

5-羟甲基糠醛与氨基酸反应形成的风味物质

An investigation on flavors formation between the reaction
of 5-hydroxymethylfurfural and amino acid

王 歌 曾 睿 邱瑞霞 黄才欢 郑 洁
WANG Ge ZENG Rui QIU Rui-xia HUANG Cai-huan ZHENG Jie

(暨南大学食品科学与工程系, 广东 广州 510000)

(Department of Food Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510000, China)

摘要:将 5-羟甲基糠醛(HMF)分别与丝氨酸、苏氨酸、 γ -氨基丁酸、丙氨酸反应,采用 GC-MS 共检测出 21 种挥发性成分,主要为羰基化合物、酮类、呋喃类和烃类化合物。在 HMF-丝氨酸反应体系中,吡嗪、5-甲基-2-呋喃甲醛和壬醛在高底物浓度和长反应时间下生成量最高;而在 HMF-苏氨酸反应体系中,苯乙酮、3-甲基-吡嗪与 2,5-二甲基-吡嗪的生成量随反应时间延长而显著增加,反应物浓度对其没有显著影响;在 HMF-氨基丁酸体系中,癸醛的生成量随着反应时间的延长而增多,反应物浓度要在长时间反应条件下才会有显著性差异;在 HMF-丙氨酸反应体系中,壬醛和癸醛的生成量随反应时间延长而增多,但在相同反应时间下,却随浓度增加而减少。

关键词:5-羟甲基糠醛;美拉德反应;氨基酸;固相微萃取;挥发性成分

Abstract: The reaction of 5-hydroxymethylfurfural (HMF) with serine, threonine, gamma-aminobutyric acid and alanine, and the relative volatile substances were determined by Gas Chromatography-Mass Spectrometer (GC-MS). The results showed that 21 volatile components in total were detected from the reaction system of HMF and these amino acids, most of which were carbonyl compounds, furans and hydrocarbon compounds. In HMF-Serine system, the concentrations of pyrazine, 5-methyl-2-furaldehyde and nonanal were the highest in the reaction system with the highest contents of the reactants and the longest reaction time. In HMF-Threonine system, the production of acetophenone, 3-methyl-pyrazine and 2, 5-dimethyl-pyrazine was positively influenced by the reaction time. However, the reactants concentration had no significant effect on their produc-

tion. In the HMF-aminobutyric acid system, the production of decanal increased as the reaction time prolonged, and the reactant concentration has significant effect under long-time reaction condition. In HMF-Alanine system, the production of nonanal and decanal increased as the reaction time prolonged, while decreased as the initial reactant concentration increased.

Keywords: 5-hydroxymethylfurfural; Maillard reaction; amino acid; solid-phase microextraction; volatile components

5-羟甲基糠醛又称羟甲基糠醛(HMF),是一种呋喃类化合物。纯品是暗黄色液体或粉末,具有吸湿性,易液化。HMF 具有活泼的 α, β -不饱和羰基结构,化学性质非常活泼,可发生氧化还原、脂化、聚合、水解等多种反应。HMF 普遍存在于热加工食品中,它以己糖为前体物质,主要通过美拉德反应和焦糖化反应产生^[1]。此外还可通过 2 条途径产生 HMF:① 葡萄糖、蔗糖、果糖等在高温下直接裂解产生,其中果糖呋喃阳离子是 HMF 重要的前体物质;② 二羰基化合物如丙酮醛和甘油醛等发生羟醛缩合产生 HMF^[2]。由于 HMF 在动物和人体内可能转化为致癌物质羟甲基糠酸磺酸盐,所以 HMF 被认为是一种食品内源污染物。HMF 含有羰基,可与氨基发生美拉德反应,Gokmen 等^[3]、Zhao 等^[4]都研究证明 HMF 与氨基酸可发生美拉德反应。美拉德反应是食品风味的主要贡献者,HMF 是美拉德反应中的中间产物,所以推测 HMF 与氨基酸可能会产生风味物质,但目前有关食品中 HMF 的研究主要集中在 HMF 的危害及控制等方面^[5],缺少 HMF 对风味物质影响的研究。

本研究拟将氨基酸与 HMF 反应,利用顶空固相微萃取法提取并用 GC-MS 鉴定反应体系中的挥发性成分,以此研究 HMF 对食品风味的贡献。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

L-丝氨酸(Ser)、L-苏氨酸(Thr)、L-丙氨酸(Ala)、 γ -氨

基金项目:国家自然科学基金(编号:31701607,31671957)

作者简介:王歌,女,暨南大学在读硕士研究生。

通信作者:郑洁(1981—),女,暨南大学副研究员,博士。

E-mail: zhengjie1317@163.com

收稿日期:2018-04-01

基丁酸(Gaba)、5-羟甲基糠醛(HMF):分析纯,百灵威科技有限公司;

磷酸氢二钠、磷酸二氢钠:分析纯,上海迈瑞尔化学技术有限公司。

1.2 仪器与设备

气质联用仪:7890/5975型,美国安捷伦公司;
毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm):DB-1MS型,美国安捷伦公司;
SPME萃取头:75 μm CAR/PDMS型,美国 Supelco公司;
旋转蒸发仪:EYELA型,上海爱朗仪器有限公司;
集热式磁力加热搅拌器:DF-101S型,巩义市予华仪器有限责任公司。

1.3 方法

1.3.1 HMF与氨基酸反应体系的建立 根据杨忠全等^[6-8]的方法,修改如下:将L-丝氨酸、L-苏氨酸、L-丙氨酸、γ-氨基丁酸和HMF分别用pH 7的磷酸缓冲液(PBS)溶解,配成含氨基酸250 mmol/L,HMF 2.5 mmol/L的混合液4 mL,置于20 mL的不锈钢管中。旋紧不锈钢管盖(带有聚四氟乙烯垫片),放置于带有磁力搅拌装置的油浴锅中(搅拌速度为300 r/min),在160 ℃下反应15 min,反应结束后将试管迅速放入冰水浴中冷却。

1.3.2 反应物浓度与反应时间对特征风味物质产生的影响 设置2个不同浓度HMF和氨基酸的反应体系,分别是:HMF 2.5 mmol/L+氨基酸250 mmol/L;HMF 5.0 mmol/L+氨基酸500 mmol/L。在160 ℃下分别反应8,15 min,研究反应物浓度和反应时间对风味物质形成的影响。

1.3.3 反应体系的pH值和褐变的测定 用pH计测定反应前后体系的pH变化;用紫外分光光度计,在420 nm下测定反应体系的吸光度(OD值)以判断褐变程度。

1.3.4 挥发性物质的提取与测定 将反应物用PBS定容到5 mL,加入1 g氯化钠,置于15 mL的顶空固相微萃取玻璃瓶中^[9-10],用带有尼龙材质垫片的瓶盖将玻璃瓶迅速密封。将玻璃瓶置于带有磁力搅拌的恒温水浴锅中,80 ℃下平衡60 min,然后迅速将顶空固相微萃取CAR/PDMS萃取头插入密封的小瓶中,并将萃取头的纤维悬在样品的顶空并保持30 min^[11-12]。萃取后将萃取头立即插入气质联用仪的进样口,在250 ℃下维持15 min,释放被吸附的挥发性物质。GC-MS分析条件:电离能量70 eV,离子源温度230 ℃,扫描时间3.89 s,氮气流速0.8 mL/min,质谱扫描范围30~400。柱温箱的升温步骤为:初始温度45 ℃,保持5 min,以6 ℃/min升温到90 ℃,以10 ℃/min升温到220 ℃,维持10 min。通过NIST08.L谱库检索比对结果,对物质进行定性,选择匹配度80%以上的物质分析,利用峰面积比较物质的相对含量。

1.3.5 数据处理与分析 利用SPSS 13.0软件处理GC峰面积数据,用平均值和标准偏差表示结果。使用Duncan检验分析显著性,显著性水平为P=0.05,每个试验平行测定3次。

2 结果与分析

2.1 反应前后体系的pH与褐变程度的变化

由表1可知,在4个HMF-氨基酸反应体系中,反应后pH都略有降低,但没有显著性差异(P>0.05)。与文献[13]的结论一致。4种氨基酸与HMF发生反应前均没有吸光度值,发生反应后都产生了不同程度的褐变(OD₄₂₀值),与反应前相比具有显著性差异(P<0.05),说明HMF与氨基酸发生了美拉德反应,但不同HMF-氨基酸体系间无显著性差异(P>0.05)。

表1 HMF-氨基酸体系pH与褐变程度的变化[†]
Table 1 Changes in pH and browning in HMF-Amino acid reaction systems

反应体系	反应前 pH	反应后 pH	OD ₄₂₀ 值(反应后)
HMF-Ser	7.34±0.06	7.23±0.12	0.553±0.075 ^a
HMF-Thr	7.24±0.16	7.16±0.26	0.472±0.090 ^a
HMF-Gaba	7.15±0.05	7.08±0.02	0.567±0.114 ^a
HMF-Ala	7.36±0.44	7.26±0.50	0.525±0.035 ^a

† 不同字母代表不同体系间差异显著(P<0.05)。

2.2 HMF对美拉德挥发性成分的影响

将HMF与4种氨基酸反应(2.5 mmol/L HMF+250 mmol/L 氨基酸,160 ℃,15 min),结果与NIST08.L谱库比对,HMF-氨基酸反应体系中生成的挥发性物质见表2。在4个反应体系中共鉴定出挥发性成分21种,大多是羰基化合物,包括醛类8种、酮类3种、吡嗪类4种、烃类3种。烃类物质的芳香阈值较高,对食品的风味贡献不大;醛类和酮类具有绿色植物的香味,在很多美拉德反应中均有检出,对食品风味有贡献作用;吡嗪类物质是许多热加工食品中的重要挥发性成分,具有浓厚的肉香味,是一类特征性风味物质^[14]。

在HMF-Ser体系中检测出5种挥发性物质,5-甲基-2-呋喃甲醛、壬醛、吡嗪是该体系的特征风味物质。在HMF-Thr体系中检测出10种挥发性物质,特征风味物质是苯乙酮、3-甲基-吡嗪与2,5-二甲基-吡嗪。在HMF-Gaba体系中检测出5种挥发性物质,特征风味物质是癸醛。在HMF-Ala体系中检测出7种挥发性物质,特征风味物质是壬醛、癸醛。

在4种氨基酸中,苏氨酸对风味贡献较大。HMF-Thr反应体系产生了3种吡嗪类化合物,其中2,5-二甲基-吡嗪、3-甲基-吡嗪的峰面积很大,是HMF-Ser体系产生的吡嗪峰面积的16倍。吡嗪是美拉德反应产生的主要挥发性物质,在非硫氨基酸参与体系中较多,在加热牛肉的渗出物中甚至达到50%^[15]。吡嗪类物质具有坚果、烧烤等气味,是一种重要的呈香物质,对食品风味具有较大贡献^[16-17]。此外,吡嗪类物质常用作医药、香精香料中间体^[18]。HMF-Thr反应体系产生的苯乙酮具有香豆素和扁桃的气味,有甜香尖刺气息,苦芬芳的风味,在食品中常做香料,主要用于配制樱桃、葡萄等多种水果和烟草的香精,对食品风味具有积极的贡

表 2 HMF+氨基酸反应体系中的挥发性成分[†]

Table 2 Volatile components produced in HMF-Amino acid reaction systems

挥发性物质	GC 峰面积(×10 ⁵)			
	HMF-Ser	HMF-Thr	HMF-Gaba	HMF-Ala
吡嗪	33.92±4.57	—	—	—
5-甲基-2-呋喃甲醛	100.26±4.05 ^a	14.83±4.02 ^b	—	—
壬醛	145.53±3.95 ^a	63.64±4.88 ^b	—	20.98±4.09 ^c
苯乙酮	26.87±3.90 ^b	585.42±3.65 ^a	—	—
癸烷	34.07±4.84	—	—	—
苯甲醛	—	—	1.16±0.54	—
己醛	—	117.07±2.65	—	—
(<i>E</i>)-2-甲基-2-丁烯醛	—	12.03±5.62	—	—
2,5-二甲基-吡嗪	—	538.61±4.01	—	—
2-乙基-6-甲基-吡嗪	—	43.83±4.73	—	—
3-甲基-吡嗪	—	538.67±4.24	—	—
癸醛	—	129.20±9.36 ^a	4.82±2.38 ^c	16.87±3.32 ^b
2,4-双(1,1-二甲基乙基)-苯酚	—	195.99±8.68	—	—
正十四烷	—	—	4.84±3.47	—
正癸烯	—	—	13.49±10.96	—
2-癸酮	—	—	1.29±0.52	—
环癸烷	—	—	—	1.02±0.53
2,4-二叔丁基苯酚	—	—	—	0.96±0.48
辛醛	—	—	—	2.15±0.97
十一醛	—	—	—	1.61±0.29
香叶基丙酮	—	—	—	3.37±3.67

[†] “—”表示未检出;不同字母代表不同体系间差异显著(P<0.05)。

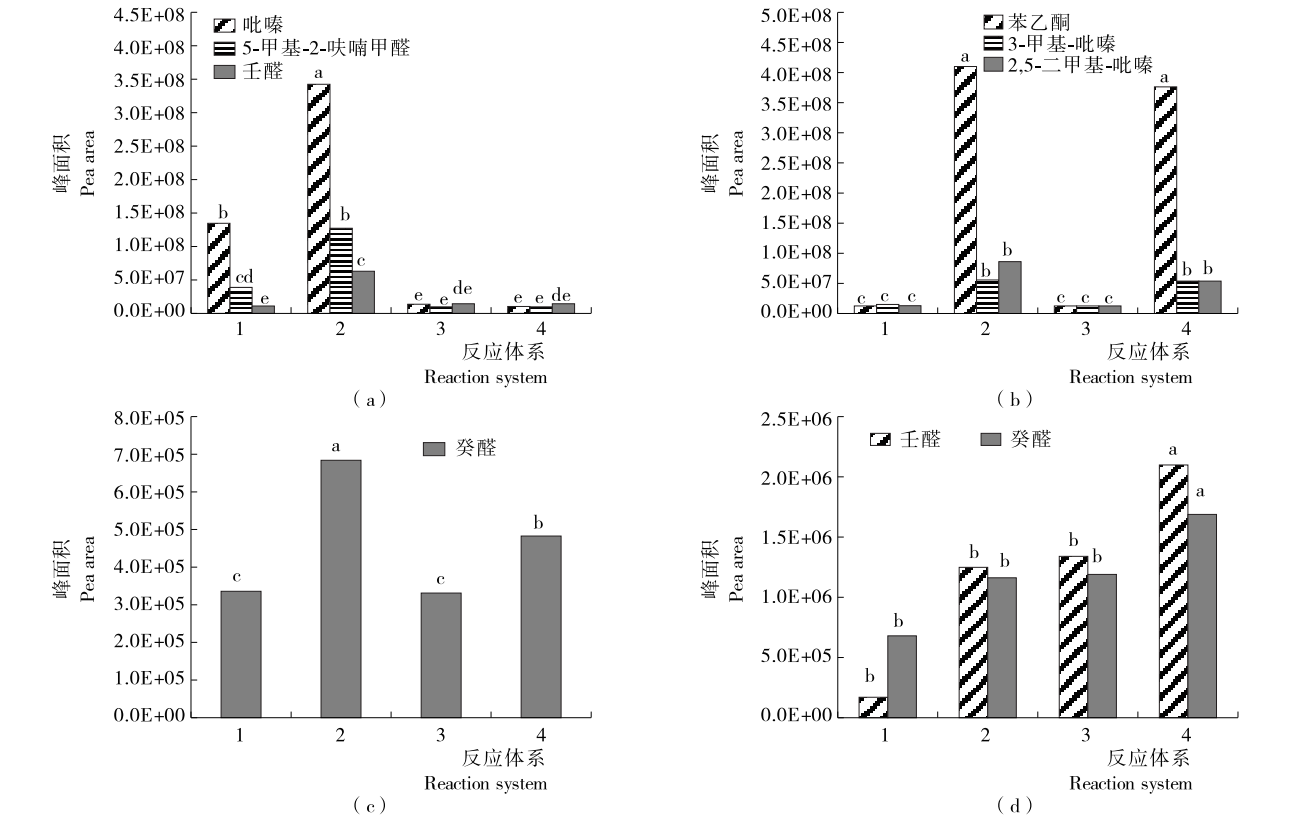
献^[19]。HMF-Thr 反应体系还产生了 5 种醛类物质,其中癸醛稀释时有甜橙和橘子香气,并带有油脂气息,壬醛具玫瑰、柑橘等香气和强的油脂香气。这些醛类物质是焙烤食品的特征性风味物质^[20],对食品风味均有积极贡献。

HMF-Gaba 体系和 HMF-Ala 体系相比于其他 2 种氨基酸体系,检测出的挥发性物质含量较低,可能与不同氨基酸的结构有关。虽然 HMF-Ala 体系检测出的挥发性物质含量较低,但产生了香叶基丙酮。香叶基丙酮具有清香,果香,并且有淡雅清新的玫瑰香味。在自然界中存在于茶叶、薄荷、茴香等物质中^[21],该物质广泛用于香精香料等工业。

2.3 反应物浓度与反应时间对特征性风味物质产生的影响

图 1 是 HMF-氨基酸体系在不同反应物浓度和不同反应时间下的特征性风味物质的峰面积柱状图。在 HMF-Ser 体系中反应物浓度对风味物质形成量影响很大。由图 1(a)可看出,在不同反应时间(8,15 min)下,高浓度(5 mmol/L HMF+500 mmol/L Ser)体系的吡嗪和 5-甲基-2-呋喃甲醛生成量均显著高于低浓度体系的。但是壬醛只有在长时间(15 min)反应条件下生成量才随浓度增大而增高。此外,试验还发现反应时间对这 3 种特征风味物质的影响只在高浓度体系下较显著,在低浓度体系中,不同反应时间下它们的生成量没有显著性差异。反应 15 min 时,高浓度体系中吡嗪、5-甲基-2-呋喃甲醛和癸醛的含量分别是低浓度体系的

100,10,5 倍。说明在 HMF-Ser 体系中吡嗪、5-甲基-2-呋喃甲醛和壬醛的产生对氨基酸、HMF 浓度以及加工时间均有要求。图 1(b)是 HMF-Thr 体系在不同反应物浓度和不同反应时间下的特征性风味物质的峰面积柱状图。由图 1(b)可以得出,在 2 个底物浓度下,反应 15 min 比反应 8 min 产生的苯乙酮、3-甲基-吡嗪、2,5-二甲基-吡嗪的量均显著增多。而反应物浓度的变化对 3 种特征性风味物质的影响较小,高浓度下产生的苯乙酮、3-甲基-吡嗪、2,5-二甲基-吡嗪含量仅是低浓度下的 1.2~1.5 倍。说明在 HMF-Thr 体系中反应时间是影响苯乙酮与 3-甲基-吡嗪生成的唯一因素。在对富含苏氨酸的食品加工时,通过改变加热时间,可以调整食品的风味与口感。图 1(c)是 HMF-Gaba 体系在不同反应物浓度和不同反应时间下的特征性风味物质的峰面积柱状图。由图 1(c)可以看出,在相同反应物浓度下,癸醛的生成量随着反应时间的延长而增多。反应 15 min 时,癸醛的生成量随着浓度的增加而增多,而反应 8 min 时,浓度对于癸醛的生成量没有显著性影响。说明反应物浓度和反应时间对癸醛的生成量均有影响,但是反应物浓度要在长时间反应条件下才会有显著性影响。图 1(d)是 HMF-Ala 体系在不同反应物浓度和不同反应时间下的特征性风味物质的峰面积柱状图。由图 1(d)可知,壬醛、癸醛生成量随反应时间的延长而增多,但在相同反应时间下,壬醛、癸醛生成量随浓



不同字母表示不同反应体系间差异显著(P<0.05);1 为 5 mmol/L HMF+500 mmol/L Ser(a)/Thr(b)/Gaba(c)/Ala(d), 8 min;2 为 5 mmol/L HMF+500 mmol/L Ser(a)/Thr(b)/Gaba(c)/Ala(d), 15 min;3 为 2.5 mmol/L HMF+250 mmol/L Ser(a)/Thr(b)/Gaba(c)/Ala(d), 8 min; 4 为 2.5 mmol/L HMF+250 mmol/L Ser(a)/Thr(b)/Gaba(c)/Ala(d), 15 min

图 1 反应物浓度与反应时间对 HMF-氨基酸体系特征性风味物质产生的影响
Figure 1 Effect of reactant concentration and reaction time on the production of flavors in HMF-Amino acid reaction systems

度增加而减少。通过与 HMF-Ser 体系、HMF-Gaba 体系对比,3 个体系中壬醛、癸醛的生成量呈现不同变化趋势。据此推测反应物浓度和反应时间对壬醛、癸醛生成量的影响可能与参与反应的氨基酸类型及结构关系密切。

3 结论

HMF 可与 4 种氨基酸发生美拉德反应产生挥发性物质,其中吡嗪、3-甲基-吡嗪、苯乙酮、壬醛、癸醛、香叶基丙酮等物质已被证明是美拉德反应体系产生的风味物质,对食品风味均有积极作用。同时,氨基酸与 HMF 的浓度和反应时间对各反应体系中特征性风味物质的生成量有较大影响。本研究用峰面积定量挥发性物质,后续的研究可以采用内标法处理,以便更精准地分析挥发性物质。

参考文献

[1] JENNIFER M. Browning:Nonenzymatic browning[J]. Encyclopedia of Food Science & Nutrition, 2003, 33(3): 665-672.

[2] CAPUANO E, FOGLIANO V. Acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural (HMF): A review on metabolism, toxicity, occurrence in food and mitigation strategies[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(4): 793-810.

[3] HAMZALIOGLU A, GOKMEN V. Investigation and kinetic evalu-

ation of the reactions of hydroxymethylfurfural with amino and thiol groups of amino acids[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 354-360.

[4] ZHAO Qian-zhu, ZOU Yue-yu, HUANG Cai-huan, et al. Formation of a hydroxymethylfurfural-cysteine adduct and its absorption and cytotoxicity in Caco-2 cells[J]. J Agric Food Chem, 2017, 65(45): 9 903-9 909.

[5] FALLICO B, ZAPPALÀ M, ARENA E. Effects of conditioning on HMF content in unifloral honeys[J]. Food Chemistry, 2004, 85(2): 305-313.

[6] 杨志全, 阚建全, 陈光静, 等. 新鲜薏仁米与异味薏仁米挥发性成分对比分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 35-39.

[7] 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.

[8] ELMORE J S, KOUTSIDIS G, DODSON A T. The effect of cooking on acrylamide and its precursors in potato, wheat and rye[J]. Advances in Experimental Medicine & Biology, 2005, 561(1): 255-269.

[9] ZOU Yue-yu, PEI Ke-han, PENG Xi-chun, et al. Possible adducts formed between hydroxymethylfurfural and selected amino acids, and their release in simulated gastric model[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2016, 51(4): 1 002-1 009.

数。在结构设计方面,通过 SolidWorks 软件对样机进行三维建模并且对整体结构进行运动学仿真分析,加快设备的设计与开发。

(2) 样机的实际车间试验表明:转速 $n=30\text{ r/min}$,滚筒直径 $D=100\text{ cm}$ 、倾斜角 $\theta=5^\circ$ 以及长度 $L=1\text{ m}$ 为最优选择,此条件下滚筒式自动分选机能够有效地完成不同大小水果的分选任务且分选效率不低于 97%,自动贴标签机也能够实现贴标签的无人化、精准化,准确率达 98.7%,整机工作性能稳定。

(3) 该设计思路为小型农户自种圆形水果的分选和贴标签提供了创新技术,同时也可以应用到其他圆形物品分选和贴标签机器的研发设计中,有利于加快自动化食品包装的国产化进程。

参考文献

[1] 屈能胜. 我国食品包装机械发展综述[J]. 轻工机械, 2005, 23(2): 1-3.

[2] 彭宝良, 胡志超, 吕小莲, 等. 我国农产品加工装备产业概况与发展[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(1): 12-16.

[3] 王新享. 电子称重式水果分选机微机测控系统的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003: 1-2.

[4] 梁海龙, 白峭峰, 梅小龙, 等. 圆形水果无损检测输送翻转装置设计[J]. 机械研究与应用, 2012(5): 118-120.

[5] 邓良平. 水果产后商品化处理设备现状与发展方向[J]. 粮油加工: 电子版, 2000(6): 7-8.

[6] 高锐, 章海亮. 水果自动分选设备的研究现状[J]. 农业机械, 2004(3): 41-41.

[7] 徐力群, 陈旭, 姬中林, 等. 基于 Inventor 的重心变换式水果大小分选机设计[J]. 科学家, 2017(15): 5-6.

[8] 白东升, 李康. 基于计算机视觉的高速机器人芒果分选系统设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 231-233.

[9] 张丽芬. 基于计算机视觉技术的樱桃自动分选系统设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(9): 212-214.

[10] 万宏强, 张晓, 吴万欣, 等. 基于 SolidWorks 的苹果大小分选机三维设计[J]. 林业机械与木工设备, 2016, 44(4): 33-36.

[11] LEEMANS V, DESTAIN M. A real-time grading method of apples based on features extracted from defects[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(1): 83-89.

[12] 刘静, 黄声德, 张义猛, 等. 基于慧鱼模型的水果包装系统设计与搭建[J]. 包装工程, 2018(5): 136-140.

[13] 刘瑞歌, 宋锋, 刘雪涛. 全自动水果包装机的设计[J]. 机电工程技术, 2017, 46(9): 79-81.

[14] 刘利东. 几种新型联轴器简介[J]. 林业机械与木工设备, 2003, 31(3): 31-32.

[15] 张江立. 继电器的简介[J]. 科技创新导报, 2013(2): 80.

[16] 栾东海. 某步进电机应用系统设计及其快速重复启停特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 1-2.

[17] 王新良. 硅橡胶与聚丙烯材料粘接用底涂剂制备及性能研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2015: 1-2.

[18] 盛金良, 高君. 垃圾滚筒筛参数设计[J]. 建筑机械化, 2004, 25(3): 62-63.

[19] 姜学东, 庄振春. 介电种子分选机分选滚筒设计分析[J]. 青岛农业大学学报: 自然科学版, 2006, 23(2): 126-128.

[20] 蔡玉良, 杨学权, 丁晓龙, 等. 滚筒筛内物料运动过程的分析[J]. 水泥工程, 2010(2): 5-8.

[21] 宁朝阳, 皮智谋, 任成高, 等. SolidWorks 软件在机械设计中的应用[J]. 现代机械, 2007(2): 43-44.

[22] 苑玉凤. 多指标正交试验分析[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2005, 19(4): 53-56.

(上接第 4 页)

[10] 姚胜文, 赵倩竹, 鲜傲霜, 等. 低聚糖阿魏酸酯对美拉德反应挥发性产物的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(3): 113-118.

[11] 向小乐, 余估, 杨万根, 等. 预处理方式对古丈毛尖茶香气成分的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 232-236.

[12] LIN Lian-zhu, ZHUANG Ming-zhu, LEI Fen-fen, et al. GC/MS analysis of volatiles obtained by headspace solid-phase microextraction and simultaneous-distillation extraction from Rabbiosia serra (MAXIM.) HARA leaf and stem[J]. Food Chemistry, 2013, 136(2): 555.

[13] YAN Liu-jun, ZHANG Yan-fang, TAO Wen-yi, et al. Rapid determination of volatile flavor components in soy sauce using head space solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2008, 26(3): 285-291.

[14] 何保江, 李成刚, 刘珊, 等. 反应条件对葡萄糖/苯丙氨酸和葡萄糖/丙氨酸 Maillard 模型体系挥发性产物的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(23): 143-149.

[15] 方杰, 冯小敏, 王维民, 等. 对虾头酶解液 Maillard 反应中挥发性成分变化及影响因素[J]. 食品与机械, 2011, 27(5): 39-43.

[16] 甘学文, 王光耀, 邓仕彬, 等. 外源美拉德反应中间体在卷烟加工中的含量变化及致香效果[J]. 食品与机械, 2017, 33(5): 77-82.

[17] ADAMS A, KIMPE N D. Formation of pyrazines from ascorbic acid and amino acids under dry-roasting conditions[J]. Food Chemistry, 2009, 115(4): 1 417-1 423.

[18] 周永妍, 李亚, 余爱农. 顶空固相微萃取法萃取 Maillard 反应体系中吡嗪类化合物的条件优化[J]. 食品科学, 2015, 36(6): 119-123.

[19] 朱丽芳. Mucor sp.转化肉桂酸生成苯乙酮和 1-苯乙醇及分析方法的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013: 10-11.

[20] MAJCHER M, JELEN HH. Comparison of suitability of SPME, SAFE and SDE methods for isolation of flavor compounds from extruded potato snacks[J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2009, 22(6): 606-612.

[21] 孙美环, 齐欣, 唐向阳, 等. 由月桂烯合成香叶基丙酮的研究[J]. 化学工业与工程, 2016, 33(1): 51-56.