

# 烟草风味品质研究现状与发展趋势

庞雪莉, 孔凡玉, 邱 军\*

(中国农业科学院烟草研究所, 青岛 266101)

**摘要:** 风味品质是烟草质量的重要构成要素, 本文通过综合文献调研和数据可视化分析, 系统梳理当前国内烟草风味品质研究进展, 结合风味科学内涵, 总结了烟草风味科学研究的热点、前沿与挑战, 为基于风味工程技术的烟草产品风味品质提升、基于风味脑科学理论的风味生物学效应调节, 以及特色烟草产品和新应用开发提供思路和借鉴。

**关键词:** 烟草; 风味科学; 感官组学(分子感官科学); 发展展望

中图分类号: TS41<sup>†</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1007-5119 (2025) 04-0115-09

## Research Status and Trend of Tobacco Flavor Quality: An Overview and Analysis

PANG Xueli, KONG Fanyu, QIU Jun\*

(Institute of Tobacco Research of CAAS, Qingdao 266101, China)

**Abstract:** Flavor is a key determinant of tobacco quality and characterization. In this paper, the research status of the tobacco flavor is systematically reviewed through comprehensive literature research and data visualization analysis. Additionally, combined with the interpretation of the connotation of scientific research on tobacco flavor, future development trends as well as the challenges faced by the tobacco flavor study were summarized and looked forward, aiming to provide ideas and references for the improvement of tobacco product flavor quality based on flavor engineering technology, for the modulation of biological effects of tobacco flavor based on the theory of flavor brain science, and for the development of special tobacco products and novel applications.

**Keywords:** tobacco; flavor science; sensomics (molecular sensory science); development perspectives

烟草作为一种叶用嗜好性经济作物, 风味品质是其质量的核心。试图定义“风味”远非易事, 在生物医学领域出版商 BioMed Central 曾经出版的学术期刊《Flavor》的导言中<sup>[1]</sup>, 编辑们这样定义风味: “风味是通过所有感官系统介导的进食过程的体验”。越来越多来自心理学家和认知神经科学家的最新研究显示, 风味是嗅觉、味觉和触觉(化学物理觉)等多感官刺激信息, 经大脑分析加工整合后的混合感受。与人类的其他感官不同, 目前我们感知风味的确切机制尚未阐明。概括来讲, 风味效应产生的过程主要包括: 风味组分在鼻腔及口腔中的释放与迁移, 风味物质与受体作用, 受体的特异性和特征编码, 信号传导机制, 低级和高级脑神经

中枢对信号的整合以及最终风味感知形成<sup>[2]</sup>。

烟叶原料的风味品质不仅是烟草制品的“灵魂”, 更是连接自然条件、农业技术、工业加工与消费市场的关键纽带。其重要性不仅体现在感官体验的满足, 更关乎产品创新、品牌竞争力和行业的可持续发展。随着技术进步和消费需求变化, 对烟叶风味品质的研究与优化将持续成为烟草产业的核心课题。现有烟草风味相关研究多聚焦狭义风味的两大因子——香气和吃味, 主要围绕解码烟草风味特征的化学本质、解析影响风味品质的形成要素、开发彰显烟草制品风味品质的关键技术三大任务展开。烟草风味品质的化学基础研究是风味优化的核心。本文总结概述了食品风味分析技术和烟草风味

**基金项目:** 中国农业科学院科技创新工程(ASTIP-TRIC07); 中国农业科学院青年创新专项项目(Y2024QC31); 中国农业科学院基本科研业务费专项院级统筹项目(1610232024004)

**第一作者:** 庞雪莉(1988—), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为食品风味化学。E-mail: pangxueli@caas.cn

**\*通信作者:** 邱 军(1975—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为烟草质量评价。E-mail: qiu jun01@caas.cn

收稿日期: 2024-11-15

修回日期: 2025-04-07

研究的发展历程,系统归纳了近10年国内烟草风味文献,利用文献可视化软件Citespace对文献发文机构及合作关系、关键词及突显词等进行分析,解析了该领域不同时间段的研究重点、前沿热点和发展态势,以期为烟草风味研究人员明确未来研究重点,开展科研选题,实现烟草风味调控技术创新突破以及产品升级提供参考。

## 1 食品风味分析技术发展历程

味觉和嗅觉是风味的两大主要构成因子<sup>[3]</sup>。然而,并非所有的化合物都具备产香和呈味属性,当且仅当风味化合物的浓度高于其风味阈值时,才具有风味功能。风味物质是挥发性/非挥发性化合物的复杂混合物,通常由数百种不同性质的物质组成,且各组分浓度水平差异甚大,从亚 $\text{ng/g}$ 级的痕量到 $\mu\text{g/g}$ 甚至 $\text{mg/g}$ 不等。因此风味研究的难点,是如何从众多的非风味贡献组分中筛选鉴别真正的风味贡献组分。

食品风味分析大概经历了三个发展阶段(图1A)。第一个阶段:利用气相色谱和液相色谱等分离技术结合质谱鉴定技术,解析基质中的挥发性和非挥发性化合物构成。该阶段仅开展了简单仪器定性定量分析研究,归纳总结了不同基质中主要挥发物和非挥发物清单,但很少涉及这些化学组分的感官特性相关信息。

第二个阶段:引入化学组分风味属性和阈值信息,基于嗅觉检测技术,研究化合物及其风味属性的归属关系。该阶段克服了第一发展阶段中“以量定效”的不准确性,能从风味贡献量化的角度解析关键风味组分构成。针对香气化合物的鉴定筛选,Patton和Josephson<sup>[4]</sup>于1957年首次提出利用浓度和阈值信息两个变量来评判化合物的风味贡献,并详细介绍了化合物阈值的测定方法。1963年,Rothe等<sup>[5]</sup>在面包风味的研究中首次将浓度和阈值比值定义为香气值(aroma value);1973年,Mulders<sup>[6]</sup>将该比值重新命名为气味值(ouder value);1987年

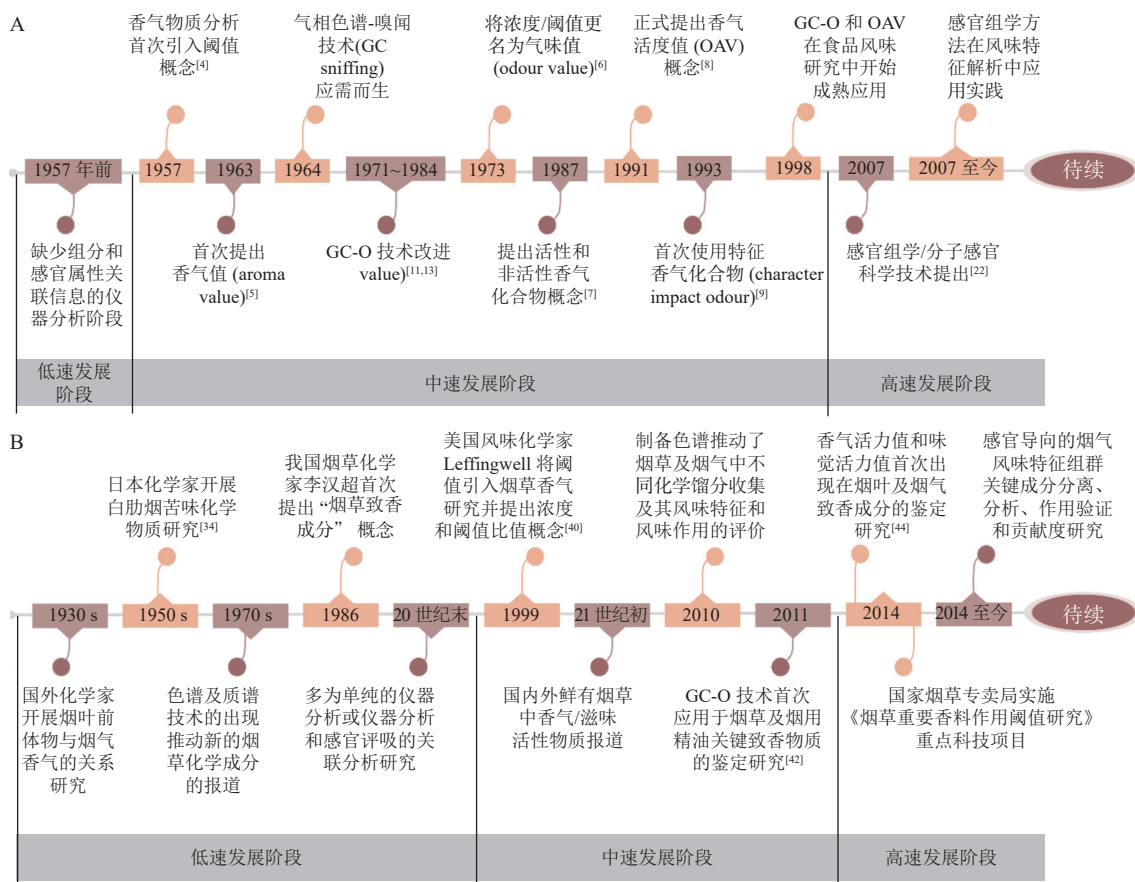


图1 食品风味分析(A)和烟草风味分析(B)发展历程

Fig. 1 Development of food flavor analysis (A) and tobacco flavor analysis (B)

第二届瓦特堡香料研讨会上, Bersuker 在有关大蒜香气物质构-效关系研究的报告中首次提出活性(active)和非活性(inactive)香气化合物的概念<sup>[7]</sup>; 1991年, Blank和Grosch<sup>[8]</sup>将该比值更名为香气活度值(odor activity value, OAV), 并认为 OAV 值越大, 化合物对整体气味特征形成的贡献越大。1993年, Schieberle<sup>[9]</sup>在不同种类黄油香气的研究中正式使用特征香气化合物(character impact odour)一词。然而, OAV 仅可用于复杂基质中已知化合物香气贡献的评估, 并不能对潜在的痕量高效未知风味化合物的风味贡献进行全面筛查评价, 而鼻子对于某些气味的灵敏度要远高于化学检测器, 因此, 以人的嗅觉为生物检测器的气相色谱-嗅闻检测技术(GC-sniffing/GC-O)于1964年应需而生<sup>[10]</sup>。Dra-vnieks等<sup>[11]</sup>相继对 GC-sniffing 技术做了一系列改进, 如引入一路高线速度的加湿空气/惰性与色谱柱流出物混合, 以提高嗅闻人员的舒适度, 保持色谱柱的原有分辨率。GC-O 方法用于评估化合物气味强度及其对样品特征气味的相对重要性, 可大致分为三大类<sup>[12]</sup>: 频率检测法、稀释至阈值法和直接强度法。CHARM法(联合香气反应测量法)<sup>[13]</sup>和 AEDA法(香气提取物稀释分析法)<sup>[14]</sup>是稀释至阈值法中应用最为普遍的方法; 直接强度法包括后强度法和时间强度法, 如 OSME<sup>[15-16]</sup>、指距法(finger span)<sup>[17]</sup>以及跨模态匹配指距法<sup>[18]</sup>。更多有关各嗅觉检测方法的描述可参见文献<sup>[19-21]</sup>。

第三个阶段: 感官组学概念提出后的风味物质真实作用验证阶段。天然基质的风味是各种风味化合物及其与基质组分协同作用后的结果, GC-O 分析和计算 OAV 并未考虑基质效应或化合物之间的协同作用, 因此仅可作为初步筛选评价化合物风味贡献的一种简单手段, 后续还需对这些物质的实际风味贡献进行验证。2007年, 德国慕尼黑工业大学的 Peter Schieberle 教授正式提出“分子感官科学”概念后<sup>[22]</sup>, 风味重组体系和遗漏实验便成为确证化合物真实风味贡献的有效方法。随着生活水平的提高, 消费者开始追求消费过程中的愉悦体验, 食品及烟草工业呈现出“健康+风味”双导向的发展态势, 分子感官科学的价值和重要性逐渐凸显, 已悄然成为烟草化学领域的研究热点<sup>[23]</sup>。

## 2 国内外烟草风味研究发展历程

食品中的风味物质只需通过咀嚼、吞咽等简单口腔加工即可被消费者直接感知, 而烟草制品与传统食品不同, 其香吃味是在燃吸过程中产生的, 烟叶中固有的与燃烧后新生的各种风味组分之间会产生极其复杂的相互作用, 这是导致烟草风味化学突破性研究进展较为缓慢的主要原因。据推测, 人类的嗅觉可以分辨出超过 10000 种不同的气味<sup>[24]</sup>, 而人类味觉受体仅可以检测到甜、苦、酸、咸和鲜味 5 种基本味觉<sup>[25]</sup>。因此, 相比吃味, 香气为复杂风味体验提供了更多的信息<sup>[26]</sup>, 这是导致烟草风味品质多样性的主要原因。

国外有关烟草香味的研究起步较早(图 1B), 早在 20 世纪 30 年代, 国外烟草化学家陆续开展了烟叶多酚类物质、萜类化合物、表面分泌物、石油醚提取物、赖百当类化合物与香气品质之间的关系研究<sup>[27-31]</sup>。1986年, 在《烟草香味化学的进展》综述中, 我国烟草化学家李汉超首次提出“烟草致香成分”概念, 随后研究学者进行了烟草致香物质分离鉴定, 开展了品种、成熟度、生态环境、农业栽培措施和调制加工技术对烟草致香物质转化积累影响的研究<sup>[32-33]</sup>。相比香味, 烟草吃味物质基础研究起步较晚, 20 世纪 50 年代, 日本化学家针对白肋烟苦味化学物质开展研究, 提出使用还原糖总氮比作为评价白肋烟苦味程度的化学指标, 且认为该比值小于 0.3 时, 烟叶会呈现苦味<sup>[34]</sup>, 并在此基础上陆续开展了土壤状况和施肥措施对苦味强度的影响研究<sup>[35]</sup>。20 世纪 70 年代, 随着气相色谱、质谱等分析技术的出现, 烟草中越来越多的化学成分被陆续报道, 然而, 直至 20 世纪末, 有关烟草风味品质化学物质基础解析的研究仍然进展缓慢, 大多为单纯的仪器分析或仪器分析和感官评吸质量的关联分析<sup>[7,36-39]</sup>, 这类研究很大程度上局限于化学成分和烟草吃味品质的相关关系, 并非直接因果关系。

1999年, Leffingwell<sup>[40]</sup>首次将阈值概念引入到烟草香气研究, 并提出可用浓度和阈值的比值来定量评价化合物风味贡献(odor potency), 这使烟草风味解析研究进入了一个全新的发展阶段(中速

发展阶段)。然而由于烟草中风味物质种类繁多,化学结构特殊,且香味之间存在交互作用,因此,直至本世纪初,国内外有关烟草及烟草制品中香气/滋味活性物质(aroma/taste-active compound)的研究仍鲜有报道,烟草的致香和呈味机理也尚未理清。

2010年,感官组学技术开始进入烟草研究者的视野,国内烟草关键风味贡献组分割析研究进入加速发展阶段。该阶段的研究以制备气相/液相色谱技术为手段,完成烟草及主流烟气中不同化学馏分的制备收集,结合感官组学评价方法,成功实现了组分风味特征和风味作用的评价,极大推动了化学成分和感官作用因果关系的解析研究<sup>[41]</sup>。2011年,上海烟草集团有限责任公司首次将GC-O技术应用于烟草及烟用精油关键致香物质的鉴定研究<sup>[42]</sup>,极大提高了复杂烟草挥发物中关键香气贡献组分的筛选鉴定效率。2014年,香气活力值首次出现在陈化烟叶致香成分的鉴定研究中<sup>[43]</sup>。同年,云南中烟工业有限责任公司首次利用味觉活力值(taste activity value, TAV)解析了烟气中酸味贡献组分<sup>[44]</sup>。2014年,国家烟草专卖局组织实施了“卷烟调香”重点科技项目《烟草重要香料作用阈值研究》,建立了烟用香料作用阈值测定的技术方法,测定了重要烟用香料的香气阈值,推动感官导向的烟草及烟气风味特征物质基础研究进入了快车道。经过10年的发展应用,以食品感官组学研究思路为指导,烟草风味研究工作者以感官导向作为卷烟烟气关键成分分离、分析、作用验证和贡献度研究的核心,现已从不同类型烟草及其制品中鉴定出多种嗅觉、味觉和化学感觉感官特征组群的关键组分<sup>[45-48]</sup>(图2)。在此基础上,风味物质神经效应的形成机理与调控、基于受体细胞和脑区效应的风味物质感官强度的客观定量评价方法开发成为当前烟草风味研究的前沿热点<sup>[49-50]</sup>。此外,烟草作为一种风味嗜好性产品,和其他食品一样,其风味品质的形成同样涉及香和味的融合。甜感是影响卷烟感官质量和风格特征的关键指标,是中式卷烟区别于国外卷烟产品的重要标志<sup>[51]</sup>。因为常见非挥发性甜味物质在烟气中迁移率极低(如葡萄糖和蔗糖迁移率仅约0.5%)<sup>[52]</sup>,对烟气甜感影响有限,因此,基于跨模

态感知交互作用的天然增甜香气物质筛选和应用研究<sup>[53-55]</sup>,成为当今烟草风味基础和应用研究领域的另一热点。

### 3 近10年国内烟草风味文献梳理

以中国知网(CNKI)为数据来源,以“烟+烟草+烟叶+烤烟+雪茄+朱砂烟+卷烟+加热卷烟+烟气+主流烟气”和“风味+香+呈香+香型+致香+香韵特征+香韵风格+甜香+酸香+不良气味+味+味觉+甜+酸味+甜味+苦味+辣感+组群+感官导向+口感导向+感官组+感官作用+感官贡献+加香贡献度+OAV+香气活度值+味觉活力值+味觉活性值+香气活力值+气味活度值+活性阈值+GC-O+同位素稀释+电子鼻+电子舌”为主题词进行搜索,时间限定为2014年1月1日至2024年7月1日,文献类型为学术期刊和硕博学位论文。得到符合要求的文章1018篇。利用文本挖掘软件,对检索得到的文献关键词进行提炼整合,通过对覆盖率较高的几个关键词进行分析后,剔除了主题为烟用香精、电子烟及赋香滤棒、加香纸、搭口胶等烟用材料相关的文献,仅保留主题为烟叶及烟草制品(卷烟、加热不燃烧、膨胀烟梗、再造烟叶、口含烟)风味相关的文献,共541篇。

#### 3.1 发文机构及其合作关系分析

研究机构的参与情况可以直接反映烟叶及烟草制品风味领域的科研力量分布、资源储备及合作网络。将CNKI数据库检索到的中文期刊文献导入Citespace软件进行发文机构分布分析,结果如图3所示。国内烟叶及烟草制品风味相关文献发文机构合作图谱共有231个节点,388条连线,网络密度为0.0146。其中,河南农业大学以72篇的发文量位居榜首,其次是云南中烟工业有限责任公司、中国烟草总公司郑州烟草研究院、中国农业科学院烟草研究所、郑州轻工业大学、河南中烟工业有限责任公司,发文量均超35篇;其他发文量较多的机构包括广西中烟工业有限责任公司(34篇)、上海烟草集团有限责任公司(30篇)、云南省烟草公司(20篇)、红云红河烟草(集团)有限责任公司(19篇)、云南瑞升烟草技术(集团)有限公司(18篇)、浙江中烟工业有限责任公司(16篇)、广



(30家)、中国农业科学院烟草研究所(29家)和郑州轻工业大学(29家)合作机构数量位居前五。可以看出,发文数量与对外合作机构数量的正比关系,

这说明跨机构合作能够整合不同机构的资源优势,促进不同学科背景和研究方法的交叉融合,推动创新成果的产生,提升研究质量和数量。

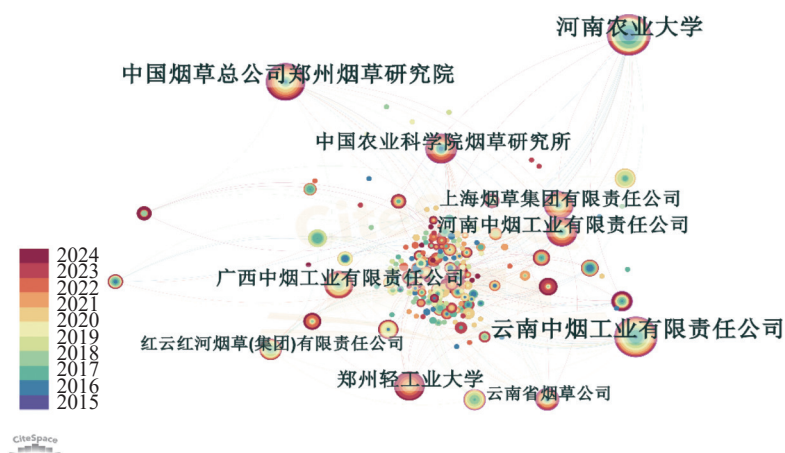


图3 CNKI数据库“烟叶及烟草制品风味”发文机构分布情况

Fig. 3 The distribution of publishing institutions of “flavor of tobacco leaves and tobacco products” in CNKI database

### 3.2 关键词聚类分析

使用 Citespace 软件对检索到的 541 篇文献进行关键词聚类分析,结果如图 4 所示,关键词聚类图谱共有 296 个网络节点,508 条边,聚类平均轮廓值( $s$  值)为 0.8745,表明该图谱可靠性较高。进

一步分析发现,排名前 5 的聚类分别是“#0 致香成分”“#1 感官质量”“#2 主流烟气”“#3 烟草”和“#4 化学成分”,表明烟叶及烟草制品风味领域的研究主要以烟草或主流烟气中香气成分为核心,并在此基础上重点关注感官质量特性。

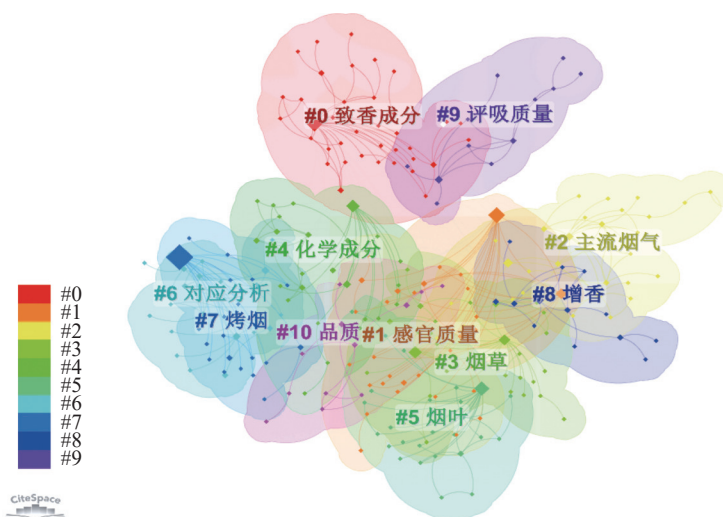


图4 CNKI数据库中“烟叶及烟草制品风味”相关中文文献关键词聚类图谱

Fig. 4 The clustering of keywords in Chinese literatures related to “flavor of tobacco leaves and tobacco products” in CNKI database

### 3.3 突显词分析

基于 CNKI 数据库的 541 篇文献进行突显词分析,烟草风味研究领域排名前 20 的突显词及其突

发强度和持续时间如图 5 所示。突发强度排名前 20 的突显词依次为“香型”“白肋烟”“乌蒙烟区”“香型风格”“海拔”“对应分析”“化学组成”“产香

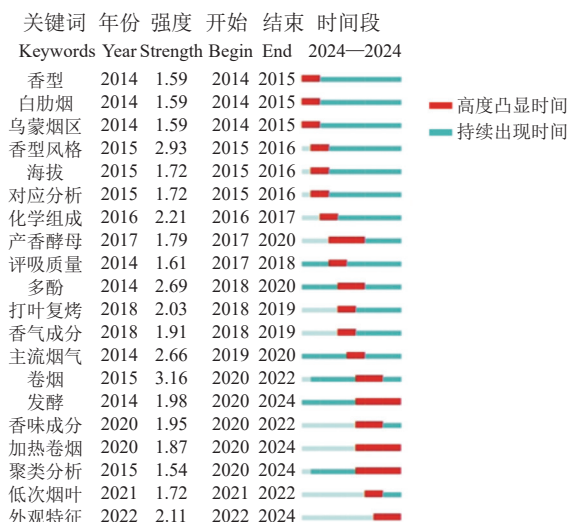


图 5 CNKI 数据库中“烟叶及烟草制品风味”相关文献突显词分析

Fig. 5 The analysis of salient words of “flavor of tobacco leaves and tobacco products” related literature in CNKI database

酵母”“评吸质量”“多酚”“打叶复烤”“香气成分”“主流烟气”“卷烟”“发酵”“香味成分”“加热卷烟”“聚类分析”“低次烟叶”“外观特征”。近几年研究突显度较高的关键词有“卷烟”(突显度 3.16, 2020—2022 年)、“香型风格”(突显度 2.93, 2015—

2016 年)、“多酚”(突显度 2.69, 2018—2020 年)、“主流烟气”(突显度 2.66, 2019—2020 年)、“化学组成”(突显度 2.21, 2016—2017 年)、“外观特征”(突显度 2.11, 2022—2024 年)以及“打叶复烤”(突显度 2.03, 2018—2019 年)。这些关键词突出体现了烟草行业对卷烟、烤烟、烟气的外观特征、化学成分及感官品质研究的重视,显示了工业实践中的重要发展趋势。

### 3.4 烟叶及烟草制品风味研究领域的发展历程

CNKI 数据库中烟草风味相关发文关键词聚类时序变化如图 6 所示,该图展示了聚类标签中的关键词随时间的首次出现时间和随时间变化的受关注情况。从图中可知,“烤烟”及“致香成分”相关文献聚类演化过程较丰富,对各聚类有较大的影响,其中与“#7 烤烟”聚类关联的文献共有 209 篇,内容主要涉及发酵、增香、烟叶品质、产香酵母、优化工艺、卷烟甜感。与“#0 致香成分”聚类关联的文献共有 58 篇,研究内容涉及基因型、前体物、卷烟加香、晒红烟、施氮、云南省、烟梗、低温慢烤等。与“#5 烟叶”聚类关联的文献共有 52 篇,研究内容涉及产区、清甜香型、烤烟香型、因子分析、

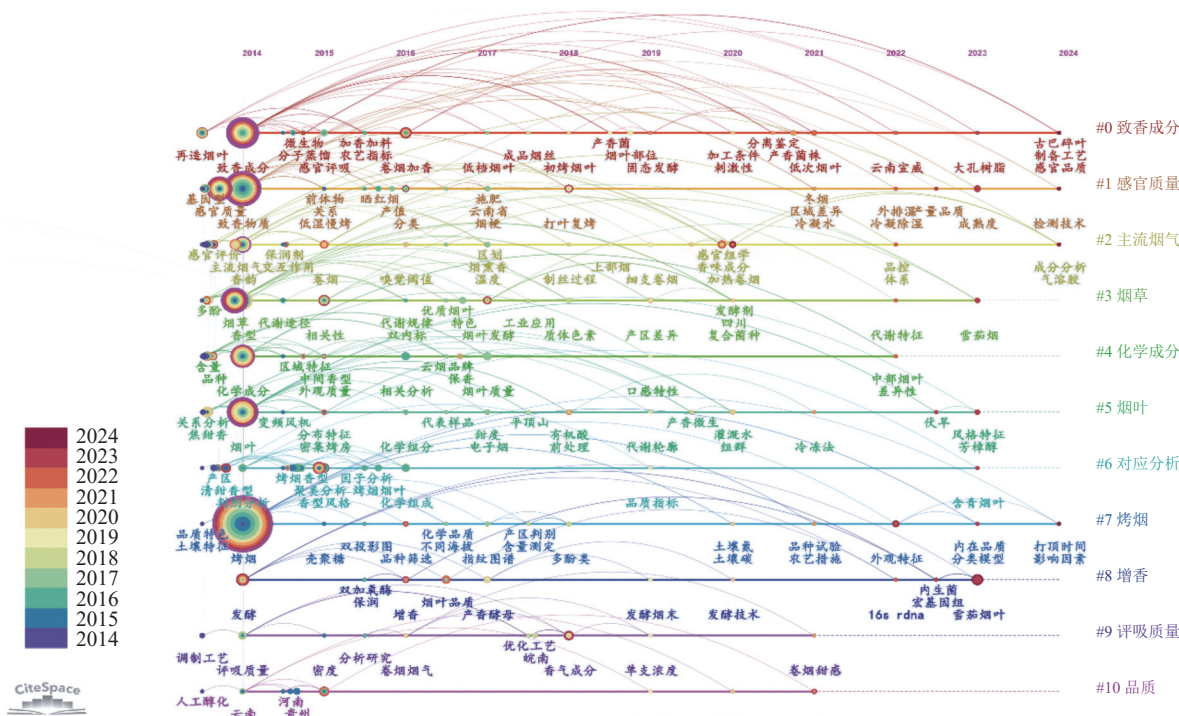


图 6 CNKI 数据库中“烟叶及烟草制品风味”相关文献关键词聚类时序图

Fig. 6 Keyword clustering timeline visualization of “flavor of tobacco leaves and tobacco products” related literature in CNKI database

品质指标、含青烟叶等。其他聚类关联文献较多的有“#4 化学成分”(42篇)、“#1 感官质量”(35篇)、“#3 烟草”(32篇),说明与这些关键词相关的研究内容也正在或者曾经获得较多关注。

## 4 展望

烟草风味特征物质基础解析是开展风味神经效应研究与精准调控烟草风味的关键。近几十年来,尤其是感官组学概念提出以来,烟草及其制品中大多数关键的气味物质和基本味觉化合物已被成功识别。然而在现有烟草风味的研究报道中,大多数是基于仪器和感官分析去筛选和测量风味贡献化合物,并试图将风味化学成分与它们产生的相对稳定的风味体验联系起来,缺乏基于心理体验绘制客观风味与主观风味体验之间复杂关系的研究。因此,为服务于健康风味双导向的产品,今后应重点在烟草全风味组分高通量分析方法开发、风味组分间交互感知作用机制剖析和兼具健康功效的烟草风味物质挖掘等方面开展深入研究。

### 4.1 开发烟草全风味组分高通量分析技术

目前,GC-MS法是分析气味物质的常用手段,而液相色谱-质谱联用是分析非挥发性滋味组分的常用方法。研究表明,感官特征感知差异主要源于气味物质/味觉物质组合体中微小的数量变化而非化学结构变化<sup>[56]</sup>。食品中香气化合物的浓度范围跨度大,从1 pmol/kg(如硫醇和硫化物)到10~100 mmol/kg(醇类)不等<sup>[57]</sup>。而基本味觉化合物(如氨基酸、有机酸和碳水化合物)通常在mmol/kg水平<sup>[58]</sup>。因此,亟需开发可覆盖化学类别范围广,分离度和灵敏度更高,适合天然复杂基质中挥发性及非挥发性风味全组分定性定量分析的新方法。

### 4.2 加深烟草风味组分互作基础理论研究

风味是大脑对不同化学感官输入组合信息整合后的独特感知体验,并非单个分子风味作用的简单叠加<sup>[59]</sup>,为更有效地利用这些风味物质,服务于产品风味品质调控,今后亟需基于风味重组体系、省略实验等感官组学方法,静态感官评价、动态感官评价以及脑电图(EEG),功能性近红外光谱(fNIRS)神经成像技术等方法,围绕不同香韵香气物质间的协同作用、香气-味觉跨模态交互作用以

及浓度-风味作用效果曲线等开展深入研究。

### 4.3 探索烟草风味物质的健康功效

香气分子激活嗅觉系统的嗅觉受体后转化为神经电信号,经过嗅神经到达嗅球,再通过大脑中枢神经系统的解码分析感知香气变化;同时,嗅觉系统引起的神经电信号经过大脑杏仁核、海马体及边缘系统等中枢神经系统,最终影响大脑神经及其支配的各项生命活动,如抗焦虑、改善学习记忆、助眠安神等。有些香气物质甚至对阿尔茨海默氏病和帕金森氏病等中枢神经系统疾病展现出较好的治疗效果<sup>[60-61]</sup>。相比其他植物,烟草中香气物质种类更为丰富,因此今后可利用动物行为学设备、脑电生理仪等神经科学和脑科学研究的重要实验手段和设备以及机器学习的数据驱动策略,开展烟草中健康功效香料分子的高效挖掘研究,为拓展烟草在生命健康领域的新应用提供思路和指导。

## 参考文献

- [1] SMITH B. Perspective: Complexities of flavour[J]. *Nature*, 2012, 486(7403): S6.
- [2] BLAKE A A. Flavour perception and the learning of food preferences[M]//TAYLOR A J, ROBERTS D D. Flavor perception, Iowa: Blackwell Publishing Ltd, 2004: 172-202.
- [3] SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ L, ALI N S, CANO-LAMADRID M, et al. Flavors and aromas[M]//Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables. Amsterdam: Elsevier, 2019: 385-404.
- [4] PATTON S, JOSEPHSON D V. A method for determining significance of volatile flavor compounds in foods[J]. *Journal of Food Science*, 1957, 22(3): 316-318.
- [5] ROTHE M, THOMAS B. Aromastoffe des Brotes[J]. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 1963, 119(4): 302-310.
- [6] MULDERS E J, MAARSE H, WEURMAN C. The odour of white bread[J]. *Zeitschrift Für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 1972, 150(2): 68-74.
- [7] BERSUKER I B, DIMOGLO A S, GORBACHOV M Y, et al. Study of the electronic and structural properties of the chemical compounds in garlic aroma[J]. *Food/Nahrung*, 1989, 33(5): 405-411.
- [8] BLANK I, GROSCH W. Evaluation of potent odorants in dill seed and dill herb (*Anethum graveolens* L.) by aroma extract dilution analysis[J]. *Journal of Food Science*, 1991, 56(1): 63-67.
- [9] SCHIEBERLE P, GASSENMEIER K, GUTH H, et al. Character impact odour compounds of different kinds of butter[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 1993, 26(4): 347-356.
- [10] FULLER G H, STELTENKAMP R, TISSERAND G A. The gas chromatograph with human sensor: Perfumer model[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1964, 116(2): 711-724.
- [11] DRAVNIKS A, O'DONNELL A. Principles and some techniques of high-resolution headspace analysis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1971, 19(6): 1049-1056.
- [12] Le FUR Y, MERCURIO V, MOIO L, et al. A new approach to examine the relationships between sensory and gas chromatography-olfactometry data using Generalized Procrustes analysis applied to six French Chardonnay wines[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(2): 443-452.
- [13] ACREE T E, BARNARD J, CUNNINGHAM D G. A procedure for the sensory analysis of gas chromatographic effluents[J]. *Food Chemistry*, 1984, 14(4): 273-286.
- [14] GROSCH W. Detection of potent odorants in foods by aroma extract

- dilution analysis[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1993, 4(3): 68-73.
- [15] SANCHEZ N B, LEDERER C L, NICKERSON G B, et al. Sensory and analytical evaluation of beers brewed with three varieties of hops and an unhopped beer[M]//Food science and human nutrition. Amsterdam: Elsevier, 1992: 403-426.
- [16] MCDANIEL M R, MIRANDA-LÓPEZ R, WATSON B T, et al. Pinot noir aroma: a sensory/gas chromatographic approach[J]. *Developments in Food Science*, 1990, 24: 23-36.
- [17] EKMAN G, BERGLUND B, BERGLUND U, et al. Perceived intensity of odor as a function of time of adaptation[J]. *Scandinavian Journal of Psychology*, 1967, 8(1): 177-186.
- [18] GUICHARD H, GUICHARD E, LANGLOIS D, et al. GC sniffing analysis: Olfactive intensity measurement by two methods[J]. *Zeitschrift Für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 1995, 201(4): 344-350.
- [19] MAHMOUD M A A, ZHANG Y Y. Enhancing odor analysis with gas chromatography-olfactometry (GC-O): Recent breakthroughs and challenges[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(17): 9523-9554.
- [20] DELAHUNTY C M, EYRES G, DUFOUR J P. Gas chromatography-olfactometry[J]. *Journal of Separation Science*, 2006, 29(14): 2107-2125.
- [21] van RUTH S M. Methods for gas chromatography-olfactometry: A review[J]. *Biomolecular Engineering*, 2001, 17(4-5): 121-128.
- [22] STEINHAUS P, SCHIEBERLE P. Characterization of the key aroma compounds in soy sauce using approaches of molecular sensory science[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(15): 6262-6269.
- [23] GRANVOGL M, SCHIEBERLE P. The sensomics approach: A useful tool to unravel the genuine aroma blueprint of foods and aroma changes during food processing[M]//Characterization of odorant patterns by comprehensive two-dimensional gas chromatography. Amsterdam: Elsevier, 2022: 41-68.
- [24] LANCET D. Vertebrate olfactory reception[J]. *Annual Review of Neuroscience*, 1986, 9: 329-355.
- [25] RAWSON N E, LI X. The cellular basis of flavour perception: taste and aroma[M]//TAYLOR A J, ROBERTS D D. Flavor perception. Iowa: Blackwell Publishing Ltd, 2004: 57-85.
- [26] SPENCE C, AUVRAY M, SMITH B. Confusing tastes with flavours[M]//STOKES D, MATTHEW M, BRIGGS S. Perception and its modalities. Oxford: Oxford University Press, 2014: 247-274.
- [27] COOLHAAS C. Chemical examination of tobacco[J]. *Mededelingen van Het Proefstation Voor Vorstenlandsche Tabak, Klaten*, 1938, 85: 75-83.
- [28] CHAKRABORTY M K, WEYBREW J A. The chemistry of tobacco trichomes[J]. *Tobacco Science*, 1963, 7: 122-127.
- [29] PAWLOWSKA A. Studies on polyphenols in tobacco. 1. Trials to determine the effects of polyphenols on tobacco flavour characteristics[J]. *Biuletyn Centralnego Laboratorium Przemyslu Tytoniowego*, 1973, 1/2: 71-81.
- [30] ENZELL C R. Terpenoid components of leaf and their relationship to smoking quality and aroma[J]. *Recent Advances in Tobacco Science*, 1976, 2: 32-60.
- [31] LEFFINGWELL J, LEFFINGWELL D. Chemical and sensory aspects of tobacco flavor—An overview[C]//42nd Tobacco Chemists' Research Conference—Recent Advances in Tobacco Science, 1988: 169-218.
- [32] 潘首慧, 李翔宇, 白茂军, 等. 烟叶致香物质研究进展[J]. *现代农业科技*, 2024(11): 161-164.
- PAN S H, LI X Y, BAI M J, et al. Research progress on tobacco aroma substances[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024(11): 161-164.
- [33] 刘宇, 颜合洪. 烟草致香物质的研究进展[J]. *作物研究*, 2006, 20(5): 470-474.
- LIU Y, YAN H H. Progress in the study of tobacco aroma substances[J]. *Crop Research*, 2006, 20(5): 470-474.
- [34] FUJIWARA A, KUROSAWA M. Studies on the biting taste of burley tobacco leaves. (Nutritional physiology of Japanese tobacco.) I. Relations between the biting taste and chemical components[J]. *Tohoku Journal of Agricultural Research*, 1954, 5: 229-237.
- [35] FUJIWARA A, KUROSAWA M. Studies on the biting taste of burley tobacco leaves. (Nutritional physiology of Japanese tobacco.) II. Effect of the soil and fertilization on the formation of the biting taste with special reference to phosphate[J]. *Tohoku Journal of Agricultural Research*, 1956, 7: 199-207.
- [36] 牛莉莉, 耿宗泽, 许自成, 等. 烤烟口感特性与化学成分的关系[J]. *甘肃农业大学学报*, 2014, 49(1): 83-88.
- NIU L L, GENG Z Z, XU Z C, et al. Relationship analysis of taste characteristics and chemical components in flue-cured tobacco leaves[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2014, 49(1): 83-88.
- [37] 王林, 刘志宏, 许自成. 烤烟烟叶酸性致香物质与多酚含量、化学成分及口感特性的关系研究[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(5): 159-169.
- WANG L, LIU Z H, XU Z C. Study on relationship between acid aroma with polyphenol content, chemical composition and taste characteristics of flue-cured tobacco[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(5): 159-169.
- [38] SCHWANZ T G, BOKOWSKI L V V, MARCELO M C A, et al. Analysis of chemosensory markers in cigarette smoke from different tobacco varieties by GC×GC-TOFMS and chemometrics[J]. *Talanta*, 2019, 202: 74-89.
- [39] McADAM K G, TETTEH J, BISHOP L, et al. A combined study of headspace volatiles using human sensory, mass spectrometry and chemometrics[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 7773.
- [40] LEFFINGWELL J. Leaf chemistry - basic chemical constituents of tobacco leaf and differences among tobacco types[M]//DAVIS D L, NIELSEN M T. Tobacco: production, chemistry, and technology. Oxford: Blackwell Science, 1999: 265-284.
- [41] QIN Y Q, PAN L N, SUN X H, et al. Accurate and sensitive analysis of sulfur aroma compounds in tobacco by NADES-enhancing HS-SPME Arrow coupled with GC-Orbitrap-MS[J]. *Microchemical Journal*, 2024, 197: 109805.
- [42] 陈丽君. 采用 GC-MS/O 分析精油和烟草中致香物质[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- CHEN L J. Identification of aroma active compounds in essential oils and tobacco leaves using gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry (GC-MS/O)[D]. Shanghai: Fudan University, 2011.
- [43] 沈进. 陈化烟叶致香成分分析及陈化烟香仿制研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- SHEN J. Research on analysis and simulation of aroma components of aged tobacco[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
- [44] 冒德寿, 李智宇, 刘强, 等. 基于味觉活力值的烤烟主流烟气关键酸味物质的研究[J]. *中国烟草学报*, 2014, 20(6): 21-27.
- MAO D S, LI Z Y, LIU Q, et al. Taste active value-based research on key sour compounds in flue-cured tobacco mainstream smoke[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2014, 20(6): 21-27.
- [45] 熊骏威, 张玮, 曹晓卫, 等. 口感导向的烟气甜香味成分的剖析[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 50(4): 487-494.
- XIONG J W, ZHANG W, CAO X W, et al. Sensory-oriented identification and analysis of sweet aroma components in cigarette smoke[J]. *Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences)*, 2021, 50(4): 487-494.
- [46] 迟广俊, 刘俊辉, 鲍峰玉, 等. 初烤烟叶提取物中酸味关键成分的感官导向分析[J]. *烟草科技*, 2015, 48(12): 27-32.
- CHI G J, LIU J H, BAO F Y, et al. Sensory-oriented analysis of key sour taste components in cured tobacco extract[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2015, 48(12): 27-32.
- [47] 赖燕华, 汪军霞, 陶红, 等. 初烤烟叶辣感关键成分的感官导向分析[J]. *烟草科技*, 2020, 53(2): 55-61.
- LAI Y H, WANG J X, TAO H, et al. Sensory-oriented analysis of key spicy compounds in flue-cured tobacco leaves[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2020, 53(2): 55-61.
- [48] 李舒畅, 黄建, 庞夙, 等. 基于感官组学的烤烟烟叶中糯米香特征成分的鉴定[J]. *甘肃农业大学学报*, 2024, 59(3): 305-317.
- LI S C, HUANG J, PANG S, et al. Identification of glutinous rice-like aroma components featured in flue-cured tobacco leaves based on sensomics approaches[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(3): 305-317.

- shank disease and bacterial wilt disease[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2024, 41(1): 1-8
- [83] 叶晓娜. 生防菌 YN-3-3 的筛选、鉴定及其复配菌剂对烟草根黑腐病的生物防治研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- YE X N. Screening and identification of the biocontrol bacterium YN-3-3 and its complex microbial agents for biocontrol of tobacco root black rot disease [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023.
- [84] 易龙, 肖崇刚, 马冠华. 防治烟草根黑腐病拮抗芽孢菌株的筛选[J]. *植物病理学报*, 2011, 41(3): 333-336.
- YI L, XIAO C G, MA G H. Screening of antagonistic spore strains for controlling tobacco root black rot disease[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2011, 41(3): 333-336.
- [85] 易龙, 肖崇刚. 烟草根黑腐病拮抗木霉菌株 TB72 的鉴定及抑菌作用[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(8): 1889-1893.
- YI L, XIAO C G. Identification and antibacterial effect of tobacco root black rot antagonistic *Trichoderma* strain TB72[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(8): 1889-1893.
- [86] 何洪令, 李钠钾, 孙成成, 等. 烟草青枯病的生物防治研究进展[J]. *植物医生*, 2021, 34(2): 4-8.
- HE H L, LI N J, SUN C C, et al. Research progress on biological control of tobacco wilt disease[J]. *Plant Doctor*, 2021, 34(2): 4-8.
- [87] LIU Y, WU D S, LIU Q P, et al. The sequevar distribution of *Ralstonia solanacearum* in tobacco-growing zones of China is structured by elevation[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2017, 147(3): 541-551.
- [88] 孙婷婷, 李修伟, 闫鼎, 等. 烟草青枯病防治技术研究进展[J]. *现代农业科技*, 2023(19): 101-106.
- SUN T T, LI X W, YAN D, et al. Research progress on tobacco wilt control technology[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(19): 101-106.
- [89] 柳辉林, 张剑, 徐隆根, 等. 荧光假单胞菌 3000 亿个/克粉剂防治烟草青枯病田间药效试验[J]. *农药科学与管理*, 2008(6): 24-26.
- LIU H L, ZHANG J, XU L G et al. The application of Qingweisan pulvis  $300 \times 10^9$  CFU/g DP to control tobacco bacterial wilt[J]. *Pesticide Science and Administration*, 2008(6): 24-26.
- [90] 张玉霞, 王珍珍, 张水翔, 等. 荧光假单胞菌与有机肥复配对黔江烟草青枯病防控效果研究[J]. *植物医学*, 2022, 1(1): 41-47.
- ZHANG Y X, WANG Z Z, ZHANG S X, et al. Study on the prevention and control effect of fluorescent *Pseudomonas aeruginosa* combined with organic fertilizer on tobacco *Fusarium* wilt in Qianjiang[J]. *Plant Health and Medicine*, 2022, 1(1): 41-47.
- [91] 赵倩, 李军民, 雷庭, 等. 嗜酸性 PGPR 菌株 CLB-17 的筛选、鉴定及其对烟草青枯病菌的生防活性[J]. *植物保护学报*, 2022, 49(2): 528-538.
- ZHAO Q, LI J M, LEI T, et al. Screening and identification of an acidophilic PGPR strain CLB-17 and its biocontrol activity against tobacco bacterial wilt[J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49(2): 528-538.
- [92] 高阳, 孙莉琼, 李晓帆, 等. 6 种根际促生细菌对浙贝母生长与活性成分的影响 [J/OL]. *南京农业大学学报*, 1-11[2025-05-29].
- GAO Y, SUN L Q, LI X F, et al. Effects of six rhizosphere growth-promoting bacterial strains on growth and active components of *Fritillaria thunbergii* Miq. [J/OL]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1-11[2025-05-29].
- [93] 牛慧伟, 宋绍森, 张汉波, 等. 基于文献计量学的烟叶油分研究进展分析[J]. *贵州农业科学*, 2024, 52(11): 32-44.
- NIU H W, SONG S S, ZHANG H B, et al. Analysis on research progress of oil content in tobacco leaves based on bibliometrics[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2024, 52(11): 32-44.
- [94] 王振龙, 杜江, 牛勇, 等. 若尔盖高寒补播草地燕麦根际促生菌的筛选及促生特性研究[J]. *草地学报*, 2023, 31(5): 1406-1413.
- WANG Z L, DU J, NIU Y, et al. Screening and growth-promoting characteristics of plant growth-promoting rhizobacteria of oat rhizosphere in alpine reseeding grassland of Zoige[J]. *Acta Agraria Sinica*, 2023, 31(5): 1406-1413.

(上接第 123 页)

- [49] 刘富强, 郭露露, 毛健, 等. 基于全身体积描记技术评估代表性辣感风味物质的感官刺激强度[J]. *食品科学*, 2024, 45(17): 17-25.
- LIU F Q, GUO L L, MAO J, et al. Evaluation of the sensory stimulation intensity of representative spicy flavor substances using whole-body plethysmography[J]. *Food Science*, 2024, 45(17): 17-25.
- [50] QIN Y M, ZHOU Y F, YAN X, et al. Establishment of a new cell-based assay to quantitatively evaluate the sweetness of sugar and sugar alcohol[J]. *Food Chemistry*, 2024, 434: 137436.
- [51] 赵蔚, 天建华, 李超, 等. 卷烟烟气甜感研究进展[J]. *云南化工*, 2024, 51(4): 22-26.
- ZHAO W, YAO J H, LI C, et al. Research progress on the sweet taste of smoke[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2024, 51(4): 22-26.
- [52] TALHOUT R, OPPERHUIZEN A, van AMSTERDAM J G C. Sugars as tobacco ingredient: Effects on mainstream smoke composition[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2006, 44(11): 1789-1798.
- [53] 牛云蔚, 蒋圆圆, 洪彦, 等. 基于分子对接技术研究香气物质对蔗糖的增甜作用机制[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(6): 21-26.
- NIU Y W, JIANG Y Y, HONG L, et al. Study on sweetening mechanism of aroma compounds on sucrose based on molecular docking technology[J]. *China Food Additives*, 2023, 34(6): 21-26.
- [54] BERTELSEN A S, MIELBY L A, ALEXI N, et al. Sweetness enhancement by aromas: Measured by descriptive sensory analysis and relative to reference scaling[J]. *Chemical Senses*, 2020, 45(4): 293-301.
- [55] ZHANG D H, LAO F, PAN X, et al. Enhancement effect of odor and multi-sensory superposition on sweetness[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2023, 22(6): 4871-4889.
- [56] DUNKEL A, STEINHAUS M, KOTTHOFF M, et al. Nature's chemical signatures in human olfaction: A foodborne perspective for future biotechnology[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53(28): 7124-7143.
- [57] HOFSTETTER C K, DUNKEL A, HOFMANN T. Unified flavor quantitation: Toward high-throughput analysis of key food odorants and tastants by means of ultra-high-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(31): 8599-8608.
- [58] GLABASNIA A, DUNKEL A, FRANK O, et al. Decoding the nonvolatile sensometabolome of orange juice (*Citrus sinensis*)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(10): 2354-2369.
- [59] JINKS A, LAING D G. The analysis of odor mixtures by humans: Evidence for a configurational process[J]. *Physiology & Behavior*, 2001, 72(1-2): 51-63.
- [60] CHOI N Y, WU Y T, PARK S A. Effects of olfactory stimulation with aroma oils on psychophysiological responses of female adults[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(9): 5196.
- [61] CUI J Q, LI M, WEI Y Y, et al. Inhalation aromatherapy via brain-targeted nasal delivery: Natural volatiles or essential oils on mood disorders[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 13: 860043.