何金鑫,李珂欣,梁雨,等. 添加氨基酸对“半胱氨酸-木糖”美拉德反应体系产生挥发性风味化合物的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 262−271. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040257
HE Jinxin, LI Kexin, LIANG Yu, et al. Effect of Additional Amino Acids on the Cysteine-Xylose Maillard Reaction to Form Volatile Flavor Compounds[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 262−271. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040257

· 分析检测 ·

添加氨基酸对“半胱氨酸-木糖”美拉德反应体系产生挥发性风味化合物的影响

何金鑫,李珂欣,梁　雨,胡晴晴,谢建春*
（北京工商大学食品与健康学院,老年营养与健康教育部重点实验室,北京 100048）

摘　要: 本文研究添加丝氨酸、谷氨酸、甘氨酸对“半胱氨酸-木糖”美拉德反应产生挥发性风味化合物的影响，为肉类动物的养殖、肉类加工及肉味香精的制备提供指导。通过检测反应液的 UV 294、420 nm 吸收、色差值、pH、木糖剩余，比较不同体系的美拉德反应程度。采用固相微萃取/气相色谱-质谱联用和稀释法气相色谱-嗅闻分析并结合偏最小二乘回归分析、计算气味活性值（OAV）的方法，比较不同体系产生的挥发性风味物质。结果表明，添加三种氨基酸（摩尔浓度为半胱氨酸 4 倍）后，体系的美拉德反应程度均升高，尤以添加甘氨酸的体系褐变颜色最深，其次为添加丝氨酸和谷氨酸体系；体系产生的挥发性物质均增多，其中加入谷氨酸的体系产生的含硫肉香化合物最多，且气味活性化合物的稀释因子及关键香气化合物（OAV≥1）的 OAV 增加的幅度最大。随三种氨基酸的添加量增大，体系中含硫关键香气化合物的含量先增后降，吡嗪类关键香气化合物的含量一直上升。当丝氨酸和谷氨酸的加量为 4 倍半胱氨酸浓度时、甘氨酸的加量为 2 倍的半胱氨酸浓度时，产生的含硫类肉香关键香气化合物各自出现峰值。总之，三种氨基酸比较，添加谷氨酸时褐变反应最弱且对产生含硫类肉香风味物质最有利。

关键词: 半胱氨酸,甘氨酸,丝氨酸,谷氨酸,肉香味,美拉德反应
中图分类号: TQ656+1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0262−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040257
本文网刊:

Effect of Additional Amino Acids on the Cysteine-Xylose Maillard Reaction to Form Volatile Flavor Compounds

HE Jinxin, LI Kexin, LIANG Yu, HU Qingqing, XIE Jianchun*
（School of Food and Health, Beijing Technology and Business University (BTBU), Key Laboratory of Geriatric Nutrition and Health, Ministry of Education, Beijing 100048, China）

Abstract: This study investigated effect of adding serine, glutamic acid, or glycine to the "cysteine-xylose" system on formation of volatile flavor compounds via the Maillard reaction, aiming to provide guidance for meat animals breeding, meat food processing, and meat flavorings preparation. For the different Maillard reaction systems, their reaction extents were assessed by measurement of UV absorption at 294 and 420 nm, color difference values, pH, and the remaining xylose in the reaction solutions. Volatile flavor compounds generated were comparatively analyzed by solid-phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry (SPME/GC-MS) and aroma extract dilution analysis in gas chromatography-olfactometry (AEDA/GC-O) in combination with partial least squares regression (PLSR) analysis and odor activity value (OAV) calculation. The results showed that addition of each of the three amino acids in four times the molar concentration of cysteine, the reaction extents of the Maillard reaction systems were enhanced. Addition of glycine caused the most browning of the reaction solution, followed by that of serine and glutamic acid. On the other hand, formation of volatile flavor compounds also increased as well with addition of the three amino acids. Especially, addition of glutamic acid produced the highest

收稿日期: 2025−04−20
基金项目: 国家自然科学基金（32372462）。
作者简介: 何金鑫（2000−）,男,硕士研究生,研究方向:食品风味化学,E-mail:hjx15210770316@hotmail.com。
*** 通信作者:** 谢建春（1967−）,女,博士,教授,研究方向:食品风味化学,E-mail:xjchun@th.btbu.edu.cn。

amount of sulfur-containing meaty compounds, where the odor-active compounds of them had greater dilution factors and the key aroma compounds (OAV≥1) of them exhibited larger OAVs. As the three amino acids were increasingly added to "cysteine-xylose" system, amounts of sulfur-containing key aroma compounds generated in the reaction systems first rose then fell, whereas amounts of the pyrazine key aroma compounds ascended all the way. As serine and glutamic acid each were in four times cysteine concentration, and glycine was in two times cysteine concentration, the sulfur-containing key aroma compounds were maximally yielded in the reaction systems, respectively. In conclusion, among the three amino acids, glutamic acid caused the weakest browning reaction and benefitted generation of sulfur-containing meaty compounds.

Key words: cysteine; glycine; serine; glutamic acid; meat flavor; Maillard reaction

肉在加热过程中产生大量的挥发性化合物，其中含硫挥发性化合物具有气味阈值低的特点[1]，是构成肉风味的重要物质[2−4]。半胱氨酸为重要肉香前体，肉中的半胱氨酸与还原糖发生美拉德反应产生含硫挥发性化合物[5−7]。故人们往往通过设计“半胱氨酸-还原糖”模型美拉德反应，研究不同因素对肉香味形成的影响及肉风味形成机制[8−9]。例如，曹长春等[10]基于“半胱氨酸+木糖”模型反应研究了加热温度对于肉类挥发性化合物的影响。黄杨斌等[11]基于含有猪肉酶解物的“半胱氨酸-葡萄糖”模型反应，研究了温度与水分活度对体系的色泽、风味、褐变程度的影响。赵健等[12]基于“半胱氨酸-木糖”模型反应，研究了脂肪醛对于美拉德反应进程及肉香物质形成的影响，发现己醛存在下反应液 294、420 nm 的吸光度下降，反-2-庚烯醛、反,反-2,4-癸二烯醛存在下体系产生的带脂肪链的含硫化合物总量增多。肉中除了含半胱氨酸（含硫氨基酸），还含有大量其他非含硫氨基酸。其他氨基酸的存在对于“半胱氨酸-还原糖”美拉德反应产生含硫肉香物质有重要影响。Zhang 等[13]发现添加少量的赖氨酸时，“半胱氨酸-木糖”模型体系产生的含硫化合物的含量呈现增加，当添加更多赖氨酸时会检测到大量的含氮杂环化合物。但目前有关其他氨基酸对“半胱氨酸”美拉德反应风味形成的影响研究报道还很少。

本文探究了在肉的自然 pH 下，甘氨酸、谷氨酸、丝氨酸这三种氨基酸对“半胱氨酸-木糖”反应体系美拉德反应程度及产生挥发性风味化合物的影响。研究结果为肉类禽畜的养殖、肉类烹饪加工及热反应肉味香精的研制提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

D-(+)-木糖、L-半胱氨酸、L-谷氨酸、L-丝氨酸、L-甘氨酸（以上纯度≥99%）、2-甲基-3-呋喃硫醇、2-糠硫醇、3-噻吩硫醇、双（2-甲基-3-呋喃基）二硫醚、3-巯基-2-丁酮、3-巯基-2-戊酮、2-噻吩甲硫醇、4-甲基-苯硫醇、噻吩、二氢-2-甲基-3(2H)-噻吩酮、2-甲基-2,3-二氢-噻吩、2-甲基噻吩、3-噻吩甲醛、2-噻吩甲醛、5-甲基-2-噻吩甲醛、3-甲基-2-噻吩甲醛、1-(3-噻吩基)-丙酮、2,5-噻吩-二甲醛、噻吩并[3,2-b] 噻吩、1,2,3-三硫杂戊环、[1,2,3,4] 四硫杂己环、噻唑、2-乙酰噻唑、2-甲基噻唑、2-乙酰基噻唑、3-甲基吡啶、2,5-二甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪、2,3-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、正构烷烃（C_5~C_{27}）、1,2-邻二氯苯（以上纯度≥95%）　百灵威科技有限公司；磷酸二氢钠、磷酸、氢氧化钠、氯化钠　均为分析纯，国药集团北京化学试剂有限公司；甲醇、乙腈、二氯甲烷　色谱纯，美国 Fisher Scientific 公司。

PHSJ-5 实验室 pH 计　上海雷磁仪器有限公司；UV2300Ⅱ紫外可见分光光度计　上海天美天平有限公司；UltraScan PRO 色差仪　美国 HunterLab Associates 公司；RCH-1000 型带加热板磁力搅拌器　日本 EYELA 公司；Agilent 7890A GC、7890A/5975C 气相色谱-质谱联用仪、Agilent 1260 高效液相色谱仪　美国 Agilent 公司；DATU 型嗅辨仪　美国 DATU Inc.公司；15 mL 耐压管　北京欣维尔玻璃仪器有限公司；萃取纤维 DVB/CAR/PDMS（2 cm, 50/30 μm）　美国 Supelco 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　模型反应液制备　准确称取 0.030 g 木糖（0.2 mmol）、0.024 g 半胱氨酸（0.2 mmol）溶于 5 mL 0.2 mol/L 磷酸盐缓冲溶液中，加入丝氨酸、谷氨酸或甘氨酸混合均匀，用磷酸溶液（或氢氧化钠溶液）调 pH 至 6.50，在 120 ℃ 下反应 150 min。反应结束后，立即放入冰水中冷却以终止反应。其中，丝氨酸、谷氨酸或甘氨酸的加量（mmol）为半胱氨酸（0.2 mmol）的 0、1、2、4、6、8、16 倍。每份做三个平行样品。

1.2.2　反应液吸光度的测定　反应液经 0.22 μm 聚醚砜膜过滤，用蒸馏水稀释一定倍数，测定 294 nm 和 420 nm 波长处吸光度。吸光度=测定值×稀释倍数。结果为三个平行样的均值。

1.2.3　反应液 pH 的测定　用 pH 计测定。

1.2.4　反应液色差的测定　反应液经 0.22 μm 聚醚砜膜过滤，加入到微量测试皿中使用 UltraScan PRO 色差仪测定[14]。根据式（1）计算样品的色差值（ΔE）。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \qquad \text{式（1）}$$

式中，$\Delta L=L_1^*-L_0^*$，$\Delta a=a_1^*-a_0^*$，$\Delta b=b_1^*-b_0^*$，L_0^*、a_0^*和 b_0^*是加热前反应液的 CIE 颜色参数，L_1^*、

a_1^*和 b_1^*是加热后反应液的 CIE 颜色参数。

1.2.5 高效液相色谱(HPLC)检测 参照文献方法[15],对添加的丝氨酸、谷氨酸、甘氨酸的摩尔浓度为半胱氨酸 4 倍时,所得反应液的糖含量(糖剩余)进行 HPLC 分析。Waters Xbridge Amide 色谱柱(150 mm×4.6 mm, 3.5 μm);流动相:10 mmol/L 甲酸铵-乙腈溶液(25:75, V/V),等度洗脱;进样 1 μL;柱温 40 ℃;流速 1 mL/min;运行时间 20 min。

ELSD 检测器条件:雾化气(空气)流速 3.5 mL/min,蒸发管温度 40 ℃;增益值 5。

木糖的含量采用外标法定量,定量曲线为 y=0.034x,y 代表含量(mmol/L),x 为峰面积。

1.2.6 固相微萃取 参考曹长春等[10]方法,将 1.2.1 得到的反应液置于 15 mL 固相微萃取瓶中,加入 1 μL 内标 1,2-邻二氯苯溶液(28 μg/μL,溶剂甲醇),加入氯化钠 2.0 g,在温度 50 ℃ 条件下预平衡 15 min,顶空吸附 20 min,萃取纤维 250 ℃ 解吸 3 min。

1.2.7 GC-MS 检测

1.2.7.1 GC 条件 色谱柱:DB-WAX 毛细管柱(30 m×0.25mm, 0.25 μm)。柱温程序为:起始温度 40 ℃,以 5 ℃/min 的速率升至 200 ℃,然后以 10 ℃/min 的速率升至 230 ℃,保持 2 min。进样口温度均为 250 ℃;载气(He);流速 1.0 mL/min;不分流进样。

1.2.7.2 MS 条件 电子轰击离子源,能量 70 eV;离子源温度 230 ℃;四级杆温度 150 ℃;全扫描模式,质量扫描范围 50~450 amu;辅助加热线温度 230 ℃。

1.2.7.3 定性及定量 检索 NIST14 谱库中的标准质谱(相似度大于 85%)和保留指数(Retention Indice, RI)及进样香料化合物的标准品鉴定化合物。在相同 GC-MS 条件下进样 1 μL C_5~C_{27} 正构烷烃(1 μg/μL,溶剂二氯甲烷),按式(2)计算保留指数:

$$RI = 100 \times \left(n + \frac{t_i - t_n}{t_{(n+1)} - t_n} \right) \quad \text{式(2)}$$

式中,t_i:待测物的保留时间(min);t_n、$t_{(n+1)}$:前后相邻的两个正构烷烃的保留时间(min)。

采用单一内标法进行粗略定量,按照式(3)计算化合物含量:

$$m_i = \frac{C_0 V_0 A_i}{m A_0} \times 10^3 \quad \text{式(3)}$$

式中,m_i:化合物含量(ng/g);A_i:化合物的峰面积;A_0:内标的峰面积;C_0:内标的浓度(μg/μL);V_0:加入的内标的体积(μL);m:反应液的质量(g)。

1.2.8 GC-O 检测 HP-5 毛细管柱(30 m×0.25mm, 0.25 μm),柱温程序为:起始温度 40 ℃,以 5 ℃/min 升至 80 ℃,再以 3 ℃/min 升至 160 ℃,保持 2 min;最后以 20 ℃/min 升至 280 ℃。进样口温度均为 250 ℃。DATU 嗅辨仪的空气流速 60 mL/min,空气加湿温度 70 ℃。稀释嗅闻法检测,通过改变进样的分流比(2:1、4:1、8:1、…、128:1)逐级稀释。将萃取纤维收缩为 1/2 长度下萃取样品,并在分流比 128:1 下进行分析,获得稀释倍数 256。化合物或气味在嗅闻口嗅闻不到时的稀释倍数,记为稀释因子(FD 值)。若稀释到 256 倍仍能够嗅闻到气味,FD 值记为“≥256”。

结合 GC-MS 分析结果、嗅闻的保留指数、嗅闻的气味和进样香料标准品鉴定气味活性化合物。GC-O 分析结果为三个评价员的平均值[16]。GC-O 分析前,采用香料标准品(如 2-甲基-3-呋喃硫醇、糠醛、三甲基吡嗪)对三位评价员进行为期一周的嗅闻分析培训,确保嗅闻结果的准确可靠。

1.2.9 OAV 的计算 对于 GC-O 分析检测到的气味活性化合物,按照其 GC-MS 检测到的化合物浓度/水中阈值[17]计算气味活性值(Odor Activity Value, OAV)。

1.3 数据处理

图、表采用 Excel 绘制,结果为三份样品的平均值。热图、柱状图采用 OriginPro 2025 软件进行绘制。单因素 ANOVA 分析采用 IBM SPSS Statistics 27 软件。偏最小二乘法回归分析采用 SIMCA 14.1 软件。

2 结果与分析

2.1 添加三种氨基酸对美拉德反应程度的影响

甘氨酸、谷氨酸为肉中含量丰富的鲜甜味氨基酸[18]。丝氨酸不仅为肉中的鲜甜味氨基酸且发生美拉德反应时易于产生具有烤香味的吡嗪类风味物质[19]。故本文选择这三种氨基酸进行研究。美拉德反应程度可通过检测反应液的 294、420 nm 紫外吸收、pH 变化、色差值及糖剩余表征。其中,294、420 nm 吸收值分别反映了体系中 α-二羰基类无色中间体的积累及美拉德反应末期产生的类黑精情况,pH 变化反映了美拉德反应的氨基消耗和有机酸生成情况[15]。色差值直观地表示反应液的褐变颜色深浅。糖剩余表示原料还原糖的消耗情况。一般,美拉德反应的程度越高,则 294、420 nm 吸光值和色差值越大,还原糖剩余得越少,反应液的 pH 下降越多[12]。

图 1 为空白体系(“半胱氨酸+木糖”)和分别添加三种氨基酸(摩尔浓度为半胱氨酸的 4 倍)的反应液指标。可知,添加三种其他氨基酸后,体系的 294、420 nm 吸光值和色差值均增大,糖的剩余量减少(即消耗增大),表明美拉德反应程度均升高。这是因为添加其他氨基酸后,体系内与还原糖反应的氨基化合物增多,因此反应速率增大,褐变程度提高。比较添加三种氨基酸体系,294、420 nm 吸光值、色差值、糖消耗的顺序为,添加甘氨酸>添加丝氨酸>添加谷氨酸,即添加甘氨酸后美拉德反应的褐变程度最高,其次为丝氨酸,而添加谷氨酸的美拉德反应褐变程度最低。添加三种氨基酸的体系的终点 pH 与空白体系相比均显著降低(P<0.05),但降低的幅度较小,并

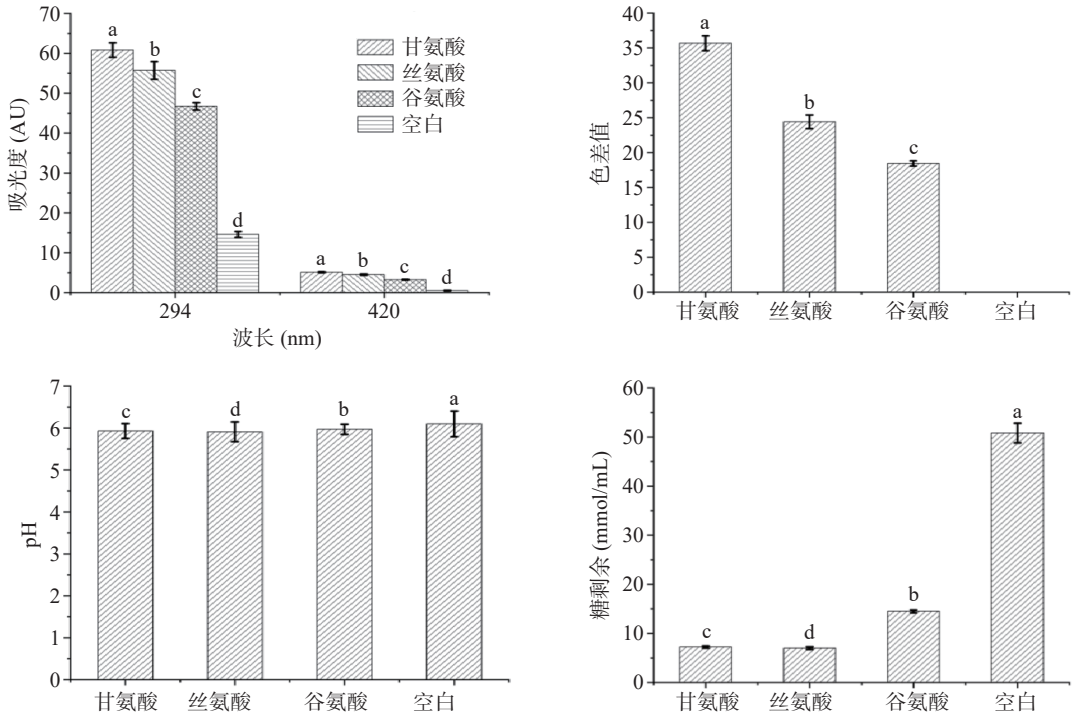


图 1　四个反应体系的美拉德反应程度指标

Fig.1　Indicators for extent of the Maillard reaction in the four reaction systems

注：不同字母表示差异显著，$P<0.05$。

没有表现出更低的 pH，这可能是因为添加的氨基酸在体系中起到了缓冲作用。

2.2　采用 GC-MS 分析添加氨基酸对产生挥发性风味化合物的影响

表 1 为 SPME/GC-MS 分析空白体系及添加 3 种氨基酸的体系中检测的挥发性风味物质。共鉴定出 37 种化合物，包括硫醇硫醚类化合物 9 种、噻吩类化合物 11 种、多硫类化合物 4 种、噻唑类化合物 3 种、含氮杂环类化合物 9 种、含氧杂环类化合物 1 种。

各体系中的含量较高的化合物均包括 2-甲基-3-呋喃硫醇、3-噻吩硫醇、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫醚、3-噻吩甲醛、3-甲基-2-噻吩甲醛、噻吩并 [2,3-b] 噻吩、2-乙酰基噻唑、2-甲基吡嗪等。据报道[13]，在“半胱氨酸+木糖”模型反应中添加赖氨酸也检测到较高含量的上述化合物。其中，2-甲基-3-呋喃硫醇、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫醚是构成肉香味的重要化合物，在各种熟肉中常检测到，如 Fan 等[20] 在炖煮北京油鸡的肉汤中检测到 2-甲基-3-呋喃硫醇的含量为 1.07 ng/g，双(2-甲基-3-呋喃基)二硫醚的含量为 1.62 ng/g。2-甲基-3-呋喃硫醇可由半胱氨酸和木糖反应产生的 4-羟基-5-甲基-3(2H)-呋喃酮与 H_2S 反应形成[21−22]。双(2-甲基-3-呋喃基)二硫醚是 2-甲基-3-呋喃硫醇氧化形成的二聚体形式。2-乙酰基噻唑可由糖降解产生的丙酮醛与半胱氨酸缩合形成[23]。半胱氨酸与糖降解产生的 α-二羰基化合物反应可形成巯基乙醛，而两分子巯基乙醛缩合则可形成 3-噻吩硫醇[24]。

由表 1 可知，与空白体系比，添加三种其他氨基酸后，鉴定出的化合物种类和数量差别不大，但多数化合物的含量明显升高，如 2-甲基-3-呋喃硫醇的含量在加入甘氨酸时，升高至 1691.02 ng/g，在加入丝氨酸时升高至 6076.00 ng/g，在加入谷氨酸时升高至 9564.80 ng/g。双(2-甲基-3-呋喃基)二硫醚的含量在加入甘氨酸时，升高至 9615.20 ng/g，在加入丝氨酸时升高至 6059.20 ng/g，在加入谷氨酸时升高至 24130.40 ng/g。5-甲基-2-噻吩甲醛的含量在加入甘氨酸时，升高至 963.20 ng/g，在加入丝氨酸时升高至 1047.02 ng/g，在加入谷氨酸时升高至 1030.40 ng/g。2,5-二甲基吡嗪的含量在加入甘氨酸时，升高至 369.60 ng/g，在加入丝氨酸时升高至 991.20 ng/g，在加入谷氨酸时升高至 795.20 ng/g。比较加入三种氨基酸的体系中产生的挥发性风味化合物的总量，从大到小的顺序为：加谷氨酸>加丝氨酸>加甘氨酸，表明谷氨酸对于挥发性风味形成的影响最大，而甘氨酸的影响最小。该顺序与上述的美拉德反应褐变程度的顺序不同，这是因为美拉德反应形成风味化合物与形成类黑精的途径不同。反应程度较高时，美拉德反应体系中易于发生聚合反应生成类黑精物质，从而不利于风味化合物的形成[10]。

采用偏最小二乘回归(Partial Least Squares Regression, PLSR)分析空白体系及添加三种氨基酸体系的 GC-MS 分析结果，见图 2。自变量拟合指数(R^2X)为 0.838，因变量拟合指数(R^2Y)为 0.667，模型预测指数(Q^2)为 0.569，R^2 和 Q^2 均超过 0.5，表明模型有效。由图 2 可知，4 个体系的样品分布在不同位

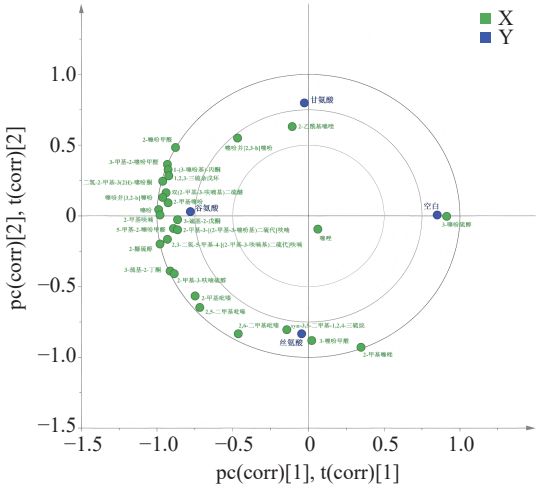
表 1 固相微萃取/气-质联用分析“半胱氨酸-木糖”及其添加 4 倍三种氨基酸体系鉴定的挥发性化合物

Table 1 Volatile compounds detected by solid phase micro extraction/gas chromatogram and mass spectrometry (SPME/GC-MS) in "cysteine-xylose" system and those with the three additional amino acids in 4 times the molar concentration of cysteine

化合物	保留指数	含量(ng/g)				定性方式
		空白	丝氨酸	谷氨酸	甘氨酸	
硫醇硫醚类化合物						
3-巯基-2-丁酮	1297	7.28±0.01^{d}	28.56±0.06^{b}	38.64±0.77^{a}	14.56±1.02^{c}	MS/RI
2-甲基-3-呋喃硫醇	1307	369.60±31.20^{d}	6076.00±683.20^{b}	9564.80±789.60^{a}	1691.02±114.40^{c}	MS/RI/S
3-巯基-2-戊酮	1360	1.68±0.02^{d}	5.04±0.01^{b}	20.72±0.42^{a}	3.92±0.02^{c}	MS/RI
2-糠硫醇	1433	3.92±0.01^{d}	16.24±5.61^{b}	21.84±2.80^{a}	12.32±0.32^{c}	MS/RI/S
3-噻吩硫醇	1572	3320.08±145.60^{a}	1204.00±95.23^{b}	884.80±100.81^{d}	1192.80±35.78^{c}	MS/RI/S
2-噻吩甲硫醇	1593	/	879.20±46.21^{c}	1338.40±41.40^{a}	1226.40±34.79^{b}	MS/RI
双(2-甲基-3-呋喃基)二硫醚	2150	274.40±34.39^{d}	6059.20±431.20^{c}	24130.40±2368.00^{a}	9615.20±795.20^{b}	MS/RI/S
2-甲基-3-[(2-甲基-3-噻吩基)二硫代]呋喃	2420	33.60±0.03^{d}	431.02±43.12^{b}	1534.40±151.21^{a}	240.80±7.02^{c}	MS/RI
2,3-二氢-5-甲基-4-[(2-甲基-3-呋喃基)二硫代]呋喃	2442	16.80±0.02^{d}	364.00±9.17^{b}	868.00±57.10^{a}	196.00±29.11^{c}	MS/RI
小计		4028.08	15063.44	38402.00	14193.20	
噻吩类化合物						
噻吩	1025	84.00±0.04^{d}	179.20±11.19^{c}	302.40±34.71^{a}	184.80±5.59^{b}	MS/RI
2-甲基噻吩	1095	61.60±0.02^{d}	252.00±25.93^{c}	879.02±98.07^{a}	313.60±32.40^{b}	MS/RI/S
二氢-2-甲基-3(2H)-噻吩酮	1528	95.20±16.51^{d}	207.20±21.32^{c}	425.60±44.79^{a}	285.60±18.56^{b}	MS/RI/S
3-噻吩甲醛	1678	840.00±78.42^{b}	3432.80±481.60^{a}	621.60±18.64^{c}	453.60±13.16^{d}	MS/RI/S
2-噻吩甲醛	1691	123.20±10.27^{d}	498.40±5.01^{c}	1562.40±76.04^{a}	1265.60±82.05^{b}	MS/RI/S
5-甲基-2-噻吩甲醛	1710	313.60±33.18^{d}	1047.02±61.62^{a}	1030.40±100.80^{b}	963.20±28.81^{c}	MS/RI/S
3-甲基-2-噻吩甲醛	1809	812.00±212.80^{d}	1881.60±162.40^{c}	3533.60±218.40^{a}	2917.60±274.40^{b}	MS/RI/S
1-(3-噻吩基)-丙酮	1856	134.40±16.77^{d}	537.60±44.81^{c}	924.00±27.72^{a}	812.00±24.36^{b}	MS/RI/S
噻吩并[2,3-b]噻吩	1873	884.80±380.80^{d}	1260.00±134.40^{c}	1873.00±91.11^{a}	1747.02±173.60^{b}	MS/RI
2,5-噻吩-二甲醛	1910	/	1204.00±128.76^{b}	1741.60±152.24^{a}	/	MS/RI/S
噻吩并[3,2-b]噻吩	1971	302.40±27.98^{d}	812.00±78.36^{c}	1080.08±72.76^{a}	912.80±27.31^{b}	MS/RI/S
小计		3651.20	11312.00	13361.6	9856.00	
多硫类化合物						
anti-3,5-二甲基-1,2,4-三硫杂戊环	1600	/	1002.40±31.40^{b}	/	1030.40±29.41^{a}	MS/RI
syn-3,5-二甲基-1,2,4-三硫杂戊环	1621	341.60±31.06^{d}	3780.00±515.20^{a}	716.80±21.50^{b}	660.80±19.82^{c}	MS/RI
1,2,3-三硫杂戊环	1770	11.20±0.01^{d}	397.60±11.72^{c}	666.40±117.92^{a}	599.20±240.80^{b}	MS/RI/S
[1,2,3,4]四硫杂己环	2080	/	666.40±67.20^{c}	1400.00±128.80^{a}	873.60±16.77^{b}	MS/RI/S
小计		352.80	5846.40	2783.20	3164.00	
噻唑类化合物						
2-甲基噻唑	1242	145.60±39.23^{b}	156.80±28.04^{a}	134.40±22.42^{c}	128.80±5.60^{d}	MS/RI/S
噻唑	1252	443.20±151.20^{b}	425.60±26.02^{c}	543.20±39.20^{a}	403.20±22.40^{d}	MS/RI
2-乙酰基噻唑	1647	7084.00±1080.80^{d}	8747.20±739.20^{b}	7548.80±812.00^{c}	13238.40±1293.06^{a}	MS/RI/S
小计		7672.80	9329.60	8226.40	13770.40	
含氮杂环化合物						
吡嗪	1212	16.80±0.01^{c}	257.60±7.72^{b}	285.60±8.56^{a}	/	MS/RI
3-甲基吡啶	1230	481.60±39.20^{a}	/	196.00±16.75^{b}	/	MS/RI/S
2-甲基吡嗪	1267	352.80±10.58^{c}	624.83±24.35^{b}	935.20±95.20^{a}	268.80±21.03^{d}	MS/RI
2,5-二甲基吡嗪	1325	134.40±9.23^{d}	991.20±78.40^{a}	795.20±61.60^{b}	369.60±28.00^{c}	MS/RI/S
2,6-二甲基吡嗪	1331	89.60±0.57^{d}	808.77±18.26^{a}	397.60±33.60^{b}	123.20±13.19^{c}	MS/RI/S
2,3-二甲基吡嗪	1348	/	302.40±9.07^{b}	397.60±11.52^{a}	106.40±11.20^{c}	MS/RI/S
2-乙基-6-甲基吡嗪	1388	/	268.80±28.06^{b}	582.40±44.80^{a}	190.40±16.80^{c}	MS/RI/S
2,3,5-三甲基吡嗪	1408	/	599.20±50.40^{b}	912.80±72.80^{a}	212.80±5.38^{c}	MS/RI/S
3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	1448	/	935.20±56.01^{b}	2475.20±196.00^{a}	151.20±9.82^{c}	MS/RI/S
小计		1075.20	4788.00	6977.60	1422.40	
含氧杂环化合物						
2-甲基呋喃	879	44.80±0.19^{d}	554.40±27.99^{b}	778.40±61.06^{a}	329.20±16.63^{c}	MS/RI
小计		44.80	554.40	778.40	329.20	
总量		16824.88	46893.84	70529.20	42735.20	

注: 保留指数, 使用DB-Wax毛细管柱上的C_5~C_{27}正构烷烃测定的线性保留指数; RI, 通过保留指数鉴定, MS, 通过检索NIST 14数据库鉴定, S, 进样标准品鉴定; /表示未检出; 同一行检测的化合物标注不同字母, 表示含量有显著性差异, P<0.05。

置，表明它们的挥发性风味化合物组成有明显差别。尤其添加三种氨基酸的体系与空白体系均有较远距离，表明添加三种氨基酸对“半胱氨酸-木糖”美拉德反应产生的挥发性风味组成的影响较大。其中，添加谷氨酸的体系与空白体系距离最远、其次为丝氨酸的体系，再次为甘氨酸的体系，即添加谷氨酸对挥发性组成的影响最大。进一步地，图 2 显示添加谷氨酸的样品与 3-巯基-2-丁酮、2-甲基-3-呋喃硫醇等化合物相关性强，表明添加谷氨酸对于上述的含硫化合物影响大。添加丝氨酸的样品与 3-噻吩甲醛、2,6-二甲基吡嗪、syn-3,5-二甲基-1,2,4-三硫杂戊环等化合物相关性强，表明添加丝氨酸对产生这些化合物影响大。据报道[13]，两分子的 α-氨基丙醛缩合可形成 2,6-二甲基吡嗪、3 分子的乙醛与 1 分子硫化氢缩合可产生 3,5-二甲基-1,2,4-三硫杂戊环。姚学强等[25] 报道猪肉中谷氨酸的含量为 57.2 mg/g，丝氨酸的含量为 9.8 mg/g。以上研究表明，增加肉中的谷氨酸、丝氨酸的含量，有助于产生具有肉香特征的含硫化合物或烤香特征的吡嗪类化合物。



R^2X=0.838　R^2Y=0.667

图 2　偏最小二乘回归分析“半胱氨酸-木糖”及其添加 4 倍三种氨基酸体系鉴定的挥发性化合物

Fig.2　Partial least squares regression (PLSR) analysis of the volatile compounds in "cysteine-xylose" system and those with the three additional amino acids in 4 times the molar concentration of cysteine

2.3　采用 GC-O 分析添加三种氨基酸对产生香气活性化合物影响

GC-MS 分析检测的为挥发性化合物，而 GC-O 分析检测的为香气活性化合物并可筛选出对总体风味贡献大的挥发性化合物。表 2 为采用 AEDA/GC-O 分析空白体系及加入三个氨基酸体系的结果。共检测到 32 种香气活性化合物，包括 10 种硫醇硫醚类化合物、11 种噻吩类化合物、4 种多硫化合物、3 种噻唑类化合物、4 种含氮杂环化合物。检测到的香气类型包括肉香、葱香、烤香、咖啡香、爆米花香等。

表 2　固相微萃取/气相色谱-嗅闻分析“半胱氨酸-木糖”及其添加 4 倍三种氨基酸体系鉴定的香气活性化合物

Table 2　Aroma active compounds detected by solid phase micro extraction/gas chromatogram-olfactometry (SPME/GC-O) in "cysteine-xylose" system and those with the three additional amino acids in 4 times the molar concentration of cysteine

保留指数	化合物	香气特征	FD				水中阈值（μg/kg）	OAV				鉴定方法
			空白	丝氨酸	谷氨酸	甘氨酸		空白	丝氨酸	谷氨酸	甘氨酸	
	硫醇硫醚类化合物											
813	3-巯基-2-丁酮	肉香	16	32	64	64	3	2	10	13	5	RI/MS/O/S
865	2-甲基-3-呋喃硫醇	肉香	≥256	≥256	≥256	≥256	0.007	52800	868000	1366400	241574	RI/MS/O/S
902	3-巯基-2-戊酮	肉香	≥256	≥256	≥256	≥256	0.7	2	7	30	6	RI/MS/O/S
909	2-糠硫醇	咖啡, 肉香	≥256	≥256	≥256	≥256	0.01	392	1624	2184	1232	RI/MS/O/S
968	3-噻吩硫醇	肉香	≥256	≥256	≥256	≥256	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
1086	2-噻吩甲硫醇	肉香	32	64	128	128	0.04	/	21980	33460	30660	RI/MS/O/S
1187	4-甲基-苯硫醇	肉香	1	8	16	8	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
1525	双(2-甲基-3-呋喃基)二硫醚	肉香	≥256	≥256	≥256	≥256	0.00008	3430000	75740000	301630000	120190000	RI/MS/O/S
1671	2,3-二氢-5-甲基-4-[(2-甲基-3- 呋喃基)二硫代]呋喃	肉香	8	8	16	8	/	/	/	/	/	RI/MS/O
1716	2-甲基-3-[(2-甲基-3-噻吩基)二硫代]呋喃	肉香	1	2	2	2	/	/	/	/	/	RI/MS/O
	噻吩类化合物											
662	噻吩	葱香	2	4	8	8	84	1	2	4	2	RI/MS/O/S
767	2-甲基噻吩	硫磺味	8	16	16	16	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
987	二氢-2-甲基-3(2H)-噻吩酮	肉香	8	16	32	16	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
990	3-噻吩甲醛	硫磺味	16	32	64	64	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
1001	2-噻吩甲醛	硫磺味	32	32	64	64	5	25	99	312	153	RI/MS/O/S
1081	2-甲基-2,3-二氢-噻吩	肉香	32	32	128	64	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S

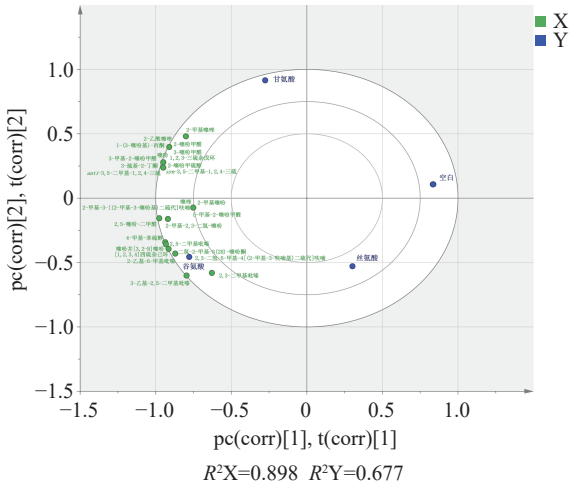
续表 2

保留指数	化合物	香气特征	FD				水中阈值（μg/kg）	OAV				鉴定方法
			空白	丝氨酸	谷氨酸	甘氨酸		空白	丝氨酸	谷氨酸	甘氨酸	
1115	5-甲基-2-噻吩甲醛	杏仁味	16	32	32	32	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
1120	3-甲基-2-噻吩甲醛	杏仁味	16	32	64	64	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
1180	1-(3-噻吩基)-丙酮	奶油味	4	4	8	8	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
1203	噻吩并[3,2-b]噻吩	肉香	4	16	32	16	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
1336	2,5-噻吩-二甲醛	硫磺味	1	4	16	8	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
	多硫化合物											
1114	1,2,3-三硫杂戊环	硫磺味	4	8	16	16	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
1129	*anti*-3,5-二甲基-1,2,4-三硫杂戊环	葱香	1	4	8	8	/	/	/	/	/	RI/MS/O
1136	*syn*-3,5-二甲基-1,2,4-三硫杂戊环	葱香	1	4	8	8	/	/	/	/	/	RI/MS/O
1322	[1,2,3,4]四硫杂己环	肉香	4	8	16	8	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
	噻唑类化合物											
729	噻唑	肉香	4	8	8	8	38	14	11	14	11	RI/MS/O/S
807	2-甲基噻唑	肉香	8	4	16	16	/	/	/	/	/	RI/MS/O/S
1020	2-乙酰基噻唑	爆米花, 肉香	⩾256	⩾256	⩾256	⩾256	3	2361	2916	2516	4413	RI/MS/O/S
	含氮杂环类化合物											
912	2,5-二甲基吡嗪	烤香	4	16	32	16	80	2	12	10	5	RI/MS/O/S
919	2,3-二甲基吡嗪	烤香	1	16	16	8	0.4	/	756	994	266	RI/MS/O/S
1000	2-乙基-6-甲基吡嗪	烤香	1	4	16	4	40	/	7	15	5	RI/MS/O/S
1079	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	烤香	1	8	16	4	5	/	187	495	30	RI/MS/O/S

注: RI, 使用HP-5毛细管柱上的C_5~C_{27}正构烷烃测定的线性保留指数; FD, 稀释因子; 水中阈值, 数据来自文献[29]; OAV, 气味活性值, 通过浓度除以阈值计算得到; RI, 通过保留指数鉴定; MS, 基于气-质联机鉴定结果鉴定; O, 通过嗅闻的气味特征鉴定; S, 通过进样标准品鉴定; /表示未检出。

采用 AEDA/GC-O 分析时, 化合物的稀释因子越大, 表明其对总体香气的贡献越大。对于空白及添加三种氨基酸的四个体系中, 具有肉香特征的 2-甲基-3-呋喃硫醇、3-巯基-2-戊酮、2-糠硫醇、3-噻吩硫醇、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫醚、2-乙酰基噻唑, 均 FD⩾256, 表明它们是四个体系中贡献肉香味的强势化合物。Zhang 等[26] 采用 GC-O 分析基于半胱氨酸和木糖制备的热反应肉味香精, 2-甲基-3-呋喃硫醇、糠硫醇也具有极高 FD 值。Zhao 等[23] 分析“谷胱甘肽-葡萄糖”体系, 2-糠硫醇、2-甲基-3-呋喃硫醇等物质也具有极高的 FD 值。与空白体系比较, 添加氨基酸后, 检测到的各化合物的稀释因子几乎均增大。比较稀释因子较大(FD⩾16)化合物个数, 空白体系中检测出 13 种, 添加丝氨酸的体系检测出 18 种, 添加甘氨酸的体系检测出 19 种, 添加谷氨酸的体系检测出 26 种。即添加谷氨酸的体系检测出的(FD⩾16)化合物最多, 表明添加谷氨酸对“半胱氨酸-木糖”反应体系的风味影响最大, 这与 GC-MS 分析结果一致。

进一步地将四个体系的 GC-O 分析结果进行 PLSR 分析, 见图 3。自变量拟合指数(R^2X)为 0.898, 因变量拟合指数(R^2Y)为 0.677, 模型预测指数(Q^2)为 0.597, R^2 和 Q^2 都大于 0.5, 表明模型有效。图 3 中, 4 个体系分布在不同象限, 表明它们的香气活性组成有明显区别。其中, 添加谷氨酸的体系与空白体系距离最远、其次为甘氨酸的体系, 再次为丝氨酸的体系, 即添加谷氨酸对香气活性组成的影响最大。图 3 显示添加谷氨酸的样品与 2-甲基-3-呋喃硫醇、双(2-甲基-3-呋喃基)二硫醚等多种气味活性化合物呈相关性, 表明添加谷氨酸对于香气活性化合物的影响大。但添加甘氨酸或丝氨酸的样品与气味活性化合物的相关性均较小, 表明添加这两种氨基酸对产生香气活性化合物影响较弱。



R^2X=0.898 R^2Y=0.677

图 3 偏最小二乘回归分析“半胱氨酸-木糖”及其添加 4 倍三种氨基酸体系鉴定的香气活性化合物

Fig.3 Partial least squares regression (PLSR) analysis of the aroma active compounds in "cysteine-xylose" system and those with the three additional amino acids in 4 times the molar concentration of cysteine

在 GC-MS、GC-O 的分析结果基础上，再结合 OAV 比较四个体系的风味物质，其中 OAV≥1 的化合物定义为关键风味化合物[27−28]。由表 2，共有 14 种化合物 OAV≥1，包括 10 种含硫化合物（6 种硫醇硫醚类化合物、2 种噻吩类化合物、2 种噻唑类化合物）和 4 种含氮杂环类化合物。四个体系相比，空白体系中检测出的 OAV≥1 化合物为 10 种，添加三种氨基酸的体系中检测出 OAV≥1 化合物数量比空白体系多，均为 14 种。尽管四个体系中这些 OAV≥1 化合物的种类相同，但它们在每个体系中的 OAV 不同，从而使四个体系的香气特征不同。

2.4　关键香气化合物含量随三种氨基酸加量的变化

图 4 采用热图表示了上述的关键香气化合物（OAV≥1）的含量，随着氨基酸添加量的变化。热图中颜色越红，表示含量越高。由图 4，与空白体系相比，添加氨基酸后绝大多数含硫化合物的含量均呈现先升高后下降的趋势，而吡嗪类化合物呈现一直升高的趋势。这是因为在美拉德反应过程中，含硫化合物与含氮杂环化合物的形成存在竞争性，含硫化合物一般由还原糖降解产生的羰基类化合物与 H_2S 反应形成，但这些羰基类化合物若与 NH_3 反应则形成含氮杂环化合物如 2,5-二甲基吡嗪、2,3-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪等[30−32]。随着非含硫氨基酸加量的增多，体系内 Strecker 降解产生的 NH_3 增多，因此含氮杂环化合物的含量升高而含硫化合物的含量却下降。

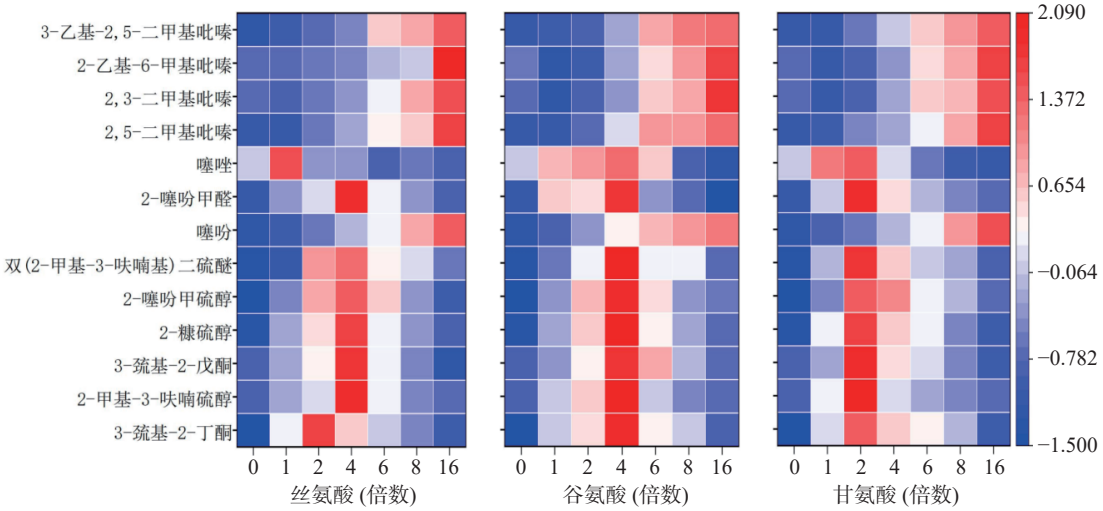


图 4　随三种氨基酸添加量增大“半胱氨酸-木糖”体系产生的关键香气化合物（OAV≥1）含量变化

Fig.4　Changes in the contents of the key aroma compounds (OAV≥1) produced with increasingly addition of three kinds of amino acids in the "cysteine-xylose" system

图 4 中添加丝氨酸和谷氨酸的体系中，几乎所有含硫化合物均在氨基酸的摩尔浓度为半胱氨酸 4 倍时达到峰值，而添加甘氨酸的体系则在摩尔浓度为半胱氨酸的 2 倍时达到峰值。由此可见，添加甘氨酸更容易释放 NH_3，从而使产生的含硫化合物下降较快。这与前述的添加甘氨酸的体系易于发生褐变反应相一致，因为体系内 NH_3 除了参与产生风味物质还往往参与产生类黑精类物质[13]。值得注意的是，与其他含硫化合物不同，在添加丝氨酸的体系中噻唑的含量在其摩尔浓度为半胱氨酸 1 倍时达到最高峰值。这可能与噻唑的产生既涉及 H_2S 又涉及 NH_3 参与反应有关。据报道，噻唑化合物可通过半胱氨酸 Strecker 降解产生 H_2S、NH_3 与糖降解产生的甲醛和乙二醛缩合产生[33−34]。

添加三种氨基酸对“半胱氨酸-木糖”体系关键风味化合物的影响与已有报道添加赖氨酸时所得研究结果类似[13]。总体而言，丝氨酸和谷氨酸的添加量为 4 倍半胱氨酸时，甘氨酸的添加量为 2 倍半胱氨酸时，各体系产生的关键含硫肉香化合物总量分别达到峰值。相比之下，添加谷氨酸的体系峰值最高，其次为添加丝氨酸的体系，而添加甘氨酸的体系最低，故添加谷氨酸对产生含硫肉香化合物最有利。

3　结论

在“半胱氨酸-木糖”体系中添加相同量的三种其他氨基酸，美拉德反应的糖消耗、褐变程度均提高，其中添加甘氨酸时对褐变的影响最大，其次为丝氨酸、谷氨酸。添加三种氨基酸后，反应体系中 GC-MS 检测到的挥发性风味物质均增多，检测到的化合物总量为加入谷氨酸的体系>加入丝氨酸的体系>加入甘氨酸的体系，尤其添加谷氨酸的体系 GC-O 检测出的 FD 值较大的气味活性化合物最多、含硫风味化合物最多，且绝大多数关键风味化合物（OAV≥1）的 OAV 最大。随着三种氨基酸加量的增大，几乎所有含硫关键风味化合物的含量均呈先增后减的趋势，丝氨酸、谷氨酸在添加量为半胱氨酸浓度 4 倍时，而甘氨酸添加量为半胱氨酸浓度 2 倍时达到峰值；而吡嗪类关键风味化合物含量呈现一直上升趋势。后续工作中将深入探讨添加三种氨基酸影响“半胱氨酸-木糖”美拉德反应产生含硫肉香味物质的机制，以及对更多其他氨基酸种类展开研究，从而更

好地为热反应肉味香精的制备及肉类食品加工等实际应用提供指导。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 李行, 吴李玲, 裴荣红, 等. 6 种武陵酱香型白酒中挥发性含硫化合物差异分析[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(1): 83−93. [LI X, WU L L, PEI R H, et al. Difference analysis of volatile sulfur-containing compounds in 6 kinds of Wuling soysauce aroma-type Baijiu[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(1): 83−93.]

[2] 张骞, 冯平, 杨海花. 不同加工方式的肉制品中香味物质的形成机制与提取[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(14): 270−276. [ZHANG Q, FENG P, YANG H H. Compositions, formation mechanisms and extractions of aroma substances in differently processed meat products[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(14): 270−276.]

[3] CERNY C, GUNTZ-DUBINI R. Formation of cysteine-S-conjugates in the Maillard reaction of cysteine and xylose[J]. Food Chemistry, 2013, 141(2): 1078−1086.

[4] SUN H M, WANG J Z, ZHANG C H, et al. Changes of flavor compounds of hydrolyzed chicken bone extracts during Maillard reaction[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(12): C2415−C2426.

[5] MARTINS S, LEUSSINK A, ROSING E A E, et al. Meat flavor generation in complex Maillard model systems; proceedings of the 238th annual meeting of the American-Chemical-Society, Washington, DC, Aug 16-20, 2009[C]. Amer Chemical Soc: WASHINGTON, 2010.

[6] 钱敏, 白卫东, 赵文红, 等. 半胱氨酸-还原糖模拟美拉德反应制备肉味香精的香气成分分析[J]. 中国食品添加剂, 2015(6): 66−72. [QIAN M, BAI W D, ZHAO W H, et al. The aroma composition analysis of preparation of meat flavor by cysteine-reducing sugar simulating Maillard reaction[J]. China Food Additives, 2015(6): 66−72.]

[7] WANG Y T, XIE J C, ZHANG C P, et al. Effect of lipid on formation of Maillard and lipid-Maillard meaty flavour compounds in heated cysteine-xylose-methyl linoleate system[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2022, 37(5): 274−284.

[8] 曾茂茂, 李伶俐, 何志勇, 等. 甘氨酸对美拉德反应体系及产生肉香风味物质的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(7): 32−36. [ZENG M M, LI L L, HE Z Y, et al. Effect of glycine on Maillard reaction system and meat flavor compounds[J]. Food Science, 2012, 33(7): 32−36.]

[9] YANG Z, XIE J C, ZHANG L, et al. Aromatic effect of fat and oxidized fat on a meat-like model reaction system of cysteine and glucose[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2015, 30(4): 320−329.

[10] 曹长春, 石景艳, 谢建春, 等. 温度对“半胱氨酸-木糖”模型体系初始美拉德中间体及挥发性风味物质形成的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(11): 64−69. [CAO C C, SHI J Y, XIE J C, et al. The effect of temperature on the formation of initial Maillard intermediates and volatile flavor compounds in cysteine/xylose model reaction system[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(11): 64−69.]

[11] 黄杨斌, 杜卿卿, 任晓镁, 等. 析因设计探究温度与水分活度对美拉德反应模型的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 21−28. [HUANG Y B, DU Q Q, REN X P, et al. Effect of temperature and water activity on the Maillard reaction model by factorial design[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(15): 21−28.]

[12] 赵健, 赵梦瑶, 曹长春, 等. 脂肪醛对“半胱氨酸-木糖”美拉德反应进程及肉香物质形成的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 63−69. [ZHAO J, ZHAO M Y, CAO C C, et al. Effect of aliphatic aldehydes on Maillard reaction between cysteine and xylose and meaty flavor formation[J]. Food Science, 2017, 38(20): 63−69.]

[13] ZHANG C P, TAN J, HE J X, et al. Effect of lysine on the cysteine-xylose Maillard reaction to form flavor compounds[J]. Food Chemistry, 2025, 469: 142529.

[14] 孙佳贺. 白汤酱油在储藏中的褐变及护色措施[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [SUN J H. Browning and color protection of white soy sauce during storage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.]

[15] 谭佳. 不同氨基酸对“半胱氨酸-木糖”体系肉香气形成影响及机制研究[D]. 北京: 北工商大学, 2021. [TAN J. Influences of different amino acids on the formation of meat aroma in the "cysteine-xylose" reaction system and influcencing mechanism[D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2021.]

[16] 裴昭阳, 何金鑫, 胡晴晴, 等. 刷油与不刷油电烤箱烤草鱼的风味物质差异[J]. 食品科学技术学报, 2025, 43(5): 128−140. [PEI Z Y, HE J X, HU Q Q, et al. Differences in flavor compounds between electric over roasted grass carp with and without oil-brushing treatment[J]. Journal of Food Science and Technology, 2025, 43(5): 128-140.]

[17] 赵新玉, 申思, 毛华, 等. 基于 OAV 和 GC-O-MS 法表征丁香花蕾油关键香气成分[J]. 现代食品, 2024, 30(10): 167−73. [ZHAO X Y, SHEN S, MAO H, et al. Identification of the key aroma components in clove bud essential oil using OAV and GC-O-MS[J]. Modern Food, 2024, 30(10): 167−73.]

[18] 金春爱, 崔松焕, 吕洁, 等. 不同性别不同部位梅花鹿肉营养品质分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(24): 279−290. [JIN C A, CUI S H, LÜ J, et al. Nutritional quality analysis of sika deer meat in different sexes and parts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(24): 279−290.]

[19] YAYLAYAN V A, KEYHANI A, WNOROWSKI A, et al. Formation of sugar-specific reactive intermediates from 13C-labeled L-serines[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(3): 636−641.

[20] FAN M D, XIAO Q F, XIE J C, et al. Aroma compounds in chicken broths of Beijing Youji and commercial broilers[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(39): 10242−10251.

[21] LIU H, NIE R T, WEI X R, et al. Carbon module labeling approach combining with gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry technology clarifies the formation mechanism of furan and thiophene derivatives: Ribose and cysteine as a classic case study[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 182: 114874.

[22] ASHBALA S, ZHANG C P, XIE J C, et al. Maillard reaction chemistry in formation of critical intermediates and flavour compounds and their antioxidant properties[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133416.

[23] ZHAO J, WANG T Z, XIE J C, et al. Formation mechanism

of aroma compounds in a glutathione-glucose reaction with fat or oxidized fat[J]. Food Chemistry, 2019, 270: 436−444.
[24] CERNY C, DAVIDEK T. Formation of aroma compounds from ribose and cysteine during the Maillard reaction[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(9): 2714−2721.
[25] 姚学强, 李江, 张东辉, 等. 甘肃 4 种地方杂交黑猪肉品质与营养成分比较[J]. 饲料工业, 2024, 45(17): 37−41. [YAO X Q, L J, ZHANG D H, et al. Quality and nutritional composition of four breeds of local hybrid black pork in Gansu Province[J]. Feed Industry, 2024, 45(17): 37−41.]
[26] ZHANG C P, WANG X, LIU Y, et al. Characteristics of meat flavoring prepared using hydrolyzed plant protein mix by three different heating processes[J]. Food Chemistry, 2024, 446: 138853-138853.
[27] 张丽华, 王子阳, 王文博, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用结合气味活度值法分析不同脱腥方法对鸡爪挥发性风味物质的影响[J]. 肉类研究, 2025, 39(4): 17−23. [ZHANG L H, WANG Z Y, WANG W B, et al. Headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry coupled with odor activity value to analyze the effect of different deodorization methods on volatile flavor substances in chicken feet[J]. Meat Research, 2025, 39(4): 17−23.]
[28] SOHAIL A, AL-DALALI S, WANG J A, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: A review[J]. Food Research International, 2022, 157: 111385.
[29] L. J. van GEMERT. Odor thresholds: Compilations of flavor threshold values in air, water and other media. Second enlarged and revised edition[M]. Oliemans Punter & Partners BV: Utrecht, the Netherlands, 2011.
[30] 冯国杨, 杨波, 邢俊德, 等. 发酵食品中四甲基吡嗪的检测、来源及其微生物合成途径研究进展[J]. 中国酿造, 2022, 41(4): 1−6. [FENG G Y, YANG B, XING J D, et al. Research progress on detection, source and microbial synthesis pathway of tetramethylpyrazine in fermented foods[J]. China Brewing, 2022, 41(4): 1−6.]
[31] BLEICHER J, EBNER E E, BAK K H. Formation and analysis of volatile and odor compounds in meat-a review[J]. Molecules, 2022, 27(19): 6703.
[32] HWANG H I, HARTMAN T G, ROSEN R T, et al. Formation of pyrazines from the Maillard reaction of glucose and lysine-alpha-amine-^{15}N[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1994, 42(4): 1000−1004.
[33] MOTTRAM D S. Flavour formation in meat and meat products: A review[J]. Food Chemistry, 1998, 62(4): 415−424.
[34] ZHAO J, WANG T Z, XIE J C, et al. Meat flavor generation from different composition patterns of initial Maillard stage intermediates formed in heated cysteine-xylose-glycine reaction systems[J]. Food Chemistry, 2019, 274: 79−88.