电子鼻应用于生牛乳检测和感官评价的试验研究

孙小二，王路阳，乔 宽，王艳飞，梁凤玲，时长旭，高永亮*

蒙牛乳业（焦作）有限公司，河南焦作 454100

摘　要：[目的]建立精确、快速的生牛乳感官气味检测方法，为其品质控制提供技术支撑。[方法]鉴于电子鼻技术在乳制品掺假检测、成分分析及加工贮藏过程中品质变化气味研究领域的广泛应用优势，本研究采用电子鼻技术与传统仪器分析、感官评价相结合的综合分析策略，开展生牛乳品质检测试验。[结果]电子鼻技术在生牛乳品质检测中展现出显著优势：可快速识别异常样本，有效规避人为主观因素导致的误差，大幅提升实际检测操作效率；2023年3—12月对10 230 个牧场生牛乳样本的检测数据显示，整体符合率达91.6%，且电子鼻检出的不符合样本经人工感官评价验证，符合率为100%。[结论]通过多次试验构建正常生牛乳光谱模型，与异常样本光谱模型对比，明确了异常生牛乳中特征挥发性化合物（如酸味样本中的3–乙基–2–甲基吡嗪、豆味样本中的乙醇等），为生牛乳感官品质评估提供科学、可靠的检测依据。

关键词：电子鼻；生牛乳；成分检测；感官评价；挥发性化合物

文章编号：1671–4393（2025）10–0094–07　　DOI:10.12377/1671–4393.25.10.15

0 引言

随着消费者对营养与健康关注度的提升，乳及乳制品消费需求持续增长。乳及乳制品因营养丰富，已成为大众日常饮食重要组成部分，鲜牛乳、纯牛乳等液态奶饮用习惯逐步普及，以巴氏杀菌牛乳为代表的新鲜牛乳更受青睐，新鲜度成为消费者选择牛乳的核心考量指标。然而，市场中仍存在生牛乳掺水、添加违禁物等问题，导致乳制品新鲜度

作者简介：孙小二（1989–），男，河南焦作人，大专，研究方向为生乳检测及感官评价；
王路阳（1993–），男，河南周口人，本科，研究方向为生乳检测及感官评价；
乔　宽（1987–），男，辽宁辽阳人，本科，研究方向为生乳检测及感官评价；
王艳飞（1983–），女，河南焦作人，本科，研究方向为生乳检测及感官评价；
梁凤玲（1982–），女，内蒙古赤峰人，本科，研究方向为生乳检测及感官评价；
时长旭（1984–），男，内蒙古通辽人，本科，研究方向为生乳检测及感官评价。
*通信作者：高永亮（1982–），男，内蒙古乌兰察布人，本科，研究方向为生乳检测及感官评价。

中国乳业线上阅读

下降、评价指标不达标，甚至产生有毒有害产品，因此开展乳及乳制品品质检测对保障食品安全、维护消费者权益具有重要现实意义。

生牛乳品质评价指标主要包括感官指标、理化指标、流变性指标及介电特性等，传统检测方法以感官检测、微生物检测、酸度测定等为主。其中，感官检测是生牛乳新鲜度筛查的首要环节，通过视觉、嗅觉、触觉、味觉等直观判断牛乳质量，但该方法主观性较强，对操作人员专业能力要求较高[1]；理化检测需分析乳中挥发性成分、营养成分及电导率、冰点等指标，常用激光诱导击穿光谱[2]、酶联免疫吸附[3]、近红外光谱[4]、气相色谱-质谱联用[5]等技术，虽检测精度较高，但存在样品预处理复杂、对检测人员技术水平要求严格、检测周期长等不足。因此，开发快速、无损、安全的乳及乳制品检测技术成为行业研究重点。

电子鼻技术具有三大核心优势：一是气味识别精准性，可准确分析和判断细微气味特征，区分不同类型异常气味；二是检测高效性，相比传统化学分析方法，响应速度更快，短时间内即可完成气味检测与识别；三是应用灵活性，通过更换或组合不同传感器，可实现多种气味检测，适应性强。基于上述优势，电子鼻技术在乳及乳制品品质检测领域具有广阔应用前景，对提升检测效率、保障产品质量具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 仪器与耗材

电子鼻（HeraclesNEO-2126，配置2 个氢FID、预浓缩捕集阱），法国Alpha M.O.S.公司；自动进样器（PAL-RSI），瑞士思特斯分析仪器有限公司；氢气发生器（TH-300）、零空气发生器（ZA-1500C），北京中惠分析技术研究所；MXT-5金属毛细管色谱柱（10 m×0.18 mm×0.4 μm，Crossbond 5%二苯基/95%二苯基聚硅氧烷）或具有同等性能的柱子、MXT-1701金属毛细管色谱柱（10 m×0.18 mm×0.4 μm，Crossbond 14%氰丙基苯基/ 86%二苯基聚硅氧烷）或具有同等性能的柱子，美国Restek公司；5 mL气相进样针，瑞士hamilton公司；20 mL顶空进样瓶配置钳口或螺纹瓶盖；9.5 mm圆柱形进样隔垫；5 mL或10 mL移液器。

1.2 检测原理

本研究采用的电子鼻本质为超快速气相色谱仪，内置气味浓缩装置（预浓缩捕集阱）[6]。检测原理如下：将固体或液体样品加入顶空瓶并密封，置于震荡箱中平衡后，用注射器抽取顶部气体注入仪器；在加载阶段，样品气体中的挥发性成分在冷阱中富集；经冲洗后，加热捕集阱使富集的挥发性成分快速释放，分别注入MXT-5和MXT-1701两根色谱柱进行分离；分离后的挥发性化合物通过2 个火焰离子化检测器（FID）检测，检测数据由Alpha Soft软件实时记录并生成图谱。

1.3 操作步骤

（1）样品准备：提前准备移液器、枪头、顶空瓶等耗材，对顶空瓶进行编号，确保与样品一一对应，避免混淆；

（2）样品制备：取混合均匀的生牛乳样品4 mL，快速移入对应编号的顶空瓶中，立即加盖密封，置于仪器托盘待检测；同时制备1 个空白样品（不加生牛乳，仅密封顶空瓶），用于评估样品制备区域的气味背景干扰；

（3）空白验证：仪器连续检测样品期间，每日首个检测序列需运行2 个空白样品瓶，若空白样品检测出现异常（如存在明显挥发性成分峰），需排查环境干扰并重新验证，确保检测环境符合要求；

（4）样品批次控制：每批检测样品数量控制在10 个以内，避免因样品放置时间过长导致挥发性成分变化，影响检测准确性；

（5）序列设置：按“样品编号+检测日期”格式命名样品，在Alpha Soft软件中创建检测序列，明确每个样品的检测方法（如色谱柱升温程序、检测

中国乳业线上阅读

器参数等），确保检测条件统一。

1.4 仪器参考条件

1.4.1 基础参数

进样口温度：200 ℃；检测器温度：火焰离子化检测器（FID）270 ℃；载气：高纯氢气（纯度≥99.999%）；零级空气：杂质含量<5 ppm；分流比：5 mL/min；柱流速：0.8 mL/min。

1.4.2 色谱柱升温程序

MXT-5与MXT-1701 色谱柱采用相同升温程序：初始温度50 ℃，保持50 s；以1 ℃/s速率升至120 ℃，保持10 s；再以33 ℃/s速率升至250 ℃，保持15 s；总检测时长188 s。

在实际检测中可根据样品特性（如异常气味强度）、仪器运行状态（如检测器灵敏度），在上述参考条件基础上适当调整参数，确保检测图谱清晰、特征峰明显。

2 结果与分析

2.1 检测结果总体统计

根据电子鼻检测统计模型，分析完成后可在序列结果列表中直接获取样品判定结果：检测值小于限值时，判定为“符合”（正常生牛乳）；检测值大于限值时，判定为“不符合”（异常生牛乳）。对“不符合”样品，需依据《GB 19301-2010 食品安全国家标准 生乳》《GB/T 10220—2012 感官分析方法学 总论》《GB/T 29605—2013 感官分析 食品感官质量控制导则》要求，开展人工感官评价（由 3 名及以上专业评价人员通过嗅觉判断异常气味类型），最终以感官评价结果作为异常样品的定性结论。

2023年3—12月，采用上述方法对牧场供应生牛乳进行持续检测，共检测样品10 230 个，其中不符合样品859 个，整体符合率达91.6%，各月份检测数据详见表1。由表1可知，各月份符合率均保持在90.0%以上，其中10 月符合率最高（94.2%），7月与9月符合率最低（均为90.0%），推测与夏季高温环境下生牛乳易滋生微生物、产生异常气味有关，需在高温季节加强牧场生牛乳储存与运输环节的温度控制。

表 1 2023 年 3—12 月电子鼻检测生牛乳数据统计

检测时间	检测数量（个）	不符合数量（个）	符合率（%）
3 月	539	52	90.4
4 月	887	66	92.6
5 月	825	53	93.6
6 月	1 337	115	91.4
7 月	998	100	90.0
8 月	660	47	92.9
9 月	1 578	159	90.0
10 月	1 302	76	94.2
11 月	768	65	91.5
12 月	1 336	126	90.6

2.2 不符合样品电子鼻与感官评价对比分析

为验证电子鼻检测准确性，筛选2023年3—5月电子鼻检出的“不符合”样品（涵盖酸味、臭味、豆味、料草味、牛体味等多种异常气味类型），对比其电子鼻检测结果与人工感官评价结果，具体数据见表2。由表2可知，电子鼻检测判定为“不符合”的样品，经人工感官评价均确认为异常生牛乳，符合率达100% ，表明电子鼻可精准识别生牛乳中的异常气味，检测结果可靠性高。

表 2 2023 年 3—5 月电子鼻与感官评价检测结果对比

检测日期	感官评价结果（异常气味类型）	电子鼻检测结果	匹配情况
3 月 23 日	酸味	不合格	完全匹配
3 月 23 日	酸味		
3 月 23 日	酸味		
3 月 23 日	酸味		
3 月 23 日	酸味		
3 月 23 日	酸味		
4 月 15 日	臭味		
5 月 13 日	酸味		
5 月 13 日	豆味		
5 月 13 日	料草味		
5 月 13 日	牛体味		
5 月 19 日	酸味		

中国乳业线上阅读

2.3 异常样品特征图谱与挥发性化合物分析

通过对比正常样品（图1、图2）与异常样品的电子鼻图谱，可清晰观察到异常样品的波形偏离（如特征峰强度增高）与数值异常（如超出正常公差范围）。

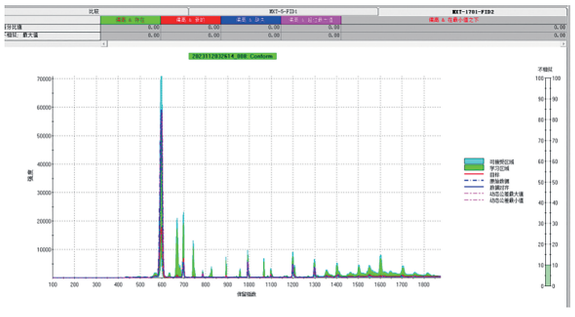


图 1 符合样品 MXT-5-FID1 色谱柱图谱

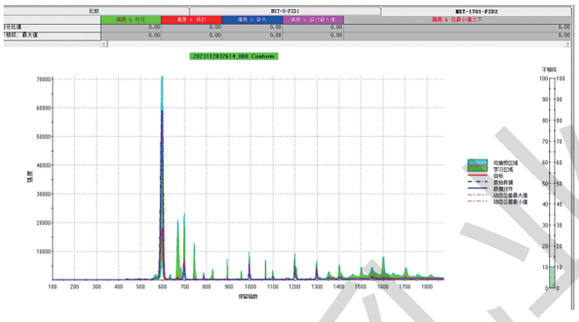


图 2 符合样品 MXT-1701-FID2 色谱柱图谱

结合化源网库检索结果，明确正常生牛乳中不含三甲基吡嗪、乙醇等易导致异常气味的化合物；而异常生牛乳中存在特定挥发性化合物，且不同异常气味类型对应特征化合物存在差异，具体分析如下。

2.3.1 酸味样品

酸味样品的MXT-5-FID1色谱柱图谱见图3。电子鼻检测显示：MXT-5色谱柱保留指数1 005～1 006区间的挥发性组分峰强度显著增高；通过CAS序号（15707-23-0、14667-55-1）检索，确认该区间特征化合物为3-乙基-2-甲基吡嗪与2，3，5-三甲基吡嗪，推测上述含氮杂环化合物是生牛乳产生酸味的主要原因（可能由微生物代谢产生）。

2.3.2 豆味样品

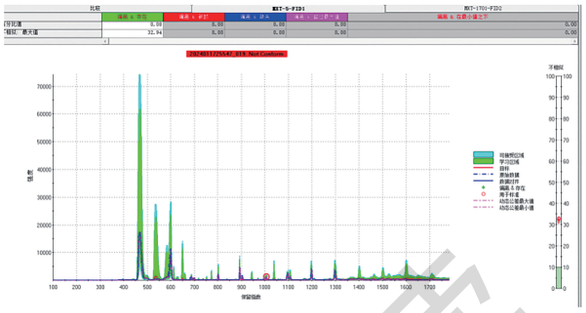


图 3 电子鼻不符合和感官评价结果为酸味的样品 MXT-5-FID1 色谱柱图谱

豆味样品的MXT-5-FID1与MXT-1701-FID2色谱柱图谱分别见图4、图5。电子鼻检测显示：MXT-5色谱柱保留指数437～450区间挥发性组分峰强度增高，MXT-1701 色谱柱保留指数554～562区间出现新增特征峰；通过CAS序号（64-17-5）检索，确认新增化合物为乙醇，推测生牛乳中微生物发酵产生的乙醇是导致豆味的关键因素。

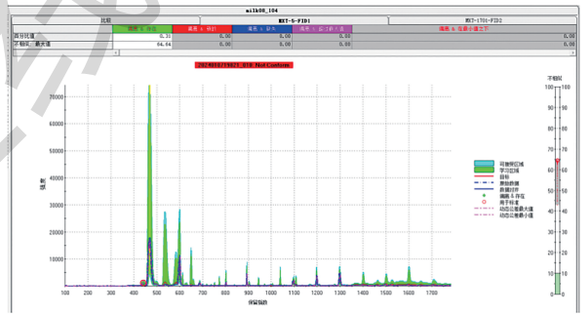


图 4 电子鼻不符合和感官评价结果为豆味的样品 MXT-5-FID1 色谱柱图谱

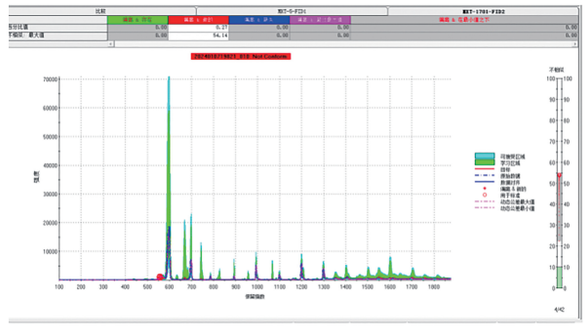


图 5 电子鼻不符合和感官评价结果为豆味的样品 MXT-1701-FID2 色谱柱图谱

2.3.3 臭味样品

臭味样品的MXT-5-FID1 与 MXT-1701-FID2色谱柱图谱分别见图6、图7。电子鼻检测显示：

中国乳业杂志上网首发

MXT−5色谱柱保留指数437～448区间挥发性组分峰强度增高，451～452、767～768区间超出最大公差，824～827区间出现新增特征峰；MXT−1701色谱柱保留指数552～561区间出现新增特征峰；通过CAS序号检索，确认特征化合物包括乙醇（CAS：64−17−5）、顺−3−己烯−1−醇（CAS：928−96−1）及吲哚（CAS：120−72−9）。其中，吲哚具有强烈粪臭味，是导致生牛乳出现臭味的核心物质，推测其来源可能为奶牛肠道微生物污染或生牛乳储存过程中腐败菌（如变形杆菌）代谢产生；顺−3−己烯−1−醇虽本身具有青草味，但在高浓度或与其他异味化合物混合时，可能加剧臭味感知。

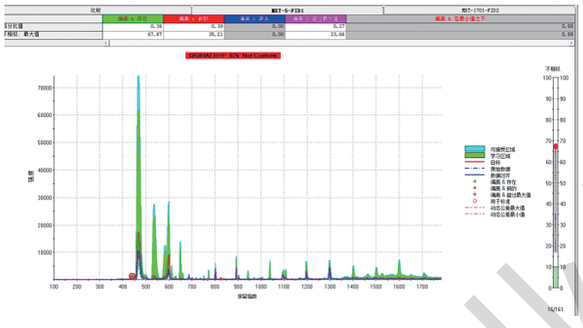


图 6 电子鼻不符合和感官评价结果为臭味的样品 MXT−5−FID1 色谱柱图谱



图 7 电子鼻不符合和感官评价结果为臭味的样品 MXT−1701−FID2 色谱柱图谱

2.3.4 料草味与牛体味样品

料草味样品的MXT−1701−FID2色谱柱图谱见图8，检测显示保留指数689～692区间出现特征峰，通过CAS序号（106−25−2）检索确认化合物为己醛，该物质广泛存在于新鲜牧草中，推测因奶牛采食后未充分消化，或挤奶过程中牧草残渣混入生牛乳导致。

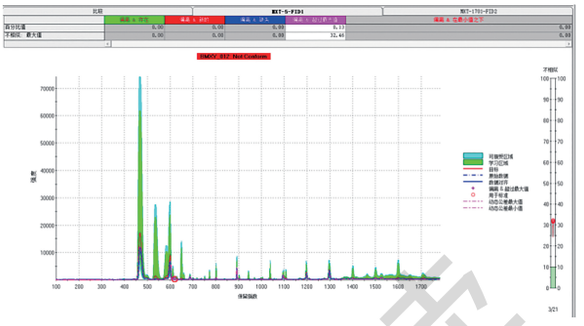


图 8 电子鼻不符合和感官评价结果为料草味的样品 MXT−5−FID1 色谱柱图谱

牛体味样品的MXT−5−FID1色谱柱图谱见图9，保留指数915～918区间峰强度显著升高，检索确认化合物为壬醛（CAS：124−19−6），该物质是动物皮脂腺分泌物的特征成分，可能因挤奶前奶牛体表清洁不彻底，导致体表异味物质转移至生牛乳中。

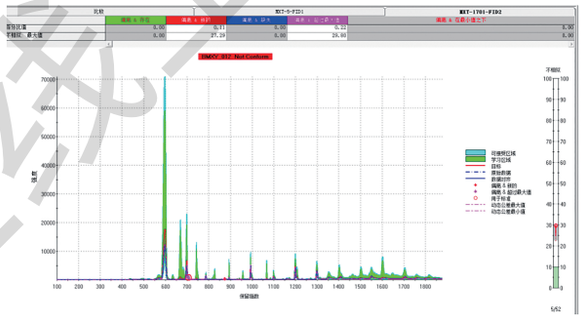


图 9 电子鼻不符合和感官评价结果为料草味的样品 MXT−1701−FID2 色谱柱图谱

3 讨论

3.1 电子鼻检测技术的优势与局限性

本研究结果表明，电子鼻技术在生牛乳感官品质检测中具有三大核心价值：一是效率优势，单一样品检测时长仅188 s，相比传统气相色谱−质谱联用技术（检测周期通常需1～2 h）[5]，效率提升超30倍，可满足牧场批量样品快速筛查需求；二是准确性优势，10 230 个样本检测整体符合率91.6%，且不符合样本人工验证准确率100%，解决了传统感官评价主观性强、结果易受评价人员经验影响的问题[1]；三是特征识别优势，通过图谱对比可精准定位异常样品中的特征挥发性化合物，为追溯异味来源提供

中国乳业线上阅读

科学依据，如酸味样品中的3-乙基-2-甲基吡嗪可指向微生物污染，壬醛可提示奶牛体表清洁问题。

但该技术也存在一定局限性：一是化合物定性能力有限，电子鼻虽能识别特征峰对应的化合物种类，但无法直接测定化合物浓度，需结合气相色谱-质谱联用等技术进一步量化分析；二是模型通用性待提升，本研究构建的检测模型基于特定牧场生牛乳样本，若应用于不同品种奶牛（如荷斯坦牛、娟姗牛）或不同地域牧场样本，可能因生牛乳基础成分差异导致误判，需扩大样本范围优化模型；三是环境干扰敏感性，检测环境中的挥发性有机物（如实验室空气中的乙醇、己醛）可能通过顶空瓶密封不严混入样品，影响检测结果，需进一步优化样品制备的无菌环境控制流程。

3.2 异常生牛乳异味来源与控制建议

结合特征化合物分析结果，可将生牛乳异常气味来源分为三类，并针对性提出控制措施：一是微生物污染类（酸味、臭味、豆味）：此类异味占本研究不符合样品的78.3%（673/859），核心诱因是生牛乳储存温度不当（夏季高温尤为显著）。建议牧场采用“冷链全程监控”模式，挤奶后15 min内将生牛乳温度降至4 ℃以下，运输过程中通过GPS温度传感器实时监测，避免微生物繁殖产生吡嗪类、吲哚等异味化合物。二是外源污染类（料草味）：主要因挤奶环节清洁不彻底导致，建议优化挤奶流程，增加“奶牛采食后静置2 h再挤奶”环节，减少牧草残渣残留；同时采用自动挤奶设备，避免人工操作带入外源杂质。三是动物自身关联类（牛体味）：与奶牛体表清洁度直接相关，建议牧场建立“挤奶前二次清洁”标准，先用温水冲洗奶牛乳房及腹部，再用无菌毛巾擦干，降低壬醛等体表分泌物污染风险。

3.3 电子鼻技术的应用拓展方向

基于本研究结果，电子鼻技术在乳制品行业可进一步拓展三大应用场景：一是加工过程质控，可用于巴氏杀菌牛乳生产中的在线监测，实时识别杀菌不彻底导致的微生物异味，避免不合格产品流入市场；二是货架期预测，通过构建生牛乳在不同储存温度下的气味变化模型，预测产品剩余货架期，为终端销售提供保质期预警；三是掺假检测，后续可针对生牛乳中常见掺假物质（如尿素、蔗糖）的特征气味，优化电子鼻传感器组合，实现掺假与异味的同步检测，提升检测覆盖面。

4 结论

本研究建立的电子鼻检测方法可快速、准确识别生牛乳中的异常气味，单一样品检测仅需188 s，整体符合率达91.6%，且对不符合样本的人工验证准确率为100%，表明该方法可作为传统感官评价的有效替代工具，适用于生牛乳批量样本的快速筛查；研究进一步明确了五类异常气味对应的特征挥发性化合物，包括酸味（3-乙基-2-甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪）、豆味（乙醇）、臭味（吲哚、顺-3-己烯-1-醇）、料草味（己醛）和牛体味（壬醛），为异味来源追溯提供了科学依据；此外，研究还发现夏季（7—9月）生牛乳异常率较高（符合率最低为90.0%），主要因高温促使微生物加速繁殖，建议牧场加强冷链管理，同时指出电子鼻技术在乳制品加工质控、货架期预测等方面具有广阔应用前景，未来需通过扩大样本规模与优化检测模型以进一步提升方法的通用性。

参考文献

[1] 徐楚璇.牛奶的变质与新鲜度检测探讨[J].现代商贸工业，2019，40（10）：176-178.

[2] Moncayo S，Manzoor S，Rosales J D，et al.Qualitative and quantitative analysis of milk for the detection of adulteration by Laser Induced Breakdown Spectroscopy（LIBS）[J].Food Chemistry，2017，232：322-328.

[3] Chen P W，Mao F C..Detection of lactoferrin in bovine and goat milk by enzyme-linked immunosorbent assay[J].Journal of Food and Drug Analysis，2004，12（2）：133-139.

[4] 王宁，乔立歌，苗镝，等.基于近红外光谱的乳制品脂肪含

中国乳业线上阅读

量测定研究[J].山东化工，2021，50（18）：109-112.
[5] Jurado S B，Ballesteros E，Gallego M.Gas chromatographic determination of N-nitrosamines，aromatic amines，and melamine in milk and dairy products using an automatic solidphase extraction system[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry，2011，59（13）：7519-7526.
[6] 质量技术监督行业职业技能鉴定指导中心. 质量技术监督基础（第二版）[M]. 北京：中国质检出版社，2014.

Experimental Research on the Application of Electronic Nose in the Detection and Sensory Evaluation of Raw Milk

SUN Xiaoer，WANG Luyang，QIAO Kuan，WANG Yanfei，LIANG Fengling，
SHI Changxu，GAO Yongliang*
Mengniu Dairy（Jiaozuo）Co.，Ltd.，Jiaozuo Henan 454100

Abstract：[Objective]To establish an accurate and rapid detection method for sensory odor of raw milk and provide technical support for its quality control.[Method]Due to the wide application advantages of electronic nose technology in the fields of dairy adulteration detection，component analysis，and odor research on quality changes during processing and storage，this study adopted a comprehensive analysis strategy combining electronic nose technology with traditional instrumental analysis and sensory evaluation to carry out raw milk quality detection experiments.[Result]Electronic nose technology showed significant advantages in raw milk quality detection：it could quickly identify abnormal samples，effectively avoid errors caused by subjective human factors，and greatly improve the efficiency of practical detection operations.The detection data of 10，230 raw milk samples from pastures from March to December 2023 showed that the overall compliance rate reached 91.6%，and the non-compliant samples detected by electronic nose were verified by artificial sensory evaluation with a compliance rate of 100%.[Conclusion]A spectral model of normal raw milk was constructed through multiple experiments.By comparing with the spectral model of abnormal samples，the characteristic volatile compounds in abnormal raw milk（such as 3-ethyl-2-methylpyrazine in sour samples and ethanol in bean-flavored samples）were identified，providing a scientific and reliable detection basis for the sensory quality evaluation of raw milk.

Keywords：electronic nose；raw milk；component detection；sensory evaluation；volatile compounds

中国乳业线上阅读