

## 肉味香精中 5-羟甲基糠醛的含量测定

张莉莉, 孙颖, 孔琰, 杨肖, 张玉玉\*, 孙宝国, 陈海涛

(北京食品营养与人类健康高精尖创新中心, 食品质量与安全北京实验室, 北京市食品风味化学重点实验室, 北京工商大学, 北京 100048)

**摘要:** **目的** 建立肉味香精中 5-羟甲基糠醛的高效液相色谱分析方法。**方法** 香精样品经甲醇溶液提取后离心, 将所得上清液过滤后采用高效液相色谱分析。测定条件为: Venusil XBP-C<sub>18</sub> 色谱柱, UV 检测器的检测波长为 284 nm, 以甲醇-水溶液(5:95, V:V)为流动相, 流速为 1.0 mL/min, 柱温 30 °C。**结果** 本方法能在 25 min 内完成目标化合物的分离分析。5-HMF 标准品在 0.16~40.00 µg/mL 的浓度范围内呈良好的线性关系,  $r^2=0.9999$ , 方法的检出限为 0.3525 µg/L, 定量限为 2.82 µg/L。5-HMF 在 3 个添加水平的平均回收率为 86.89%, 能够满足样品测定的要求。自制糖醋排骨香精中 5-HMF 的含量为 7.80 mg/kg, 市售猪肉、牛肉和鸡肉香精中 5-HMF 的平均含量分别为 3.94、5.32 和 9.38 mg/kg, 且测定结果间的 RSD 平均值为均小于 5%。**结论** 该方法快速、准确、灵敏, 适用于肉味香精中 5-羟甲基糠醛的定量分析。

**关键词:** 肉味香精; 5-羟甲基糠醛; 高效液相色谱法

## Content determination of 5-hydroxymethylfurfural in meat flavors

ZHANG Li-Li, SUN Ying, KONG Yan, YANG Xiao, ZHANG Yu-Yu\*, SUN Bao-Guo, CHEN Hai-Tao

(Beijing Advanced Innovation Center for Food Nutrition and Human Health, Beijing Laboratory for Food Quality and Safety, Beijing Key Laboratory of Flavor Chemistry, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

**ABSTRACT: Objective** To establish a method for the determination of 5-hydroxymethylfurfural in meat flavors by high performance liquid chromatography (HPLC). **Methods** The flavor samples were extracted with methanol and then centrifuged, and after being filtered, the supernatant fluid obtained was analyzed by HPLC. The samples were analyzed on a Venusil XBP-C<sub>18</sub> column at 284 nm with a UV detector. Using the methanol water solution (5:95, V:V) as mobile phase with the flow rate was 1.0 mL/min and the column temperature was 30 °C. **Results** The separation and analysis of the target compound were accomplished within 25 min using this method. The 5-HMF standard had a good linear relationship in the range of 0.16~40.00 µg/mL with  $r^2=0.9999$ , the limits of detection (LOD) was 0.3525 µg/L, and the limit of quantitation (LOQ) was 2.82 µg/L. The average recoveries at 3 additional levels was 86.89%, which could meet the requirements of sample determination. The content of 5-HMF in homemade sweet and sour spareribs flavor was 7.80 mg/kg, the average content of 5-HMF in pork flavor, beef flavor and chicken flavor sold in markets were 3.94, 5.32 and 9.38 mg/kg, and the average relative standard deviations of the results were all less than

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400705)、国家自然科学基金青年基金项目(31401604)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD04B06)

**Fund:** Supported by the National Key R&D Program (2016YFD0400705), the National Natural Science Foundation of China (31401604), and the National Key Technology R&D Program (2014BAD04B06)

\*通讯作者: 张玉玉, 副教授, 主要研究方向为食用香料化学及其应用。E-mail: zhangyy2@163.com

\*Corresponding author: ZHANG Yu-Yu, Associate Professor, School of Food and Chemical Engineering, Beijing Laboratory for Food Quality and Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China. E-mail: zhangyy2@163.com

5%. **Conclusion** The proposed method is fast, accurate and sensitive, which is suitable for the quantitative analysis of 5-HMF in meat flavors.

**KEY WORDS:** meat flavor; 5-hydroxymethylfurfural; high performance liquid chromatography

## 1 引言

5-羟甲基糠醛(5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF)是由糖类化合物在高温或弱酸性条件下水解产生的一类呋喃化合物<sup>[1]</sup>,广泛存在于热加工食品中,比如酒类<sup>[2,3]</sup>、蜂蜜<sup>[4,5]</sup>、烘焙食品<sup>[6]</sup>、果葡糖浆<sup>[7]</sup>、醋<sup>[8,9]</sup>、酱油<sup>[10]</sup>以及一些药物<sup>[11,12]</sup>。然而有研究表明,5-HMF对眼黏膜、呼吸道黏膜和皮肤有一定程度的刺激作用,过量的5-HMF被机体吸收后,会对人体的肝脏和肾脏等器官产生很大伤害<sup>[13,14]</sup>。

5-HMF能够诱导细胞和基因突变,具有潜在的致癌性、神经毒性和生育毒性<sup>[15]</sup>。我国国家标准GB/T 18796-2005<sup>[16]</sup>中明确指出,蜂蜜中5-HMF的含量应小于40 mg/kg。国家标准GB/T 18963-2012<sup>[17]</sup>中规定,浓缩苹果清汁中5-HMF的限量为20 mg/kg。目前,5-HMF含量的测定方法以高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)<sup>[18]</sup>为主,黄晓雯等<sup>[19]</sup>利用固相萃取-高效液相色谱法测定了11种酱油专用焦糖中的5-HMF含量,发现不同原料和加工方法对焦糖中5-HMF的生成有一定的影响作用;王露露等<sup>[20]</sup>利用高效液相色谱法,通过测定不同存储时间和温度的蜂王浆中的5-HMF,发现样品中的5-HMF含量随着存储时间的延长和温度的升高而增加;张乐等<sup>[21]</sup>利用高效液相色谱法研究了白术麸炒过程中5-HMF含量的变化规律,发现样品炮制的时间与温度对其中5-HMF的含量影响很大,其变化规律与王露露等<sup>[20]</sup>的研究结果一致,时间的延长与温度的增加均有利于样品中5-HMF的生成;郭欢迎等<sup>[22]</sup>利用高效液相色谱法对右旋糖酐40葡萄糖注射液的pH值与5-HMF的含量进行了相关性分析,发现葡萄糖注射液的pH值与5-HMF的含量呈负相关;张玉玉等<sup>[23]</sup>利用高效液相色谱法对3种单糖模拟体系中5-HMF的形成进行了动力学分析。然而,采用高效液相色谱法测定通过热反应制得的肉味香精中5-HMF含量的研究还未见报道。

本研究采用高效液相色谱法对猪肉香精、牛肉香精、鸡肉香精和糖醋排骨香精中的5-HMF进行定量分析,为其检测提供一定的理论依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 试剂与仪器

猪肉香精、牛肉香精和鸡肉香精各5种,均为市售,糖醋排骨香精为自制;蔗糖、醋、猪肉和猪棒骨均购于北京永辉超市。

动物蛋白酶(食品级,广西南宁庞博生物有限公司);5-羟甲基糠醛(纯度99%,色谱纯,美国Sigma公司);甲醇(色谱纯,美国Fisher控制设备国际有限公司);超纯水(杭州娃哈哈集团有限公司);0.45 μm尼龙滤膜(天津博纳艾杰尔科技有限公司)。

1260高效液相色谱仪(配备Quat Pump洗脱泵、ALS自动进样器、TCC柱温箱、DAD检测器及OpenLAB CDS工作站,安捷伦科技有限公司);Venusil XBP-C<sub>18</sub>(L)色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm,天津博纳艾杰尔科技有限公司);3K15高速冷冻离心机(德国Sigma公司)。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 糖醋排骨香精的制备<sup>[24]</sup>

将猪肉切成2 cm左右见方的肉块,进绞肉机绞成肉馅,按m(猪肉馅):m(水)=1:2的比例混匀,加热搅拌,待温度达到50℃时,加入0.2%(占肉馅的质量百分数)的动物蛋白酶酶解3 h,酶解结束后,迅速升温至90℃,维持10 min以灭酶活,得猪肉蛋白酶解液。

将猪棒骨放入碎骨机中粉碎,得到的碎骨颗粒直径为74~150 μm,按m(碎骨):m(冰)=2:1的比例混匀入骨泥磨,得到骨泥。按照m(骨泥):m(水)=1:1的比例加入水并混合均匀,加热搅拌,待温度达到50℃时,加入0.2%(占骨泥的质量百分数)的动物蛋白酶酶解3 h,酶解结束后,迅速升温至90℃,维持10 min以灭酶活,得猪骨泥酶解液。

将热反应原料加入三角瓶中混合均匀,放入灭菌锅中于0.11 MPa, 121℃条件下反应15 min,即得到膏状糖醋排骨香精。热反应原料为:4.40 mL醋、7.60 g蔗糖、5.00 g葡萄糖、1.00 g木糖、0.90 g酵母膏、7.20 g猪骨油、1.35 g植物水解蛋白液(HVP液)、0.16 g呈味核苷酸钠(I+G)、0.27 g硫胺素(VB<sub>1</sub>)、0.73 g半胱氨酸、0.73 g谷氨酸、0.73 g精氨酸、0.73 g脯氨酸、辛香料复合包:m(八角):m(桂皮):m(肉蔻):m(小茴香):m(白芷):m(香叶):m(山柰):m(陈皮):m(鼠尾草)=4:1:4:8:8:1:2:2:8(添加量为香精整体质量的0.10%)、18.75 g猪骨泥酶解液、18.75 g猪肉蛋白酶解液。热反应条件:0.11~0.12 MPa, 121~123℃, 15 min。

#### 2.2.2 标准溶液的配制

精确称取5-HMF标准品0.0286 g,用超纯水溶解,定容到100 mL的容量瓶中,得286 μg/mL的5-HMF标准品储备液,于4℃条件下避光保存。

#### 2.2.3 样品溶液的配制

将香精样品于4℃冷藏静置过夜,然后取样品20 g,于4℃,9600 r/min条件下离心10 min去除油脂层,重复3次,得脱脂液。取脱脂液和甲醇按1:1(V:V)的比例混合,静

置 10 min, 9600 r/min, 4 °C 条件下离心 30 min, 沉淀蛋白, 取上清液。上清液经 0.45 μm 滤膜过滤后, 用于高效液相色谱测定分析。

#### 2.2.4 测定条件

色谱条件为: Venusil XBP-C<sub>18</sub> 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm); 柱温为 30 °C; UV 检测器, 检测波长为 284 nm; 流动相为 5%(体积百分含量)的甲醇水溶液, 等梯度洗脱; 流速为 1.0 mL/min; 进样量为 20 μL。

### 3 结果与分析

#### 3.1 色谱流动相的优化

选取 5%、10%和 15%(V:V)的甲醇-水溶液作为流动相进行优化, 结果表明, 在 284 nm 的检测波长下, 流动相流速为 1.0 mL/min, 以 5%的甲醇-水溶液作为流动相进行等

梯度洗脱时, 5-HMF 标准溶液的色谱峰图形较好。5-HMF 标准溶液及自制糖醋排骨香精提取液的高效液相色谱图如图 1 和图 2 所示。由图 2 可以看出, 选定的色谱测定条件能够很好地分离被测样品中的 5-HMF。

#### 3.2 标准曲线和线性范围

将 286 μg/mL 的 5-HMF 标准品储备液用超纯水逐级稀释为 40、20、10、5、2.5、1.25、0.63、0.16 和 0.13 μg/mL 的标准品溶液。将上述标准品溶液用 0.45 μm 的水系微孔滤膜过滤后, 进行 HPLC 分析, 每个浓度的标准品溶液重复进样 3 次, 取结果的平均值。以 5-HMF 浓度为横坐标, 5-HMF 对应的色谱峰面积为纵坐标作图, 得到标准曲线如图 3 所示, 线性回归方程为  $Y=719.03X+83.834$ ,  $r^2=0.9999$ 。结果表明, 在 5-HMF 的浓度为 0.16~40.00 μg/mL 的范围内, 5-HMF 的浓度与峰面积呈良好的线性关系。

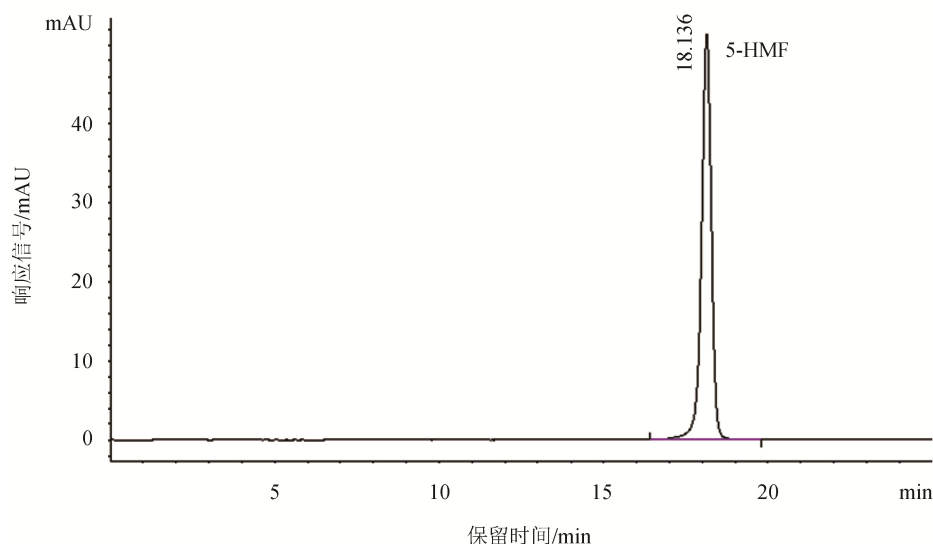


图 1 5-HMF 标准溶液的高效液相色谱图

Fig. 1 The high performance liquid chromatogram of 5-HMF standard solution

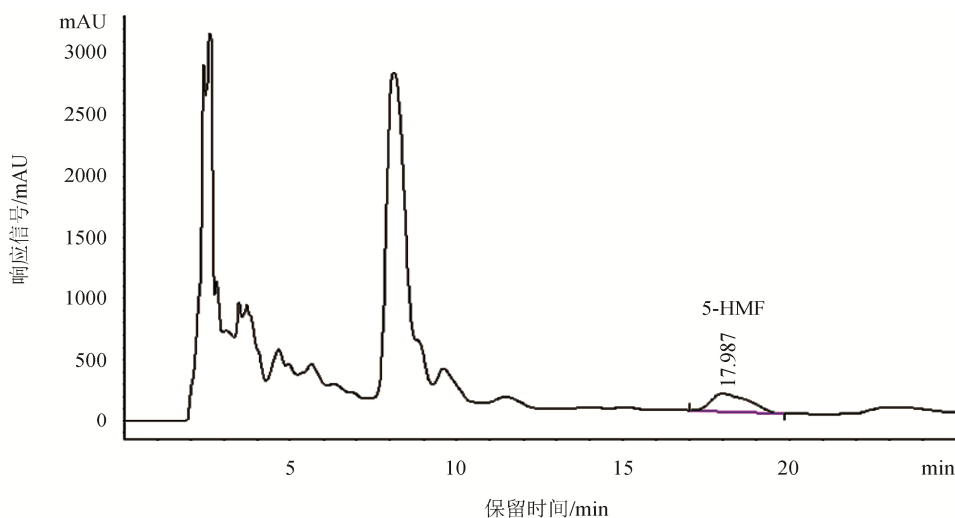


图 2 自制糖醋排骨香精提取液的高效液相色谱图

Fig. 2 The high performance liquid chromatogram of extract from homemade sweet and sour spareribs flavor

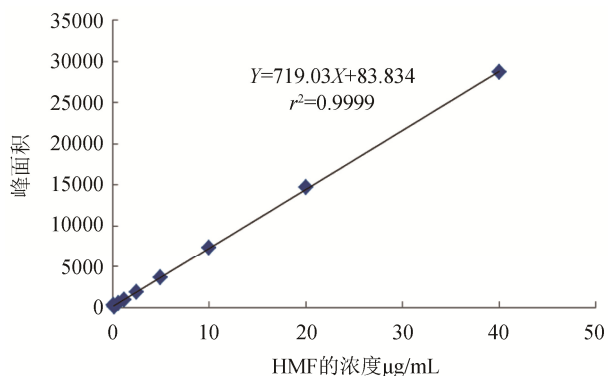


图 3 5-HMF 的标准曲线

Fig. 3 Standard curve of 5-HMF

### 3.3 方法的检出限和定量限

以信噪比  $S/N=3$  时信号响应值对应的浓度作为检出限(detection limit, LOD), 以  $S/N=10$  时信号响应值对应的浓度作为定量限(limit of quantitation, LOQ)。进行 9 次平行实验, 得到本测定方法中 5-HMF 的  $LOD=0.3525 \mu\text{g/L}$ ,  $LOQ=2.82 \mu\text{g/L}$ 。

### 3.4 方法的重复性

将糖醋排骨香精样品重复取样 3 次, 每次 1.0 mL, 每个样品平行进样 3 次, 分别按“2.2.4”中的色谱条件对 5-HMF 进行测定, 计算所测含量间的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD), 考察方法的重复性, 结

果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 3 个样品的测定结果间的 RSD 均小于 5%, 表明方法的重复性良好。

表 1 方法的重复性考察( $n=3$ )  
Table 1 Repeatability of the method ( $n=3$ )

样品编号	5-HMF 含量(mg/kg)			RSD(%)	平均 RSD(%)
1	7.28	7.68	7.57	2.78	1.59
2	7.99	8.08	8.11	0.77	
3	7.78	7.93	7.76	1.21	

### 3.5 精密度实验

在室温条件下, 将浓度为 2.86 mg/L、0.286 mg/L 和 0.03525 mg/L 的 5-HMF 标准品溶液进行色谱分析, 每个浓度的样品连续进样 6 次, 结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 3 个浓度样品 5-HMF 峰面积的测定结果间的 RSD 均小于 5%, 表明方法的精密度良好。

### 3.6 加标回收率实验

取已知 5-HMF 浓度的糖醋排骨香精样品共 9 份, 分别加入 0.8、0.8、0.8、1.0、1.0、1.0、1.2、1.2 和 1.2 mL 的 5-HMF 标准品溶液( $286 \mu\text{g/mL}$ )进行色谱分析, 测定香精样品中 5-HMF 的含量。根据测定结果, 计算 5-HMF 的加标回收率, 如表 3 所示。从表 3 中可以看出, 5-HMF 的回收率在 80%~120% 范围内, 测定结果间的 RSD 小于 5%, 表明方法的准确度较好。

表 2 方法的精密度考察( $n=6$ )  
Table 2 Precision of the method ( $n=6$ )

5-HMF 浓度 (mg/L)	5-HMF 峰面积						RSD(%)	平均 RSD(%)
	1	2	3	4	5	6		
2.86	1072.80	1091.76	1112.71	1127.05	1140.09	1148.42	2.60	1.34
0.286	125.16	124.09	125.55	124.66	124.66	125.53	0.46	
0.03525	13.83	14.12	13.89	13.87	13.96	14.14	0.95	

表 3 5-HMF 的回收率( $n=3$ )  
Table 3 The recoveries of 5-HMF ( $n=3$ )

试验号	样品溶液体积/mL	样品中 5-HMF 含量/ $\mu\text{g}$	5-HMF 加入量/ $\mu\text{g}$	5-HMF 的测定量/ $\mu\text{g}$	平均回收率/%	RSD 平均值(%)
1	1	4.93	228.80	211.82	86.89	2.96
2	1	5.48	228.80	213.49		
3	1	5.13	228.80	212.73		
4	1	5.42	286.00	251.98		
5	1	5.26	286.00	248.35		
6	1	5.50	286.00	250.37		
7	1	5.21	343.20	295.00		
8	1	5.28	343.20	291.17		
9	1	5.38	343.20	298.52		

表 4 样品中 5-HMF 的含量( $n=3$ )  
Table 4 The contents of 5-HMF in samples ( $n=3$ )

编号	1	2	3	4	5	5-HMF 的平均含量 (mg/kg)	平均 RSD (%)
猪肉香精	3.41±0.07 <sup>a</sup>	3.31±0.15 <sup>b</sup>	n.d.	6.29±0.01 <sup>c</sup>	2.74±0.04 <sup>d</sup>	3.94	2.03
牛肉香精	2.06±0.06 <sup>f</sup>	3.09±0.03 <sup>h</sup>	2.45±0.05 <sup>i</sup>	13.91±0.02 <sup>j</sup>	5.12±0.08 <sup>k</sup>	5.32	1.48
鸡肉香精	5.36±0.12 <sup>a</sup>	8.92±0.16 <sup>c</sup>	14.31±0.13 <sup>d</sup>	2.96±0.03 <sup>j</sup>	15.33±0.57 <sup>n</sup>	9.38	1.92
糖醋排骨香精			7.80±0.13			7.80	1.65

注: n.d. 为未检出; 5-HMF 的含量采用(平均值±标准偏差)表示; 同一行标有不同字母的数值间的差异显著( $P<0.05$ )。

### 3.7 样品测定

将猪肉香精、牛肉香精、鸡肉香精及糖醋排骨香精样品分别按照“2.2.3”中的实验条件制备样品提取液, 用高效液相色谱法测定样品中 5-HMF 的含量, 结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出, 猪肉、牛肉和鸡肉香精样品中 5-HMF 的含量在 0~15.33 mg/kg 之间, 这可能是由香精制备过程中的原料、热处理方式、pH、加热温度和加热时间等的不同而造成的。自制糖醋排骨香精中 5-HMF 的含量高于所测定的 15 种市售肉味香精中的 11 种, 其原因可能是由于糖醋排骨香精的制作过程中重用糖和醋<sup>[25]</sup>, 并在高温条件下通过美拉德反应制得, 这有利于糖类化合物在高温或弱酸性条件下水解产生呋喃类化合物, 形成 5-HMF。

## 4 结论

本研究采用高效液相色谱法测定肉味香精中 5-HMF 的含量, 选定的检测条件为: 以甲醇-水溶液(5:95, V:V)为流动相, 流速为 1.0 mL/min, 色谱柱为 Venusil XBP-C<sub>18</sub>, 柱温 30 °C, UV 检测器的检测波长为 284 nm。5-HMF 在 0.16~40.00 µg/mL 的浓度范围内, 其浓度与峰面积呈良好的线性关系,  $r^2=0.9999$ , 方法的检出限为 0.3525 µg/L, 定量限为 2.82 µg/L。方法的准确度和精密度较好, 能够满足样品测定的要求。定量分析结果表明, 自制糖醋排骨香精中 5-HMF 的含量为 7.80 mg/kg, 市售猪肉、牛肉和鸡肉香精中 5-HMF 的平均含量分别为 3.94、5.32 和 9.38 mg/kg, 且测定结果间的 RSD 平均值为均小于 5%。本研究确定的高效液相色谱检测条件能够实现肉味香精中 5-HMF 的定量分析, 为相关香精样品的生产提供一定的理论依据。

### 参考文献

- [1] 章银良, 周文权. 美拉德反应产物 5-羟甲基糠醛含量与抗氧化活性关系研究[J]. 中国调味品, 2013, 38(1): 36-40.  
Zhang YL, Zhou WQ. Investigation of the correlation between content and antioxidant activities of Maillard reaction product-5-HMF [J]. China Condiment, 2013, 38(1): 36-40.
- [2] Chen L, Huang H, Liu W, et al. Kinetics of the 5-hydroxymethylfurfural

formation reaction in Chinese rice wine [J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(6): 3507-3511.

- [3] 钟恋, 汪云伟, 杨诗龙, 等. 地黄酒炖过程化学成分及“味”的关系[J]. 中成药, 2015, 37(5): 1041-1044.  
Zhong L, Wang YW, Yang SL, et al. Connection of stewing *Rehmanniae Radix* with wine and its “taste” [J]. Chin Tradit Patent Med, 2015, 37(5): 1041-1044.
- [4] Ajlouni S, Sujirapinyokul P. Hydroxymethylfurfuraldehyde and amylase contents in Australian honey [J]. Food Chem, 2010, 119(3): 1000-1005.
- [5] 龙光明, 裘璐, 马丽, 等. HPLC 测定 6 种蜂蜜中 5-羟甲基糠醛的含量 [J]. 数理医药学杂志, 2012, 25(6): 643-645.  
Long GM, Qiu L, Ma L, et al. Determination of 5-HMF content in 6 different kinds of honey by HPLC [J]. J Math Med, 2012, 25(6): 643-645.
- [6] Akpınar K, Karakaş B, Akça H, et al. Determination of HMF in roasted flour/oil mixtures and effect of solvent used in the extraction procedure [J]. Food Chem, 2011, 128(3): 790-794.
- [7] 李惠安, 伍伯良, 许永苗, 等. 5-羟甲基糠醛在 F-55 果葡糖浆贮存过程中的变化研究[J]. 食品工程, 2014, (2): 39-41.  
Li HA, Wu BL, Xu YM, et al. Research on the changes of 5-hydroxymethyl furfural during the F55-fructose syrup storage [J]. Food Eng, 2014, (2): 39-41.
- [8] 张玉玉, 张兴, 章慧莺, 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 3 kinds of monosaccharide solution model system during thermal processing [J]. Food Sci, 2014, 35(17): 41-47.
- [9] Lalou S, Hatzidimitriou E, Papadopoulou M. Beyond traditional balsamic vinegar: compositional and sensorial characteristics of industrial balsamic vinegars and regulatory requirements [J]. J Food Compos Anal, 2015, 43: 175-184.
- [10] 伊魁宇, 曹焱鑫, 李继民, 等. 分光光度法测定酱油中 5-羟甲基糠醛的研究[J]. 化学通报(印刷版), 2014, 77(3): 282-284.  
Yi KY, Cao YX, Li JM, et al. Determination of 5-hydroxymethylfurfural in soy by the method of derivative spectrophotometry [J]. Chem, 2014, 77(3): 282-284.
- [11] 周逸群, 贺福元, 杨岩涛, 等. 美拉德反应研究现状及对中药炮制和制剂工艺研究方法的影响[J]. 中草药, 2014, 45(1): 125-130.  
Zhou YQ, He FY, Yang YT, et al. Research situation of Maillard reaction and its influence on research methods for processing and preparation

- process of Chinese materia medica [J]. *Chin Tradit Herbal Drugs*, 2014, 45(1): 125–130.
- [12] 郑文华, 许旭. 美拉德反应的研究进展[J]. *化学进展*, 2005, 17(1): 122–129.  
Zheng WH, Xu X. Research progress on Maillard reaction [J]. *Prog Chem*, 2005, 17(1): 122–129.
- [13] Serra-Cayuela A, Castellari M, Bosch-Fust J, *et al.* Identification of 5-hydroxymethyl-2-furfural(5-HMF) in Cava sparkling wines by LC-DAD-MS/MS and NMR spectrometry [J]. *Food Chem*, 2013, 141: 3373–3380.
- [14] Oral R A, Mortaş M, Doğan M, *et al.* New approaches to determination of HMF [J]. *Food Chem*, 2014, 143: 367–370.
- [15] Anese M, Suman M. Mitigation strategies of furan and 5-hydroxymethylfurfural in food [J]. *Food Res Int*, 2013, 51(1): 257–264.
- [16] GB/T 18796-2005 食品安全国家标准 蜂蜜[S].  
GB/T 18796-2005 National food safety standard-Honey [S].
- [17] GB/T 18963-2012 食品安全国家标准 浓缩苹果汁[S].  
GB/T 18963-2012 National food safety standard-Apple juice concentrate [S].
- [18] Kumar G, Sivagurunathan P, Kobayashi T, *et al.* Simultaneous removal of 5-hydroxymethylfurfural(5-HMF) and hydrogen production from acid(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) pretreated red-algal hydrolysate via hybrid immobilized cells [J]. *Algal Res*, 2015, 11: 326–333.
- [19] 黄晓雯, 冯笑军. 固相萃取-高效液相色谱法测定酱油专用焦糖中 5-羟甲基糠醛和糠醛 [J]. *中国酿造*, 2014, 33(1): 133–136.  
Huang XW, Feng XJ. Determination of 5-hydroxymethyl furfural and furfural in caramel for soy sauce by SPE-HPLC [J]. *China Brew*, 2014, 33(1): 133–136.
- [20] 王露露, 董蕊, 范超, 等. 蜂王浆在贮藏过程中 5-羟甲基糠醛、10-羟基-2-癸烯酸及精氨酸双糖苷含量的变化[J]. *食品科学*, 2016, 37(2): 271–275.  
Wang LL, Dong R, Fan C, *et al.* Changes in the contents of 5-HMF, 10-HDA and AFG in royal jelly during storage [J]. *Food Sci*, 2016, 37(2): 271–275.
- [21] 张乐, 潘欢欢, 刘飞, 等. 白术麸炒过程中 5-羟甲基糠醛的含量变化规律及其与饮片温度颜色变化的相关性分析[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2016, 17: 21–24.  
Zhang L, Pan HH, Liu F, *et al.* Content variation of 5-hydroxymethylfurfural in bran-frying process of atractylodis macrocephalae rhizoma and its correlation with temperature and color changes of decoction pieces [J]. *Chin J Exp Tradit Med Formul*, 2016, 17: 21–24.
- [22] 郭欢迎, 耿庆光, 王嫦鹤, 等. 右旋糖酐 40 葡萄糖注射液 pH 值与 5-羟甲基糠醛、糠醛含量的相关性分析[J]. *中国药物警戒*, 2015, (10): 611–613.  
Guo HY, Geng QG, Wang CH, *et al.* Correlation analysis of furfural, 5-hydroxymethylfurfural content and pH value of dextran 40 and glucose injection [J]. *Chin J Pharmacov*, 2015, 10: 611–613.
- [23] 张玉玉, 张兴, 章慧莹, 等. 双糖体系中 5-羟甲基糠醛的形成动力学分析[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(3): 93–100.  
Zhang YY, Zhang X, Zhang HY, *et al.* Analysis of the formation kinetics on 5-hydroxymethylfurfural in disaccharide system during thermal processing [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(3): 93–100.
- [24] 张玉玉, 孙颖, 赵静, 等. 应用逐级正交优化排骨汤香精制备工艺[J]. *精细化工*, 2016, (7): 803–810.  
Zhang YY, Sun Y, Zhao J, *et al.* Sequential orthogonal optimization of thermal reaction technology for pork ribs soup flavoring [J]. *Fine Chem*, 2016, (7): 803–810.
- [25] 高原菊. 糖醋排骨制作工艺优化研究[J]. *四川旅游学院学报*, 2015, (3): 18–21.  
Gao YJ. Study on the optimization of preparation process of sweet and sour spareribs [J]. *J Sichuan Tour Coll*, 2015, (3): 18–21.

(责任编辑: 刘丹)

## 作者简介



张莉莉, 硕士研究生, 主要研究方向为食用香料化学及其应用。  
E-mail: 1505933693@qq.com



张玉玉, 博士, 副教授, 主要研究方向为食用香料化学及其应用。  
E-mail: zhangyy2@163.com