

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250207007

引用格式: 郭磊, 李立鹏, 宗东岳, 等. 酸角酶解液结合焦糖化料液利用美拉德反应制备食用香料[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 61-71.

GUO L, LI LP, ZONG DY, *et al.* Preparation of edible flavorings using Maillard reaction by combining acid keratin hydrolysate with caramelized feed solution [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 61-71. (in Chinese with English abstract).

酸角酶解液结合焦糖化料液利用美拉德反应 制备食用香料

郭磊¹, 李立鹏², 宗东岳³, 王富申², 蔡继宝¹, 徐达¹,
田耀伟¹, 曲利利², 许春平^{2*}

(1. 江西中烟工业有限责任公司技术中心, 南昌 330096; 2. 郑州轻工业大学烟草科学与工程学院, 郑州 450000; 3. 江苏中烟工业有限责任公司技术中心, 南京 210019)

摘要: **目的** 以天然植物为原料, 开发与焦糖化料液结合的美拉德反应香料。**方法** 以酸角为原料, 对其进行复合酶处理后与焦糖化料液掺配进行美拉德反应, 根据美拉德香料感官综合评分标准确定其最优制备工艺, 分析有无掺配焦糖化料液的美拉德反应香料的香韵差异, 并利用顶空微萃取技术(headspace solid-phase microextraction, HS-SPME)结合气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)检测挥发性香气成分, 分析产生香韵差异的原因, 利用 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)研究其抗氧化活性。**结果** 酸角酶解最优工艺条件为: 温度 45 °C, 时间 4.0 h, 果胶酶、纤维素酶、木瓜蛋白酶组成质量比为 1:1:1 (*m:m:m*)的复合酶添加量为酸角添加量的 0.5%。温度 120 °C、时间 80 min、初始 pH 8.0、料液比 5:1 (*m:l*)时, 酸角酶解液与焦糖化料液掺配美拉德反应香料感官评分最高。在该条件下, 香料中检测出 68 个挥发性成分, 其中酯类、杂环类、酮类等挥发性物质占比均高于未掺配的焦糖化料液的酸角美拉德反应香料, 赋予香料焦甜香、烤甜香、膏香, 添加焦糖化料液进行美拉德反应可以增强其抗氧化性, 香料质量浓度为 10 mg/mL 时 DPPH 自由基清除率为 70.8%。**结论** 该研究以酸角为原料, 为结合焦糖化料液进行美拉德反应制备食用香料提供了新方法。**关键词:** 酸角; 美拉德反应; 顶空固相微萃取分析; 抗氧化活性

Preparation of edible flavorings using Maillard reaction by combining acid keratin hydrolysate with caramelized feed solution

GUO Lei¹, LI Li-Peng², ZONG Dong-Yue³, WANG Fu-Shen², CAI Ji-Bao¹,
XU Da¹, TIAN Yao-Wei¹, QU Li-Li², XU Chun-Ping^{2*}

(1. Research Center, Jiangxi Tobacco Industry Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 2. College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China; 3. Research Center, Jiangsu Tobacco Industry Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

收稿日期: 2025-02-07

基金项目: 中国烟草总公司重大科技项目[110202201005(JY-05)]; 河南省重大科技专项(231100310200)

第一作者: 郭磊(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为香精香料研究。E-mail: recallerman@163.com

*通信作者: 许春平(1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品香料合成。E-mail: xuchunping05@163.com

ABSTRACT: Objective To develop Maillard reaction flavors combined with caramelized syrup using natural plants as raw materials. **Methods** Using tamarind as a raw material, it was treated with composite enzymes and mixed with caramelized syrup for Maillard reaction. The optimal preparation process was determined according to the comprehensive sensory score standard for Maillard flavors. The aroma differences between the Maillard reaction flavors with and without caramelized syrup were analyzed, and volatile aroma compounds were detected using headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) coupled with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The reasons for the aroma differences were analyzed, and its antioxidant activity was studied using 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH). **Results** The optimal conditions for tamarind enzymatic hydrolysis were: Temperature 45 °C, time 4.0 hours, and a composite enzyme ratio of 1:1:1 (*m:m:m*) for pectinase, cellulase, and papain, with an enzyme dosage of 0.5% of the tamarind amount. At a temperature of 120 °C, reaction time of 80 minutes, initial pH 8.0, and a material-to-liquid ratio of 5:1 (*m:V*), the Maillard reaction flavor mixed with caramelized syrup showed the highest sensory score. Under these conditions, 68 volatile compounds were detected in the flavor, with ester, heterocyclic, and ketone volatile compounds accounting for a higher proportion compared to the Maillard flavor without caramelized syrup, imparting a sweet-caramel, roasted-sweet, and rich aroma. Adding caramelized syrup enhanced the antioxidant activity of the flavor, and at a concentration of 10 mg/mL, the DPPH scavenging rate reached 70.8%. **Conclusion** This study provides a new method for preparing edible flavors through the Maillard reaction with tamarind as the raw material combined with caramelized syrup.

KEY WORDS: acid horn; Maillard reaction; headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; antioxidant activity

0 引言

焦糖化反应液是指醛糖或酮糖在 150~200 °C 的高温条件下发生降解产生的,可赋予食品香气和色泽^[1-2]。研究表明烟草调制过程中会产生焦糖化反应^[3-4],产生甲基环戊烯醇酮、乙基环戊烯醇酮、糠醛等物质^[5-6],对烟草香气具有重要影响,但并没有相关针对焦糖化料液对美拉德反应香气影响的研究。

生物酶解技术可将植物内果胶、蛋白质等大分子物质分解成氨基酸、还原糖及制香前体物等小分子^[7-8],目前已广泛应用于香料的制备。例如,何爱华^[9]采用生物酶处理天然奶油中对香气无贡献的甘油三酯,得到奶香精基料。美拉德反应主要是氨基酸和还原糖加热时发生的一种化学反应,会产生一系列具有特色风味香气的化合物和棕/褐色色素^[10]。因此,美拉德反应是影响食品质量参数的关键因素,它涉及感官特性、颜色变化及蛋白质功能等多个方面^[11]。许春平等^[12]利用酶处理红薯得到酶解液,并进行美拉德反应,确定了酶处理在美拉德反应香料香气提升方面的作用。

酸角,又称罗望子,为苏木科酸豆属,营养价值高,富含多种氨基酸、蛋白质、果胶及还原糖等^[13]。目前在食品行业内,酸角的应用主要包括开发食品添加剂^[14]、发酵食品^[15]、功能性食品^[16]等。以酸角为原料在香精香料的研究主要集中在酸角浸膏卷烟加香方面^[17],然而以酸角

为原料制备美拉德反应食用香料的研究鲜少见报道。

本研究以酸角为原料,利用复合酶技术酶解酸角中纤维素、果胶等大分子,以所得酸角酶解液中氨基酸及还原糖为内源,添加焦糖化料液为糖原进行美拉德反应制备具有焦甜香味的酸角酶解液美拉德香料,确定最优工艺条件,结合嗅香评价和顶空固相微萃取(headspace solid-phase microextraction, HS-SPME)与气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对最优工艺条件下美拉德反应香料挥发性成分进行分析,研究添加焦糖化料液后对美拉德反应香料香韵变化,并分析香料的抗氧化性,以期以酸角为原料,开发一种具有焦甜香的特色食用香料,为酸角的香料开发提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

酸角(爱萝卜美食有限公司)。

无水乙醇、二氯甲烷、氢氧化钠(分析纯,苏州辰泽化工有限公司);无水硫酸钠、无水碳酸钠(分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);乙酸苯乙酯(色谱纯,美国 Sigma-Aldrich 公司);食用葡萄糖(分析纯,无锡市亚泰联合化工有限公司)。

SHZ-D(III)型循环水式多用真空泵、HH-S 型恒温油浴锅(巩义市予华仪器有限公司);GE0205 电子天平(精度 ±0.001 g,上海佑科仪器仪表有限公司);HH-8 型恒温水浴

锅(金坛市华峰仪器有限公司); UV-1000 紫外分光光度计(普源精电科技股份有限公司); 九阳 S5-LF960-A 搅拌机(杭州九阳生活电器有限公司); SK2200 超声波清洗机(长沙明杰仪器有限公司); DF-101 S 型集热式恒温磁力搅拌器(河南省予华仪器有限公司); 非极性 DB-5 色谱柱(美国安捷伦科技有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 酸角酶解液的制备

由于酸角黏稠, 因此按照 1:30 ($m:V$) 的配比, 将 10 g 酸角加入 300 g 去离子水中, 用搅拌机将酸角果肉粉碎, 加入一定量复合酶(果胶酶、纤维素酶、木瓜蛋白酶)进行水浴酶解浸提。酶解完成后, 将浸提液置于沸水中高温灭活复合酶, 然后将酶解灭活后的酶解液在 4000 r/min 下离心 10 min, 获取上清液, 将其稀释一定倍数得到酸角酶解液。

1.2.2 葡萄糖焦糖化料液的制备

参考芦昶彤等^[18]制备焦糖化料液的方法, 称取定量无水葡萄糖, 添加 20% 无水碳酸钠作为反应助剂, 选取一定量水为溶剂, 超声搅拌均匀, 在 160 °C 下加热 20 min 制备焦糖化料液。

1.2.3 酸角水提液酶解单因素实验

还原糖含量会影响美拉德反应的进行及效果^[19]。因此考察酸角酶解液制作过程中, 酶解时间(3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 h)、酶解温度(35、40、45、50、55 °C)、复合酶添加量(0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、0.9%)对酶解液还原糖含量的影响。

1.2.4 酸角焦糖化美拉德香料制备单因素实验

酸角酶解液与焦糖化料液按一定比例掺配进行美拉德反应, 以感官评分为主结合褐变值, 设置单因素实验, 对反应时间(40、60、80、100、120 min)、反应温度(70、90、10、130、150 °C)、反应 pH (5.0、6.0、7.0、8.0、9.0)及掺配比例(酸角酶解液:焦糖化料液=3:1、4:1、5:1、6:1、7:1, $m:V$)进行优化。在改变其中一个因素时, 其余因素不变。

1.2.5 Box-Behnken 响应曲面法设计

以反应温度(A)、反应时间(B)、初始 pH (C)和酸角酶解液与焦糖化料液的比例(D) 4 个因素为考察对象, 以感官评分(Y)为响应值, 利用 Box-Behnken 方法进行设计实验, 建立响应面回归模型, 实验设计如表 1 所示。

1.2.6 美拉德反应褐变程度测定感官评价

用紫外可见分光光度计测定 420 nm 处的吸光度值, 作为美拉德反应晚期褐变聚合物形成的指标。将单因素实验中不同水平的酸角酶解液焦糖化美拉德香料稀释 1000 倍后, 测定其在 420 nm 处的吸光度, 褐变度越大, 美拉德反应终产物的积累量越大, 反应越剧烈。

表 1 酸角美拉德反应香料响应面法设计实验因素和水平
Table 1 Design test factors and levels of acid horn Maillard reaction spices response surface method

因素	编码	水平		
		-1	0	1
反应温度/°C	A	110	120	130
反应时间/min	B	70	80	90
初始 pH	C	6.0	7.0	8.0
酸角酶解液:焦糖化料液比($m:V$)	D	4:1	5:1	6:1

1.2.7 感官评价

由 6 名经验丰富的感官评定员组成感官评定小组, 在通风环境下, 从“色泽”“气味”“协调性”“质地”4 个方面对不同工艺制备的酸角酶解液焦糖化美拉德香料进行评价, 评价分数去掉最高分与最低分后取平均值^[12](表 2)。

表 2 酸角香料感官综合评分标准
Table 2 Sensory comprehensive evaluation standard of acid horn spices

维度	评价标准	评分/分
色泽	显黄褐色、色泽纯正、均一	15~20
	偏褐色、色泽不纯正、不均一	8~14
	深褐色或色泽不透亮	0~7
气味	香味层次丰富, 焦甜香突出, 具有葡萄干特征香味	21~30
	香味层次一般, 有一定的焦甜香及葡萄花特征香味	11~20
	香味层次单一, 焦甜香等较弱	0~10
协调性	协调性好, 风味饱满突出	21~30
	协调性一般, 风味较好	11~20
	协调性差, 风味寡淡	0~10
质地	组织细腻, 静置后无分层	15~20
	组织不均一、但静置后无明显分层	8~14
	浑浊、静置有明显分层	0~7

1.2.8 嗅香评价

将酸角酶解液焦糖化美拉德香料放置于密闭的磨口瓶中保存, 由 8 名经验丰富的感官评定员组成感官评定小组, 通过嗅觉对待测样品的风味进行评分, 从果香、清甜香、烤甜香、焦甜香、密甜香、坚果香、膏香等 7 个方面进行嗅香评价, 每个方面最高分 6 分, 最低分 0 分, 评定其风格类型, 评价结果用雷达图表示。

1.2.9 酸角美拉德反应香料分析方法

(1) HS-SPME 条件

样品预热条件: 80 °C, 预热 30 min; 顶空吸附: 将老化后的微萃取头插入顶空瓶中, 推出纤维头, 于顶空位置吸附 3 min 后, 收回纤维头, 抽提过程中保持 45 °C 加热; 顶空吸附后迅速送样至 GC 送样口, 于 250 °C 温度下热解

析 5 min。

(2) GC-MS 条件

GC-MS 仪检测条件: 采用 DB-5 色谱柱进行分析。

GC 条件: 不分流, 载气(高纯氮气 99.999%)流量 1.0 mL/min, 升温程序: 初始温度 40 °C, 保持 4 min; 以 5 °C/min 升至 110 °C, 再以 5 °C/min 升至 220 °C, 在 220 °C 保持 5 min。

MS 条件: 离子源: 电子轰击(electron impact, EI), 离子源温度 230 °C, 接口温度 230 °C, EI 源能量 70 eV, 电子倍增器电压 2409 V, 质量扫描范围 m/z 50~550 u。

定性分析: 根据总离子流图中各色谱峰的质谱信息, 经 NIST17 标准质谱库进行串联检索, 选取匹配度 80 以上的物质, 对各挥发性组分进行定性。计算挥发性物质的百分比含量。

1.2.10 酸角焦糖化美拉德香料抗氧化性实验

由于 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)可以在化学反应中观察是否有自由基反应, 因此选择 DPPH 对酸角酶解液焦糖化美拉德香料进行抗氧化性的测定^[19]。DPPH 法具体方法如下: 分别配制质量浓度为 0.5、1.0、1.5、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 mg/L 的酸角酶解液焦糖化美拉德香料及酸角酶解液与焦糖化料液掺配未加热香料。另外利用 50%乙醇溶液配制 0.1 g/L 质量浓度的 DPPH 自由基溶液待用。设置 5 个测试组, 两个样品组对应待测香料, 一个对照组和两个空白组来避免样品本身吸光度的影响。将不同浓度样品加入到 DPPH 溶液中做样品组, 用蒸馏水替代香料溶液加入到 DPPH 溶液中作对照组, 将香料溶液加入到无水乙醇中作空白组, 在 517 nm 波长处测定的吸光度, 依次标记为样品组 C_2 、对照组 C_0 、空白组 C_1 , 分别计算两种香料样品的 DPPH 自由基的清除率。计算如公式(1)所示。

$$\text{DPPH 自由基的清除率}/\%=[1-(C_2-C_1)/C_0]\times 100\% \quad (1)$$

1.3 数据处理

对照组和实验组各进行 3 次平行实验; 使用 Design

Expert 10 软件对实验数据进行分析; 利用 Origin 2018 软件进行绘图, SPSS 17.0 进行显著性分析, $P<0.05$ 表示数据具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 酶解条件单因素优化结果

由图 1 可知, 随着复合酶酶解时间的增加, 酸角酶解液中还原糖含量总体呈先上升后下降的趋势, 在 5.0 h 后趋于稳定。当酶解时间在 3.0~4.0 h 之间时, 还原糖含量随着时间的延长而增加, 底物与酶结合的作用位点增多, 还原糖含量逐渐增加; 当酶解时间在 4.5~5.0 h 之间时, 还原糖含量变化不大, 可能是由于酶解产物含量逐渐增多, 其竞争性抑制增强, 因此还原糖含量没有明显变化; 温度在 35~45 °C 之间时, 水提液中还原糖含量随温度的增加而有较大幅度的增加, 在 45 °C 时达到最大值, 而当酶解温度大于 45 °C 时, 还原糖含量降低并保持稳定, 因此确定 45 °C 为最适酶解温度; 随着酶添加量的增多, 酸角酶解液还原糖含量增加趋势明显, 0.5% 添加量时还原糖含量达到峰值。最终确定酸角酶解工艺条件为: 时间 4.0 h、温度 45 °C、复合酶添加量为酸角添加量 0.5%。

2.2 酸角酶解液焦糖化美拉德反应香料工艺制备优化结果

2.2.1 不同反应时间的影响

将酸角酶解液与焦糖化料液掺配进行美拉德反应, 其他条件不变, 控制美拉德反应时间, 不同反应时间下的酸角酶解液美拉德反应香料褐变值及感官评分结果如图 2。随着反应时间的延长, 香料褐变值不断上升, 40~80 min 上升趋势较大, 说明此区间内, 美拉德反应较为剧烈。香料的感官评分随着反应时间的延长先增后降, 在 100 min 时香料感官评价结果最好, 超过 100 min 后逐渐下降, 说明 100 min 时, 香味物质已经产生, 而超过 100 min 后, 美拉德反应产生的棕色物质类黑精产生过量^[20], 环化会有不良气味的物质产生。

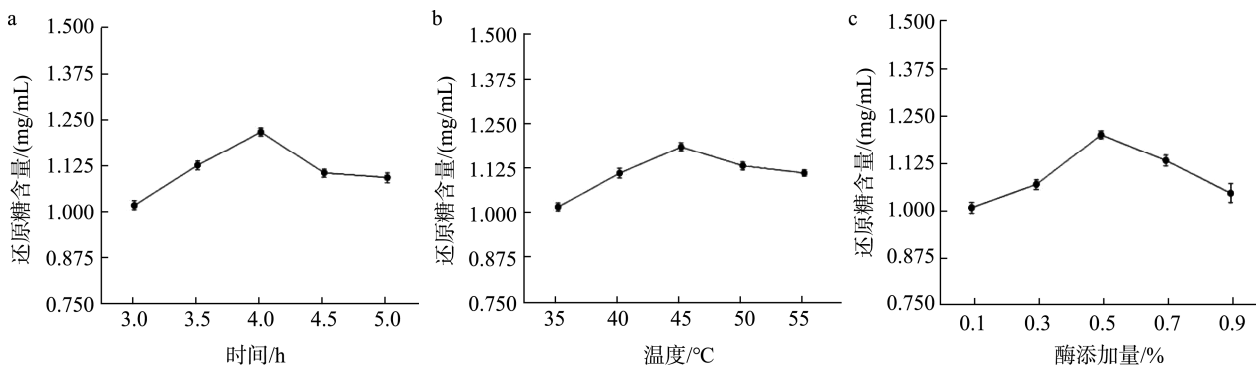
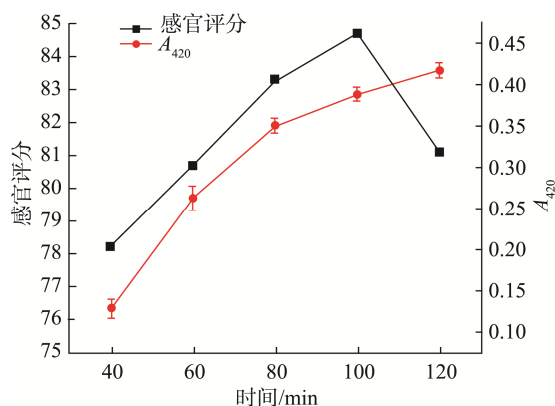


图 1 酶解时间(a)、酶解温度(b)、复合酶质量比(果胶酶:纤维素酶:木瓜蛋白酶)(c)对还原糖含量的影响

Fig.1 Effects of enzymolysis time (a), enzymolysis temperature (b) and compound enzyme mass ratio (pectinase:cellulase:papain) (c) on reducing sugar content



注: A_{420} 为酸角焦糖化美拉德香料稀释 1000 倍后, 在 420 nm 处的吸光度, 图 3~5 同。

图 2 不同反应时间下酸角酶解液焦糖化美拉德香料感官评分及褐变值变化

Fig.2 Changes of sensory scores and browning values of acid horn Maillard spices under different reaction time

2.2.2 不同反应温度的影响

不同温度下酸角酶解液焦糖化美拉德香料样品褐变值及感官评分变化趋势如图 3 所示。香料反应的褐变速率随着温度的增加而持续增快, 因此香料在 420 nm 处的吸光度随着反应温度的增加不断上升, 棕色物质不断增加^[21-22]。感官评分随着反应温度的增加先增后降, 在 130 °C 时最大, 说明当反应温度过低时, 美拉德反应还没有达到产生香气物质的条件, 反之, 温度过高, 反应进行过度, 反应产物色泽变深, 杂质成分增加, 产生焦糊味。因此, 130 °C 时酸角酶解液焦糖化美拉德香料反应程度最为恰当。

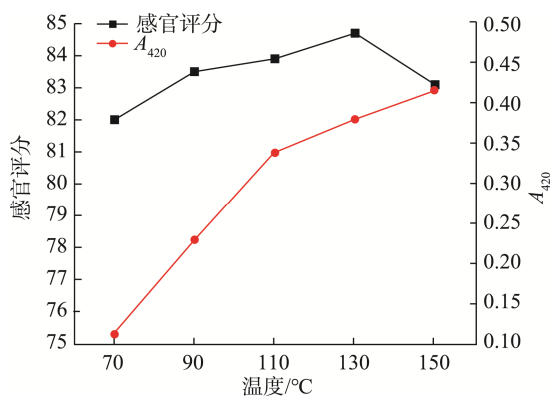


图 3 不同反应温度下酸角酶解液焦糖化美拉德香料感官评分及褐变值变化

Fig.3 Changes of sensory scores and browning values of acid horn Maillard spices under different reaction temperatures

2.2.3 不同反应 pH 的影响

由图 4 可知, 随着酸角酶解液焦糖化美拉德香料样品的初始 pH 的逐渐增大, 香料在 420 nm 处吸光度值呈上升趋势, 说明 pH 会促进反应体系的进程^[23-24], 而感官评分随着初始 pH 的增加呈现先升后降的趋势且前后差异明显,

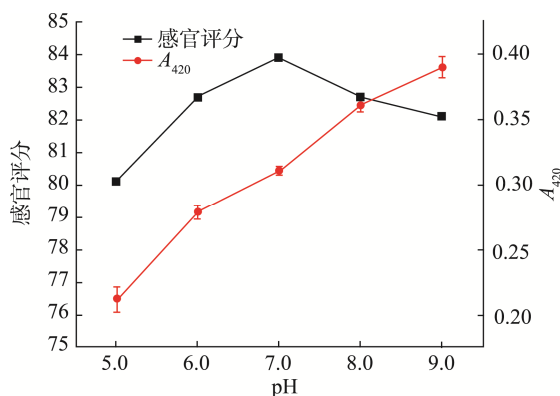


图 4 不同反应 pH 下酸角酶解液焦糖化美拉德香料感官评分及褐变值变化

Fig.4 Changes of sensory scores and browning values of acid horn Maillard spices under different reaction pH

在 pH 为 7.0 时感官评价效果最好。

2.2.4 不同料液比的影响

如图 5 所示, 样品褐变值随着酸角酶解液焦糖化美拉德反应体系中酸角酶解液比例的增多逐渐下降, 香料在 420 nm 处吸光度值呈下降趋势, 说明焦糖化料液的比例会促进反应体系的进程^[25-26]。感官评价表明, 随着料液比的增大, 感官得分呈先增大后减小的趋势, 其中以酶解液和焦糖化液的比例为 5:1 ($m:l$) 时效果最好, 结合褐变值分析原因可能是焦糖化料液过多会掩盖酸角酶解液本身的果香, 过少则影响美拉德反应进行的程度, 在料液比 5:1 ($m:l$) 时反应体系最为协调。

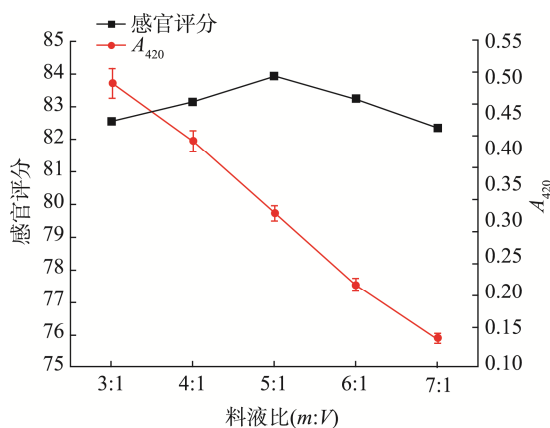


图 5 不同料液比对酸角酶解液焦糖化美拉德香料感官评分及褐变值的影响

Fig.5 Effects of different solid-liquid ratios on sensory scores and browning values of acid horn Maillard spices

2.2.5 响应面实验结果分析

根据单因素实验结果, 以反应温度(A)、反应时间(B)、初始 pH (C)及料液比(D)为自变量, 所得香料感官评价结果为响应值, 采用 Design-Expert 10 软件设计响应面实验方案, 实验方案与结果如表 3 所示。

表 3 Box-behnken 实验设计方案与实验结果
Table 3 Design scheme and experimental results of Box-behnken test

序号	A(反应温度)/°C	B(反应时间)/min	C(初始 pH)	D(料液比)(m:V)	感官评分	序号	A(反应温度)/°C	B(反应时间)/min	C(初始 pH)	D(料液比)(m:V)	感官评分
1	70	130	7.0	6:1	81.1	16	80	130	8.0	6:1	86.0
2	80	130	6.0	6:1	80.7	17	80	130	7.0	5:1	85.9
3	80	120	7.0	4:1	81.6	18	80	130	7.0	5:1	85.1
4	80	120	6.0	5:1	78.5	19	80	130	7.0	5:1	85.6
5	70	130	7.0	4:1	80.1	20	90	120	7.0	5:1	82.1
6	70	120	7.0	5:1	80.0	21	80	130	7.0	5:1	85.1
7	80	140	8.0	5:1	83.0	22	90	130	6.0	5:1	80.8
8	90	130	7.0	4:1	80.5	23	80	140	7.0	6:1	79.6
9	90	130	7.0	6:1	81.0	24	90	140	7.0	5:1	79.0
10	80	140	6.0	5:1	81.0	25	80	140	7.0	4:1	80.0
11	70	130	8.0	5:1	84.0	26	90	130	8.0	5:1	84.4
12	80	130	6.0	4:1	82.3	27	70	130	6.0	5:1	81.9
13	80	130	7.0	5:1	85.1	28	80	120	8.0	5:1	86.8
14	80	130	8.0	4:1	85.0	29	70	140	7.0	5:1	79.2
15	80	120	7.0	6:1	78.9						

为了研究时间、温度、pH 及料液比对酸角酶解液焦糖化美拉德香料感官评分的影响,在单因素实验基础上,进行响应面实验,根据实验结果,利用 Design Expert 软件对实验结果进行分析。

由表 4 可知,该模型 $P < 0.0001$,表明模型极其显著; $R^2 = 99.17\%$,失拟项 $P = 0.0511$ ($P > 0.05$),表明拟合程度好,

误差小,可以有效地预测香料的感官评价得分。经 Design-Expert 10 软件分析优化,以感官评价得分为响应值,可得制备酸角酶解液焦糖化美拉德香料的最优工艺参数为:时间 80 min、温度 120 °C、pH 8.0、料液比 5:1 (m:V)。根据 P 大小可知:一次项 C ,交互项 AC ,二次项 A^2 、 B^2 、 D^2 对酸角焦糖化料液美拉德香料的感官评价得分结果的影响均达

表 4 回归模型各项系数方差分析和显著性检验结果
Table 4 Results of variance analysis and significance test of regression model coefficients

方差来源	总偏差平方和	自由度	平均偏差平方和	F	P	显著性
模型	170.28	14	12.16	19.61	<0.0001	**
A	3.1	1	3.1	5	0.0422	*
B	0.1875	1	0.1875	0.3023	0.5911	
C	48	1	48	77.39	<0.0001	**
D	0.4033	1	0.4033	0.6503	0.4335	
AB	1.32	1	1.32	2.13	0.1663	
AC	9.92	1	9.92	16	0.0013	**
AD	1.32	1	1.32	2.13	0.1663	
BC	0.5625	1	0.5625	0.907	0.3571	
BD	0.0625	1	0.0625	0.1008	0.7556	
CD	1.69	1	1.69	2.72	0.1210	
A^2	59.55	1	59.55	96.02	<0.0001	**
B^2	39.89	1	39.89	64.32	<0.0001	**
C^2	0.0214	1	0.0214	0.0346	0.8551	
D^2	29.77	1	29.77	48.01	<0.0001	**
残差	8.68	14	0.6202			
失拟项	8.13	10	0.8131	5.89	0.0511	
纯误差	0.552	4	0.138			
合计	178.96	28				

注: *表示差异显著($P < 0.05$), **表示差异极显著($P < 0.01$)。

到极显著水平($P<0.01$); 根据 F 大小可知, 各因素对感官评分的影响排为 $C>A>D>B$, 即反应 $pH>$ 反应温度 $>$ 料液比 $>$ 反应时间。最终确定制备酸角焦糖化料液美拉德反应香料最优工艺为: 时间 80 min、温度 120 °C、 pH 8.0、酸角酶解液与焦糖化料液料液比 5:1 ($m:V$)。

2.3 酸角焦糖化美拉德反应香料嗅香评价

酸角酶解液美拉德反应香料(反应体系中未加入焦糖化料液)、酸角酶解液焦糖化美拉德反应香料各香韵的变化如图 6 所示, 酸角酶解液焦糖化美拉德反应香料各香韵中焦甜香评分最高, 明显高于酸角酶解液美拉德反应香料, 烤甜香、膏香较为突出, 果香较为和缓, 明显低于酸角酶解液美拉德反应香料, 清甜香略低于酸角酶解液美拉德反应香料, 这表明添加焦糖化料液后, 对美拉德反应香料的甜香香韵的改善较大, 香气对果香及清甜香有所掩盖。

2.4 HS-SPME-GC-MS 分析结果

酸角酶解液美拉德反应香料(对照组)、最优工艺条件下酸角酶解液焦糖化美拉德反应香料(样品组)的挥发性成分结果如表 5 所示, 选取 80%以上匹配度的挥发性物质进行分析鉴定。

如表 5 所示, 两种香料共检测出 88 个挥发性物质, 其中酸角酶解液美拉德反应香料共检测 59 个, 酸角酶解液

焦糖化美拉德反应香料检测到 68 个。酸角酶解液焦糖化美拉德反应香料挥发性成分中, 酮类物质含量明显提高, 酮类物质大多具有焦甜香、烘烤香、坚果香等, 有利于改善卷烟的香气品质, 如甲基环戊烯醇酮、2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮等。

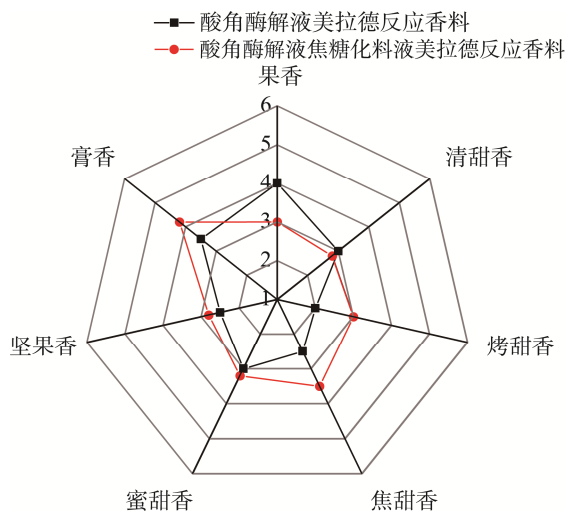


图 6 两种酸角美拉德反应香料的香韵分析
Fig.6 Flavor analysis of two kinds of acid horn Maillard spices

表 5 两种酸角香料的顶空固相微萃取分析结果(%)

Table 5 Analysis results of headspace solid-phase microextraction for 2 kinds of acid horn flavorings (%)

类别	挥发性物质	对照组	样品组	类别	挥发性物质	对照组	样品组
酮类	β -紫罗兰酮	20.7652	16.5483	醇类	桉油烯醇	2.7584	1.7382
	香叶基丙酮	3.3049	7.2048		α -桉醇	0.4678	0.4079
	右旋香芹酮	3.5710	1.6537		香茅醇	1.4856	2.1446
	2,6-二(叔丁基)-4-羟基-4-甲基-2,5-环己二烯-1-酮	2.6507	2.5771		(1S,4S,4aR,8aS)-4-异丙基-1,6-二甲基-3,4,4a,7,8,8a-六氢-2H-萘-1-醇	7.1236	5.3899
	4-异丙基-6-甲基-1-四氢萘酮	0.1452	0.1174		A-毕橙茄醇	8.2385	7.2399
	大马士酮	-	1.0513		钙-4-烯-1 β -醇	0.9817	-
	甲基环戊烯醇酮	-	1.2659		4-萜烯醇	0.1578	-
	乙基环戊烯醇酮	-	0.0969		香叶醇	0.3177	0.5471
	5-乙基-3,4-二甲基-1H-吡喃-[2,3-c]吡唑-6-酮	0.6079	-		3,7,11-三甲基-2,6,10-十二烷三烯-1-醇	2.0913	2.8829
	4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮	-	0.2495		11,11-二甲基-4,8-二亚甲基双环[7.2.0]十一烷-3-醇	1.1487	-
	3-丁烯-2-酮	-	0.8766		DL-薄荷醇	0.0994	-
	3 甲基-6-(1-甲基乙基)-2-环己烯-1-酮	-	0.0249		α -松油醇	0.5392	1.8559
	DDMP	-	6.5645		橙花叔醇	0.5716	0.4463

表 5(续)

类别	挥发性物质	对照组	样品组	类别	挥发性物质	对照组	样品组
醇类	芳樟醇	2.2411	-	酯类	棕榈酸乙酯	4.7238	0.5375
	桉叶油醇	0.0622	-		2-甲基-丙酸 3-羟基-2,2,4-三甲基戊基酯	-	0.0765
	α -松油醇	1.2136	2.8559		2,2,4-三甲基-3-羧基异丙基异丁酯	0.2603	-
	(-)-蓝桉醇	-	0.2388		邻苯二甲酸异丁基辛酯	-	0.2091
	香叶基香叶醇	-	0.0535	酚类	丁香酚	1.7276	1.0452
	(-)-4-萜品醇	-	0.4435		甲基丁香酚	0.2148	0.2618
	4(15),5,10(14)-大根香叶三烯-1-醇	-	0.1927		(-)-对苯二酚	0.1490	0.1355
	β -石竹烯	1.0609	0.0549		乙基麦芽酚	1.0993	0.2137
	(1R,4E,7E,11R)-1,5,9,9-四甲基-12-氧杂双环[9.1.0]十二碳-4,7-二烯	0.1894	0.1576		4A(2H)萘酚	-	0.7232
	依兰油烯	0.0995	-		2,5-二叔丁基酚	-	0.0774
环十四烷	0.0487	-	香芹酚		-	0.0559	
α -衣兰油烯	0.3300	-	2-叔丁基对甲苯酚		-	0.0232	
α -蒎烯	2.3097	1.9352	醛类		金合欢醛	2.1012	1.2589
(E)- β -金合欢烯	0.4751	-			柠檬醛	0.5070	0.0114
白菖烯	0.4905	-		苯乙醛	0.1072	0.4104	
(+)-香橙烯	0.6747	0.6329		2,3-二氢-2,2,6-三甲基苯甲酰	0.2372	1.1984	
五甲基环戊二烯	0.1049	-		α -亚乙基-苯乙醛	-	0.1082	
(1R,9R,E)-4,11,11-三甲基-8-亚甲基双环[7.2.0]十一碳-4-烯	0.7534	-		正癸醛	-	0.1321	
α -萜品烯	0.9060	0.0134		壬醛	-	0.1164	
7-(甲基亚乙基)-双环[4.1.0]庚烷	0.4144	0.4150		5-羟甲基糠醛	-	9.2246	
氧化石竹烯	0.6228	1.7257		糠醇	0.3564	3.7051	
1,4-二甲基-4-乙酰基-1-环己烯	0.3291	1.0056		其他	(1S,8aR)-1-异丙基-4,7-二甲基-1,2,3,5,6,8a-六氢萘	-	0.5766
14-羟基石竹烯	3.4420	1.1652	(1S)-1,2-二氢-4,7-二甲基-1-(1-甲基乙基)-萘		-	0.2205	
香树烯	-	2.2794	3-苯基咪喃		2.2649	2.9479	
6-甲基-2-亚甲基-6-(4-甲基-3-戊烯基)-庚烷	-	0.3346	1,2,3,4-四氢-1,1,6-三甲基萘		0.0533	-	
环氧化蛇麻烯	-	0.4070	1,2,3,4,4A,7-六氢化-1,6-二甲基-4-(1-甲基乙基)-萘		0.4471	-	
酯类	肉豆蔻酸异丙酯	1.1062	0.0482		薄荷脑	2.2810	-
	棕榈酸异丙酯	0.1208	0.0977		2H-1-苯吡喃	3.5032	-
	乙酸冰片酯	0.0113	0.0375		7-甲基二苯并咪唑	-	0.1098
	棕榈酸甲酯	5.3660	-		2,4-二甲基-1-甲氧基苯	-	0.1589
	邻苯二甲酸二丁酯	-	0.2181		2,5-二甲基吡嗪	0.5682	1.2658

注: -表示未检出; 2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮(2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-4H-pyran-4-one, DDMP)。

2.5 焦糖化料液对酸角酶解液美拉德反应挥发性成分影响分析

对比未掺配焦糖化料液的酸角酶解液美拉德反应产物(图 7), 酸角酶解液焦糖化美拉德反应香料除烷烯类及醇类, 其他不同类别挥发性成分占比及种类均有所提高。芳樟醇、桉油烯醇等香气物质减少, 醇类物质阈值范围大, 具有壤香、花香、植物香和清甜香^[27-28], 这表明焦糖化料液对美拉德反应香料在植物香气方面的改善并不明显, 解释了酸角酶解液焦糖化料液美拉德反应香料清甜香减弱的原因; 相反, 醛类、酮类及杂环类物质增加最多, 主要香气物质包括 5-羟甲基糠醛、甲基环戊烯醇酮、DDMP、糠醇、二甲基吡嗪等, 上述酮类化合物是焦甜香的特征性物质, 吡嗪类化合物具有烤香、坚果香等风味特征^[29], 香气物质变化与嗅香评价结果一致。

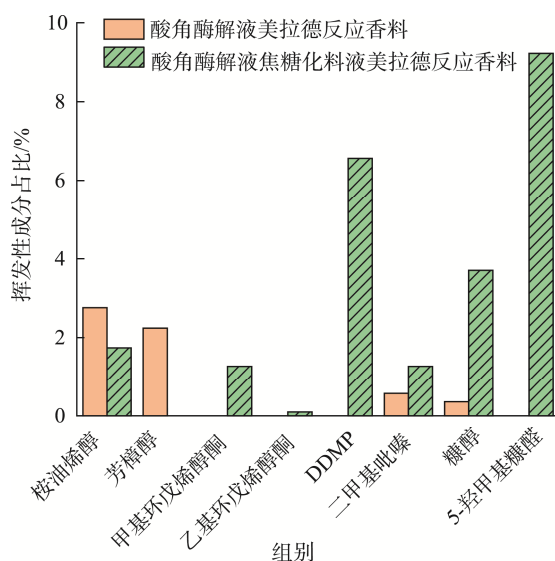


图 7 两种酸角美拉德反应香料挥发性成分分析
Fig.7 Analysis of volatile components of 2 kinds of acid horn Maillard spices

2.6 两种酸角美拉德反应香料的抗氧化活性

对最优工艺下的酸角酶解液焦糖化美拉德反应香料与酸角酶解液未掺配焦糖化料液美拉德反应香料进行抗氧化活性的测定, 设置焦糖化料液为对照组, 以区分美拉德反应与焦糖化的独立贡献, 避免协同效应的影响。如图 8 所示, 三者均具有清除 DPPH 自由基的能力。焦糖化料液自身具有抗氧化性, 这是由于焦糖化料液中含有大量醛酮等抗氧化物质^[30]。焦糖化料液的抗氧化能力低于另两种香料, 这是由于酸角自身具有抗氧化物质, 且美拉德反应也会产生醛酮类物质。在质量浓度 0~4 mg/mL 范围中, 酸角酶解液焦糖化料液美拉德反应香料的 DPPH 清除率随浓度提高而快速增加, DPPH 自由基清除率大于酸角酶解液

未掺配焦糖化料液美拉德反应香料, 这是由于焦糖化料液中含有大量醛酮等抗氧化物质^[30]。在质量浓度 2~6 mg/mL 范围内两种香料 DPPH 自由基清除率增速减慢, 质量浓度 6 mg/mL 以上范围的 DPPH 自由基清除率随浓度提高趋于平稳。质量浓度为 10 mg/mL 的酸角酶解液焦糖化料液美拉德反应香料的 DPPH 自由基清除率可达 70.8%。这表明添加焦糖化料液有效提高了美拉德反应香料的抗氧化活性。

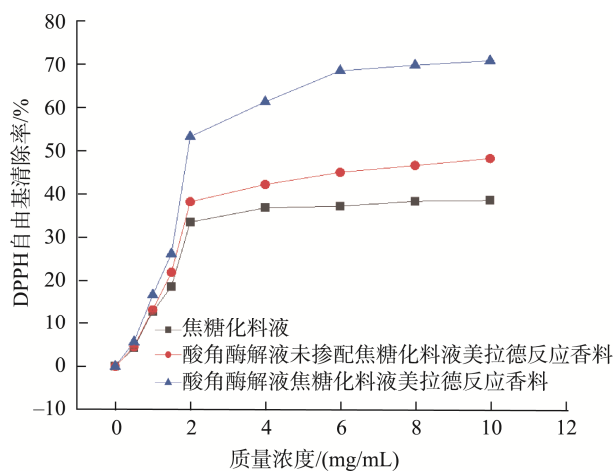


图 8 两种酸角美拉德反应香料清除 DPPH 自由基测定结果
Fig.8 DPPH scavenging assay results of two kinds of acid horn Maillard spices

3 结论

选择纤维素酶、果胶酶、木瓜蛋白酶比例为 1:1:1 ($m:m:m$)作为复合酶制剂, 采用单因素实验法对酸角浸提液的酶解时间、温度和酶的用量进行优化。所得酸角酶解液与焦糖化料液掺配进行美拉德反应, 采用单因素及响应面实验优化反应时间、反应温度、反应最初 pH、料液比, 得到制备酸角酶解液焦糖化美拉德香料的最优制备工艺。随后采用 HS-SPME-GC-MS 分析香料挥发性成分, 对香料抗氧化活性进行测定, 结果如下:

(1)酸角水提液复合酶处理的最优工艺条件为: 酶解时间 4.0 h、酶解温度 45 °C、复合酶添加量为酸角添加量的 0.5%。

(2)酸角酶解液与焦糖化料液掺配进行美拉德反应制备香料的最优工艺条件为: 反应温度为 120 °C, 反应时间为 80 min, 初始 pH 为 8.0, 酸角酶解液与焦糖化料液比例为 5:1 ($m:l$)。在此条件下, 香料实际感官评分平均为 86.8 分。

(3)挥发性物质检测到两种香料共检测出 88 个挥发性物质, 其中酸角酶解液美拉德反应香料共检测 59 个, 酸角

酶解液焦糖化美拉德香料检测到 68 个, 酸角酶解液焦糖化美拉德香料焦甜香、烤甜香、膏香突出。

(4) 酸角酶解液焦糖化美拉德反应香料具有清除 DPPH 自由基的活性, 质量浓度为 10 mg/mL 时 DPPH 清除率为 70.8%, 明显优于酸角酶解液与焦糖化料液掺配未加热的样品, 表明酸角酶解液与焦糖化料液进行美拉德反应能够提高香料抗氧化性。

本研究探究了酸角酶解液结合焦糖化料液进行美拉德反应的最优工艺, 确定了酸角焦糖化料液美拉德反应香料的香气成分及抗氧化活性。对提高酸角经济附加值、拓展酸角的应用范围, 进而促进我国酸角加工产业的发展壮大具有一定意义。

参考文献

- [1] 王丹, 况丹妮, 刘若阳, 等. 焦糖化与美拉德反应中 DDMP、HMF 及糠醛的生成研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 100–107.
WANG D, KUANG DN, LIU RY, *et al.* Investigation of DDMP, HMF, and furfural formation in caramelization and Maillard reactions [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(12): 100–107.
- [2] 史文慧. 氨法焦糖色素品质优化与 4-甲基咪唑含量控制的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
SHI WH. Study on quality optimization of ammonia caramel color and control of 4-methylimidazole content [D]. Journal of South China University of Technology, 2012.
- [3] 朱远洋, 郭鹏, 郑美玲, 等. 焦糖化香料的制备及其在卷烟中的应用研究[J]. 化学试剂, 2020, 42(10): 1154–1159.
ZHU YY, GUO P, ZHENG ML, *et al.* Preparation of caramelized flavors and their application in cigarettes [J]. Chemical Reagents, 2020, 42(10): 1154–1159.
- [4] 王荣浩, 李林林, 陈栋, 等. 美拉德反应在烟草加工中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(3): 345–350, 356.
WANG RH, LI LL, CHEN D, *et al.* Research progress on application of Maillard reaction in tobacco production and processing [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(3): 345–350, 356.
- [5] 苏加坤, 赵琪, 李瑞丽, 等. 葡萄糖和丙氨酸的美拉德反应及其在烟草中的应用研究[J]. 化学试剂, 2019, 41(11): 1201–1205.
SU JK, ZHAO Q, LI RL, *et al.* Maillard reaction of glucose and application in tobacco [J]. Chemical Reagents, 2019, 41(11): 1201–1205.
- [6] 甘学文, 王光耀, 邓仕彬, 等. 美拉德反应中间体对卷烟评吸品质的影响及其风味受控形成研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(6): 46–52.
GAN XW, WANG GY, DENG SB, *et al.* Effects of Maillard reaction intermediates on smoking quality and study on controlled formation of flavor [J]. Food & Machinery, 2017, 33(6): 46–52.
- [7] 刘鑫, 熊国玺, 陈胜, 等. 烟用酸豆果实(酸角)浸膏的工艺改进、分析及应用[J]. 香料香精化妆品, 2010, 119(2): 13–16.
LIU X, XIONG GX, CHEN S, *et al.* The improvement of manufacture technology, analysis and application for *Tamarindus indica* Linn concrete used in cigarette [J]. Flavour Fragrance Cosmetics, 2010, 119(2): 13–16.
- [8] ZHU Y, ZHANG M, ZHANG L, *et al.* Preparation of enzymatic hydrolysate using edible fungi by-products of soup seasoning: Effect of different enzymes on enzymatic hydrolysis [J]. Food Bioscience, 2022, 1: 3785–3794.
- [9] 何爱华. 生物酶解天然奶油制备奶香精基料的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
HE AIH. Research on the preparation of milk flavor base by biological enzymatic hydrolysis of natural cream [D]. Wuxi: Journal of Jiangnan University, 2009.
- [10] 渠一聪. 不同糖对茶氨酸美拉德反应的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
QU YC. The influence of different sugars on the Maillard reaction with theanine [D]. Chongqing: Southwestern University, 2023.
- [11] 渠一聪, 张绍绒, 罗理勇, 等. 基于人工神经网络耦合遗传算法优化茶氨酸-葡萄糖美拉德反应的条件[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 183–192.
QU YC, ZHANG SR, LUO LY, *et al.* Optimization of theanine-glucose Maillard reaction conditions using artificial neural network coupled with genetic algorithm [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 183–192.
- [12] 许春平, 张弛, 薛云, 等. 红薯美拉德反应制备食用烤香香料的工艺优化[J]. 中国调味品, 2023, 48(3): 191–198.
XU CP, ZHANG C, XUE Y, *et al.* Optimization of process for the preparation of edible roasted flavor by Maillard reaction of sweet potato [J]. China Condiment, 2023, 48(3): 191–198.
- [13] 王艳丹, 余建琳, 宋子波, 等. 酸角营养成分的研究进展[J]. 中国果树, 2023(4): 16–23.
WANG YD, YU JL, SONG ZB, *et al.* Research progress on nutritional components of acidic horn [J]. China Fruits, 2023(4): 16–23.
- [14] 白冰, 何静, 杨静, 等. 美拉德反应中间体 2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4(H)吡喃-4-酮的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(5): 326–333.
BAI B, HE J, YANG J, *et al.* Advances in the research of Maillard intermediate 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-4H-pyran-4-one [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(5): 326–333.
- [15] ZHOU ZL, XU ZQ, SHU JS, *et al.* Influence of various factors on formation of 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-4(H)-pyran-4-one in a solid-state model system of Maillard reaction [J]. European Food Research & Technology, 2014, 239(1): 31–40.
- [16] 戚向阳, 陈维军. 酸角解暑饮料的研制[J]. 农牧产品开发, 1997(2): 15–16.
QI XY, CHEN WJ, *et al.* The development of Sour horn heat-relieving drink [J]. China Dairy, 1997(2): 15–16.
- [17] 吴明美, 李仙, 郑琳, 等. 微生物发酵制备烟用酸角浸膏的研究[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(7): 180–183.
WU MM, LI X, ZHENG L, *et al.* Study on microbial fermentation for the preparation of Sour horn extract for tobacco [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(7): 180–183.
- [18] 芦昶彤, 杨雯静, 冯颖杰, 等. 加热温度对红薯焦甜香原料中挥发性成分的影响[J]. 香料香精化妆品, 2024, 203(2): 133–141.
LU CT, YANG WJ, FENG YJ, *et al.* Effect of heating temperature on volatile components of sweet potato caramel flavor [J]. Flavour Fragrance Cosmetics, 2024, 203(2): 133–141.
- [19] 张美. 刺参性腺酶解物及其美拉德反应产物风味和抗氧化活性研

- 究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- ZHANG M. Study on the flavor and antioxidant activity of *Glandal hydrolysate* and its Maillard reaction products [D]. Shanghai: Journal of Shanghai Ocean University, 2023.
- [20] LUND MN, RAY CA. Control of Maillard actions in foods: Strategies and chemical mechanisms [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2017, 65(23): 4537–4552.
- [21] 郝辉, 王宣静, 高明奇, 等. 罗汉果美拉德反应制备食用香料的工艺优化[J]. *中国调味品*, 2022, 47(12): 181–185.
- HAO H, WANG XJ, GAO MQ, *et al.* Optimization of the preparation process of edible spice by Maillard reaction of *Siraitia grosvenorii* [J]. *China Condiment*, 2022, 47(12): 181–185.
- [22] 罗娇依, 曹晨阳, 孙姗姗, 等. 热加工食品中晚期糖基化终产物及其检测技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(24): 77–85.
- LUO JY, CAO CY, SUN SS, *et al.* Research progress on advanced glycosylation end products and detection method in thermal processed foods [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(24): 77–85.
- [23] 于珍, 布冠好, 王美月, 等. 花生肽的制备及其美拉德反应产物风味特性研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(14): 4665–4673.
- YU Z, BU GH, WANG MY, *et al.* Preparation of *Peanut peptides* and flavor properties of its Maillard reaction products [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(14): 4665–4673.
- [24] NURSTEN HE. The Maillard reaction: Chemistry, biochemistry and implications [Z]. 2005.
- [25] VAN BM. Formation of flavour compounds in the Maillard reaction [J]. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 2006, 24(2): 230–233.
- [26] ZHOU QQ, LIU ZY, WU T Y, *et al.* Furfural from pyrolysis of agroforestry waste: Critical factors for utilisation of C5 and C6 sugars [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2023, 176: 113194.
- [27] 刘美娇, 黎铸毅, 陈秋翰, 等. 酶解-美拉德反应制备金鲳鱼调味基料的工艺研究及风味分析[J]. *中国调味品*, 2024, 49(6): 83–90, 118.
- LIU MJ, LI ZT, CHEN QH, *et al.* Study on preparation process of seasoning basic material of *Trachinotus ovatus* by enzymatic hydrolysis-Maillard reaction and flavor analysis [J]. *China Condiment*, 2024, 49(6): 83–90, 118.
- [28] 瓮亚楠, 马晓蕊, 陈涛, 等. 基于气相色谱质谱和气相离子迁移色谱对谷氨酸-葡萄糖美拉德反应体系中挥发性风味物质分析[J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(2): 320–330.
- WENG YF, MA XR, CHEN T, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds in glutamic acid-glucose Maillard reaction system based on gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(2): 320–330.
- [29] 苑彬, 金慧, 骈琳, 等. 美拉德反应对食品品质与安全的影响及其产物检测研究进展[J]. *轻工学报*, 2024, 39(2): 60–68.
- YUAN B, JIN H, PIN L, *et al.* Study on the preparation and flavoring effect of cigarette flavor from black tea dust based on Maillard reaction [J]. *Journal of Light Industry*, 2024, 39(2): 60–68.
- [30] 李瑞丽, 徐达, 赵琪, 等. 美拉德反应产物对主流烟气碱性香味成分的影响研究[J]. *化学试剂*, 2021, 43(2): 220–224.
- LI RL, XU D, ZHAO Q, *et al.* Effect of Maillard reaction products on alkaline aroma components of mainstream smoke [J]. *Chemical Reagents*, 2021, 43(2): 220–224.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)