

# 食品接触材料中挥发性气味物质分析技术的 研究进展

马宁宁<sup>1,2</sup>, 陈燕芬<sup>1,2</sup>, 钟怀宁<sup>1,2</sup>, 李丹<sup>1,2\*</sup>, 贝荣华<sup>1,2</sup>

(1. 广东省动植物与食品进出口技术措施研究重点实验室, 广州 510623;

2. 广州海关技术中心, 广州 510623)

**摘要:** 目前食品接触材料安全性日益受到关注。食品接触材料产生的挥发性物质, 常常具有异常的气味, 可能通过气相传质或直接接触迁移至食品中, 不但会引发食品感官特性的变化, 影响消费者的使用体验, 削弱消费者购买欲望, 过量摄入后还会危及人体健康。因此, 准确识别和检测食品接触材料产生的异味物质, 对确保食品接触材料的合规以及保护消费者健康安全显得尤为重要。本文对国内外关于挥发性物质气味评估和检测技术及其在食品接触材料领域的运用进行综述。重点介绍了顶空、顶空-固相微萃取、热脱附、电子鼻等气味分析技术, 及其与气相色谱、气相色谱/质谱或气相色谱-嗅闻-质谱仪等结合的联用分析技术, 并梳理和展望了食品接触材料中挥发性气味物质分析技术发展前景, 为有效管控食品接触材料异味问题提供技术参考。

**关键词:** 挥发性气味物质; 食品接触材料; 气味分析

## Research progress on analysis technology of volatile odorant substances in food contact materials

MA Ning-Ning<sup>1,2</sup>, CHEN Yan-Fen<sup>1,2</sup>, ZHONG Huai-Ning<sup>1,2</sup>, LI Dan<sup>1,2\*</sup>, BEI Rong-Hua<sup>1,2</sup>

(1. *Guangdong Key Laboratory of Import and Export Technical Measures of Animal, Plant and Food, Guangzhou 510623, China*; 2. *Guangzhou Customs Technology Center, Guangzhou 510623, China*)

**ABSTRACT:** At present, the safety of food contact materials is increasingly concerned. The volatile substances migrate from food contact materials by direct contact or through the gas-phase transfer occurred between the material and food surface probably have specific odor, which may cause the change of organoleptic character of food, affect consumers' experience and weaken the purchase desire. Furthermore, it may cause health problem if the migration level exceed the threshold limit of exposure. Therefore, it is important to identify and quantify the volatile substances from food contact materials, so that to ensure the compliance of food contact materials and protect the health and safety of consumers. This paper aimed to summarize the development of the techniques and approach for analysis of volatile substances and their applications in food contact materials, mainly introduced static headspace, headspace-solid-phase micro-extraction, thermal desorption and electronic nose, etc., and the relevant identification technics by combination with gas chromatography, gas chromatograph/mass spectrometry or gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, etc, and reviewed and prospected the development of volatile odor analysis

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFF0203705)、广东检验检疫局科技项目(2018GDK07)

**Fund:** Supported by China National Key R&D Program (2016YFF0203705), and Science and Technology Project of Guangdong Inspection and Quarantine Bureau (2018GDK07)

**\*通讯作者:** 李丹, 硕士, 研究员, 主要研究方向食品包装安全。E-mail: lid@iqtc.cn

**\*Corresponding author:** LI Dan, Master, Professor, Guangzhou Customs Technology Center, Guangzhou, 510623, Guangdong. E-mail: lid@iqtc.cn

technology in food contact materials, so as to provide technical reference for effectively controlling the peculiar smell of food contact materials.

**KEY WORDS:** volatile odorant substances; food contact material; odor analysis

## 1 引言

食品接触材料的异味问题是一个较为敏感的话题。食品接触材料的主要功能是利用自体阻隔性与抗污染性保证食品的安全和质量,既要防止外部污染物迁移至食品中,也要避免其自身的化合物迁移至食品中而造成化学污染<sup>[1]</sup>。而后者往往因具有挥发性气味物质的迁移而导致食品气味异常、味道不正,引发食品的感官品质发生劣变。这些问题的产生不仅会引起消费者在使用过程中的不满,甚至会由于气味物质本身具有的毒性而影响消费者的身体健康。因此,异味问题已经成为食品接触材料不可忽视的问题。中国、欧盟等国家和地区均对食品接触材料的气味感官特性予以立法,以有效控制由食品接触材料和制品给食品带来的感官品质劣变风险。

欧盟所颁布的食品接触材料框架性法规 EC No.1935/2004<sup>[2]</sup>中,在通用基本要求部分明确规定了“对于材料和制品,包括活性剂智能材料和制品,其生产应符合良好生产规范,在正常或可预见的使用条件下,其成分向食品的迁移量不会导致:(a)……(b)食品成分发生不可接受的变化,或(c)食品感官特性的劣变。”

美国联邦法规 21CFR 174《非直接食品添加剂》<sup>[3]</sup>也规定了与欧盟类似的要求,即如果通过适当的测试发现食品包装材料会向所包装食品带来不可接受的气味和味道,则将被视为违法美国食品、药品和化妆品法案的要求。

中国食品安全国家标准 GB 4806.1《食品安全国家标准 食品接触材料及制品通用安全要求》<sup>[4]</sup>规定“食品接触材料及制品在推荐的使用条件下与食品接触时,迁移到食品中的物质不应造成食品成分、结构或色香味等性质的改变”。

总之,食品中原有的风味或气味不得因食品接触材料而发生改变。GB/T 35773《包装材料及制品气味的评价》<sup>[5]</sup>和 SN/T 3179《食品接触材料检测方法 纸和纸板感官分析气味》<sup>[6]</sup>对于食品接触材料中的气味的解释为嗅觉器官嗅某些挥发性物质所感受到的感官特性。为了防止食品接触材料中的挥发性气味物质迁移至食品中而引起食品气味和风味发生改变,同时也为了人体健康,对于挥发性气味物质的分析显得尤为重要。目前针对挥发性气味物质的检测分析技术主要有感官分析和仪器分析,其中仪器分析包括顶空(static headspace, HS)<sup>[7-10]</sup>、顶空-固相微萃取(headspace-solid-phase microextraction, HS-SPME)<sup>[11-14]</sup>、热脱附(thermal desorption, TD)<sup>[15,16]</sup>、电子鼻(electronic

nose)<sup>[17,18]</sup>等串联气相色谱(gas chromatography, GC)、气相色谱/质谱联用仪(gas chromatograph/mass spectrometry, GC/MS)以及气相色谱-嗅闻-质谱联用仪(gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, GC-O-MS)等,且挥发性气味物质检测分析技术仍处在不断地改进和发展中。

本文就近些年不同挥发性气味物质现有的分析技术及其在食品接触材料领域的运用进行综述分析,并结合食品接触材料的特殊要求提出可能进一步发展的研究测试手段,为食品接触材料的气味分析提供有效的技术支持。

## 2 食品接触材料中挥发性气味物质来源及毒性简介

食品接触材料中的挥发性气味物质的来源较为复杂,可能是来源于生产、运输和消费过程中,释放出的一些单体、起始物、添加剂及降解产物等产生的气味<sup>[12,19-21]</sup>,包括甜味、酸臭味、药味、焦臭味、石蜡味、石油味、油墨味、焦油味、溶剂味等。

例如,常常用来制造食品接触材料的塑料,其生产过程需经过加聚或缩聚反应,并添加一定助剂,最终形成高分子聚合物材料<sup>[22]</sup>。研究发现引起塑料异味的物质主要是羰基化合物,包括醛类、酮类和酯类化合物等,并且萘烯和不饱和、支链的碳氢化合物比直链的碳氢化合物气味性更强<sup>[16,23]</sup>。例如用于食品包装薄膜的低密度聚乙烯(low density polyethylene, LDPE)不仅本身可降解产生己醛、辛醛等气味成分,其爽滑剂中的芥酸酰胺也可降解产生己醛、庚醛和 2-庚酮等气味物质<sup>[24]</sup>。高温条件下聚丙烯(polypropylene, PP)中的抗氧化剂 168 和抗氧化剂 1010 会发生降解,产生对叔丁基苯酚、2-甲基-5-(1-甲基乙基)苯酚、1-甲基-4-(1-甲基亚乙基)烯等具有刺激性气味的挥发性有机物<sup>[25]</sup>。

食品接触材料中加入的溶剂、助剂、添加剂及分解产物中包含的挥发性有机物<sup>[26]</sup>主要有烷烃类、烯烃类、芳香烃类、卤代烃类、酯类、醛类和酮类等,其中具有强烈气味的物质不但在与食品接触时易迁移至食品中,影响食品的味道,甚至许多物质能对人体组织产生致癌变、致畸变和致突变的“三致”作用,并且难以降解,在人体内有蓄积效应,危害性极大<sup>[27]</sup>。

例如,具有特殊芳香族气味的苯系物<sup>[28]</sup>是树脂材料的原料和良好溶剂,在食品包装中主要用于复合包装材料的原料、粘合剂和塑料印刷油墨的溶剂<sup>[29]</sup>。苯是世界公认

的致癌物质,其他苯系物(甲苯、乙苯、异丙苯、苯乙烯等)对人体的危害主要表现为皮肤和粘膜刺激症状、麻醉作用以及引起头晕、头痛、恶心、呕吐、全身无力等,严重中毒可发生昏迷、抽搐等症状<sup>[28]</sup>。

具有特殊辛辣气味和催泪性<sup>[28]</sup>的丙烯酸酯类物质是生产丙烯酸树脂的重要原料。而此类物质均有一定的毒性<sup>[28,30]</sup>。例如甲基丙烯酸甲酯对粘膜具有刺激作用,会导致头部眩晕、头痛以及全身无力等症状,严重时可能会损害神经系统和中枢系统<sup>[31]</sup>。而毒性更大的丙烯酸乙酯为致癌物,美国职业安全与健康管理局规定其空气中容许暴露浓度仅为甲基丙烯酸甲酯的二十分之一<sup>[28]</sup>。

常常用于生产制造食品接触材料的丁腈橡胶、丙烯腈-苯乙烯、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯等丙烯腈聚合物中残留的腈类化合物,如丙烯腈等,会引起呼吸道刺激、呼吸加快、头痛甚至昏迷和呼吸心跳停止而死亡<sup>[32]</sup>。

### 3 主要分析技术

#### 3.1 人工感官分析

人工感官分析通过人的感觉器官对产品的特征和品质进行检测,以便得出准确可靠的数据和结论。人工感官在食品接触材料中的气味分析具有极其重要的作用。在国外,食品接触材料领域最广泛使用的人工感官分析标准为德国标准 DIN10955<sup>[33]</sup>、EN 1230-1<sup>[34]</sup>、EN 1230-2<sup>[35]</sup>。国内关于食品接触材料气味感官分析的标准主要基于 GB/T 35773《包装材料及制品气味的评价》<sup>[5]</sup>和 SN/T 3179《食品接触材料检测方法 纸和纸板感官分析气味》<sup>[6]</sup>。人工感官分析的过程一般是让若干受过专业训练的感官人员对与食品接触材料接触的原始包装产品或食品模拟物的气味进行人工嗅辨并分级,取平均值进行结果判定。

人工感觉器官非常敏感,可以嗅到阈值极低的迁移物质,并且该方法与普通消费者对食品接触材料的感受一致性较强<sup>[36]</sup>,但却无法获知气味的成分、来源、危害性等信息<sup>[37,38]</sup>。此时必须用到现代仪器分析手段。

#### 3.2 现代仪器分析

目前用于挥发性气味物质的仪器分析技术,主要包括 HS、HS-SPEM、TD、电子鼻等测试手段与 GC、GC/MS 和 GC-O-MS 之间的串联使用。

##### 3.2.1 顶空分析技术

顶空分析通常被定义为气相萃取,是在已达到平衡的密闭容器中对液体或固体样品基质上方的气体进行定性和定量分析<sup>[39]</sup>,所以顶空气态取样分析的技术具有避免将复杂基质成分带入到分析仪器系统中,从而减少对挥发性组分分析的干扰的优点<sup>[40]</sup>。

由于具有气味的物质多为挥发性有机物,故目前实验室通常将样品直接放入顶空瓶内进行一定时间的孵化后

进入 GC 或 GC/MS 进行分析。该方法能获知食品接触材料中挥发性有机物的种类、成分,甚至可以定量分析,所以 HS 分析技术在气味分析方面有独特的意义和价值<sup>[41]</sup>。

早在 1979 年,德国健康政府部门将 HS-GC 作为检测聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)产品以及与其直接接触的食品中微量单体氯乙烯的官方方法<sup>[42]</sup>。

目前,顶空技术最多应用在食品接触材料中挥发性有机物的分析测试。在该技术的应用过程中,顶空条件、检出限、检测通量等技术不断的得到优化和改善<sup>[43,44]</sup>。例如研究表明高温利于样品中挥发性有机物的挥发和扩散,可在一定程度上提高灵敏度,降低检出限。这对于挥发性有机物含量较低的实际样品具有很高的实用价值。

刘宝圣等<sup>[45]</sup>利用 HS-GC/MS 法同时检测了食品包装材料中包括异丙醇、乙酸乙酯、苯、乙酸丙酯、甲苯、乙酸丁酯、乙苯以及邻、间、对-二甲苯等 10 种具有气味性的残留溶剂。在以上相同取样量的情况下优化条件,获得物质的定量限为 0.001 mg/m<sup>2</sup>,可满足各物质的限量要求。

王建玲等<sup>[46]</sup>采用 HS-GC/MS 法对食品接触塑料制品中 32 种挥发性有机物进行了测试分析。将食品接触塑料制品剪成颗粒状,取 0.1 g 进行 90 °C 40 min 的顶空加热后,进入 GC/MS 测定,得到不同挥发性物质的定量限均在 5 mg/kg 以下。

将顶空技术运用在基质较为复杂的食品气味分析中具有明显的优势。如 Ang 等<sup>[10]</sup>分别利用人工感官和 HS-GC/MS 来分析大豆分离蛋白浆的顶空气味,其中 HS 可模拟人工感官时样品的顶空条件,对顶空气味物质进行定量。利用 HS 避免了样品制备时溶剂的使用,也避免了通过加热或真空进行浓缩和蒸馏从而导致沸点较低的挥发物发生损失的情况。该分析方法在水稻蛋白质样品中的主要气味分析中也取得了较好的成果。与易造成低分子量化合物损失的溶剂辅助香味物质蒸发法的实验结果相比,顶空分析能够成功检测出水稻蛋白质中具有代表性的芳香气味物质的主要成分<sup>[9]</sup>。然而,顶空分析灵敏度极其有限,因此它只能检测出含量最丰富的物质和最强烈的气味。

因此在食品接触材料领域,顶空技术可借鉴食品气味分析并结合食品接触材料中挥发性有机物的检测手段,对食品接触材料中的挥发性气味物质进行检测分析。顶空技术虽然可以排除难挥发性物质以及溶剂基质对于进样系统的影响,并且操作简便,易于实施,但是顶空所取的样品量一般较少,灵敏度有限<sup>[47]</sup>,而对于阈值较低的挥发性气味物质,顶空技术可能无法达到其定量分析所需的检出限,此时顶空对于分析挥发性气味物质是不适合的<sup>[48]</sup>。并且顶空分析时通常需要将样品加热到一定温度,这样虽然有利于挥发性物质的挥发,但也同样增加了样品中的副反应<sup>[49]</sup>,如顶空加热处理后测试所得的物质与人在常温下闻到的真实气味物质存在一定的差异,导致测试结果失真。

因此,急需一个取样量少,灵敏度高,并且在常温下即可富集样品,可以反映样品真实情况的检测手段,如顶空固相微萃取技术。

### 3.2.2 顶空-固相微萃取

HS-SPME 法是一种新的样品采集技术,是以涂渍在石英玻璃纤维上的固定相(高分子涂层或吸附剂)作为吸收(吸附)介质,对目标分析物进行萃取和浓缩,并在 GC 进样口中通过热解吸,进入到检测器中进行分析检测的技术。这一技术适合于挥发性和半挥发性有机物的分析<sup>[50]</sup>。由于可将分析物浓缩富集在固相微萃取涂层上,该技术可将检出灵敏度提高几倍到几十倍<sup>[51]</sup>。HS-SPME 具有成本低、无需有机溶剂、样品需求少但灵敏度高、操作简便等特点,能较准确地反映样品中的挥发性组成。

SPME 技术最早可追溯于 1989 年, Belardi 与 Pawliszyn 等<sup>[52]</sup>为了节省样品处理时间,将样品的前处理和气相色谱进样口相结合,即将涂渍固定相的石英丝置于样品水溶液中进行吸附,而后取出吸附有待分析物的石英丝置于 GC 的气化室中进行分析,从而开启 SPME 技术的发展<sup>[53]</sup>。

最初的 SPME 与 GC 联用技术主要应用于环境中挥发性的有机污染物的检测分析,如:农药、苯及其同系物、抑菌剂残留、酚类、多氯联苯、多环芳烃、芳香胺化合物、醛类等<sup>[54-56]</sup>。目前的 SPME 已广泛应用于食品、医药化工、临床等各个方面。

对于 HS-SPME 技术,其吸附和脱附时间、搅拌、加盐、萃取头的选择等诸多因素对于目标物的吸附效果具有重要的影响。康平等<sup>[57]</sup>利用 HS-SPME-GC/MS 对饮用水中主要引起发霉气味的土臭素(geosmin)和 2-甲基异莰醇(MIB)成分进行检测分析时,同时对 HS-SPME 的前处理条件进行了优化。结果表明,对水样进行搅拌可提高对目标物的吸附量,吸附最佳时间为 30 min,SPME 进行吸附时加盐可降低目标物的溶解度,提高其分配系数。利用 SPME 技术,可解决分析低浓度样品时需大量取样的问题,并且避免高沸点化合物的干扰。

不同 SPME 萃取头对于不同物质具有不同的萃取效果,这种取样方法不能保证“平衡覆盖”所有的分析目标物,例如,水溶性差、挥发性好的化合物容易被 SPME 富集,相反则不易被富集<sup>[58]</sup>。因此利用 HS-SPME 技术进行挥发性气味物质的检测时,选择合适的萃取头极其重要。萃取头的性质决定了 HS-SPME 方法的应用范围。因此,研制更多新型涂层和改进涂渍的技术,将会大大拓宽 SPME 的应用范围。

SPME 萃取头的选择和使用在水中具有特殊芳香族气味的挥发性物质-苯系物的测定中得到了有效的体现<sup>[59]</sup>。例如分析苯及其同系物时,主要用到的萃取头为聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS),而新型萃取头聚丙

烯酸酯(polyacrylate, PA)、聚二甲基硅氧烷/Carboxen (PDMS/CAR)、聚二甲基硅氧烷/二乙烯基苯(polydimethylsiloxane/divinylbenzene, PDMS/DVB)等也同样有所报道。

刘瑛等<sup>[60]</sup>分析纺织品中的异味时选用的 SPME 萃取纤维膜为 70  $\mu\text{m}$  乙二醇二乙烯基苯共聚物,并且通过对样品的多次取样分析,获取到了霉味、高沸点石油味(如汽油、煤油味)、鱼腥味、芳香烃气味、香味物质气相色谱的指纹图谱,为后续的挥发性或气味物质的分析,做了数据库的积累。

近年来,HS-SPME 技术在食品接触材料在食品接触材料领域的应用越来越多。Osorio 等<sup>[12]</sup>采用 HS-SPME 技术和 GC-O-MS 用于鉴别淀粉基聚合物食品接触材料中的 35 种气味化合物,发现醛类物质是影响淀粉基材料的主要气味物质。Ezquerro 等<sup>[61]</sup>利用 GC-MS 来测定食品接触材料中挥发性气味物质,分别对比了 HS-SPME 和 HS 样品制备技术提取的样品在 MS 上的色谱特征,发现 HS-SPME 方法在灵敏度方面要远远优于 HS 法。

Vera 等<sup>[13,37,62]</sup>利用 HS-SPME 技术在食品接触材料气味分析领域也取得了许多实质性的进展。Vera 等<sup>[37]</sup>利用顶空-固相萃取(headspace-solid-phase extraction, HS-SPE)和 HS-SPME 技术,结合 GC-O-MS,分别采用 PDMS 和 DVB/CAR/PDMS 萃取头对食品包装材料中的热熔型和其他类型(包括乙烯醋酸乙烯,淀粉,聚醋酸乙烯和丙烯酸)共 5 种胶粘剂进行了的分析。胶粘剂中具有气味特征的挥发性的化合物多达 33 种,其中分别具有奶酪味、酸臭味、酸味、医药味和香草气味的丁酸、乙酸、丁酸甲酯、1-丁醇和壬醛等普遍存在于多数胶粘剂中,并且乙酸含量最大。

随后,该技术也被运用于可生物降解聚乙烯中的气味物质的定性定量分析中<sup>[13]</sup>。经 HS-SPME-GC/MS 和 HS-SPME-GC-O-MS 2 种检测技术的分析后,多达 62 种不同的气味化合物被鉴定出。其中含量最大的(Z)-3-己烯酸具有李子的水果香味。但是包括 2-十二烯醛在内多达十余种的化合物均无法被 MS 检测,却可以通过 GC-O 进行检测,这表明 GC-O-MS 不仅具有 GC/MS 能够分析样品化合物的组成的特点,甚至还能够鉴别挥发性化合物的类别、气味强度,灵敏度高。GC-O-MS 与 HS-SPME 技术相结合,对气味分析具有十分重要的作用。

近日,HS-SPME-GC-O-MS 技术又被应用到用于食品包装材料的聚丙烯、聚乙烯、纸和纸板材质样品中挥发性气味物质的 Tenax 迁移实验研究中<sup>[62]</sup>。样品被 HS-SPME 富集后,经气相色谱解吸分离分别进入嗅探端口进行人工感官分析,鉴别挥发性气味物质的感官特性;或者进入 MS 端进行定量分析,计算挥发性气味物质的迁移量,判断其合规性,评估该挥发性气味物质对人体的危害性。经

过 GC-O-MS 分析发现,在 PP、PE 和纸制品中,气味最强的化合物是带有脂肪气味的醛类。具有醋酸和腐臭气味的乙酸、丙酸、丁酸存在于 PP 样品中。而硬纸板和纸张样品中则含有带有木质、溶剂和油性气味的萜烯和三甲基苯。

由此可见,HS-SPEM 结合 GC/MS 和 GC-O-MS 技术可对食品接触材料进行有效的气味分析,并且可实现食品接触材料中阈值较低的挥发性气味物质的气味鉴别和定性定量分析。SPEM 的前处理技术在食品接触材料气味分析领域的应用最为广泛。

### 3.2.3 热脱附分析技术

液体进样时高聚物极易导致进样口的污染和堵塞,而顶空进样时高温加热可能引起聚合物样品发生分解,从而影响最后测定结果<sup>[49,63]</sup>。TD 与 GC/MS 联用技术可直接通过吸附管将固体或液体样品中的挥发性组分进行低温富集,再进行快速升温脱附后直接导入 GC/MS 或 GC-O-MS 中进行分离和检测,从而提高了样品中挥发性有机物的检出限,同时也可具有顶空技术的优点。

TD 分析技术最常应用于环境空气中挥发性有机物的分析<sup>[64]</sup>。朱晓平等<sup>[65]</sup>利用 TD 和 GC/MS 对环境空气样品中挥发性有机物的检测已达到 67 种,包括芳香烃、脂肪烃、卤代烃和含氧挥发性有机物等。并考察了 5 种不同填充材料的不锈钢吸附管对 78 种挥发性有机物的吸附能力。研究发现吸附材料对分析物的捕集效果十分重要。极易挥发性有机物(沸点小于 100°C)可能不易被某些吸附材料(如 Tenax TA 填料)吸附,这对如何选择合适的吸附管进行科学研究具有重要的启示。

TD 技术在食品接触材料中的应用,包括纸塑复合材料、纸基材料、塑料复合材料、铝塑复合材料等,主要对其残留的醇类、苯、酮、酯等代表性挥发性物质进行检测<sup>[66]</sup>。方法中样品采用冷冻粉碎处理后置于空白热脱附管中,为防止样品中的挥发性物质发生过早解吸,将脱附管插入低于室温的解吸室中,随后升温脱附,经 GC/MS 进行检测后可得检出限 0.07~0.11 mg/L,回收率 92.7%~112.5%,相对标准偏差 < 3.3%,  $R^2 > 0.9890$  等较好的分析效果。

对于其他材质的 FCM,也可借鉴。

TD 还常与环境舱配合使用,此时环境舱可模拟样品在实际使用中的条件,能够更直观反映样品在使用过程中释放的挥发性物质。如家具中总挥发性有机物释放<sup>[67]</sup>的探究和软体家具面料中的挥发性物质<sup>[68]</sup>的研究。其方法是将样品放入环境舱中,控制环境舱中的温度、湿度以及空气速率等。样品放入环境舱一定时间后,以一定的流速对环境舱中的空气进行采集,挥发性物质经热脱附后进入 GC/MS 分析。对于较大体积的食品接触材料也可采用此方法,模拟实际储存温度或实际使用情况对样品进行气味分析。

TD 技术与 GC-O-MS 结合使用可用于气味分析。Villberg 等<sup>[16]</sup>对 LDPE 在挤出涂层时产生的烟雾进行了异

味分析。与分析环境空气样品的处理方法类似,Villberg 用 Tenax GR 吸附管分别收集了 285 °C 和 315 °C 两种温度下挤出机(热熔体)附近空气和出料管内部烟雾。经 GC-O-MS 检测,样品中气味最大的化合物为羧酸类化合物。并且能检测到的气味随挤出温度升高而增多。

TD 技术在食品接触领域中的应用仍在不断发展。TD 技术具有 HS 和 SPEM 技术的诸多优点,配合环境舱使用后不仅可以模拟样品的实际使用情况,还可避免 HS 和 SPEM 对少量样品进行检测时,样品的代表性和均匀性不够等缺点。因此将 TD 技术结合 GC/MS 或 GC-O-MS 在食品接触材料气味分析方面具有较好的发展前景。

### 3.2.4 电子鼻

电子鼻是采用传感器模拟人的嗅觉来分析样品气味的一种新型仪器,能够分析识别和检测混合挥发性气体的信息特征,从而对气味进行识别和预测气味强度等级,分辨不同样品之间的气味差异<sup>[69]</sup>。具有快速、客观等优点<sup>[70,71]</sup>。1994 年,“电子鼻”的概念<sup>[72]</sup>被提出之后,电子鼻研究便取得了快速进展。目前电子鼻已广泛应用在烟草行业<sup>[73]</sup>、食品工业<sup>[74,75]</sup>、精细化工<sup>[76]</sup>、医药<sup>[77]</sup>、环境监测<sup>[78,79]</sup>等领域中。其中,Zhu 等<sup>[80]</sup>利用电子鼻代替人工感官分析,结合 HS 分析方法,检测分析了药物制剂中的香精。研究表明,电子鼻可以识别不同的香精原料,还可以定量分析口服溶液制剂中的香精,用于测定口服液制剂释放试验期间的香精浓度,甚至可以监测销售包装瓶中香精的有效期。

在食品领域的应用上,迟雪露等<sup>[81]</sup>利用人工感官分析法和电子鼻分别评价脱脂纯牛奶的风味属性。并采用主成分分析(principal component analysis, PCA)和聚类分析(cluster analysis, CA)结合偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)法对电子鼻的传感器性能和人工感官属性进行相关性分析,结果表明电子鼻可以较好地预测不同品牌脱脂纯牛奶的感官属性。

塑料制品广泛应用于食品接触材料领域,其生产过程中加入的添加剂含有许多挥发性物质,往往使最终产品产生不愉快的气味。用电子鼻检测塑料的气味比感官的检测更节省时间、更客观、准确<sup>[82]</sup>。

Torri 等<sup>[83]</sup>使用便携式电子鼻和人工感官分析法对应用于食品包装的 25 种聚乙烯和 5 种 PP 的气味进行了分析,研究表明电子鼻可以对不同的树脂样品进行有效的区分,并且可以得到与感官评价相一致的分类结果。利用电子鼻的数据模型可以有效地将传感器阵列数据与感官评价数据相关联,并用于预测样品的气味等级。

魏峰等<sup>[84]</sup>使用 Alpha MOS 公司的 Fox 4000 电子鼻进行快速分析,研究了不同助剂配方对透明聚丙烯母料气味的影响,并选用合适的配方组合,得到性能接近进口成核剂的国产透明成核剂,有效减少反复试验的次数,提高了生产效率。

康鹏等<sup>[85]</sup>同样利用 Fox 4000 电子鼻系统配合 S-HS 进样技术, 对不同聚丙烯树脂的气味差异进行探究, 并优化了电子鼻各检测参数, 最终确定作为关键影响因素的顶空温度和顶空时间分别为 120 °C, 30 min。经研究发现在合适的条件下 PCA 模型可以对聚丙烯树脂的气味强度进行准确分析, 并且可以用来识别 PP 树脂气味。

综上, 电子鼻已广泛应用在不同领域中的气味分析, 借鉴电子鼻在食品、高分子材料、医药等的应用, 可实现对食品接触材料中挥发性气味物质的区分, 利用气味特征分辨不同样品之间的差异, 从而获取较为理想的气味分析结果。但是目前应用最为广泛的传感电子鼻无法给出详细的气味物质成分信息, 必须配合 GC/MS 对样品中的气味物质进行鉴别。

### 3.3 食品接触材料气味分析解决方案

表 1 描述各气味分析方法优缺点, 结合表 1 和依据以上气味分析方法综述, 可提出以下食品接触材料气味分析解决方案: (1)对于样品初筛或者气味较重的样品,

可首先进行耗时较短的 HS-GC/MS 或 HS-GC-O-MS 分析, 对于样品量较少、阈值较低的气味物质采用此法只能对样品进行简要分析和初步筛选; (2)对于“散发”气味物质的材料, 可将一定量的样品放置在密封气袋中, 常温下挥发一定时间后, 用 SPME 萃取头吸附挥发出来的气味物质, 然后进入 GC/MS 或 GC-O-MS 进行分析; (3)而针对样品量大、体积较大的样品或者需模拟实际使用情况的样品, 应采用 TD 法, 将样品置于标准环境舱内, 常温下挥发指定的时间, 选择合适的 Tenax 吸附管采集环境舱内的空气样品, 经热解析后进入 GC/MS 或 GC-O-MS 分析; (4)对需要进行快速分析、区分不同样品间的气味差异(尤其对正常样品和有异味样品的对比分析)或者对气味浓度给出分级的样品, 可利用 HS、HS-SPME 取样后, 进入电子鼻进行分析; (5)人工感官分析是目前具有标准支持的测试手段, 在进行仪器分析时可同时结合人工感官分析对食品接触材料进行气味鉴别和等级判断, 从而给出合规性评判。

表 1 气味分析方法优劣势  
Table 1 Comparison of different odor analysis methods

分析技术	优点	缺点
人工感官分析法	对气味敏感, 可嗅到阈值极低的物质; 能够感知样品的实际气味。	无法区分和辨别气味成分和来源; 主观性强。
顶空法	操作简便; 可避免复杂基质干扰; 避免低分子量化合物的损失; 可对气味物质成分进行定性定量分析。	灵敏度低; 顶空加热发生副反应, 导致测试结果失真; 取样量少, 样品的代表性和均匀性不够。
顶空-固相微萃取法	成本低; 无需有机溶剂; 可避免高沸点化合物的干扰; 样品需求少; 灵敏度高; 操作简便; 可对气味物质种进行定性定量分析。	不能保证覆盖所有化合物, 不同萃取头的选择性有限; 取样量少, 样品的代表性和均匀性不够。
热脱附法	可模拟样品在实际使用中的条件; 灵敏度高, 拥有顶空和固相微萃取的诸多优点。	需根据样品中的物质类型选择合适的吸附管
电子鼻法	快速分析; 可根据物质的气味特征, 分辨样品间的气味差异。	维护要求高: 传统的传感器对灰尘、水和二氧化碳非常敏感, 须定期校准; 无法给出详细的气味物质成分信息, 必须配合 GC/MS 对样品中的气味物质进行鉴别。

## 4 结论与讨论

目前, 针对于食品接触材料的气味分析测试方法还不够成熟, 需要借鉴食品、环境、医药等对于挥发性气味物质的分析, 说明食品接触材料气味分析技术依旧具有较大的发展空间。在对食品接触材料挥发性气味物质的研究中, 可运用顶空、顶空-固相微萃取、热脱附和电子鼻串联 GC、GC/MS 或 GC-O-MS 等仪器测试方法, 结合已有的研究成果, 针对食品接触材料的实际使用情况, 制定合理的分析技术方案, 及时检测和分析食品接触材料中的挥发性气味物质的种类和来源, 促进生产工艺上的改进, 从根源上消除污染物质, 从而保证食品安全和改善消费者的用户

体验, 满足消费者对于质量安全的要求。在以后的发展中, 高分辨质谱及二维色谱等更加先进的仪器对于提高食品接触材料挥发性气味物质的检出灵敏度以及改善其定性手段可提供强有力的技术支持, 而检测仪器的微型化和便携化也将成为仪器分析领域的发展趋势。

### 参考文献

- [1] Vera P, Canellas E, Nerina C, *et al.* Compounds responsible for off-odors in several samples composed by polypropylene, polyethylene, paper and cardboard used as food packaging materials [J]. Food Chem, 2020, (309): 125792–125811.
- [2] Regulation (EC) No 1935/2004 of the European Parliament and of the council of 27 October 2004 on materials and articles intended to come into contact with food and repealing directives 80/590/EEC and 89/109/EEC



- [S].
- [3] 21 CFR Part 174-Indirect food additives: General [S].
- [4] GB 4806.1-2016 食品安全国家标准 食品接触材料及制品通用安全要求[S].  
GB 4806.1-2016 National food safety standard-General safety requirements on food contact materials and articles [S].
- [5] GB/T 35773-2017 包装材料及制品气味的评价[S].  
GB/T 35773-2017 Assessment for odor of packing materials and products [S].
- [6] SN/T 3179-2012 食品接触材料检测方法 纸和纸板感官分析 气味[S].  
SN/T 3179-2012 Food contact materials-paper and board-Sensory analysis-Odour [S].
- [7] Kakuda DY. Headspace analysis of food and flavors, theory and practice [J]. Trends Food Sci Technol, 2001, (12): 392.
- [8] Margaux C, Georgia L, Jean CB. Static headspace analysis using low-pressure gas chromatography and mass spectrometry, application to determining multiple partition coefficients: A practical tool for understanding red wine fruity volatile perception and the sensory impact of higher alcohols [J]. Anal Chem, 2018, (90): 10812-10818.
- [9] Zhao J, Boatright WL. Static headspace analysis of odorants in commercial rice proteins [J]. Food Chem, 2016, (221): 345-350.
- [10] Ang EC, Boatright WL. Olfactory perception of major odorants found in the headspace of aqueous soy protein isolate slurries [J]. J Food Sci, 2006, (68): 388-393.
- [11] Ezquerro O, Pons B, Tena MT. Development of a headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry method for the identification of odour-causing volatile compounds in packaging materials [J]. J Chromatogr A, 2002, (963): 381-392.
- [12] Osorio J, Aznar M, Nerin C. Identification of key odorant compounds in starch-based polymers intended for food contact materials [J]. Food Chem, 2019, (285): 39-45.
- [13] Wrona M, Vera P, Pezo D, *et al.* Identification and quantification of odours from oxobiodegradable polyethylene oxidised under a free radical flow by headspace solid-phase microextraction followed by gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry [J]. Talanta, 2017, (172): 37-44.
- [14] Hopfer H, Haar N, Stockreiter W, *et al.* Combining different analytical approaches to identify odor formation mechanisms in polyethylene and polypropylene [J]. Anal Bioanal Chem, 2011, (4022): 903-919.
- [15] Zhu JC, Xiao ZB. Characterization of odor-active volatiles in hawthorn puree using thermal desorption system coupled with gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry and GC-flame photometric detector [J]. J Agric Food Chem, 2018, (66): 12296-12305.
- [16] Villberg K, Veijanen A. Analysis of a GC/MS thermal desorption system with simultaneous sniffing for determination of off-odor compounds and VOCs in fumes formed during extrusion coating of low-density polyethylene [J]. Anal Chem, 2001, 73(5): 971-977.
- [17] Brattoli M, Gennaro G, Pinto V, *et al.* Odour detection methods: Olfactometry and chemical sensors [J]. Sensors, 2011, (11): 5290-5322.
- [18] Wang M, Zhang J, Chen J, *et al.* Characterization of differences in flavor in virgin rapeseed oils by using gas chromatography-mass spectrometry, electronic nose, and sensory analysis [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2019. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201900205>
- [19] Anselme C, N'Guyen K, Bruchet A, *et al.* Can polyethylene pipes impart odors in drinking water? [J]. Environ Technol Lett, 1985, (6): 477-488.
- [20] Czerny M, Buettner A. Odor-active compounds in cardboard [J]. J Agric Food Chem, 2009, (57): 9979-9984.
- [21] Salafranca J, Clemente I, Isella F, *et al.* Influence of oxygen and long term storage on the profile of volatile compounds released from polymeric multilayer food contact materials sterilized by gamma irradiation [J]. Anal Chim Acta, 2015, (878): 118-130.
- [22] 郝倩, 苏荣欣, 齐威, 等. 食品包装材料中有害物质迁移行为的研究进展[J]. 食品科学, 2014, (35): 279-286.  
Hao Q, Su RX, Qi W, *et al.* Review of current knowledge on the migration of harmful substances from food packaging materials [J]. Food Sci, 2014, (35): 279-286.
- [23] Villberg K, Veijanen A, Gustafsson I, *et al.* Analysis of odour and taste problems in high-density polyethylene [J]. J Chromatogr A, 1997, (91): 213-219.
- [24] Bigger SW, O'Connor MJ, Scheirs J, *et al.* Odor characterization of low-density polyethylene used for food-contact applications [J]. ACS Pub, 1996, (249): 249-268.
- [25] Espert A, Heras LADL, Karlsson S. Emission of possible odorous low molecular weight compounds in recycled biofibre/polypropylene composites monitored by head-space SPME-GC-MS from food packaging materials [J]. Food Sci, 2014, (35): 279-286.
- [26] 郭旭东, 陈意光, 张沛林, 等. 六种塑料制品中挥发性有机物分析研究[J]. 当代化工, 2018, 47(4): 809-813.  
Guo XD, Chen YG, Zhang PL, *et al.* Research on volatile organic compounds in six types of plastic products [J]. Contempor Chem Ind, 2018, 47(4): 809-813.
- [27] 李友平, 唐娅, 范忠雨, 等. 成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评估[J]. 环境科学, 2018, (39): 576-583  
Li YP, Tang Y, Fan ZY, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in Chengdu [J]. Environ Sci, 2018, (39): 576-583
- [28] 程能林. 溶剂手册第四版[M]. 北京: 化学工业出版社, 1986.  
Cheng NL. Handbook of solvent 4th edition [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1986.
- [29] 张秋菊, 樊珠凤. 塑料食品包装材料中苯系物来源、迁移与检测方法[J]. 中国卫生检验杂志, 2013, (18): 159-161.  
Zhang QJ, Fan ZF. Source, migration and detection method of benzene series in plastic food packaging materials [J]. Chin J Health Lab Technol, 2013, (18): 159-161.
- [30] 李英, 李成发, 陈旭辉, 等. 固相微萃取-气相色谱/质谱法测定塑料食品接触材料中 5 种丙烯酸酯类单体迁移量[J]. 塑料科技, 2014, (42): 115-119.  
Li Yi, Li CF, Chen XH, *et al.* Determination of five kinds of acrylate monomers migrated from plastic food-contacting materials by SPME with GC/MS [J]. Plast Sci Technol, 2014, (42): 115-119.
- [31] 罗圣庆, 王蓂兰. 甲基丙烯酸甲酯的毒性研究[J]. 国外医学(卫生学分册), 1981, (1): 13-15, 56.  
Luo SQ, Wang YL. Research on toxicity of methyl methacrylate [J]. For Med Sci (Sec Hyg), 1981, (1): 13-15, 56.
- [32] 韩陈, 袁琳嫣, 孙衍, 等. 顶空-气相色谱法测定聚丙烯类食品接触材料中 3 种腈类化合物迁移量规律[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, (6): 1684-1689.  
Han C, Yuan LY, Sun K, *et al.* Determination of migration of 3 kinds of nitrile compounds in polyacrylonitrile food contact materials by headspace-gas chromatography [J]. J Food Saf Qual, 2019, (6): 1684-1689.
- [33] DIN 10955 Sensory analysis-Testing of packaging materials and packages

- for foodstuffs [S].
- [34] EN 1230-1-Paper and board intended to come into contact with foodstuffs - Sensory analysis - Part 1: Odour [S].
- [35] EN 1230-2-Paper and board intended to come into contact with foodstuffs - Sensory analysis - Part 2: Off-flavour [S].
- [36] Vera P, Canellas E, Nerin C. Migration of odorous compounds from adhesives used in market samples of food packaging materials by chromatography olfactometry and mass spectrometry (GC-O-MS) [J]. *Food Chem*, 2014, (145): 237-244.
- [37] Vera P, Uliaque B, Canellas E, *et al.* Identification and quantification of odorous compounds from adhesives used in food packaging materials by headspace solid phase extraction and headspace solid phase microextraction coupled to gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry [J]. *Anal Chim Acta*, 2012, (745): 53-63.
- [38] Huber M, Ruiz J, Chastellain F, *et al.* Off-flavour release from packaging materials and its prevention: A foods company's approach [J]. *Food Add Contam*, 2002, (19): 221-228.
- [39] Wang Y, McCaffrey J, Norwood DL, *et al.* Recent advances in headspace gas chromatography [J]. *J Liquid Chromatogr Related Technol*, 2008, (31): 1823-1851.
- [40] 柴欣生, 付时雨, 莫淑秋, 等. 静态顶空气相色谱技术[J]. *化学进展*, 2008, (20): 262-266.  
Chai XA, Fu SY, Mo SH, *et al.* Static headspace-gas chromatography [J]. *Prog Chem*, 2008, 20(20): 262-266.
- [41] Marriott PJ, Shellie R, Cornwell C, *et al.* Gas chromatographic technologies for the analysis of essential oils [J]. *J Chromatogr A*, 2001, (936): 1-22.
- [42] Kolb B, Ettre LS. Static headspace-gas chromatography theory and practice [Z].
- [43] 徐春祥, 杨洋, 高俊伟, 等. 食品包装复合膜中 15 种溶剂残留的同时测定方法[J]. *食品科学*, 2008, (29): 496-498.  
Xu CY, Yang Y, Gao JW, *et al.* Simultaneous determination of 15 kinds of residual organic solvents in laminated films used for food packages by head-space gas chromatography [J]. *Food Sci*, 2008, (29): 496-498.
- [44] 许涵秋. 顶空气相色谱法测定食品包装复合膜中挥发性有机物[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014, (4): 1204-1208.  
Xu HQ. Determination of residual organic solvents in laminated films used for food packages by HS-GC [J]. *J Food Saf Qual*, 2014, (4): 1204-1208.
- [45] 刘宝圣, 段永生, 马育松, 等. 顶空进样气相色谱质谱法同时检测食品包装材料中的 10 种残留溶剂[J]. *食品安全质量检测学报*, 2013, (6): 1853-1858.  
Liu BS, Duan YS, Ma YS, *et al.* Determination of 10 residual solvents in food packaging material by headspace gas chromatography-mass spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2013, (6): 1853-1858.
- [46] 王建玲, 孙春燕, 刘艇飞. 顶空气相色谱-质谱联用法测定食品接触塑料制品中 32 种挥发性物质[J]. *分析实验室*, 2015, (8): 116-121.  
Wang JL, Sun CY, Liu TF. Determination of 32 VOCs in food contact material plastic articles by headspace gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Chin J Anal Lab*, 2015, (8): 116-121.
- [47] 张茜, 刘伟伦, 路亚楠, 等. 顶空气相色谱-质谱联用技术的应用进展[J]. *色谱*, 2018, (36): 28-37.  
Zhang Q, Liu WL, Lu YN, *et al.* Recent advances in the application of headspace gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Chin J Chromatogr*, 2018, (36): 28-37.
- [48] Sghaier L, Vial J, Sassiati P, *et al.* Analysis of target volatile compounds related to fishy off-flavor in heated rapeseed oil: A comparative study of different headspace techniques [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2016, (118): 906-918.
- [49] 王昊阳, 郭寅龙, 张正行, 等. 顶空-气相色谱法进展[J]. *分析测试技术与仪器*, 2003, (9): 2-8.  
Wang HY, You YL, Zhang ZX, *et al.* The progress of headspace-gas chromatography analysis [J]. *Anal Test Technol Instrum*, 2003, (9): 2-8.
- [50] 傅若农. 固相微萃取(SPME)的演变和现状[J]. *化学试剂*, 2008, (30): 13-22.  
Fu RN. The evolution and advances of solid-phase microextraction [J]. *Chem Reagents*, 2008, (30): 13-22.
- [51] 马继平, 王涵文, 关亚凤. 固相微萃取新技术[J]. *色谱*, 2002, (1): 18-22.  
Ma JP, Wang HW, Guan YF. New technologies of solid-phase microextraction [J]. *Chin J Chromatogr*, 2002, (1): 18-22.
- [52] Pawliszyn, Janusz, Liu S. Sample introduction for capillary gas chromatography with laser desorption and optical fibers [J]. *Anal Chem*, 1987, (59): 1475-1478.
- [53] Louch D, Motlagh S, Pawliszyn J. Dynamics of organic compound extraction from water using liquid-coated fused silica fibers [J]. *Anal Chem*, 1992, (64): 1187-1199.
- [54] Arthur CL, Pratt K, Motlagh S, *et al.* Environmental analysis of organic compounds in water using solid phase micro extraction [J]. *J Separ Sci*, 2015, (15): 741-744.
- [55] Chai M, Arthur CL, Pawliszyn J, *et al.* Determination of volatile chlorinated hydrocarbons in air and water with solid phase microextraction [J]. *Analyst*, 1993, (118): 1501-1505.
- [56] Buchholz KD, Pawliszyn J. Determination of phenols by solid-phase microextraction and gas chromatographic analysis [J]. *Environ Sci Technol*, 1993, (27): 2844-2848.
- [57] 康平利, 杨青. 固相微萃取气-质联用技术在饮用水气味分析中的应用[J]. *沈阳化工大学学报*, 2000, (1): 73-76.  
Kang PL, Yang Q. Analysis of odors in drinking water by GC/MS with solid phase microextraction [J]. *J Shenyang Instit Chem Technol*, 2000, (1): 73-76.
- [58] Gionfriddo E, Souza-Silva ÉA, Pawliszyn J. Headspace versus direct immersion solid phase microextraction in complex matrixes: investigation of analyte behavior in multicomponent mixtures [J]. *Anal Chem*, 2015, (87): 8448-8456.
- [59] 张俊花, 张洪林, 李长波, 等. 固相微萃取技术在水中苯系物测定中的应用[J]. *化学与粘合*, 2011, (33): 73-76.  
Zhang JH, Zhang HL, Li CB, *et al.* The application of solid-phase micro-extraction in determination of BTEX in water [J]. *Chem Adhesion*, 2011, (33): 73-76.
- [60] 刘瑛, 梁勇, 邓志光, 等. 固相微萃取气相色谱检测纺织品中异常气味[J]. *印染*, 2005, (31): 37-38.  
Liu Y, Liang Y, Zheng ZG, *et al.* Determination of peculiar smell in textiles by solid phase microextraction and gas chromatography [J]. *Dy Finish*, 2005, (31): 37-38.
- [61] Ezquerro O, Pons B, Tena MT. Development of a headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry method for the identification of odour-causing volatile compounds in packaging materials [J]. *J Chromatogr A*, 2002, (963): 381-392.
- [62] Vera P, Canellas E, Nerina C, *et al.* Compounds responsible for off-odors in several samples composed by polypropylene, polyethylene, paper and cardboard used as food packaging materials [J]. *Food Chem*, 2020, (309):



- 125792-125811.
- [63] 蒋霞, 向小亮. 用热脱附-GC/MS 分析 ABS 中挥发性有机化合物含量[J]. 怀化学院学报, 2017, (36): 54-57.  
Jian g X, Xiang XL. Determination of volatile organic compounds of ABS by using thermal desorption-GC/MS [J]. J Huaihua Univ, 2017, (36): 54-57.
- [64] 应红梅, 朱丽波, 徐能斌. 空气中挥发性有机物(VOCs)的监测方法研究[J]. 中国环境监测, 2003, (19): 24-29.  
Ying HM, Zhu LB, Xu NB. Determination of volatile organic compounds in indoor air and environmental air by gas chromatography and mass spectrometry coupled automated thermal desorber method [J]. Environ Monitor China, 2003, (19): 24-29.
- [65] 朱晓平, 马慧莲, 朱秀华, 等. 热脱附-气相色谱-质谱法测定环境空气中 67 种挥发性有机物[J]. 色谱, 2019, (37): 1228-1234.  
Zhu XP, Ma HL, Zhu XH, *et al.* Determination of 67 volatile organic compounds in ambient air using thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Chin J Chromatogr, 2019, (37): 1228-1234.
- [66] 熊中强, 杜宇, 庞震, 等. 热脱附-气相色谱/质谱法检测食品接触材料中有机残留物[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, (4): 1039-1045.  
Xiong ZQ, Du Y, Pang X, *et al.* Determination of organic residuals in food contact materials by thermal desorption-gas chromatography/mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2013, (4): 1039-1045.
- [67] 李倩, 徐微. 热脱附-气质联用工作条件对环境舱法研究家具 TVOC 释放的影响[J]. 上海计量测试, 2013, (5): 5-8.  
Li Q, Xu W. Research on the working conditions of thermal desorption-GC-MS in emitted TVOC from furniture based on environmental chamber method [J]. Shanghai Measur Test, 2013, (5): 5-8.
- [68] 文瑶, 曹淑瑞, 郗存显, 等. 环境舱-热脱附-气相色谱/质谱联用法测定软体家具面料中 40 种挥发性有机物[J]. 分析实验室, 2018, (6): 626-631.  
Wen Y, Cao SR, Xi CX, *et al.* Determination of 40 volatile organic compounds in soft furniture fabrics by environment test chamber-thermal desorption-gas chromatography/mass spectrometry [J]. Chin J Anal Lab, 2018, (6): 626-631.
- [69] Zhu D, Ren XJ, Wei LW, *et al.* Collaborative analysis on difference of apple fruits flavour using electronic nose and electronic tongue [J]. Sci Horticult, 2020, (260): 108879-108888
- [70] Swami SS. Application of electronic nose in food analysis [J]. Int J Agric Eng, 2010, (3): 110-114.
- [71] 毛友安, 刘巍, 钟科军. 电子鼻技术应用研究进展[J]. 化学传感器, 2009, (29): 17-22.  
Mao YA, Liu W, Zhong KJ. Development of electronic nose applications [J]. Chem Sensors, 2009, (29): 17-22.
- [72] Gardner JW, Bartlett PN. A brief history of electronic noses [J]. Sens Actuators B Chem, 1994, (18): 210-211.
- [73] Torri L, Piergiovanni L, Caldiroli E. Odour investigation of granular polyolefins for flexible food packaging using a sensory panel and an electronic nose [J]. Food Add Contam: Part A, 2008, (25): 490-502.
- [74] Ongo E, Falasconi M, Sberveglieri G, *et al.* Chemometric discrimination of philippine civet coffee using electronic nose and gas chromatography mass spectrometry [J]. Procedia Eng, 2012, (47): 977-980.
- [75] Goodner KL, Baldwin EA, MarÃ-a JJ, *et al.* Use of an electronic nose to differentiate NFC orange juices [J]. Proceed Florida State Horticult Soc, 2017, (388): 405-418.
- [76] 周围, 王波, 刘倩倩, 等. 基于电子鼻和 GC-MS 对不同品种玫瑰“活体”香气的研究[J]. 香料香精化妆品, 2017, (2): 1-6.  
Zhou W, Wang B, Liu QQ, *et al.* Study on aroma constituents of different cultivars of “Living” rose by electronic nose and GC-MS [J]. Flavour Fragr Cosmet, 2017, (2): 1-6.
- [77] Zhu L, Seburg RA, Tsai E, *et al.* Flavor analysis in a pharmaceutical oral solution formulation using an electronic-nose [J]. J Pharmaceut Biomed Anal, 2004, (34): 453-461.
- [78] Hassan M, Umar M, Bermak A, *et al.* Computationally efficient environmental monitoring with electronic nose: A potential technology for ambient assisted living [C]. 2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE). IEEE, 2016.
- [79] Baby RE, Cabezas M, Reza ENWD. Electronic nose: A useful tool for monitoring environmental contamination [J]. Sens Actuators B (Chem), 2000, (69): 214-218.
- [80] Zhu L, Seburg RA, Tsai E, *et al.* Flavor analysis in a pharmaceutical oral solution formulation using an electronic-nose [J]. J Pharm Biomed Anal, 2004, (34): 453-461.
- [81] 迟雪露, 宋铮, Muratshan K, 等. 脱脂纯牛奶感官评价与电子鼻分析相关性研究[J]. 精细化工, 2018, (35): 998-1003.  
Chi XL, Song Z, Muratshan K, *et al.* Study on correlation between sensory evaluation and electronic nose sensors analysis of skimmed milk [J]. Fine Chem, 2018, (35): 998-1003.
- [82] 刘亭利, 胡国清. 电子鼻的应用综述[J]. 传感器世界, 2007, (13): 6-10.  
Liu LT, Hu GQ. Summary of the electronic nose applications [J]. Sensorworld, 2007, (13): 6-10.
- [83] Torri L, Piergiovanni L, Caldiroli E. Odour investigation of granular polyolefins for flexible food packaging using a sensory panel and an electronic nose [J]. Food Add Contamin: Part A, 2008, (25): 490-502.
- [84] 魏峰, 徐振明. FOX4000 型电子鼻研究透明塑料母粒气味[J]. 现代塑料加工应用, 2010, (22): 43-45.  
Wei F, Xu ZM. Study on smell of transparent plastic masterbatch based on FOX4000 type electronic nose [J]. Mod Plast Process Appl, 2010, (22): 43-45.
- [85] 康鹏, 金滢, 石胜鹏, 等. 基于电子鼻技术的聚丙烯气味识别研究[J]. 塑料工业, 2015, (3): 126-129.  
Kang P, Jin Y, Shi SP, *et al.* Research on odor discrimination of polypropylene based on electronic nose [J]. China Plast Ind, 2015, (3): 126-129.

(责任编辑: 韩晓红)

### 作者简介



马宁宁, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为食品包装安全。

E-mail: mann@iqtc.cn



李丹, 硕士, 研究员, 主要研究方向为食品包装安全。

E-mail: lid@iqtc.cn