

内酯类化合物在食品中的风味贡献及形成机制

于海燕, 姚文倩, 陈臣, 袁海彬, 黄娟, 娄新曼, 田怀香*

(上海应用技术大学香料香精技术与工程学院, 上海 201418)

摘要: 食品中的内酯类物质主要包括 γ -内酯、 δ -内酯、葫芦巴内酯、威士忌内酯, 它们对食品整体风味的形成具有重要作用, 能赋予食品奶香、水果香、坚果香、焦糖香等优良的风味特征, 研究食品中内酯类化合物的风味贡献及形成机制具有重要意义。该研究综述了食品中常见的内酯类化合物, 食品中内酯类化合物的组成及香气贡献, 总结了对食品风味贡献较大的内酯类化合物的形成机制包括: δ -内酯和 γ -内酯的羟基脂肪酸-内酯生成途径、一步分子内酯交换反应途径、葫芦巴内酯的羟醛缩合反应途径、果实中脂肪酸-酰基 CoA-内酯形成途径、果实中不饱和脂肪酸-羟基脂肪酸-内酯形成途径等, 并对当前研究中存在的问题和未来研究方向做了归纳与展望。为全面认知食品中内酯类风味化合物及其形成, 改善食品风味并提高食品品质, 实现食品产业转型和升级提供理论参考。

关键词: 食品; 内酯类化合物; 风味; 生物合成机制; δ -内酯; γ -内酯; 葫芦巴内酯; 脂肪酸-酰基 CoA-内酯

文章编号: 1673-9078(2022)05-337-349

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.5.0954

Flavor Contribution and Biosynthesis Mechanism of Lactone Compounds in Food

YU Haiyan, YAO Wenqian, CHEN Chen, YUAN Haibin, HUANG Juan, LOU Xinman, TIAN Huaixiang*

(School of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Lactones in food, which mainly include γ -lactone, δ -lactone, fenugreek lactone, and whisky lactone, play an important role in the formation of the overall flavor. They can grant the food a milky, fruity, and nutty flavor, as well as caramel and other excellent flavor characteristics. Thus, it is of great significance to the food industry to better understand the flavor contribution and biosynthesis mechanism of lactones in food. The type, composition, and aroma contribution of lactones commonly found in food were herein reviewed and their biosynthesis mechanisms were summarized, including the hydroxy fatty acid-lactone formation pathway of δ -lactone and γ -lactone, the one-step molecular lactone exchange pathway, the aldol condensation pathway of fenugreek lactone, the fatty acid-acyl CoA-lactone formation pathway in fruit, and the unsaturated fatty acid-hydroxy fatty acid-lactone formation pathway in fruit. Issues in current research and future research directions are also summarized and discussed. The purpose of this study is to provide theoretical references for comprehensive understanding of lactone flavor compounds and their formation, which may contribute for improving food flavor and food quality, and consequently transform and enhance the use of lactones in the food industry.

Key words: food; lactone compounds; flavor; biosynthesis mechanism; δ -lactone; γ -lactone; fenugreek lactone; fatty acid-acyl CoA-lactone

引文格式:

于海燕,姚文倩,陈臣,等.内酯类化合物在食品中的风味贡献及形成机制[J].现代食品科技,2022,38(5):337-349,+55

YU Haiyan, YAO Wenqian, CHEN Chen, et al. Flavor contribution and biosynthesis mechanism of lactone compounds in food [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 337-349, +55

内酯类化合物是许多食品风味的关键气味物质之一, 能赋予食品奶香、水果香、坚果香、焦糖香等优良的风味^[1,2], 并可调和其他挥发性成分使整体风味更加柔和^[3]。内酯类化合物有较低的感官阈值, 如: γ -

收稿日期: 2021-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32072346)

作者简介: 于海燕 (1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品风味分析, E-mail: hyyu@sit.edu.cn

通讯作者: 田怀香 (1976-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品风味, E-mail:

tianhx@sit.edu.cn

十二内酯在水中的香气阈值 (察觉阈值) 为 0.43-7.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[4], 且对食品风味有重要贡献, 例如: γ -内酯和 δ -内酯对奶酪奶香味的形成具有重要作用^[5], δ -癸内酯在黄油^[6-10]、切达奶酪^[3,5]、高达奶酪^[11]、马苏里拉奶酪^[12]等乳制品中香气活性值 (odor activity value, OAV) 大于 1, 对乳制品的奶香和坚果风味有重要贡献; δ -辛内酯是桃的特征香气成分^[13], 也是清香型白茶的特征风味物质之一^[14]; 甜味和奶油味与 γ -辛内酯含量呈正相关^[15]; 葫芦巴内酯具有独特的香气特征: 由低浓度时的焦糖香气向高浓度时的咖喱香气转变^[16]; 威士忌

内酯具有四种立体异构体,可以赋予酒甜香、椰子香、水果香、茉莉香等^[17];二氢猕猴桃内酯具有木香^[18],是碧螺春^[19]、西湖龙井^[20]茶的关键呈香成分。

研究发现,越来越多的化合物与风味特征紧密相关^[1,7,21]。研究风味物质的形成机理、了解风味物质在食品加工和储存过程中的生物和化学变化,将食品以最佳的可接受度呈现给消费者成为新的研究趋势。目前,研究者已经对内酯化合物在食品中的形成机制进行了探索,提出了 γ -内酯和 δ -内酯的羟基脂肪酸-内酯形成机制^[3]、一步分子内酯交换反应途径^[22]、葫芦巴内酯的羟醛缩合反应途径^[23]、果实中脂肪酸-酰基 Co A-内酯形成途径^[24]、果实中不饱和脂肪酸-羟基脂肪酸-内酯形成途径^[25]等。

对食品中内酯类化合物的研究,有助于阐明内酯类化合物对食品风味的贡献;解析其形成机制和影响因素,对开发和生产符合消费者口味的食品具有指导意义。本文在查阅相关文献的基础上综述了内酯类化合物对食品的风味贡献、食品中内酯类化合物的形成机制及影响因素,并总结了在研究内酯类风味化合物过程中所出现的问题,展望了未来的研究热点。

1 食品中常见的内酯类化合物

食品中常见的内酯类化合物有 δ -内酯、 γ -内酯、葫芦巴内酯和威士忌内酯(又称橡木内酯)、二氢猕猴桃内酯等。内酯类化合物与食品风味有密切关系^[3],且内酯类化合物的化学结构决定了它们的感官和化学性质。食品中的常见内酯类化合物的结构式如图1,常见食品中的内酯类化合物及其香气贡献如表1。

δ -内酯在乳制品和水果中广泛存在。其中, δ -癸内酯、 δ -十二内酯和 δ -壬内酯表现出典型的甜奶油香气、坚果香和椰子味,且阈值相对较小^[5]。 δ -癸内酯和 δ -十二内酯是奶油香的特征成分,尤其是 δ -癸内酯具有强烈持久的奶油的甜润香气,在水中的香气阈值(察觉阈值)仅为2.50~410.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[4];采用稳定同位素稀释法(stable isotope dilution assays, SIDA)测定黄油中 δ -癸内酯,其稀释系数高达4096^[7],浓度达1193.00~5730.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[6-10];在水果中, δ -癸内酯赋予桃、杏、芒果等水果甜香、水果香^[26-28],在桃中 δ -癸内酯浓度高达4250.00~26260.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[26],OAV>10。 δ -十二内酯阈值很低,在水中的香气阈值(察觉阈值)低至0.46~53.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[4],在切达奶酪和高达奶酪中浓度分别高达19.37~396.26 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[5]和260.00~1640.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[11],赋予奶酪甜味和水果味,对奶酪奶香味的形

成具有重要作用^[5]。

γ -内酯是一类重要的呈香化合物,留香时间长,有增香的作用^[29]。目前,国内外学者对 γ -内酯的结构、感官特性和形成已经有了较为全面的研究^[30]。 γ -内酯在白葡萄酒^[31,32]、黄酒^[33-35]、葡萄酒^[36]、威士忌^[37,38]等酒中广泛存在(表1): γ -癸内酯、 γ -壬内酯、 γ -十二内酯在酒中的含量较高,阈值较低,能赋予酒甜香、水果香、椰子香; γ -辛内酯、 γ -壬内酯是白酒中主要的内酯类香气物质^[39]; γ -壬内酯对浓香型白酒、清爽型黄酒的风味贡献较大。其次, γ -内酯是水果、乳及乳制品的重要风味物质^[40,41](表1): γ -辛内酯在水中的香气阈值为6.50~24.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[4],在杏果中, γ -辛内酯的浓度为7.00~4040.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[27];在UHT乳、切达奶酪中的浓度远高于阈值,分别为790.00~990.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[42],130.00~170.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[43]。此外, γ -丁内酯、 γ -辛内酯、 γ -己内酯也赋予花生油、核桃油、巴旦木油等坚果油焦糖味、甜味和椰子味^[44]。在茶叶中, γ -辛内酯在冷藏的仙毫绿茶中OAV值大于1,具有花香,紫罗兰香^[45];在凤凰单丛茶的挥发性成分中有 γ -丁内酯、 γ -己内酯,分别具有玉兰香和姜花香^[46]。

葫芦巴内酯(3-羟基-4,5-二甲基-2(5H)呋喃酮),是一种香气强烈的手性内酯化合物,在水中的香气阈值极低,为0.40~20.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[4],在绿茶中的浓度为121.31~574.17 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[45],远高于其阈值。葫芦巴内酯是构成多种类型葡萄酒^[47,48](如:雪利酒^[48]、马德拉酒^[40,49]、波特酒^[48])、咖啡^[50]、黄酒^[40]、醋^[51]等发酵食品香气特征的关键香气化合物^[51,52]。葫芦巴内酯与陈味有内在联系,且随时间呈递增关系^[53],被鉴定为年份标志物^[54],是陈酿酒中的关键香气物质^[55]。

威士忌内酯(又称橡木内酯),在威士忌,白兰地中存在,赋予其水果香、花香^[17]。橡木内酯的顺式和反式具有显著不同的气味阈值^[56],且威士忌的感官评价与反式橡木内酯的含量呈正相关^[17]。威士忌内酯在稀酒精溶液中的每种对映体都有其独特的气味品质^[1,17]:反式-(3S, 4R):具有非常强烈的椰子香,茉莉花香,木香,干草香;反式-(3R, 4S):具有强烈的甜香,椰子香,花香,果香;顺式-(3R, 4R):具有淡到中等强度的甜香、椰子香;顺式-(3S, 4S):具有甜味和非常微弱的椰子味。

二氢猕猴桃内酯是类胡萝卜素类降解产物^[57],具有木香^[18],广泛存在于多种名优茶中,是凤凰单丛茶^[46]、香茶等绿茶^[58],Kangra 正统红茶^[59]、茯砖茶等黑茶^[57],绞股蓝茶^[18],福鼎白茶^[60]的关键呈香成分。

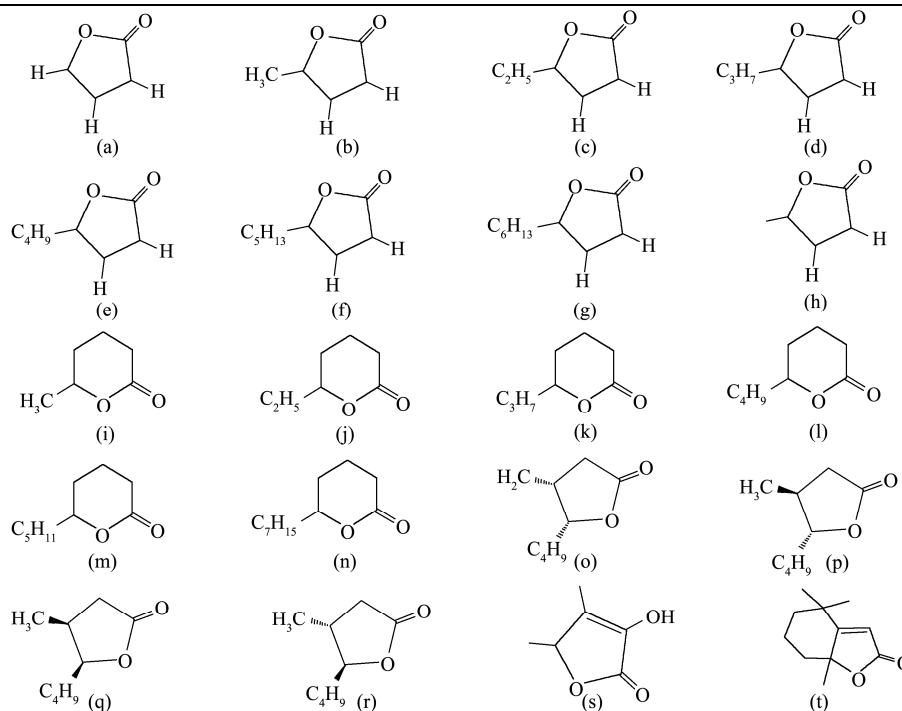


图1 食品中常见的内酯类化合物的结构式

Fig.1 Structural formulas of lactones commonly found in foods

注: (a)~(g): γ -丁内酯~ γ -癸内酯; (h): γ -十二内酯; (i)~(m): δ -己内酯~ δ -癸内酯; (n): δ -十二内酯; (o): 顺式-(3R,4R)-橡木内酯; (p): 反式-(3S,4R)-橡木内酯; (q): 顺式-(3S,4S)-橡木内酯; (r): 反式-(3R,4S)-橡木内酯; (s): 4,5-二甲基-3-羟基-2(5H)-咪喃酮(葫芦巴内酯); (t): 二氢猕猴桃内酯。

Siek 等^[61]建立了单个内酯的香气阈值: 在油中, δ -辛内酯、 δ -癸内酯、 δ -十二内酯、 δ -十四内酯的味觉阈值分别为 3.00、1.40、95.00、500.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 在水中的味觉阈值比在油中低 5 到 950 倍。研究表明内酯类化合物具有较低的感官阈值^[30], 通常短链内酯的阈值低于长链内酯^[62]。

2 食品中内酯类化合物的组成及其香气贡献

2.1 乳及乳制品

内酯类化合物对乳及乳制品的风味有很大贡献^[63,64]。内酯类化合物是超高温瞬时灭菌乳 (ultra-high temperature instantaneous sterilization 乳, UHT 乳) 风味的主要来源, 例如, δ -癸内酯, γ -十二内酯是 UHT 乳中重要挥发性风味物质, 对形成 UHT 乳特有风味起重要作用^[42,65]。内酯也是黄油风味形成的主要化合物: Tharp 等^[8]从黄油的蒸汽馏分中分离出了 δ -癸内酯和 δ -十二内酯; Boldingh 等^[9]在黄油中检测到 δ -辛内酯、 δ -癸内酯、 δ -十二内酯和 δ -十四内酯, 发现乳脂中的一系列 δ -内酯和少量的 γ -内酯为黄油风味的主要贡献者; Schlutt 等^[10]发现半挥发性内酯, 如 δ -十四内酯, 可以增强黄油的典型奶油味道。奶酪中内酯含量与奶酪脂肪含量呈正比^[66], 赋予奶酪奶油味、椰子味

等; 王姣等^[5]在不同成熟时间的切达奶酪样品中检测出 8 种内酯: δ -己内酯、 δ -壬内酯、 γ -十一内酯、 δ -癸内酯、 γ -十二内酯、 δ -十二内酯、 β -羟基- γ -丁内酯、 δ -十四内酯; 在不同成熟时间的切达奶酪中, 成熟时间为 12 个月的中味切达奶酪含 8 种内酯, 所含种类最多, 且含量最高为 0.06 mg/kg ^[5]; 北京工商大学王蓓团队^[12]发现不同工艺制备的马苏里拉奶酪的挥发性化合物种类和含量差别较大, 新鲜牛奶奶酪中内酯类化合物含量较高, 半硬质牛奶奶酪以酸类化合物为主, 内酯类化合物其次; δ -辛内酯、 δ -癸内酯、 δ -十二内酯和 γ -己内酯是高达奶酪中主要内酯类物质, 赋予奶酪椰子味、甜味、杏果味等^[11]。

2.2 酒

内酯类化合物能赋予酒焦糖香、陈香、水果香、甜香、坚果香等良好的风味, 在威士忌、葡萄酒、黄酒、白酒、朗姆酒中已检测到内酯类化合物, 且种类多样 (表 1)。 β -甲基- γ -内酯 (橡木内酯), γ -壬内酯, γ -癸内酯和 γ -十二内酯是在麦芽威士忌中已知的四种内酯, 其中: γ -壬内酯, γ -十二内酯的感官阈值极低, 分别为 9.70~30.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[67]、0.43~7.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[28,37], γ -壬内酯, γ -十二内酯的 OAV 值均大于 1; γ -癸内酯和 γ -十二内酯对麦芽威士忌的甜味和脂肪风味有显著贡

献,影响麦芽威士忌的品质^[37,38];橡木内酯在麦芽威士忌中有顺式和反式两种^[17],呈威士忌酒香气及香豆素香、椰子香、木香、坚果香等,是麦芽威士忌中重要的理想风味成分。此外,内酯是葡萄酒的重要香气成分之一^[68]:Jose等^[69]测定了9款菲诺型白葡萄酒在工业条件下生物陈化1、3、5年后的63种香气成分,发现葫芦巴内酯是风味贡献最大的化合物之一。在黄酒中:江南大学徐岩团队^[34]采用GC-O首次发现葫芦巴内酯是构成甜型黄酒“焦糖香”特征香气的关键香气化合物;罗涛等^[33]发现 γ -壬内酯对清爽型黄酒的贡献较大。目前,在白酒中已经定性的内酯有 γ -己内酯^[31]、 γ -辛内酯^[39]、 γ -壬内酯^[70,71]、 γ -癸内酯^[32]、 γ -十二内酯^[32],具有甜香、坚果香等令人愉快的香气,对白酒的风味有积极的贡献;陈年白酒中具有顺式和反式两种橡木内酯,顺式内酯的感官阈值为0.79 mg/L,反式内酯的感官阈值为0.07 mg/L,顺式内酯的香气比反式内酯的香气更浓郁^[72]。

2.3 水果

内酯类化合物是桃、杏、芒果、椰子等水果的重要特征香气成分。内酯类物质是成熟桃果实的主要呈味物质,尤其是 γ -癸内酯和 δ -癸内酯^[73,74]。内酯可以使桃果实具有桃香尾韵, γ -癸内酯使桃果实具有桃特有的芳香气味。Jia等^[75]发现甜度与 γ -辛内酯、 γ -癸内酯、 δ -癸内酯、 γ -十二内酯高度相关;酸味与 γ -癸内酯和 γ -辛内酯呈高度负相关; γ -己内酯、 γ -癸内酯和 γ -辛内酯与桃子味、水果味、桃子整体风味和人们总的接受程度呈显著正相关,与青草味呈显著负相关。 γ -癸内酯、 γ -辛内酯是杏香气的关键特征香气成分,内酯类成分的有无及含量多少,可以作为鉴定杏果实香气优劣的重要指标之一。张波等^[76]采用顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)和气相色谱-质谱联用法(gas chromatography - mass spectrometry, GC-MS)联用技术,在6种杏果中鉴定出9种内酯类化合物,其中: γ -己内酯、 δ -十一内酯、5-羟基-7-癸烯酸内酯和5-羟基-2,4-癸二烯酸内酯是杏中首次报道的风味物质。Xi等^[77]在杏果实香气化合物中鉴定出8种内酯,其中: γ -辛内酯、 δ -辛内酯、 γ -癸内酯、 δ -癸内酯、 γ -十二内酯的OAV值均大于1。Elisabeth等^[27]发现欧洲生态杏子中含有 γ -癸内酯、二氢猕猴桃内酯,且 γ -癸内酯含量较多。Engel等^[78]采用标准控制蒸馏-萃取、液相色谱和GC-MS联用技术,

Wilson等^[28]采用气相色谱法,在芒果中共鉴定出11种内酯。

2.4 其他食品

牛肉中含有较为丰富的内酯类化合物,其中 δ -十四内酯和 δ -十六内酯可以掩盖青草味^[79],在谷物饲养牛肉中的含量高于草饲牛肉。不同品种的牛肉所含内酯类化合物的种类和含量有所差异: γ -十二内酯、 δ -癸内酯、 δ -十二内酯、 δ -十四内酯和 δ -十六内酯在澳大利亚牛肉中含量相对较高;和牛中的 γ -辛内酯和 γ -壬内酯含量相对较高^[80],且内酯是日本和牛最重要的风味成分^[79],具有椰子味或桃味的 γ -壬内酯有助于和牛的甜味^[81]。葫芦巴内酯是咖啡风味的关键化合物之一^[82],Semmelroch等^[83]发现Arabica和Robusta咖啡中葫芦巴内酯的OAV值分别为257和103,远大于1,对咖啡风味具有重要作用。贾潇等^[44]对溶剂辅助蒸发法(solvent-assisted flavor evaporation, SAFE)提取的3种坚果油挥发性化合物通过质谱鉴定,保留指数鉴定,嗅闻鉴定结合分析:在花生油和核桃油中发现 γ -丁内酯(焦糖、甜味),在巴旦木油中鉴定出 γ -辛内酯(椰子味)。此外, γ -壬内酯、 δ -癸内酯、 δ -壬内酯可以赋予面包椰子香、甜香、坚果香^[84-86];葫芦巴内酯、 δ -辛内酯、 δ -癸内酯、 γ -辛内酯、二氢猕猴桃内酯赋予绿茶椰子香、焦糖香、麝香等,构成其独特的香气特征^[45,58]。

3 具有风味贡献的内酯类化合物形成机制及其影响因素

3.1 乳及乳制品

乳及乳制品中具有丰富的内酯,目前人们对乳制品中内酯的形成机制主要有两种观点:酶反应途径和化学反应途径。 γ -内酯和 δ -内酯为乳制品风味的理想贡献者^[9,95],4-羟基酸和5-羟基酸分别是 γ -内酯和 δ -内酯的重要前体。羟基化脂肪酸存在于乳脂甘油三酯中,可以通过酶促反应分解脂肪或者加热得到;也可以通过微生物酶(脂氧合酶和水合酶)作用于不饱和脂肪酸的分解代谢产生(图2)。而化学反应途径认为:奶酪中内酯形成的机理是一步非酶反应,在甘油三酯中酯化的羟基脂肪酸经过酯交换反应直接释放内酯(图3)^[21]。

表1 常见食品中的内酯类化合物及其香气贡献

Table 1 Lactones in common foods and their aroma contribution

食品种类	食品名称	主要内酯类化合物	香气贡献	参考文献
乳	乳	γ -癸内酯、 γ -十二内酯	水果味、奶香味、奶油味	[42]
	UHT 乳	2, 4-戊二烯-4-内酯、2(5)-庚烯-4-内酯、 γ -辛内酯、 δ -辛内酯、 γ -壬内酯、 δ -癸内酯	奶香味、奶油味、椰子味、杏仁味、桃花香	[42,87]
	黄油	δ -癸内酯、 δ -十二内酯、 δ -辛内酯、 δ -癸内酯、 δ -十二内酯、 δ -十四内酯	桃子味、奶油味、奶香味	[6-10,88]
	乳制品			
	切达奶酪	δ -己内酯、 δ -壬内酯、 γ -十一内酯、 δ -癸内酯、 γ -十二内酯、 δ -十二内酯、 β -羟基- γ -丁内酯、 δ -十四内酯	桃子味、椰子味、甜味	[5,43]
	马苏里拉奶酪	δ -癸内酯、 δ -十二内酯、丁内酯、 γ -壬内酯、 δ -壬内酯、 γ -十二内酯	奶油味、椰子味、水果味	[12]
	高达奶酪	δ -辛内酯、 δ -癸内酯、 δ -十二内酯、 γ -己内酯、 δ -十四内酯、 δ -十六内酯	椰子味、甜味、杏果味	[11]
酒	麦芽威士忌	β -甲基- γ -内酯(威士忌内酯)、 γ -壬内酯、 γ -癸内酯、 γ -十二内酯	甜味、脂肪风味、椰子香、木香、坚果香	[37,38]
	雪莉酒	葫芦巴内酯、 γ -丁内酯、威士忌内酯、 γ -己内酯、 γ -辛内酯、 γ -壬内酯、 γ -癸内酯、 δ -癸内酯	水果味、椰子味、桃味	[36]
	朗姆酒	威士忌内酯(顺式和反式)、葫芦巴内酯	椰子味、辛辣味	[89]
	黄酒	葫芦巴内酯、 γ -壬内酯、 γ -丁内酯、 γ -癸内酯、 γ -己内酯、 γ -十二内酯	焦糖香、陈香	[33,34]
	白酒	γ -己内酯、 γ -辛内酯、 γ -壬内酯、 γ -癸内酯、 γ -十二内酯	甜香、坚果香	[31,32,39]
	桃	γ -癸内酯、 γ -己内酯、 γ -庚内酯、 γ -辛内酯、 γ -壬内酯、 γ -十二内酯、反-2-十六内酯、 γ -十六内酯、 δ -癸内酯	桃味、甜味、青草味、酸味、水果味	[73,74,90]
杏	γ -己内酯、 γ -辛内酯、 γ -癸内酯、 γ -十一内酯、 γ -十二内酯、 δ -癸内酯、 δ -十一内酯、5-羟基-7-癸烯酸内酯、二氢猕猴桃内酯、5-羟基-2,4-癸二烯酸内酯	桃味、杏果味、甜味、椰子味、坚果味、淡红茶味	[26,27,76]	
水果				
	芒果	γ -丁内酯、 γ -戊内酯、 γ -己内酯、 γ -己内酯、 γ -八角内酯、 δ -辛内酯、 γ -壬内酯、 δ -壬内酯、 γ -癸内酯、 δ -癸内酯、 γ -十二内酯、 γ -己内酯、 γ -辛内酯、 γ -癸内酯、 γ -十一内酯、 γ -十二内酯、 δ -癸内酯、 δ -十一内酯、5-羟基-7-癸烯酸内酯、二氢猕猴桃内酯	桃味、杏果味、甜味、椰子味、坚果味、淡红茶味	[28]
	番茄	γ -丁内酯、 γ -辛内酯	甜香味、水果香	[73]
	菠萝	γ -癸内酯、 δ -癸内酯	甜香味、水果香	[91]
	草莓	γ -十二内酯、 γ -癸内酯	奶油味、水果味、桃子味	[92]
其他	牛肉	γ -十二内酯、 δ -癸内酯、 δ -十二内酯、 δ -十四内酯、 δ -十六内酯、 γ -辛内酯、 γ -壬内酯	椰子味、桃味、甜味	[80,81,93]
	咖啡	葫芦巴内酯	焦香味、甜味、水果香	[83,94]
	绿茶	葫芦巴内酯、 δ -辛内酯、 δ -癸内酯、 γ -辛内酯、二氢猕猴桃内酯	椰子气、焦糖香气、麝香、香豆素气息	[45,58]
	花生油	γ -丁内酯	焦糖味、甜味	[44]
	核桃油	γ -丁内酯	焦糖味、甜味	[44]
	巴旦木油	γ -辛内酯、 γ -己内酯	椰子味、甜味、焦糖味	[44]
	面包	γ -壬内酯、 δ -癸内酯、 δ -壬内酯	椰子香、杏仁味、花香、奶油香、甜香、坚果香	[84-86]

影响内酯类化合物在乳及乳制品中生成的因素主要有：①温度：牛乳经过 UHT 处理后，酯类化合物变化最大，与原料乳相比，有 2,4-戊二烯-4-内酯，2(5)-庚烯-4-内酯， γ -辛内酯， δ -辛内酯， γ -壬内酯和 δ -癸内酯 6 种内酯类化合物形成^[42]；干酪成熟过程中内酯的形成取决于成熟温度，其形成速率具有温度依赖性^[21]。②水分活度：微量的水在内酯形成过程是必要的，且水在反应过程中起催化作用^[21,96]，Alewijn 等^[21]发现添加 5% (V/V) 的水可以充分地提高奶酪中内酯形成速率，但添加更多的水不会产生额外的影响。③其他：干酪成熟过程中内酯的形成也取决于非发酵剂乳酸菌 (nonstarter lactic acid bacteria, NSLAB) 的存在^[97]；缺乏前体或酶活性会阻碍内酯的形成^[98]；此外，乳制品的乳脂含量，发酵乳制品的发酵时间，不同预热处理方式均会影响乳制品中内酯化合物的种类和数量^[64,99,100]。

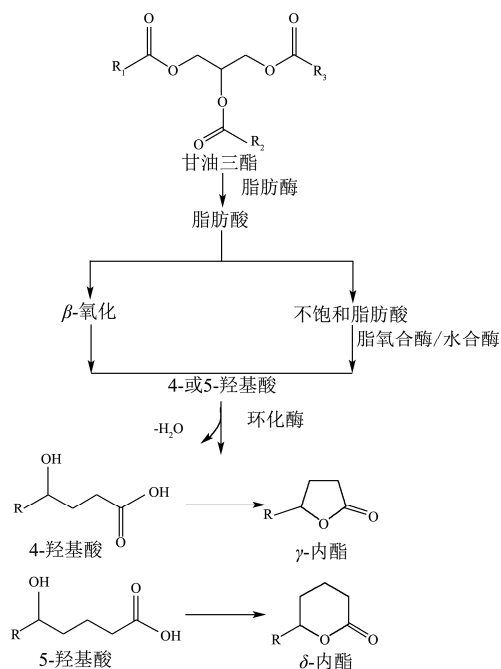


图2 奶酪中内酯类化合物形成机理^[3,21,97,101-103]

Fig.2 Formation mechanism of lactones in cheeses ^[3,21,97,101-103]

3.2 酒

目前，内酯类化合物在酒中的形成机制主要有两类观点：①氧化反应：亚油酸在糖化过程中通过酶促氧化或自动氧化产生氢过氧化物，亚油酸通过氢过氧化物从 4-羟基壬酸转化为 γ -壬内酯^[37]。②微生物作用：乳酸菌将不饱和脂肪酸油酸和棕榈油酸分别转化为 γ -内酯的前体：10-羟基硬脂酸和 10-羟基棕榈酸，然后酵母将 10-羟基硬脂酸和 10-羟基棕榈酸分别转化为 γ -癸内酯和 γ -十二内酯。此外，酒中微生物之间的相互作用会间接影响内酯的形成：羟基脂肪酸可在乳酸菌

存在的情况下形成，在布鲁尔氏酵母存在下形成的羟基脂肪酸比只在酿酒酵母存在下形成的羟基脂肪酸更多^[104]。且研究发现，顺式橡木内酯和反式橡木内酯可能来自相同的前体物质 (图 3)^[17]。葫芦巴内酯是陈酿酒的重要特征风味物质，其形成途径比较复杂，酒精饮料陈酿过程中 2-酮丁酸与乙醛的缩合可能形成葫芦巴内酯，且抗坏血酸可作为 2-酮丁酸的前体，但葫芦巴内酯形成途径可能不唯一^[105]，图 4 提供了葫芦巴内酯一种可能的形成及降解途径。此外，葫芦巴内酯的形成与残糖含量^[104]和抗坏血酸含量有着极大的联系^[52]；葫芦巴内酯与糖衍生物糠醛、5-甲基糠醛、5-羟甲基糠醛和 5-乙氧基甲基糠醛之间存在很强的相关性，故推测葫芦巴内酯可能来自糖等成分^[104]；而在含有乙醇的酸性介质中抗坏血酸的氧化降解可以形成葫芦巴内酯^[52]。

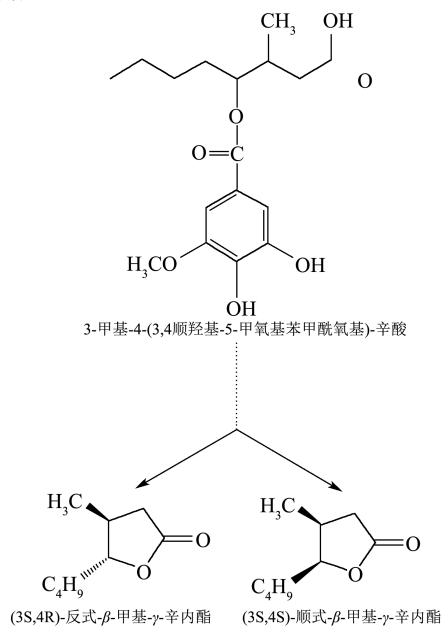


图3 橡木内酯形成的生化途径^[17]

Fig.3 Biochemical formation pathway of oak lactones ^[17]

影响内酯类化合物在酒中生成的因素主要有：①时间：白兰地中橡木内酯总量从储存半年后的 0.57 mg/L 增加到 5 年后的 6.00 mg/L；在威士忌的三年陈化过程中橡木内酯的含量也呈现同样的变化趋势^[17]。马德拉葡萄酒中葫芦巴内酯的浓度随时间增加，从 6 年的 100.00 μ g/L 增加到 25 年的 1000.00 μ g/L，达最高含量^[104]。②温度：高温烘烤会导致橡木内酯挥发或热降解，且加热剧烈程度影响顺式、反式橡木内酯的比例：在未加热的橡木中，反式橡木内酯占主导地位，随着加热程度的增强，顺式的比例增加^[16]。温度对黄酒陈酿过程中葫芦巴内酯的形成起决定性作用，其含量随着温度的升高而增加^[55]。③其他：温和的加速老化会导致其他能够产生葫芦巴内酯的机制^[52]；葫芦巴

内酯也可以通过美拉德反应生成^[106]。

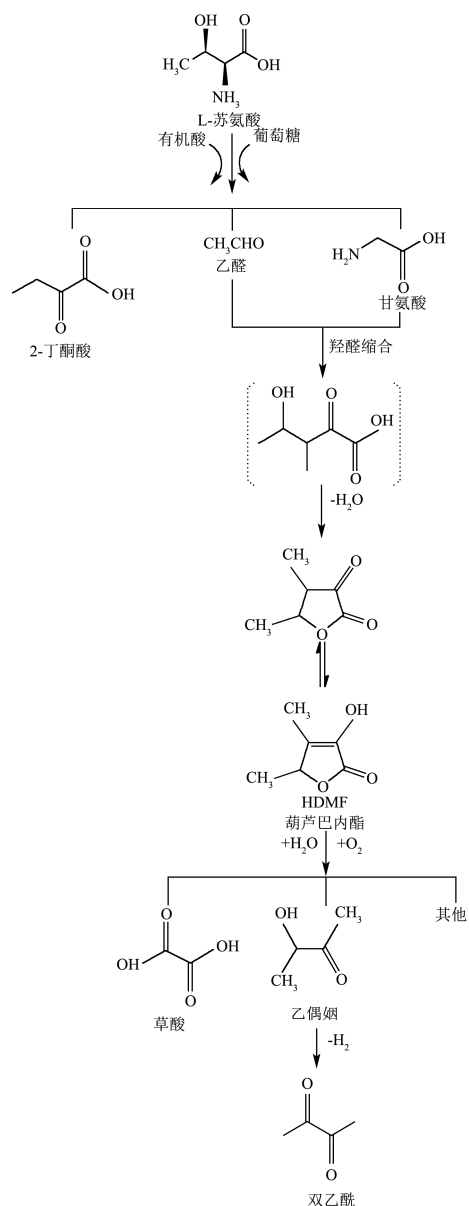


图4 干白葡萄酒中葫芦巴内酯的形成及降解途径^[23]

Fig.4 Formation and degradation pathways of sotolon in dry white wine ^[23]

3.3 水果

果实中内酯类化合物的形成途径主要有两条：①饱和脂肪酸通过 β -氧化和酰基辅酶 A 氧化酶 (acyl-CoA oxidase, ACX) 的催化生成内酯类物质；②亚麻酸和亚油酸在细胞色素 P450 和其他羟化酶、环化酶的作用下生成羟基脂肪酸，最终形成内酯^[107] (图5)。Engel 等^[107]研究菠萝香气成分 δ -辛内酯的生物合成，发现至少有三个代谢途径：含氧酸的还原，不饱和脂肪酸的水合作用及 3-羟基酸的延伸作用^[73]。一些学者认为，二氢猕猴桃内酯是通过加热 β -胡萝卜素，或依次通过 β -胡萝卜素的光氧化， β -紫罗兰酮的

光氧化与 β -紫罗兰酮一起出现。但 Guichard 等^[27]通过实验发现当提取过程中不涉及加热或光照射时，依然具有较高含量的二氢猕猴桃内酯，且除 Rouge du Roussillon 品种外的五种杏中，未同时检测到二氢猕猴桃内酯和 β -紫罗兰酮。因此，二氢猕猴桃内酯的形成机制尚存争议。

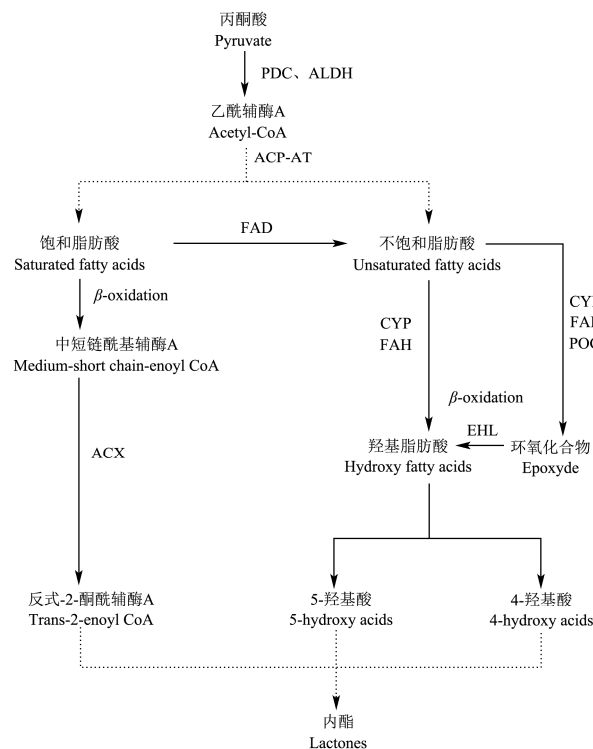


图5 果实内可能的内酯合成途径^[25,108,109]

Fig.5 Possible lactones synthesis pathways in fruits ^[25,108,109]

注：实线箭头代表一步反应，虚线箭头代表多步反应。

PDC, pyruvate decarboxylase, 丙酮酸脱羧酶 (EC:4.1.1.1); ALDH, aldehyde dehydrogenase, 乙醛脱氢酶 (EC:1.2.1.3); ACP-AT, acyl carrier protein-acyltransferase, ACP-转酰酶 (EC:2.3.1.16); FAD, fatty acid desaturase, 脂肪酸去饱和酶 (EC:1.14.19.4); ACX, acyl-Co A oxidase, 酰基辅酶 A 氧化酶 (EC:1.3.3.6); CYP, cytochrome P450, 细胞色素 P450; FAH, fatty acid hydroxylase, 脂肪酸羟化酶 (EC:1.14.--); FAE, fatty acid epoxydase, 脂肪酸环化酶; POG, peroxygenase, 脂肪酸羟化环化酶 (EC:1.11.2.3); EHL, epoxyde hydrolase, 环氧水分解酶。

影响水果中内酯类化合物生成的因素主要包括：

①采前因素：如光照、水分、肥料等。不同套袋处理的果实中 γ -癸内酯和 δ -癸内酯含量有显著差异。贾慧娟等^[90]发现用 80.00 mg/L 氮肥处理的果实中 γ -己内酯、 γ -辛内酯、 γ -癸内酯高于其它果实。②果实大小及成熟度：Jia 等^[110]对 4 个品种桃果实按果实大小分类，发现小桃果实中 γ -癸内酯的浓度明显高于其在大桃果实中的浓度。桃果实芳香物质中，癸内酯含量变化受

成熟度影响最大。在桃成熟后期, γ -癸内酯和 δ -癸内酯含量迅速增加, 在成熟时达到最高量^[111]。乙烯参与了桃果实内酯类物质的生成, 乙烯自催化作用的增加, 可能对桃果实挥发性物质形成具有极其重要的作用^[24,74]。③采后处理: 芒果鲜样的内酯化合物含量极低, 浓度仅为 ppb 级别^[78,112]。刘璇等^[112]发现芒果经热风干燥, 微波真空干燥, 真空冷冻干燥, 变温压差膨化干燥后, 香气物质中 γ -丁内酯的含量显著升高。

4 结论和展望

4.1 内酯类化合物种类繁多, 对乳及乳制品、酒、水果的特征风味有重要影响, 赋予食品奶香味、坚果味、水果味等优良的风味品质。本文综述了 γ -内酯、 δ -内酯、葫芦巴内酯、威士忌内酯等食品中常见的内酯类化合物的风味特征, 食品中内酯类化合物的组成及其香气贡献, 总结了具有风味贡献的内酯类化合物在乳及乳制品、酒、水果中的形成机制及其影响因素, 发现温度、时间、环化酶、羟化酶对内酯类化合物的形成有重要影响, 对于全面认知内酯类化合物, 促进食品中内酯类物质的富集提供一定的理论支撑。

4.2 虽然国内外目前对内酯类化合物的香气贡献、形成机制、影响因素有了一定的研究, 但仍然存在许多问题有待解决。例如: 在乳及乳制品、酒、水果中同种内酯的形成机制是否完全相同, 在参与内酯形成的多条途径中, 哪一条是主要途径, 哪一步是限速步骤尚不清晰; 且食品体系是一个复杂的生物化学体系, 涉及较多动态的变化, 这些生物化学反应发生时引起内酯形成过程中哪些反应物或产物浓度的变化, 变化有何规律, 哪些关键酶被激活或抑制, 相关的机理仍缺乏系统的研究和认识; 一些环境因素如: 加热、微波、氧气等会使食品中内酯类化合物的含量增加, 但尚未进行全面的研究。随着精密仪器与技术的创新突破, 研究手段与方法的不断完善, 对食品中内酯类物质的相关研究也将逐渐深入。未来期望能够对内酯的形成机理以及合成调控进行更深入透彻的研究, 这有助于改善食品风味, 提高食品品质, 推动食品工业的发展。

参考文献

- [1] Cameleyre M, Madrelle V, Lytra G, et al. Impact of whisky lactone diastereoisomers on red wine fruity aromatic expression in model solution [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(39): 10808-10814
- [2] Cooke R C, Leeuwen K A V, Capone D L, et al. Odor detection thresholds and enantiomeric distributions of several

- 4-alkyl substituted γ -lactones in Australian red wine [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(6): 2462-2467
- [3] 陈臣,刘政,于海燕,等. 奶酪中内酯类物质风味贡献及其生物合成调控进展[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(11): 305-312
CHEN Chen, LIU Zheng, YU Haiyan, et al. Flavor contribution of lactones in cheese and its biosynthetic regulation: a review [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(11): 305-312
- [4] Gemert L J V. Odour threshold values in water in odour thresholds [M]// Gemert L J V. *Compilations of Odour Threshold Values in Air, Water and Other Media*. The Netherlands: Oliemans Punter & Partners BV, 2011: 207-359
- [5] 王姣,许凌云,张晋华,等. 不同成熟时间切达奶酪中挥发性香气成分及其电子鼻判别分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(20): 175-183
WANG Jiao, XU Lingyun, ZHANG Jinhua, et al. Cheddar cheese with different ripening times: analysis of volatile aroma components and electronic nose discrimination [J]. *Food Science*, 2020, 41(20): 175-183
- [6] 刘昊. 酶解与发酵技术在黄油增香中的应用研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017
LIU Hao. Study on the application of enzymatic hydrolysis and fermentation technology in butter flavor enhancement [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017
- [7] Mallia S, Escher F, Schlichtherle-Cerny H. Aroma-active compounds of butter: a review [J]. *European Food Research & Technology*, 2008, 226(3): 315-325
- [8] Tharp B W, Patton S. Coconut-like flavor defect of milk fat. IV. demonstration of δ -dodecalactone in the steam distillate from milk fat [J]. *Journal of Dairy Science*, 1960, 43(4): 475-479
- [9] Boldingh J, Taylor R J. Trace constituents of butterfat [J]. *Nature*, 1962, 194: 909-913
- [10] Schlutt B, Moran N, Schieberle P, et al. Sensory-directed identification of creaminess-enhancing volatiles and semivolatiles in full-fat cream [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(23): 9634-9645
- [11] Jung H J, Ganesan P, Lee S J, et al. Comparative study of flavor in cholesterol-removed Gouda cheese and Gouda cheese during ripening [J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(4): 1972-1983
- [12] 王姣,许凌云,张晋华,等. SPME-GC-MS 和 GC-O 鉴定 3 种不同生产工艺马苏里拉奶酪的特征香气物质[J]. *食品科学*, 2020, 41(18): 210-217

- WANG Jiao, XU Lingyun, ZHANG Jinhua, et al. Identification of characteristic aroma substances of three different Mozzarella cheeses by solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry [J]. Food Science, 2020, 41(18): 210-217
- [13] 陈小燕,王友升,安琳,等.桃果实低温贮藏期间挥发性物质与感官特性的关系-偏最小二乘回归分析法[J].北京工商大学学报(自然科学版),2010,28(4):36-40
- CHEN Xiaoyan, WANG Yousheng, AN Lin, et al. Relationship between volatile substances and sensory properties of peach fruits during cryopreserved-partial least squares regression analysis [J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2010, 28(4): 36-40
- [14] 田宇倩.基于感官评价和化学计量学的白茶风味品质研究[D].杭州:浙江大学,2020
- TIAN Yuqian. Study on flavor quality of white tea based on sensory evaluation and chemometrics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020
- [15] Leuven I V, Caelenberg T V, Dirinck P. Aroma characterization of Gouda-type cheeses [J]. International Dairy Journal, 2008, 18(8): 790-800
- [16] Kobayashi A. Sotolon: identification, formation, and effect on flavor [M]// Teranishi R. Flavor Chemistry: Trends and Developments. ACS Symposium Series. Washington, DC: American Chemical Society, 1989: 49-59
- [17] Maga J A. Oak lactones in alcoholic beverages [J]. Food Reviews International, 1996, 12(1): 105-130
- [18] 王忠泽,杨宇涵,张红霞,等.五个不同产地绞股蓝茶挥发物及香气成分研究[J].天然产物研究与开发,2020,32(10): 1717-1729
- WANG Zhongze, YANG Yuhan, ZHANG Hongxia, et al. Volatile and aroma components of *Gynostemma pentaphyllum* (Thunb.) Makino tea from five different origins [J]. Natural Product Research and Development, 2020, 32(10): 1717-1729
- [19] 陈合兴.碧螺春茶特征香气成分研究[D].上海:上海应用技术学院,2016
- CHEN Hexing. Characteristic aroma components of Biluochun tea [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2016
- [20] 肖作兵,陈合兴,牛云蔚,等.顶空蒸馏萃取法结合 GC-MS/GC-O 技术分析龙井茶的特征香气成分[J].浙江大学学报(理学版),2015,42(6):714-720
- XIAO Zuobing, CHEN Hexing, NIU Yunwei, et al. Identify the characteristic aroma components of Longjing tea by headspace steam distillation extraction and GC-MS/GC-O [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2015, 42(6): 714-720
- [21] Ueda S, Sasaki R, Nakabayashi R, et al. Exploring the lipids involved in the formation of characteristic lactones in Japanese black cattle [J]. Metabolites, 2021, 11(4): 203-217
- [22] Alewijn M, Smit B A, Sliwinski E L, et al. The formation mechanism of lactones in Gouda cheese [J]. International Dairy Journal, 2007, 17(1): 59-66
- [23] Kojiro T, Makoto T, Shin S. 3-Hydroxy-4,5-dimethyl-2(5H)-furanone, a burnt flavoring compound from aged sake [J]. Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan, 1976, 40(2): 325-330
- [24] 曹香梅.桃果实酯类芳香物质的代谢与调控研究[D].杭州:浙江大学,2019
- CAO Xiangmei. Metabolism and regulation of volatile esters in peach fruit [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019
- [25] Xi W P, Zhang B O, Liang L I, et al. Postharvest temperature influences volatile lactone production *via* regulation of acyl-CoA oxidases in peach fruit [J]. Plant, Cell & Environment, 2012, 35(3): 534-545
- [26] Robertson J A, Horvat R J, Lyon B G, et al. Comparison of quality characteristics of selected yellow- and white-fleshed peach cultivars [J]. Journal of Food Science, 2010, 55(5): 1308-1311
- [27] Guichard E, Souty M. Comparison of the relative quantities of aroma compounds found in fresh apricot (*Prunus armeniaca*) from six different varieties [J]. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung, 1988, 186(4): 301-307
- [28] Wilson C W, Shaw P E, Knight R J. Importance of some lactones and 2,5-dimethyl-4-hydroxy-3(2H)-furanone to mango (*Mangifera indica* L.) aroma [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1990, 38(7): 1556-1559
- [29] 聂庆庆,徐岩,范文来.固相萃取结合气相色谱-质谱技术定量白酒中的 γ -内酯[J].食品与发酵工业,2012,38(4):159-164
- NIE Qingqing, XU Yan, FAN Wenlai. Determination of γ -lactone in liquor by solid phase extraction combined with gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(4): 159-164
- [30] Wanikawa A, Hosoi K, Kato T. Conversion of unsaturated fatty acids to precursors of γ -lactones by lactic acid bacteria during the production of malt whisky [J]. Journal of the

- American Society of Brewing Chemists, 2000, 58(2): 51-56
- [31] 沈海月. 酱香型白酒香气物质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010
SHEN Haiyue. Studies on aroma compounds of Chinese soy sauce aroma type liquor [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010
- [32] Fan W, Qian M C. Characterization of aroma compounds of Chinese "Wuliangye" and "Jiannanchun" liquors by aroma extract dilution analysis [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(7): 2695-2704
- [33] 罗涛. 清爽型黄酒香气特征及麦曲对其香气的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2008
LUO Tao. Characteristic aroma of light aroma style Chinese rice wines and effects of wheat Qu by GC-O coupled with GC-MS [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008
- [34] Chen S, Wang D, Xu Y. Characterization of odor-active compounds in sweet-type Chinese rice wine by aroma extract dilution analysis with special emphasis on sotolon [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(40): 9712-9718
- [35] 陈双. 中国黄酒挥发性组分及香气特征研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013
CHEN Shuang. Characterization of the volatile and aroma profile of Chinese rice wine [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013
- [36] Durán-guerrero E, Castro-mejías R, García-moreno M D V, et al. Aroma of sherry products: a review [J]. Foods, 2021, 10: 753-785
- [37] Wanikawa A, Hosoi K, Takise I, et al. Detection of gamma-lactones in malt whisky [J]. Journal-Institute of Brewing, 2000, 106(1): 39-43
- [38] Wanikawa A. Flavors in malt whisky: a review [J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2020, 78(4): 1-19
- [39] 陈双, 陈华蓉, 吴群, 等. 应用顶空固相微萃取-气相色谱质谱技术解析酿造用高粱蒸煮挥发性香气成分[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(4): 201-207
CHEN Shuang, CHEN Huarong, WU Qun, et al. Characterization of volatile aroma compounds in cooked sorghum by HS-SPME and GC-MS [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(4): 201-207
- [40] Wang N, Chen S, Zhou Z. Characterization of volatile organic compounds as potential aging markers in Chinese rice wine using multivariable statistics [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(14): 6444-6454
- [41] García-moreno M V, Sánchez-guillén M M, Delgado-gonzález M J, et al. Chemical content and sensory changes of Oloroso Sherry wine when aged with four different wood types [J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 140: 110706
- [42] 王万厚, 母智深. UHT 热处理对牛奶中风味物质的影响[J]. 中国乳品工业, 2012, 40(4): 36-38
WANG Wanhou, MU Zhishen. Effect of UHT treatment on volatile compounds in milk [J]. China Dairy Industry, 2012, 40(4): 36-38
- [43] 徐振丽, 郑晓吉, 陈计峦, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析茶叶提取物对奶酪挥发性风味的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 207-212
XU Zhenli, ZHENG Xiaoji, CHEN Jiluan, et al. Effect of tea extract on volatile flavor compounds of cheese based on HS-SPME-GC-MS [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(2): 207-212
- [44] 贾潇, 周琦, 杨旖旎. 3 种坚果油的挥发性成分提取及关键风味成分分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(7): 35-41
JIA Xiao, ZHOU Qi, YANG Yini. Extraction of volatile flavors of three kinds of nut oils and their key flavor compounds [J]. China Oils and Fats, 2020, 45(7): 35-41
- [45] 苏莹. 汉中绿茶香气成分及香气特征分析[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2019
SU Ying. Analysis of the aroma components and characteristics on Hanzhong green tea [D]. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2019
- [46] 肖凌. 十种香型凤凰单丛茶香气成分分析[D]. 重庆: 西南大学, 2018
XIAO Ling. Study on aroma components of ten types of Fenghuang Dancong tea [D]. Chongqing: Southwest University, 2018
- [47] Milheiro J, Vilamarim R, Filipe-ribeiro L, et al. An accurate single-step LLE method using keeper solvent for quantification of trace amounts of sotolon in port and white table wines by HPLC-DAD [J]. Food Chemistry, 2021, 350: 129268
- [48] Freitas A I, Pereira V, Leca J M, et al. A simple emulsification-assisted extraction method for the GC-MS/SIM analysis of wine markers of aging and oxidation: application for studying micro-oxygenation in madeira wine [J]. Food Analytical Methods, 2018: 2056-2065
- [49] Pereira V, Marques J C. Odor detection threshold (ODT) and odor rejection threshold (ORT) determination of sotolon in Madeira wine: a preliminary study [J]. AIMS Agriculture and Food, 2018, 3(3): 172-180

- [50] Caporaso N, Whitworth M B, Cui C, et al. Variability of single bean coffee volatile compounds of Arabica and Robusta roasted coffees analysed by SPME-GC-MS [J]. *Food Research International*, 2018, 108: 628-640
- [51] 简东振. 镇江香醋陈酿香气变化及其影响因素研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020
JIAN Dongzhen. Study on aroma changes and influencing factors of Zhenjiang aromatic vinegar during aging [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020
- [52] Pons A, Lavigne V, Landais Y, et al. Identification of a sotolon pathway in dry white wines [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(12): 7273-7279
- [53] 田晓林. 衡水老白干酒中陈味物质的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2016
TIAN Xiaolin. Study on chen flavor substances in Hengshui Laobaigan wine [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2016
- [54] Hugo O, Paula G, Machado B P, et al. Impact of forced-aging process on madeira wine flavor [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(24): 11989-11996
- [55] 王程成. 黄酒陈酿关键香气组分及其形成影响因素的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020
WANG Chengcheng. The study on the key aroma compounds and influencing factors during the aging process of Chinese rice wine [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020
- [56] 李兰晓, 李记明, 赵虎, 等. 国产橡木与欧美橡木主要成分的差异分析[J]. *酿酒科技*, 2016, 12: 52-55, 58
LI Lanxiao, LI Jiming, ZHAO Hu, et al. Difference in main compositions between domestic and European/American oak [J]. *Liquor-Making Science and Technology*, 2016, 12: 52-55, 58
- [57] 李永迪. 茯砖茶加工过程中特征性香气成分研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019
LI Yongdi. Study on characteristic aroma compounds during the process of Fu brick tea [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019
- [58] 蔺志远, 施江, 谭俊峰, 等. 提香温度对绿茶(香茶)干燥效能及风味品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(23): 153-158
LIN Zhiyuan, SHI Jiang, TAN Junfeng, et al. Effect of drying temperature on drying efficiency, energy consumption and flavor quality of Xiangcha, a kind of green tea [J]. *Food Science*, 2020, 41(23): 153-158
- [59] 王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. 茶叶挥发性成分中关键呈香成分研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 341-349
WANG Mengqi, ZHU Yin, ZHANG Yue, et al. A review of recent research on key aroma compounds in tea [J]. *Food Science*, 2019, 40(23): 341-349
- [60] 严寒. 福鼎白茶中挥发性内酯类及萜类化合物的对映异构体研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019
YAN Han. Study on the enantiomers of volatile lactones and terpenoids in Fuding white tea [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019
- [61] Siek T J, Albin I A, Sather L A, et al. Comparison of flavor thresholds of aliphatic lactones with those of fatty acids, esters, aldehydes, alcohols, and ketones^{1, 2} [J]. *Journal of Dairy Science*, 1971, 54(1): 1-4
- [62] Yoshinaga K, Obi J, Tago A, et al. Analysis of hydroxy triacylglycerol as a lactone precursor in milk fat using liquid chromatography electrospray ionization tandem mass spectrometry [J]. *Food Chemistry*, 2018, 274: 298-304
- [63] Duru I C, Laine P, Andreevskaya M, et al. Metagenomic and metatranscriptomic analysis of the microbial community in Swiss-type Maasdam cheese during ripening [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2018, 281: 10-22
- [64] Chi X, Shao Y, Pan M, et al. Distinction of volatile flavor profiles in various skim milk products via HS-SPME-GC-MS and e-nose [J]. *European Food Research and Technology*, 2021, 247(6): 1539-1551
- [65] 闫虹, 李洪亮, 钱文涛, 等. 直接 UHT 灭菌对牛乳营养成分、感官和风味的影响[J]. *食品工业*, 2020, 41(5): 329-332
YAN Hong, LI Hongliang, QIAN Wentao, et al. Effect of direct UHT sterilization on nutritional components, sensory and flavor of milk [J]. *The Food Industry*, 2020, 41(5): 329-332
- [66] Drake M A, Miracle R E, McMahont R J. Impact of fat reduction on flavor and flavor chemistry of Cheddar cheeses [J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(11): 5069-5081
- [67] Nakamura S E, Crowell E A, Ough C S, et al. Quantitative analysis of γ -nonalactone in wines and its threshold determination [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 53(4): 1243-1244
- [68] 黄玲. 产区威代尔冰葡萄酒风味特征及非挥发性组分对香气影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018
HUANG Ling. The distinct flavor of regional Vidal icewines and effects of nonvolatile contents on aromas [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018
- [69] Moreno J A, Zea L, Moyano L, et al. Aroma compounds as markers of the changes in sherry wines subjected to biological ageing [J]. *Food Control*, 2005, 16(4): 333-338
- [70] 王露露. 酱香型白酒中呈“盐菜味”异嗅味关键香气化合物

- 解析[D].无锡:江南大学,2020
- WANG Lulu. Characterization of potent odorants causing a "pickle-like" off-odor in soy sauce-aroma type Baijiu [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020
- [71] 马宇.基于风味组学策略研究酱香型白酒关键成分及其呈香呈味特性[D].贵阳:贵州大学,2019
- MA Yu. The key components and flavor characteristics of maotai-flavor liquor were studied based on flavor omics strategy [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019
- [72] Otsuka K I, Zenibayashi Y, Itoh M, et al. Presence and significance of two diastereomers of β -methyl- γ -octalactone in aged distilled liquors [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1974, 38(3): 485-490
- [73] 张晓萌.桃果实成熟过程中香气成分形成及其生理机制研究[D].杭州:浙江大学,2005
- ZHANG Xiaomeng. Physiological studies on aroma volatile formation in peach fruit [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005
- [74] Zhang X M, Jia H J. Changes in aroma volatile compounds and ethylene production during "Hujingmilu" peach (*Prunus persica* L.) fruit development [J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2005, 31(1): 41-46
- [75] Jia H J, Goro O, Hirano A. Studies on the sensory evaluation of juice constituents of peach fruit [J]. Journal of Fruit Science, 2004, 21(1): 5-10
- [76] 张波,韩舜愈,蒋玉梅,等.杏果挥发性风味成分分析[J].食品科学,2008,29(12):559-563
- ZHANG Bo, HAN Shuyu, JIANG Yumei, et al. Analysis of volatile compounds in apricot fruit [J]. Food Science, 2008, 29(12): 559-563
- [77] Xi W P, Zheng H W, Zhang Q Y, et al. Profiling taste and aroma compound metabolism during apricot fruit development and ripening [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2016, 17(7): 998-1019
- [78] Engel K H, Tressl R. Studies on the volatile components of two mango varieties [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1983, 31(4): 796-801
- [79] Yoshinaga K, Tago A, Yoshinaga-kiriake A, et al. Characterization of lactones in Wagyu (Japanese beef) and imported beef by combining solvent extraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 135: 110015
- [80] Watanabe A, Ueda Y, Higuchi M, et al. Analysis of volatile compounds in beef fat by dynamic-headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Science, 2008, 73(5): 420-425
- [81] Matsuishi M, Kume J, Itou Y, et al. Aroma components of Wagyu beef and imported beef [J]. Nihon Chikusan Gakkaiho, 2004, 75(3): 409-415
- [82] Blank I, Sen A, Grosch W. Potent odorants of the roasted powder and brew of Arabica coffee [J]. Zlebensm Unters Forsch, 1992, 195(3): 239-245
- [83] Semmelroch P, Grosch W. Analysis of roasted coffee powders and brews by gas chromatography-olfactometry of headspace samples [J]. LWT - Food Science and Technology, 1995, 28(3): 310-313
- [84] 孙莹,苗榕芯,江连洲.电子鼻结合气相色谱-质谱联用技术分析贮存条件对马铃薯面包挥发性成分的影响[J].食品科学,2019,40(2):222-228
- SUN Ying, MIAO Rongxin, JIANG Lianzhou. Analysis of volatile components of potato bread under different storage conditions by electronic nose combined with HS-SPME-GC-MS [J]. Food Science, 2019, 40(2): 222-228
- [85] 张可欣.酒酿面包面团发酵过程及其面包烘焙特性研究[D].无锡:江南大学,2017
- ZHANG Kexin. Studies on fermentation process and baking properties of bread dough made of fermented glutinous rice [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017
- [86] 王益姝.生香酵母及其面团发酵过程与面包香气特征研究[D].无锡:江南大学,2016
- WANG Yishu. Studies on dough fermented by aroma-producing yeast and aroma characteristics of bread [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016
- [87] 叶美霞,李荣,姜子涛,等.基于超快速气相电子鼻研究不同类型 UHT 牛奶的挥发性风味特征[J/OL].食品科学,1-17 [2021-08-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20210816.1729.119.html>
- YE Meixia, LI Rong, JIANG Zitao, et al. Research on volatile flavor characteristics in different kinds of UHT milk based on ultra fast GC electronic nose [J/OL]. Food Science, 1-17 [2021-08-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20210816.1729.119.html>
- [88] 梁钻好.超高压处理对黄油物理特性及挥发性风味物质的影响[D].广州:华南农业大学,2016
- LIANG Zuanhao. Effect of ultra-high-pressure treatment on physical properties and volatile compounds of butter [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016
- [89] Franitza L, Granvogl M, Schieberle P. Characterization of the key aroma compounds in two commercial Rums by means of

- the sensomics approach [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(3): 637-645
- [90] 贾惠娟,冈本五郎,平野健.桃果实品质形成成分与其风味之间的相关性[J].*果树学报*,2004,21(1):5-10
JIA Huijuan, Okamoto G, Hirano K. Studies on the sensory evaluation of juice constituents of peach fruit [J]. *Journal of Fruit Science*, 2004, 21(1): 5-10
- [91] 魏长宾,刘胜辉,陆新华,等.菠萝果实香气成分多样性研究[J].*热带作物学报*,2016,37(2):418-426
WEI Changbin, LIU Shenghui, LU Xinhua, et al. Aroma volatile compounds diversity analysis of pineapple fruits [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(2): 418-426
- [92] Campbell S M, Sims C A, Bartoshuk L M, et al. Manipulation of sensory characteristics and volatile compounds in strawberry fruit through the use of isolated wavelengths of light [J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(3): 771-780
- [93] Larick D K, Hedrick H B, Bailey M E, et al. Flavor constituents of beef as influenced by forage-and grain-feeding [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 52(2): 245-251
- [94] 孙振春.咖啡香气消褪机制及控制[D].无锡:江南大学,2020
SUN Zhenchun. Coffee aroma staling mechanism and control [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020
- [95] Yoshinaga K, Tago A, Yoshinaga-kiriake A, et al. Effects of heat treatment on lactone content of butter and margarine [J]. *Journal of Oleo Science*, 2019, 68(12): 1295-1301
- [96] Wyatt C J, Pereira R L, Day E A. Lactone precursor in fresh milk fat: isolation and characterization of the precursor1 [J]. *Journal of Dairy Science*, 1967, 50(11): 1760-1763
- [97] Mcsweeney P, Sousa M. Biochemical pathways for the production of flavour compounds in cheeses during ripening: a review [J]. *Le Lait*, 2000, 80(3): 293-324
- [98] Alewijn M, Sliwinski E L, Wouters J. Production of fat-derived (flavour) compounds during the ripening of Gouda cheese [J]. *International Dairy Journal*, 2005, 15(6-9): 733-740
- [99] Esmacelzadeh P, Ehsani M R, Mizani M, et al. Characterization of a traditional ripened cheese, Kurdish Kope: lipolysis, lactate metabolism, the release profile of volatile compounds, and correlations with sensory characteristics [J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86: 3303-3321
- [100] Minghui, Pan, Lingjun, et al. Comparison of sensory and electronic tongue analysis combined with HS-SPME-GC-MS in the evaluation of skim milk processed with different preheating treatments [J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2019, 24(9): 1650-1665
- [101] Khattab A R, Guirguis H A, Tawfik S M, et al. Cheese ripening: a review on modern technologies towards flavor enhancement, process acceleration and improved quality assessment [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2019, 88: 343-360
- [102] Sales A, Paulino B N, Pastore G M, et al. Biogenesis of aroma compounds [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2018, 19: 77-84
- [103] Collins Y F, Mcsweeney P L H, Wilkinson M G. Lipolysis and free fatty acid catabolism in cheese: a review of current knowledge [J]. *International Dairy Journal*, 2003, 13(11): 841-866
- [104] Camara J S, J C, Alves M A, et al. 3-hydroxy-4,5-dimethyl-2(5H)-furanone levels in fortified Madeira wines: relationship to sugar content [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(22): 6765-6769
- [105] Yang Y J, Hu W Y, Xia Y J, et al. Flavor formation in Chinese rice wine (Huangjiu): impacts of the flavor-active microorganisms, raw materials, and fermentation technology [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 580247
- [106] 魏超昆.亚麻籽源肉味美拉德反应MARQUES产物的风味形成机理及安全评价[D].合肥:合肥工业大学,2020
WEI Chaokun. Flavor formation mechanism, and safety evaluation of flaxseed derived meaty Maillard reaction products [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020
- [107] 席万鹏,郁松林,周志钦.桃果实香气物质生物合成研究进展[J].*园艺学报*,2013,40(9):1679-1690
XI Wanpeng, YU Songlin, ZHOU Zhiqin. Advances in aroma compounds biosynthesis of peach fruit [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(9): 1679-1690
- [108] Teranishi R, Buttery R G, Shahidi F. [ACS Symposium Series] Flavor Chemistry [M]. Washington D.C.: American Chemical Society, 1989: 1-6
- [109] 张秋云.基于转录组学杏果实风味,色泽品质形成相关基因挖掘及转录调控网络解析[D].重庆:西南大学,2017
ZHANG Qiuyun. Gene mining and analyzation of transcriptionally regulated network related to apricot flavor and color quality based on transcriptomics [D]. Chongqing: Southwest University, 2017