

偏最小二乘回归分析市售牛肉丸感官特性与挥发性风味化合物的关系

吴丹璇¹, 高子武¹, 吴鹏^{1,2}, 许志诚^{1,2}, 高苏敏¹, 孟祥忍^{1,2*}, 王恒鹏^{1,2*}

(1. 扬州大学旅游烹饪学院, 江苏扬州 225127)

(2. 中餐非遗技艺传承文化和旅游部重点实验室, 江苏扬州 225127)

摘要: 该研究选取 10 种不同品牌市售牛肉丸, 首先以 28 个感官特性为指标对牛肉丸进行定量描述分析 (quantitative descriptive analysis, QDA), 其次采用气相色谱-质谱联用技术 (gas chromatograph-mass spectrometry, GC-MS) 检测牛肉丸中的挥发性风味化合物, 并结合相对气味活度值 (relative odor activity value, ROAV) 明确其特征风味成分, 最后通过偏最小二乘回归法 (partial least squares regression, PLSR) 构建牛肉丸的感官特性与挥发性风味物质之间的关系。结果表明, 牛肉丸的感官评价体系中前 6 个主成分的累计贡献率为 89.9%, 高于 85%, 能解释牛肉丸感官特征的大部分变异信息。不同市售牛肉丸挥发性风味物质的种类及含量存在明显差异, 确定了二烯丙基硫醚和(-)- β -蒎烯等 18 种挥发性化合物为牛肉丸的特征风味物质。(+) - 柠檬烯、(-)- β -蒎烯、对丙烯基茴香醚等与香辛料味呈显著相关; 反式-2-辛烯-1-醇、正辛醛、壬醛、反-2-辛烯醛等与油味呈显著相关; 正癸醛、柠檬醛与甜香呈显著相关; 二烯丙基二硫醚与蒜味呈显著相关; 二烯丙基硫醚对葱香味影响显著。该试验为牛肉丸的感官质量评价体系的构建提供了理论依据。

关键词: 牛肉丸; 特征性风味; 感官特性; 定量描述分析; 偏最小二乘回归

文章编号: 1673-9078(2022)03-276-285

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.3.0718

Correlation Analysis of Sensory Attributes and Volatile Compounds of Commercial Beef Meatballs by Partial Least Squares Regression

WU Danxuan¹, GAO Ziwu¹, WU Peng^{1,2}, XU Zhicheng^{1,2}, GAO Sumin¹, MENG Xiangren^{1,2*}, WANG Hengpeng^{1,2*}

(1.College of Tourism and Cooking, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China) (2.Key Laboratory of Chinese Cuisine Intangible Cultural Heritage Technology Inheritance, Ministry of Culture and Tourism, Yangzhou 225127, China)

Abstract: In this paper, 10 different brands of beef meatballs were selected. Firstly, 28 kinds of sensory properties were used as indexes for quantitative descriptive analysis (QDA). Secondly, the volatile flavor compounds in 10 kinds of beef meatballs were detected by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and the characteristic flavor components were identified by relative odor activity value (ROAV). Finally, the relationships among sensory attributes and volatile components in commercial beef meatballs were constructed by partial least square regression (PLSR). The results showed that the cumulative contribution rate of the first six principal components in the sensory evaluation system of beef meatballs was 89.9%, which was higher than 85%, which could explain most of the variation information of the sensory characteristics of beef meatballs. There were significant differences on the types and contents of volatile flavor substances in different brands of beef meatballs. 18 volatile compounds such as diallyl sulfide and (-)- β -pinene were determined as the characteristic flavor values of

引文格式:

吴丹璇,高子武,吴鹏,等.偏最小二乘回归分析市售牛肉丸感官特性与挥发性风味化合物的关系[J].现代食品科技,2022,38(3):276-285

WU Danxuan, GAO Ziwu, WU Peng, et al. Correlation analysis of sensory attributes and volatile compounds of commercial beef meatballs by partial least squares regression [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 276-285

收稿日期: 2021-07-10

基金项目: 中国营养学会-百胜餐饮健康基金 (CNS-YUM2020A17); 江苏省社会科学基金项目 (17GLD021); 扬州市“绿扬金凤计划”领军人才资助项目; 扬州大学“青蓝工程”资助项目

作者简介: 吴丹璇 (1998-), 女, 硕士研究生在读, 研究方向: 烹饪科学与动物源性食品营养加工, E-mail: 2963809441@qq.com

通讯作者: 孟祥忍 (1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 烹饪科学与动物源性食品营养加工, E-mail: xrmeng@yzu.edu.cn; 共同通讯作者: 王恒鹏 (1991-),

男, 博士研究生在读, 讲师, 研究方向: 农产品加工及质量控制, E-mail: yzuwhp@163.com

beef meatballs. D-Limonene, (-)- β -pinene, anethole had a significantly positive correlation with the spices; trans-2-Octen-1-ol, octanal, nonanal, trans-2-octenal were significantly correlated with the oil odor; decyl aldehyde and citral were significantly correlated with the sweet smell; diallyl disulfide were significantly correlated with the garlic flavor; diallyl sulfide had a contribution to the onion flavor. This experiment provided a theoretical basis for the construction of sensory quality evaluation system of beef meatballs.

Key words: beef meatballs; characteristic flavor; sensory evaluation; quantitative descriptive analysis; partial least-squares regression

牛肉丸是用牛肉糜和辅料加工而成的肉制品^[1], 广受消费者欢迎。虽然牛肉丸已有相关规格标准和制作工艺规范, 如 T/CZSPTXH 108-2019《潮州菜潮州牛肉丸制作工艺规范》^[2], 但其质量评价体系仍不明确, 经常导致市售牛肉丸在品质稳定性上存在较大差异。因此, 进一步建立市售牛肉丸的质量评价体系至关重要。

定量描述分析法(QDA)由于结果详细、一致和可靠, 较适用于感官分析, 许多学者使用该法来描述肉制品的感官特征^[3,4]。如 Braghieri 等^[3]采用 QDA 法结果表明香肠添加中防腐剂对其感官特性没有显著影响。气相色谱-质谱(GC-MS)联用技术便捷高效, 多用于食品中挥发性化合物的定性定量分析^[5]。王靖等^[5]利用 GC-MS 技术对鸭肉掺假羊肉样品的挥发性化合物进行分析, 其中 3-甲基丁醛、3-环庚烯-1-酮等能有效区分不同样品; Deng 等^[6]采用 GC-MS 法研究培根的挥发性风味化合物, 得出选用黑猪制作的培根比白猪制作的培根在贮藏过程中对风味的影响更显著。偏最小二乘回归分析(PLSR)可有效对自变量多、样本量少而相关性高的数据进行分析、建模, 在食品领域应用广泛^[7]。Kortesniemi 等^[8]采用 PLSR 法研究芬兰蜂蜜的感官特性, 并将其与气味活性化合物相关联。Lieb 等^[9]研究四个不同品种哥斯达黎加木瓜果泥的挥发性成分和感官特征, 利用多元统计方法建立回归模型, 筛选出适合原浆生产的番木瓜品种。

虽然不同挥发性成分对食品感官特性影响的研究较多^[10,11], 但关于牛肉丸的感官评价和挥发性风味物质的研究鲜有报道。通过 PLSR 分析市售牛肉丸感官特性与挥发性风味化合物的关系, 可为生产适合我国消费者的牛肉丸产品, 提供进一步的理论参考。因此, 本试验以 10 种市售牛肉丸为研究对象, 采用 QDA 法建立牛肉丸的感官特性和 GC-MS 分析牛肉丸的挥发性风味物质组成, 并通过 PLSR 法进一步阐明牛肉丸感官特性与挥发性成分之间的关系, 并初步构建牛肉丸质量评价体系, 从而为牛肉丸产品的质量评价和品质控制提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

10 种不同品牌市售牛肉丸, 将样品依次编号为: 潮牛阿彬牛肉丸(S1); 潮迹牛肉丸(S2); 老德头牛肉丸(S3); 喜得佳牛肉丸(S4); 潮庭牛肉丸(S5); 安井牛肉丸(S6); 汕头八合里海记牛肉丸(S7); 芮美达牛肉丸(S8); 潮兴记牛肉丸(S9); 丸子妹牛肉丸(S10)。样品置于-20℃储存。

1.2 主要试剂

蔗糖、味精和食盐为食品级, 购于扬州麦德龙超市; 氯化钠, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.3 仪器与设备

Trace ISQ II 气质联用仪, 美国热电公司; DRSJZML-550 电热升降煮面炉, 济南金佰特商用厨具有限公司; Supelco 75 μ m Carboxen 萃取头, 上海楚定分析仪器有限公司。

1.4 方法

1.4.1 QDA 法

参考 GB/T 1629.1-2012《感官分析选拔、培训与管理评价员一般导则第 1 部分: 优选评价员》^[12]和 Cuffiaa^[13]方法, 略作修改。将 10 组样品进行随机三位数编号, 感官评价前在-4℃解冻 12 h, 沸水煮 6 min, 冷却至室温。首先全面筛选出 35 名感官评价员, 并进行培训, 培训内容包括: 了解牛肉丸的知识、识别不同色卡和香气卡、味觉和嗅觉的训练和评分强度卡的使用等内容, 其中蔗糖、味精和食盐用于调配各种不同浓度的溶液, 目的是测试感官评价员的味觉和嗅觉能力, 最终选取 12 名培训合格的评价人员(6 男 6 女)组成感官评定小组。其次参考 GB/T 10221-2012《感官分析术语》^[14]并结合牛肉丸的感官属性。由评定小组描述出反映牛肉丸的外形、香气、质地、滋味和余味的感官词汇, 进一步进行讨论、排除, 确定牛肉丸的感官属性。并对牛肉丸的每一感官词汇进行定义并选用强度值为 3 的样品作为该词的参比样。最后由感官评定小组依据牛肉丸相应感官指标进行打分, 其感官特性强度采用 0-5 的标度法(0-没感觉, 1-弱, 2-

稍弱, 3-中等, 4-稍强, 5-强)。

1.4.2 挥发性化合物的测定

1.4.2.1 固相微萃取

根据傅丽等^[15]的方法稍加修改, 准确称取 2.0 g (精确至 0.001 g) 切碎混匀的牛肉丸, 加入 4 mL 饱和食盐水, 置于 10 mL 萃取瓶中, 60 °C 水浴, 平衡 40 min 后将经老化的 SPME 头插入封口顶空采样, 吸附 40 min 后将萃取针头插入气相色谱仪进样口, 250 °C 下解析 5 min。

1.4.2.2 GC-MS 检测条件

色谱条件: 色谱柱为 DB-Wax, 进样口设置温度

为 250 °C, 载气为氦气, 流速为 1.0 mL/min。

升温程序: 起始柱温以 40 °C 保持 2 min, 以 4 °C/min 的升温速率升至 120 °C, 不保持, 最后以 8 °C/min 升至 240 °C, 保持 7 min。

质谱条件: 离子源温度 240 °C, 电离方式 EI⁺, 电子能量 70 eV; 质量扫描范围 30~450 m/z。

1.4.2.3 定性定量方法

结果根据计算机普库 (NIST/Wiley) 进行检索, 根据其拟合度对辨别挥发性化合物的成分, 并用峰面积归一化法计算其相对含量。

表 1 牛肉丸感官特性的描述词汇表

Table 1 Descriptive glossary of the sensory properties of beef meatballs

感官指标	描述词	定义	参照物
外形	灰褐色	牛肉丸呈现灰褐色	比色卡
	浑圆	牛肉丸形态饱满, 呈圆形	小番茄
	完整	牛肉丸形态完整	小番茄
	光滑	牛肉丸的表面平整、不粗糙, 有较高的光泽感	荔枝
香气	肉香味	烹饪成熟之后散发出的牛肉丸香味	熟牛肉
	甜香	清甜气味	16 g/L 的蔗糖溶液
	清香	茶汤的清香	茶汤
	鲜香	有肉汤的香味	牛肉汤
	油味	植物油的气味	食用油
	香辛料味	清淡的茴香、八角、香叶等辅料的气味	五香粉
	咸香	食盐溶液的咸香味	5 g/L 的食盐溶液
	蒜味	清淡的大蒜味	大蒜
	葱香味	清淡的葱香味	葱
韧性	韧性	筋道的感觉	海带
	咀嚼性	类似于在咀嚼辣条的感觉	辣条
质地	紧密型	将样品完全咬穿后, 由口腔触觉感受器觉察到的与产品横断面结构的细致、紧密有关的几何质地特性	软糖
	胶粘性	口腔将样品咀嚼成可吞咽状态所需的力	栗子泥
	弹性	解除形变压力后变回原状的性质	火腿肠
	残渣感	类似于咀嚼鸡胸肉后的感觉	熏鸡胸肉
	松软	对样品变性表现出的轻微的抵抗力的性质	凉皮
	滑嫩	组织中感觉不出颗粒存在的性质以及均匀细腻的质感	果冻
滋味	咸味	适宜的咸味	5 g/L 的食盐溶液
	鲜香味	牛肉的鲜味	牛肉汤
	脂味	感受到油脂的气味	熟花生油味
	肉香味	醇厚、浓郁的牛肉香味	熟牛肉
	多汁的	口腔中游离液增多的感觉	新鲜的虾仁
余味	五香味	清淡的香辛料的味道	五香粉
	肉香味	口腔尚有淡淡的牛肉香味	熟牛肉

1.5 关键挥发性风味化合物的分析

参考刘登勇等^[16]的方法, 风味物质的贡献程度是根据其百分含量来评价, 即相对气味活度值 (ROAV), ROAV 计算公式如下:

$$ROAV_i \approx \frac{C_i}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_i} \times 100$$

式中:

C_{max} 和 T_{max} ——所有风味物质中最大的百分比含量和感觉阈值, $\mu\text{g}/\text{kg}$;

C_i 和 T_i ——对应挥发性化合物的百分比含量和感觉阈值, $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

1.6 数据处理

采用 Excel 2010 及 Origin 2017 分析数据并作图, 差异显著水平 α 为 0.05; 采用 XLSTAT 2016 统计软件分别进行主成分分析和 PLSR 分析。

2 结果与分析

2.1 QDA 结果分析

由感官评价小组对 10 种牛肉丸感官特性的不断开发、讨论和整合, 建立了描述牛肉丸的外形、香气、质地、滋味和余味的 28 个描述词, 主要包括灰褐色、浑圆、完整和光滑等 4 个外形描述词, 肉香味、甜香、清香、鲜香、油味、香辛料味、咸香、蒜味和葱香味等 9 个香气描述词, 韧性、咀嚼性、紧密型、胶粘性、弹性、残渣感、松软和滑嫩等 8 个质地描述词, 咸味、鲜香味、脂味、肉香味和多汁的等 5 个滋味描述词, 五香味和肉香味等 2 个余味描述词, 并对其描述词进行定义和参照物的确定, 最终构建牛肉丸的感官评价标准体系。该试验建立的质地感官描述词汇与殷俊的研究结果相似^[17]。

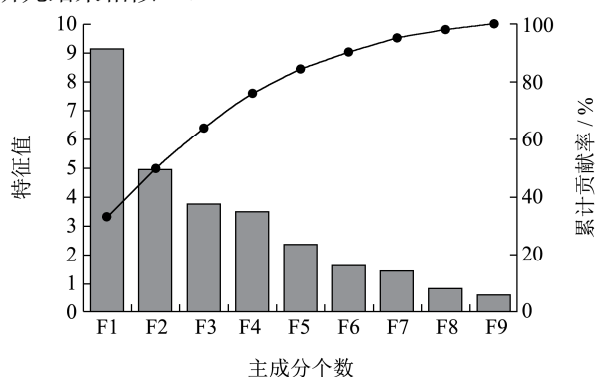


图 1 特征值的碎石图

Fig.1 Scree plot

由表 1 可知, 任何单一描述词都无法准确评价牛

肉丸的感官特性, 均需多个描述词评价, 可见牛肉丸的感官特性多样且复杂。由感官评定小组建立的牛肉丸质量评价体系, 对其风味轮构建具有重要意义。

牛肉丸的 28 个感官属性由主成分分析 (principal component analysis, PCA) 结果表明, 由图 1 可知, 前 6 个主成分的累计贡献率为 89.9%, 高于 85%, 说明 10 种市售牛肉丸感官特征的大部分变异信息足够被解释。

表 2 牛肉丸感官描述词在各个主成分中的载荷因子

Table 2 The load factor of sensory descriptors in each principal component of beef meatballs

感官指标	描述词	F1	F2	F3	F4	F5
外形	灰褐色	-0.13	0.38	0.27	0.48	0.66
	浑圆	-0.74	0.21	-0.06	0.32	0.3
	完整	-0.73	-0.11	-0.13	0.6	0.15
	光滑	-0.78	0.15	0.41	0.38	-0.08
香气	肉香味	0.75	-0.42	0.26	-0.08	0.04
	甜香	0.39	-0.59	0.3	0.19	0.33
	清香	0.28	-0.28	0.33	0.66	0.12
	鲜香味	0.81	-0.17	0.04	0.36	0.36
	油味	0.61	0.55	-0.32	-0.28	0.16
	香辛料味	0.65	0.48	-0.11	-0.35	-0.25
	咸香	0.27	0.04	0.32	-0.59	0.53
	蒜味	0.3	0.87	-0.18	-0.07	-0.06
	葱香味	0.43	0.59	0.29	0.05	0.24
质地	韧性	0.41	-0.15	0.19	-0.49	0.08
	咀嚼性	0.64	0.38	0.06	0.38	-0.04
	紧密型	0.02	0.28	0.68	-0.2	-0.23
	胶粘性	0.62	0.38	-0.58	0.27	-0.16
	弹性	-0.4	-0.34	0.6	-0.31	-0.32
	残渣感	0.62	0.29	-0.22	0.41	-0.38
	松软	0	-0.07	-0.63	-0.22	0.74
	滑嫩	-0.17	0.82	0.45	-0.07	0.08
滋味	咸味	0.85	0.11	0.23	-0.37	0.14
	鲜香味	0.75	-0.36	-0.15	0.49	-0.16
	脂味	0.79	-0.29	-0.24	0.1	-0.04
	肉香味	0.5	-0.71	0.42	-0.09	-0.07
	多汁的	-0.12	0.64	0.66	0.21	-0.01
余味	五香味	0.73	0.14	0.25	0.43	-0.31
	肉香味	0.77	-0.02	0.46	0.19	0.28

由表 2 和图 2 可知, 第一主成分 (PC1) 主要体现了样品间浑圆、完整、光滑、肉香味 (香气)、鲜香味 (香气)、油味、香辛料味、咀嚼性、胶粘性、残渣感、咸味、鲜香味 (滋味)、脂味、五香味和肉香味 (余味) 的变异信息, 第二主成分 (PC2) 则主要体现了蒜味、滑嫩、肉香味 (滋味)、多汁的变异信息。特征

向量值可解释为感官属性与主成分相关系数，参考文献得到当其大于 0.6 即可认为是该主成分的特征属性^[18-20]，而本文中以上提到的属性与主成分相关性系数均在 0.6 以上，其高度相关性表明该 19 个属性能较好地体现牛肉丸的感官特性。

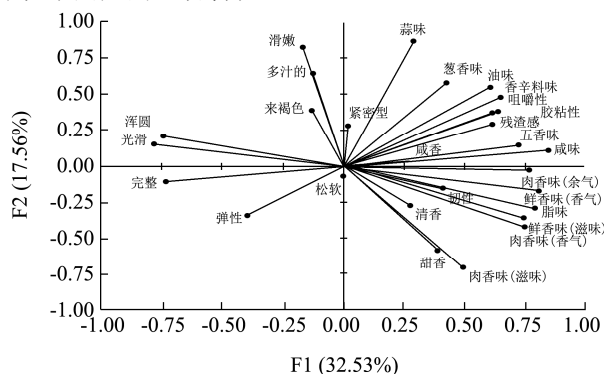


图 2 28 个感官特征在 F1/F2 的载荷值

Fig.2 The loading value of 28 sensory characteristics in F1/F2

2.2 牛肉丸挥发性化合物的测定

由表 3 可知，10 种牛肉丸共测出 173 种挥发性化合物，包括 27 种烃类、34 种醇类、15 种酮类、5 种酚类、19 种醛类、16 种醚类、32 种酯类、6 种酸类以及 19 种其他类化合物。对牛肉丸各类风味化合物相对含量进行统计，由图 3 可知，其主要集中于醚、醛、烃 3 类物质，醚类在部分样品中含量高达 31.26%，醛类物质在部分样品中相对含量达到 19.26%以上，烃类在部分样品中含量达到 14.14%以上。另外，可看出不同市售牛肉丸的挥发性化合物的相对含量差异较大，仅有样品 S3、S7、S8、S9 挥发性化合物相对含量较高，可见市售牛肉丸的风味品质差异较大，其仍有提升空间。

某一风味化合物的相对含量高低并不能解释其对风味的贡献程度，需要结合其香气阈值进行 ROAV 分析。挥发性风味化合物的 ROAV 值均在 0~100，且

ROAV 值越大，表明该化合物对风味贡献越大。一般认为当 ROAV \geq 1 时，该化合物为样品的特征风味化合物，当 $0.1 \leq ROAV < 1$ 时，该化合物对整体风味具有重要的修饰作用。本试验对能查阅到阈值的风味化合物进行分析。表 4 列出了每种牛肉丸样品中风味化合物的阈值及对应 ROAV 值。

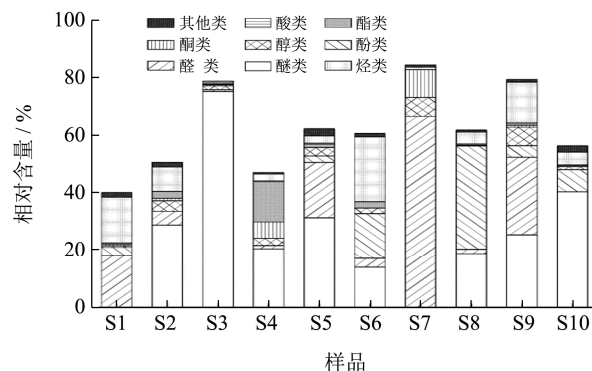


图 3 不同牛肉丸挥发性化合物的相对含量

Fig.3 Relative content of volatile compounds in different beef meatballs

含硫化合物的阈值较低，是牛肉中重要的风味物质，主要来源于 Maillard 反应或氨基酸热解^[21]。二烯丙基二硫醚呈大蒜味^[22]，由表 4 可知，其 ROAV 值在样品 S1、S2、S3 和 S8 中达到最高，且在 S6、S9 和 S10 中均有检测出。二烯丙基硫醚具有葱香味^[22]，在样品 S2、S3、S5、S6、S8、S9 和 S10 中均有检出。此外，仅在样品 S1 中测定出 4-烯丙基苯甲醚(ROAV=10.60)，仅在样品 S10 中检测到二烯丙基四硫醚，而甲基烯丙基硫醚分别在样品 S8 和 S9 中检测到。由此可知，二烯丙基二硫醚、二烯丙基硫醚、4-烯丙基苯甲醚、二烯丙基四硫醚和甲基烯丙基硫醚是牛肉丸的特征风味物质。另外，甲基三硫醚和 2-乙酰基噻唑这两种化合物仅在个别牛肉丸中检出 ($0.1 \leq ROAV < 1$)，表明其对修饰牛肉丸的整体风味具有重要作用。

表 3 不同牛肉丸挥发性化合物的种类及相对含量

Table 3 Types and relative contents of volatile compounds in different beef meatballs

挥发性风味物质	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	种类
烃类	15.90	8.51	0.63	2.25	2.46	22.51	0.86	4.21	14.14	4.54	27
醇类	0.50	3.63	1.18	2.43	2.93	1.87	6.58	0.25	6.42	1.02	34
酮类	0.52	0.88	0.37	5.75	0.00	0.05	9.6	0.07	0.69	0.06	15
酚类	2.84	0.00	0.14	0.00	2.22	15.75	0.00	35.91	4.02	7.73	5
醛类	18.05	4.81	0.57	1.18	19.26	3.13	66.46	1.55	27.01	0.07	19
醚类	0.03	28.69	75.08	20.46	31.26	13.88	0.00	18.73	25.29	40.22	16
酯类	0.46	2.41	0.25	14.02	1.24	2.24	0.00	0.32	0.78	0.34	32
酸类	0.10	0.00	0.48	0.35	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	6
其他类	1.68	1.60	0.05	0.59	2.50	1.11	0.85	0.70	0.94	2.15	19
合计	40.08	50.53	78.75	47.03	62.20	60.54	84.35	61.74	79.29	56.26	173

表4 不同牛肉丸中挥发性风味化合物的阈值及对应 ROAV

Table 4 Threshold values and corresponding ROAV of volatile flavor compounds in different beef meatballs

物质	保留时间 /min	阈值 /($\mu\text{g/L}$)	ROAV 值									
			S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
正十六烷	25.46	0.5	-	-	-	-	-	-	0.01	-	-	-
萜品油烯	22.59	0.2	-	-	-	0.02	-	0.00	-	-	-	-
α -石竹烯	24.90	0.16	-	-	-	0.01	-	0.00	-	-	0.01	-
(+)-柠檬烯	13.56	0.045	-	0.10	0.01	0.26	-	0.02	-	0.27	1.13	-
1,3,8-对薄荷三烯	13.41	0.015	-	-	-	0.13	-	-	-	-	-	-
(+)- α -蒎烯	11.56	0.0053	-	4.15	-	4.25	-	0.26	-	4.54	7.13	-
(-)- β -蒎烯	11.74	0.00007	-	-	-	100.00	-	4.67	-	86.34	100.00	-
正戊醇	5.18	0.153	-	-	-	-	-	-	0.33	-	-	-
2-萘醇	18.46	0.08	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
正庚醇	11.68	0.023	-	-	-	-	-	-	0.57	-	-	-
正辛醇	15.13	0.022	-	-	-	-	-	-	0.82	-	-	-
反式-2-辛烯-1-醇	15.02	0.02	-	-	-	-	-	-	0.40	-	-	-
顺-5-辛烯-1-醇	15.01	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	0.41	-
桉叶油醇	13.65	0.0035	-	8.81	-	-	-	-	-	-	-	0.18
1-辛烯-3-醇	11.99	0.0027	-	0.00	-	-	-	-	-	-	4.64	-
芳樟醇	16.03	0.0024	4.76	-	-	-	-	-	-	-	13.09	-
3-羟基-2-丁酮	13.56	0.014	-	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-
鸢尾酮	15.48	0.002	-	-	-	0.36	-	-	-	-	-	-
3-辛酮	12.10	0.0013	-	-	-	-	-	-	100.00	-	-	-
4,6-二叔丁基间苯二酚	6.47	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01
丁香酚	25.40	0.00061	-	-	0.49	-	-	-	-	-	1.87	0.56
庚醛	9.18	0.26	-	-	-	-	-	-	0.16	-	0.03	-
正己醛	5.89	0.23	0.02	0.24	-	0.33	-	-	2.54	0.05	0.82	0.00
正辛醛	4.70	0.17	-	-	-	-	-	-	0.84	-	0.02	-
十一醛	16.15	0.14	-	-	-	-	-	-	-	0.04	-	-
十四醛	23.99	0.11	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-
苯甲醛	11.29	0.085	-	-	-	-	-	-	0.08	-	-	-
(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	20.32	0.0088	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(Z)-癸-2-烯醛	20.94	0.0031	-	-	-	-	-	0.14	1.22	-	-	-
壬醛	10.80	0.0031	-	-	0.33	1.76	-	-	30.23	-	6.38	-
反-2-辛烯醛	14.60	0.0027	-	-	-	-	-	-	2.16	-	-	-
正癸醛	19.43	0.0026	-	-	-	-	-	-	2.19	-	-	-
苯乙醛	20.90	0.0017	-	-	0.11	-	-	-	-	-	-	-
柠檬醛	21.06	0.00015	11.83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
反式-2-壬烯醛	17.98	0.00009	-	-	-	-	-	-	54.17	-	-	-
对丙烯基茴香醚	21.56	0.057	-	-	0.03	-	-	-	-	0.14	1.27	0.03
甲基三硫醚	11.45	0.014	-	-	-	-	-	-	-	0.16	-	-
二烯丙基二硫醚	15.31	0.0013	100.00	100.00	100.00	-	-	1.21	-	100.00	83.15	14.73
4-烯丙基苯甲醚	19.20	0.0013	10.60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
二烯丙基硫醚	8.48	0.001	-	5.16	26.69	-	3.03	0.16	-	59.67	19.13	9.91
烯丙基甲基硫醚	4.40	0.0005	-	-	0.55	-	-	-	-	6.15	4.07	0.25

续表 4

物质	保留时间 /min	阈值 ($\mu\text{g/L}$)	ROAV 值										
			S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	
二烯丙基四硫醚	15.79	0.000008	-	-	-	-	100.00	-	-	-	-	-	-
苯甲酸苄酯	29.29	0.341	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-辛基环丙烷十四酸甲酯	5.15	0.18	-	0.06	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-
6,9,12,15-二十二碳四烯酸甲酯	23.68	0.0017	-	-	0.14	0.32	-	-	-	-	-	0.62	-
2-乙酰基噻唑	13.25	0.004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.28	0.02
2,3,5-三甲基吡嗪	12.58	0.07	-	0.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
邻异丙基甲苯	13.40	0.0045	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.45	-
间二甲苯	8.77	0.18	-	-	-	0.02	0.01	-	0.06	0.02	-	-	0.00
2-乙基-6-甲基吡嗪	12.69	0.04	-	-	-	-	-	-	-	0.04	-	-	0.02
2-乙基-5-甲基吡嗪	12.61	0.036	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-
3-乙基-2,5 甲基吡嗪	15.16	0.024	-	-	-	-	-	-	-	0.06	-	-	0.01
2-乙烷基-3,5-二甲基吡嗪	15.16	0.0004	-	-	-	-	0.85	-	-	-	-	-	-

醇类物质主要来源于醛类物质的还原和脂肪氧化^[23]。芳樟醇具有花香气息^[24]，在样品 S1 (ROAV=4.76) 和 S9 (ROAV=13.09) 中均有检出；1-辛烯-3-醇具有熟蘑菇香气^[25]，仅在样品 S9 (ROAV=4.64) 中检出。由此可知，芳樟醇和 1-辛烯-3-醇是牛肉丸的特征风味化合物。另外，桉叶油醇、正戊醇、正庚醇、正辛醇和顺-5-辛烯-1-醇等风味化合物仅在个别牛肉丸中检出 ($0.1 \leq \text{ROAV} < 1$)，表明它们对牛肉丸的整体风味具有修饰作用。

烯炔类物质阈值较低，一般由脂肪氧化产生。在被检出的烯炔类物质中，(-)- β -蒎烯、(+)-柠檬烯和 α -蒎烯的 ROAV 值大于 1，构成牛肉丸的特征风味组分。其中(-)- β -蒎烯占较大比例，在样品 S4、S6、S8 和 S9 中均检测到，其通常来源于香辛料，可能与制作牛肉丸时添加的姜、葱和五香粉等有关^[23]。(+) -柠檬烯在样品 S9 中检测到，可能来自于牛肉丸中添加的香辛料^[26]。而 α -蒎烯在样品 S2、S4、S8 和 S9 中均检测到。另外，1,3,8-对薄荷三烯在个别牛肉丸中检出，其 ROAV 值 > 0.1 ，其能较好修饰牛肉丸的风味。

酯类物质主要由醇类与酸类的酯化反应产生，可赋予肉制品具有较强的酯香味^[27]。S3、S4 和 S9 中均检测到 6,9,12,15-二十二碳四烯酸甲酯 ($0.1 \leq \text{ROAV} < 1$)，表明其对牛肉丸整体风味有较好的修饰作用。

醛类物质阈值较低，含有脂肪香气，主要来源于脂肪氧化和氨基酸 Strecker 反应，对牛肉风味的贡献较大^[28]。在被检出的醛类物质中，反-2-辛烯醛、正葵醛、反式-2-壬烯醛、壬醛、己醛和柠檬醛的 ROAV 值均大于 1，是牛肉丸的特征风味物质。其中样品 S7 检测到呈脂肪香的反-2-辛烯醛、呈甜香的正葵醛以及反

式-2-壬烯醛^[28]；壬醛阈值较低，脂香浓郁^[24]，在样品 S4、S7 和 S9 中均有检出；己醛呈青草和清新味^[29]，其能增加肉制品味感，在样品 S7 中检出；而呈甜香的柠檬醛仅在样品 S1 中检测到。另外，庚醛呈果实香、正辛醛呈脂肪香^[29]，它们仅在个别牛肉丸中检出 ($0.1 \leq \text{ROAV} < 1$)，对牛肉丸的整体风味有较好的修饰作用。

酮类物质阈值较高，主要来自于 Maillard 反应和不饱和脂肪酸热氧化或降解，对牛肉丸风味贡献较小^[27]。3-辛酮具有酮香、青香和蔬菜香^[29]，仅在样品 S7 中检出，其 ROAV 值最大，是该牛肉丸的特征风味。丁香酚呈丁香和果香味^[29]，其阈值较低，在样品 S3 和 S10 中 ROAV 值大于 0.1，表明其对牛肉丸的风味有较好的修饰作用。对丙烯基茴香醚具有茴香香气^[24]，存在于多种香辛料中，其 ROAV 值在样品 S3、S8、S9 和 S10 中均大于 0.1，说明其能较好修饰牛肉丸的整体风味。此外，4-烯丙基苯甲醚仅在样品 S1 中检出，其 ROAV 值大于 1，是牛肉丸的特征风味。

综合看来，对丙烯基茴香醚、二烯丙基二硫醚、芳樟醇和 1-辛烯-3-醇等 18 种风味化合物是牛肉丸的特征风味物质。不同市售牛肉丸中的挥发性风味化合物种类、相对含量及贡献程度存在较大差异，进一步表明风味分析可有效区分不同品牌市售牛肉丸的特征香气，是评价牛肉丸风味品质的重要依据。

2.3 PLSR 分析

以十种市售牛肉丸的挥发性风味化合物 (ROAV > 0.1) 为解释变量 (X)，将肉香味、甜香、清香、鲜香味、油味、香辛料味、咸香、蒜味和葱香味等 9 个香气描述词的强度作为因变量 (Y) 进行偏

最小二乘回归 (PLSR) 分析, 可以对风味化合物和香气属性强度之间相关性进行预测探究。由图 4 可知, 大部分风味化合物都与牛肉丸香气属性具有不同程度的显著相关性。与香辛料味呈显著相关的化合物包括 (+)-柠檬烯 (A1)、(-)- β -蒎烯 (A4) 和对丙烯基茴香醚 (A27)。油味周围聚集多种风味化合物, 包括反式-2-辛烯-1-醇 (A8)、正辛醛 (A18)、壬醛 (A21)、反-2-辛烯醛 (A22), 表明上述物与油味之间具有较强的相关性。陈祖明等^[30]研究指出壬醛呈脂肪香味, 对牛肉丸整体风味贡献较大。与甜香呈显著相关的化合物为正癸醛 (A23)、柠檬醛 (A25)。影响蒜味的显著因素为二烯丙基二硫醚 (A29); 二烯丙基硫醚 (A31) 对葱香味影响显著, 这与石华治等人报道的二烯丙基硫醚具有葱香味的结论相一致^[23]。由此看出, 大部分风味化合物与牛肉丸的感官特性具有不同程度的显著相关性。

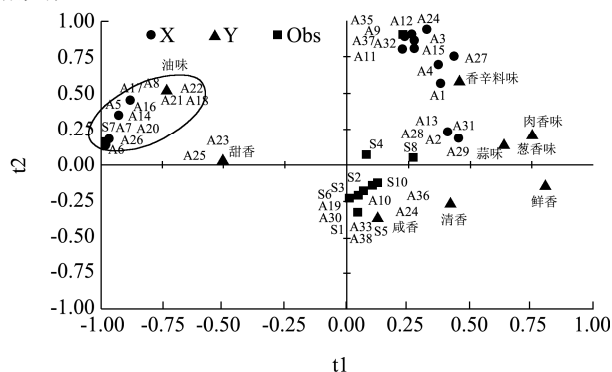


图 4 不同牛肉丸样品风味化合物、香气属性的相关性分布
Fig.4 Correlation distribution of flavor compounds and aroma characteristics in different beef meatballs

注: X: 风味化合物; Y: 香气属性; Obs: 样品。

此外, 样品 S7 单独位于第二象限, 与咸香、清香和鲜香的相对距离较远, 表明样品 S7 与咸香、清香和鲜香的相关性不大; 样品 S1、S2、S3、S5、S6 和 S10 与咸香、清香和鲜香的相对距离较近, 表明相关性较高。样品 S4 和 S8 与蒜味、肉香味和葱香味相对距离较近, 相关性较高。结合感官和风味分析结果, 进一步显示样品 S3 和 S8 的品质较好。

以化学成分为解释变量, 9 个感官得分作为因变量进行模型的建立。该模型对不同市售牛肉丸的香气感官特征和挥发性成分进行变量重要性投影 (variable importance for the projection, VIP) 的计算^[31], VIP 得分大于 1 的成分可能是导致牛肉丸感官特征差异的原因。图 5 可看出二烯丙基硫醚 (A31)、正辛醛 (A18)、正戊醇 (A5)、正庚醇 (A6)、正辛醇 (A7)、反式-2-辛烯-1-醇 (A8)、3-辛酮 (A14)、反-2-辛烯醛 (A22)、正癸醛 (A23)、反式-2-壬烯醛 (A26)、壬醛 (A21)、

庚醛 (A16)、(Z)-癸-2-烯醛 (A20)、正己醛 (A17)、烯丙基甲基硫醚 (A32)、(+)- α -蒎烯 (A3) 等指标对变量的影响较大。因此, 在研究牛肉丸的感官特征和特征风味物质时, 合理优化各种工艺参数, 对提高牛肉丸的感官特性具有指导意义。

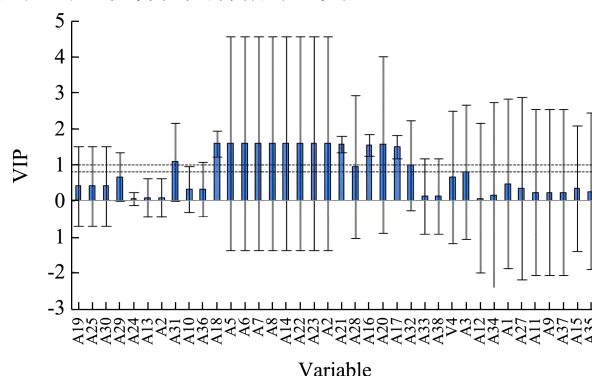


图 5 解释变量对模型的贡献度评价

Fig.5 Evaluation of the contribution of explanatory variables to the model

3 结论

通过对 10 种市售牛肉丸的感官特性进行定量描述分析, 最终筛选出光滑、肉香味、鲜香味和蒜味等 28 个描述词, 构建了牛肉丸的感官评价标准体系。由风味分析可知不同市售牛肉丸挥发性风味化合物的种类及含量存在明显差异, 样品 S3、S7 和 S8 的风味化合物相对含量较高于其他样品, 其中二烯丙基二硫醚、二烯丙基硫醚和(-)- β -蒎烯等 18 种风味化合物是牛肉丸的特征风味物质。由 PLSR 分析可知牛肉丸的感官特性和部分风味化合物之间呈现一定的显著相关性, 且样品 S1、S2、S3、S5、S6 和 S10 与咸香、清香和鲜香相关性较高, 而样品 S4 和 S8 与蒜味、肉香味和葱香味相关性较高。经初步建立的质量评价体系分析可知, 样品 S3 和 S8 的综合品质最好。

参考文献

[1] SUN Yuwei, ZHANG Yu, SONG Huanlu. Variation of aroma components during frozen storage of cooked beef balls by SPME and SAFE coupled with GC-O-MS [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 45(1): e15036

[2] T/CZSPTXH 108-2019.潮州菜潮州牛肉丸制作工艺规范 [S]
T/CZSPTXH 108-2019. Chaozhou Cuisine, Specification for Processing Technology of Chaozhou Beef Meatballs [S]

[3] Braghieri Ada, Piazzolla Nicoletta, Galgano Fernanda, et al. Effect of preservative addition on sensory and dynamic profile of Lucanian dry-sausages as assessed by quantitative

- descriptive analysis and temporal dominance of sensations [J]. Meat Science, 2016, 122: 68-75
- [4] Eerik Saldana, Saldarriaga Castillo, Cabrera Sanchez, et al. Descriptive analysis of bacon smoked with Brazilian woods from reforestation: methodological aspects, statistical analysis, and study of sensory characteristics [J]. Meat Science, 2018, 140: 44-50
- [5] 王婧,李璐,王佳奕,等.电子鼻结合气相色谱-质谱法对宁夏小尾寒羊肉中鸭肉掺假的快速检测[J].食品科学,2017,38(20):222-228
WANG Qian, LI Lu, WANG Jiayi, et al. Rapid detection of Ningxia small-tailed han sheep meat adulterated with duck by electronic nose combined with GC-MS [J]. Food Science, 2017, 38(20): 222-228
- [6] DENG Siyang, LIU Yunhe, HUANG Feng, et al. Evaluation of volatile flavor compounds in bacon made by different pig breeds during storage time [J]. Food Chemistry, 2021, 357: 129765
- [7] Jeehye Sung, Hyuk Suh, Yu Wang, et al. Relationship between sensory attributes and chemical composition of different mango cultivars [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(18): 5177-5188
- [8] Kortnesniemi Maaria, Rosenvald Sirli, Laaksonen Oskar, et al. Sensory and chemical profiles of Finnish honeys of different botanical origins and consumer preferences [J]. Food Chemistry, 2018, 246: 351-359
- [9] Lieb Veronika, Esquivel Patricia, Cubero Castillo, et al. GC-MS profiling, descriptive sensory analysis, and consumer acceptance of Costa Rican papaya (*Carica papaya* L.) fruit purees [J]. Food Chemistry, 2018, 248: 238-246
- [10] Wang Shuo, Takehiro Tamura, Nobuyuki Kyouno, et al. Effect of volatile compounds on the quality of Japanese fermented soy sauce [J]. LWT - Food Science and Technology, 2019, 111: 594-601
- [11] Noelia Tena, Roman Ruiz, Maria Morales, et al. Relationship between sensory attributes and volatile compounds qualifying dry-cured hams [J]. Meat Science, 2008, 80(2): 315-325
- [12] GB/T 1629.1-2012.感官分析选拔、培训与管理评价员一般导则第1部分:优选评价员[S]
GB/T 1629.1-2012. Sensory Analysis General Guidelines for the Selection, Training and Management of Evaluators Part 1: Preferred Evaluators [S]
- [13] Cuffia Facundo, George Guillermo, Godoy Lucas, et al. *In vivo* study of the immunomodulatory capacity and the impact of probiotic strains on physicochemical and sensory characteristics: case of pasta filata soft cheeses [J]. Food Research International, 2019, 125: 108606
- [14] GB/T 10221-2012.感官分析术语[S]
GB/T 10221-2012. Terminology for Sensory Analysis [S]
- [15] 傅丽,葛佳俊,龚辉,等.上浆时间对水晶虾仁品质的影响[J].中国食品学报,2019,19(3):222-231
FU Li, GE Jiajun, GONG Hui, et al. The influence of sizing time on crystal shrimp quality [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(3): 222-231
- [16] 刘登勇,周光宏,徐幸莲,等.金华火腿主体风味成分及其确定方法[J].南京农业大学学报,2009,32(2):173-176
LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinlian, et al. Study on key odor compounds of Jinhua ham [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(2): 173-176
- [17] 殷俊.即食牛肉丸加工技术研究[D].广州:华南理工大学, 2012
YIN Jun. Study of processing technology of ready-to-eat beef meatball [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012
- [18] 李欢欢,王超,傅冬和,等.响应面分析法优化茯砖茶感官定量描述分析条件[J].食品与发酵工业,2018,44(8):284-290, 297
LI Huanhuan, WANG Chao, FU Donghe, et al. Optimization of quantitative sensory evaluation of Fuzhuan brick-tea by response surface analysis [J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(8): 284-290, 297
- [19] 常玉梅,钟芳.豆腐干质构感官分析及评价小组能力评估[J].食品与生物技术学报,2013,32(1):37-42
CHANG Yumei, ZHONG Fang. Spectrum descriptive sensory analysis of dried bean curd's texture and panel performance analysis [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2013, 32(1): 37-42
- [20] 吴殿廷,吴迪.用主成分分析法作多指标综合评价应该注意的问题[J].数学的实践与认识,2015,45(20):143-150
WU Dianting, WU Di. Some problems in comprehensive evaluation of the principal component analysis [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015, 45(20): 143-150
- [21] Khan Muhammad, Jo Cherorun, Tario Muhammad. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors-a systematic review [J]. Meat Science, 2015, 110: 278-284
- [22] 郭思文,王丹,赵晓燕,等.不同颜色蒜泥的风味及挥发性物质分析[J].食品科学,2019,40(22):256-262
GUO Siwen, WANG Dan, ZHAO Xiaoyan, et al. Analysis of the flavor and volatile components of crushed garlic cloves with different colors [J]. Food Science, 2019, 40(22):

- 256-262
- [23] 石华治,王娟,刘玉平,等.潮汕牛肉丸煮制前后关键性香气成分对比分析[J].食品科学技术学报,2018,36(5):44-50
SHI Huazhi, WANG Juan, LIU Yuping, et al. Comparative analysis of key odorants in Chaoshan beef balls before and after boiling [J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 36(5): 44-50
- [24] 耿秋月,田洪磊,詹萍,等.椒麻鸡赋味汤料制备中主要基料对香气品质的影响[J].食品科学,2020,41(2):230-237
GENG Qiuyue, TIAN Honglei, ZHAN Ping, et al. Effect of main ingredients on flavor quality of Xinjiang spicy chicken seasoning [J]. Food Science, 2020, 41(2): 230-237
- [25] Costa R, Fanali C, Pennazza G, et al. Screening of volatile compounds composition of white truffle during storage by GCxGC-(FID/MS) and gas sensor array analyses [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 60(2): 905-913
- [26] Watanabe A, Kamada G, Imannri M, et al. Effect of aging on volatile compounds in cooked beef [J]. Meat Science, 2015, 107: 12-19
- [27] 臧明伍,张凯华,王守伟,等.基于 SPMIE-GC-O-MS 的清真酱牛肉加工过程中挥发性风味成分变化分析[J].食品科学, 2016,37(12):117-121
ZANG Mingwu, ZHANG Kaihua, WANG Shouwei, et al. Changes in volatile flavor components during the processing of Islamic spiced beef analyzed by solid phase micro-extraction coupled with gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry (SPME-GC-O-MS) [J]. Food Science, 2016, 37(12): 117-121
- [28] Lu Benet, Maria Dolores, Carles Ibanez, et al, Low intramuscular fat (but high in PUFA) content in cooked cured pork ham decreased Maillard reaction volatiles and pleasing aroma attributes [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 76-82
- [29] 孙宝国.食用调香术[M].北京:化学工业出版社,2003
SUN Baoguo. Food Flavoring [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003
- [30] 陈祖明,陈丽兰.芡薯粉对牛肉丸感官及风味的影响[J].中国调味品,2021,46(3):82-85
CHEN Zuming, CHEN Lilan. Effects of *brassicarapa* L. powder on sensory and flavor properties of beef balls [J]. China Condiment, 2021, 46(3): 82-85
- [31] Seisonen Sirli, Vene Kristel, Koppel Kadri. The current practice in the application of chemometrics for correlation of sensory and gas chromatographic data [J]. Food Chemistry, 2016, 210: 530-540

(上接第 158 页)

- [15] Wang H, Liu Y, Chen L, et al. Insights into the multi-scale structure and digestibility of heat-moisture treated rice starch [J]. Food Chemistry, 2018, 242: 323-329
- [16] Tan I, Flanagan B M, Halley P J, et al. A method for estimating the nature and relative proportions of amorphous, single, and double-helical components in starch granules by ¹³C CP/MAS NMR [J]. Biomacromolecules, 2007, 8(3): 885-891
- [17] Witt T, Gidley M J, Gilbert R G. Starch digestion mechanistic information from the time evolution of molecular size distributions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(14): 8444-8452
- [18] Liu K, Zu Y, Chi C, et al. Modulation of the digestibility and multi-scale structure of cassava starch by controlling the cassava growth period [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 346-353
- [19] Flanagan B M, Gidley M J, Warren F J. Rapid quantification of starch molecular order through multivariate modelling of ¹³C CP/MAS NMR spectra [J]. Chem Commun (Camb), 2015, 51(80): 14856-14858
- [20] Ratseewo J, Warren F, Siriamornpun S. The influence of starch structure and anthocyanin content on the digestibility of Thai pigmented rice [J]. Food Chemistry, 2019, 298: 124949
- [21] 陆萍.发酵及多酚复合对大米淀粉结构和消化性能的影响[D].广州:华南理工大学,2020
LU Ping. Effect of fermentation and polyphenol complexation on the structure and digestibility of rice starch [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020
- [22] Chi C, Li X, Zhang Y, et al. Modulating the in vitro digestibility and predicted glycemic index of rice starch gels by complexation with gallic acid [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 821-828
- [23] Tan L, Kong L. Starch-guest inclusion complexes: formation, structure, and enzymatic digestion [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(5): 780-790