A_{420\text{nm}}$ )的影响

Fig.1 Effects of exogenous sugar types on the sensory score and  $A_{420\text{nm}}$  of Maillard reaction juice

由图 1 结合图 2 可知,添加不同外源糖均可明显改善马铃薯酶解汁液风味。添加木糖或果糖制备的反应液感官评定总分较高,表明添加木糖或果糖进行美拉德反应,更有利于改善和提升马铃薯酶解汁液风味和滋味。由图 2 可见,添加木糖制备的美拉德反应液(MRPs)香气最为突出,香味和滋味的感官评分最高,添加果糖制备的 MRPs 香气较为突出,主要体现在口感好、甜度高,香甜

气和滋味评分较高。添加核糖虽消除了酶解汁液的腥味,但汁液产生了糊味及其它不良风味,同时产生了明显的苦味,使得整体风味接受度下降,感官评分降低。添加葡萄糖对MRPs风味虽具有一定的提升作用,但风味比较单一;添加蔗糖、麦芽糖虽对酶解液气味和滋味略有一定的改善作用,但效果并不突出。综合感官评分和美拉德反应程度结果,以添加果糖和木糖为宜。

**2.1.2 木糖和果糖质量比** 由图3可知,添加不同质量比的木糖与果糖,反应液的感官评分差异明显。当添加的木糖与果糖的质量比为1:3时,汁液的感官评分最高, $A_{420nm}$ 值较大,说明美拉德反应进行程度较强。综合考虑,选择木糖与果糖质量比为1:3较为适宜。

**2.1.3 外源糖复配添加量** 由图4可知,美拉德反应程度随着复配外源糖添加量的增加而逐渐上升;当复配外源糖添加量为3.0%时,反应液的感官评分最高,美拉德反应程度也处于较高水平;进一步提高复配外源糖添加量,会生成糊味或其它刺激性气味,感官评分下降;当添加4.0%复配外源糖时,汁液糊味明显,有苦味产生,感官评分明显降低。综上,选择3.0%为最适外源糖添加量。

**2.1.4 反应温度** 由图5可知,反应液 $A_{420nm}$ 值随反应温度升高而逐渐增加,表明美拉德反应程度随反应温度逐步增强。反应液感官评分在一定范围内,随着温度的增加而逐渐上升,而后逐渐下降。100℃制备的反应液感官评分最高。而110

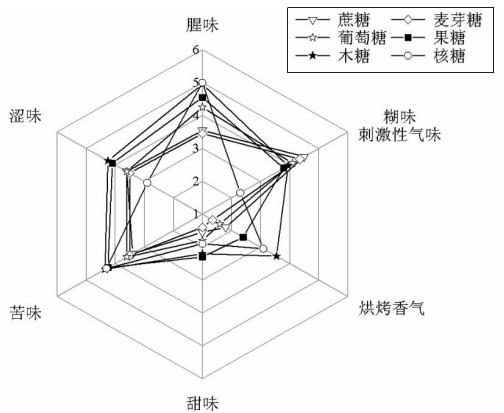


图2 外源糖种类对美拉德反应汁液感官评分的影响  
Fig.2 Effects of various exogenous sugars on sensory score of Maillard reaction juice

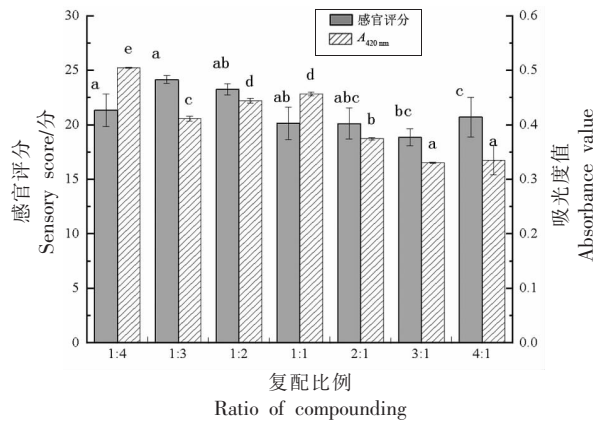


图3 木糖与果糖质量比对美拉德反应汁液感官评分和吸光度值( $A_{420nm}$ )的影响

Fig.3 Effects of mass ratio of xylose and fructose on sensory score and  $A_{420nm}$  of Maillard reaction juice

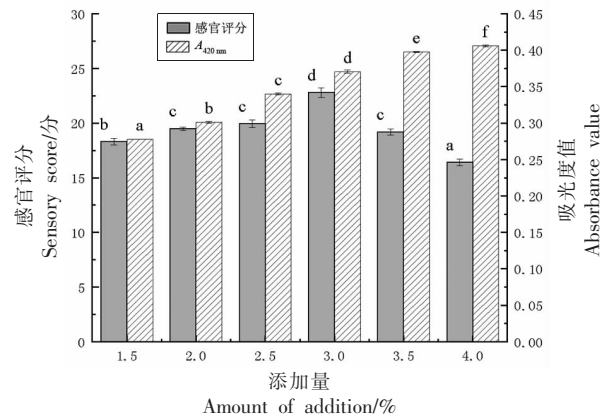


图4 复配外源糖(木糖和果糖)添加量对美拉德反应汁液感官评分和吸光度值( $A_{420nm}$ )的影响

Fig.4 Effects of the amount of exogenous mixed sugar (xylose and fructose) on sensory score and  $A_{420nm}$  of Maillard reaction juice

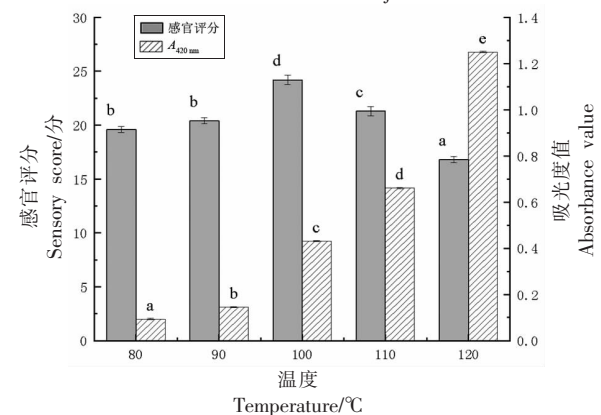


图5 反应温度对美拉德反应汁液感官评分和吸光度值( $A_{420nm}$ )的影响

Fig.5 Effects of reaction temperature on sensory score and  $A_{420nm}$  of Maillard reaction juice

℃和 120 ℃条件下制备的反应液感官评分显著下降,主要是在较高温度下形成较多的类黑精等物质,产生糊味等不良风味和明显的苦涩味。因此,选取 100 ℃为较适宜的反应温度。

2.1.5 反应时间 由图 6 可以看出,随反应时间不断增加, $A_{420\text{nm}}$ 吸光度值不断增大,美拉德反应程度不断加强。在反应时间 10~50 min 变化时,MRPs 感官评分先上升后下降,当时间为 40 min 时,感官评分最高。当反应时间在 10~40 min 之间逐渐增加时,MRPs 中的风味物质不断释放,腥味

减弱,感官评分增加;当时间大于 40 min 时,继续增加反应时间,汁液产生不良风味,评分降低。综上,选取 40 min 为适宜的反应时间。

2.1.6 体系 pH 值 由图 7 可知,体系初始 pH 从 5.0~9.0 不断提高时, $A_{420\text{nm}}$ 吸光度值逐渐变大,表明美拉德反应程度随着 pH 值的增加而不断增强。反应液的感官评分也随反应体系初始 pH 值提高先上升后下降,当体系中初始 pH 值为 7.0 时,感官评分最高。综上,选取 pH7.0 为适宜的反应 pH 值。

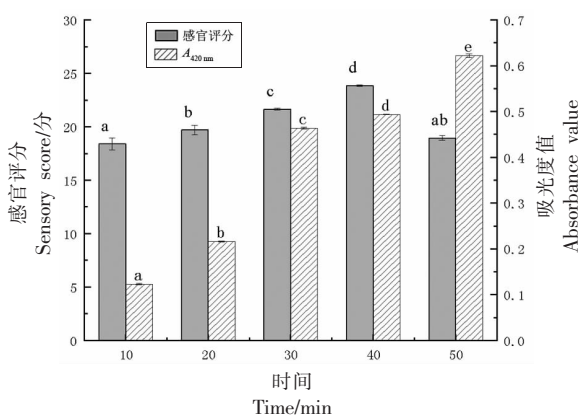


图 6 反应时间对美拉德反应汁液感官评分和吸光度值( $A_{420\text{nm}}$ )的影响

Fig.6 Effects of reaction time on sensory score and  $A_{420\text{nm}}$  of Maillard reaction juice

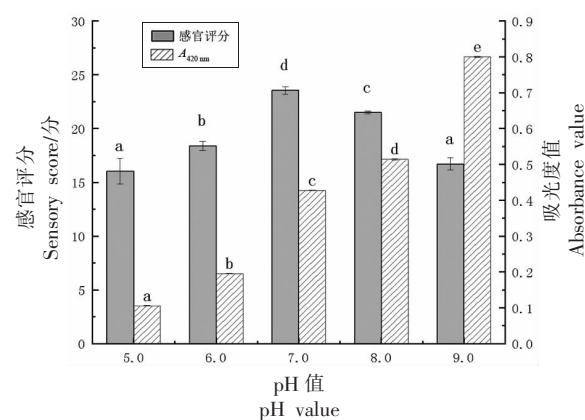


图 7 反应体系初始 pH 值对美拉德反应汁液感官评分和吸光度值( $A_{420\text{nm}}$ )的影响

Fig.7 Effects of initial pH value on sensory score and  $A_{420\text{nm}}$  of Maillard reaction juice

## 2.2 正交试验结果分析与验证

由表 3 可知,各因素对美拉德反应后马铃薯汁液的感官评分影响顺序为反应温度>体系 pH 值>反应时间>外源糖添加量。由表 4 可知,4 个因素对反应液感官评分均有显著性影响 ( $P<0.01$ ),且影响程度为反应温度>体系 pH 值>反应时间>

外源糖添加量,与极差分析结果一致。由表 3 可知,最适美拉德反应条件组合为:反应温度 110 ℃,反应时间 50 min,外源糖添加量为 3.0%,体系 pH 值为 6.0。在此反应条件下,重复 3 次试验,最后测得反应后马铃薯汁液感官评分为 24.80,汁液风味良好,反应程度高。

表 3 正交试验结果

Table 3 Orthogonal design experiment results

序号	反应温度/℃	反应时间/min	外源糖添加量/%	体系 pH 值	感官评分/分
1	90	30	2.5	6.0	17.70 ± 0.42
2	90	40	3.0	7.0	18.60 ± 0.28
3	90	50	3.5	8.0	17.85 ± 0.21
4	100	30	3.0	8.0	19.60 ± 0.14
5	100	40	3.5	6.0	22.55 ± 0.21
6	100	50	2.5	7.0	21.00 ± 0.42
7	110	30	3.5	7.0	22.25 ± 0.07
8	110	40	2.5	8.0	20.65 ± 0.21

(续表 3)

序号	反应温度/℃	反应时间/min	外源糖添加量/%	体系 pH 值	感官评分/分
9	110	50	3.0	6.0	24.80 ± 0.42
$k_1$	18.05	19.85	19.78	21.68	
$k_2$	21.05	20.60	21.00	20.62	
$k_3$	22.57	21.22	20.88	19.37	
$r$	4.517	1.367	1.217	2.316	

表 4 正交试验方差分析

Table 4 Variance analysis of orthogonal test

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
校正模型	90.564 <sup>a</sup>	8	11.321	130.622	<0.001
截距	7 605.556	1	7 605.556	87 756.410	<0.001
反应温度	63.401	2	31.701	365.776	<0.001
反应时间	5.621	2	2.811	32.429	<0.001
外源糖添加量	5.408	2	2.704	31.199	<0.001
体系 pH 值	16.134	2	8.067	93.083	<0.001
误差	0.780	9	0.087		
总计	7 696.900	18			
校正误差	91.344	17			

### 2.3 美拉德反应前、后汁液挥发性风味物质组成与含量结果分析

马铃薯酶解汁液和美拉德反应液中分别检测到 35 和 45 种挥发性化合物(表 5)。相较于马铃薯酶解汁液,美拉德反应液中烃类物质、醇类物质含量减少甚至消失,生成了较多糠醛、二甲基丁醛、苯甲醛、苯乙醛等香气物质及吡嗪、吡啶等含有坚果香、烤肉香气的杂环类化合物。马铃薯酶解汁液中主要包括壬醛、 $\beta$ -紫罗酮 ( $OAV \geq 1.0$ ) 2 种关键风味物质,苯甲醇、正己醛 ( $0.1 \leq OAV < 1.0$ ) 2 种修饰性风味物质,共同赋予马铃薯酶解汁液青草香、柏木香以及轻微的腥味;美拉德反应液中主要包括壬醛、2-甲基丁醛、苯甲醛、苯乙醛、 $\beta$ -紫罗酮 ( $OAV \geq 1.0$ ) 5 种关键风味物质,苯甲醇 ( $0.1 \leq OAV < 1.0$ ) 1 种修饰性风味物质,并生成吡啶、吡嗪等杂环类化合物,赋予美拉德反应汁液烘焙香、坚果香气。

从整体来看,芳香族烃类化合物在各样品中检出相对较少,芳香类化合物大多阈值较高,少数阈值较低,对风味贡献不大。这些芳香族化合物可能来自于马铃薯细胞中外源糖的降解,是形成某些杂环化合物的重要物质前体,对马铃薯香气的形成起到重要作用<sup>[26]</sup>。

醛类物质具有较低的嗅觉阈值,低剂量条件下对马铃薯的香气也作出突出贡献,这些物质可能来自于甘油三酯的氧化降解或多不饱和脂肪酸中碳碳双键的氧化降解。其中饱和醛类物质主要来源于 n-6 或 n-9 不饱和脂肪酸的氧化降解,其中 C6~C12 饱和醛类物质阈值较低,对风味贡献较大。本试验中检测到了壬醛、己醛,其中己醛是亚油酸的氧化和断裂反应产物<sup>[27]</sup>。在受热过程中,氨基酸的氨基与糖类的羰基发生化学反应,生产醛类物质,这些物质与 Maillard 和 Strecker 反应具有关联<sup>[28]</sup>。己醛低浓度时呈清香和草香味,浓度过高时产生令人不悦的酸败及刺激性辛辣味<sup>[29]</sup>。

美拉德反应产物 2,3-二氢苯并呋喃、2-正戊基呋喃、吡啶、吡嗪和 2-甲基吡啶赋予烘焙香、烤甜香。在美拉德反应过程中,含硫氨基酸通过 Strecker 降解产生硫化氢和氨,为大量杂环风味物质的形成提供前体物质,再经氧化生成吡嗪。吡嗪类化合物是烤马铃薯风味的典型成分,具有坚果烘烤香味<sup>[30-31]</sup>。杨金等初<sup>[32]</sup>研究认为,呋喃类、吡喃类和环戊烯酮类化合物是甘薯和南瓜中的主要香气组分,吡嗪类、吡咯类和吡啶类化合物是马铃薯主要香气组分。本试验也在美拉德反应液中检测到了吡嗪、吡咯等杂环类化合物。



综上所述,马铃薯酶解汁液主要为壬醛、 $\beta$ -紫罗酮、正己醛带来的青草香、微腥味,美拉德反应汁液主要为壬醛、2-甲基丁醛、苯甲醛、苯乙醛、 $\beta$ -紫罗酮以及吡嗪、吡啶类杂环化合物共同赋予的浓郁的烘烤香气、坚果香气。

表5 美拉德反应前、后汁液的挥发性风味物质含量

Table 5 Volatile flavor composition and content of juice before and after Maillard reaction

类别	化合物名称	CAS号	感觉		酶解汁液		美拉德反应液		
			阈值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1[33]}$	感官描述	含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	OAV	含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	OAV	
芳香烃类	丁基化羟基甲苯	128-37-0	NA	NA	$1.58 \pm 0.10$	NA	$2.51 \pm 1.14$	NA	
	1-乙基-4-乙烯基苯	3454-07-7	NA	NA	$0.19 \pm 0.27$	NA	-	-	
	2,2',5,5'-四甲基联苯基	3075-84-1	NA	NA	$0.70 \pm 0.99$	NA	-	-	
烷烃类	正己烷	110-54-3	NA	NA	$0.50 \pm 0.02$	NA	-	-	
	环十二烷	294-62-2	NA	NA	$0.51 \pm 0.07$	NA	$0.51 \pm 0.72$	NA	
烯烃类	$\alpha$ -柏木烯	469-61-4	NA	NA	$0.52 \pm 0.02$	NA	-	-	
	$\alpha$ -蒎品烯	99-86-5	NA	NA	$0.67 \pm 0.94$	NA	-	-	
	环辛四烯	629-20-9	NA	NA	$0.17 \pm 0.24$	NA	$0.32 \pm 0.46$	NA	
	(+)-柠檬烯	5989-27-5	10	清香	$0.46 \pm 0.65$	0.05	-	-	
醇类	2-异丙基-5-甲基环己醇	1490-04-6	NA	NA	$3.36 \pm 0.01$	NA	-	-	
	苯甲醇	100-51-6	3	苦杏仁味	$0.32 \pm 0.02$	0.11	$1.11 \pm 0.35$	0.37	
	2-乙基己醇	104-76-7	NA	NA	$1.39 \pm 0.13$	NA	-	-	
	(R)- $\alpha,\alpha$ -4-三甲基-3-环己烯-1-醇	7785-53-7	NA	NA	$0.64 \pm 0.91$	NA	-	-	
	柏木醇	77-53-2	NA	NA	$4.48 \pm 0.10$	NA	$1.35 \pm 0.13^*$	NA	
	环辛醇	696-71-9	NA	NA	$0.36 \pm 0.51$	NA	-	-	
	5-甲基-2-呋喃甲醇	3857-25-8	NA	NA	-	-	$0.48 \pm 0.01$	NA	
	2,5-二甲基-2,5-己二醇	110-03-2	NA	NA	-	-	$1.69 \pm 2.39$	NA	
	酸类	辛酸	124-07-2	3 000	奶酪苦涩味	-	-	$1.45 \pm 0.26$	<0.01
		壬酸	112-05-0	NA	脂肪味、椰子味	$1.16 \pm 0.55$	NA	$1.04 \pm 0.13$	NA
正癸酸		334-48-5	69 000	酸味	-	-	$1.80 \pm 0.35$	<0.01	
醛类	正己醛	66-25-1	4.5	鱼腥味、青草味	$1.58 \pm 0.05$	0.35	-	-	
	壬醛	124-19-6	1	脂香、青草香味	$1.85 \pm 0.14$	1.85	$4.83 \pm 0.34^*$	4.83	
	正辛醛	124-13-0	7	脂肪香	$0.54 \pm 0.03$	0.08	-	NA	
	糠醛	98-01-1	9 562	烧烤味、焦糖味	$2.93 \pm 0.00$	<0.01	$15.54 \pm 21.97$	<0.01	
	2-苯基-2-丁烯醛	4411-89-6	NA	NA	$0.34 \pm 0.05$	NA	$0.78 \pm 0.41$	NA	
	2-甲基丁醛	96-17-3	1	苹果香味	-	-	$10.86 \pm 3.22$	10.86	



(续表 5)

类别	化合物名称	CAS号	感觉		酶解汁液		美拉德反应液	
			阈值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1[33]}$	感官描述	含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	OAV	含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	OAV
酮类	苯甲醛	100-52-7	3	杏仁味、坚果味	-	-	$30.54 \pm 4.68$	10.18
	2-吡咯甲醛	1003-29-8	NA	NA	-	-	$5.10 \pm 0.43$	NA
	苯乙醛	122-78-1	4	蜜甜香	-	-	$46.83 \pm 8.51$	11.71
	$\beta$ -紫罗酮	79-77-6	0.007	紫罗兰香	$1.98 \pm 2.79$	282.86	$11.81 \pm 15.90$	1687.14
	2,6-二(叔丁基)-4-羟基-4-甲基-2,5-环己二烯-1-酮	10396-80-2	NA	NA	-	-	$0.72 \pm 1.02$	NA
	香叶基丙酮	689-67-8	60	果香、木香	$0.89 \pm 0.01$	0.01	-	-
	(E)-1-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-2-丁烯-1-酮	23726-93-4	NA	NA	$4.04 \pm 0.34$	NA	$4.09 \pm 0.94$	NA
酚类	4-(2-呋喃基)-3-丁烯-2-酮	623-15-4	NA	NA	-	-	$0.58 \pm 0.82$	NA
	2,4-二氯酚	120-83-2	NA	NA	-	-	$1.22 \pm 0.25$	NA
	甲基丁香酚	93-15-2	NA	NA	$0.40 \pm 0.02$	NA	-	-
	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	200	果香	$3.55 \pm 0.22$	0.02	$3.03 \pm 0.58$	0.02
酯类	4-乙基-2-甲氧基苯酚	7786-61-0	NA	NA	$1.15 \pm 0.06$	NA	$2.54 \pm 0.16^*$	NA
	茶酚	108-95-2	5 900	NA	-	-	$1.99 \pm 0.44$	<0.01
	2,2,4-三甲基戊二醇异丁酯	6846-50-0	NA	NA	$10.41 \pm 0.20$	NA	$21.68 \pm 9.24$	NA
	水杨酸甲酯	119-36-8	60	冬青油香气	$0.60 \pm 0.22$	0.01	$1.36 \pm 0.32$	0.02
	十三酸甲酯	1731-88-0	NA	NA	$0.10 \pm 0.14$	NA	-	-
	甲酸辛酯	112-32-3	NA	果香味	$0.50 \pm 0.70$	NA	-	-
	二十二烷酸甲酯	929-77-1	NA	NA	$0.12 \pm 0.17$	NA	-	-
杂环类	水杨酸辛酯	118-60-5	NA	NA	$0.27 \pm 0.38$	NA	$0.34 \pm 0.48$	NA
	十四酸乙酯	124-06-1	NA	NA	-	-	$0.34 \pm 0.48$	NA
	吡啶	110-86-1	2 000	NA	$1.66 \pm 0.02$	<0.01	$0.86 \pm 0.70$	<0.01
	3-甲基吡啶	108-99-6	NA	NA	$2.06 \pm 0.06$	NA	$1.54 \pm 0.12^*$	NA
	嘧啶	289-95-2	$1.2 \times 10^6$	NA	-	-	$3.06 \pm 4.33$	<0.01
	2-甲基吡嗪	109-08-0	280 000	坚果味、烤香味	-	-	$76.18 \pm 16.36$	<0.01
	2-乙基吡嗪	13925-00-3	430 000	坚果香	-	-	$0.97 \pm 1.37$	<0.01
	2,3-二甲基吡嗪	5910-89-4	100	坚果、肉香	-	-	$1.00 \pm 0.26$	0.01
	2-乙酰基吡啶	1122-62-9	19	焦糖香气	-	-	$0.33 \pm 0.46$	0.02
	2-乙酰基吡咯	1072-83-9	200 000	坚果香、烤香味	-	-	$1.35 \pm 0.22$	<0.01

(续表 5)

类别	化合物名称	CAS 号	感觉		酶解汁液		美拉德反应液	
			阈值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1[33]}$	感官描述	含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	OAV	含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	OAV
	苯并噻唑	95-16-9	80	炖肉、 烧烤味	-	-	$3.17 \pm 0.32$	0.04
	2,3,5-三甲基吡嗪	14667-55-1	10	NA	-	-	$1.74 \pm 0.75$	0.17
	2-乙烯基吡嗪	4177-16-6	NA	NA	-	-	$0.64 \pm 0.90$	NA
	2-丙酰呋喃	3194-15-8	NA	NA	-	-	$0.69 \pm 0.10$	NA
	3-苯基吡啶	1008-88-4	NA	NA	-	-	$0.55 \pm 0.77$	NA
	2-乙酰基吡啶	1122-62-9	NA	NA	-	-	$0.33 \pm 0.46$	NA
	2,5-二甲基苯并恶唑	5676-58-4	NA	NA	-	-	$4.57 \pm 0.94$	NA

注:NA 表示无法确定;“-”表示未检出;\* 表示美拉德反应前、后汁液中挥发性风味物质含量存在显著性差异( $P<0.05$ )。

## 2.4 美拉德反应前、后汁液游离氨基酸含量变化

游离氨基酸是食品中重要营养元素之一,是食品滋味和气味前体物质的重要来源,并与食品体系中的其它成分共同发生协同作用,影响食品风味。由表 6 可知,由于美拉德反应过程的消耗,汁液中鲜味、甜味和苦味氨基酸的含量均显著降

低,游离氨基酸总含量降低了 22.52%。反应后汁液中仅蛋氨酸含量有所增加,可能是由于反应中蛋白质或肽类的降解生成<sup>[19,34]</sup>。不同呈味氨基酸占游离氨基酸总含量的比例发生了明显变化,其中鲜味氨基酸和甜味氨基酸占比分别增加了 2.88% 和 0.85%,而苦味氨基酸占比减少了 3.72%。此外,

表 6 美拉德反应对马铃薯酶解汁液中游离氨基酸含量的影响

Table 6 Effect of Maillard reaction on free amino acid content in enzymatic hydrolysate of potato juice

类别	氨基酸	酶解汁液/ $\text{mg}\cdot(100\text{g})^{-1}$	美拉德反应汁液/ $\text{mg}\cdot(100\text{g})^{-1}$	变化率/%
鲜味氨基酸	天冬氨酸(Asp)	$333.2 \pm 0.8$	$254.2 \pm 2.6^*$	-23.69
	谷氨酸(Glu)	$266.7 \pm 0.7$	$230.3 \pm 2.1^*$	-13.65
	合计	$599.9 \pm 1.5$	$484.6 \pm 4.7^*$	-19.22
甜味氨基酸	苏氨酸(Thr)	$15.6 \pm 0.0$	$11.8 \pm 0.0^*$	-24.13
	丝氨酸(Ser)	$15.7 \pm 0.1$	$12.0 \pm 0.2^*$	-23.52
	脯氨酸(Pro)	$22.5 \pm 0.5$	$21.3 \pm 0.1^*$	-5.00
	甘氨酸(Gly)	$9.8 \pm 0.0$	$8.2 \pm 0.0^*$	-16.79
	丙氨酸(Ala)	$10.9 \pm 0.0$	$10.2 \pm 0.0^*$	-6.69
	合计	$74.5 \pm 0.3$	$63.5 \pm 0.4^*$	-14.71
	苦味氨基酸	组氨酸(His)	$18.5 \pm 0.2$	$10.6 \pm 0.0^*$
精氨酸(Arg)		$60.4 \pm 0.2$	$21.4 \pm 0.3^*$	-64.59
缬氨酸(Val)		$33.8 \pm 0.3$	$28.2 \pm 0.8^*$	-16.49
蛋氨酸(Met)		$6.8 \pm 2.0$	$7.1 \pm 1.6$	+4.89
异亮氨酸(Ile)		$13.7 \pm 0.4$	$11.0 \pm 0.5^*$	-19.48
亮氨酸(Leu)		$9.2 \pm 0.1$	$7.0 \pm 0.0^*$	-23.89
酪氨酸(Tyr)		$22.1 \pm 0.3$	$17.1 \pm 0.2^*$	-22.48
苯丙氨酸(Phe)		$18.7 \pm 0.0$	$16.2 \pm 1.3^*$	-13.54
赖氨酸(Lys)		$28.0 \pm 0.2$	$19.4 \pm 0.2^*$	-30.68
合计		$211.1 \pm 3.9$	$138.0 \pm 2.3^*$	-34.66
总游离氨基酸		$885.5 \pm 5.1$	$686.1 \pm 7.0^*$	-22.52

注:\* 表示美拉德反应前、后汁液中游离氨基酸的含量存在显著差异( $P<0.05$ )。

美拉德反应产物所含的 0.3~3 ku 的肽、5'-鸟苷酸、谷氨酸、天冬氨酸等鲜味氨基酸贡献强烈的鲜味及回味<sup>[35-38]</sup>,一方面,这些物质可以增加汁液的鲜味和咸味,另一方面,游离氨基酸与新生成的 MPRs 之间发生了味觉相互作用,掩盖了汁液原有的苦、涩等异味<sup>[18,39]</sup>,进而呈现出更加浓郁的咸鲜风味,因此美拉德反应对马铃薯酶解汁液滋味的改善与氨基酸的组成和比例改变有关。

表 7 汁液体外抗氧化活性

Table 7 *In vitro* antioxidant capacity of potato juice

样品	总还原力(A <sub>700nm</sub> )	DPPH 自由基清除率/%	ABTS 自由基清除率/%
马铃薯酶解汁液	0.52 ± 0.00	21.85 ± 0.01	52.18 ± 0.05
美拉德反应液	1.74 ± 0.00	77.67 ± 0.00	85.30 ± 0.04

### 3 结论

本研究以马铃薯酶解汁液为原料,通过添加外源糖,以反应液感官评分为指标,获得改善马铃薯汁液风味的美拉德反应最佳条件为:以木糖与果糖为复配外源糖,质量比 1:3,添加质量分数 3.0%,反应体系 pH 值为 6.0,110 °C 反应 50 min。挥发性风味物质分析表明:美拉德反应液中烃类物质、醇类物质含量减少甚至消失,新生成了较多糠醛、二甲基丁醛、苯甲醛、苯乙醛等挥发性香气成分以及吡嗪、吡啶等具有坚果香、烤肉香气的杂环类化合物,赋予了汁液烘烤香、坚果香味等令人愉悦的风味;汁液中苦味氨基酸占比降低,鲜味氨基酸、甜味氨基酸占比提高,游离氨基酸与新生成的 MPRs 通过味觉相互作用使得汁液的苦涩味降低,咸香风味增强,整体风味与滋味得到较大程度的改善,同时制备的反应液体外抗氧化活性增强。上述结果表明,美拉德反应可以用于改善熟化马铃薯汁液副产物的风味及滋味,为以马铃薯汁液作为风味基料开发新型调味品提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] ZHANG H, XU F, WU Y, et al. Progress of potato staple food research and industry development in China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(12): 2924-2932.
- [2] SUN H R, LIU X Y, TIAN Z G, et al. Influence

### 2.5 美拉德反应前、后马铃薯汁液的体外抗氧化活性

由表 7 可知,马铃薯酶解汁液和最优 MPRs 均有抗氧化性,且最优美拉德反应条件下的马铃薯酶解汁液的总还原力、DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率均显著增加,表明美拉德反应后产物的抗氧化活性明显增加,可能是由于美拉德反应后体系生成了较多的抗氧化性物质<sup>[40]</sup>。

of Potato flour on dough and steamed bread quality and correlation analysis[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2020, 16(1/2): 20190273-1-201902-12.

- [3] JU Q, LI Y X, SUN H X, et al. Effect of potato flour on quality and staling properties of wheat-potato flour bread[J]. *Food Science and Nutrition*, 2020, 8(10): 5474-5482.
- [4] PU H Y, WEI J L, WANG L, et al. Effects of potato/wheat flours ratio on mixing properties of dough and quality of noodles[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 76: 236-242.
- [5] KHALID Z, HUMAYOUN A. Potato production, usage, and nutrition - A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(5): 711-721.
- [6] SHEN G H, ZHANG L D, HU T T, et al. Preparation of potato flour by freeze-thaw pretreatment: Effect of different thawing methods on hot-air drying process and physicochemical properties[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2020, 153: 110157.
- [7] 申光辉,覃小艳,刘海娜,等.紫色马铃薯全粉加工的汁液腥味物质成分及酶解脱腥效果[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(4): 83-91.
- [8] SHEN G H, TAN X Y, LIU H N, et al. Off-flavor compounds of liquid from processing purple potato granules and enzymatic deodorization effect[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(4): 83-91.
- [8] CAI L Y, LI D M, DONG Z J, et al. Change regularity of the characteristics of Maillard reaction

- products derived from xylose and Chinese shrimp waste hydrolysates[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2016, 65: 908-916.
- [9] HAFSA J, ALI SMACH M, BEN MRID R, et al. Functional properties of chitosan derivatives obtained through Maillard reaction: A novel promising food preservative[J]. *Food Chemistry*, 2021, 349: 129072.
- [10] ARIHARA K, YOKOYAMA I, OHATA M. Bioactivities generated from meat proteins by enzymatic hydrolysis and the Maillard reaction[J]. *Meat Science*, 2021, 180: 108561.
- [11] MAJID N, HDI V, EEPAK KUMAR V. Functional and biological properties of Maillard conjugates and their potential application in medical and food: A review[J]. *Food Research International*, 2020, 131: 109003.
- [12] CECILE R, LPHINE L, EMILIE R, et al. Mitigation strategies of acrylamide, furans, heterocyclic amines and browning during the Maillard reaction in foods[J]. *Food Research International*, 2016, 90(3): 154-176.
- [13] 罗伟, 段振华, 刘小兵. 贻贝煮汁酶解液美拉德反应条件优化及其产物氨基酸组成分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(24): 40-44.
- LUO W, DUAN Z H, LIU X B. Optimization of Maillard reaction for enzymatic hydrolysates from mussel juice and amino acid composition analysis[J]. *Food Science*, 2014, 35(24): 40-44.
- [14] HABINSHUTI I, MU T H, ZHANG M. Structural, antioxidant, aroma, and sensory characteristics of Maillard reaction products from sweet potato protein hydrolysates as influenced by different ultrasound-assisted enzymatic treatments [J]. *Food Chemistry*, 2021, 361: 130090.
- [15] 刘培基. 香菇柄酶解液美拉德反应引起的风味及抗氧化性变化的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- LIU P J. Study on flavor and antioxidant properties changes of Maillard reaction in enzymatic hydrolysate of shiitake stalk[D]. Tan'an: Shandong Agricultural University, 2020.
- [16] 刘海娜. 淀粉酶酶解改善马铃薯全粉加工汁液风味及其发酵乳饮料的制备[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
- LIU H N. Flavor improvement of potato juice from potato granules processing by mixed amylases hydrolysis and preparation of lactic fermented milk beverage[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [17] MARIJA P, SAMI G, ANA S, et al. Maillard reaction products formation and antioxidative power of spray dried camel milk powders increases with the inlet temperature of drying[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2021(7): 111091.
- [18] 陆占国, 董艳, 封丹. 顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱分析马铃薯茎叶中挥发性成分[J]. *食品研究与开发*, 2007, 28(6): 113-115.
- LU Z G, DONG Y, FENG D. Study on volatile components of potato leaf by HS-SPME-GC-MS[J]. *Food Research and Development*, 2007, 28(6): 113-115.
- [19] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: "ROA"法[J]. *食品科学*, 2008, 29(7): 370-374.
- LIU D Y, ZHOU G H, XU X L. "ROAV" method: A new method for determining key odor compounds of rugao ham[J]. *Food Science*, 2008, 29(7): 370-374.
- [20] 裴继伟, 丁连坤, 李丽, 等. 牡蛎酶解液-葡萄糖美拉德反应前后体系的溶解特性及氨基酸组成分析[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(20): 93-99.
- PEI J W, DING L K, LI L, et al. Solubility and amino acids composition of enzymatic oyster hydrolysate after Maillard reaction[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(20): 93-99.
- [21] 周际松, 汪芷玥, 汤凯, 等. 羧甲基化茯苓多糖的抗氧化性分析[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(7): 120-125.
- ZHOU J S, WANG Z Y, TANG K, et al. Antioxidant analysis of carboxymethylated *Poria cocos* [J]. *China Food Additives*, 2020, 31(7): 120-125.
- [22] LI S Y, ZHAO Y J, ZHANG L, et al. Antioxidant activity of *Lactobacillus plantarum* strains isolated from traditional Chinese fermented foods [J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(3): 1914-1919.
- [23] 杨楠, 罗凡, 费学谦, 等. 油茶籽美拉德反应及其产物抗氧化性[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(2): 67-72.
- YANG N, LUO F, FEI X Q, et al. Camellia seed Maillard reaction and its product antioxidant resistance[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(2): 67-72.
- [24] LAROQUE D, INISAN C, BERGER C, et al. Ki-



- netic study on the Maillard reaction. Consideration of sugar reactivity[J]. Food Chemistry, 2008, 111(4): 1032-1042.
- [25] 徐静馨, 陈静, 唐琪, 等. 梅鱼内脏酶解液美拉德反应工艺优化及挥发性物质分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(10): 11-17.
- XU J X, CHEN J, TANG Q, et al. Optimization of Maillard reaction process and analysis of volatile compounds in enzymatic hydrolysate of bighead croaker viscera[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(10): 11-17.
- [26] 杨妍, 马晓军, 王黎瑾. 马铃薯泥挥发性风味物质研究[J]. 食品科技, 2007(2): 118-123.
- YANG Y, MA X J, WANG L J. Research on volatile compounds of potato puree[J]. Food Science and Technology, 2007(2): 118-123.
- [27] 秦晓, 吴容, 吴薇, 等. 暗纹东方鲀与菊黄和红鳍东方鲀肉中挥发性成分的比较[J]. 中国食品学报, 2015, 15(7): 230-238.
- QING X, WU R, WU W, et al. Analysis of aromatic volatile in obscure puffer (*Takifugu obscurus*), tawny puffer (*Takifugu flavidus*) and tiger puffer (*Takifugu rubripes*)[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(7): 230-238.
- [28] VARLET V, PROST C, SEROT T. Volatile aldehydes in smoked fish: Analysis methods, occurrence and mechanisms of formation[J]. Food Chemistry, 2007, 105(4): 1536-1556.
- [29] 李松林, 蒋长兴, 聂凌鸿, 等. 风鸡腌制和风干过程中挥发性成分的变化[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(3): 191-198.
- LI S L, JIANG C X, NIE L H, et al. Changes of volatile compounds during curing and drying of air-dried chicken[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(3): 191-198.
- [30] 王榛, 陈雷, 潘超, 等. 不同熟化方法对紫色马铃薯挥发性风味物质形成的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(6): 128-133.
- WANG Z, CHEN L, PAN C, et al. The effect of different cooking methods on volatile compounds of purple Potato[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(6): 128-133.
- [31] 刘圆, 齐红岩, 王宝驹, 等. 不同品种甜瓜果实成熟过程中香气物质动态分析[J]. 华北农学报, 2008, 23(2): 53-58.
- LIU Y, QI H Y, WANG B J, et al. Dynamic analysis of aromatic compounds in different cultivars of Melon during the fruit ripeness[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(2): 53-58.
- [32] 杨金初, 孙世豪, 胡军, 等. 以天然植物水提取物为美拉德反应原料制备天然香料[J]. 烟草科技, 2017, 50(12): 44-54.
- YANG J C, SUN S H, HU J, et al. Natural flavor preparation via Maillard reaction of plant water extracts[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(12): 44-54.
- [33] 范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 3-553.
- GEMERT L J V. Compilations of odour ehreshold values in air, water and other media (second enlarged and revised edition) [M]. Beijing: Science Press, 2018: 3-553.
- [34] LAN X H, LIU P, XIA S Q, et al. Temperature effect on the non-volatile compounds of Maillard reaction products derived from xylose-soybean peptide system: Further insights into thermal degradation and cross-linking[J]. Food Chemistry, 2010, 120(4): 967-972.
- [35] YU M, HE S D, TANG M M, et al. Antioxidant activity and sensory characteristics of Maillard reaction products derived from different peptide fractions of soybean meal hydrolysate [J]. Food Chemistry, 2018, 243: 249-257.
- [36] WANG W L, ZHANG L, WANG Z Q, et al. Physicochemical and sensory variables of Maillard reaction products obtained from *Takifugu obscurus* muscle hydrolysates[J]. Food Chemistry, 2019, 290: 40-46.
- [37] CHEN X, YU J Y, CUI H P, et al. Effect of temperature on flavor compounds and sensory characteristics of Maillard reaction products derived from mushroom hydrolysate[J]. Molecules, 2018, 23(2): 247.
- [38] 王磊, 莫蓓红, 刘振民. Edam干酪的特征滋味[J]. 乳业科学与技术, 2018, 190(2): 11-15.
- WANG L, MO B H, LIU Z M. Taste characteristics of Edam cheese[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2018, 190(2): 11-15.
- [39] KIM M J, SON H J, KIM Y, et al. Umami-bitter interactions: The suppression of bitterness by umami peptides via human bitter taste receptor[J]. Chemical

Senses, 2015, 456(2): 586–590.  
[40] MAJID N, MEHDI V, MOEIN B. The Maillard reaction products as food-born antioxidant and an-

tibrowning agents in model and real food systems[J]. Food Chemistry, 2019, 75: 644–660.

### Maillard Reaction Improves the Flavor of Frozen-thawed Enzymatic Juice Derived from Cooked Potato

Li Jiao<sup>1,2</sup>, Zhou Zhishuai<sup>1</sup>, Shen Guanghui<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan

<sup>2</sup>Key Laboratory of Agro-Products Processing and Nutritional Health, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ya'an 625014, Sichuan)

**Abstract** In this present study, enzymatic hydrolysis and Maillard thermal reaction by adding exogenous sugars were employed to produce Maillard reaction products (MRPs) for flavor improvement of enzymatic hydrolyzed juice by-product derived from cooked potatoes prepared by frozen-thawing process. Single-factor experiments combined with orthogonal experiments were employed to optimize the enzymolysis liquid reaction conditions. Changes of volatile favor compounds, free amino acids and antioxidant activity of Maillard treated juice were analyzed. Results showed that the optimal parameters for Maillard reaction were: 3.0% mixed xylose and fructose with a mass ratio of 1:3, initial pH 6.0, and reaction at 110 °C for 50 min. The types of volatile substances in MRPs were increased significantly, the content of hydrocarbons and alcohols were decreased or even disappeared. Moreover, furfural, dimethyl butyraldehyde, benzaldehyde, phenylacetaldehyde, pyrazine, pyridine characterized nutty and barbecue aroma formed, and therefore contributed to the flavor improvement of potato juice. In addition, the total content of free amino acids was decreased by 22.52%, the umami acids and sweet amino acids increased by 2.88% and 0.85%, the bitter amino acids was decreased by 3.72%. In terms of antioxidant activity *in vitro*, ferric ion reducing antioxidant power increased by 3.35 folds, the DPPH free scavenging activity increased by 55.82%, and the ABTS free radical scavenging rate increased by 33.12%. Overall, the application of Maillard reaction by adding exogenous xylose and fructose can be used a promising strategy for improving flavor and antioxidant activity of the enzymatic hydrolyzed potato juice by-product.

**Keywords** potato; hydrolyzed juice; Maillard reaction; flavors; free amino acids; antioxidant activity