基于多模态感官风味的高鲜酵母抽提物制备工艺优化

王星月[1]，汲广习[2]，张云凯[3]，李树标[3]，苏同孝[2]，郑宇涵[1]，纪凌枫[1]，解万翠[1*]

（1.青岛科技大学生物工程学院，山东青岛 266045）（2.齐齐哈尔龙江阜丰生物科技有限公司，黑龙江齐齐哈尔 161033）（3.山东阜丰发酵有限公司，山东临沂 276600）

摘要：为突破现有破壁技术在酵母抽提物工业化生产中提取率与风味难以兼顾的瓶颈，该研究旨在优化破壁工艺以制备高鲜酵母抽提物。系统比较胶体磨、超声破碎及乙酸乙酯添加三种破壁方式，整合感官品评、电子鼻、电子舌及脑电感知技术，对破壁及酶解后的酵母抽提物进行多模态分析。结果显示：胶体磨（15 min，50 ℃）、超声破碎（80 min，70 W）及乙酸乙酯辅助（质量分数 7.5%，9 h）的破壁率分别为 90.33%、82.13% 和 65.12%；酶解后样品的感官整体风味评价得分依次为 8.33、8.30 和 7.73，鲜味特征显著；电子鼻与电子舌结果进一步验证了感官品评结果，鲜味值依次为 18.03、17.32、17.12，胶体磨处理样品味感最佳且风味协调，乙酸乙酯样品香气更浓郁；脑电分析（聚焦 δ 节律）表明，胶体磨处理样品的全脑 δ 波能量密度显著更高，与其最高鲜味强度直接相关。胶体磨破壁兼具高提取率和最优风味，酶解产物鲜味突出、协调性好，该研究为基于多模态感官技术开发高风味酵母抽提物提供了工艺依据与理论支持。

关键词：细胞破壁；胶体磨；超声；乙酸乙酯；酵母抽提物；多模态感官分析

文章编号：1673-9078(2026)10-169-178 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.1072

Optimization of the Preparation Process for High-Umami Yeast Extract Based on Multimodal Sensory Flavor

WANG Xingyue[1], JI Guangxi[2], ZHANG Yunkai[3], LI Shubiao[3], SU Tongxue[2], ZHENG Yuhan[1], JI Lingfeng[1], XIE Wancui[1*]

(1.School of Bioengineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266045, China)

(2.Qiqihar Longjiang Fufeng Biotechnology Co. Ltd., Qiqihar 161033, China)

(3.Shandong Fufeng Fermentation Co. Ltd., Linyi 276600, China)

Abstract: To address the limitations in existing cell disruption technologies, which make it difficult to balance extraction efficiency and flavor in the industrial production of yeast extract, the cell disruption process for preparing high-umami yeast extract was optimized. Three cell disruption methods, namely colloid milling, ultrasonic disruption, and ethyl acetate addition, were systematically compared. Multimodal analysis of the yeast extract after cell disruption and enzymatic hydrolysis was performed by integrating sensory evaluation, electronic nose, electronic tongue, and electroencephalography (EEG) sensing technologies. The results showed that the cell disruption rates for colloid milling (15 min, 50 ℃), ultrasonic disruption (80 min, 70 W), and ethyl acetate assistance (mass fraction 7.5%, 9 h) were 90.33%, 82.13%, and 65.12%, respectively. After enzymatic hydrolysis, the overall sensory flavor evaluation scores of the samples were 8.33, 8.30, and 7.73, respectively, with significant umami characteristics. The results of the electronic nose and electronic tongue further verified the sensory evaluation results, with umami values of 18.03, 17.32, and 17.12, respectively. The sample treated with colloid milling had the best taste and coherent flavor, while the sample treated with ethyl acetate had a more intense aroma. EEG analysis (focused on δ rhythm) showed that the whole-brain δ-wave energy density of

收稿日期：2025-07-30；修回日期：2025-08-23；接受日期：2025-08-29

基金项目：国家自然科学基金资助项目（32472483）；黑龙江省重点研发计划项目（2025ZX02A03）

作者简介：王星月（2002-），女，硕士研究生，研究方向：天然鲜味剂，E-mail：15150714260@163.com

通讯作者：解万翠（1969-），女，博士，教授，研究方向：水产品风味与生物活性物质，E-mail：xiewancui@163.com

the sample treated with colloid milling was significantly higher than that of other groups, and this was associated with the highest umami intensity. Colloid milling for cell disruption achieves both high extraction efficiency and optimal flavor quality, and the resulting enzymatic hydrolysate exhibited a strong umami flavor and good consistency. This study provides a technical foundation and theoretical support for the development of high-flavor yeast extract based on multimodal sensory technology.

Key words: cell disruption; colloid milling; ultrasound; ethyl acetate; yeast extract; multimodal sensory analysis

引文格式：

王星月,汲广习,张云凯,等.基于多模态感官风味的高鲜酵母抽提物制备工艺优化[J].现代食品科技,2026,42(10):169-178.

WANG Xingyue, JI Guangxi, ZHANG Yunkai, et al. Optimization of the preparation process for high-umami yeast extract based on multimodal sensory flavor [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(10): 169-178.

食品工业的发展与消费者对天然营养的需求增长，推动了酵母这一多功能微生物资源的深度利用，其富含约 50% 的蛋白质及 6% 的核苷酸，是优质风味物质载体。通过酶解或自溶技术释放内部鲜味物质（如谷氨酸、呈味核苷酸）及香气成分（如醛酮类、吡嗪类等）所制备的酵母抽提物（Yeast Extract, YE），可显著提升食品风味层次[1]，成为替代人工添加剂的关键功能性配料[2]。

然而，酵母细胞壁含多糖、几丁质、蛋白质等复杂结构阻碍滋味物质释放（如图 1 所示），且酵母细胞易吸附生长基质中的不良成分，加之细胞裂解过程释放的内源代谢产物，直接导致 YE 存在风味单薄与如苦味和酵母味等不良后味残留的共性缺陷[3]。当前破壁技术主要有机械法（如高压均质、球磨）和非机械法（如自溶、酶解、化学渗透）[4]。Aparecida 等[5]提出高压均质法更广泛地用于酵母细胞破碎且是有效的，但需要共处理以减少均质化步骤，以防止破坏酵母且耗能高，Dimopoulos 等[6]研究酶法实现酵母细胞裂解后提取，但成本高且导致酵母内容物产量和功能特性降低。现主流破壁技术（如高压均质）尽管应用广泛且有效，但存在高能耗、多步骤协同处理需求及细胞过度破碎等问题[7]；酶解法虽可实现定向裂解，却因成本高昂导致内容物得率下降[8]；化学渗透法则受限于试剂残留毒性及蛋白质变性风险[9]。现有技术难以兼顾破壁效率与风味保留的协同优化，成为工业化应用的瓶颈，还需探究更具应用潜力的替代工艺。

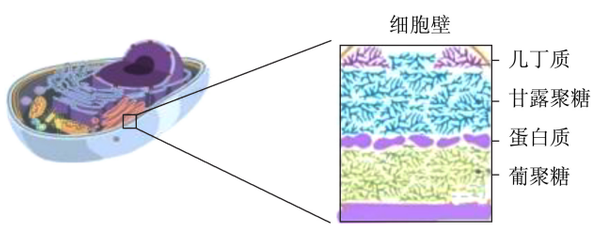


图 1 酵母细胞壁结构图

Fig.1 Diagram of yeast cell wall structure

近年来，超声法（温和机械破壁）、胶体磨法（高效机械破壁）及乙酸乙酯溶剂法（化学破壁）等也逐渐受到关注。但现有研究多聚焦破壁效率的单一维度评价，尚未系统解析破壁方式与呈味物质释放、苦味抑制间的构效关系。传统感官评价易受主观因素干扰，电子鼻、电子舌虽可客观量化基础风味强度[10]，却无法诠释风味组分的协同效应及中枢神经响应机制。而脑电（Electroencephalogram, EEG）分析技术通过捕捉大脑对风味刺激的神经响应，为理解消费者感知提供了新视角，与传统方法形成互补。

本论文将系统研究不同高效破壁方法对酵母抽提物最终风味特性的影响。通过构建感官评定结合电子舌、电子鼻及脑电仿生感官图谱，明确采用不同破壁方法的酵母抽提物中香气活性物质及滋味物质的释放特征，以期为酵母破壁工艺提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

酿酒酵母（*Saccharomyces cerevisiae BFY-11*），齐齐哈尔龙江阜丰生物科技有限公司；复合蛋白酶（中性蛋白酶与木瓜蛋白酶 1:1 复合），谦诺生物科技有限公司；风味蛋白酶，谦诺生物科技有限公司；乙酸乙酯（分析纯），国药集团化学试剂有限公司；酵母抽提物 YESH，河北廊坊福平生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

TDL-80-2B 离心机，上海安亭科学仪器厂；BILON-6000Y 喷雾干燥机，上海比朗仪器制造有限公司；JM50A 胶体磨，山东龙兴化工机械有限公司；N&DN 超微细胞破碎仪，常州国华电器有限公司；FE28 pH 计，梅特勒－托利多仪器（上海）有限公司；YP20001 电子天平，上海越平科学仪器（苏州）制造有限公司；PEN-3 电子鼻，北京盈盛恒泰科技有限责任公司；TS-5000Z 电子舌，北京盈盛恒泰科技有限责任公司；XL-998 数字脑电地形图仪，江苏慕泰医用科技有限公司。

表 1 酵母抽提物感官评分表

Table 1 Scale for yeast extracts

项目类型	评分标准	得分
鲜味（10 分）	无鲜味、鲜味转瞬即逝	1~3
	微弱鲜味	4~6
	鲜味强烈持久	7~10
咸味（10 分）	微弱咸味（仅舌侧感知）	1~3
	适口咸味（无刺激）	4~6
	刺激性咸味（引发口渴感）	7~10
甜味（10 分）	微弱甜味	1~3
	自然甜味	4~6
	高甜度且无后苦	7~10
酸味（10 分）	酸味不明显，提升整体风味	1~3
	酸味明显	4~6
	酸味突兀	7~10
苦味（10 分）	极微弱苦（仅舌根感知）	1~3
	苦味明显（影响适口性）	4~6
	强烈苦味（引发排斥反应）	7~10
余味（10 分）	口腔内不愉悦味道残留	1~3
	口腔内短暂残留令人舒适的风味特征	4~6
	口腔内持续存留令人舒适、纯净的风味特征	7~10
香气（10 分）	存在异味	1~3
	香气平淡	4~6
	香气愉悦、纯净、丰富有层次	7~10
协调性（10 分）	各风味相互冲突拮抗	1~3
	主体风味突出但缺乏层次	4~6
	协调，形成立体风味结构	7~10
整体风味评价（10 分）	不喜欢，有明显缺陷	1~3
	一般，基本接受	4~6
	喜欢，具有独特风味	7~10

1.3 实验方法

1.3.1 不同破壁工艺的优化

1.3.1.1 胶体磨物理破壁法

取适量酵母泥加蒸馏水调配成质量浓度为 15 g/100 g 的酵母悬浊液后取 500 mL，采取胶体磨的物理方法进行破壁。

A. 在温度 40 ℃条件下，分别比较胶体磨破壁 5、10、15、20、25 min 处理时间。

B. 在 20 min 处理时间下，分别比较温度 30、40、50、60、70 ℃工艺条件。

1.3.1.2 超声细胞破碎仪处理

取适量酵母泥加蒸馏水调配成质量浓度为 15 g/100 g 的酵母悬浊液后取 200 mL，采取超声细胞破碎仪（冰水浴）的物理方法进行破壁。

C. 在超声功率 70 W，分别比较破壁 20、40、60、80、100 min 处理时间。

D. 在破壁时间 60 min，分别比较超声功率 40、50、60、70、80 W 工艺条件。

1.3.1.3 乙酸乙酯辅助自溶破壁

取适量酵母泥加蒸馏水调配成质量浓度为 15 g/100 g 的酵母悬浊液后取 500 mL，采取 50 ℃加入乙酸乙酯溶剂促溶的化学方法进行破壁。

E. 乙酸乙酯添加量 7.5%（质量分数），比较 3、6、9、12、15 h 处理时间。

F. 在 9 h 时间条件下，比较乙酸乙酯添加量（质量分数）2.5%、5%、7.5%、10%、12.5% 工艺条件。

每个条件设置 3 组平行。测定不同条件下细胞计

数板计数法[11]破壁率，比较破壁率及感官品评中整体风味评价得分得到较优破壁条件。

破壁率计算公式见公式（1）。

$$P=\frac{a_1-a_2}{a_1}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

P——破壁率，%；

a_1——破壁前酵母细胞数，个；

a_2——破壁后酵母细胞数，个。

1.3.2 双酶酶解法制备酵母抽提物

参考朱华健等[12]方法，取质量浓度 15 g/100 g 的破壁后酵母悬浊液，调 pH 值至最适条件，装进 500 mL 锥形瓶中放入水浴摇床中升温至 55 ℃，再加入 0.3%（质量分数）的复合蛋白酶和 0.4%（质量分数）的风味酶，酶解 6 h 后，在 90 ℃水浴下灭酶 15 min；冷却至室温后离心机 6 000 r·min^{-1} 离心 5 min，收集上清液。

1.3.3 酵母抽提物制备

取 1.3.2 中上清液，采用喷雾干燥处理获得粉状样品，喷雾干燥机参数：设定温度：200 ℃，风机速度：60%；蠕动泵速度：35%；通针：2 s。启动设备，待系统稳定后开始喷雾干燥过程。收集干燥后的粉末，并在干燥环境中冷却至室温后进行包装密封。

按照 1.3.1 中三种破壁工艺优化后的破壁率最高的溶液经酶解获得的酵母抽提物样品分别记为 YE1、YE2、YE3。选择市售较好的酵母抽提物 YESH 为对照组，YESH 是国内主流食品级 YE 产品，旨在对比工业化主流工艺与本研究所优化破壁工艺的风味差异。

1.3.4 感官品评

采用 10 分制评分法，参考 Jiang 等[13]方法进行修改，在恒温（25~30 ℃）密闭的感官评价室内进行。12 名经验丰富的年龄 20~30 岁的评审员（男女各半）对质量浓度为 2 g/100 g 的酵母抽提物水溶液的鲜味、香气等 9 个感官属性及整体风味评价（见表 1）进行评分。评价结果取各属性评分的平均值，以确保数据的客观性和准确性。

1.3.5 电子鼻测定顶空气体

电子鼻检测参考 Wang 等[14]的方法，精确称取 3.00 g YE 样品装入 25 mL 顶空瓶中密封，样品经 45 ℃孵育 30 min 后在 PEN3 型电子鼻上进行测定分析。分析参数为样品间隔 1 s、自动调零 10 s、样品准备时间 5 s、测量时间 90 s、清洗时间 60 s、内部气体流量 400 mL·min^{-1}、进样流量 400 mL·min^{-1}。

1.3.6 电子舌测定滋味

参考蔡雨静等[15]的方法，精确称取 1.00 g YE 样品，然后加水定容至 100 mL，为电子舌待测液。分析参数为：清洗时间 330 s，平衡 30 s，样品测定时间 30 s，截止时间 30 s，采集周期 1 s，检测环境为室温。检测酵母抽提物水溶液的酸味、苦味、涩味、鲜味、咸味、甜味、后味－涩味、后味－苦味和丰富度。

1.3.7 脑电仪辅助气味及滋味测定

参考 Wu 等[16]方法。受试者戴着帽子并在静止状态下做好准备，确保帽子和头皮之间良好贴合，深呼吸，慢慢呼气，同时保持情绪稳定。

样品：配制质量浓度为 2 g/100 g 的 YE 样品及谷氨酸钠（MSG）。

气味测定：在每次嗅闻开始时，受试者保持平静。然后，以 10 mL 等分试样放入杯子（40 mL）中到受试者的鼻前 10 s。

滋味测定：在每次品尝开始时，受试者用超纯水漱口 3 次，以在 30 s 内测试基线。然后，以 10 mL 等分试样放入杯子（40 mL）中输送到受试者的嘴中。慢慢品尝（不吞咽，不旋转）10 s。

全程保持头部处于最大程度地减少移动，避免其余影响。对照和样品以相同的方式进行测试。在刺激间隔之间休息 30 s 后开始下一次刺激呈现。试验重复 3 次。

1.4 数据处理

数据通过 Excel 2019 软件进行处理，并通过 BMI SPSS Statistics 25 软件进行显著性分析，显著性差异分析使用单因素方差分析和 Duncan 检验法（$P<0.05$ 表示具有显著性差异），利用 Origin 2021 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同破壁方式及破壁条件确定

由图 2a 可知，胶体磨破壁时间显著影响酵母细胞破壁率及最终酵母抽提物的整体风味评价。当破壁时间为 15 min 时，破壁率达到最高值 90.33%，同时整体风味评价得分也最高（8.33）。破壁机制主要依赖于高剪切力破坏酵母细胞壁中起关键支撑作用的葡聚糖－几丁质网络结构。破壁时间延长至 20 min 和 25 min 时，破壁率与 15 min 相比无显著性变化，但整体风味评价得分显著下降，这可能是过长的处理时间可能导致机械能累积引发局部温升，促使美拉德反应中间体异常积累或氧化副产物增加。由图 2b 可知，破壁温度在 30 ℃至 70 ℃范围内变化时，破壁率无显著性差异。

然而，温度对最终酵母抽提物的整体风味评价得分影响显著。当温度超过 50 ℃后，感官评分显著降低，这可能是由于温度过高导致酵母细胞内源酶失活及蛋白质变性[17]，从而影响最终酵母抽提物的滋味和香气品质。综合破壁率（90.33%）与整体风味评价（最高得分 8.33）的优化结果，确定胶体磨破壁的最佳工艺参数为：时间 15 min，温度 50 ℃。该条件在实现高效破壁的同时，最大程度地避免了因处理时间过长或温度过高导致的风味劣变。

由图 2c 和图 2d 可知，超声破壁的效果受处理时间和功率影响。在功率 70 W 条件下，处理 80 min 时获得最高破壁率 82.13% 和最佳整体风味评价得分 8.12。延长处理时间至 100 min，破壁率与感官评分均未呈现显著提升。超声破壁主要通过高频空化效应产生的冲击波和剪切力破坏酵母细胞壁的葡聚糖交联结构[18]。在时间 60 min 条件下，功率从 40 W 增至 80 W，破壁率和感官评分变化不显著。考虑到能耗因素，最终确定超声破壁的最佳工艺参数为：时间 80 min，功率 70 W。该方法的破壁效率（82.13%）低于胶体磨（90.33%），且处理时间较长，这两种方法验证了 Vieira 等[19]及 Dimopoulos 等[20]采用机械法制备酵母抽提物提高了酵母自溶效率。

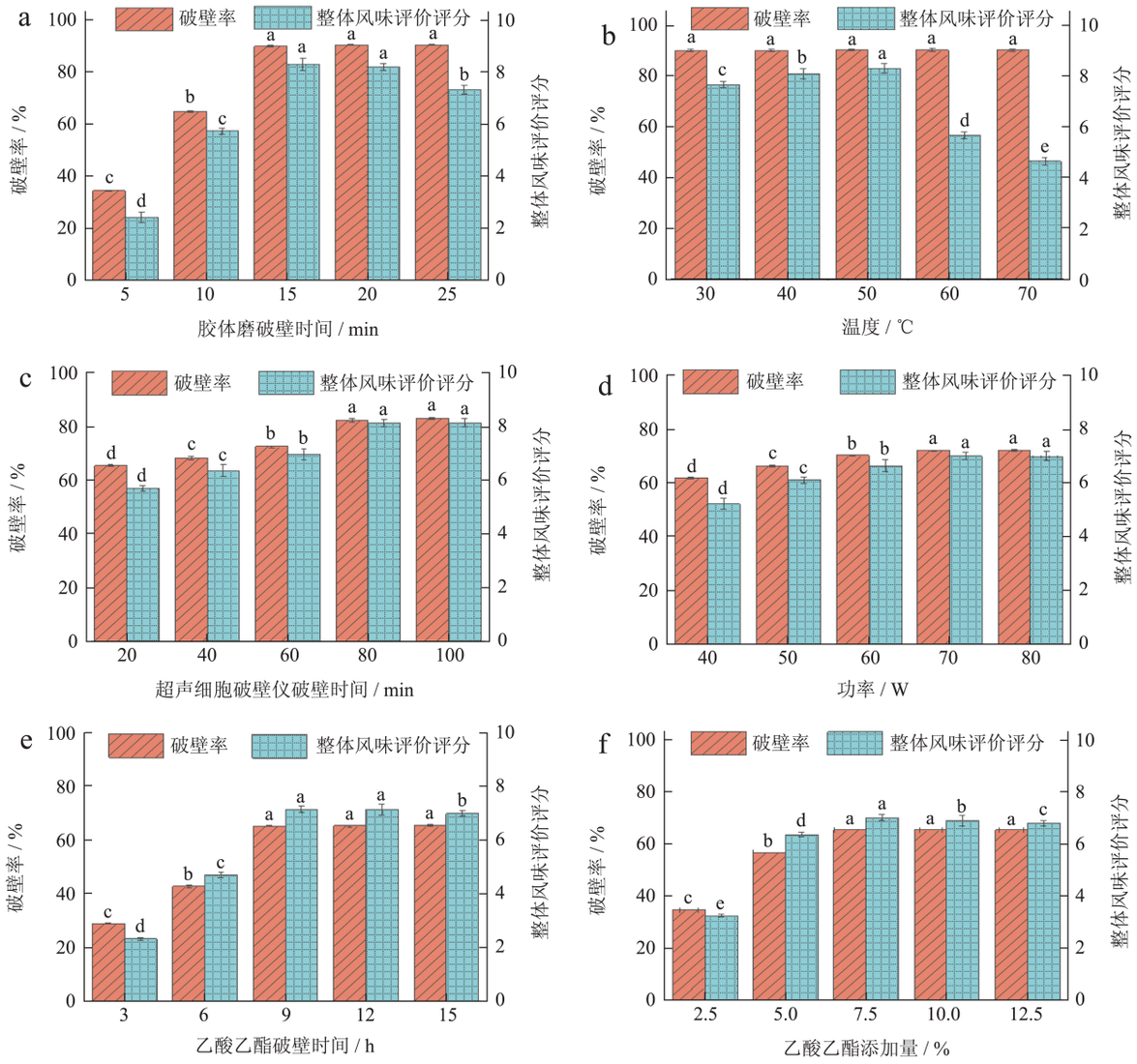


图 2 不同破壁条件对酵母细胞破壁率及酵母抽提物感官评分

Fig.2 Scores of different wall-breaking conditions on yeast cell wall-breaking rate and overall impression of yeast extract

注：同一个图中不同字母表示有显著性差异（$P<0.05$）。a：胶体磨时间；b：酵母液不同温度；c：超声细胞破碎仪时间；d：超声细胞破碎仪功率；e：乙酸乙酯破壁时间；f：乙酸乙酯添加量。

由图 2e 可知，在添加 7.5%（质量分数）乙酸乙酯的条件下，随着处理时间增加，破壁率显著提高，并在 9 h 时达到 65.12%，同时整体风味评价得分为 7.12。继续延长处理时间而破壁率未发生显著变化。由图 2f 可知，乙酸乙酯添加量为 7.5%（质量分数）时，破壁率（65.17%）和整体风味评价得分（6.99）均达到该条件下的最高值。进一步增加乙酸乙酯添加量至 10%（质量分数）及以上，整体风味评价得分显著下降（$P<0.05$），这与胥怀等[17]添加的乙酸乙酯比例增大使酵母抽提物中 GABA 的含量先增加后减少结果类似。乙酸乙酯主要通过疏水作用增强细胞膜脂质层的流动性，促进内容物释放。然而，过量添加可能导致膜蛋白（如 α-螺旋结构）构象改变，暴露出不良滋味物质（如苦味肽），同时溶剂残留可能掩盖酵母抽提物的特征香气，从而影响感官品质。综上，乙酸乙酯辅助破壁工艺选择乙酸乙酯添加量 7.5%（质量分数），处理时间 9 h。相较于胶体磨，超声与溶剂法破壁率低，但其能效比提升，更适用于低能耗高风味保留场景。

2.2 不同破壁方式对酵母抽提物感官特性的影响

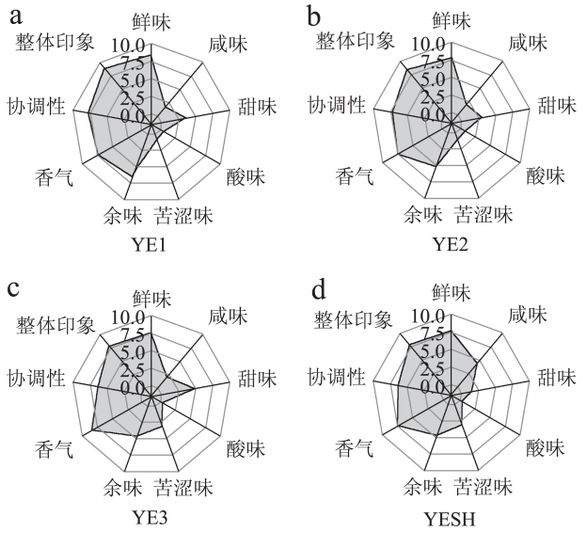


图 3 酵母抽提物感官品评雷达图

Fig.3 Radar chart of sensory evaluation of yeast extract

注：YE1：胶体磨破壁处理的酵母抽提物；YE2：超声破壁处理的酵母抽提物；YE3：添加乙酸乙酯破壁处理的酵母抽提物；YESH：市售酵母抽提物。下同。

如图 3 所示，YE1 的胶体磨的高剪切力实现了酵母细胞壁的物理破碎，其高破壁率（90.33%）有效促进了细胞内呈味物质（如谷氨酸、鲜味肽）的释放，使其在鲜味（8.37）和甜味（3.17）强度上表现突出。然而，其香气评分（7.06）相对较低，可能是高剪切力作用下过量溶出的细胞壁组分通过物理吸附作用，抑制了挥发性香气物质的逸散。YE2 通过超声破碎依赖于空化效应产生的冲击波破坏细胞壁[21][21]。相较于胶体磨，超声处理在选择性破坏细胞壁结构的同时，可能对部分细胞内容物的破坏较小，或局部高温促进了香气前体的释放[22]，因此其香气评分（7.33）高于 YE1，但其鲜味强度（7.83）略低于 YE1。YE3 通过乙酸乙酯主要通过溶解细胞膜脂质层并改变膜蛋白构象来实现破壁[23]。这种方式有效促进了核糖等甜味物质的溶出，同时释放了较多脂溶性风味前体，使其香气浓郁，有最高的甜味得分 4.77 和香气得分 8.33。然而，膜蛋白构象的改变可能导致其疏水区域暴露，增加了与异 α-酸等不良苦味物质的结合，导致其苦味（3.07）增强，风味协调性显著低于 YE1 和 YE2。综合感官评分结果，YE1 表现最佳。

三种破壁工艺制备的 YE 在甜味强度上均显著高于市售对照样品 YESH。这可能源于优化的破壁工艺（定向破碎）更有效地破坏了酵母细胞壁结构，促进了风味前体物质释放，从而提高了后续酶解效率，释放出更多的甜味氨基酸[24]。鉴于感官评价存在一定的主观性和局限性，进一步采用电子鼻和电子舌技术进行客观分析，对感官评价结果进行验证和补充。

2.3 电子鼻气味特征及主成分分析结果

如图 4 所示，不同破壁工艺制备的 YE 在传感器 W1W（对硫化物敏感）和 W2W（对芳香族成分、有机硫化物敏感）上表现出显著差异的响应信号，这与其感官评价中观察到的香气特性分化相似。W1W 响应值高可能与酵母抽提物中存在的含硫风味物质（如含硫氨基酸降解产物）有关。W2W 响应值高则表明样品中含有能被该传感器识别的芳香族和有机硫化物类物质，这类物质对食品香气的形成至关重要。

YE3 在所有样品中表现出最高的整体响应强度，尤其在 W1W 和 W2W 传感器上。这可能是这乙酸乙酯作为有机溶剂，溶解细胞膜脂质层的过程可能促进了脂质氧化或改变了代谢途径，导致酵母细胞在自溶过程中产生了更多或特定类型的挥发性化合物，此外，乙酸乙酯本身带有的气味增加了最终酵母抽提物的气味[25]。PCA（图 4b）进一步直观地展示了不同样品挥发性物质整体轮廓的差异[26]，YE1 与市售 YESH 的挥发性轮廓相似度较高。不同破壁工艺显著影响了酵母抽提物的挥发性物质组成和强度。

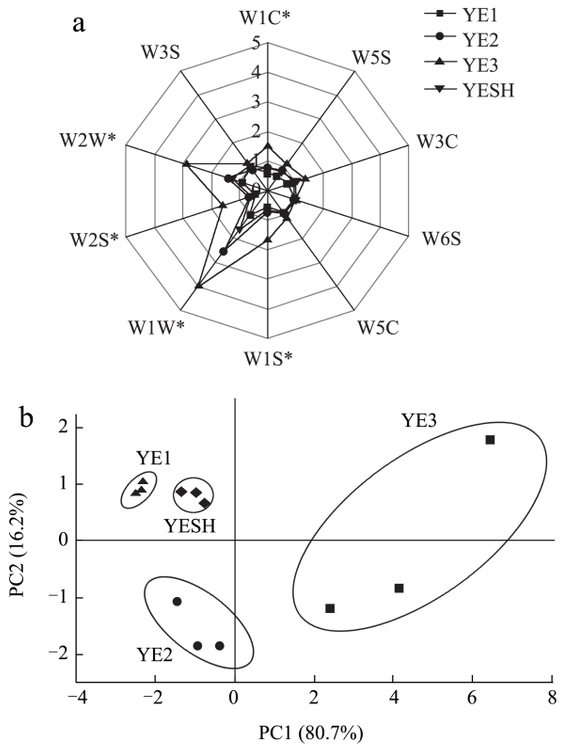


图 4 酵母抽提物电子鼻雷达图及主成分分析图

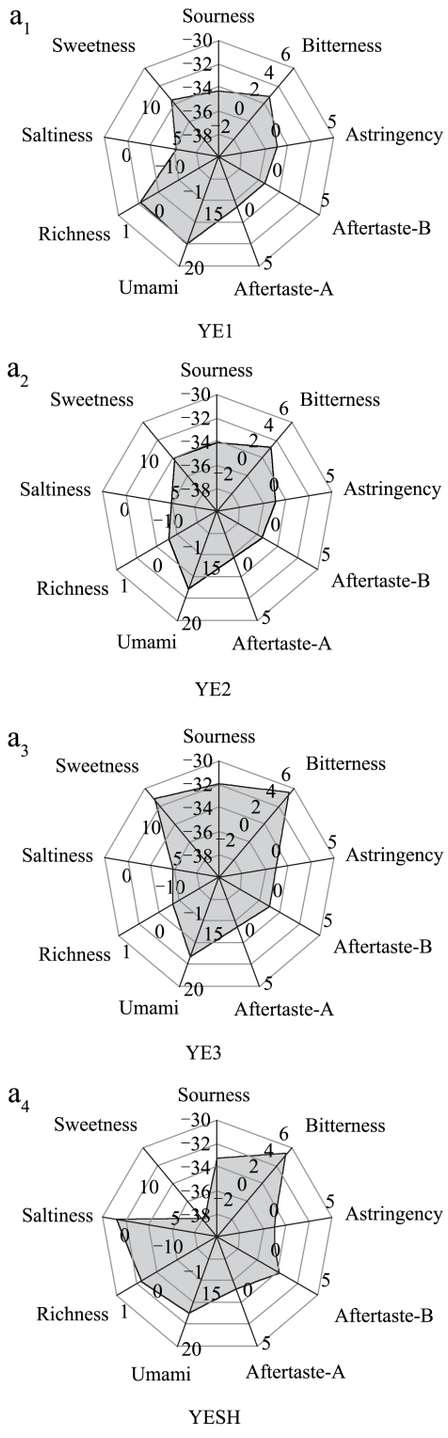
Fig.4 Electronic nose radar chart and principal component analysis chart of yeast extracts

注：a：电子鼻雷达图；b：主成分分析 PCA 图。

2.4 电子舌滋味特征及主成分分析结果

如图 5所示，四种酵母抽提物的滋味轮廓均以鲜味为主导。其中，YE1 表现最为突出，其鲜味值（Umami）（18.03）显著高于其他样品，苦味值（Bitterness）最低（2.77），甜味值（Sweetness）较高（8.75），且浓郁度值（Richness）（0.32）最高，客观印证了感官评价中其鲜味突出、滋味饱满、整体风味评价最佳的结果。YE2 和 YE3 的鲜味值（分别为 17.32 和 17.12）虽低于 YE1，但仍显著优于市售对照 YESH，这很可能与胶体磨和超声破碎这类高效机械破壁工艺更利于释放酵母细胞内鲜味前体物质（如蛋白质、核苷酸），进而在后续酶解中高效生成谷氨酸等鲜味物质有关。此外，所有实验组 YE 的咸味值均显著低于 YESH。YE3 呈现出独特滋味特征，苦味值（5.49）和甜味值（12.12）均最高，这可能源于乙酸乙酯促溶破壁没有除去酵母生长基质中的苦味物质及选择性释放了特定甜味物质（如核糖）。图 5b 的 PCA 清晰展示了样品间整体滋味轮廓的差异，YE1 和 YE2 位置接近，表明其滋味相似度较高，与其均采用机械破壁法的共性机制相符，而 YE3（化学破壁）和 YESH 则分布在明显不同区域。

电子舌既是模拟人类味觉的绝佳工具，并高效、准确地评估滋味物质对主要味觉特征的影响，又弥补了人类感官模糊、主观、不确定的缺点[10]。通过电子鼻和电子舌的辅助分析，发现不同破壁方式对酵母抽提物的风味轮廓产生了显著影响。不同破壁方式可能导致酵母细胞内部结构的差异，进而影响了后续酶解过程中的酶接触效率和底物可用性，这可能导致产生不同的风味前体物质和酶解产物。



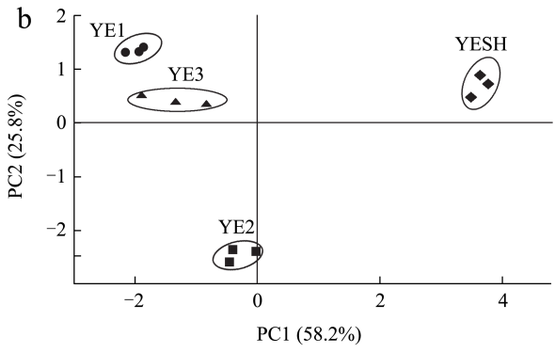


图 5 酵母抽提物电子舌雷达图及主成分分析图

Fig.5 Electronic tongue radar diagram and principal component analysis chart of yeast extracts

注：a：电子舌雷达图；b：主成分分析 PCA 图。

2.5 脑电多模态感官测定结果分析

为了尽量减少可能影响脑电图数据的个体差异，感官评价中的多名受试者也参与了脑电图研究。

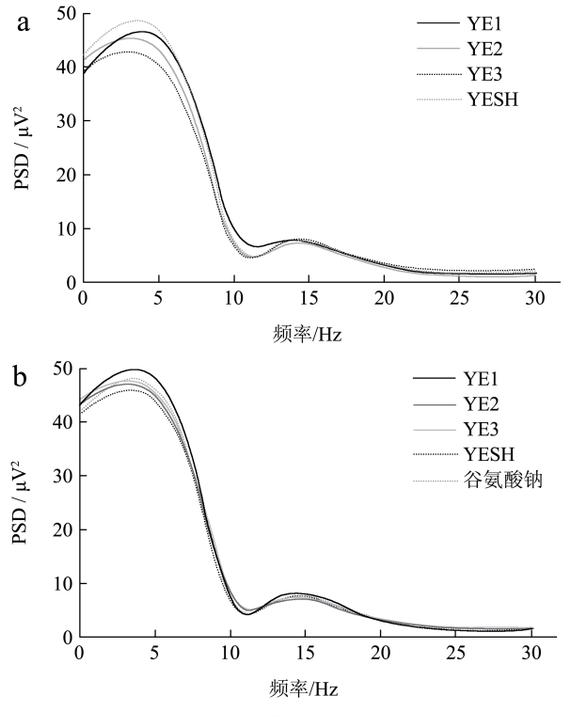


图 6 脑电频谱信号的变化

Fig.6 Changes in EEG spectral signals

注：a：嗅闻不同酵母抽提物；b：品尝不同酵母抽提物水溶液。

由图 6 所示，酵母抽提物能刺激大脑能够在低频段（1~5 Hz）产生较强的能谱峰，而在其他频段（5~30 Hz）没有表现出较强的峰，响应信号主要集中在 δ 波附近，这与 Zhao 等[27]揭示 1~4 Hz 参与味觉编码的结论是一致的。峰值出现在 δ 波（1~4 Hz）中，因此 δ 波表现出品尝与嗅闻酵母抽提物时大脑的活动最为敏感。

对嗅闻及品尝酵母抽提物时 δ 节律的脑电地形图进行分析，结果如图 7a 所示，所有 YE 样品和谷氨酸钠均呈现出相似的大脑反应信号，这符合 Arndal 等[28]在知觉上相似的刺激可能会导致大脑皮层的明显激活的结果。结合感官品评及电子舌测定结果知酵母抽提物的鲜味特性可以显著增强 δ 波幅值，Wu 等[16]研究发现大脑对鲜味刺激的不同感觉强度敏感。如图 7c 所示，YE1 在中央区、枕叶区及左颞区的 δ 波能量密度均显著高于其他组，与其电子舌测得的最高鲜味强度（18.03）直接相关，印证了 Bradley 等[29]的研究：发现大脑中央区参与处理味觉信息，味觉与视觉刺激的结合会影响枕叶区域，嗅觉和味觉联合感知会影响大脑颞区。YE2 虽鲜味响应稍弱，但其在颞区的持续激活可能与超声破壁保留的香气物质引发的嗅觉－味觉协同效应有关。YE3 响应明显低于其他两种 YE 但通过乙酸乙酯破壁释放的香气在枕叶区产生愉悦性响应，均高于市售酵母抽提物及谷氨酸钠。

采用相关性分析方法探讨了不同脑区与四种酵母抽提物样品的脑电响应之间的关系，并阐释了四种风味感官属性与不同脑区之间的潜在联系，如图 7b 所示。鲜味与中央区及颞区存在显著的正相关性，而协调性则与各脑区呈现正相关。这一发现与先前在地形图中观察到的变化相吻合。其 δ 节律能量分布特征与电子舌及电子鼻数据形成有效互补，凸显出 YE1 整体风味最好。脑电图作为记录脑电波活动的生理测试方法，能够直观地展示出嗅觉味觉刺激引起的脑波变化，可以更加精确地量化大脑对刺激物的反应[30,31]。

2.6 不同破壁方式综合分析

对胶体磨、超声细胞破碎仪及乙酸乙酯三种不同破壁方法进行综合分析，结果如表 2 所示。胶体磨通过高剪切力破坏细胞壁多糖快速释放胞内鲜味氨基酸及呈味核苷酸等物质，部分香气前体物质被机械力破坏，且部分细胞壁多糖溶于最终的酵母抽提物，使最终酵母抽提物鲜味突出且协调性好。超声细胞破碎仪通过空化效应促进酵母内容物释放，释放挥发性香气物质更多，鲜味略低于胶体磨破壁但仍然突出。乙酸乙酯选择性溶解脂质层，释放脂溶性风味前体（如酯类）较多，保留更多还原糖，鲜味物质释放较少，最终酵母抽提物鲜味略低，甜味明显。

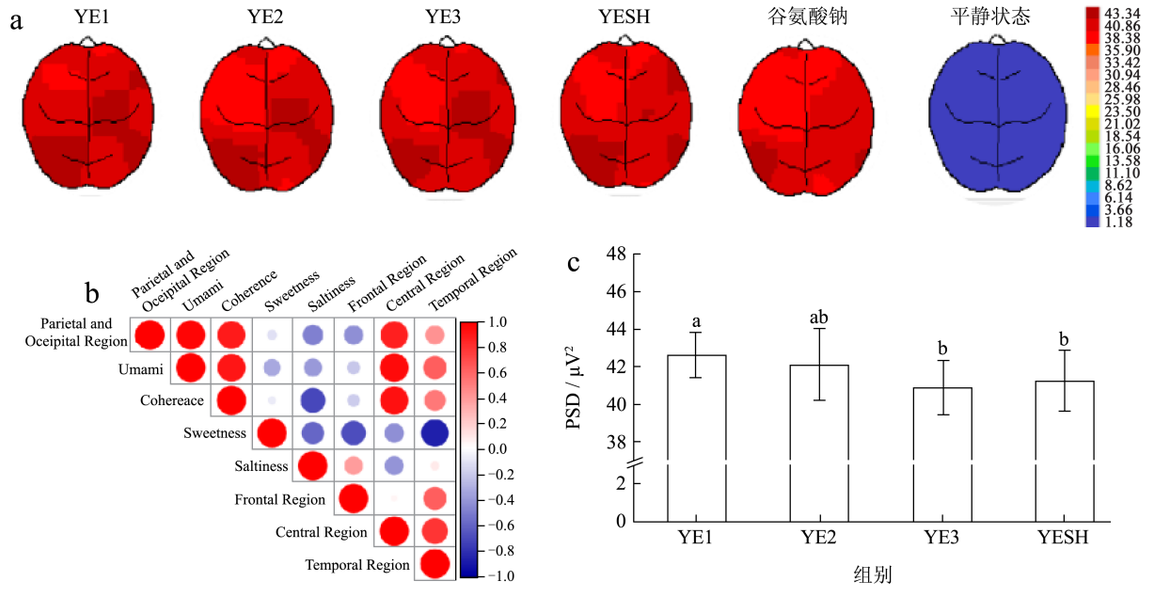


图 7 δ 节律下不同酵母抽提物风味的脑电响应

Fig.7 EEG responses to flavours of different yeast extracts under δ-rhythm

注：a：脑电地形图；b：不同脑区响应相关性分析；c：全脑响应。图 c 中不同字母表示有显著性差异（$P<0.05$）。

表 2 不同破壁方式综合分析表

Table 2 Comprehensive analysis table of different yeast breakage methods

酵母破壁方式	破壁机制	破壁率	最终酵母抽提物
胶体磨	机械剪切力破坏细胞壁和细胞膜	破壁率极高且时间快	鲜味显著，整体协调性好
超声细胞破碎仪	空化气泡破裂产生的冲击波和剪切力破坏细胞结构	破壁率高，破壁量较少	鲜味明显，气味较好
乙酸乙酯	化学溶解作用破坏细胞膜的脂双层结构	破壁率较高，破壁过程温和，时间长	鲜味略低，甜味明显，香气浓郁

3 结论

本论文通过比较三种破壁方法结合酶法制备酵母抽提物，运用多模态感官组学技术系统解析了不同破壁工艺对酵母抽提物风味品质的影响。研究表明：胶体磨机械破壁、超声细胞破碎机械破壁与乙酸乙酯化学破壁对酵母细胞结构的不同破坏模式，使酵母细胞破壁率呈现出显著差异，影响风味物质的释放及不同组分之间的平衡性。机械破壁通过高剪切及空化效应充分释放酵母细胞内呈味物质，形成鲜味主导、滋味协调的风味特征，但过度剪切或局部高温以及氧化等原因导致香气前体损失。构建多模态感官分析体系，不仅为酵母抽提物制备中破壁工艺的优化提供了新的技术路径，同时为多模态感官技术在食品风味品质评价及精准调控领域的深度应用拓宽了思路。

参考文献

[1] TANG Z K, YANG H B, LIU M, et al. Yeast extract: characteristics, production, applications and future perspectives [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2023, 33(2): 151-166.

[2] LI M L, LIU X S, XU Q Q, et al. Aroma-active components of yeast extract pastes with a basic and characteristic meaty flavour [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(5): 882-889.

[3] EIGENFELD M, KERPES R, BECKER T, et al. Upcycling of brewer's yeast: application as material for encapsulating unstable liquid ingredients in the food industry [J]. BrewingScience, 2020, 73(5-6): 77-84.

[4] MARSON G V, TEIXEIRA D C M M, JANSER S D C R, et al. Sequential hydrolysis of spent brewer's yeast improved its physico-chemical characteristics and antioxidant properties: a strategy to transform waste into added-value biomolecules [J]. Process Biochemistry, 2019, 84: 91-102.

[5] APARECIDA T G, MARIA C Z, RIGON M S. An overview of cell disruption methods for intracellular biomolecules recovery [J]. Preparative Biochemistry & Biotechnology, 2020, 50(7): 635-654.

[6] DIMOPOULOS G, STEFANOU N, ANDREOU V, et al. Effect of pulsed electric fields on the production of yeast extract by autolysis [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 48: 287-295.

[7] GEORGIO N, NICOLAS L, EUGÈNE V, et al. Mechanical cell

disruption technologies for the extraction of dyes and pigments from microorganisms: a review [J]. Fermentation, 2021, 7(1): 36.

[8] LI J, KARBOUNE S, SEDMAN J, et al. Characterization of the structural properties of mannoproteins isolated from selected yeast-based products upon the enzymatic treatment [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109596.

[9] FERREIRA I, PINHO O, VIEIRA E, et al. Brewer's Saccharomyces yeast biomass: characteristics and potential applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2009, 21(2): 77-84.

[10] CHEN L L, NIE F J, ZHANG L, et al. Quality assessment of royal jelly based on physicochemical properties and flavor profiles using HS-SPME-GC/MS combined with electronic nose and electronic tongue analyses[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134392.

[11] 徐娟,陈翔宇,李蒙蒙,等.计数标准微球分散及浓度对酿酒酵母计数的比较[J].现代食品科技,2023,39(9):315-322.

[12] 朱华健,陈皓,李宛格,等.高鲜酵母抽提物的制备及产品性质分析[J].食品与发酵工业,2025,51(12):11-20.

[13] JIANG S, ZHANG Y W, PAN J Y, et al. Characterization of stewed beef by sensory evaluation and multiple intelligent sensory technologies combined with chemometrics methods [J]. Food Chemistry, 2023, 408: 135193.

[14] WANG D, ZHANG J, ZHU Z S, et al. Effect of ageing time on the flavour compounds in Nanjing water-boiled salted duck detected by HS-GC-IMS [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 155: 112870.

[15] 蔡雨静,张振宇,王彩玲,等.电子鼻、电子舌结合SPME-GC-MS对青海玉树牦牛肉挥发性化合物分析[J].食品工业科技,2023,44(16):348-357.

[16] WU B, BLANK I, ZHANG Y, et al. Investigating the influence of different umami tastants on brain perception via scalp electroencephalogram [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(36): 11344-11352.

[17] 胥怀,郑重,李库,等.富含γ-氨基丁酸酵母抽提物酶解工艺的研究[J].食品科技,2024,49(5):234-242.

[18] 张秋红.超声细胞破碎仪辅助提取桑葚多糖及其抗氧化性分析[J].食品与机械,2022,38(6):168-172.

[19] VIEIRA F E, CARVALHO J, PINTO E, et al. Nutritive value, antioxidant activity and phenolic compounds profile of brewer's spent yeast extract [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2016, 52: 44-51.

[20] DIMOPOULOS G, TZIA M, TZIA P. Effect of high pressure homogenization on the production of yeast extract via autolysis and beta-glucan recovery [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 62: 102340.

[21] 陕怡萌,曹博雅,蒲丹丹,等.市售酵母抽提物中呈味物质鉴定及其增味减盐作用分析[J].食品科学技术学报,2025,43(2):106-116.

[22] TIMIRA V, MEKI K, LI Z X, et al. A comprehensive review on the application of novel disruption techniques for proteins release from microalgae [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 62(16): 11-17.

[23] YU Z, SU Y, ZHANG Y, et al. Potential use of ultrasound to promote fermentation, maturation, and properties of fermented foods: a review [J]. Food Chemistry, 2021, 357: 129805.

[24] SHI J, MA Y, ZHU J, et al. A review on electroporation-based intracellular delivery[J]. Molecules, 2018, 23(11): 3044.

[25] 邓霞婵,黄朵,陶勇,等.高产乙酸乙酯酵母菌的筛选鉴定及发酵条件优化[J].中国酿造,2024,43(10):134-141.

[26] FARAG A M, ABDELWARETH A, SALLAM E I, et al. Metabolomics reveals impact of seven functional foods on metabolic pathways in a gut microbiota model [J]. Journal of Advanced Research, 2020, 23: 47-59.

[27] ZHAO G Q, ZHANG Y, HOON M A, et al. The receptors for mammalian sweet and umami taste [J]. Cell, 2003, 115(3): 255-266.

[28] ARNDAL C A, LEONARD M K, HOLM R A, et al. EEG discrimination of perceptually similar tastes [J]. Journal of Neuroscience Research, 2019, 97(3): 241-252.

[29] BRADLEY R M, GRABAUSKAS G. Neural circuits for taste: excitation, inhibition, and synaptic plasticity in the rostral gustatory zone of the nucleus of the solitary tract [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1998, 855: 467-474.

[30] ZHANG R, DENG H, XIAO X. The insular cortex: an interface between sensation, emotion and cognition [J]. Neuroscience Bulletin, 2024, 40(11): 1763-1773.

[31] YANG T Y, ZHANG P, XING L D, et al. Insights into brain perceptions of the different taste qualities and hedonic valence of food via scalp electroencephalogram [J]. Food Research International, 2023, 173: 113311.