

食品中鲜味物质研究进展

于芳珠¹, 薄存美¹, 刘登勇^{1,2*}

1. 渤海大学食品科学与工程学院, 生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 锦州 121013;
2. 江苏省肉类生产与加工质量安全控制协同创新中心, 南京 210095)

摘要: 鲜味作为五大基本味觉之一, 对食品滋味具有重要贡献。食品中的鲜味物质(包括鲜味肽、有机酸、氨基酸、核苷酸以及复合鲜味剂等)以其营养、安全等特点, 近年来逐渐成为食品鲜味科学领域以及鲜味调味品方面的研究热点, 为相关食品风味的改善提供了理论参考及研究方向。本研究介绍了鲜味物质的发展过程, 并对鲜味及鲜味物质的研究现状进行了综述。同时对鲜味物质的种类进行概述, 并对食品中主要的鲜味物质检测方法研究进展进行总结, 最后对食品中鲜味物质的发展进行展望, 以便于为食品中仪器检测鲜味物质相关研究提供参考和依据。

关键词: 鲜味物质; 检测分析; 滋味

Research progress of umami substances in food

YU Fang-Zhu¹, BO Cun-Mei¹, LIU Deng-Yong^{1,2*}

1. College of Food Science and Technology, Bohai University, National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Jinzhou 121013, China;
2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Meat Production and Processing, Quality and Safety Control, Nanjing 210095, China)

ABSTRACT: As one of the 5 basic tastes, umami has an important contribution to food taste. The umami substances (including umami peptides, organic acids, amino acids, nucleotides, and umami agents) have gradually become a hot issue in the food umami science fields and umami seasonings field in recent years due to their nutritional and safety characteristics, providing a theoretical reference for the improvement of related food flavors. This study introduced the development process of flavor substances, reviewed the research status of flavor and flavor substances, summarized the types of flavor substances and the research progress of detection methods of main flavor substances in food was, and prospected the development of flavor substances in food, so as to provide reference and basis for related research on instrument detection of delicious substances in food.

KEY WORDS: umami substances; detection analysis; taste

1 引言

滋味是消费者判断食品品质以及购买与否的重要指标, 良好的滋味可使食品更加可口。传统理论认为酸、甜、苦、咸和鲜是食品中的 5 种基本味觉, 可赋予产品不同口

味^[1]。呈鲜味的化合物加入到食品中, 若含量大于其阈值时可使产品呈现鲜味; 含量小于阈值时即使不能品尝出鲜味, 也能使产品风味增强。因此在鲜味被认定为基本味觉之前, 欧美学者将其命名为“风味增强剂”^[2]。研究表明, 在众多滋味影响因素中, 鲜味是影响食品品质的重要因素,

*通讯作者: 刘登勇, 博士, 教授, 主要研究方向为肉品加工与质量安全控制、食品风味与感知科学。E-mail: jz_dyliu@126.com

*Corresponding author: LIU Deng-Yong, Ph.D, Professor, Bohai University, No.19, Keji Road, New Songshan District, Jinzhou 121013, China. E-mail: jz_dyliu@126.com

在味觉偏好接受和食物消费中起着至关重要的作用。

鲜味肽、有机酸、核苷酸、氨基酸以及鲜味剂等鲜味物质被发现具有鲜味, 在食品中可通过蒸、煮和添加调味剂等方式得到。现有研究表明, 鲜味是通过一种类似于甜味和苦味的受体介导机制来感知的^[3]。等鲜浓度(equivalent umami concentration, EUC)是衡量呈鲜滋味的氨基酸类(谷氨酸, 天冬氨酸)与 5'-核苷酸 2 类鲜味物质协同作用所产生的鲜味强度对食品中鲜味特征的贡献, 可用来表征许多食物的鲜味强度^[4]。在有些食物中, 鲜味物质可以增强甜味或咸味感知强度, 也可增加其他风味特征, 如风味感知的厚度和复杂性等, 说明鲜味物质含量的提高有助于某些食物的整体适口性。

本研究对鲜味研究现状分析, 并对鲜味物质种类及检测技术的研究进展进行总结, 以便人们对鲜味进一步了解, 以为食品中鲜味相关方面的研究提供参考和依据。

2 鲜味的发现与特性

2.1 鲜味的发现

“民以食为天, 食以味为先”, 鲜味以其独特而微妙的“愉悦味蕾”的魅力在中华饮食文化中备受偏爱, 是评价食品风味的重要因素之一。有关鲜味历史的记载最早可追溯于南宋作家林洪的烹饪著作《山家清供》, 其中对竹笋的描述“其味甚鲜”, 开启人们对“鲜”的认知; 到明朝时有人称赞酱油“愈久愈鲜”, 鲜味在民间普及; 到清朝时鲜味获得广泛认可^[5]; 到了现代, 1886 年德国化学家利特豪森从小麦中分离出谷氨酸, 但不明确具有鲜味, 直到 1907 年日本化学家池田菊苗再次从海带中提取一种叫谷氨酸钠的鲜味物质, 并命名为“味精”^[6], 从而使“鲜味”名声大噪。继谷氨酸被发现具有鲜味后, 鲜味的研究得到迅速发展, 许多其他物质包括核苷酸如 5'-肌苷酸(5'-IMP)和 5'-鸟苷酸(5'-GMP)以及有机酸等被发现也具有呈鲜效果, 但此时鲜味仍不以基本味觉被人认可, 直到 2000 年鲜味受体的发现, 鲜味才被认为是一种基本味觉^[7]。

2.2 鲜味的特性

鲜味作为基本味觉须遵循以下 4 点: 不是其他味觉的组合; 独立于其他味觉; 存在特异性受体; 具有协同增效性^[8]。1924 年, 德国学者海宁首次提出了关于味觉的“四面体学说”^[8], 后来学者 Tilak 依据鲜味的特点, 提出了鲜味的味觉模式, 认为“4 种基本味的感受位置是在一个四面体边缘、表面、内部或邻近四面体之处, 而鲜味则是独立于外部的位”^[9,10]。鲜味作为一种独立的味觉, 既不能由其他 4 种基本味觉组合而成, 也不能合成其他基本味觉。鲜味被认为是由味觉细胞中 G 蛋白偶联受体与鲜味物质特异结合而产生的^[11], 这是鲜味独立于其他味觉的性质。目前发现至少有 2 种鲜味受体在鲜味感知过程中发挥作用机制,

分别是味型 mGluR4 和异源二聚体 T1R1/T1R3。其中 mGluR4 最早在大脑中发现, 称为脑型 mGluR4^[12], 随后又有研究发现在舌面味蕾的轮廓乳头和叶状乳头中也存在表达 mGluR4 的受体细胞, 称为味型 mGluR4。mGluR4 的主要功能是辨别鲜味和其他味觉化合物, 可接受谷氨酸和类似物的鲜味; 味觉受体 1 型(T1R1/T1R3)家族在哺乳动物味觉系统中介导鲜味, 在舌面味蕾中的蕈状乳头的味觉受体细胞中存在特异性表达^[13]。T1R1 主要负责鲜味物质的识别, T1R3 负责其他的辅助功能, 可分别鉴定 L-Glu、IMP 等鲜味物质的结合位点。T1R1/T1R3 受体在与不同鲜味化合物的结合程度上存在差异, 以 T1R1 感应谷氨酸钠、肌苷酸二钠、鸟苷酸二钠和琥珀酸二钠 4 种鲜味物质的传感能力强弱为例: 鸟苷酸二钠>谷氨酸钠>肌苷酸二钠>琥珀酸二钠^[14]。

与其他 4 种基本味觉不同的是, 鲜味物质具有协同增效的作用, 2 种或多种鲜味物质联合可以增加鲜味强度, 其作用效果高于鲜味物质单独使用时的鲜味强度, 即鲜味物质之间存在相乘效应^[15]。Dang 等^[16]利用电子舌建立了一种鲜味肽与味精协同增效作用的评价新方法, 发现 Asp-Asp-Asp 和 Glu-Ser-Val 等三肽与谷氨酸钠的结合具有较强的协同增效作用, 可显著提高鲜味强度; 也有研究报道^[17], 从鱼干和香菇中分离出的核苷酸与谷氨酸钠具有显著的协同增效作用, 其鲜味远远大于单独使用谷氨酸钠时的鲜味强度; Eric 等^[18]也指出当谷氨酸(Glu)单独存在时无法产生牛肉特征滋味, 但当与 5'-IMP 和 5'-GMP 共存时则会产生独特的肉鲜味道; 为证实鲜味物质间的协同增效机制, Dang 等^[19]向鲜味多肽中添加鲜味 Glu, 3 种变化证实了鲜味肽和 Glu 的协同增效: 首先, 谷氨酸的添加使 T1R1 结合腔的尺寸从 534.125A³ 增加到 1135.75A³; 其次, 鲜味肽与 T1R1 的结合对接能和相互作用能量发生改变; 三是增加了 Glu-429、Gln-302、Gly-304、Try-107 和 His-364 等 5 个具有鲜味特性的结合残基。

3 鲜味物质研究现状

3.1 鲜味物质种类

目前已知的能呈现鲜味的食物主要有烧鸡、鱼、盐水鸭、蚕蛹、甲壳类动物、茶叶、香菇、海带、大豆等。呈鲜味物质主要有鲜味氨基酸类、多肽类、核苷酸类、有机酸类以及复合鲜味剂等。

3.1.1 氨基酸

游离的鲜味氨基酸对食品的呈鲜特性具有十分重要的作用。食品中呈鲜味的氨基酸主要有谷氨酸、天冬氨酸、丙氨酸、甘氨酸、苯丙氨酸和酪氨酸及其钠盐, 它们属于谷氨酸钠型鲜味物质, 其中谷氨酸和天冬氨酸是最重要的两种呈鲜味氨基酸。刘天天等^[20]对沙蟹汁中的氨基酸进行分析, 结果表明沙蟹汁鲜味氨基酸含量为总的氨基酸含量

的 39.38%，说明了鲜味氨基酸对食品滋味贡献的重要性。研究表明：谷氨酸钠型鲜味物质分子结构不对称，因此存在 *L* 型和 *D* 型氨基酸，但只有 *L* 型氨基酸才具有鲜味；此类鲜味物质存在 -O-(C)_n-O-脂链结构，且 C 原子个数为 4~6 时鲜味最强烈^[21]。作为食品中仅有的 2 种酸性氨基酸，Glu 和 Asp 的结构中均含有羧基和一个氨基，等电点 (isoelectric point, PI) 分别为 3.22 和 2.97^[62]，呈鲜阈值分别为 30 mg/100 mL 和 100 mg/100 mL^[4]。王南^[4]根据扒鸡成品的滋味物质滋味活性值 (taste active value, TAV) 值得出 Glu 对扒鸡的滋味有直接贡献；周婷^[22]研究得出鲟鱼籽酱含量最多的氨基酸是呈鲜味特征的谷氨酸和天冬氨酸；谷镇^[23]对 12 种食用菌中的呈味物质进行分析，结果表明，含量最高的氨基酸为呈鲜味的天冬氨酸，呈鲜味的谷氨酸含量也较为丰富；李锐等^[24]研究鱼露中的鲜味物质，结果表明鲜甜味氨基酸的含量最高，占总氨基酸量的 48.2%，且谷氨酸对鱼露整体滋味贡献最大。除此茶叶中的茶氨酸也是茶叶中较为特殊的一种重要的呈鲜味氨基酸，赋予茶叶独特的鲜味和醇厚的风味，对茶叶滋味具有不可替代的重要贡献^[25]。

3.1.2 核苷酸

目前已发现的呈鲜味的核苷酸及其衍生物共有 30 多种。核苷酸包括 3 种同分异构体：2'-核苷酸、3'-核苷酸和 5'-核苷酸，但只有 5'-核苷酸才具有鲜味。典型的呈鲜味核苷酸有 2 种：5'-肌苷酸和 5'-鸟苷酸。核苷酸类物质具有嘌呤杂环芳烃结构，但只有 6-羟基嘌呤核苷酸才能呈鲜味特性；且第 5 个 C 原子位置发生磷酸化反应时核苷酸物质才会产生鲜味^[21]。1913 年小玉新太郎发现鲟鱼汤中的主要呈鲜物质基础为 5'-IMP，其呈味阈值为 25 mg/100 mL^[26]；19 世纪中叶德国学者 Liebig 博士从牛肉汤中分离出呈鲜味的 5'-IMP^[27]；1957 年国中明研究出香菇中具有呈鲜味特性的 5'-GMP，其呈鲜阈值为 12.5 mg/100 mL^[5]；王琳涵等^[28]对鸡汤中的呈味物质进行研究，发现鸡汤中含量最高的呈鲜味核苷酸为 5'-IMP，也有研究发现鸡肉中最主要的呈味核苷酸为 5'-IMP^[29]；李锐等^[24]的研究结果显示，核苷酸中 5'-GMP 对鱼露滋味有重要影响。食用菌中主要的鲜味核苷酸为 5'-GMP，此外 5'-UMP、5'-CMP 和 5'-AMP 等核苷酸类物质具有很强的助鲜作用，可赋予食用菌鲜美的滋味^[30]。5'-IMP 和 5'-GMP 已被发现具有协同增效的作用，按比例 1:1(m/m) 混合可在商业中作为鲜味剂添加入食品，具有增鲜提味的效果，同时二者与谷氨酸之间也有鲜味协同作用^[31]。

3.1.3 鲜味肽

鲜味肽由氨基酸聚合成，不仅可以赋予食品美味的口感，还可增强食物的鲜味和醇厚味。最早发现的鲜味肽为谷氨酰基鲜味寡肽^[32]。鲜味肽的来源广泛，主要存在于可食用菌类食品中，大豆、海带等植物性食品中也存在鲜

味肽，肉类中鲜味肽含量也较丰富，如牛肉、猪肉和鸡肉等。Yu 等^[33]从蚕蛹水解物中鉴定出 Val-Pro-Tyr、Thr-Ala-Tyr、Gly-Phe-Pro 和 Ala-Ala-Pro-Tyr 等 4 种呈鲜味的多肽；Kong 等^[34]从香菇中分离鉴定出 2 条鲜味三肽和 3 条鲜味二肽，这些肽的氨基酸序列分别为 Gly-Cys-Gly、Glu-Pro-Glu、Cys-Met、Val-Phe 和 Gly-Glu；陶正清等^[35]从盐水鸭中分离出一种呈味特性最接近鲜味的九肽，Val-Val-Thr-Asn-Pro-Ser-Arg-Pro-Trp，是盐水鸭的特征呈味肽；苏国万等^[32]从酱油中分离鉴定出 4 种二肽：Asn-Pro、Gly-Pro、Gly-Leu 和 Ala-His，发现其具有明显的鲜味和增鲜作用；罗凤莲等^[36]亦对辣椒渣中的鲜味肽进行分离纯化研究。作为一种新型鲜味物质，鲜味肽正逐渐受到关注。

3.1.4 有机酸

呈鲜味的有机酸主要有琥珀酸、乳酸和没食子酸等。琥珀酸、乳酸及其钠盐是沙蟹、虾等甲壳动物体中主要的肌肉代谢产物，但由于其含量较低，对产品的呈味特性仅起到辅助作用，并不能成为产品呈鲜的直接贡献者^[37]。Kong 等^[38]从鸡汤及鸡肉酶解液中提取呈鲜味的琥珀酸二钠，其含量分别达到 0.39 mg/mL 和 1.76 mg/mL。茶叶中琥珀酸含量较低，没食子酸和乳酸是茶叶中 2 种重要的呈鲜味的有机酸成分，可增强绿茶鲜爽味，其含量分别达到 280.37 μmol/L 和 453.42 μmol/L，与 Glu 协同可增强 Glu 的鲜味强度^[25]。

3.1.5 复合鲜味剂

复合鲜味剂又称风味增强剂，是指一类能够增强食品鲜味的化合物。根据来源不同可以分为酵母提取物、水解植物蛋白和水解动物蛋白等。酵母提取物是以面包酵母、啤酒酵母、原酵母等为原料，通过自溶、浓缩以及酶解等方式分解成的核苷酸、氨基酸以及多肽等风味物质^[39]，通过干燥等方式加工成粉末制成鲜味剂，不仅可以起到增味调鲜的作用，还具有增加食品营养价值的效果，可作为复合调味料添加到肉汤、牛肉等中，大大增强产品的风味。水解植物蛋白是指植物性蛋白通过酸法、碱法以及酶解法等方式水解得到的产物。其主要成分为氨基酸和多肽^[40]，人体对其具有良好的吸收效果，起到增鲜调味、改善风味、掩盖异味的的作用。水解动物蛋白是指以猪肉、鸡肉和牛肉等动物肌肉为原料，通过酶法等方式将蛋白质水解成氨基酸和多肽的鲜味剂。除动物肌肉外，动物血液、脾脏及其结缔组织等都可通过水解制备成水解动物蛋白，将其添加到肉类制品中可改进肉香，有效抑制肉腥味^[41]。

3.2 主要呈鲜物质检测方法分析

鲜味成分对食品滋味具有很大的贡献，其中在呈鲜味方面起主导作用的是氨基酸和核苷酸，因此实现其含量的检测对实现产品品质的稳定性具有重要的作用。

3.2.1 氨基酸检测

目前测定鲜味氨基酸一般使用全自动氨基酸分析仪，

其检测原理是首先将样品中的氨基酸和肽类等大分子物质水解成单个的氨基酸。氨基酸在酸性条件下变成阳离子, 流经装有离子交换树脂的色谱柱后与色谱柱中的离子发生离子交换, 不同氨基酸因交换程度不同而分离, 再与茚三酮试剂发生反应生成紫色或黄色或深蓝色化合物, 可用荧光检测器检测吸光值。氨基酸浓度与吸光强度符合朗伯-比尔定律, 可据此对氨基酸进行定性、定量分析。使用氨基酸分析仪检测方法准确可靠, 具有样品前处理方法简单、检测灵敏度高、重现性较好、可在多时间内实现大量样品的测定以及应用于未知的复杂样品的检测等优点^[42-47]。余自琳等^[42]以墨鱼酶解液和葡萄糖-木糖混合糖为原料, 应用全自动氨基酸分析仪, 研究了 pH 变化对美拉德反应产物中的氨基酸的影响, 结果共检测出 16 种游离氨基酸, 其中鲜味氨基酸与苦味氨基酸含量均随着 pH 的升高而降低; 周礼元等^[43]采用氨基酸分析仪检测出金福菇子实体中呈鲜味的谷氨酸和天冬氨酸含量分别为 3.62 mg/g 和 0.21 mg/g, 具有很强的助鲜作用; 任佳桦等^[44]利用氨基酸分析仪检测酵母提取物滋味成分, 结果表明呈鲜谷氨酸对酵母提取物的滋味贡献最大, 且与鲜味核苷酸(5'-GMP、5'-IMP 和 5'-AMP)的协同增鲜可有效减轻腥味; 方林^[45]使用氨基酸分析仪检测出草鱼不同部位游离氨基酸含量, 结果表明草鱼红肉部位呈鲜味的天冬氨酸和谷氨酸明显高于背肉和腹肉; 阮明杰等^[46]利用氨基酸自动分析仪检测 1~12 月份刀鲚鱼中的游离氨基酸变化规律, 结果显示, 各游离氨基酸 3 月份达到最高, 3~10 月份开始下降, 鲜味的谷氨酸和甘氨酸也显著降低, 11~12 月份回升; 张航等^[47]建立了氨基酸自动分析仪法测定云南新鲜羊肚菌中游离氨基酸含量, 样品经匀浆后加入酸水解, 结果显示呈鲜味的谷氨酸和天冬氨酸含量丰富, 占游离氨基酸总量的 21.8%~24.4%。

除氨基酸分析仪法, 高效液相色谱法、毛细管电泳法、气相色谱法、电化学传感器等方法也在呈鲜氨基酸的检测中得到应用。此外, 气相色谱-质谱联用技术(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)也可被应用于

呈鲜氨基酸的检测。Mohana 等^[48]用 6 mol/L 的盐酸对蛋白质样品进行水解, 以氯甲酸乙酯为衍生剂对样品进行衍生, 再将样品萃取后采用进行检测, 共鉴定出 20 种氨基酸, 其中 2 种为鲜味氨基酸, 该方法快速、灵敏、准确度高, 可应用于复杂生物样品和食品样品中氨基酸的测定; 杨芹等^[49]采用甲基叔丁基醚-甲醇-水体系提取蝎子样品, 提取物经 GC-MS 共检测出 16 种游离氨基酸; Azevedo 等^[50]通过 GC-MS 测定巴西蜂蜜游离氨基酸(free amino acid, FAA), 结果表明该方法准确、可靠, 可用于蜂蜜中氨基酸的分离鉴别, 这几种方法的原理、特点及应用如表 1 所示。

3.2.2 核苷酸检测

呈鲜味的核苷酸的检测方法主要有液相色谱法、毛细管电泳法、紫外分光光度法。丁奇^[55]采用高效液相色谱仪检测鸡汤及鸡汤酶解液中的 5'-GMP 和 5'-IMP, 在检测波长为 254 nm、流动相为 5%的甲醇和 95%的磷酸二氢钾(0.05 mol/L, pH 调为 4.5)、流速为 1.0 mL/min 的条件下, 检测结果的回收率在 103.3%~104.9%, 表明该方法检测的准确度较高, 可用于呈味核苷酸的分析检测; Pilar 等^[56]采用高效液相色谱-电喷雾-高分辨飞行时间质谱联用技术快速测定婴儿食品中的 5'-GMP 和 5'-IMP, 先将样品经稀释和离心处理, 随后用乙腈进行提取, 使其在亲水作用色谱(hydrophilic interaction chromatography, HILIC)体系中充分分离, 经处理后的样品萃取回收率达 80%以上; 左瑾瑜等^[57]应用毛细管区带-紫外检测器法(capillary zone ultraviolet, CZE-UV)分离检测猪肉中的核苷酸, 电泳条件是以 pH 为 10 的硼砂溶液为缓冲液, 分离条件为温度 25 °C、检测波长 214 nm 以及分离电压为 25 kV, 结果表明 4 种核苷酸在 13 min 内发生分离, 其中呈鲜味 5'-IMP 检测结果的回收率为 95%, 重复性和稳定性良好。叶珊^[58]提出了一种利用紫外分光光度法同时测定 5'-IMP 和 5'-GMP 的方法, 并将所得的数据进行了几种化学计量学方法的处理, 结果显示主成分回归法的预报误差最低, 进而利用此方法对鸡精和味精中呈鲜味的 5'-GMP 和 5'-IMP 进行了回收实验, 其回收率均在 98%以上。

表 1 呈味氨基酸的几种检测方法
Table 1 Several detection methods of taste amino acids

方法	原理	特点	应用
高效液相色谱法	流动相为极性, 固定相为非极性, 根据氨基酸在流动相和固定相中溶解度不同而分离	不受热稳定性以及物质挥发等方面的限制, 且检测范围广泛; 但样品前处理复杂, 色谱柱易受损坏和污染	Kazan 等 ^[51] 测定茶叶中的氨基酸; 芮鸿飞等 ^[52] 测定黄酒中的 Glu 和 Asp
毛细管电泳法	以高压电流为驱动力, 以毛细管为分离通道, 根据不同物质分配行为的差异进行分离的技术	样品量消耗少、分离效果好、分离速度快、分离模式多样; 但制备能力差、检测灵敏度低、分离重现性较差	Hong 等 ^[53] 测定蜂王浆中的 Glu 和 Asp
气相色谱法	样品经气化后, 在流动相和固定相体系中做相对运动, 不同分配系数的组分在两相间多次反复分配达到分离目的	分离效率高、可分离沸点相近的化合物、衍生物稳定; 但设备定性能力差、不能直接分析未知氨基酸成分	李晓庆等 ^[54] 测定柑橘中的 Glu 和 Asp

3.2.3 电化学传感器检测

应用电化学技术检测正逐渐成为当下的研究热点。电化学技术的原理是利用物质在溶液中的反应性质,当某种物质在溶液中进行反应时,会引起一系列的电化学反应,通过反应所产生的电势差来实现物质的检测。目前常用的电化学检测方法有循环伏安法、差分脉冲伏安法、开路电位法、电化学交流阻抗法等。方法通过改变敏感层的性质产生一定的电化学响应,可选择性地识别待测物质,具有安全、灵敏度高、稳定性和可选择性强等优点。Batra 等^[59]利用电化学原理检测 Glu 含量,首先将羧化多壁碳纳米管(cMWCNT)、金纳米颗粒(AuNPs)和壳聚糖(chitosan, CHIT)复合膜修饰于金电极表面,并在此基础上修饰谷氨酸氧化酶,结果表明,在 pH7.5 和 35 °C 条件下,传感器于 2 s 内产生响应值,具有低检出限和高灵敏度等特点; Shi 等^[60]利用离子液体 1-辛基-3-甲基咪唑六氟磷酸(OMIMPFO)修饰碳糊电极制备了一种新型电化学传感器,电极通过离子修饰,对 5'-GMP 具有良好的氧化电催化活性,该方法可进一步应用于样品中 5'-GMP 含量的测定; Fei 等^[61]合成了石墨相氮化碳掺杂的羧化多壁碳纳米管复合材料用于 5'-GMP 的检测,电极经羧酸盐羧化处理,不仅可以增加羧化石墨相氮化碳多壁碳纳米管复合材料溶解度,羧基还可以与 5'-GMP 中的氨基发生反应,具有较高的电催化活性、良好的导电性和生物相容性,对 5'-GMP 的测定起着至关重要的作用,可较好地代替其他方法进行 5'-GMP 的分析测定; 朱灵涛^[62]以铂盘电极为载体,研制出了基于 N, N'-二苯基硫脲的膜修饰传感器,可用于同时检测谷氨酸和天冬氨酸 2 种鲜味氨基酸。

3.2.4 鲜味受体生物传感器检测

生物传感器是利用其对生物物质的敏感性,将物质的浓度转换成电信号进行检测的仪器。其主要由两部分构成,一个是用来识别被检测物质的感应元件,又可以与被检测物质反应形成复合物。被检测物质扩散后经分子识别,产生的生物学信号通过第二部分信号传导器转变为易于传输处理的电信号,经过放大输出即可完成对物质的检测^[63]。

关于生物传感器相关方面的研究,秦臻^[64]将味觉受体作为电子舌敏感元件,首次提出在体生物电子舌概念,以大鼠为试验对象,利用大鼠完整的味觉感受系统,采用神经信号记录设备对采集的信号进行记录,并采用神经解码算法对记录的信号进行特征处理,最终建立味觉分类模型和味觉物质的定量分析。Ahn 等^[65]利用了 T1R1/T1R3 受体,研制了一种基于石墨烯场效应晶体管的双电子舌,将 2 种受体固定于石墨烯表面制成生物传感器,可用于同时检测鲜味和甜味物质。为了特异性检测鲜味物质, Ahn 等^[66]又从大肠杆菌中分离和纯化 T1R1 受体,制成了模拟人类 T1R1 受体的纳米材料,将其固定于石墨烯晶体管制成人造生物传感器,并应用于绿茶和番茄汁(含谷氨酸)样

品的检测,结果表明,随着样品浓度增加,电信号强度增加,并且在样品中添加 5'-肌苷酸(5'-IMP)电信号也存在规律性变化;但当添加糖精(甜味)时,测试的电信号结果无明显变化,说明 T1R1 受体不存在与甜味的结合位点, T1R1 受体制成的生物传感器可用于特异性检测食物中的鲜味成分。庞广昌团队^[11]研究构建了基于双层纳米金-T1R1 受体结构的生物传感器,采用制备的传感器对 4 种常见鲜味物质(谷氨酸钠、肌苷酸二钠、鸟苷酸二钠和琥珀酸二钠)进行检测,得出的传感能力强弱为:鸟苷酸二钠>谷氨酸钠>肌苷酸二钠>琥珀酸二钠。T1R1 作为一种营养受体,是机体细胞识别氮信号的受体; Wei 等^[67]利用大鼠心肌细胞作为味觉传感元件,开发了一种基于仿生细胞的体外鲜味检测的生物电子舌,可特异性检测呈鲜味的谷氨酸钠。与传统常规方法检测相比,生物鲜味受体仿生传感器具有高灵敏性和特异性等特点,且与人体具有相似的鲜味识别性能,因此在食物、饮料和药物等领域都有潜在的应用价值。

4 总结与展望

本研究对食品中鲜味及鲜味物质的研究现状、鲜味物质检测方法研究进展等进行了总结。鲜味是对食品风味产生重要影响的因素之一,因此有关鲜味物质在食品风味领域的研究近几年备受青睐。尤其是以鲜味物质为基础的新型鲜味调味品的开发和利用日益成为人们关注的焦点。在我国,鲜味物质的研究多停留在从食品中提取鲜味成分并进行鉴定,但将食品中的鲜味提取并将其研制成可添加于食品中的风味添加剂却鲜有报道,且鲜味物质提取和制备技术尚不成熟,在研制的过程中要考虑提取的鲜味不足或鲜味消失等无法预知的后果。

鲜味物质检测技术方面,现有检测技术存在一定的局限性,分析成本高、便携性差、需要高素质操作人员等,都会增加企业分析成本;将仪器客观检测与人的主观判断相结合的方式可增加实际应用价值,但重现性的好坏需要考虑;仪器检测可以对不同鲜味物质进行区分,但无法比较鲜味强弱,感官评价是最直接的评价食品鲜味强弱的手段,但受主观因素影响较大,需要大量人员的参与,并且要对感官评价员进行人员培训,以降低个体差异引起的误差。

关于鲜味受体的应用,现研究多集中于从菌体中分离纯化并将其固定于纳米材料而实现鲜味的检测,但存在操作繁琐、成本高,且当菌体发生变异时无法预知其风险等缺点。因此,开发可简化操作、有利于降低成本及提高可靠性的人造受体替代纯化受体具有重要意义。

参考文献

- [1] Lindemann B. Receptors and transduction in taste [J]. Nature, 2001,

- 413(6852): 219
- [2] 李学鹏, 谢晓霞, 朱文慧, 等. 食品中鲜味物质及鲜味肽的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(22): 319–327.
Li XP, Xie XX, Zhu WH, *et al.* Research progress of umami substances and umami peptides in food [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(22): 319–327.
- [3] Fuke S. Interactions between umami and other flavor characteristics [J]. *Trend Food Sci Technol*, 1996, 7(12): 407–411.
- [4] 王南. 扒鸡加工过程中品质指标变化规律[D]. 锦州: 渤海大学, 2016.
Wang N. The rules of quality change in braised chicken during processing procedures [D]. Jinzhou: Bohai University, 2016.
- [5] 刘源, 王文利, 张丹妮. 食品鲜味研究进展[J]. 中国食品学报, 2017, 17(9): 1–10.
Liu Y, Wang WL, Zhang DN. Research progress of umami in food [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2017, 17(9): 1–10.
- [6] Sano C. History of glutamate production [J]. *Amer J Clin Nutr*, 2009, 90(3): 728–732.
- [7] Damak S. Detection of sweet and umami taste in the absence of taste receptor T1R3 [J]. *Science*, 2003, 301(5634): 850–853.
- [8] Kenzo K. Umami the fifth basic taste: History of studies on receptor mechanisms and role as a food flavor [J]. *Bio Med Res Int*, 2015, (2015): 1–10.
- [9] Cheled-Shoval SL, Druyan S, Uni Z. Bitter, sweet and umami taste receptors and downstream signaling effectors: Expression in embryonic and growing chicken gastrointestinal tract [J]. *Poul Sci*, 2015, 94(8): 1928–1941.
- [10] 龚骏, 陶宁萍, 顾赛麒. 食品中鲜味物质及其检测研究方法概述[J]. 中国调味品, 2014, 39(1): 129–135.
Gong J, Tao NP, Gu SQ. Overview of umami substance in food and its detection methods [J]. *China Cond*, 2014, 39(1): 129–135.
- [11] 庞广昌, 陈庆森, 胡志和, 等. 味觉受体及其传感器研究与应用[J]. 食品科学, 2017, 38(5): 288–298.
Pang GC, Chen QS, Hu ZH, *et al.* Advances in research on taste receptors and application prospects of taste sensors [J]. *Food Sci*, 2017, 38(5): 288–298.
- [12] 王晶, 张勇, 黄铁军. 动物鲜味受体的研究进展及其基因表达调控[J]. 动物营养学报, 2016, 28(9): 2702–2708.
Wang J, Zhang Y, Huang TJ. Umami receptors: Research progress and gene expression regulation [J]. *Chin J Anim Nutr*, 2016, 28(9): 2702–2708.
- [13] Yoshida Y, Wang ZH, Tehrani KF, *et al.* Bitter taste receptor T2R7 and umami taste receptor subunit T1R1 are expressed highly in vimentin-negative taste bud cells in chickens [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2019, 511(2): 280–286.
- [14] Huang YL, Lu DQ, Liu H, *et al.* Preliminary research on receptor-ligand recognition mechanism of umami by an hT1R1 biosensor [J]. *Food Funct*, 2019, 10(3): 1280–1287.
- [15] 郇芳玲. 食用菌中鲜味物质味感相互作用的研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2016.
Bing FL. The taste interaction of umami substances in edible fungi [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2016.
- [16] Dang YL, Hao L, Zhou TY, *et al.* Establishment of new assessment method for the synergistic effect between umami peptides and monosodium glutamate using electronic tongue [J]. *Food Res Int (Ottawa, Ont.)*, 2019, (121): 20–27.
- [17] López-Cascales JJ, Costa SDO, Groot BLD, *et al.* Binding of glutamate to the umami receptor [J]. *Biophys Chem*, 2010, 152(1–3): 139–144.
- [18] Eric K, Raymond LV, Huang M, *et al.* Sensory attributes and antioxidant capacity of Maillard reaction products derived from xylose, cysteine and sunflower protein hydrolysate model system [J]. *Food Res Int*, 2013, 54(2): 1437–1447.
- [19] Dang YL, Hao L, Cao JX, *et al.* Molecular docking and simulation of the synergistic effect between umami peptides, monosodium glutamate and taste receptor T1R1/T1R3 [J]. *Food Chem*, 2019, 271(15): 697–706.
- [20] 刘天天, 梁中永, 范思华, 等. 北海沙蟹特征滋味成分的分析[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 236–241.
Liu TT, Liang ZY, Fan SH, *et al.* Analysis of characteristic taste components of soldier crab (*Mictyris brevidactylus*) [J]. *Food Sci*, 2018, 39(14): 236–241.
- [21] 张开诚. 鲜味剂的结构特征与呈味机理的探讨[J]. 中国调味品, 2001, (6): 28–32.
Zhang KC. Study on the structure characteristics and flavor mechanism of umami agent [J]. *China Cond*, 2001, (6): 28–32.
- [22] 周婷. 鲟鱼籽酱贮藏期间品质及优势微生物变化的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
Zhou T. Studies on changes of quality and dominant microorganism in sturgeon caviar during storage [D]. Shanghai Ocean University, 2016.
- [23] 谷镇. 食用菌呈香呈味物质分析及制备工艺研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2012.
Gu Z. Study on the determination of flavor substances and preparation technology [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2012.
- [24] 李锐, 张海玲, 李旭艳, 等. 三种发酵方法制备远东拟沙丁鱼露中鲜味物质的比较[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(22): 143–149.
Li R, Zhang HL, Li XY, *et al.* Umami substances comparison of sardinops sagax fish sauces prepared by three fermentation processes [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(22): 143–149.
- [25] 刘爽. 绿茶鲜爽味的化学成分及判别模型研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
Liu S. Study on the fresh and brisk taste and its discriminant model of green tea [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [26] 顾复昌, 徐静娅. 鲜味剂的特性[J]. 食品科学, 1983, 4(9): 15–17.
Gu FC, Xu JY. Characteristics of umami agent [J]. *Food Sci*, 1983, 4(9): 15–17.
- [27] 吕东坡, 朱仁俊. 肌苷酸的研究现状及展望[J]. 肉类研究, 2007, (11): 53–56.
Lv DP, Zhu RJ. The research status and potential using of IMP [J]. *Meat Res*, 2007, (11): 53–56.
- [28] 王琳涵, 乔凯娜, 丁奇, 等. 不同煮制时间对鸡汤中呈味物质的影响[J]. 精细化工, 2018, 35(10): 1683–1690.
Wang LH, Qiao KN, Ding Q, *et al.* Effect of different cooking time on taste compounds in chicken soup [J]. *Fine Chem*, 2018, 35(10): 1683–1690.
- [29] 席斌, 王莉蓉, 陈效威, 等. 冰鲜时间对不同性别青爪乌鸡和黄麻鸡肉中肌苷酸含量的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(22): 21–24, 29.
Xi B, Wang LR, Chen XW, *et al.* Influence of fresh time on inosine monophosphate content in black claw chicken and yellow chicken of

- different gender [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(22): 21–24, 29.
- [30] Manninen H, Rotola-Pukkila M, Aisala H, *et al.* Free amino acids and 5'-nucleotides in Finnish forest mushrooms [J]. *Food Chem*, 2018, (247): 23–28.
- [31] 潘见, 杨俊杰, 朱双杰, 等. 四种不同品种猪肉滋味成分差异研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(14): 161–164, 174.
Pan J, Yang JJ, Zhu SJ, *et al.* Comparison of taste compounds in pork from four different breeds [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(14): 161–164, 174.
- [32] 苏国万, 赵炫, 张佳男, 等. 酱油中鲜味二肽的分离鉴定及其呈味特性研究[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(5): 7–15.
Su GW, Zhao X, Zhang JN, *et al.* Isolation, identification and taste characteristics of umami dipeptides from soy sauce [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2019, 35(5): 7–15.
- [33] Yu Z, Jiang H, Guo R, *et al.* Taste, umami-enhance effect and amino acid sequence of peptides separated from silkworm pupa hydrolysate [J]. *Food Res Int*, 2018, (108): 144–150.
- [34] Kong Y, Zhang LL, Zhao J, *et al.* Isolation and identification of the umami peptides from shiitake mushroom by consecutive chromatography and LC-Q-TOF-MS [J]. *Food Res Int*, 2018, (121): 463–470.
- [35] 陶正清, 刘登勇, 周光宏, 等. 盐水鸭工业化加工过程中主要滋味物质的测定及呈味作用评价[J]. *核农学报*, 2014, 28(4): 632–639.
Tao ZQ, Liu DY, Zhou GH, *et al.* Taste evaluation of nonvolatile taste compounds in Nanjing cooked duck during modern processing [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2014, 28(4): 632–639.
- [36] 罗凤莲, 王燕, 赵静. 辣椒渣鲜味肽初步分离纯化研究[J]. *农产品加工*, 2017, (18): 8–10.
Luo FL, Wang Y, Zhao J. Preliminary isolation and purification of chill residue umami peptide [J]. *Farm Prod Proc*, 2017, (18): 8–10.
- [37] 邵宏宏, 周秀锦, 周向阳, 等. 抑制型离子色谱法测定海产品中的有机酸类鲜味物质[J]. *中国调味品*, 2014, 39(3): 94–97.
Shao HH, Zhou XJ, Zhou XY, *et al.* Simultaneous determination of umami substances of organic acids in marine products by suppressed ion chromatography [J]. *China Cond*, 2014, 39(3): 94–97.
- [38] Kong Y, Yang X, Ding Q, *et al.* Comparison of non-volatile umami components in chicken soup and chicken enzymatic hydrolysate [J]. *Food Res Int*, 2017, (102): 559–566.
- [39] 李欣瑶. 高核苷酸酵母水解物在对虾中的应用研究[J]. *当代水产*, 2017, (10): 68–70.
Li XY. Application of high nucleotide yeast hydrolysate in prawn [J]. *Curr Fish*, 2017, (10): 68–70.
- [40] 韩硕, 郑姣姣, 李永歌. 酸水解植物蛋白调味粉在蚝油中的应用[J]. *中国调味品*, 2019, 44(1): 136–140.
Han S, Zheng JJ, Li YG. Application of HVP powder in oyster sauce [J]. *China Cond*, 2019, 44(1): 136–140.
- [41] 姜元欣, 黄柳霖, 余炼, 等. 几种动物蛋白水解液抗氧化活性比较研究[J]. *轻工科技*, 2018, 34(8): 20–22.
Jiang YX, Huang LL, Yu L, *et al.* Comparative study on antioxidant activity of several animal protein hydrolysates [J]. *Light Ind Sci Technol*, 2018, 34(8): 20–22.
- [42] 余自琳, 郭荣灿, 姜毅, 等. pH 对墨鱼酶解物美拉德反应产物风味的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(15): 280–286.
Yu ZL, Guo RC, Jiang Y, *et al.* Effect of pH on flavor of Maillard reaction products from cuttlefish hydrolysate [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(15): 280–286.
- [43] 周礼元, 姜孝珣. 金福菇子实体的基本组成及呈味物质的分析[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(24): 124–128.
Zhou LY, Jiang XX. The analysis of nutritional characteristics and nonvolatile taste components from *Tricholoma lobayense* Heim [J]. *Food Res Dev*, 2018, 39(24): 124–128.
- [44] 任佳铎, 翟营营, 黄晶晶, 等. 酵母抽提物滋味成分分析及其复合调味料对鲢鱼风味的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2019, 38(5): 1–13.
Ren JY, Zhai YY, Huang JJ, *et al.* Analysis of the taste components of yeast extract and the effect of compound seasoning on the flavor of silver carp [J]. *J Huazhong Agric Univ*, 2019, 38(5): 1–13.
- [45] 方林. 草鱼滋味物质及品质变化的影响因素研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
Fang L. Study on taste components and quality variation of grass carp meat [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [46] 阮明杰, 陶宁萍. 不同月份刀鲚鲜味物质变化规律[J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(4): 626–633.
Ruan MJ, Tao NP. Change law of *Coilia nasua* umami taste in different months [J]. *J Shanghai Ocean Univ*, 2019, 28(4): 626–633.
- [47] 张航, 宋卿, 林佳, 等. 氨基酸自动分析仪法测定云南新鲜羊肚菌中16种氨基酸的含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(22): 7564–7569.
Zhang H, Song Q, Lin J, *et al.* Determination of 16 amino acids in fresh *Morchella esculenta* of Yunnan province by amino acid automatic analyzer [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(22): 7564–7569.
- [48] Mohana KRM, Ratnasekhar C, Rajeev J, *et al.* Rapid and simultaneous determination of twenty amino acids in complex biological and food samples by solid-phase microextraction and gas chromatography–mass spectrometry with the aid of experimental design after ethyl chloroformate derivatization [J]. *J Chromatogr B Anal Technol Biomed Life Sci*, 2013, (907): 56–64.
- [49] 杨芹, 陶瑞, 王鸿超, 等. 基于气相色谱-质谱联用技术的蝎子中脂肪酸与氨基酸的同时提取与分析[J]. *中国食品学报*, 2016, (10): 174–182.
Yang Q, Tao R, Wang HC, *et al.* Analysis of fatty acids and amino acids in scorpion by gas chromatography mass spectrometry [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2016, (10): 174–182.
- [50] Azevedo MS, Seraglio SKT, Rocha G, *et al.* Free amino acid determination by GC-MS combined with a chemometric approach for geographical classification of bracatinga honeydew honey (*Mimosa scabrella* Benth) [J]. *Food Control*, 2017, (78): 383–392.
- [51] Kazan RM, Seddik HA, Marstani ZM, *et al.* Determination of amino acids content in tea species using liquid chromatography via pre-column fluorescence derivatization [J]. *Microchem J*, 2019, (150): 104103.
- [52] 芮鸿飞, 张晓瑜, 刘兴泉, 等. PITC 柱前衍生-反相高效液相色谱法测定黄酒中游离氨基酸和生物胺[J]. *食品科学*, 2016, 37(8): 159–163.
Rui HF, Zhang XY, Liu XQ, *et al.* Simultaneous determination of free amino acids and biogenic amines in Chinese rice wine by RP-HPLC with pre-column phenylisothiocyanate (PITC) derivatization [J]. *Food Sci*, 2016, 37(8): 159–163.
- [53] Hong AD, Minh TV, Thanh DN, *et al.* Determination of 10-hydroxy-2-decenoic acid and free amino acids in royal jelly supplements with purpose-made capillary electrophoresis coupled with

- contactless conductivity detection [J]. *J Food Compos Anal*, 2020, (87): 103442.
- [54] 李晓庆, 蔡颖, 潘思轶, 等. 氯甲酸异丁酯二次衍生-气相色谱法检测柑橘中游离氨基酸[J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(2): 122–132
Li XQ, Cai Y, Pan SY, *et al.* Analysis of free amino acids in citrus by gas chromatography after isobutyl chloroformate second derivatization [J]. *J Huazhong Agric Univ*, 2020, 39(2): 122–132
- [55] 丁奇. 鸡汤及鸡肉酶解液中鲜味成分的测定与对比分析[D]. 北京: 北京工商大学, 2017.
Ding Q. Determination and analysis of umami components from chicken soup and chicken enzymatic hydrolysate [D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2017.
- [56] Pilar V, Natalia C, Gema FM, *et al.* Ion-pair high-performance liquid chromatography with diode array detection coupled to dual electrospray atmospheric pressure chemical ionization time-of-flight mass spectrometry for the determination of nucleotides in baby foods [J]. *J Chromatogr A*, 2010, 1217(32): 5197–5203.
- [57] 左瑾瑜, 李婷婷, 王树民, 等. 应用毛细管区带电泳-紫外检测法分离猪肉中的 4 种核苷酸[J]. *食品科技*, 2017, 42(9): 294–299.
Zuo JY, Li TT, Wang SM, *et al.* Determination of four nucleotides in pork by capillary zone electrophoresis with direct ultraviolet detection [J]. *Food Sci Technol*, 2017, 42(9): 294–299.
- [58] 叶娜. 主成分回归校正法-紫外分光光度法同时测定鲜味剂中 5'-肌苷酸二钠和 5'-鸟苷酸二钠[J]. *理化检验(化学分册)*, 2010, 46(7): 784–786.
Ye S. Simultaneous UV-spectrophotometric determination of disodium 5'-inosinate and disodium 5'-guanylate in tasty flavourings with calibration by the method of principal component regression [J]. *Phys Test Chem Anal Part B*, 2010, 46(7): 784–786.
- [59] Batra B, Pundir CS. An amperometric glutamate biosensor based on immobilization of glutamate oxidase onto carboxylated multiwalled carbon nanotubes/gold nanoparticles/chitosan composite film modified Au electrode [J]. *Biosens Bioelectron*, 2013, (47): 496–501.
- [60] Shi F, Wang X, Wang W, *et al.* Electrochemical behavior and determination of guanosine-5'-monophosphate on a ionic liquid modified carbon electrode [J]. *J Anal Chem*, 2015, 70(2): 186–192.
- [61] Fei QQ. A novel non-enzymatic sensing platform for determination of 5'-guanosine monophosphate in meat [J]. *Food Chem*, 2019, 286(15): 515–521.
- [62] 朱灵涛. 基于膜修饰传感器的牛肉滋味品质评价及呈鲜味氨基酸检测方法[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
Zhu LT. Evaluation of beef taste quality and detection of umami amino acids based on film modified sensors [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [63] 李羽. 生物传感器在食品安全检测中的应用和发展[J]. *现代食品*, 2019, (6): 26–28.
Li Y. Application and development of biosensors in food safety testing [J]. *Mod Food*, 2019, (6): 26–28.
- [64] 秦臻. 基于生物味觉的仿生电子舌及其在味觉检测与识别中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Qin Z. Detection and identification of tastants using biomimetic tongues based on biological gustation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [65] Ahn SR, An JH, Song HS, *et al.* Duplex bioelectronic tongue for sensing umami and sweet tastes based on human taste receptor nanovesicles [J]. *Acs Nano*, 2016, (10): 7287–7296.
- [66] Ahn SR, An JH, Jiang AH, *et al.* High-performance bioelectronic tongue using ligand binding domain T1R1 VFT for umami taste detection [J]. *Biosens Bioelectron*, 2018, (117): 628–636.
- [67] Wei XW, Qin CL, Gu CL, *et al.* A novel bionic *in vitro* bioelectronic tongue based on cardiomyocytes and microelectrode array for bitter and umami detection [J]. *Biosens Bioelectron*, 2019, (145): 111673.

(责任编辑: 李磅礴)

作者简介



于芳珠, 硕士研究生, 主要研究方向为肉品加工与质量安全控制。

E-mail: yufangzhu1997@126.com



刘登勇, 博士, 教授, 主要研究方向为肉品加工与质量安全控制、食品风味与感知科学。

E-mail: jz_dyliu@126.com