

奶酪中内酯类物质风味贡献及其生物合成调控进展

陈臣, 刘政, 于海燕, 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: 奶酪中的内酯类物质主要包括 γ -内酯和 δ -内酯两大类, 它们是奶酪关键气味物质之一, 对于奶酪整体风味的形成有着重要作用。本文在查阅相关文献的基础上, 对常见奶酪中内酯类物质的组成、香气贡献以及主要内酯物质的浓度范围进行了系统的综述; 介绍了 GC 外标法、峰面积归一化法、超高效液相色谱-串联质谱法、GC-MS 内标法、选择离子流动管质谱法、稳定同位素稀释分析法六种内酯类物质主要的定量测定方法; 总结了奶酪中内酯类物质的形成机理以及研究者们提出的生物合成调控策略; 并对当前研究中存在的问题以及未来研究方向做了归纳与展望。为全面认知奶酪中内酯类香气化合物及其形成和调控, 开发更适合国人口味原制奶酪, 实现我国奶酪产业转型和升级提供理论参考。

关键词: 奶酪; 内酯; 香气贡献; 定量测定; 合成调控

文章编号: 1673-9078(2020)11-305-312

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.11.0513

Flavor Contribution of Lactones in Cheese and Its Biosynthetic Regulation: a Review

CHEN Chen, LIU Zheng, YU Hai-yan, TIAN Huai-xiang

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

Abstract: The lactones in cheeses mainly include γ -lactones and δ -lactones, which are one kind of the key odorants of cheese and make key contributions to the formation of cheese flavor. In this paper, a systematic review of the composition, flavor contribution and concentration range of major lactones in common cheeses was discussed based on consulting relevant literature. The six main quantitative methods for lactones including GC external standard method, peak area normalization method, ultra performance liquid chromatography-mass/mass spectrometry, GC-MS internal standard method, selective ion flow tube mass spectrometry, stable isotope dilution analysis were introduced. The formation mechanism of lactones and the biosynthetic control strategies proposed by researchers were summarized. The current issues and future research directions were also forecasted. A theoretical basis was provided to fully understand the lactones and their formation and regulation in cheeses. This review will be important for the development of original cheeses which is more suitable for Chinese consumers and the transformation and upgrading of the cheese industry in China.

Key words: cheese; lactones; flavor contribution; quantitative determination; synthesis regulation

引文格式:

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 Hai-yan, 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

奶酪(Cheese)是以牛奶或羊奶为原料, 经浓缩、发酵等工序制成的具有较高营养价值的发酵乳制品^[1]。近年来, 随着下游需求市场的崛起以及国内企业投资布局的增长, 我国奶酪消费呈现快速增长态势, 市场规模不断扩大^[2]。然而, 就横向比较而言, 我国

收稿日期: 2020-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31972197)

作者简介: 陈臣(1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品发酵产香、食品生物技术

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

目前奶酪的人均消费水平还远不及其他国家, 消费人群也主要集中在传统牧区及内地发达城市^[3,4]; 同时, 目前我国奶酪的研究及生产尚处于起步阶段, 市场供给严重依赖进口。因此, 我国的奶酪产业发展潜力巨大、迫在眉睫。

风味是决定消费者购买意愿的重要因素^[5]。调查表明, 我国消费者在选购奶酪时更青睐于清新温和、奶香浓郁的奶酪品种, 而对于硫味、苦味等独特的风味则接受程度较低^[6]。目前在奶酪中已经鉴定出数百种香气化合物, 主要包括脂肪酸、醇、醛、酮、酯、

内酯、吡嗪、含硫化合物、胺等^[7]。其中，内酯类化合物虽然在奶酪中含量通常较低，但却能赋予奶酪以特殊的水果香气^[8]，同时还可调和其他挥发性成分使得整体风味更加柔和，是奶酪风味中关键气味物质之一，因此备受研究者的关注。

通过对奶酪中内酯类香气化合物的研究，有助于阐明这类微量风味物质对于奶酪风味的贡献，解析其形成和调控机制，这对于开发和生产更适合我国消费者口味的奶酪，推动我国原制奶酪产业快速发展具有重要意义。本文在查阅相关文献的基础上综述了奶酪中内酯类物质的风味贡献、定量方法、形成机理以及生物合成调控研究进展，并对研究过程中可能出现的问题、未来发展方向做了展望。

1 奶酪中内酯类物质的组成及其香气贡献

奶酪中的内酯物质主要包括 γ -内酯和 δ -内酯两大类， α -内酯和 β -内酯由于具有高度反应性和不稳定性，在奶酪中不能被检测到^[9]。与此相反， γ -内酯和 δ -内酯分别是具有五元环和六元环的稳定结构^[10]，奶酪中常见的内酯包括 γ -辛内酯、 γ -癸内酯、 γ -十二内酯和 δ -辛内酯、 δ -癸内酯、 δ -十二内酯等。作为奶酪中一类微量风味组分，内酯类物质含量通常不是很高，但由于其阈值相对较低（表1），它们在很多奶酪中均具有较强的风味贡献，通常赋予奶酪以椰子味、桃子味等水果香气和甜味（表2）。

早在1975年，Wong^[24]利用气相色谱结合感官评价对切达奶酪中内酯类物质进行定量研究后发现它们的生成量远高于阈值水平，对于切达奶酪整体风味的

形成具有显著贡献。Curioni^[13]通过气相色谱-嗅闻技术（gas chromatography-olfactometry, GC-O）对切达奶酪中的香气成分进行测定发现主要的内酯物质为 γ -癸内酯、 δ -癸内酯和 δ -十二内酯，通过香气抽提物稀释分析法（aroma extract dilution analysis, AEDA）发现在三种内酯中 γ -癸内酯风味贡献较强，阈值相对较低（FD值为27，另两种则为8和16）。目前，国内关于奶酪中内酯类物质的相关研究较少，北京工商大学王蓓团队^[14]采用溶剂辅助蒸发法（solvent-assisted flavor evaporation, SAFE）和固相微萃取法（solid-phase microextraction, SPME），结合气相色谱-质谱联用技术（gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS）对不同成熟时间切达奶酪中挥发性香气成分进行鉴定分析，发现主要的内酯物质为 δ -癸内酯、 δ -十二内酯以及 δ -壬内酯，其中 δ -癸内酯的含量最高约为15 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。三种内酯均表现出典型的甜奶油香气、椰子味和坚果香，它们在切达奶酪奶香味形成过程中发挥了重要作用。

表1 奶酪中主要内酯物质阈值及其浓度范围

Table 1 Threshold and concentration range of major lactones in

| cheeses | | |
|----------------|---|--|
| 内酯名称 | 阈值/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$ ^[11] | 浓度范围/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$ ^[12-23] |
| γ -辛内酯 | 12 | 2~53 |
| γ -癸内酯 | 1.10 | - |
| γ -十二内酯 | 7 | 5~468 |
| δ -辛内酯 | 200 | 500~1410 |
| δ -癸内酯 | 66 | 11~540 |
| δ -十二内酯 | 53 | 7~1640 |

表2 常见奶酪中的内酯物质及其香气贡献

Table 2 The composition and flavor contribution of lactones in common cheeses

| 奶酪类型 | 奶酪品种 | 主要内酯物质 | 香气贡献 | 主要产地 | 参考文献 |
|-------|--------|--|------------|-----------|---------|
| 硬质奶酪 | 切达奶酪 | γ -癸内酯、 δ -癸内酯、 δ -十二内酯 | 桃子味、椰子味、甜味 | 英国/新西兰 | [12-14] |
| | 格鲁耶尔奶酪 | δ -癸内酯 | 椰子味、甜味 | 瑞士 | [15] |
| 半硬质奶酪 | 高达奶酪 | δ -辛内酯、 δ -癸内酯、 δ -十二内酯 | 椰子味、甜味、杏果味 | 新西兰/荷兰/芬兰 | [16-18] |
| 软质奶酪 | 马苏里拉奶酪 | δ -癸内酯、 δ -十二内酯 | 奶油味、椰子味 | 意大利 | [19] |
| | 卡蒙贝尔奶酪 | γ -癸内酯、 δ -癸内酯、 γ -十二内酯、 δ -十二内酯 | 桃子味、椰子味、甜味 | 法国 | [13,20] |
| | 蓝纹奶酪 | δ -癸内酯、 δ -十二内酯 | 奶油味、椰子味 | 英国/法国/意大利 | [21] |
| 半软质奶酪 | 山羊乳奶酪 | γ -丁内酯、 γ -辛内酯、 δ -癸内酯、 δ -十二内酯 | 椰子味、桃子味 | 法国 | [22] |
| | 米纳斯奶酪 | δ -辛内酯、 δ -癸内酯 | 奶油味、椰子味 | 巴西 | [23] |

除切达奶酪之外，在目前常见的奶酪如高达奶酪、格鲁耶尔奶酪、蓝纹奶酪、卡门贝尔奶酪等中都检测

到了内酯的存在^[25]。王姣^[19]对三类不同工艺制备的马苏里拉奶酪中挥发性风味组分进行鉴定后发现 δ -癸内

酯、 δ -十二内酯的OAV值大于1,它们大多具有奶油味、椰子味等油脂香气; Delgado^[26]研究了西班牙山羊原乳干酪在4个成熟阶段挥发性成分的变化,发现其中主要的内酯物质为能够赋予奶酪椰子味的 δ -癸内酯,这种内酯同时也是卡蒙贝尔和艾蒙塔尔奶酪中的关键香气物质,是奶酪中最常见和最重要的内酯之一。Alewijn^[27]对高达奶酪成熟过程中内酯类物质的研究发现 δ -内酯含量起初快速增长,在20周时达到最高值并一直维持,而 γ -内酯含量增长缓慢且持续时间较长。表明在奶酪成熟过程中内酯类物质一直参与其中,对奶酪整体风味的形成有着至关重要的作用。此外, Nogueira^[23]对米纳斯奶酪中的内酯进行研究后发现 δ -辛内酯和 δ -癸内酯除了能够赋予奶油味、椰子味的特点以外,它们还可以改善其它挥发物成分影响从而使奶酪整体风味更加柔和,如降低游离脂肪酸成分的刺激性气味和尖锐感。

2 内酯类物质的定量测定

伴随着精密仪器以及研究技术的不断更新与进步,关于内酯类物质的定量研究也是一个逐步发展的过程(表3)。在较早的时候, Wong^[24]通过简单的柱萃取,借助气相色谱利用外标法(External standard method)对切达奶酪中的 γ -十二内酯、 δ -癸内酯、 δ -十二内酯和 δ -十四内酯进行了定量研究。这种方法操作简便、定量结果准确,然而由于当时实验条件的限制,一些内酯由于标准品的缺乏而不能进行定量,相对来说具有一定的缺陷。

在内酯类化合物的检测中,高效液相色谱与气相色谱是较为常用的仪器,通常采用峰面积归一化法(Peak area normalization method)来进行复杂样品组分的含量测定。这两种方法的前提是样品中所有组分全部流出色谱柱并在色谱图上都出现色谱峰,对进样要求不高,简便快捷,但结果准确性较差,通常只用于粗略定量。郭文奎^[28]通过归一化法计算了酸奶发酵过程中内酯类化合物及其它挥发性组分的相对含量; Jung^[15]利用这种方法对两种高达奶酪成熟过程中内酯类化合物的含量进行了测定,结果显示内酯类物质在成熟过程中浓度均显著升高,表明该方法可用于奶酪成熟不同阶段内酯类化合物的测定比较。

随着质谱技术的发展,超高效液相色谱-串联质谱法(ultra performance liquid chromatography-mass/mass spectrometry, UPLC-MS/MS)在内酯化合物的检测中也得到了较为广泛的应用。该方法借助外标物进行定量,分析时间短、重复性好、结果准确可靠。但也存在相应的局限性,主要是样品前处理比较繁琐、一些

小分子化合物不能直接检测以及易受残留效应的影响。陈月猛^[29]通过超高效液相色谱-串联质谱法测定了功能饮料中 γ -丁内酯的含量,定性定量结果准确,是一种在侦查和鉴定工作中方便可靠的检测手段;王一涵^[30]利用UPLC-MS/MS技术建立了猪肉中14种大环内酯类药物残留的测定方法,表明该方法适用于动物源性食品中大环内酯类药物的快速筛查和测定。

近年来,气相色谱-质谱联用法(GC-MS)在对挥发性风味物质的检测中得到了广泛应用,研究者们也通常结合内标法(Internal standard method)来进行相应的定量测定。这种方法进样量少、灵敏度高、定量过程快速简便,然而缺点在于定量结果相对而言不是特别精确,因此常被称为内标半定量法。聂庆庆^[31]通过液液萃取及固相萃取,以 L -薄荷醇为内标,通过GC-MS技术对白酒中的8种 γ -内酯进行了定性与定量分析。结果显示该方法对不同香型成品酒及原酒的重现性均较好,可用于白酒中微量成分 γ -内酯的快速分析测定。

选择离子流动管质谱法(selective ion flow tube-mass spectrometry, SIFT-MS)也可以用来进行内酯化合物的检测。该方法结合流动管技术、化学电离和质谱,有选择地使用 H_3O^+ 、 NO^+ 和 O_2^+ 等初始离子,可在几秒之内对挥发性风味物质进行多组分实时在线分析^[31]。该方法通过已知的产物离子对挥发物进行识别和定量,利用反应比速率常数、反应时间以及试剂离子和产物离子的计数率计算顶空挥发性化合物的浓度。样品采集方便,定量结果准确,还可分析一些GC-MS无法分析的风味物质。但该方法对仪器设备要求较高,且高 m/z 离子会发生质量歧视效应影响分析结果的精确性^[32]。Castada^[33]通过这种方法对瑞士奶酪中的挥发性化合物顶空浓度进行了测定,结合与感官属性间的相关性对奶酪风味进行评估,发现 γ -癸内酯与熟乳和双乙酰的风味特性呈正相关。

稳定同位素稀释分析法(stable isotope dilution assays, SIDA)是近年来随着同位素试剂的不断研发而出现的一种新型定量方法。这种方法利用稳定同位素(2H 、 ^{13}C 等)对分析物在一定位置上进行标记,然后使用标记的同位素异构体作为理想的内标物质进行定量分析,由此计算出样品中该分析物含量的方法。该方法重现性好、精确度高,具有高技术含量以及高附加值,目前常用 2H 、 ^{13}C 、 ^{15}N 、 ^{18}O 等稳定同位素进行标记^[34]。由于标记物与分析物表现出几乎相同的物理化学性质,如挥发度、溶解度、沸点、极性等。如果在试验前将标记物添加到样品中并允许足够的平衡时间,则由萃取、蒸馏甚至降解等过程造成的分析物

损失能得到完全的补偿^[35], 定量可以简单地通过监测目标分析物和同位素内标的相应信号来完成。慕尼黑工业大学Peter Schieberle教授^[36]对乳脂中的5种 γ -内酯和4种 δ -内酯分别利用¹³C和²H进行标记, 并结合GC×GC-TOF-MS进行了测定。结果发现热处理后内酯含量显著增加, 乳脂的奶香味以及整体香气得到明显改善, 表明乳脂中的内酯前体具有很高的潜力。研究结果为利用热处理方式来改善乳制品的香气提供了可能, 也为内酯形成的进一步研究奠定了基础。李永波

^[37]通过SIDA法测定啤酒中的芳樟醇, 以H/D交换合成的^{[2}H₂]R/S-芳樟醇作为内标物, 对芳樟醇的两种同分异构体进行了定量。定量结果表明与外标法相比, SIDA法重现性更好, 精确度更高。但该方法目前也存在一定的缺点和局限性, 主要是同位素试剂价格昂贵、获取不易, 且每一种标记物只能用于一种分析物的定量测定。目前国外在这一方面已经形成较为完整的技术和产品链, 但出于技术保密和产品垄断等原因, 该方法目前在国内的应用还相对较少。

表3 内酯类物质不同定量方法的比较

Table 3 Comparison of different methods for quantitative determination of lactones

| 测定方法 | 优点 | 局限性 |
|---------------|---------------------|------------------------------------|
| GC 外标法 | 操作简便、定量准确 | 若分析物相应的标准品缺乏则无法进行定量 |
| 峰面积归一化法 | 简便快捷 | 准确性差, 为粗略定量 |
| 超高效液相色谱-串联质谱法 | 分析时间短、重现性好、结果准确 | 样品前处理繁琐, 小分子化合物难以直接检测, 残留效应影响 |
| GC-MS 内标法 | 进样量少、灵敏度高、快速简便 | 重现性差, 结果不是特别精确 |
| 选择离子流动质谱法 | 样品采集方便、定量快速准确、定量范围广 | 对仪器设备要求高, 高 <i>m/z</i> 离子会发生质量歧视效应 |
| 稳定同位素稀释分析法 | 精确度高、具有高技术含量以及高附加值 | 同位素试剂价格昂贵, 只能一对一定量 |

3 奶酪中内酯类物质的形成机理及合成调控

研究进展

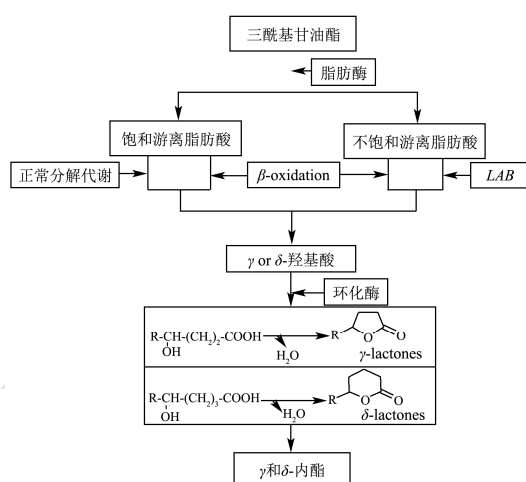


图1 内酯类物质的形成机理

Fig.1 Formation mechanism of lactones

目前的研究表明, 奶酪中的主要内酯物质 γ -内酯和 δ -内酯, 来自三酰基甘油酯中释放的游离脂肪酸^[38]。在脂肪酶的作用下, 通过脂解作用生成游离脂肪酸, 然后在 β -氧化酶系作用下通过 β -氧化过程进行脂肪酸的羟基化从而生成内酯的前体羟基酸 γ -羟基酸或 δ -羟基酸^[39,40]; 对于奶酪中的不饱和游离脂肪酸来说, 内

酯的前体羟基酸也可在乳酸菌的作用下通过微生物途径生成^[41]; 在奶酪成熟过程中饱和游离脂肪酸的正常分解代谢作用也可产生内酯的前体羟基酸^[42]。而后在环化酶的作用下, γ -内酯和 δ -内酯由各自的前体羟基脂肪酸 γ -羟基酸或 δ -羟基酸通过分子内酯化反应脱去一分子水生成^[43]。反应起始于羟基对羟基脂肪酸羧基的亲核攻击, 水在反应过程中同时起催化作用^[44] (图1)。

以 γ -癸内酯为例 (图2), 反应首先是脂解作用生成的游离脂肪酸在一系列 β -氧化酶系 (脂肪酸酰基辅酶 A、4-羟基癸酸辅酶 A 等) 作用下参与 β -氧化进行缩碳生成直接前体物 4-羟基癸酸, 再在 4-羟基癸酸环化酶的催化作用下由 4 位碳上的羟基和首位羧基脱水缩合得到。关于 γ -癸内酯的降解途径, 目前尚没有特别明确的阐明, 主要包括两个方面: 一是通过一种 γ -内酯酶的作用进行开环, 然后通过 β -氧化将开环的产物进行氧化降解; 另一种途径就是内酯的 ω -氧化, 会生成一种 ω -二羧酸^[45,46]。

鉴于内酯类化合物的重要性, 研究者们也提出了一些调控内酯类物质生物合成的策略, 主要包括: ① 添加附属发酵剂。通过将高产特定脂肪酶乳酸菌和工业菌种混合作为附属发酵剂进行奶酪的生产。内酯的前体羟基酸是由游离脂肪酸通过 β -氧化过程进行缩碳生成, 控制链缩短是通过操纵过氧化物酶体酰基辅酶

A 氧化酶 (POX) 的底物特异性来实现的, 短链酰基 CoA 上具有高活性的 POX 基因的缺失改善了蓖麻酸盐中 γ -癸内酯的生成^[47]。②添加合适的前体物。在奶酪成熟过程中内酯类物质生成的主导途径是其前体羧基酸在环化酶的催化作用下进行环化, Young-Suk Kim^[48]发现在发酵糙米样品时, 添加了 4-羟基癸酸的糙米样品中 γ -癸内酯的含量明显高于对照组。③针对氧化还原电位进行调控。不同内酯化合物的酯化也有不同的实现条件, 氧化还原电位是基于该类反应的一个重要控制点。Feron^[49]发现当氧化还原电位降低 Eh7 到中性条件 (Eh7=+30 mV 和+2.50 mV) 时有利于 γ -癸内酯的代谢生成, 而处于氧化条件或还原条件时 γ -癸内酯的产量则会较低, 表明氧化还原电位的调节显著影响了内酯的生成。④改变物理化学条件。张俊杰^[50]、杨树林^[51]在通过生物转化法制备 γ -癸内酯的研究中发现, 不同浓度、温度、pH 等参数条件对最终 γ -癸内酯的产率具有较大影响, 低浓度的 4-羟基癸酸具有向 γ -癸内酯更高的转化效率。此外, 他们还发现根据内酯酶对底物的选择性不同, 可以通过添加结构类似物来与 γ -癸内酯形成竞争性抑制从而减少最终产物的降解。

氧化酶能够只作用长链脂肪酸从而减少 4-羟基癸酸的降解? 这些问题的解决, 可以有效调控前体物的生成从而增加内酯的产量。此外, 在前体羧基酸内酯化形成内酯过程中的关键影响因素尚不是特别清楚, 目前对于环化酶的理化性质研究还相对较少, 想要对其实现可调控也是深度所在。对于不同链长和不同构型的内酯化合物来说, 它们的酯化也有不同的实现条件。找出该类反应的重要控制点, 有利于进一步解析内酯的合成和调控机制, 对于提升奶酪风味具有重要意义。

4 展望

风味一直是奶酪研究的热点和难点之一, 内酯类香气化合物由于其特殊的香气贡献也一直受到人们的关注, 而其中也存在许多问题亟待研究或解决。首先是内酯类化合物对奶酪风味的具体贡献目前尚缺乏系统的研究和认识。包括在各不同奶酪中内酯的具体组成、风味贡献尚不确定, 内酯化合物之间的风味协同作用也不明确。此外在奶酪成熟过程中, 内酯类物质生物合成调控方式也未研究, 即影响内酯合成和有效积累的关键限速步骤。包括上游羧基酸的代谢调控以及前体羧基酸环化过程中环化酶的性质研究、不同链长和构型内酯化合物酯化过程中重要控制点的选择等等。这些问题制约了我们对奶酪中内酯化合物形成及调控机制的认知, 也制约了相应产品的开发和工业化生产。

随着精密仪器与技术的不断发展, 研究手段与方法的不断成熟, 对奶酪中内酯类物质的相关研究也逐渐深入。未来需要在目前的认知基础上进一步认识内酯类物质的香气贡献, 同时期望能够对奶酪成熟过程中内酯的形成机理以及合成调控研究达到更深入透彻的层次, 这有利于全面认识奶酪内酯类香气化合物及其形成和调控, 进一步系统完善奶酪风味研究; 同时也有助于促进我国原制奶酪产业的转型和升级, 对于奶酪产业的快速发展具有重要意义。

参考文献

[1] 蔡琳飞,李键,陈炼红.我国奶酪产品研究现状及分析[J].中国乳品工业,2015,43(7):42-44,48
CAI Lin-fei, LI Jian, CHEN Lian-hong. Research status and analysis of cheese products in China [J]. China Dairy Industry, 2015, 43(7): 42-44, 48
[2] 武爱群.奶酪的营养价值及国内消费市场培育研究[J].食品安全导刊,2018,212(21):166-167
WU Ai-qun. Research on the nutritional value of cheese and the cultivation of domestic consumer market [J]. China Food

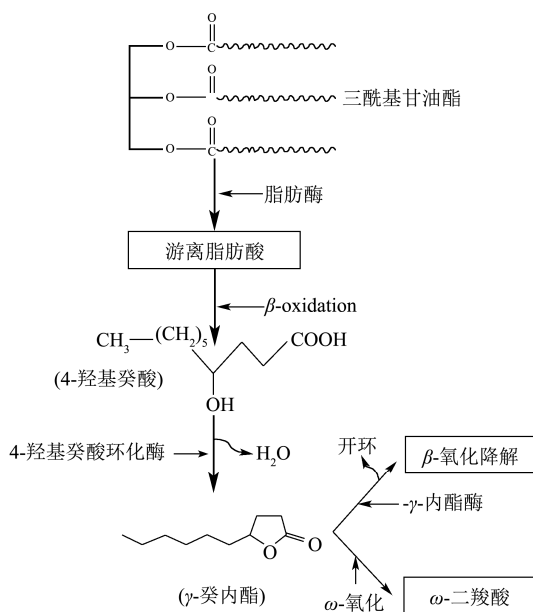


图2 γ -癸内酯的形成及降解途径

Fig.2 Formation and degradation of γ -decalactone

尽管奶酪中成熟过程中内酯的形成机理已经基本明确, 针对其形成过程中的关键限速步骤也进行了很多调控机制研究, 但其中仍存在很多问题未得到解决。首先是上游羧基酸的代谢调控, 即前体物的富集。以 γ -癸内酯为例, 在调控前体羧基酸 4-羟基癸酸的生成时, 在何 pH、温度为多少时能达到最好的生成效果? 在进行 β -氧化过程缩碳时, 选择何种特定酰基辅酶 A

- Safety Magazine, 2018, 212(21): 166-167
- [3] 杨云生. 如何实现奶酪品类国产快消化[J]. 中国乳业, 2018, 202(10): 21-25
YANG Yun-sheng. How to realize the fast digestion of domestic cheese [J]. China Dairy, 2018, 202(10): 21-25
- [4] 陈臣, 周文雅, 袁佳杰, 等. 3-甲基丁醛对奶酪坚果风味的贡献及其生物合成研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 228-233
CHEN Chen, ZHOU Wen-ya, YUAN Jia-jie, et al. Recent progress in biosynthesis of 3-Methylbutanal and its contribution to nutty flavor in cheese [J]. Food Science, 2020, 41(7): 228-233
- [5] Drake M A, Yates M D, Gerard P D. Determination of regional flavor differences in US cheddar cheeses aged for 6 mo or longer [J]. Journal of Food Science, 2008, 73(5): S199-S208.
- [6] 江丽红, 周颖喆, 洪青, 等. 市售陈年切达奶酪风味特征及消费者喜好度研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(23): 275-281
JIANG Li-hong, ZHOU Ying-zhe, HONG Qing, et al. Flavor characteristics and consumer preference for the commercial aged Cheddar cheese [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(23): 275-281
- [7] 马艳丽, 曹雁平, 郑福平, 等. 奶酪的风味组分研究进展[J]. 中国乳品工业, 2013, 41(5): 36-39
MA Yan-li, CAO Yan-ping, ZHENG Fu-ping, et al. Review on the advancement of cheese flavor components [J]. China Dairy Industry, 2013, 41(5): 36-39
- [8] Bovolenta S, Romanzin A, Corazzin M, et al. Volatile compounds and sensory properties of montasio cheese made from the milk of simmental cows grazing on alpine pastures [J]. Journal of Dairy Science, 2014, 97(12): 7373-7385
- [9] Fox P F, Wallace J M. Formation of flavor compounds in cheese [J]. Advances in Applied Microbiology, 1997, 45: 17-86
- [10] Eriksen, S. Flavours of milk and milk products [J]. Mikhwissenschaft, 1976, 31(1): 549-550
- [11] Gemert, L.J.V. Odour Threshold Values in Water in Odour Thresholds. Compilations of Odour Threshold Values in Air, Water and Other Media [M]. The Netherlands: Oliemans Punter & Partners BV, 2011: 207-359
- [12] Drake M A, Miracle R E, McMahon D J. Impact of fat reduction on flavor and flavor chemistry of cheddar cheeses [J]. Journal of Dairy Science, 2010, 93(11): 5069-5081
- [13] Curioni P M G, Bosset J O. Key odorants in various cheese types as determined by gas chromatography-olfactometry [J]. International Dairy Journal, 2002, 12(12): 959-984
- [14] 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/OL]. 食品科学, 1-16[2020-05-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20191112.1529.077.html>
WANG Jiao, XU Ling-yun, ZHANG Jin-hua, et al. Study on the components of volatile aroma in cheddar cheese with different ripening time and its electronic nose were analyzed [J/OL]. Food Science, 1-16[2020-05-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20191112.1529.077.html>
- [15] Rychlik M, Bosset J O. Flavour and off-flavour compounds of Swiss Gruyere cheese, evaluation of potent odorants [J]. International Dairy Journal, 2001, 11(11-12): 895-901
- [16] 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
- [17] Jo Y, Benoist D M, Ameerally A, et al. Sensory and chemical properties of Gouda cheese [J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(3): 1967-1989
- [18] Leuven I V, Caelenberg T V, Dirinck P. Aroma characterisation of Gouda-type cheeses [J]. International Dairy Journal, 2008, 18(8): 790-800
- [19] 王姣, 许凌云, 张晋华, 等. SPME-GC-MS 和 GC-O 鉴定三种不同生产工艺马苏里拉奶酪特征香气物质 [J/OL]. 食品科学, 2020, 41(18): 210-217
WANG Jiao, XU Ling-yun, ZHANG Jin-hua, et al. Identification of characteristic aroma substances of mozzarella cheese by SPME-GC-MS and GC-O techniques [J/OL]. Food Science, 2020, 41(18): 210-217
- [20] Gallois A R, Langlois D. New results in the volatile odorous compounds of French cheeses [J]. Dairy Science and Technology, 1990, 70(2): 481-494
- [21] Jolly R C, Kosikowski F V. Quantification of lactones in ripening pasteurized milk blue cheese containing added microbial lipases [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1975, 23(6): 1175-1176
- [22] M. E, Carunchiawhetstine, Y, et al. Identification and quantification of character aroma components in fresh chevre-style goat cheese [J]. Journal of Food Science, 2003, 68(8): 2441-2447
- [23] Nogueira M C L, Lubachevsky G, Rankin S A. A study of the volatile composition of Minas cheese [J]. LWT-Food Science and Technology, 2005, 38(5): 555-563
- [24] Wong N P, Ellis R, Lacroix D E. Quantitative determination of lactones in cheddar cheese [J]. Journal of Dairy Science,

- 1975, 58(10): 1437-1441
- [25] Thierry A, Collins Y F, M.C, et al. Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology [M]. San Diego: Academic Press, 2017: 423-444.
- [26] Delgado F J, Gonzalez-crespo J, Cava R, et al. Formation of the aroma of a raw goat milk cheese during maturation analysed by SPME-GC-MS [J]. Food Chemistry, 2011, 129(3): 1156-1163
- [27] 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
- [28] 郭文奎. 优质酸奶风味图谱的建立[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012
- GUO Wen-kui. Establishment of high-quality yogurt flavor map [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012
- [29] 陈月猛, 钱振华. 超高效液相色谱-串联质谱法测定“哇哇潮饮”和“哇哇沈”中 γ -羟基丁酸和 γ -丁内酯[J]. 中国药物依赖性杂志, 2019, 28(3): 201-208
- CHEN Yue-meng, QIAN Zhen-hua. Detection of γ -hydroxybutyric acid and γ -butyrolactone in "Making wow drinks" and "Making wow Gui" by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Drug Dependence, 2019, 28(3): 201-208
- [30] 王一涵, 王展华, 陈万勤, 等. 固相萃取/超高效液相色谱-串联质谱法同时测定猪肉中 14 种大环内酯类兽药残留[J]. 分析测试学报, 2019, 38(10): 1247-1253
- WANG Yi-han, WANG Zhan-hua, CHEN Wan-qin, et al. Simultaneous determination of 14 macrolide drugs residues in pork samples by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry with solid phase extraction [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2019, 38(10): 1247-1253
- [31] 聂大庆, 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 Qin-qin, XU Yan, FAN Wen-lai. Quantification of γ -lactones in Baijiu with solid phase extraction (SPE) -gas chromatography mass spectrometry (GC-MS) [J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 38(4): 159-164
- [32] 王天舒. 选择离子流动管质谱及其在痕量气体分析中的应用[J]. 分析化学, 2005, 33(6): 887-893
- WANG Tian-shu. The selected ion flow tube mass spectrometry and its applications to trace gas analysis [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2005, 33(6): 887-893
- [33] Castada H Z, Hanas K, Barringer S A. Swiss cheese flavor variability based on correlations of volatile flavor compounds, descriptive sensory attributes, and consumer preference [J]. Foods, 2019, 8(2): 78
- [34] 杜晓宁, 王伟, 雷雯. 稳定性同位素标记试剂的研发及应用展望[J]. 化学试剂, 2015, 37(9): 769-775
- DU Xiao-ning, WANG Wei, LEI Wen. The prospect application and development of stable isotope labeling reagent [J]. Chemical Reagents, 2015, 37(9): 769-775
- [35] Schieberle P, Molyneux R J. Quantitation of sensory-active and bioactive constituents of food: A journal of agricultural and food chemistry perspective [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(10): 2404-2408
- [36] Schütt J, Schieberle P. Quantitation of nine lactones in dairy cream by stable isotope dilution assays based on novel syntheses of carbon-13-labeled γ -lactones and deuterium-labeled δ -lactones in combination with comprehensive two-dimensional gas chromatography with time-of-flight mass spectrometry [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(48): 10534-10541
- [37] 李永波, 张荣超. 采用固相微萃取 (SPME) 和稳定同位素稀释分析 (SIDA) 测定啤酒中的 R-芳樟醇和 S-芳樟醇[J]. 啤酒科技, 2006, 2: 44-48, 54
- LI Yong-bo, ZHANG Rong-chao. Determination of R-linalool and S-linalool in beer by solid phase microextraction (SPME) and stable isotope dilution analysis (SIDA) [J]. Beer Science and Technology, 2006, 2: 44-48, 54
- [38] 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
- [39] Mcsweeney P L H, Sousa M J. Biochemical pathways for the production of flavour compounds in cheeses during ripening: A review [J]. Dairy Science and Technology, 2000, 80(3): 293-324
- [40] Sales A, Paulino B N, Pastore G M, et al. Biogenesis of aroma compounds [J]. Current Opinion in Food Science, 2018, 19: 77-84
- [41] 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
- [42] 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
- [43] 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
- [44] 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*, 2019, 274: 298-304
- [45] 王梦泽. 酵母 MF-Y11 转化蓖麻油酸制备 γ -癸内酯的工艺研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2018
WANG Meng-ze. Study on the preparation of γ -decalactone by conversion of ricinoleic acid by yeast MF-Y11 [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2018
- [46] Braga A, Belo I. Biotechnological production of γ -decalactone, a peach like aroma, by *Yarrowia lipolytica* [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2016, 32(10): 169
- [47] Marella E R, Dahlin J, Dam M I, et al. A single-host fermentation process for the production of flavor lactones from non-hydroxylated fatty acids [J]. *Metabolic Engineering*, 2019, 9
- [48] Lee S M, Lim H J, Chang J W, et al. Investigation on the formations of volatile compounds, fatty acids, and γ -lactones in white and brown rice during fermentation [J]. *Food Chemistry*, 2018, 269: 347-354
- [49] Feron G, Mauvais G, Lherminier J, et al. Metabolism of fatty acid in yeast: addition of reducing agents to the reaction medium influences β -oxidation activities, γ -decalactone production, and cell ultrastructure in *Sporidiobolus ruinenii* cultivated on ricinoleic acid methyl ester [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2007, 53(6): 738-749
- [50] 张俊杰. 初探酵母 MF-Y11 转化 γ -癸内酯的环化机制[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2019
ZHANG Jun-jie. A preliminary study on the cyclization mechanism of yeast MF-Y11 to transform γ -decalactone [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2019
- [51] 杨树林. 酵母转化蓖麻油酸制备天然香料 γ -癸内酯的研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2016
YANG Shu-lin. Study on the biotransformation of natural γ -decalactone by yeast from ricinoleic acid [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2016

(上接第 272 页)

- [34] 李铁志, 王明, 雷激. 阿坝州半野血藏猪肉挥发性风味物质的研究[J]. *食品科技*, 2015, 40(10): 124-130
LI Tie-zhi, WANG Ming, LEI Ji. Study on volatile flavor compounds of pork collected from Banye blood in Aba prefecture [J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40 (10): 124-130
- [35] SONG Shi-qing, TANG Qi, FAN Li, et al. Identification of pork flavour precursors from enzyme-treated lard using Maillard model system assessed by GC-MS and partial least squares regression [J]. *Meat Science*, 2017, 124: 15-24
- [36] 曾画艳, 黄业传, 罗兰. 清炖与红烧猪肉挥发性风味成分的 GC-MS 比较[J]. *肉类工业*, 2011, 10: 36-40
ZENG Qiu-yan, HUANG Ye-chuan, LUO Lan. GC-MS comparison of volatile flavor components between stewed pork and braised pork [J]. *Meat Industry*, 2011, 10: 36-15
- [37] 王瑞花, 姜万舟, 汪倩, 等. 烹制方法对猪肉脂质氧化和挥发性风味物质的作用研究[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(1): 175-182
WANG Rui-hua, JIANG Wan-zhou, WANG Qian, et al. Study on the effect of cooking methods on lipid oxidation and volatile flavor compounds of pork [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(1): 175-182
- [38] Biller E, Boselli E, Obiedzinski M, et al. The profile of volatile compounds in the outer and inner parts of broiled pork neck is strongly influenced by the acetic-acid marination conditions [J]. *Meat Science*, 2016, 121: 292-301