

微波加热下食品美拉德反应研究进展

Research progress of Maillard reaction in food under microwave heating

许海侠^{1,2,3}程裕东^{1,2,3}金银哲^{1,2,3}XU Hai-xia^{1,2,3} CHENG Yu-dong^{1,2,3} JIN Yin-zhe^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学食品热加工工程中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学食品科学与工程国家级实验教学示范中心, 上海 201306)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. Engineering Research Center of Food Thermal-Processing Technology, Shanghai Ocean University,
Shanghai 201306, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science
and Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要:微波加热作为一种高效、节能、环保的新型加热方式,在工业上的应用越来越广泛。微波加热下美拉德反应的早期反应程度更高,中期产物组成不同、挥发性芳香物质更丰富,晚期化合物的抗氧化性等生理活性显著增强,微波加热对美拉德反应产物有显著影响。文章主要介绍了微波加热下美拉德反应的影响因素、产物分析方法、产物类型及其在食品中的应用和研究进展。

关键词:微波加热;美拉德反应;影响因素;分析方法;食品中应用

Abstract: As a new type of heating method with high efficiency, energy saving and environmental protection, microwave heating is more and more widely used in industry. The Maillard reaction under microwave heating has a higher degree of early reaction. The composition of the middle products is different, and the volatile aromatic substances are more abundant. The physiological activities such as the antioxidant activity of the late products are significantly enhanced. Microwave heating has a significant impact on Maillard reaction products. This paper mainly introduces the influencing factors, products analysis methods, products types and application in food and research progress of Maillard reaction under microwave heating.

Keywords: microwave heating; Maillard reaction; influencing factors; analytical methods; application in food

美拉德反应(Maillard Reaction, MR)是还原糖的羰

基与游离氨基酸、肽和蛋白质的胺基间的复杂反应,在食品贮藏和加工过程中自发且广泛地发生^[1],反应过程中形成的产物被称为美拉德反应产物(MRPs),包括芳香化合物、色素化合物、晚期糖基化终产物(AGEs)和类黑素。MRPs与食物的感官接受度、营养价值以及AGEs的产生紧密相关^[2],其在加工食品的香味和活性化合物的生成过程中起到重要作用^[3]。目前,游离氨基酸和羰基化合物间的反应模型已广泛研究,并且得出不同反应物(如游离氨基酸或肽)存在不同的反应机理^[4-5]。热处理是影响MR反应速率和调味特性的最重要因素之一^[6]。

微波加热是近几十年来应用在食品工业上的新型加热方法,被广泛应用于烹饪、焙烤和巴氏灭菌等工艺。微波加热本质上是微波辐射与极性分子和带电离子的相互作用,并导致食品基质内的分子摩擦和离子迁移^[7]。微波加热快速、均匀;对物料穿透力强,且穿透速度快;可控性强,微波辐射后快速加热,停止辐射后,加热停止;对食品的营养成分、活性成分、维生素和色泽等的损害较小^[8]。此外,微波作为“绿色食品加工”技术,还具有减少耗能、耗水并消除废水,促进环境保护等优点^[9]。而且微波技术易于实现连续化生产,便于控制,在现代食品工业中广泛应用。

MRPs制备的传统方法有水浴、油浴和高压锅等,与微波加热相比,其具有高耗时和高耗能等缺点。然而微波加热在制备MRPs的应用中研究较少,且多集中于其产物分析和生理活性应用方面,而对于机理研究及其他方面的应用还未涉及,亟待研究。因此,文章综述微波加热下MR的研究进展,旨在为其在食品工业中的大规模开发和利用提供参考。

基金项目:上海高校知识服务平台项目(编号:ZF1206)

作者简介:许海侠,女,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:金银哲(1977—),男,上海海洋大学副教授,博士。

E-mail: yzjin@shou.edu.cn

收稿日期:2020-03-06

1 美拉德反应机理与历程

MR 分为 3 个阶段:初始阶段,首先是糖胺缩合,然后是 Amadori 重排;中间阶段,包括糖脱水、碎裂以及氨基酸降解(Strecker 降解);最终阶段,包括醛醇缩合、醛胺缩合和杂环氮化合物的形成。中间阶段的化合物发生聚合反应,形成具有高分子量的棕色物质,称为类黑素,在食品加工过程中(如面包、饼干、肉)引起色泽变化。聚合反应有助于熟化和贮藏食品的硬化^[10]。

2 微波加热下美拉德反应的影响因素

影响 MR 的因素包括糖类和氨基酸的结构^[11-13]、反应温度和时间^[14-16]、pH 值^[17-18]、水分^[19]、金属离子^[20]、高压^[21]、加热方式^[22-24]等,前者主要影响 MRPs 类型,后者主要是影响 MR 反应动力学。而对于微波加热下 MR 的影响因素主要有以下几类。

2.1 反应物类型与浓度

MR 受反应物类型及其摩尔比的影响。低分子量化合物的反应性大于高分子量化合物,由于其空间位阻较低,容易反应。一般规律为醛糖>酮糖;五碳糖>六碳糖;单糖>双糖;碱性氨基酸>中性氨基酸>酸性氨基酸。陈艳云等^[25]研究了不同类型的氨基酸、糖和反应介质对微波处理下 MR 的影响,符合上述规律。赵丽琴等^[26]研究了微波加热下不同中性氨基酸与葡萄糖、果糖的 MR,不同的酸碱性条件也会影响氨基酸的反应速率。Liang 等^[27]发现,在微波加热下提高糖—赖氨酸初始摩尔比可显著提高吡咯素的生成量,反应活性为乳糖>果糖>葡萄糖>蔗糖。

2.2 温度和时间

高温和较长的反应时间会导致更高的糖化程度,伴随更高水平的高分子量的中间和褐色产物的形成,更多的电子和氢供体(如羟基和吡咯基团)与蛋白黑素结合形成,提高 MRPs 的抗氧化能力。Nasrollahzadeh 等^[16]发现微波加热下的产物具有比常规加热更高的 DPPH-自由基清除能力(DPPH-RS),由于微波加热下 MR 速率的提高,增加了抗氧化活性产物的含量。Mowlacifar 等^[28]用微波加热辅助方式获得了溶菌酶—麦芽糊精接枝物,微波加热时间增加,MR 程度加深。

2.3 微波功率

微波功率增加,MR 反应程度增加。谢欢^[29]发现蛋清蛋白与葡萄糖在不同的微波加热条件下发生 MR,随着微波功率的增加,产生的类黑素增加。且微波加热处理后 MRPs 的乳化性质、抗氧化性均增加。微波功率越高,加热时间越长,抗氧化能力越高。但长时间高功率下产生的羧甲基赖氨酸和丙烯酰胺等有害产物高于短时间低功率下产生的。所以适当提高微波功率对 MR 影响较为关键。

2.4 反应体系中的 pH 值

pH 值影响 MR 的多种反应途径,导致反应速率变化。pH>7 时会加速反应,pH<7 时会抑制反应。Yeo 等^[30]考察了微波加热下不同 pH 的 D-葡萄糖/L-半胱氨酸的模型,随着 pH 的增加,MRPs 褐变度增加,挥发性产物总量增加。

2.5 含水量

水作为反应媒介,其量与 MR 紧密相关。张开诚^[31]用葡萄糖和半胱氨酸在微波中反应,在无水的样品中没有色素形成,增加含水量(0%~40%),色素含量增加,当含水量为 14%时色素含量最大,之后随含水量的增加而减少,这是由于含水量过高引起反应物被稀释。当含水率为 11%时,风味物质含量最高,之后随含水量的增加而减少。因此在使用微波加热食品时,保证含水量 10%~15%为最佳,水分过高、过低均会减缓 MR 速率。

2.6 介电损耗

介电损耗是指将电磁能转变为热能的能力,影响食品对微波能量的吸收,从而影响 MR 程度。在微波加热下,增加反应体系的介电损耗对 MR 不同阶段的提升有促进作用。Zhang 等^[32]使用不同的反应溶剂(水、水与甘油)来验证微波加热下介电损耗对 MR 不同阶段的影响,发现增加介电损耗有助于促进微波加热下 MR 的进行。

2.7 反应介质和电解质的影响

反应介质和电解质对微波加热下的 MR 有重要作用。在微波加热下,反应液温度与介质沸点相关,高沸点介质能促进 MR,电解质的添加也能促进 MR 的进行,增加的离子增强了反应体系对微波辐射的吸收。不同浓度的不同电解质对 MR 影响不同,与离子的电荷、半径以及极化作用相关。在微波加热下的赖氨酸与葡萄糖美拉德体系中,同样浓度的不同介质对 MR 的促进效果为 $\text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaCl} > \text{KCl} > \text{CaCl}_2 > \text{Na}_2\text{SO}_4$ ^[31]。

3 微波加热下的美拉德反应产物分析方法

MRPs 的分离提纯方法有固相萃取、超滤、膜透析、超速离心、层析法、电泳等,最常用的是薄层层析色谱和超滤。由于 MRPs 含量少且极不稳定,先进的分析表征手段对 MRPs 的生成机理、成分分析起重要作用。目前常用的 MRPs 分析表征方法有紫外光谱法、体积排阻色谱、荧光光谱法、红外光谱法、流动注射分析法、核磁共振、放射性同位素标记、凝胶渗透色谱(GPC)、气相色谱—质谱(GC-MS)以及液相色谱—质谱联用法(LC-MS)、酶联免疫法等。

随着 GC-MS、LC-MS 和各种质谱等分析手段的运用及优化,关于 MRPs 的成分和性质的研究更加深入,但在微波加热下的 MR 研究还有待深入。有关微波加热下美

拉德反应产物的分析方法总结如表 1 所示。

因 MR 过程较复杂,产物类型较多,为了方便、高效地探究 MR 的反应程度,多检测不同阶段的特征产物。为了更全面地评判 MR 的益害,生理活性物质和有害物质的检测也成为主要关注点。微波加热下 MRPs 的特征物质与检测方法见表 2。

目前,关于 MR 研究的热点集中于 MRPs 的成分分析、控制其反应阶段的条件及毒理的病源性研究。综上,色谱与质谱联用法的样品处理简单,重现性高,适用于 MRPs 定性和定量分析。光谱法适用于 MR 的阶段性研究及产物结构分析。

4 微波加热下的美拉德反应产物

MRPs 一般具有香味,分为以下 4 类:① 含氮杂环化

合物,如吡嗪、吡喃、吡啶等;② 环状烯醇类化合物,如麦芽酚等;③ 多羰基化合物,如丙酮等;④ 单羰基化合物,如 Ssrecher 醛类。除以上挥发性香味物质外,还包括类黑素和其他抗氧化性物质。当延长加热时间或升高温度时,MRPs 的色度增加,碳氮比、不饱和度、化学芳香性也随之增加^[44]。

微波加热下 MR 不同阶段产物的含量和类型与传统加热相比也有所不同。杨立强^[45]发现随着温度的升高,加热时间的延长,所有 MR 的早期产物浓度升高。段邓乐^[33]研究表明,微波加热比水浴加热下的游离氨基减少更多,早期反应程度更高。Yeo 等^[30]分离分析微波辐射的 D-葡萄糖/L-半胱氨酸 MRPs 中的挥发性杂环化合物,发现随着 pH 的增加,产生的挥发物总量增加。肖桂明等^[46]发现微波加热下不同温度对赖氨酸与葡萄糖

表 1 微波加热下美拉德反应产物的分析方法

Table 1 Analytical method of Maillard reaction products under microwave heating

分类	方法	适用范围	参考文献
光谱法	红外光谱	用于检测蛋白质分子结构变化	[29]
	紫外光谱	可以反映蛋白质结构的变化;可用来检测美拉德反应速率,在 294 nm 处的吸光值代表中间产物的生成,在 420 nm 处的吸光值代表美拉德反应末期棕色聚合物的生成	[29,33—38]
	内源性荧光	荧光强度的改变可反映蛋白质结构的变化,包括表面疏水性、分子极性	[29,33—34,36,38]
	圆二色光谱	蛋白质区域(170~250 nm)中的光谱提供了关于蛋白质二级结构的信息	[16,34,38]
色谱法	气相色谱—质谱联用	挥发性物质的测量	[39]
	高效液相色谱	非挥发性物质的测量	[35,40]
	高效液相色谱—质谱联用	非挥发性物质的测量,多用于中间产物的测定	[41]
	凝胶电泳	样品分子量的变化	[16,29,33—34,36—38]
其他	扫描电镜	观察蛋白质及其接枝产物的微观结构	[34,38]
	电子鼻	用于风味物质的测量,包括硫化物、芳香类有机硫化物、含氮氧化物、烷烃类物质和醇类物质等	[42]
	酶联免疫法	用于羧甲基赖氨酸(CML)的检测	[43]
	碳标记示踪技术(同位素碳标记示踪技术)	可采用碳标记示踪技术研究葡萄糖参与反应过程,中间产物的产生和终产物的降解/消除路径	[41]

表 2 微波加热下美拉德反应产物的特征物质与检测方法

Table 2 Characteristic substances and detection methods of Maillard reaction products under microwave heating

特征物质	方法	适用范围	参考文献
游离氨基	紫外—可见分光光度计	检测美拉德反应初级阶段产物	[34]
羟甲基糠醛(HMF)	紫外—可见分光光度计	检测美拉德反应中间产物	[33,42]
羧甲基赖氨酸	HPLC-MS	检测美拉德反应后期产物	[33,41]
类黑精	紫外—可见分光光度计	检测美拉德反应末期产物	[33]
抗氧化活性物	DPPH 法、ABTS 清除率测定、亚铁离子螯合能力测定	检测美拉德反应产物的生理活性	[29,40]
有害物质	3-脱氧葡萄糖醛酮、丙酮醛、丙烯酰胺、5-甲基糠醛的检测	检测美拉德反应产物有害产物	[39]

MRPs 主要为具有烘烤香味的吡嗪类化合物。赵丽琴等^[26]研究了不同中性氨基酸与葡萄糖、果糖在微波加热下的 MR,发现在酸性条件下,丙氨酸、苏氨酸 MRPs 中吡嗪类化合物种类最多。刘红^[39]发现微波烘烤饼干中的挥发性成分多于传统烤箱焙烤。胡军等^[47]发现微波能加快 MR,两种加热方式下同样体系的最终产物成分类似,但含量不同。传统加热 MRPs 抗氧化性明显低于微波加热^[48]。刘志华等^[49]发现微波加热时间对抗氧化物含量作用不明显,但微波加热比油浴下 MRPs 抗氧化性更强。刘红^[39]分别在最优的传统焙烤与微波焙烤下测定有害物的生成量,发现微波焙烤下的生成量少于传统焙烤的。综上,微波加热下的美拉德反应挥发性特征香味物质与传统加热相似,但种类更丰富。

微波加热下的 MRPs 含量高于传统加热的,挥发性成分种类增加,各种生物活性增加,其产生的机理有待深入研究。而 MRPs 具有抗诱变^[50]、抗肿瘤^[51]、抗增殖^[52]、降血压^[53]等作用,对防治疾病、提升人类健康有重要意义。

5 微波加热下的美拉德反应在食品中的应用

5.1 增强食品风味和色泽

微波加热下的 MR 时间短且易制得,可在短时间内产生大量棕色物质,且产生的挥发性成分较多,可应用于增强食品色香味。张开诚^[31]利用 MR 原理增强微波食品风味的方法,制备了食品褐变剂,主要包括:① 氨基酸类,如天冬氨酸、谷氨酰胺、赖氨酸;② 还原糖类,如葡萄糖、果糖;③ 介质,如低级醇和多元醇(甘油、丙醇、乙醇等);④ MR 促进剂,如聚乙烯吡咯烷酮;⑤ pH 调节剂,如碳酸钠等,可促进食品产生理想的色泽。

5.2 制备香精

食用香精已被广泛应用于肉类加工食品和其他食品中。张开诚^[54]以鸭骨为原料,经胰蛋白酶酶解作用得到鸭骨酶解液,在微波加热下发生 MR 制备鸭味香精,所得鸭味香精风味良好、香气醇厚。

5.3 制备食用薄膜

Kamboj 等^[55]采用 33 个全因子设计,对玉米纤维胶(CFG)与壳聚糖(CH)的微波辅助 MR 进行了优化和表征。通过 MR 制得的薄膜(F21)具有坚韧、柔韧、耐水性和抗菌性。这种通过 MR 制得的薄膜在食品和药品中具有很高的潜力,拓宽了微波加热下 MR 的应用范围。

5.4 改善性质

微波加热下的 MRPs 的生理活性高于传统加热的,可更好地应用于改善食品的性质,提高其活性,在食品、医药、化妆品行业有很好的应用前景。Nooshkam 等^[56]使用微波加热将乳糖异构化,乳清蛋白水解成体外抗氧

化肽,在微波下与乳糖或乳果糖缀合发生 MR,缀合增加了抗氧化物活性并改善了肽的发泡和乳化性质,扩大了乳清蛋白衍生肽技术的应用范畴。除潜在的生物活性外,MRPs 还可抵抗热诱导的去稳定化和分解,与乳果糖缀合的乳清肽可获得更高的模拟胃消化率,可用于提高蛋白质和基于肽的食物的生物利用度。Laguerre 等^[43]发现微波加热时间对婴儿奶粉的 MRPs 有影响,在微波加热特定功率高且加热时间少的条件下,羧甲基赖氨酸的形成和营养物变质可达最小化,同时孢子被破坏。杨楠等^[40]考察了热风、红外辐射和微波辐射 3 种加工方式对油茶籽油美拉德产物抗氧化性的影响,得出微波比热风效果更佳。

微波加热下的 MR 在食品中的应用多集中于其独特色泽、香味、生物活性方面的研究,其产物多应用于食品、医药等行业,有关其他方面的应用还有待深入和拓宽。

6 结论与展望

微波加热下的美拉德反应产物可改善食品表面色泽,比传统加热显色更快,其反应产物的挥发性成分含量增多,可增加食物的香味,其反应产物各种生物活性提高,对疾病治疗、提高人类健康有重要意义。

目前,对美拉德反应产物的小分子物质研究已取得了一定进展,但对中期产物和最终产物的产生机理、结构和性质尚不完全清楚。故如何定性、定量地确定中期产物和终产物类黑精等的组成、分子结构及其抗突变和抗氧化的机理等仍是今后研究的重点。后续需深入研究微波加热对美拉德反应产物的影响机理,补充和完善微波对美拉德反应影响的基础理论。寻找微波加热下美拉德反应产物有益和有害间的最佳平衡点,建立微波食品品质优化和安全调控机制。

参考文献

- [1] KATO A. Industrial applications of Maillard-type protein-polysaccharide conjugates[J]. Food Science and Technology Research, 2002, 8(3): 193-199.
- [2] TAVARES W P S, DONG Shi-yuan, JIN Wei-ya, et al. Effect of different cooking conditions on the profiles of Maillard reaction products and nutrient composition of hairtail (*Thichiurus lepturus*) fillets [J]. Food Research International, 2018, 103(1): 390-397.
- [3] MARTINS S I F S, JONGEN W M F, VAN BOEKEL M A J S. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling[J]. Trends in Food Science & Technology, 2000, 11(9/10): 364-373.
- [4] VAN LANCKER F, ADAMS A, DE KIMPE N. Formation of pyrazines in Maillard model systems of lysine-containing dipeptides[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(4): 2 470-2 478.

- [5] LU Chi-ying, Hao Zhi-gang, PAYNE R, et al. Effects of water content on volatile generation and peptide degradation in the Maillard reaction of glycine, diglycine, and triglycine[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(16): 6 443-6 447.
- [6] BENZING-PURDIE L M, RIPMEESTER J A, RATCLIFFE C I. Effects of temperature on Maillard reaction products[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1985, 33(1): 31-33.
- [7] CHANDRASEKARAN S, RAMANATHAN S, BASAK T. Microwave food processing: A review[J]. Food Research International, 2013, 52(1): 243-261.
- [8] DE LA HOZ A, DIAZ-ORTIZ A, MORENO A. Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects[J]. Chemical Society Reviews, 2005, 34(2): 164-178.
- [9] CHEMAT F, ROMBAUT N, MEULLEMIESTER A, et al. Review of green food processing techniques: Preservation, transformation, and extraction[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41(6): 357-377.
- [10] MACHIELS D, ISTASSE L. La réaction de Maillard: Importance et applications en chimie des aliments[J]. Ann Med Vét, 2002, 146(2): 347-352.
- [11] RUFIAN-HENARES J Á, GARCIA-VILLANOVA B, GUERRA-HEMANDEZ E. Generation of furosine and color in infant/enteral formula-resembling systems [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(17): 5 354-5 358.
- [12] SCAMAN C, NAKAI S, AMINLARI M. Effect of pH, temperature and sodium bisulfite or cysteine on the level of Maillard-based conjugation of lysozyme with dextran, galactomannan and mannan[J]. Food Chemistry, 2006, 99(2): 368-380.
- [13] YAN Fang, YU Xue-qing, JING Ying-jun. Optimized preparation, characterization, and antioxidant activity of chito-oligosaccharide-glycine Maillard reaction products [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(2): 712-720.
- [14] LEE Y Y, TANG T K, PHUAH E T, et al. New functionalities of Maillard reaction products as emulsifiers and encapsulating agents, and the processing parameters: A brief review[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(5): 1 379-1 385.
- [15] HAMDANI A M, WANI I A, BHAT N A, et al. Effect of guar gum conjugation on functional, antioxidant and antimicrobial activity of egg white lysozyme[J]. Food Chemistry, 2018, 240(1): 1 201-1 209.
- [16] NASROLLAHZADEH F, VARIDI M, KOOCHKEI A, et al. Effect of microwave and conventional heating on structural, functional and antioxidant properties of bovine serum albumin-maltodextrin conjugates through Maillard reaction[J]. Food Research International, 2017, 100(2): 289-297.
- [17] 陈华. 影响食品中美拉德反应的因素[J]. 四川食品与发酵, 1998(3): 21-23.
- [18] 孙丽平, 汪东风, 徐莹, 等. pH 和加热时间对美拉德反应挥发性产物的影响[J]. 食品工业科技, 2009(4): 122-125.
- [19] 向智男, 宁正祥. 肉品风味的形成与美拉德反应[J]. 广州食品工业科技, 2004, 20(2): 143-146.
- [20] 李林, 卢家炯. 美拉德反应的抑制及消除方法[J]. 广西轻工业, 2000(4): 16-18.
- [21] MARTINS S I F S, MARCELIS A T M, VAN BOEKEL M A J S. Kinetic modelling of Amadori *N*-(1-deoxy-*D*-fructos-1-yl)-glycine degradation pathways Part I: Reaction mechanism[J]. Carbohydrate Research, 2003, 338(16): 1 651-1 663.
- [22] CHAO Pei-chun, HSU Cheng-chin, YIN Mei-chin. Analysis of glycative products in sauces and sauce-treated foods[J]. Food Chemistry, 2009, 113(1): 262-266.
- [23] DELGADO-ANDRADE C, MORALES F J, SEIQUER I, et al. Maillard reaction products profile and intake from Spanish typical dishes [J]. Food Research International, 2010, 43(5): 1 304-1 311.
- [24] SUN Xiao-hua, TANG Ju-ming, WANG Jing, et al. Formation of advanced glycation endproducts in ground beef under pasteurisation conditions[J]. Food Chemistry, 2015, 172(4): 802-807.
- [25] 陈艳云, 胡卓炎, 余小林, 等. 微波加热下美拉德反应条件的优化研究[J]. 食品工业科技, 2005, 26(8): 61-63.
- [26] 赵丽琴, 彭黔荣, 张荣, 等. 微波条件下的美拉德反应[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(4): 55-64.
- [27] LIANG Zhi-li, LIN Li, FU Quan-yi, et al. Formation and elimination of pyrrole in the maillard reaction in a saccharide-lysine model system[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(7): 2 555-2 564.
- [28] MOWLAEIFARR M H, AMINLARI M, NIAKOSARI M, et al. Effect of microwave treatment on glycation extent of lysozyme-maltodextrin maillard conjugates[J]. Journal of Food Science & Technology, 2017, 13(60): 105-113.
- [29] 谢欢. 不同时空条件下微波对蛋清蛋白糖基化反应的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2017: 50-62.
- [30] YEO H C H, SHIBAMOTO T. Microwave-induced volatiles of the Maillard model system under different pH conditions[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1991, 39(2): 370-373.
- [31] 张开诚. 美拉德反应在微波食品中的应用[J]. 武汉轻工大学学报, 2000(4): 9-11.
- [32] ZHANG Na-na, FAN Da-ming, ZHAO Yue-liang, et al. Dielectric loss mediated promotion of microwave heating in the Maillard reaction[J]. LWT-Food Science and Technolo-

- gy, 2019, 101(3): 559-566.
- [33] 段邓乐. 微波场内卵清蛋白-葡萄糖美拉德反应产物生成机制初探[D]. 南昌: 南昌大学, 2016: 10-45.
- [34] 胡月明. 微波场内卵清蛋白糖基化反应的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014: 12-45.
- [35] 袁媛, 陈芳, 刘洁, 等. 微波对美拉德模拟体系中丙烯酰胺含量的影响[J]. 食品工业科技, 2009, 30(6): 135-138.
- [36] 张兰. 微波场内乳蛋白-乳糖模型的变化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014: 20-52.
- [37] 张智刚. 微波场中米蛋白-葡聚糖复合物的制备、功能特性及其结构表征[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013: 30-37.
- [38] 毕伟伟. 微波对酪蛋白的糖基化反应及产物功能性质的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 18-77.
- [39] 刘红. 微波焙烤条件对饼干品质的影响及美拉德有害产物的控制研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017: 16-44.
- [40] 杨楠, 罗凡, 费学谦, 等. 干燥方式对油茶籽油中美拉德反应产物及其抗氧化性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 14-18.
- [41] 付全意. 食品模拟体系糖化反应过程中羧甲基赖氨酸的形成和抑制[D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 27-95.
- [42] 孟岳成, 何珊珊, 李延华, 等. 不同加热条件下牛乳美拉德反应程度的研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(1): 158-165.
- [43] LAGUERRE J C, PASCALEG W, DAVID M, et al. The impact of microwave heating of infant formula model on neo-formed contaminant formation, nutrient degradation and spore destruction[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 107(2): 208-213.
- [44] 严昊, 付惠, 谢冰. 美拉德反应及其产物抗氧化活性研究进展[J]. 宜宾学院学报, 2007(12): 82-84.
- [45] 杨立强. 微波加热食品过程中的 Maillard 反应[J]. 江西广播电视大学学报, 2004(1): 60-61.
- [46] 肖桂明, 卢红兵, 车靖, 等. 微波作用下不同反应温度的梅拉德反应研究[J]. 广州化工, 2015, 43(2): 59-61.
- [47] 胡军, 李国栋, 宗永立. 微波加热缬氨酸和葡萄糖的棕化反应[J]. 烟草科技/烟草化学, 2006(9): 45-50.
- [48] 董乐. 2 种氨基酸与葡萄糖美拉德反应产物的抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 89-92.
- [49] 刘志华, 刘春波, 韩敬美, 等. 中低 pH 下 Maillard 反应产物抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(13): 14-17.
- [50] WAGNER K H, REICHHOLD S, KOSCHUTNIG K, et al. The potential antimutagenic and antioxidant effects of Maillard reaction products used as “natural antibrowning” agents[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2007, 51(4): 496-504.
- [51] WIJEWICKREME A N, KITTS D D, DURANCE T D. Reaction conditions influence the elementary composition and metal chelating anance of nondialyzable model Maillard reaction products[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(12): 4 577-4 583.
- [52] HWANG I G, KIM H Y, WOO K S, et al. Biological activities of Maillard reaction products (MRPs) in a sugar-amino acid model system[J]. Food Chemistry, 2011, 126(1): 221-227.
- [53] RUFIAN-HENARES J A, MORALES. Effect of in Vitro Enzymatic digestion on antioxidant activity of coffee melanoidins and fractions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(24): 1 480-1 485.
- [54] 张开诚. 微波加热与传统加热对食品风味影响的探讨[J]. 武汉轻工大学学报, 1999(2): 23-26.
- [55] KAMBOJ S, SINGH K, TIWARY A K, et al. Optimization of microwave assisted Maillard reaction to fabricate and evaluate corn fiber gum-chitosan IPN films[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44(2): 260-276.
- [56] NOOSHKAM M, MADADLOU A. Microwave-assisted isomerisation of lactose to lactulose and Maillard conjugation of lactulose and lactose with whey proteins and peptides[J]. Food Chemistry, 2016, 200(1): 1-9.
- (上接第 213 页)
- [29] WOLF B W, BAUER L L, FAHEY G C. Effects of chemical modification on in vitro rate and extent of food starch digestion: An attempt to discover a slowly digested starch[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(10): 4 178-4 183.
- [30] SAJILATA M G, SINGHAL R S, KULKARNI P R. Resistant starch: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2006, 5(1): 1-17.
- [31] 何健, 王韧, 张昊, 等. 改性蜡质玉米淀粉抗消化组分的理化性质及分子结构表征[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 1-4.
- [32] FUENTES-ZARAGOZA E, RIQUELME-NAVARRETE M J, SNCHEZ-ZAPATA E, et al. Resistant starch as functional ingredient: A review [J]. Food Research International, 2010, 43(4): 931-942.
- [33] 蒲华寅, 马芸, 黄萌, 等. 超高压辅助制备醋酸酯淀粉结构性质研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 1-6.
- [34] 曹余, 何绍凯, 田映良, 等. 玉米交联羟丙基复合变性淀粉性能研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 16-18.
- [35] MAJZOBI M, BEPARVA P, FARAHNAKY A, et al. Physicochemical properties of cross-linked wheat starch affected by L-ascorbic acid[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(2): 355-364.
- [36] SUN Xiao-jing, LI Wen-hao, HU Ya-yun, et al. Comparison of pregelatinization methods on physicochemical, functional and structural properties of tartary buckwheat flour and noodle quality[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 80: 63-71.
- [37] 郭玉. 预糊化淀粉的制备及其在冷冻面条中的应用[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013: 36-38.