

# 食品中 5-羟甲基糠醛的形成与控制

裴珂晗, 欧仕益\*

(暨南大学食品科学与工程系, 广州 510632)

**摘要:** 5-羟甲基糠醛(5-hydroxymethylfurfural, HMF)是食品热加工和贮藏过程中产生的内源性污染物, 主要通过美拉德反应和己糖在酸性条件下脱水产生, 其形成过程受反应底物种类、加热温度、反应体系 pH、水分活度及金属离子等影响。HMF 具有一定神经毒性、遗传毒性; 摄入后在磺基转移酶作用下可转化为具有致癌毒性的羟甲基糠醛次硫酸, 因而近年来 HMF 受到了国内外的广泛关注。本文综述了 HMF 形成的途径、影响因素和控制措施。

**关键词:** 5-羟甲基糠醛; 形成机制; 控制措施

## Formation and mitigation of 5-hydroxymethylfurfural in foods

PEI Ke-Han, OU Shi-Yi\*

(Department of Food Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**ABSTRACT:** 5-hydroxymethylfurfural is a neo-formed contaminant in foods during heating or preservation processes, which is formed through the Maillard reaction or dehydration of sugars under acidic conditions. Its formation is influenced by the varieties of reactants, temperature, pH, water activity and metal cations. Since it shows neurotoxicity, genotoxicity, and can be transformed to carcinogenic compounds, 5-sulphoxymethylfurfural by sulphotransferase, it has attracted worldwide attention in recent years. This article reviewed the formation influencing factors and mitigation methods of HMF.

**KEY WORDS:** 5-hydroxymethylfurfural; formation mechanism; mitigation

## 1 引言

5-羟甲基糠醛(5-hydroxymethylfurfural, HMF)是一种具有呋喃环的糠醛化合物, 分子式为  $C_6H_6O_3$ , 结构如图 1 所示。HMF 作为美拉德反应和焦糖化反应的一种中间产物, 具有调香增色等作用, 同时也是衡量焙烤食品、蜂蜜、咖啡、乳制品、水果制品等食品热处理和贮存时间的指标<sup>[1-4]</sup>。

HMF 是一种食品内源性污染物, 具有低毒性,  $LD_{50}$  为  $3.1 \text{ g/kg}$ <sup>[5]</sup>。2005 年, 欧洲食品安全局评估的人群 HMF 日摄入量为  $1.6 \text{ mg}$ <sup>[6]</sup>。HMF 具有抗心肌缺血、抗氧化、改变

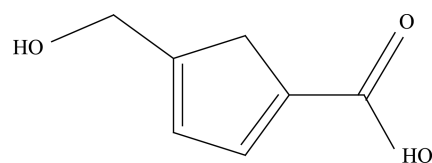


图 1 HMF 结构式

Fig. 1 Structure of HMF

血液流变性和神经保护性; 但 HMF 也会对眼黏膜、上呼吸道黏膜等产生刺激作用, 对人体横纹肌和内脏有损伤<sup>[7-9]</sup>。目前, 关于其致癌性仍具有一定争议, 但是, HMF 在体内

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371745)

**Fund:** Supported by the National Natural Sciences Foundation of China (31371745)

\*通讯作者: 欧仕益, 博士, 教授, 主要研究方向为食品化学。E-mail: tosy@jnu.edu.cn

\*Corresponding author: OU Shi-Yi, Professor, Department of Food Science and Engineering, Jinan University, Huangpu Road West 601, Guangzhou 510632, China. E-mail: tosy@jnu.edu.cn

磺基转移酶作用下所形成羟甲基糠酸和羟甲基糠醛次硫酸具有强致癌性<sup>[10]</sup>。由于HMF具有神经毒性、遗传毒性,及其体内代谢产物羟甲基糠酸和羟甲基糠醛次硫酸具有致癌活性和致突变活性,因此食品中的羟甲基糠醛近年来引起广泛关注。

## 2 食品中羟甲基糠醛形成途径

HMF广泛存在于焙烤食品、咖啡、果汁、蜂蜜等食品;其中,干果制品和焦糖制品的含量高达1 g/kg<sup>[11]</sup>。目前,

食品中HMF形成机制尚不详尽,已知其产生途径主要有2条:己糖强酸性条件下脱水和美拉德反应。具体见图2。

### 2.1 己糖在酸性条件下脱水

蔗糖、葡萄糖、果糖等己糖在高温条件和低水分含量下直接裂解产生HMF<sup>[13]</sup>。其中,呋喃果糖阳离子是其形成的重要中间体。在酸性下,果糖经加热形成呋喃果糖阳离子,再经过环化脱水形成HMF<sup>[14,15]</sup>。Perez-Locas等<sup>[16]</sup>认为在高温和低水分活度条件下,呋喃果糖阳离子才能脱水形成HMF。

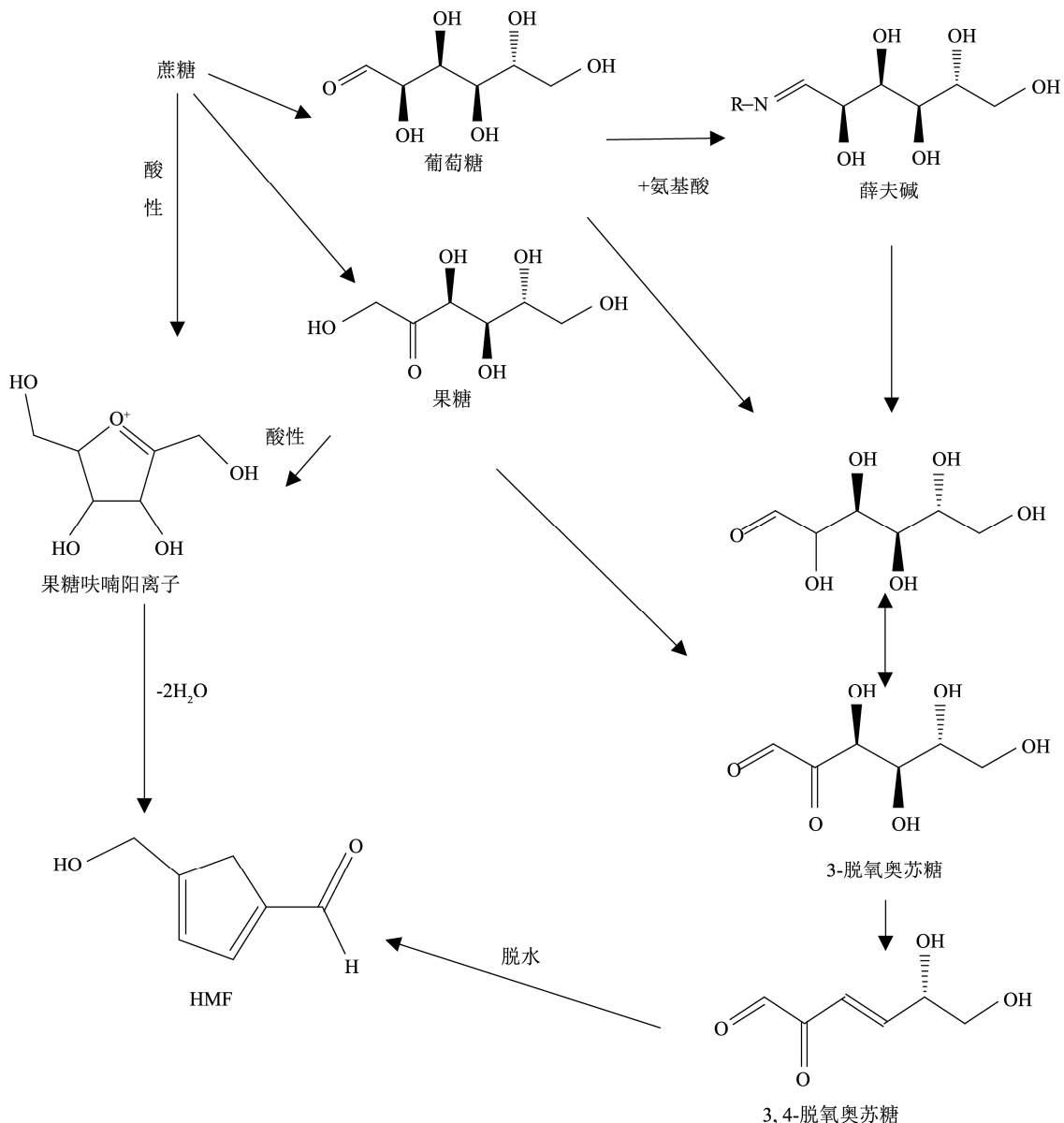


图2 HMF形成途径<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Formation pathway of HMF<sup>[12]</sup>

## 2.2 美拉德反应

HMF 的生成是美拉德反应的一个分支, 包括两个过程: 第一步是氨基酸和葡萄糖或果糖形成薛夫碱, 从而进一步形成重要中间产物 3-脱氧奥苏糖。第二步是 3-脱氧奥苏糖失去两分子水形成 HMF。同时, 在美拉德反应过程中会产生小分子羰基化合物, 如 3-脱氧奥苏糖裂解或酶促反应产生丙酮醛和甘油醛。这些小分子羰基化合物可以通过羟醛缩合反应形成 3,4-脱氧奥苏糖后再脱水产生 HMF<sup>[17]</sup>。

## 3 影响 HMF 形成的因素

从 HMF 的形成途径可知, 食品中 HMF 主要来源于焦糖化反应和美拉德反应, 因此影响美拉德反应的影响因素如加热温度、反应体系 pH、反应底物种类及金属离子<sup>[18]</sup>等会影响 HMF 形成。

### 3.1 反应底物

在单糖中仅有果糖和葡萄糖能够形成 HMF。由于果糖烯醇化速度较快, 有利于形成 3-脱氧奥苏糖, 因此, 果糖产生 HMF 速度比葡萄糖快得多<sup>[19,20]</sup>。Perez-Locas 等<sup>[16]</sup>在研究 HMF 形成时发现, 在 250 °C 高温下, 90% 的 HMF 来源于蔗糖的果糖部分, 仅有 10% 来源于葡萄糖。Guan 等<sup>[21]</sup>通过添加催化剂提高了葡萄糖生成 HMF 的量, 并且他们认为葡萄糖异构为果糖, 从而提高了 HMF 产生量。

Bharate 和 Bharate<sup>[13]</sup>在模拟橙汁实验时发现, 在低温加热时 HMF 的形成必须有氨基酸存在。Jiang 等<sup>[22]</sup>利用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)检测葡萄糖/氨基酸体系在 160 °C 下反应时产生的 HMF 含量, 发现在谷氨酸、赖氨酸、甘氨酸、半胱氨酸中, 赖氨酸组产生的 HMF 最多, 为谷氨酸和甘氨酸组的 2 倍, 是半胱氨酸组的 180 倍。

### 3.2 温度

美拉德反应生成 HMF 所需的温度低于焦糖化反应。Kroh<sup>[23]</sup>发现美拉德反应最适条件为: pH>5.0, 温度>50 °C, 中等水分活度; 焦糖化反应的适合条件是: pH<3 或 pH>9, 温度>120 °C, 低水分活度。Pereira 等<sup>[24]</sup>发现, 甜葡萄酒在 30 °C 下放置 4 个月后 HMF 的生成量仅为 12 mg/L, 而温度升高至 45 °C 时, HMF 产生量达到 150 mg/L。Göncüoğlu 和 Gökmen<sup>[25]</sup>通过检测面团油榨油中的 HMF 含量发现, HMF 含量随油炸温度和油炸次数的增加而增加。Van Der Fels-Klerx 等<sup>[26]</sup>发现, 饼干在 200 °C 下烘烤 15 min 可产生 295 mg/kg 的 HMF, 分别为在 180 °C 和 190 °C 烘烤时的 100 倍和 20 倍。Shallenberger 等<sup>[27]</sup>将单糖在 100 °C 单独加热, 发现果糖和葡萄糖分别在 pH 4~6 及 pH 2~6 时非常稳定, 很少形成 HMF。说明经高温加工的食品如油炸食品、炙烤食品和焙烤食品是 HMF 的主要来源。

### 3.3 pH

3-脱氧奥苏糖是生成 HMF 重要的前体物质, 其形成和脱水所需的最适 pH 显著不同: 形成 3-脱氧奥苏糖时, 氨基酸需以非质子化形式、还原糖需以直链式状况存在, 因此, pH>5.0 才有利于 3-脱氧奥苏糖形成; 而其脱水反应需要 pH 值较低(pH<5.0)<sup>[28]</sup>。这就可以合理揭示 Weigel 等<sup>[29]</sup>的发现: 他们将蜂蜜在中性条件下加热, 发现蜂蜜中 HMF 含量很低, 但产生大量 3-脱氧奥苏糖。

### 3.4 水分活度

己糖通过脱水或者美拉德反应生成 HMF 时, 会产生 2 分子以上的水, 因此, 高水分活度会抑制其反应, 从而不利于 HMF 生成<sup>[30]</sup>。Ait-Ameur 等<sup>[31]</sup>发现, 当曲奇饼的水分活度降至 0.40 时, HMF 含量由 0.5 mg/kg 上升至 74.6 mg/kg。Gökmen 等<sup>[30]</sup>也发现在曲奇中越低的水分活度越有利于 HMF 形成。Miao 等<sup>[32]</sup>在薯片体系中发现, HMF 含量也随着水分活度的减少而增加, 并且, 当水分活度低于 0.38 时, HMF 含量迅速增加。

### 3.5 金属离子

Lee 等<sup>[33]</sup>发现在果糖(葡萄糖)/有机酸反应体系中, 添加一定量的阳离子可使 HMF 的产生增加 2%。Quarta 和 Anese<sup>[34]</sup>进一步发现二价阳离子如钙离子和镁离子等可促进糖的烯醇化, 从而增加 HMF 的形成, 而钾离子对 HMF 形成有一定抑制。

### 3.6 酚类物质

Arena 等<sup>[35]</sup>通过检测 40 种市售蜂蜜中的酚类物质和 3-脱氧奥苏糖含量, 首次发现蜂蜜中 3-脱氧奥苏糖含量与酚类物质呈正相关。江姗姗等<sup>[36]</sup>通过研究对-香豆酸对葡萄糖与氨基酸(赖氨酸、谷氨酸和甘氨酸)美拉德反应体系影响, 发现对-香豆酸对抑制 HMF 的抑制程度与氨基酸种类、香豆酸浓度和反应时间有关。Cai 等<sup>[37]</sup>发现在葡萄糖/天冬酰胺体系中, 绿原酸对 HMF 生成有促进作用。吴泰钢等<sup>[38]</sup>发现在糖酸反应体系中, 绿原酸对 HMF 的影响与 pH 有关: 在 pH 为 2.80 和 3.70 时, 绿原酸对 HMF 形成有抑制作用; 而在 4.70 和 5.70 时, 绿原酸促进 HMF 形成。Zhang 等<sup>[39]</sup>发现绿原酸可以通过促进 3-脱氧奥苏糖的形成, 从而促进果糖脱水体系和果糖/天冬氨酸体系中 HMF 的生成。

## 4 食品中 HMF 的控制措施

### 4.1 减少或消除 HMF 的物质

HMF 形成的过程中前体物质对 HMF 的产生有重要影响, 因此减少或替代这些前体物质可抑制 HMF 产生。

食品中糖的种类和含量显著影响 HMF 的形成。Ait-Ameur 等<sup>[40]</sup>用蔗糖取代葡萄糖和果糖制作饼干, 发现在 250 °C 下焙烤时 HMF 含量大大下降; 用乳糖和麦芽糖替代

葡萄糖和果糖制蛋糕时,也可显著减少 HMF 产生<sup>[41]</sup>。Shinoda 等<sup>[42]</sup>发现脱除果汁中的糖类,几乎没有 HMF 生成。

食品中游离氨基酸含量影响 HMF 形成。Capuano 等<sup>[43]</sup>发现精制面粉比普通面粉加工产生的 HMF 含量少得多,因为精制面粉游离氨基酸的含量较低。而且,半胱氨酸能显著降低食品中 HMF 的含量,Zou 等<sup>[44]</sup>认为,游离半胱氨酸会与形成的 HMF 形成加合物,从而降低 HMF 含量。

食品的水分含量是影响 HMF 形成的重要因素之一。将食品的水分含量从由 22% 升高至 26%,食品中的 HMF 含量可显著减少 43%<sup>[45]</sup>,这可能是因为在高的水分含量下,HMF 前体物质脱水反应受到了限制。

食品添加剂也影响 HMF 的形成。在焙烤食品中用 NaHCO<sub>3</sub> 替代 NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>,可以通过提高反应体系的 pH 抑制 HMF 产生<sup>[46]</sup>。

#### 4.2 改变加工工艺

温度是影响 HMF 生成的关键因素之一,并且随着温度的升高,HMF 生成量越高。因此,在食品加工过程中,适当降低加热温度或者减少加热时间可以减少 HMF 的生成。

除了控制加热温度和时间外,改变加热方式也可以减少 HMF 产生。Akkarachaneeyakorn 等<sup>[47]</sup>对麦芽通过微波加热方式进行加工,发现 HMF 生成量显著减少。Felke 等<sup>[48]</sup>利用射频加热对番茄酱进行巴氏杀菌不仅可以减少 HMF 生成量,还可以保持其营养价值。而对一些液态食品如果汁、饮料等,采用超高压、高静压<sup>[49]</sup>或者紫外灯<sup>[50]</sup>对其灭菌,可以有效减少 HMF 产生。如 Saldo 等<sup>[51]</sup>利用超高压均质技术对苹果汁进行商业灭菌,发现在灭菌过程 HMF 含量仅为热灭菌的 1%。

#### 4.3 减少或消除已产生的羟甲基糠醛

HMF 的沸点较低,因此可采用真空技术脱除食品中的 HMF,如咖啡<sup>[52]</sup>;由于高水分活度食品的粘度高,真空技术更适用于消除水分活度较低的食品,如饼干等<sup>[53]</sup>。紫外线也可通过光降解途径消除产生的 HMF,其降解程度随着处理温度增高和时间的延长而增加<sup>[54]</sup>。此外,发酵也可消除食品中的 HMF。Akillioglu 等<sup>[55]</sup>发现麦芽在发酵过程中,HMF 可转化为羟甲基糠醇。进一步研究发现,若在木糖发酵时使用丝状真菌 *Amorphotheca resinae* ZN1 可以促进发酵过程中的 HMF 转化为羟甲基糠醇或者羟甲基糠醛<sup>[56]</sup>。

## 5 展 望

HMF 是一种食品热加工过程中的内源性污染物。目前,对 HMF 形成机制、风险评价以及控制方式等研究还不充分。因此,今后研究应侧重于以下几个方面:(1)HMF 的风险评价,尤其是对 HMF 进行暴露水平的评估;(2)控制 HMF 方法的研究,包括抑制 HMF 形成的方法和机制,清除 HMF 方法和机制等。

## 参考文献

- [1] Ramirez-Jiménez A, Guerra-Hernández E, García-Villanova B. Evolution of non enzymatic browning during storage of infant rice cereal [J]. Food Chem, 2003, 3(2): 219–225.
- [2] Fallico B, Zappalà M, Arena E, *et al.* Effects of conditioning on HMF content in unifloral honeys [J]. Food Chem, 2004, 85(2): 305–313.
- [3] Morales FJ, Jiménez-Pérez S. Hydroxymethylfurfural determination in infant milk-based formulas by micellar electrokinetic capillary chromatography [J]. Food Chem, 2001, 72(4): 525–531.
- [4] Rada-Mendoza M, Luz Sanz M, Olano A, *et al.* Formation of hydroxymethylfurfural and furosine during the storage of jams and fruit-based infant foods [J]. Food Chem, 2004, 85: 605–609.
- [5] Ulbricht RJ, Northup SJ, Thomas JA. A review of 5-hydroxymethylfurfural (HMF) in parenteral solutions [J]. Fundam Appl Toxicol, 1984, 4(5): 843–853.
- [6] EFSA. Opinion of the scientific panel on food additives, flavourings, processing aids and materials in contact with food (AFC) on a request from the commission related to flavouring group evaluation 13: furfuryl and furan derivatives with and without additional side-chain substituents and heteroatoms from chemical group 14 [J]. EFSA J, 2005, 215: 1–73.
- [7] Kim HK, Choi Y, Lee EN, *et al.* 5-hydroxymethylfurfural from black garlic extract prevents tnf $\alpha$ -induced monocytic cell adhesion to huvecs by suppression of vascular cell adhesion molecule-1 expression, reactive oxygen species generation and nf- $\kappa$ b activation [J]. Phytother Res, 2011, 25(7): 965–974.
- [8] 傅紫琴,王明艳,蔡宝昌. 5-羟甲基糠醛(5-HMF)在中药中的研究现状探讨[J]. 中华中医药学刊, 2008, 26(3): 508–510.  
Fu ZQ, Wang MY, Cai BC. Discussion of 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) in Chinese native medicine research present situation [J]. Chin Arch Tradit Chin Med, 2008, 26(3): 508–510.
- [9] Husøy T, Haugen M, Murkovic M, *et al.* Dietary exposure to 5-hydroxymethylfurfural from Norwegian food and correlations with urine metabolites of short-term exposure [J]. Food Chem Toxicol, 2008, 46(12): 3697–3702.
- [10] Monien BH, Frank H, Seidel A, *et al.* Conversion of the common food constituent 5-hydroxymethylfurfural into a mutagenic and carcinogenic sulfuric acid ester in the mouse *in vivo* [J]. Chem Res Toxicol, 2009, 22(6): 1123–1128.
- [11] Kowalski S, Lukasiewicz M, Duda-Chodak A, *et al.* 5-hydroxymethyl-2-furfural (HMF)-heat-induced formation, occurrence in food and biotransformation: A review [J]. Polish J Food Nutr Sci, 2013, 63(4): 207–225.
- [12] Capuano E, Fogliano V. Acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural (HMF): A review on metabolism, toxicity, occurrence in food and mitigation strategies [J]. LWT-Food Sci Technol, 2011, 44: 793–810.
- [13] Bharate SS, Bharate SB. Non-enzymatic browning in citrus juice: chemical markers, their detection and ways to improve product quality [J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(10): 2271–2288.
- [14] Antal MJ, Mok WSL, Richards GN. Mechanism of formation of 5-(hydroxymethyl)-2-furaldehyde from D-fructose and sucrose [J]. Carbohydr Res, 1990, 199: 91–109.
- [15] Moreau C, Durand R, Razigade S, *et al.* Dehydration of fructose to 5-hydroxymethylfurfural over H-mordenites [J]. Appl Catal A: Gen, 1996,

- 145(1/2): 211–224.
- [16] Perez-Locas C, Yaylayan VA. Isotope labeling studies on the formation of 5-(hydroxymethyl)-2-furaldehyde (HMF) from sucrose by pyrolysis-GC/MS [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56: 6717–6723.
- [17] Cammerer B, Wedzicha BL, Kroh LW. Nonenzymatic browning reactions of retro-aldol degradation products of carbohydrates [J]. *Eur Food Res Technol*, 1999, 209: 261–265.
- [18] 吴惠玲, 王志强, 韩春, 等. 影响美拉德反应的几种因素研究[J]. *现代食品科技*, 2010, 26(5): 441–444.  
Wu HL, Wang ZQ, Han C, *et al.* Factors affecting the Maillard reaction [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2010, 26(5): 441–444.
- [19] Liu SC, Chang HM, Wu JSB. A study on the mechanism of browning in mei liqueur using model solutions [J]. *Food Res Int*, 2003, 36: 579–585
- [20] 张玉玉, 张兴, 章慧蕊, 等. 3 种单糖模拟体系中 5-羟甲基糠醛的形成动力学分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(17): 41–47.  
Zhang YY, Zhang X, Zhang HY, *et al.* Kinetic studies on 5-hydroxymethylfurfural formation in three kinds of monosaccharide solution model systems during thermal processing [J]. *Food Sci*, 2014, 35(17): 41–47.
- [21] Guan J, Cao Q, Guo X, *et al.* The mechanism of glucose conversion to 5-hydroxymethylfurfural catalyzed by metal chlorides in ionic liquid: A theoretical study [J]. *Comput Theor Chem*, 2011, 963(2): 453–462.
- [22] Jiang SS, Ou SY, Liang E, *et al.* Effect of chlorogenic acid on hydroxymethylfurfural in different Maillard reaction systems [J]. *Int Food Res J*, 2013, 20(3): 1239–1242.
- [23] Kroh LW. Caramelisation in food and beverages [J]. *Food Chem*, 1994, 51: 373–379.
- [24] Pereira V, Albuquerque FM, Ferreira AC, *et al.* Evolution of 5-hydroxymethylfurfural (HMF) and furfural (F) in fortified wines submitted to overheating conditions [J]. *Food Res Int*, 2011, 44: 71–76.
- [25] Gönçüoğlu N, Gökmen V. Accumulation of 5-hydroxymethylfurfural in oil during frying of model dough [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2013, 90(3): 413–417.
- [26] Van Der Fels-Klerx HJ, Capuano E, Nguyen HT, *et al.* Acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural formation during baking of biscuits: NaCl and temperature-time profile effects and kinetics [J]. *Food Res Int*, 2014, 57(1): 210–217.
- [27] Shallenberger RS, Mattick LR. Relative stability of glucose and fructose at different acid pH [J]. *Food Chem*, 1983, 12: 159–165.
- [28] Arribas-Lorenzo G, Morales FJ. Estimation of dietary intake of 5-hydroxymethylfurfural and related substances from coffee to Spanish population [J]. *Food Chem Toxicol*, 2010, 48: 644–649.
- [29] Weigel KU, Opitz T, Henle T. Studies on the occurrence and formation of 1, 2-dicarbonyls in honey [J]. *Eur Food Res Technol*, 2004, 218: 147–151.
- [30] Gökmen V, Açar ÖÇ, Köksel H, *et al.* Effects of dough formula and baking conditions on acrylamide and hydroxymethylfurfural formation in cookies [J]. *Food Chem*, 2007, 104: 1136–1142.
- [31] Ait-Ameur L, Trystram G, Birlouez-Aragon I. Accumulation of 5-hydroxymethyl-2-furfural in cookies during the baking process: validation of an extraction method [J]. *Food Chem*, 2006, 98: 790–796.
- [32] Miao YT, Zhang HJ, Zhang LL, *et al.* Acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural formation in reconstituted potato chips during frying [J]. *J Food Sci Technol*, 2014, 51(12): 4005–4011.
- [33] Lee HS, Nagy S. Relative reactivities of sugars in the formation of 5-hydroxymethylfurfural in sugar-catalyst model systems [J]. *J Food Proc Pres*, 1990:171–178.
- [34] Quarta B, Anese M. The effect of salts on acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural formation in glucose-asparagine model solutions and biscuits [J]. *J Food Nutr Res*, 2010, 49: 69–77.
- [35] Arena E, Ballistreri G, Tomaselli F, *et al.* Survey of 1, 2-dicarbonyl compounds in commercial honey of different floral origin [J]. *J Food Sci*, 2011, 76: 1203–1210.
- [36] 江姗姗, 梁恩, 于森, 等. 对-香豆酸和绿原酸对美拉德反应体系中 5-羟甲基糠醛形成的影响[J]. *食品科学*, 2012, 33(19): 17–20.  
Jiang SS, Liang E, Yu M, *et al.* Effects of *p*-coumaric acid and chlorogenic acid on formation of 5-hydroxymethylfurfural in different Maillard reaction systems [J]. *Food Sci*, 2012, 33(19): 17–20.
- [37] Cai Y, Zhang ZH, Jiang SS, *et al.* Chlorogenic acid increased acrylamide formation through promotion of HMF formation and 3-aminopropionamide deamination [J]. *J Hazards Mater*, 2014, 268c(6): 1–5.
- [38] 吴泰钢, 黄才欢, 白卫滨, 等. 绿原酸对糖酸反应体系中 5-羟甲基糠醛形成的影响[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(10): 74–79.  
Wu TG, Huang CH, Bai WB, *et al.* Effect of chlorogenic acid on formation of 5-hydroxymethylfurfural in fructose-acid reaction systems [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2014, 30(10): 74–79.
- [39] Zhang ZH, Zou YY, Wu TG, *et al.* Chlorogenic acid increased 5-hydroxymethylfurfural formation when heating fructose alone or with aspartic acid at two pH levels [J]. *Food Chem*, 2016, 190: 832–835.
- [40] Ait-Ameur L, Mathieu O, Lalanne V, *et al.* Comparison of the effects of sucrose and hexose on furfural formation and browning in cookies baked at different temperatures [J]. *Food Chem*, 2007, 101(4): 1407–1416.
- [41] Zhang YY, Song Y, Hu XS, *et al.* Effects of sugars in batter formula and baking conditions on 5-hydroxymethylfurfural and furfural formation in sponge cake models [J]. *Food Res Int*, 2012, 49(1): 439–445.
- [42] Shinoda Y, Komura H, Homma S, *et al.* Browning of model orange juice solution: factors affecting the formation of decomposition products [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2005, 69(11): 2129–2137.
- [43] Capuano E, Ferrigno A, Acampa I, *et al.* Effect of flour type on Maillard reaction and acrylamide formation during toasting of bread crisp model systems and mitigation strategies [J]. *Food Res Int*, 2009, 42(9): 1295–1302.
- [44] Zou YY, Huang CH, Pei KH, *et al.* Cysteine alone or in combination with glycine simultaneously reduced the contents of acrylamide and hydroxymethylfurfural [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2015, 63: 275–280.
- [45] Masatcioglu TM, Ng PKW, Koksel H. Effects of formulation and extrusion cooking conditions on furfural and hydroxymethylfurfural content [J]. *J Cereal Sci*, 2015, 65: 31–38.
- [46] Gökmen V, Şenyuva HZ. Acrylamide formation is prevented by divalent cations during the Maillard reaction [J]. *Food Chem*, 2007, 103(1): 196–203.
- [47] Akkarachaneeayakorn S, Laguerre JC, Tattiyakul J, *et al.* Optimization of combined microwave-hot air roasting of malt based on energy consumption and neo-formed contaminants content [J]. *J Food Sci*, 2010, 74: E201–E207.
- [48] Felke K, Pfeiffer T, Eisner P, *et al.* Radio-frequency heating: A new

- methods for improved nutritional quality of tomato puree [J]. *Agro Food Ind Hi-tech*, 2011, 22: 29–32.
- [49] Vervoort L, Plancken IVD, Grauwet T, *et al.* Thermal versus high pressure processing of carrots: a comparative pilot-scale study on equivalent basis [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2012, 15(1): 1–13.
- [50] Bule MV, Desai KM, Parisi B, *et al.* Furan formation during UV-treatment of fruit juices [J]. *Food Chem*, 2010, 122(4): 937–942.
- [51] Saldo J, Suarez-Jacobo A, Gervilla R, *et al.* Use of ultra-high-pressure homogenization to preserve apple juice without heat damage [J]. *High Pressure Res*, 2009, 29: 52–56.
- [52] Anese M, Suman M. Mitigation strategies of furan and 5-hydroxymethylfurfural in food [J]. *Food Res Int*, 2013, 51(1): 257–264.
- [53] Anese M, Bot F, Suman M. Furan and 5-hydroxymethylfurfural removal from high- and low-moisture foods [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, 56(2): 529–532.
- [54] Aguilar K, Garvin A, Azuara E, *et al.* Modelling of 5-hydroxymethylfurfural photo-degradation by UV irradiation. Influence of temperature and pH [J]. *Food Res Int*, 2015, 71:165–173.
- [55] Akillioglu HG, Mogol BA, Gökmen V. Degradation of 5-hydroxymethylfurfural during yeast fermentation [J]. *Food Addit Contam Part A*, 2011, 28: 1629–1635.
- [56] Hong R, Jian Z, Gao Q, *et al.* Analysis of biodegradation performance of furfural and 5-hydroxymethylfurfural by *Amorphotheca resinae* ZN1 [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2014, 7(8): 69–74.

(责任编辑: 杨翠娜)

## 作者简介



裴珂晗, 硕士研究生, 主要研究方向  
食品安全。

E-mail: peikehan2006@qq.com



欧仕益, 博士, 教授, 主要研究方向  
为食品化学。

E-mail: tosy@jnu.edu.cn