DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2020.10.005

L-半胱氨酸盐酸盐对饼干中 4 种有害醛类和荧光晚期糖基化终产物的影响

Effect of L-cysteine hydrochloride on the contents of four toxic aldehydes and fluorescent AGEs in biscuits

翁 婷 郑 洁 黄才欢 欧仕益

WENG Ting ZHENG Jie HUANG Cai-huan OU Shi-yi

(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:将食品添加剂 L-半胱氨酸盐酸盐添加到面团中制作饼干,研究了添加不同量(0.3,0.6,1.0,1.5 g/kg)的 L-半胱氨酸盐酸盐对饼干外观、4 种有害醛类和荧光晚期糖基化终产物(AGEs)含量的影响。结果表明:L-半胱氨酸盐酸盐能使饼干色泽变亮,pH 小幅下降。L-半胱氨酸盐酸盐显著降低 5-羟甲基糠醛(HMF)、3-脱氧葡萄糖醛酮(3-DG)、乙二醛(GO)、丙酮醛(MGO)和荧光 AGEs 含量且呈剂量效应。当 L-半胱氨酸盐酸盐的添加量为 0.3 g/kg 时,饼干中 HMF、3-DG、GO 和 MGO 含量分别降低 84.7%,13.7%,82.0%,72.1%,荧光 AGEs 降低 8.9%。

关键词:L-半胱氨酸盐酸盐;饼干;3-脱氧葡萄糖醛酮;乙二醛;丙酮醛;5-羟甲基糠醛;晚期糖基化终产物

Abstract: In the current study, different levels of L-cysteine hydrochloride (0.3, 0.6, 1.0, 1.5 g/kg) were incorporated in dough for the preparation of biscuits to investigate the effect of L-cysteine on the appearance and the content of four toxic aldehydes and fluorescent advanced glycation end products(AGEs) in biscuits. The results showed that the addition of L-cysteine hydrochloride brightened the color of the biscuits, and cause a slight decrease in pH values. The incorporation of L-cysteine hydrochloride significantly decreased the content of 5-hydroxymethyl furfural(HMF), 3-deoxyglucosone(3-DG), glyoxal(GO), methylglyoxal(MGO) and fluorescent AGEs in biscuits in a dose-dependent manner. The addition of L-cysteine at the level of 0.3 g/kg decreased the contents of HMF, 3-DG, GO, MGO and fluorescent AGEs in biscuits by 84.7%, 13.7%, 82.0%, 72.1%, and 8.9% respectively.

Keywords: L-cysteine hydrochloride; biscuit; 3-deoxyglucosone; glyoxal; methylglyoxal; 5-hydroxymethyl furfural; advanced glycation end products

L-半胱氨酸盐酸盐是一种无色至白色结晶或结晶性粉末,有轻微特殊气味和酸味。对亚硝酸盐具有一定的清除能力[1],具有抗氧化和防酶促褐变作用,能通过延缓龙眼氧化而保持果实品质[2]。L-半胱氨酸盐酸盐能够减轻愈伤组织的褐变[3],具有防止或推迟褐变的作用[4-5]。美拉德反应香精制备中,L-半胱氨酸盐酸盐能赋予肉香味并降低产品颜色[6]。

同时,L-半胱氨酸盐酸盐还是面粉改良剂[7]。饼干是常见的烘焙食品之一,其主要成分还原糖和蛋白质(氨基酸)在烘焙过程中发生美拉德反应赋予饼干独特的色、香、味,但同时会伴随一些有害物质的产生,如 5-羟甲基糠醛、α-二羰基化合物和晚期糖基化终末产物(AGEs)[8-9]等。5-羟甲基糠醛对人体黏膜、横纹肌和内脏具有刺激和损伤作用,具有基因毒性和遗传毒性,且是衡量食品褐变的指标[10-13]。典型的 α-二羰基化合物,如 3-脱氧葡萄糖醛酮(3-DG)、乙二醛(GO)、丙酮醛(MGO)是 AGEs 的主要前体物质[14]。α-二羰基化合物不仅存在于食品中,还在人体中产生,与一些慢性或者老年化疾病有关,如动脉粥样硬化[15]、糖尿病[16]、阿尔茨海默症[17]等疾病。还原性物质能够有效抑制 GO、MGO 和 AGEs 的形成[18-19]。课题组[20]36-46[21]前期研究表明,半胱氨酸在生理条件下能与 HMF、3-DG、GO、MGO 形成加合物并降低细胞毒性。L-半胱氨酸盐酸盐应用在韧性饼干中用来改良其品质[22],但是否能有效降低以上有害醛类和荧

基金项目:广州市民生科技攻关计划(编号:201903010004);国家自然科学基金项目(编号:31671957)

作者简介:翁婷,女,暨南大学在读硕士研究生。

通信作者:欧仕益(1963—),男,暨南大学教授,博士。

E-mail: tosy@jnu.edu.cn

收稿日期:2020-06-07

光 AGEs 还未见报道。

研究拟将不同剂量的 *L*-半胱氨酸盐酸盐添加至面团中，研究其对饼干外观和有害物质 HMF、3-DG、GO、MGO、荧光 AGEs 含量的影响，以期为 *L*-半胱氨酸盐酸盐在烘焙食品中的应用提供有益指导。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

1.1.1　材料与试剂

低筋小麦粉：潍坊风筝面粉有限责任公司；

棕榈油：广州珠烽进出口贸易有限公司；

蔗糖、氯化钠、碳酸氢钠、碳酸氢铵、乙醇、邻苯二胺：分析纯，天津大茂有限公司；

5-羟甲基糠醛：纯度 98%，北京百灵威科技有限公司；

乙二醛、丙酮醛：质量分数 40%水溶液，北京百灵威科技有限公司；

3-脱氧葡萄糖醛酮：加拿大 TRC 有限公司。

1.1.2　仪器与设备

pH 计：FE22 型，梅特勒—托利多仪器（上海）有限公司；

微型旋涡混合仪：XW-80A 型，上海沪西分析仪器厂；

高效液相色谱仪：LC-20AT 型，日本岛津公司；

色谱柱：ZORBAX SB-Aq 型，4.6 mm × 250 mm，5 μm，美国安捷伦有限公司；

压面机：WA-BYM-15SFT 型，江苏无锡市麦威电器有限公司。

1.2　方法

1.2.1　饼干的制备

（1）配方：根据 Zou 等[23]的配方略有修改（见表 1）。

（2）制作步骤：先将氯化钠、蔗糖、碳酸氢铵、碳酸氢钠和半胱氨酸盐酸盐分别溶于水中，再加油混合均匀，然后加入小麦粉制备成面团。*L*-半胱氨酸盐酸盐的添加量分别为 0.0，0.3，0.6，1.0，1.5 g/kg，将面团用压面机辊压 3 次，制成厚度为 3 mm 的面皮，再用饼干模具制成长 48 mm 和宽 36 mm 大小的饼干，置于预热 30 min 后的烤箱中，在 190 ℃下分别烘焙 10 min 和 15 min 后放置在干燥器中保存。

1.2.2　饼干 pH 与色度的测定　将 1 g 烘焙 10 min 的饼干磨碎，在 15 mL 水中超声 60 min，然后在室温下静置 1 h，用 pH 计测其上清液的 pH 值，每处理重复 3 次。

表 1　饼干配料

Table 1　Biscuit ingredients　　g

小麦粉	棕榈油	蔗糖	氯化钠	碳酸氢钠	碳酸氢铵	水
120	30	52.5	1.5	1.2	0.6	24

将焙烤 10 min 的饼干冷却至室温后，使用白度仪检测饼干的 L^*（亮度）、a^*（红色/绿色）和 b^*（黄色/蓝色），每处理重复 5 次。

1.2.3　HMF 的测定　将 1 g 烘焙 15 min 的饼干磨碎，在 20 mL 水中涡旋 5 min 充分混匀，10 000 r/min 离心 10 min，再加入 10 mL 水按重复提取一次，收集上清液用 0.22 μm 滤膜过滤。根据 Huang 等[24]的程序进行 HPLC 分析，分离操作在 ZORBAX SB-Aq 柱上进行，采用 5%的甲醇溶液等度洗脱 25 min。样品进样体积 10 μL，流速 0.6 mL/min，柱温 40 ℃。HMF 在284 nm 处检测的标准曲线的回归方程为 $Y = 106\ 862X + 1\ 767\ 141$（$R^2 = 0.997$，线性范围 10～600 μg/mL）。每处理重复 3 次。

1.2.4　GO、MGO、3-DG 的检测　采用衍生法（形成喹喔啉衍生物）、HPLC 检测。将 1 g 烘焙 15 min 的饼干磨碎，在 20 mL 水中涡旋 5 min 充分混匀，10 000 r/min 离心 10 min，再加入 10 mL 水重复提取一次。取 1 mL 上清液与 100 μL 邻苯二胺溶液（1.08 g OPD 溶于 10 mL 甲醇中）涡旋 1 min 混合均匀，置于60 ℃ 的水浴锅中避光衍生 24 h，将衍生完的溶液通过0.22 μm 滤膜过滤，根据 Ou 等[25]的方法稍作修改进行 HPLC 分析，样品分离在 ZORBAX SB-Aq 柱上进行，流动相 A 为 0.1%乙酸—水，流动相 B 为甲醇，梯度洗脱，梯度程序设置：B＝28%～43%，0.00 ～ 15.00 min；B ＝ 43% ～ 75%，15.01 ～ 30.00 min；B＝75%，30.01～35.00 min。进样量 50 μL，流速 1 mL/min，柱温 40 ℃。在 314 nm 处对 GO、MGO 和 3-DG 进行定量检测，分别绘制 GO、MGO 和 3-DG 的标准曲线进行定量，其中 GO 的浓度设置为 0.01，0.10，0.20，0.30，0.40 μmol/mL，MGO 浓度为 0.1，0.2，0.4，0.6，0.8，1.0 μmol/mL，3-DG 浓度为 10，20，40，60，80，100 μg/mL，得到 GO、MGO 和 3-DG 的标准曲线回归方程如下：GO 为 $Y = 13\ 061\ 332X + 47\ 122$（$R^2 = 1.000$，线性范围 0.01～0.40 μmol/mL）；MGO 为 $Y = 9\ 535\ 572X + 22\ 714$（$R^2 = 1.000$，线性范围 0.1～1.0 μmol/mL）；3-DG 为 $Y = 96\ 487X - 45\ 331$（$R^2 = 0.998$，线性范围 10～100 μg/mL）。每处理重复 3 次。

1.2.5　荧光 AGEs 的测定　将 1 g 烘焙 10 min 的饼干磨碎，在 5 mL 水中超声 20 min，10 000 r/min 离心20 min，收集上清液。沉淀用 2 mL 水再提取两次，合并上清液后用 0.45 μm 滤膜过滤，用水定容至 10 mL。将上清液注入 96 孔黑色平板，每孔 100 μL。参照 Sadowska-Bartosz 等[26]的方法，分别在 325/440，330/415，365/480，325/434 nm（激发波长/发射波长）下检测荧光 AGEs、二酪氨酸、犬尿氨酸和 *N*-甲酰犬尿氨酸。每处理重复 9 次。

1.3　数据处理

每次处理重复 3 次以上，运用 SPSS 进行显著性分

析，使用单因素方差分析（ANOVA）中 Duncan 进行检验（$P<0.05$），使用 Excel 进行数据处理分析。

2　结果与分析

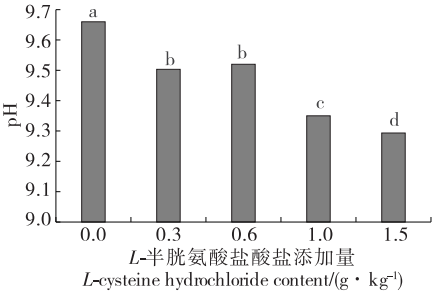
2.1　L-半胱氨酸盐酸盐对饼干 pH 与色度的影响

由图 1 可知，饼干的 pH 随 L-半胱氨酸盐酸盐添加量的增加呈下降趋势，pH 值从 9.7 下降至 9.3，说明添加剂呈酸性能中和一部分面团中的碱。虽然饼干的 pH 值随 L-半胱氨酸盐酸盐的添加有小幅降低，但数值依然在偏碱性范围内。

褐变是饼干在烘焙时的主要变化之一，不仅影响产品外观，还影响口感风味。研究[27]发现，L-半胱氨酸盐酸盐的添加会使酥性饼干品质变好。由图 2 可知，饼干的 L^* 值随 L-半胱氨酸盐酸盐添加量的增加而增加，而 a^* 值和 b^* 值随添加量的增加而下降。说明 L-半胱氨酸盐酸盐的增加使饼干红度和黄度下降，白度增加，即饼干在烘焙时呈更亮的颜色。L-半胱氨酸能与褐变产生的醌类反应生成无色化合物[28]，所以添加 L-半胱氨酸盐酸盐可以在一定程度上改善饼干的色泽。

2.2　L-半胱氨酸盐酸盐对 HMF 的影响

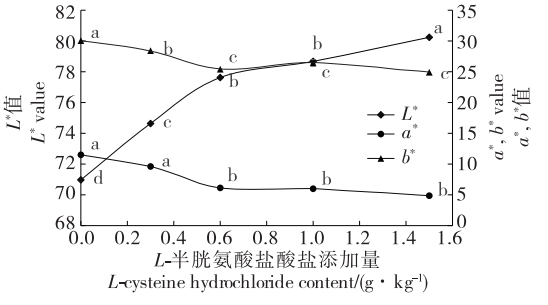
HMF 是烘焙产品经热加工产生的主要有害物质之一，常常用作焙烤食品的质量指标。模拟生理条件下，L-半胱氨酸可与 HMF 生成加合物从而消除 HMF 并降低 HMF 带来的毒性[20]39-46。由图 3 可知，L-半胱氨酸盐酸盐可降低饼干中 HMF 含量，当添加量达 0.3 g/kg 后，HMF 显著下降，降低幅度达 84.7%（$P<0.05$）。继续增加 L-半胱氨酸盐酸盐的添加量，HMF 降低缓慢，当添加量达 1.5 g/kg 后，HMF 下降 94.3%。在组成蛋白质的氨基酸中，L-半胱氨酸除了有氨基外还有一个巯基，更易与 HMF 发生 Michael 加成反应[29]。所以添加 L-半胱氨酸盐酸盐可显著降低饼干中的 HMF 含量。



小写字母不同代表样品间存在显著性差异（$P<0.05$）

图 1　L-半胱氨酸盐酸盐对饼干 pH 的影响

Figure 1　Effect of L-cysteine hydrochloride on pH in biscuits



小写字母不同代表样品间存在显著性差异（$P<0.05$）

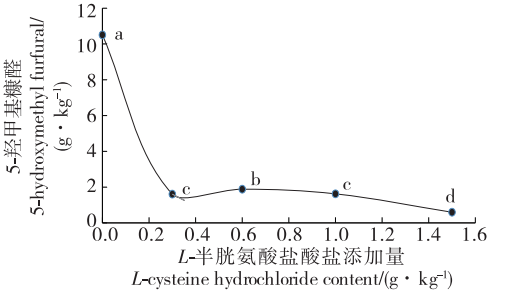
图 2　L-半胱氨酸盐酸盐对饼干色度的影响

Figure 2　Effect of L-cysteine hydrochloride on the color parameters of biscuits

2.3　L-半胱氨酸盐酸盐对 GO、MGO、3-DG 的影响

二羰基化合物 GO、MGO、3-DG 等化学性质非常活泼，可与蛋白质反应形成 AGEs、丙烯酰胺、甲基咪唑等，危害人体健康，是热加工食品中需要控制的有害物质[30]。

由表 2 可知，饼干中会产生较多的 3-DG 和 MGO，而 L-半胱氨酸盐酸盐的添加可显著减少饼干中 3-DG、GO 和 MGO 的含量，并存在剂量依赖关系。当 L-半胱氨酸盐酸盐的添加量为 0.3 g/kg 时，GO 和 MGO 含量显著下降，分别减少了 82.0% 和 72.1%（$P<0.05$），3-DG 含量下降了 13.7%。添加量增加至 1.5 g/kg 时，GO 和 MGO 含量分别下降了 89.6% 和 85.0%，3-DG 含量虽然只下降了 69%，但总量下降了 704.2 mg/kg，说明 L-半胱氨酸盐酸盐能有效清除饼干中 GO、MGO 和 3-DG。



小写字母不同代表样品间存在显著性差异（$P<0.05$）

图 3　L-半胱氨酸盐酸盐对饼干中 HMF 的影响

Figure 3　Effect of L-cysteine hydrochloride on HMF in biscuits

表 2　L-半胱氨酸盐酸盐对饼干中 3-DG、GO、MGO 的影响†

Table 2　Effect of L-cysteine hydrochloride on 3-DG, GO, and MGO in biscuits

L-半胱氨酸盐酸盐添加量/(g·kg⁻¹)	3-DG/(mg·kg⁻¹)	GO/(mg·kg⁻¹)	MGO/(mg·kg⁻¹)
0.0	1 021.0±17.8^a	280.3±9.6^a	1 191.0±26.7^a
0.3	881.5±11.9^b	50.5±0.4^b	332.7±4.1^b
0.6	531.3±5.1^c	47.1±0.5^{bc}	342.8±8.8^b
1.0	479.1±1.2^d	41.9±0.3^c	289.6±4.8^c
1.5	316.8±1.5^e	29.2±0.3^d	178.3±5.6^d

†　同列字母不同代表差异显著（$P<0.05$）。

推测 *L*-半胱氨酸盐酸盐降低二羰基化合物含量有两种机制：① 美拉德反应初期，半胱氨酸与 Amadori 产物反应，阻止了 Amadori 产物的分子重排，抑制美拉德反应，从而减少了二羰基化合物的产生[31]；② GO、MGO 和 3-DG 等二羰基化合物形成后，半胱氨酸可与其形成加合物，从而降低其含量[21]。

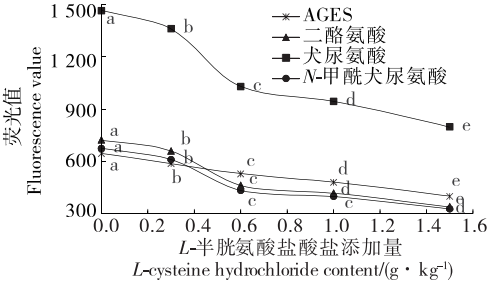
2.4 *L*-半胱氨酸盐酸盐对荧光 AGEs 的影响

食品在高温加工过程中，二羰基化合物会与蛋白质上的一些氨基酸残基如赖氨酸、精氨酸反应形成 AGEs，包括荧光和非荧光 AGEs。荧光 AGEs 主要有乙二醛赖氨酸二聚体、丙酮醛赖氨酸二聚体、戊糖素、FFI、fluorolink、vesperlysineA-C 等，非荧光 AGEs 主要有羧甲基赖氨酸、羧乙基赖氨酸等[32]。其中荧光 AGEs 常用于评价热加工食品 AGEs 形成水平的指标[33-34]。食品中的蛋白质也会发生氧化，产生有害物质并降低蛋白质的营养价值。氧化过程中，蛋白质色氨酸和酪氨酸残基被修饰产生荧光产物，主要有二酪氨酸、犬尿氨酸、*N*-甲酰犬尿氨酸，其可作为蛋白质氧化指标[26]。因此，采用荧光法研究 *L*-半胱氨酸盐酸盐对饼干中 AGEs 和蛋白质氧化的影响。

由图 4 可知，随着 *L*-半胱氨酸盐酸盐添加量的增加，AGEs、二酪氨酸、犬尿氨酸和 *N*-甲酰犬尿氨酸的荧光值均显著下降，且呈明显的量效关系。当 *L*-半胱氨酸盐酸盐的添加量为 0.3，0.6，1.0，1.5 g/kg 时，荧光 AGEs 分别减少了 8.9%，18.1%，25.5%，38.1%（$P<0.05$）。其作用机制可能是 *L*-半胱氨酸盐酸盐抑制了 AGEs 的前体二羰基化合物的产生。*L*-半胱氨酸盐酸盐对蛋白质氧化的抑制作用强于对荧光 AGEs 的抑制作用，当添加量为 1.5 g/kg 时，二酪氨酸、犬尿氨酸、*N*-甲酰犬尿氨酸分别减少了 53.0%，45.5%，51.4%（$P<0.05$），接近甚至超过了半抑制率。其原因可能是 *L*-半胱氨酸盐酸盐具有抗氧化活性，从而抑制了蛋白质中氨基酸的氧化。

3 结论

L-半胱氨酸盐酸盐在改善饼干外观的同时，还显著抑制饼干中活泼羰基化合物（HMF、3-DG、GO、MGO）和荧光 AGEs 形成，同时抑制蛋白质的氧化，且呈剂量效应，说明 *L*-半胱氨酸盐酸盐可应用于饼干制作中来控制其主要内源性化学污染物的产生。试验也证实了活泼羰基化合物与 *L*-半胱氨酸可形成加合物从而抑制 AGEs 的形成，且 *L*-半胱氨酸盐酸盐对内源性污染物具有高效的清除能力[21]。后续可进一步探讨 *L*-半胱氨酸盐酸盐的作用机理以及其对焙烤食品风味形成的影响，为 *L*-半胱氨酸盐酸盐在焙烤食品中的应用提供更多的科学依据。



小写字母不同代表样品间存在显著性差异（$P<0.05$）

图 4 *L*-半胱氨酸盐酸盐对饼干中荧光 AGEs 的影响

Figure 4 Effect of *L*-cysteine hydrochloride on the fluorescent substances in biscuits

参考文献

[1] 许苗苗. 净菜、泡菜贮藏过程中亚硝酸盐的变化及控制[D]. 泰安：山东农业大学，2010：33-44.

[2] LI Tao-tao，WU Qi-xian，ZHOU Yi-jie，et al. l-Cysteine hydrochloride delays senescence of harvested longan fruit in relation to modification of redox status[J]. Postharvest Biology and Technology，2018，143：35-42.

[3] 卢艳丽，周洪友，张笑宇. 马铃薯茎尖脱毒方法优化及病毒检测[J]. 作物杂志，2017(1)：161-167.

[4] 范敬华，林宏图. 运用 *L*-半胱氨酸维护维生素 C 效价的研究[J]. 河北医学，2007(3)：263-266.

[5] 宗红，诸葛斌，方慧英，等. 海南黄帝椒酶促褐变控制的研究[J]. 食品工业科技，2013，34(18)：202-205.

[6] 张根生，艾晓丽，何丽莹，等. 脱脂碎肉粉利用 Maillard 反应制备鸡肉香精的工艺研究[J]. 中国调味品，2011，36(12)：56-58.

[7] 李晴华. *L*-半胱氨酸盐酸盐对韧性饼干面团品质改良的作用[J]. 广州食品工业科技，1992(1)：35-39.

[8] 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，2017：3-6.

[9] MUIR D D. The maillard reaction-chemistry，biochemistry and implications[J]. International Journal of Dairy Technology，2007，60(1)：59.

[10] 王歌，曾睿，邱瑞霞，等. 5-羟甲基糠醛与氨基酸反应形成的风味物质[J]. 食品与机械，2018，34(8)：1-4，84.

[11] ABRAHAM K，GÜRTLER R，BERG K，et al. Toxicology and risk assessment of 5-hydroxymethylfurfural in food[J]. Molecular Nutrition & Food Research，2011，55(5)：667-678.

[12] 周康宁，郑洁，欧仕益，等. 3-咖啡酰奎尼酸对水果干燥过程中 5-羟甲基糠醛形成和色度的影响[J]. 食品与机械，2019，35(11)：129-135.

[13] 韩希凤，李书启，乔镜澄，等. 大枣浓缩汁贮藏过程中非酶褐变动力学研究[J]. 食品与机械，2015，31(3)：131-134.

[14] SHARMA C，KAUR A，THIND S S，et al. Advanced glycation End-products（AGEs）：An emerging concern for processed food industries[J]. Journal of Food Science and Technology，2015，52(12)：7 561-7 576.

[15] 王中群，李丽华，严金川，等. 糖基化终末产物与动脉粥样硬化的关系[J]. 中国动脉硬化杂志，2015，23(1)：94-100.

[16] 季庆玲. 老年人血清3-DG水平与糖代谢紊乱及其中医证型关联性临床研究[D]. 南京：南京中医药大学，2012：3-9.
[17] URIBARRI J，DEL CASTILLO M D，DE I M M P，et al. Dietary advanced glycation end products and their role in health and disease[J]. Adances in Nutrition：An International Review Journal，2015，6(4)：461-473.
[18] 卢永翎，肖留榜，夏秋琴，等. 精氨酸——还原糖体系中1，2-二羰基化合物的形成和抑制研究[J]. 食品与机械，2018，34(10)：1-7.
[19] 卢永翎，陆敏，王茜，等. 1，2-二羰基化合物及晚期糖基化终产物在蒸蛋糕中的形成及调控[J]. 食品与机械，2019，35(2)：1-6.
[20] 赵倩竹. 一种羟甲基糠醛—半胱氨酸加合物的鉴定及其细胞毒性研究[D]. 广州：暨南大学，2018.
[21] JIANG Kai-yu，HUANG Cai-huan，JIAO Rui，et al. Adducts formed during protein digestion decreased the toxicity of five carbonyl compounds against Caco-2 cells[J]. Journal of Hazardous Materials，2019，363：26-33.
[22] 姚晓丹，徐学明，吴凤凤，等. 蛋白酶对韧性饼干品质的改良作用[J]. 食品与机械，2018，34(3)：39-43，48.
[23] ZOU Yue-yu，HUANG Cai-huan，PEI Ke-han，et al. Cysteine alone or in combination with glycine simultaneously reduced the contents of acrylamide and hydroxymethylfurfural[J]. LWT-Food Science and Technology，2015，63(1)：275-280.
[24] HUANG Jun-qing，WANG Yi-jin-ruo，YANG Ling，et al. Effect of maize bran feruloylated oligosaccharides on the formation of endogenous contaminants and the appearance and textural properties of biscuits[J]. Food Chemistry，2018，245：974-980.
[25] OU Juan-ying，TENG Jing，El-NEZAMI H S，et al. Impact of resveratrol，epicatechin and rosmarinic acid on fluorescent AGEs and cytotoxicity of cookies[J]. Journal of Functional Foods，2018，40：44-50.
[26] SADOWSKA-BARTOSZ I，STEFANIUK I，GALINIAK S，et al. Glycation of bovine serum albumin by ascorbate in vitro：Possible contribution of the ascorbyl radical? [J]. Redox Biology，2015，6：93-99.
[27] 万盈. 湖北软麦制作酥性饼干品质特性的改良研究[D]. 武汉：武汉工业学院，2011：26-36.
[28] 丁捷，刘书香，张雪军，等. 鲜切马铃薯复合褐变抑制剂组合的筛选[J]. 食品科学，2011，32(6)：288-292.
[29] 邹悦瑜. 食品中HMF衍生物的形成及其在模拟胃肠道中的释放[D]. 广州：暨南大学，2017：6-29.
[30] ZHENG Jie，OU Juan-ying，OU Shi-yi. Alpha-Dicarbonyl Compounds[M]// Chemical Hazards in Thermally-Processed Foods. Singapore：Springer，2019：19-46.
[31] HUANG Mei-gui，ZHANG Xiao-ming，ERIC K，et al. Inhibiting the color formation by gradient temperature-elevating Maillard reaction of soybean peptide-xylose system based on interaction of l-cysteine and Amadori compounds[J]. Journal of Peptide Science，2012，18(5)：342-349.
[32] OU Juan-ying，HUANG Jun-qing，WANG Ming-fu，et al. Effect of rosmarinic acid and carnosic acid on AGEs formation in vitro[J]. Food Chemistry，2017，221：1 057-1 061.
[33] 刘荟萃. 油炸食品加工与贮藏过程中晚期糖基化末端产物的形成分析及抑制[D]. 咸阳：西北农林科技大学，2014：2-19.
[34] 崔珏. 牛蒡多酚对荧光性晚期糖基化终产物形成的抑制作用[J]. 食品科技，2019，44(4)：220-224.

(上接第22页)

[45] 曹盼. 燕麦果汁复合饮料的研制[D]. 无锡：江南大学，2012：31-43.
[46] 唐美玲，段伟文，段振华，等. 超高压处理对百香果—火龙果复合饮料品质的影响及杀菌工艺优化[J]. 食品与机械，2020，36(2)：182-186，236.
[47] 凌孟硕. 苦荞麦芽—小米复合谷物饮料的工艺研究[D]. 无锡：江南大学，2013：31-50.
[48] 孔宇. 一种稳定型米乳饮料的研制[D]. 天津：天津科技大学，2014：39-55.
[49] DE SOUZA N L，BARTZ J，ZAVAREZE E R，et al. Functional，thermal and rheological properties of oat β-glucan modified by acetylation[J]. Food Chemistry，2015，178：243-250.
[50] 傅亮，田利春. 均质条件与大米饮料乳化稳定性关系研究[J]. 食品与机械，2006，22(3)：20-21.
[51] NSOGNING D S，SUSANNE P，BERTRAM S，et al. Flavor of lactic acid fermented malt based beverages Current status and perspectives[J]. Trends in Food Science and Technology，2016，54：37-51.
[52] 郑欣瑶，任建军. 薏米，荞麦，百香果复合谷物饮料的研究[J]. 农产品加工，2019(4)：29-31.
[53] TAVARES M A G，LACERDA R C，RIBEIRO D D，et al. Combination of probiotic yeast and lactic acid bacteria as starter culture to produce maize-based beverages[J]. Food Research International，2018，111：187-197.
[54] OKUDA M. Rice used for Japanese sake making[J]. Taylor & Francis，2019，83(8)：1 428-1 441.
[55] ANGEL A，TEODORA Y，VELITCHKA G. Oats as a matrix of choice for developing fermented functional beverages[J]. Springer India，2018，55(7)：2 351-2 360.
[56] 孟祥勇. 糙米、大豆发芽富集γ-氨基丁酸及复合谷物饮料的研究[D]. 无锡：江南大学，2009：11-18.
[57] LIMITED V G B. Beverage manufacturing method using corn stubble and barley leaf：KR20150102244[P]. 2017-02-01.