牛乳中异味的产生机理与系统性管控策略研究与应用

陈绮萍，吴炜俊*，李颂群，范存斐，吴泽鹏，孙克龙，张金玉，高方阳，刘兰凤，黄　海，张婉莹

广州风行乳业股份有限公司，广东广州 510610

摘　要：牛乳是营养丰富的天然饮品，其风味直接影响消费者接受度与产品市场价值。从牧场到餐桌的全产业链中，牛乳易受多种因素影响产生不良异味，导致严重降低产品品质，同时阻碍乳制品行业高质量发展。本文系统分析牛乳异味的主要类型、关键影响因素及生物化学机理，并在此基础上，进一步探讨牧场端系统管控方法，涵盖奶牛健康管理、饲料营养搭配、挤奶卫生保障、环境条件控制等方面，提出精准可行的技术方案。同时，结合“优质乳工程”核心思路，阐述牛乳风味品质从“安全”向“优质”的升级路径，为乳品行业提供理论参考与实践指引，助力优质乳风味品质提升。

关键词：优质乳；异味；产生机理；管控方法；升级路径

文章编号：1671–4393（2025）11–0092–11　　DOI:10.12377/1671–4393.25.11.11

0 引言

牛乳在全球范围内被公认为优质蛋白质、钙、维生素及矿物质的重要膳食来源，在各国居民的营养健康保障中发挥着不可替代的作用。随着社会经济的不断发展和消费者健康理念的逐步增强，“优质乳”已成为乳制品行业发展过程中的核心方向。

作者简介：陈绮萍（1992–），女，广东广州人，本科，助理工程师，研究方向为食品质量安全；
李颂群（1977–），女，广东梅州人，本科，工程师，研究方向为乳品质量管控；
范存斐（1986–），女，山西大同人，硕士，研究方向为乳品检测分析；
吴泽鹏（1991–），男，广东揭阳人，本科，助理工程师，研究方向为食品质量安全；
孙克龙（1983–），男，黑龙江肇东人，本科，研究方向为食品质量安全；
张金玉（1980–），男，黑龙江安达人，大专，研究方向为乳品质量管控；
高方阳（2000–），女，海南保亭人，黎族，本科，研究方向为乳品检测分析；
刘兰凤（1997–），女，广东梅州人，大专，研究方向为乳品检测分析；
黄　海（2000–），男，江西赣州人，本科，研究方向为乳品质量管控；
张婉莹（1992–），女，广东云浮人，本科，研究方向为食品质量安全。
*通信作者：吴炜俊（1995–），男，广东江门人，硕士，助理工程师，研究方向为食品加工与安全。

中国乳业线上阅读

优质乳已不再局限于满足基础营养成分标准和卫生指标的基本要求，其在风味、口感、新鲜度等感官品质方面亦呈现出更为严格的标准[1]。牛乳本身具备清甜、醇厚且带有淡淡乳香的天然风味，这种“本真”的风味表现，正是其高品质属性的直接展现。然而，牛乳作为一种化学成复杂且生物活性较强的体系，对外界环境变化具有高度敏感性。在原料乳的生产、加工、储存过程中任一个环节出现疏忽，均可能导致牛乳产生不良风味，即通常所说的“异味”[2]。

牛乳异味的出现是乳品产业链中最常见也是最棘手的质量问题之一[3]。该问题不仅直接导致消费者的不良体验，损害企业品牌形象和经济效益；更为关键的是，异味常作为牛乳品质劣变的信号，可能伴随着营养成分破坏、有害物质生成或微生物超标[4]。因此，深入理解牛乳异味的产生根源，并建立一套从源头到终端的系统性管控体系，是当前乳品行业面临的重大挑战，也是实现优质乳产业升级、迈向高质量发展的必然要求。

近年来，中国乳品行业在积极推动“优质乳工程”，这一工程的核心理念是在保障安全的基础上，最大程度保留生乳中的天然活性营养物质和纯正风味[5]。在此背景下，对牛乳异味的研究和管控，其重要性已超越质量控制的范畴，直接关系到“优质乳”战略能否顺利实施的关键环节。

综上所述，牛乳的风味品质是衡量其质量的核心指标之一，而异味的存在会直接影响消费者的接受度和乳品的市场价值。本文系统综述了牛乳中主要异味（如微生物味、氧化味、酸败味、饲料味等）的类型、关键致味化合物及其复杂的形成机制，深入探讨包括感官评价和现代仪器分析在内的异味检测技术体系。在此基础上，重点聚焦于牧场端的综合管控策略，涵盖奶牛健康与饲养管理、挤奶过程与设备卫生、牛乳快速冷却与储存以及牧场环境控制等多个维度，并结合最新的行业标准和前沿研究进展提出系统性的预防与控制方案，以期为生产优质乳、提升风味品质提供理论参考和实践指导。

1 牛乳主要异味类型及产生机制

牛乳的异味谱系十分复杂，其产生机制涉及微生物代谢、酶促反应、化学氧化以及外源物迁移等多种途径。深入理解每一种异味的成因，是制定有效管控措施的前提[4]。

1.1 微生物源性异味

生乳是微生物生长的理想培养基，微生物是导致生乳品质劣变和异味产生的最主要因素。尽管严格的卫生措施和低温的贮藏环境能抑制多数微生物的生长，但部分嗜冷菌，如假单胞菌属、不动杆菌属等，仍能在4~7 ℃的冷藏条件下缓慢生长并分泌各种胞外酶，主要是脂肪酶和蛋白酶，这些酶是微生物源异味的关键因素[6]。

1.1.1 酸败味与腐败味

酸败味与腐败味是最常见的微生物异味。当牛乳冷却不及时或储存时间过长时，乳酸菌等微生物会发酵乳糖产生乳酸，导致pH值下降，出现酸味[7]。尤其是以假单胞菌属为代表的革兰氏阴性嗜冷菌，能够分泌耐热的蛋白酶和脂肪酶，这些酶可在巴氏杀菌甚至超高温瞬时杀菌后仍保持部分活性，进而持续降解蛋白质和脂肪。蛋白质被降解为多肽和氨基酸，并进一步代谢为氨、硫化氢、吲哚、粪臭素等散发腐败味的物质，脂肪则被分解为游离脂肪酸（FFA），其中短链脂肪酸会导致酸败哈喇味[8]。

1.1.2 苦味

微生物蛋白酶能降解牛乳中的主要蛋白质——酪蛋白，产生一系列大小不一的肽段[9]。其中，一些疏水性较强的短肽会呈现出明显的苦味，进一步降解还会产生氨、硫化氢等物质，导致腐败味的出现[10]。如荧光假单胞菌是乳品中常见的腐败菌，其产生的蛋白酶热稳定性极高，即使经巴氏杀菌甚至超高温瞬时灭菌处理，仍可能保持部分活性，并在产品货架期内持续作用，导致产品出现苦味和凝胶化现象[11]。

中国乳业杂志阅读

1.1.3 麦芽味/醇味

除酶解产物外，微生物自身的代谢活动也会产生各种特征性异味物质。如某些菌株能将氨基酸转化为具有特殊气味的醇、醛、酮类，其中3-甲基丁醛是导致典型麦芽味的关键化合物[12]。此外，某些酵母菌和霉菌的污染，也可能使牛乳产生类似水果发酵的醇味或霉味[12]。而一些乳酸菌在特定条件下也会产生不良风味，如过量的双乙酰会引起黄油味[13]。因此，控制生乳中的微生物总数和菌群结构至关重要。

1.2 酶促源性异味

除微生物分泌的酶，牛乳自身也含有多种内源酶，其中脂蛋白脂肪酶是导致非微生物性酸败味的主要元凶[14]。牛乳中的脂肪以脂肪球的形式存在，且牛乳中含有较高水平的内源性脂肪酶，即脂蛋白脂肪酶。与牛乳中多数酶相似，脂蛋白脂肪酶源于牛体的血液并转移至乳汁。通常牛乳中，该酶主要与酪蛋白胶束结合，而其底物甘油三酯则受乳脂肪球膜的保护[15]。然而，任何破坏乳脂球膜完整性的物理操作，如剧烈搅拌、过度泵送、管道中混入空气、温度剧烈波动（冷热交替）等，都会导致脂蛋白脂肪酶与暴露的甘油三酯接触，迅速催化水解反应，释放出FFAs[14]。其中，丁酸、己酸、辛酸等短链FFAs具有极低的感官阈值和强烈的刺激性气味，是酸败哈喇味的核心来源[16]。此外，奶牛患有乳房炎或处于泌乳末期时，其乳汁中脂蛋白脂肪酶的活性和乳脂球膜的通透性都会增加，自发性脂肪水解的风险显著升高[17]。

1.3 化学与物理源性异味

非酶促化学反应，尤其是不饱和脂肪酸的氧化，是另一大类异味的来源，这类异味在经过热处理和长期储存的乳品中尤为突出。

1.3.1 氧化味

牛乳中的多不饱和脂肪酸（如亚油酸、亚麻酸）易在氧气、光照、金属离子（尤其是铜和铁）的催化下发生自由基链式反应，即自动氧化[18]。这一过程产生一系列挥发性醛、酮、醇类化合物，如正己醛、正戊醛和2，4-癸二烯醛等是典型的氧化味物质，它们共同导致了纸板味、金属味或油哈味[19]。饲料中补充富含不饱和脂肪酸的油脂（如鱼油、亚麻籽）以优化牛乳脂肪酸组成时，若不相应增加维生素E等抗氧化剂的供给，会显著增加牛乳的氧化风险[20]。

1.3.2 加热味

热处理是保障乳品安全的必要工序，但也会引起风味变化。巴氏杀菌，特别是超高温瞬时杀菌，会使乳清蛋白（主要是β-乳球蛋白）发生热变性，暴露出其内部的巯基，进而产生硫化氢、二甲基硫、甲硫醇等含硫化合物，形成蒸煮味或硫味[21，22]。这种味道在牛乳新鲜时或可被某些消费者接受，但随着储存时间的延长，会转变为难以接受的陈腐硫味。

1.3.3 光照味

光照则是乳品在零售环节货架期内风味劣变的重要诱因。牛乳中的核黄素（维生素B2）是一种高效光敏剂，在光照（尤其是日光或荧光灯）下被激活，继而催化甲硫氨酸（蛋氨酸）降解为甲硫醛；甲硫醛具有极低的感官阈值，会带来强烈的日晒味，类似于煮过头的卷心菜或土豆的味道[23]。同时，光照亦可加速脂肪氧化，即使在无菌条件下，缓慢的化学变化仍持续进行。残留的蛋白酶和脂肪酶可能继续发挥作用，两种机制协同作用，显著加剧牛乳风味的劣变[24，25]。

1.4 饲料与环境源性异味

饲料与环境源性异味属于外源性污染，致味物质通过奶牛的消化系统或呼吸系统进入血液，最终迁移至乳汁中。

1.4.1 草腥味/青贮味

饲喂劣质或未经充分发酵的青贮饲料是牛乳中青贮味的主要来源。如果青贮发酵过程中，产生的挥发性脂肪酸、醇类、酯类等物质含量过高，会直

中国乳业杂志上网读

接转移至牛乳中[26]。同样，奶牛采食了某些特殊气味的植物，如野蒜、洋葱、艾草等，其特征性含硫化合物或萜烯类物质也能在挤奶后数小时内出现在乳汁中，形成蒜味或草药味[27, 28]。

1.4.2 异物污染味

牛乳作为一种优良的异味吸收剂，牧场环境中的挥发性化学物质，如消毒剂（可产生氯味、碘味）、油漆、燃料、清洁剂等，可能通过空气被牛乳吸收，或因设备清洗不彻底而直接混入牛乳中[29]。若生乳吸收消毒剂或工业污染物中的2-碘-4-甲基苯酚，即使在极低浓度下也会导致强烈的药味或化学品味，显著降低产品品质[30]。此外，牛舍内如果氨气浓度过高，也可能导致牛乳带有牛骚味或畜棚味[31]。

2 牧场端异味的系统性管控策略

防止异味形成的最经济有效的途径是在于源头控制，即牧场环节。作为牛乳生产的源头，牧场是决定其最终风味品质的最关键环节。因此，需要构建一套基于风险分析和关键控制点（HACCP）理念的管理体系，实施系统性的异味管控，将牧场视为一个整体，对牛乳生产链中各环节实行精细化管理，从而有效保障原料乳的风味质量[32]。

2.1 奶牛健康与遗传选育

健康的奶牛是生产优质乳的前提。

2.1.1 乳房炎防治

奶牛临床型和亚临床型乳房炎都会导致牛乳中体细胞数急剧升高，使乳脂肪球膜的结构和组成发生改变。研究发现，与健康奶牛乳汁相比，患乳房炎奶牛乳汁的乳脂肪球膜中磷脂含量降低，与膜损伤相关的黄嘌呤氧化酶活性降高，且乳脂肪球表面粗糙度和zeta电位显著增高，表明其膜的稳定性下降，由此会显著促进脂肪的水解和氧化，产生酸败味和氧化味[33]。因此，严格监控和防治乳房炎是牛乳风味控制的基础。

2.1.2 酮病管理

酮病是常见的高产奶牛代谢病，患病牛血液和乳汁中酮体（如丙酮、β-羟丁酸）浓度升高，会给牛乳带来一种不悦的、类似于化学溶剂的酮味[34]。优化围产期能量平衡是预防酮病的有效途径。能量平衡调控需贯穿妊娠后期（产前21天）至泌乳初期（产后21天）的过渡阶段，具体措施包括：限制产前过量能量摄入以预防肥胖与肝脂沉积，提高产后营养物质利用率以改善能量负平衡状态，以及通过代谢通路调控抑制酮体生成。

2.1.3 遗传选育

研究表明，某些风味性状具备可遗传性特征。例如，不同奶牛个体对饲料成分的代谢转化效率存在差异，导致其乳中风味物质的组成及含量有所差异[35]。未来，利用基因组选择技术，选育对异味具备天然抗性或能产生更多愉悦风味物质的牛群，将成为一项具有重要应用前景的研究方向[36]。

2.2 饲料与营养精准调控

饲料组成对牛乳风味特征具有决定性影响，因此饲料管理是牛乳风味控制较为直接且有效的技术途径。

2.2.1 饲料原料选择与质量控制

在饲料原料选择与质量控制中，需严禁使用发霉、变质的饲料。对于已知会产生异味的饲料（如葱、蒜、鱼粉等），应完全避免或严格限制饲喂量，并确保在挤奶前足够长的时间（通常为4~6 h）内停止饲喂，给予奶牛充分的代谢时间[37]。青贮、苜蓿等粗饲料的收割、制作和储存过程必须标准化，确保其发酵品质和卫生状况。

2.2.2 营养素平衡与抗氧化剂补充

在营养素平衡与抗氧化剂补充中，需注意追求有益脂肪酸（如Omega-3）的同时，必须考虑其对氧化稳定性的影响。精准调控日粮中的饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸比例，是平衡牛乳营养与风味的关键[38]。通过在日粮中添加足量维生素E和硒，可有效提高牛乳的抗氧化能力，抑制自由基的积累，保护细胞免受损害，从而有效预防自发性氧化异味的

中国乳业线上阅读

产生[39]。

2.2.3 全混合日粮管理

在全混合日粮（TMR）管理中，需确保TMR搅拌均匀，以避免奶牛挑食，从而保障奶牛个体营养摄入的均衡性。同时，需严格执行日粮日清，避免TMR在饲槽中二次发酵变质，产生异味[40]。

2.3 挤奶与储存过程的卫生管理

挤奶和生乳储存是微生物污染和物理化学变化的高风险环节。

2.3.1 挤奶设备与流程标准化

挤奶管道、奶罐等所有与牛乳接触的表面必须严格按照“预冲洗–碱洗–酸洗–后冲洗–消毒”的标准化程序进行清洁消毒，并确保清洁剂和消毒剂无残留[41]，严格执行标准操作程序是实现有效清洁与消毒得关键。挤奶前要对乳头进行药浴并擦干，废弃头三把奶，以降低初始菌落数[42]。挤奶过程中，要避免过度挤奶和真空波动，此类操作会导致乳头组织损伤，增加乳房炎患病风险，并可能使空气过度混入牛乳，加速乳脂肪氧化[43]。

2.3.2 生乳的快速冷却与低温储存

依据《NY/T 4053—2021 生牛乳质量安全生产控制技术规范》，生乳挤出后需在2 h内通过板式换热器等设备迅速降温至0~4 ℃，且24 h内奶温升高不宜超过2 ℃，并在4 ℃以下储存[44]。这是抑制嗜冷菌生长、延缓牛乳中各种生化反应、保全牛乳天然风味的关键步骤[45]。

2.3.3 储奶罐管理

储奶罐的管理需确保制冷和搅拌系统正常工作。搅拌过程应保持温和且均匀，避免局部结冰或过度搅动。生乳在牧场的储存时间不宜超过48 h，以降低微生物增殖和酶促反应累积的风险[46]。

2.4 牧场环境控制

清洁、卫生的牧场环境不仅关乎动物福利，也直接影响牛乳风味。在空气质量管理方面，保持牛舍通风良好，并及时清理粪污，有助于显著降低空气中氨气、对甲酚、粪臭素等异味物质的浓度，从而降低其通过呼吸系统进入奶牛体内的可能性[29, 31]。在饮水与饲槽清洁方面，应确保奶牛的饮用水水质洁净，并定期清理水槽和饲槽，防止藻类、细菌滋生和饲料残渣腐败，上述因素均为潜在的异味来源[47]。在分区管理方面，需将饲料储存区、病牛隔离区与泌乳牛生活区分开，避免交叉污染。

3 异味检测技术的发展与应用

为实现对牛乳异味的有效管控，建立精准且快速的检测技术是必不可少的技术支撑条件。

3.1 感官评价

经过专业团队进行感官评价，迄今仍是评价牛乳风味的标准化方法[48]。专业评价人员能够清晰描述出异味的具体类型和实际强度，提供最直接的感官体验信息。但仍需注意，这种评价方式存在明显局限——评价结果受主观因素影响较大，开展评价的成本相对较高且无法在大规模场景中推广应用。

3.2 气相色谱 – 质谱联用技术（GC–MS）

在挥发性风味化合物的研究与检测中，GC–MS技术是当前最为核心的仪器分析手段[49]。利用顶空固相微萃取等前处理方法，将样品里的挥发性物质进行富集，之后再借助GC–MS对这些物质展开分离与鉴定操作。通过该流程，能对数百种风味物质进行定性与定量分析，进而探究异味背后的化学本质。

3.3 气相色谱 – 嗅闻技术

气相色谱–嗅闻技术通过分流处理气相色谱产生的流出物，使其中一路流向质谱检测器，另一路输送至专门的嗅闻口，由专业品评员通过嗅闻来感知。凭借该设计，这项技术能直接辨别出对牛乳整体风味起到实际影响的“关键香气活性化合物”[50]。而这恰好解决了GC–MS技术的一个短

中国乳业线上阅读

板——无法区分出真正带有味道的物质。

3.4 电子鼻

电子鼻设备是一种模拟生物嗅觉系统的传感器阵列装置，能快速捕捉样品中挥发性物质的“指纹图谱”，并借助模式识别算法与数据库进行比对分析，完成对不同异味类型的快速辨别和初步判定[51]。电子鼻有检测速度快、不会对样品造成损伤、便于携带的优势，这些特性使其尤其适用于在牧场或者收奶站开展现场快速筛查工作。

3.5 新兴技术应用与未来发展方向

随着分析化学领域和数据科学领域的持续进步，全二维气相色谱-飞行时间质谱技术（GC×GC-TOFMS）展现出卓越的分离能力和检测灵敏度，显著超越传统技术的分析能力。该技术凭借其优势它能够对更为复杂的风味物质体系进行解析[19]。如果将该技术与代谢组学的研究方法相结合，对牛乳中所有小分子代谢物的变化情况展开系统性分析，则有望从更宏观的视角出发，揭示风味形成与变化的内在规律[2]。

4 基于“优质乳工程”的牛乳风味品质优化路径思考

“优质乳工程”的推进实施标志着中国乳业正经历从追求数量与安全向追求质量与营养的战略转型[52]。在这一转型过程中，牛乳的风味品质不仅是衡量产品质量的核心指标，更是连接生产端科学管控与消费端感官体验的关键桥梁。“优质乳工程”对牛乳风味提出了远超无异味的基础要求，其核心是追求一种积极的、卓越的感官体验。这意味着需要最大程度地保留生乳中由乳脂肪、乳蛋白等天然组分所赋予的醇厚感与清甜感，同时呈现出清新、纯净的乳香。

传统的质量管控模式多为“事后追溯”，即在检测到异味后，再反向查找问题环节，该方式滞后且成本高昂，基于优质乳的理念则需建立一套基于风险评估的“事前预防”体系。这就需要将模糊的感官描述转化为精确的科学数据，将经验判断升级为模型预测，从而在异味形成之前进行精准干预。

4.1 “优质风味”量化评价标准探索

要实现对风味的精准管控，首先必须建立一套科学、客观的量化评价体系。这套评价体系应结合传统感官品评与现代仪器分析，用数据定义各种类型的风味。

4.1.1 关键化学指标：FFA阈值探讨

FFA是评价牛乳新鲜度和脂肪水解程度的关键指标，其含量过高是产生哈喇味的主要原因[53]。尽管我国现行生乳国家标准尚未针对“优质风味”FFA含量设定具体限量，但国际相关研究和实践为该指标的标准化提供了重要参考依据。国际乳业联合会（IDF）建议，当FFA水平超过1.5~2.0 mEq/100g脂肪时，产品将出现不可接受的哈喇味[54]。Mannion等[55]研究发现，当FFA超过1.5 mmol/L时，其导致的变质风味将不被消费者接受。以上研究结果数值可作为制定优质乳企内部控制标准的初步参考依据。例如，企业可设定一个远低于1.5 mEq/100 g脂肪的内部预警线（如0.7~1.0 mEq/100g脂肪），一旦生乳FFA含量触及该线，即启动对上游环节（如挤奶设备、冷却系统）的核查与干预。

4.1.2 核心风味物质：挥发性化合物指征作用

牛乳的风味由数百种挥发性化合物共同构成，其中一些标志性物质的浓度变化可作为表征其风味品质和新鲜度的重要指标。

（1）风味标志物

己醛作为正面风味标志物，通常与青草香和新鲜感有关，其在全脂牛乳中的浓度高于脱脂牛乳，是体现新鲜风味的重要化合物之一[56]。脂肪氧化是导致牛乳风味劣变的主要途径之一，会产生一系列不良风味物质。这些负面风味标志物，如庚醛和壬醛在加热牛乳中是重要风味活性物物质，当其浓度过高时，可能呈现出油腻、陈腐等不悦气味[57]。

中国乳业杂志网络版

（2）标准现状与未来方向

与FFA类似，目前我国国家标准尚未针对生乳中的己醛、庚醛等特定“优质风味”挥发性化合物含量设定具体限量，反映出当前标准体系与产业升级需求之间尚存在一定差距。未来，行业协会与龙头企业应牵头开展研究，建立基于中国消费者偏好和本土奶源特性的挥发性风味化合物数据库，并逐步推动形成团体标准乃至行业标准，为风味评价提供更精细的依据。例如，通过大量样本分析，确定优质巴氏杀菌乳中己醛浓度应不低于某一水平，而庚醛浓度应不高于某一水平，并将其纳入企业采购和出厂的内控标准。

4.2 技术驱动的风味主动预防与智能管控

明确量化评价标准后，亟需解决的问题在于如何利用先进技术对生产全过程进行高效、实时的监测与管控，从“被动应对”向“主动预防”转变。

4.2.1 电子鼻技术：从牧场到餐桌的实时风味监测系统

电子鼻作为一种模拟生物嗅觉系统的传感器阵列装置，具有快速、无损、成本较低的优点，在牛乳风味实时监控中展现出巨大潜力[58]。国际上已有成熟的商业化电子鼻系统被应用于乳品行业，如德国AIRSENSE公司的PEN系列电子鼻已被伊利集团、蒙牛集团等验证，用于检测掺假牛乳、监测牛乳的气味变化、检测潜在变质和奶源验证[59，60]。

（1）牧场端快速筛查：在原料乳收购环节，使用便携式电子鼻对每批次生乳进行快速检测。通过与“优质风味标准指纹图谱”进行比对，可在数分钟内识别存在潜在异味风险（如早期脂肪氧化、微生物污染）的奶源，并依据检测结果采取拒收或降级处理，有效防止问题奶源进入生产线[60]。

（2）生产过程监控：在加工车间的关键控制点（如巴氏杀菌前后、储罐中）部署在线电子鼻，实时监测风味轮廓的变化，确保加工过程不会引入不良风味物质，并保证批次间风味的一致性。

（3）货架期预测：通过分析产品在储存期间挥发性物质“指纹图谱”的动态变化规律，建立模型预测产品的感官货架期，为优化物流和销售策略提供数据支持[61]。

4.2.2 机器学习与数据融合：构建智能预警模型

电子鼻产生的是高维度的复杂数据，必须与强大的数据分析算法相结合才能发挥其最大效用。机器学习为此提供了核心技术支持。研究表明，支持向量机（SVM）、随机森林（RF）、梯度提升决策树（GBDT）、神经网络（NN）等多种机器学习算法被广泛用于处理电子鼻数据，以实现对牛乳来源、新鲜度及异味的精准分类和预测[62，63]。未来，可开发基于电子鼻数据的快速预警模型，输入电子鼻实时采集的挥发性物质“指纹图谱”数据，通过预先训练好的机器学习算法（如深度神经网络），实时输出风味品质评分或异味风险等级。当风险等级超过阈值时，系统自动触发警报，提示管理人员采取干预措施。如当模型预测到某批次生乳的氧化异味风险概率超过85%时，系统可建议工厂调整加工参数，或将该批次牛乳用于生产对风味要求不高的发酵乳制品。

4.3 构建“饲料－牛乳风味”大数据平台

控制牛乳异味是一个系统工程，需要产业链上下游的协同管理。要实现这种协同，核心在于打破数据孤岛，建立一个贯穿“从草到杯”全流程的风味大数据平台。

系统收集不同饲料配方（如青贮种类、精料组成、微量元素添加等）和不同牛群生理状态（胎次、泌乳阶段）相关数据，并与通过GC-MS等精密仪器分析所得的牛乳关键风味化合物含量和感官评分数据进行关联分析，由此建立起庞大的“饲料成分-牛乳风味物质”关联基础数据库[64]。基于基础数据库，利用大数据分析和机器学习算法，建立预测模型，以实现饲料优化及精准饲喂。同时，将牧场端的风味预测数据，与运输环节的温度、时间数据，加工环节的工艺参数数据以及销售终端的消费者感官反馈数据进行整合，实现智能排产和风险溯源。

在“优质乳工程”的指引下，牛乳风味品质的

中国乳业杂志网络版

优化正由经验导向型工艺向精准化科学范式转变。其核心实施路径在于构建以量化标准为基础、智能监测为手段、数据驱动为核心的全产业链协同管控体系。

5 展望

牛乳异味是由多种因素驱动、涉及复杂生物化学反应的综合性问题，从奶牛的饲养环境到最终产品到达消费者环节，整个产业链均存在引发异味的风险。其主要根源涵盖脂肪氧化、微生物活动、饲料与环境物质的转移以及不当的加工储存方式等，这些因素通过一系列复杂的生物化学反应，最终影响牛乳的风味品质。本文全面梳理了各类异味的形成机制，并着重阐述了以牧场管理为核心的系统性管控策略，强调了在奶牛健康维护、饲料营养调配、挤奶卫生保障以及环境精准控制等环节实施精细化管理，对保持牛乳天然风味的关键作用。

在全面推进“优质乳工程”的当下，牛乳异味管控已从单纯的“缺陷消除”上升至“塑造卓越品质”的战略层面。这不仅依赖先进的感官评价技术和高精度的现代仪器分析手段，更亟需构建一套贯穿乳业全产业链、以主动预防为导向、基于大数据驱动的精准风味管理体系。

展望未来，牛乳异味领域存在诸多极具潜力的研究方向。例如，开展特定益生菌制剂对改善瘤胃发酵、减少不良风味前体物转移效果的研究，有望通过调节瘤胃微生物群落结构，优化奶牛对饲料的代谢过程，从源头降低异味物质的产生。运用组学技术筛选与低异味产生潜力相关的奶牛遗传标记，可为奶牛选育提供更精准的分子生物学依据，培育出在遗传层面具备优良风味性状的奶牛品种。此外，开发更高效、低成本的新型异味在线监测技术，将实现对牛乳生产全过程异味物质的实时监控，为及时调整生产工艺、保障产品风味提供有力支撑。

未来研究还应深入挖掘愉悦风味的分子基础，解析风味物质形成与调控的内在机制，为风味品质的提升提供理论依据。同时，加快推动检测技术的智能化和普及化进程，促进先进风味检测手段广泛应用于乳业生产各环节。通过跨学科合作，整合畜牧学、食品科学、生物信息学、环境科学等多领域专业知识，为乳业提供兼顾风味、营养、生产效率与可持续发展的综合解决方案。最终，通过持续的科学探索与产业实践，旨在为消费者稳定供应安全、营养、美味的高品质牛乳，助力乳业实现价值回归，推动乳业向高质量发展新阶段迈进。

中国乳业线上阅读

参考文献

[1] 潘雨桐，李翠霞.数字技术赋能奶业高质量发展及空间效应研究[J].中国乳品工业，2024，52（11）：58–74.

[2] 卢璇，张茜，赵宇轩，等.基于代谢组学技术结合智能感官探究临床乳房炎对牛乳风味和滋味物质的影响[J].食品科学，2023，44（20）：260–267.

[3] Contarini G，Povolo M. Phospholipids in Milk Fat：Composition，Biological and Technological Significance，and Analytical Strategies[J]. International Journal of Molecular Sciences，2013，14（2）：2808–2831.

[4] 丛懿洁，马蕊，王世杰，等.乳制品感官品评的应用研究进展[J].乳业科学与技术，2017，40（3）：29–32.

[5] 王加启.优质乳工程技术体系核心指标研究[J].中国乳业，2019（6）：2–6.

[6] 徐煜，任婧.原料乳中嗜冷假单胞菌危害及控制研究进展[J].食品工业科技，2015，36（13）：380–384.

[7] Richardson Z，Perez–Guaita D，Kochan K，et al. Determining the age of spoiled milk from dried films using attenuated reflection fourier transform infrared （ATR FT–IR） spectroscopy[J]. Applied Spectroscopy，2019，73（9）：1041–1050.

[8] Yalew K，Pang X，Huang S，et al. Recent development in detection and control of psychrotrophic bacteria in dairy production：Ensuring milk quality[J]. Foods（Basel，Switzerland），2024，13（18）：2908–2908.

[9] D'Incecco P，Brasca M，Rosi V，et al. Bacterial proteolysis of casein leading to UHT milk gelation： An applicative study[J]. Food Chemistry，2019（292）：217–226.

[10] Xu J，Wang X，Zhao X，et al. Evaluation of UHT milk spoilage caused by proteases from psychrophilic bacteria based on peptidomics[J]. Food Chemistry：X，2024（24）：102059.

[11] Lo R，Stanton–Cook M J，Beatson S A，et al. Draft genome

sequence of pseudomonas fluorescens SRM1，an isolate from spoiled raw milk[J]. Genome Announcements（Washington，DC），2015，3（2）：e00138-15.

[12] Meng H Y，Piccand M，Fuchsmann P，et al. Formation of 3-methylbutanal and 3-methylbutan-1-ol recognized as malty during fermentation in Swiss Raclette-Type cheese，reconstituted milk，and de Man，Rogosa，and Sharpe Broth[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2021，69（2）：717-729.

[13] 刘宁宁，郭红敏，葛春美，等.酸奶中乙醛和双乙酰含量对其风味的影响[J].中国食品添加剂，2012（S1）：269-273.

[14] Delosi è re M，Bernard L，Hurtaud C，et al. Protein signatures of spontaneous lipolysis and lipoprotein lipase activity in cow's milk[J]. Journal of proteomics，2023（285）：104951.

[15] 张金亮，李义恒，杨晓丽，等.内源性脂蛋白脂肪酶及其对牦牛乳风味劣变的影响机制研究进展[J].食品与发酵工业，2023，49（3）：347-353.

[16] Woodhouse H M，LeBlanc S J，DeVries T J，et al. Farm factors associated with increased free fatty acids in bulk tank milk.[J]. Journal of Dairy Science，2025，108（2）：1625-1633.

[17] Vanbergue E，Delaby L，Peyraud J，et al. Effects of breed，feeding system，and lactation stage on milk fat characteristics and spontaneous lipolysis in dairy cows[J]. Journal of Dairy Science，2017，100（6）：4623-4636.

[18] 赵小伟，王加启，卜登攀,等.影响乳脂自发性氧化反应的主要因素[J].动物营养学报，2011，23（12）：2071-2076.

[19] 王海涛，沈潇，姚凌云，等.采用GC×GC-TOFMS分析3种脂肪含量牛乳中挥发性化合物[J].乳业科学与技术，2024，47（1）：26-32.

[20] Rico D E，Gervais R，Pe ň a-Cotrino S M，et al. Effect of postruminal supply of linseed oil in dairy cows：2. Milk fatty acid profile and oxidative stability[J]. The Journal of Dairy Research，2023，90（2）：124-131.

[21] Li C，Paulsen P A，Akıllıoğlu H G，et al. Cysteine residues are responsible for the sulfurous off-flavor formed in heated whey protein solutions[J]. Food Chemistry · Molecular Sciences，2022（5）：100120.

[22] 孙钰清，吴继红，庞雪莉.食品异味问题现状及其研究进展[J].食品安全质量检测学报，2019，10（15）：4830-4839.

[23] Asaduzzaman M，Scampicchio M，Biasioli F，et al. Methanethiol formation during the photochemical oxidation of methionine - riboflavin system[J]. Flavour and Fragrance Journal，2020，35（1）：34-41.

[24] Chen H. Volatile flavor compounds in yogurt： a review[J]. Critical reviews in food science and nutrition，2010，50（10）：938-950.

[25] Zhao D，Le T T，Larsen B L，et al. Interplay between residual protease activity in commercial lactases and the subsequent digestibility of β-Casein in a model system[J]. Molecules（Basel，Switzerland），2019，24（16）：2876.

[26] Genovese A，Marrazzo A，De Luca L，et al. Volatile organic compound and fatty acid profile of milk from cows and Buffaloes Fed Mycorrhizal or Nonmycorrhizal Ensiled Forage[J]. Molecules（Basel，Switzerland），2019，24（8）：1616.

[27] Abad P，Arroyo-Manzanares N，Gil L，et al. Use of onion extract as a dairy cattle feed supplement：Monitoring propyl propane thiosulfonate as a marker of its effect on milk attributes[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry，2017，65（4）：793-799.

[28] Lejonklev J，Kidmose U，Jensen S，et al. Short communication： Effect of oregano and caraway essential oils on the production and flavor of cow milk[J]. Journal of Dairy Science，2016，99（10）：7898-7903.

[29] 段家昕，庄安宁，王若勇，等.浅谈不同生产要素对生乳滋气味的影响[J].家畜生态学报，2016，37（6）：71-74.

[30] Sato Y，Aoki N，Tateno M，et al. Identification and Quantification of 2-Iodo-4-methylphenol in Milk[J]. Food Hygiene and Safety Science（Shokuhin Eiseigaku Zasshi），2019，60（5）；151-153.

[31] Bleizgys R，Naujokien V. Ammonia emissions from cattle manure under variable moisture exchange between the manure and the environment[J]. Agronomy（Basel），2023，13（6）：1555.

[32] Cao T，Zheng Y，Dong H. Control of odor emissions from livestock farms：A review[J]. Environmental research，2023（225）：115545.

[33] Verma A，Ghosh T，Bhushan B，et al. Characterization of difference in structure and function of fresh and mastitic bovine milk fat globules[J]. PloS one，2019，14（8）：e0221830.

[34] Ghavi Hossein-Zadeh N. A meta-analysis of the genetic contribution estimates to major indicators for ketosis in dairy cows[J] .Research in Veterinary Science，2022（153）：8-16.

[35] Bergamaschi M，Cecchinato A，Biasioli F，et al. From cow to cheese： genetic parameters of the flavour fingerprint of cheese investigated by direct-injection mass spectrometry（PTR-ToF-MS）[J]. Genetics selection evolution（Paris），2016，48（1）：89.

[36] Pegolo S，Bergamaschi M，Gasperi F，et al. Integrated PTRToFMS GWAS and biological pathway analyses reveal the contribution of cow’s genome to cheese volatilome[J]. Scientific Reports，2018，8（1）：17002-13.

中国乳业线上阅读

[37] 顾小卫，赵国琦，郭鹏，等.牛奶风味影响因素的研究进展[J].乳业科学与技术，2010，33（2）：95–98.

[38] 申跃宇，郝科比，刘建业，等.泌乳奶牛日粮中添加不同比例脂肪酸对奶牛生产性能，血液生化指标的影响[J].中国饲料，2023（15）：99–103.

[39] 张拴林，陈燕红，袁霞，等.硒和维生素E对奶牛生产性能及血液生化指标的影响[J].动物营养学报，2012，24（12）：2476–2484.

[40] 刘春青，亓宝华，高俊荣，等.奶牛饲喂全混合日粮（TMR）注意要点[J].畜牧兽医科学，2022（13）：119–121.

[41] 余涛，叶岩，刘立强.挤奶设备清洗系统组成与维护[J].农机使用与维修，2021（1）：71–73.

[42] Baumberger C，Guarin J F，Ruegg P L. Effect of 2 different premilking teat sanitation routines on reduction of bacterial counts on teat skin of cows on commercial dairy farms[J]. Journal of Dairy Science，2016，99（4）：2915–2929.

[43] Romero G，Peris C，Fthenakis G C，et al.Effects of machine milking on udder health in dairy ewes[J]. Small Ruminant Research，2020，188（25）：106096.

[44] 中华人民共和国农业农村部. NY/T 4053–2021 生牛乳质量安全生产控制技术规范[S].

[45] Ajmal M，Nadeem M，Imran M，et al. Impact of immediate and delayed chilling of raw milk on chemical changes in lipid fraction of pasteurized milk[J]. Lipids in Health and Disease，2018，17（1）：190.

[46] O'Connell A，Ruegg P L，Jordan K，et al. The effect of storage temperature and duration on the microbial quality of bulk tank milk[J]. Journal of Dairy Science，2016，99（5）；3367–3374.

[47] Burkhardt F K，Hayer J J，Heinemann C，et al. Drinking behavior of dairy cows under commercial farm conditions differs depending on water trough design and cleanliness[J]. Applied Animal Behaviour Science，2022（256）：1–9.

[48] Pop M D. Sensory Evaluation Techniques of Food[J]. Annals of "Valahia" University of Târgoviște. Agriculture，2023，15（2）：58–62.

[49] Diez–Simon C，Ammerlaan B，van den Berg M，et al. Comparison of volatile trapping techniques for the comprehensive analysis of food flavourings by Gas Chromatography–Mass Spectrometry[J]. Journal of Chromatography A，2020（1624）：461191.

[50] Friedrich J E，Acree T E. Gas Chromatography Olfactometry（GC/O）of Dairy Products[J]. International Dairy Journal，1998，8（3）：235–241.

[51] 张珊，李雯，张玉婷，等.基于气相型电子鼻研究不同脂肪含量牛奶贮藏期间风味变化特征[J].乳业科学与技术，2024，47（3）：26–34.

[52] Li S，Lopez R A，Zhu C，et al. Consumer preferences for sustainably produced ultra–high–temperature milk in China.[J]. Journal of Dairy Science，2023，106（4）：2338–2346.

[53] Woodhouse H M，Leblanc S J，Devries T J，et al. Farm factors associated with increased free fatty acids in bulk tank milk[J]. Journal of Dairy Science，2025，108（2）：1625–1633.

[54] Hung H Y，Hsu Y Y，Su P F，et al. Variations in the rancid–flavor compounds of human breastmilk under general frozen–storage conditions[J]. Bmc Pediatrics，2018，18（1）：94.

[55] Mannion D T，Furey A，Kilcawley K N. Free fatty acids quantification in dairy products[J]. International Journal of Dairy Technology，2016，69（1）：1–12.

[56] Leksrisompong P，Barbano D M，Foegeding A E，et al. The roles of fat and pH on the detection thresholds and partition coefficients of threecompounds：Diacetyl，delta–decalactone，and furaneol in water，oil，and emulsions[J]. Journal of Sensory Studies，2010，25（3）：347–370.

[57] Li Y H，Wang W J，Zhang F，et al. Formation of the oxidized flavor compounds at different heat treatment and changes in the oxidation stability of milk[J]. Food science & nutrition，2019，7（1）：238–246.

[58] Ai N，Liu H，Wang J，et al. Triple–channel comparative analysis of volatile flavour composition in raw whole and skim milk via electronic nose，GC–MS and GC–O[J]. Analytical methods，2015，7（1）：4278–4284.

[59] 徐亚丹，王俊，赵国军.基于电子鼻的对掺假的“伊利”牛奶的检测[J].中国食品学报，2006（5）：111–118.

[60] 郭奇慧，白雪，康小红.应用电子鼻区分不同气味的原奶[J].食品科技，2008，33（6）：179–181.

[61] Wen T，Yan J，Huang D，et al. Feature extraction of electronic nose signals using QPSO–based multiple KFDA signal processing[J].Sensors（Basel，Switzerland），2018，18（2）：388.

[62] Mu F，Gu Y，Zhang J，et al. Milk source identification and milk quality estimation using an electronic nose and machine learning techniques[J]. Sensors（Basel，Switzerland），2020，20（15）：4238.

[63] Shtepliuk I，Dom è nech–Gil G，Almqvist V，et al. Electronic nose and machine learning for modern meat inspection[J]. Journal of Big Data，2025（12）：1–21.

[64] Yang Y，Wu X，Xu Y，et al. Influence of feeding systems on the microbial community and flavor characteristics of raw milk：A Comparative Analysis[J]. Journal of Dairy Science，2025，108（5）：4693–4708.

中国乳业线上阅读

Study and Application of the Formation Mechanism and Systematic Control Strategies for Off-flavors in Bovine Milk

CHEN Qiping，WU Weijun*，LI Songqun，FAN Cunfei，WU Zepeng，SUN Kelong，ZHANG Jinyu，GAO Fangyang，LIU Lanfeng，HUANG Hai，ZHANG Wanying
Guangzhou Fengxing Dairy Co.，Ltd.，Guangzhou Guangdong 510610

Abstract：Bovine milk is a nutrient-rich natural beverage，and its flavor directly influences consumers' acceptance and the market value of the product. Throughout the entire industrial chain from the pasture to the dining table，bovine milk is prone to developing unpleasant odors due to various factors，which significantly reduces product quality and simultaneously hinders the high-quality development of the dairy industry. This paper systematically analyzed the main types，key influencing factors and biochemical mechanisms of milk odor. On this basis，it further explored the systematic control methods at the pasture end，covering aspects such as dairy cow health management，feed nutrition matching，milking hygiene assurance，and proposes precise and feasible technical solutions. Meanwhile，in combination with the core concept of the “China Excellent Milk Project”，this paper expounded the path for upgrading the flavor and quality of bovine milk from “safety” to “quality”，providing theoretical references and practical guidance for the dairy industry and contributing to the improvement of the flavor quality of high-quality milk.

Keywords：high-quality milk；off odor；formation mechanism；control methods；upgrade path

▲上接91页

It has attracted much attention due to its low allergenicity，high digestibility，and rich bioactive substances. This paper systematically reviewed the lactation patterns of mares，the basic nutritional components of mare's milk（such as protein，fat，lactose，minerals，and vitamins），its active components（such as lactoferrin，lysozyme，and milk fat globule membrane proteins），and their functional characteristics. Research showed that the ratio of casein to whey protein in mare's milk is close to that in human milk，and it has low allergenicity. 773 functional proteins have been identified in the milk fat globule membrane of mare's milk，which are closely related to immune regulation and cell metabolism. Fermentation technology can significantly enhance the nutritional value of mare's milk，reducing lactose content and generating metabolites such as antimicrobial peptides and organic acids，endowing it with functions such as regulating blood lipids and enhancing immunity. This paper also explored the development potential of derivative products such as acid mare's milk and mare's milk powder. In the future，it is necessary to strengthen the analysis of the mechanism of action of active components in mare's milk， optimize standardized production and processing technologies，and promote its development from a regional ethnic food to a high-value functional food industry，providing support for the development of China's characteristic dairy resources.

Keywords：mare's milk；lactation regularity；nutritive value；functional activity

中国乳业线上阅读