

张梦祺, 胡泽林, 曾令楠, 等. 小麦籽粒挥发物研究进展[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 1071-1076.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.04.033

小麦籽粒挥发物研究进展

张梦祺, 胡泽林, 曾令楠, 程颖, 周畅, 崔文礼, 郑文寅
(安徽农业大学农学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 面制品的食味品质(麦香味)是重要的感觉评价指标,主要受籽粒挥发物的种类和含量的影响。本文对小麦籽粒挥发物组成、检测技术、影响小麦籽粒挥发物的因素等方面进行了综述,并对其在食味品质、植物保护、小麦籽粒贮藏品质、香麦种质资源的筛选等方面的应用进行总结和展望,以期小麦籽粒挥发物相关的遗传和分子标记研究以及小麦食味品质(麦香味)改良提供参考依据。

关键词: 小麦; 挥发物; 检测技术; 影响因素

中图分类号: S512.101 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)04-1071-06

Research progress of volatile matter in wheat grain

ZHANG Meng-qi, HU Ze-lin, ZENG Ling-nan, CHENG Ying, ZHOU Chang, CUI Wen-li, ZHENG Wen-yin
(School of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: The taste quality (wheat flavor) of flour products is an important sensory evaluation index, which is mainly affected by the types and contents of grain volatiles. In this paper, the composition of wheat grain volatiles, the detection techniques and the factors affecting wheat grain volatiles were reviewed, and their applications in taste quality, plant protection, wheat grain storage quality and selection of wheat germplasm resources were summarized and prospected to provide reference for genetic and molecular markers research related to volatile matter of wheat grain and improvement of wheat taste quality.

Key words: wheat; volatiles; detection techniques; influencing factors

小麦是世界上重要的粮食作物,全世界有 2/5 的人口将小麦粉作为主要食物。小麦粉可以制作出众多蒸煮、烘培种类的食品,为人体提供营养。随着人民生活水平和饮食质量持续提高,人们对小麦粉的品质要求也越来越高。除了对小麦粉营养和加工品质的要求外,对面制品的口感与气味也提出了更高的要求。在中国的面制品评价中,食味品质(麦香味)越来

越受到重视。目前对小麦籽粒气味的评价,一般直接进行感官评价,但由于个体嗅觉敏感度的不同,对气味的评价结果也会造成较大差异^[1]。对小麦籽粒香味挥发物的研究多集中在食品行业以及个别品种和样品的麸皮、胚芽、面粉、全麦粉与少数面制品的差异上,尚未见针对小麦粉食味品质(麦香味)的改良和育种的报道。因此,本文综述当前国内外对小麦籽粒挥发物组成、检测技术以及影响小麦籽粒挥发物的因素等方面的研究进展,以期为深入研究和改良小麦粉食味品质(麦香味)提供依据。

1 小麦籽粒挥发物的构成

小麦籽粒香味可能主要来自 2 个方面,分别是

收稿日期: 2021-01-08

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFD0300405); 安徽农业大学大学生创新创业项目(XJDC2019115)

作者简介: 张梦祺(1995-), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 研究方向为作物遗传育种。(E-mail) 1337207450@qq.com

通讯作者: 郑文寅, (E-mail) zhengwenyin_75@163.com

小麦的胚芽和糊粉层,对面粉芳香作用较大。对小麦粉、麸皮、胚芽等挥发物差异的研究结果表明,面粉中的挥发性物质主要有醛、醇、烃类,麸皮中醇、羧酸类较多,胚芽中挥发性物质以酚类、醇类、烃类为主^[2-3]。烘培胚芽香气检测结果表明含氮的杂环化合物和醛类是烘培风味的主体^[4]。孙浩然认为小麦麸皮气味主要由正己酸乙酯为代表的水果香、以柠檬烯为代表的柑橘香、以正己醛为代表的青草味和以苯酚为代表的特殊臭味构成^[5]。通过对小麦粉、麸皮、胚芽、全麦粉中挥发性气味物质分析发现,其中麸皮和胚芽对面粉气味贡献较大^[6-7],受小麦出粉率影响,面粉气味可能与引入麸皮和胚芽相关。任国宝等^[8]对面粉、全麦粉与全麦粉挤压膨化后的挥发物进行了测定,分析结果表明,与小麦粉相比,全麦粉中由于含有更多的麸皮和胚芽,因此挥发物中醛类、醇类与呋喃类含量明显增多;全麦粉挤压膨化后醛、吡嗪、酮类增多,可能与膨化过程中发生美拉德反应有关。小麦粉中醇类、醛类的香气阈值很低,是构成小麦粉香味的主要物质,但酮的种类少阈值较高,对风味影响较小,而烷烃类物质虽然种类较多但阈值较高,同样对馒头和饼干整体上风味特征影响相对较小^[9-10]。加工处理后也会使挥发物组成发生很大变化,麸皮经过热处理后烷烃和烯烃大幅减少,酮类和醛类物质大量增加^[11]。

2 小麦籽粒气味挥发物的检测技术

2.1 电子鼻技术

电子鼻技术是研究挥发物成分的常用技术^[12]。电子鼻通过电化学传感器模拟“嗅觉”来快速识别气味物质,传感器阵列中每个传感器对不同气态物质响应不同,将化学信号转化成电信号^[13-14]。电子鼻能区分某一类物质浓度的高低,无法对具体化学成分进行测定分析,但检测方法简单迅速,而且能够较为客观地反映样品原有气味特征,广泛应用于食品气味检测分析中^[15]。电子鼻能够识别调味品中非法添加的罂粟成分^[16],测定茶叶及南果梨储存期间气味变化^[17-18],以及划分花椒品种^[19]等。在小麦籽粒检测方面,电子鼻技术也已有效应用于对小麦籽粒霉变程度的监测以及种子活力的检测等。赵天霞等^[20]对不同储藏阶段下籽粒气味信息进行测定,通过气味的变化能较好地地区分出不同霉变程度的样品。张婷婷等^[21]利用电子鼻实现了对不同老化程

度的小麦种子的快速无损鉴别和区分。

2.2 气质联用法

对挥发性气味成分的测定首先要提取风味化合物,提取方法有同时蒸馏萃取(SDE)、动态顶空(DHS)、固相微萃取(SPME)、溶剂辅助风味萃取(SAFE)^[22]。其中 SPME 具有快速、简单、无需溶剂的特点,被广泛应用,在小麦籽粒挥发物研究方面也较为常用,原理是利用在石英纤维上具有固相涂层萃取头的吸附作用,对样品进行萃取,萃取物在汽化室内进行高温解吸后,以氦气或者氢气作为流动相将其导入色谱柱进行分析。固相微萃取方式主要有直接萃取(DI-SPME)、膜保护萃取(MP-SPME)与顶空萃取(HS-SPME)3种^[23]。而气相色谱(GC)是利用气体作为流动相的色谱法,利用不同相对分子质量的物质在色谱柱中移动速度不同,实现对样品挥发性成分的快速分离分析,根据不同物质和检测领域的不同,检测器有氢火焰离子化检测器(FID)、火焰光度检测器(FPD)与质谱检测器(MS)等。目前,顶空固相微萃取与气质联用法(HS-SPME/GC-MS)可以实现对挥发性物质由收集到分离再到鉴别分析的过程^[24-25],并成功运用在茶叶、烟草、水稻、水果等众多作物的气味成分检测中^[26-29]。

在小麦籽粒挥发物研究方面,袁佐云等^[6]通过 HS-SPME/GC-MS 检测全麦粉和小麦粉,分别检测出 39 种和 23 种挥发性物质。徐鑫等^[3]从小麦粉和全麦粉中分别检测出 24 种和 29 种挥发性成分,全麦粉的挥发物成分数量高于小麦粉,其中十二烷、3-甲基-1-丁醇、2-甲基-1-丁醇、1-戊醇这些挥发物是全麦粉区别于小麦粉的成分。胡喜贵等^[30]利用 GC-MS 研究小麦籽粒挥发性成分,发现小麦籽粒香气主要以烃类和醇类为主,且不同来源小麦籽粒的香气成分具有一定差异。Mattiolo 等^[31]对 4 种硬质小麦品种进行挥发性成分测定,分析出 11 种化学成分类别,认为其中醇类和醛类是小麦籽粒挥发物的主要成分。从已有研究结果看,HS-SPME/GC-MS 方法可以有效测定和区分小麦籽粒中挥发性成分。

2.3 气相色谱-嗅觉测定法

气相色谱-嗅觉测定法(GC-O)是通过气相色谱与人嗅觉感官的结合来检测气流中的香味特征。样品经过毛细管柱分离后,通过分流进入检测器和探嗅口,在人的嗅觉闻嗅后记录持续时间和强度,生成谱图^[32]。GC-O 能够检测出 GC-MS 无法检测的隐

藏在杂质峰及大峰中的微量成分,对化合物的气味进行描述并且很容易区分出影响气味关键性的物质,嗅闻仪与气质联用相结合(GC-MS-O)对挥发物的测定可以发挥出更好的作用。高歌等^[33]利用GC-O-MS确定了5个品种柚子的香气差异贡献组分,区分了不同品种柚子的主要特征风味类型。陈光静等^[34]应用气味活度值(OAV)结合气味强度值测定薏米中的异味成分,测定出12种具有异味的成分。说明GC-O-MS可以从复杂多样的化合物中有效鉴别出香气物质。

3 影响小麦籽粒挥发物产生的因素

3.1 遗传特性

已有研究结果表明,植物香味的产生可能受到个别特殊化合物影响,如2-乙酰基-1吡咯啉(2AP)是稻米香味中最重要的香气成分^[35]。遗传基因相关定位分析结果表明,稻米香味由位于第8染色体上1对隐性基因控制,甜菜碱醛脱氢酶(*BADH2*)功能的缺失导致合成更多的2AP,促进了香味的形成^[36]。而在小麦方面,目前研究者大多认为,小麦品种之间品质的差异最终导致气味特征出现差别。Starr等^[37]在温室条件下对栽培的81个小麦品种的籽粒挥发物进行分析,共鉴定出72种挥发物,不同样品的挥发物成分有很大差异,地方品种和现代品种挥发性物质含量与种类不同,其中地方品种中酯类、醇类和呋喃的含量较高,现代品种中萜类、吡嗪和醛类的含量较高。Romina等^[38]通过对4个硬粒小麦品种面粉制作的面和意大利面挥发性化合物的联合分析,发现半熟和熟面食的挥发性成分之间存在显著差异,面食的挥发性成分可能取决于硬粒小麦品种,己醛在面食样品挥发物中最为丰富。

3.2 栽培环境

作物的气味挥发特征也易受生长环境的影响。烟草由于生长地域的不同,受降水量和降雨时间对作物有机物转化和积累的影响,不同产地烟草挥发物组分有所差异,主要影响因子是海拔和纬度^[39]。课净璇等^[40]在花椒籽粒挥发油的研究中也发现不同产地的花椒挥发油成分差异较大。在稻米研究中证实了土壤中稀有元素对植物气味品质的影响很大,土壤中农家肥用量、有机质含量、酸碱性和矿质营养元素对作物的生长具有重要作用^[41]。而目前有关栽培环境因素影响小麦籽粒挥发物的研究结果

并不一致。Seitz^[42]对堪萨斯州6个试验地块收获的小麦籽粒进行了挥发物分析,认为醇类含量最丰富,其次是醛类、烷烃类、烷基苯、酮类、甲酯、萘、萜烯等杂环类化合物,一些挥发物的数量在不同地点和品种之间存在差异,但这些差异似乎与品种本身的内在特性无关。燕雯^[2]对14个小麦品种进行了分析,认为不同产地之间气味存在差异。Riccardo等^[43]对不同地区收获的6个小麦品种进行测定,共识别出158种挥发性有机化合物,经过分析认为,与小麦品种间差异相比,种植区域对挥发物变化的影响较大。

3.3 贮存条件

关于贮存条件对小麦籽粒挥发物影响的研究相对较多。小麦籽粒储藏不当,易导致发霉变质并失去原有的小麦香味,而农药杀虫剂的使用、真菌和昆虫分泌物也会造成气味品质变差^[44]。随着小麦籽粒储存时间的延长,烃类和酯类的含量先增多后减少,醇类、醛类、酮类、酸类的含量逐渐增加^[45-46]。Ji等^[47]对9个软质冬小麦的分析结果显示,小麦籽粒中醇类含量最高,其次是酮类和烷烃,挥发性有机物含量随着籽粒成熟而降低,经过真菌侵染的小麦籽粒挥发性有机化合物含量与正常小麦籽粒有明显差异,可以通过1-辛-3醇和2-乙基-1己醇的浓度进行区分。小麦籽粒在储藏期间辛醇、己醇、十六醇等醇类挥发物含量在不断降低,在不同水分储藏条件下小麦E-15-十七烯醛、苯乙醛、2-壬烯醛等醛类和酮类挥发物含量逐渐增加,烷烃类如十五烷、十六烷、十八烷等成分不断增加^[48]。另一方面,随着小麦籽粒贮存时间的延长和贮存条件的变化,小麦籽粒中一些酶类和色素会逐渐发生作用,促进新的挥发物生成。

与种子储藏特性相关的脂肪氧化酶(*LOX*)可能是影响挥发性物质产生的重要因素,不同小麦品种籽粒挥发性化合物特征是由于*LOX*活性的差异造成的^[49]。*LOX*作为脂质降解的关键酶,可将不饱和脂肪酸氧化并产生相应的脂肪酸过氧化氢物,再经酶催化或自动分解成为各种挥发物,其中有多种化合物具有特殊气味,主要包括乙醛、庚醛和非2-烯醛等^[50-52]。一些研究者利用微波钝化*LOX*,发现随着微波处理时间增加,除酮类含量增加外,2-戊基呋喃、酸类、醛类和酯类含量均降低,对全麦粉风味的影响较大^[53]。越来越多的研究结果表明在贮藏期

间小麦籽粒中脂质的降解是导致气味品质变差的因素,但具体挥发性化合物的种类和含量及其与 *LOX* 的关系还没有进行深入研究。除了 *LOX* 对挥发物的影响外,类胡萝卜素在面粉加工和贮藏过程中经过氧化降解会生成较多的酮类,如紫罗兰酮、假紫罗兰酮、氧化异佛尔酮以及二氢猕猴桃内酯,这些物质具有特殊的香味特征,与面粉的香味形成有一定关系^[54]。

3.4 其他因素

小麦籽粒挥发物会影响到终端面制品味道的好坏^[55]。面制品的香味物质包括原有籽粒中的挥发物成分,也包括烘焙与蒸煮加工过程中和加工后产生的新挥发性化合物。已证实发酵温度、酵母浓度会影响面包的风味,在精麦面包和全麦面包中,发酵温度会影响美拉德反应,酵母用量较低会使面包皮中己醇含量提高^[56]。而在不同阶段下生成的挥发物类型也不同。可通过改变糖类和氨基酸等氨基化合物的种类和烘焙工艺,达到改善风味目的,特别是促进中间产物吡嗪的产生,加强烘烤类面制品的香味^[57]。

此外,制粉温度对挥发物的形成和含量也有重要影响。在 100 °C 内面粉挥发物主要由 C6-C10 挥发性醛和醇组成,短链醛类和醇类也被认为是基本风味成分,在大于 100 °C 尤其 120 °C 时化合物的形成速率增加,会生成较多长碳链醛和醇、呋喃、酸、酯以及含氮含硫的挥发性化合物^[58]。因此在制粉过程中应该注意对温度的控制以保证原始味道,也可以通过对面粉进行不同程度加热烘烤实现对面制品风味的调解。而在较高的挤压温度下,蒸煮类面制品中吡咯、噻吩、噻唑啉的含量增加,呋喃和醛的含量降低^[59]。因此,在面粉加工和面团加工过程中,进行温度的控制有利于保持特定的麦香味。

4 小麦籽粒挥发物的应用和展望

4.1 食味品质方面的应用

对小麦品种造成的面制品香味差异研究较少,尤其在具体香味物质方面的差异研究并不多见。Romina 等^[38]对硬粒小麦面粉、粗面条、煮熟的意大利面挥发性化合物的组成和含量进行了比较,认为存在显著差异,且在蒸煮过程中,出现了新形成的酮类化合物,而且大部分醛类含量增加,醇类降低,因此最终面制品因品种不同味道可能会有很大的差

异。面制品加工过程中挥发物含量也会产生很大变化。燕雯^[2]研究结果表明,在面团与馒头制作和蒸煮过程中会生成特殊香味成分,在酵母的作用下面团产生大量醇类,酮类和醛类含量下降,在蒸煮后的馒头中产生了较多的醛类、杂环类物质,并且醇类含量在蒸煮过程中逐渐降低,在面粉中添加不同含量胚芽对制作出的馒头香味有很大影响。不同加工方式对馒头香味也有影响,对比干酵母馒头,传统老酵头馒头中醇类和酯类含量较高,可能除了酵母菌外其他微生物通过自身代谢产生了丰富的香气成分^[60]。面制品香气形成的化学反应机制还需要进一步研究,通过面制品挥发物与小麦籽粒挥发物建立相关联系,对快速筛选具有麦香味的小麦品种具有重要作用。

4.2 植物保护

小麦籽粒气味挥发性化合物的研究结果可以应用在植物保护中。曾妹静^[61]对 5 种小麦粉挥发物成分进行探究,结果表明正己醇、柠檬烯、正壬醛、十二烷、十四烷 5 种挥发性化合物为小麦挥发物的共有成分,其中正壬醛和十四烷标准品对赤拟谷盗成虫和幼虫具有驱避作用,正己醇对赤拟谷盗有引诱效果。此外,小麦籽粒气味挥发性化合物还可用于研究小麦化感作用对病虫害的防御效果。化感物质属于次生代谢物,其中次生代谢物中萜类和酚类化合物也大多具有香气特征,目前研究的小麦化感物质主要有异羟肟酸类和酚酸类物质,如阿魏酸、丁香酸、香草酸等,研究结果表明这些化感物质的利用可减少化学药剂的使用,达到保护环境的目的,同时还能增强小麦抗逆性和品质^[62]。

4.3 小麦籽粒贮藏质量评价

小麦籽粒气味特征还能够用于小麦籽粒贮藏质量的评价。小麦籽粒在不同储藏年限间其挥发性成分具有一定差异,这些差异可利用电子鼻进行检测。庞林江等^[63]对不同储藏年限的小麦籽粒进行检测,较好地地区分开了不同年份的小麦籽粒。利用电子鼻采集陈化小麦籽粒气味信息,可辨别出掺杂不同比例其他年份的陈化小麦籽粒^[64]。小麦籽粒在贮藏过程中极易受到霉菌的感染。应用电子鼻技术^[65-66]可有效区分不同霉菌感染的小麦籽粒,判断不同程度的霉变,GC-MS 方法检测霉变小麦籽粒的结果表明随着储藏时间延长,烯炔类、醛类含量不断减少,酸类与酯类含量呈下降的趋势^[67]。

4.4 香麦种质资源的筛选与创制

当前,香味种质资源的筛选和创制在水稻中研究较多,而在小麦中尚未见相关报道。在水稻中,对香稻香味物质种类及其合成途径、香味遗传和基因定位等的研究已取得很大进展,研究成果成功应用于香味性状的分子标记辅助育种中。基于禾谷类作物基因线性同源性的认识,今后应对浓烈麦香味的小麦种质资源进行筛选,并以麦香味为育种目标进行相关亲本材料的创制。

参考文献:

- [1] 祁占林,赵春娜. 利用模糊综合评价法对小麦色泽气味进行定量测定的研究[J]. 粮食科技与经济, 2013, 38(1): 24-25.
- [2] 燕雯. 黄淮冬麦区小麦挥发性成分研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012.
- [3] 徐鑫,毛红艳,王仙,等. 顶空固相微萃取全麦粉中挥发性成分的研究[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(10): 1902-1908.
- [4] 呼德,张颖,张甜甜,等. 同时蒸馏萃取和动态顶空萃取法提取焙烤小麦胚芽中风味物质[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 236-242.
- [5] 孙浩然. 小麦麸皮香气成分研究及产品开发[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
- [6] 袁佐云,章晴,任晨刚,等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法分析全麦粉中的挥发性成分[J]. 中国食品学报, 2016, 16(11): 240-245.
- [7] 史建芳,胡明丽. 小麦麸皮营养成分及利用现状[J]. 现代面粉工业, 2012, 26(2): 25-28.
- [8] 任国宝,任晨刚,曾维鹏,等. 全麦粉品质及其挥发性物质研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(10): 8-15.
- [9] 王才才,王晓曦,马森,等. 小麦粉出粉率对馒头品质及挥发性物质的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(10): 167-174, 210.
- [10] 梁玲,陈存社. 小麦胚芽饼干烘烤过程中麦香味的形成及分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 64-69.
- [11] 王太军,温纪平,王华东,等. 热处理对小麦麸皮挥发性成分的影响[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(8): 68-70.
- [12] 程宏桢,蔡志鹏,王静,等. 基于 GC-MS/GC-O 和电子鼻技术评价百香果酒香气特征[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 256-264.
- [13] AMPUER S, BOSSET J O. The electronic nose applied to dairy products: a review[J]. Sensors and Actuators B, 2003, 94: 1-2.
- [14] CORRADO D N, ANTONELLA M, EUGENIO M, et al. Lung cancer identification by the analysis of breath by means of an array of non-selective gas sensors[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2003, 18(10): 1209-1218.
- [15] 贾洪锋,王鑫,邓红,等. 电子鼻在食品气味分析中的应用[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(1): 38-42.
- [16] 刘亚雄,刘丛丛,庄玥,等. 基于电子鼻技术对调味品中非法添加罂粟壳的检测[J]. 现代食品, 2017(7): 81-85.
- [17] 高静,王淑娟,刘思彤,等. 基于电子鼻技术判别黄山毛峰的储存期和陈化度[J]. 茶业通报, 2018, 40(2): 77-85.
- [18] 纪淑娟,张丽萍,卜庆状,等. 基于电子鼻技术对冷藏后南果梨货架期间气味的变化分析[J]. 食品科学, 2012, 33(7): 123-126.
- [19] 张正武,王勃,林云,等. 基于电子鼻技术的陇南花椒品种区分[J]. 经济林研究, 2019, 37(4): 188-193.
- [20] 赵天霞,沈飞,周日春,等. 小麦霉菌侵染程度电子鼻快速检测方法的初步研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 135-140, 146.
- [21] 张婷婷,赵宾,杨丽明,等. 基于电子鼻技术的小麦种子活力鉴别[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(9): 123-130.
- [22] SONG H, LIU J. GC-O-MS technique and its applications in food flavor analysis[J]. Food Research International, 2018, 114: 187-198.
- [23] 李盼,吴玲,冯旭,等. 固相微萃取技术研究进展[J]. 亚太传统医药, 2016, 12(1): 52-55.
- [24] SONG N E, LEE J Y, LEE Y Y, et al. Comparison of headspace-SPME and SPME-arrow-GC-MS methods for the determination of volatile compounds in Korean salt-fermented fish sauce[J]. Applied Biological Chemistry, 2019, 62(1): 16-24.
- [25] 丁艳芳,谢海燕,王晓曦,等. 食品风味检测技术发展概况[J]. 现代面粉工业, 2013, 27(1): 22-26.
- [26] 朱晓凤,刘政权,宛晓春,等. SDE 和 HS-SPME 结合 GC-MS 分析霍山黄大茶香气成分的比较[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 214-221.
- [27] 徐晓玲,曹建敏,庞雪莉,等. HS-SPME arrow-GC/MS 结合化学计量学分析烟草香气突变体中特征香气成分[J]. 烟草科技, 2020, 53(9): 33-61.
- [28] 刘玉平,苗志伟,陈海涛,等. 4 种市售香米中挥发性成分提取与分析[J]. 食品科学, 2011, 32(20): 181-184.
- [29] LIU X, DENG J K, BI J F, et al. Cultivar classification of cloudy apple juices from substandard fruits in China based on aroma profile analyzed by HS-SPME/GC-MS[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 102: 304-309.
- [30] 胡贵喜,姜小冬,王玉泉,等. 不同来源小麦面粉香气成分的比较研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(12): 2332-2336.
- [31] MATTIOLO E, LICCIARDELLO F, LOMBARDO G M, et al. Volatile profiling of durum wheat kernels by HS-SPME/GC-MS[J]. European Food Research and Technology, 2017, 243(1): 147-155.
- [32] 夏玲君,宋焕禄. 香味检测技术——GC/O 的应用[J]. 食品与发酵工业, 2006, 32(1): 83-87.
- [33] 高歌,庞雪莉,刘海华,等. 基于 GC-MS-O 香气成分分析和多元统计分析的柚子品种鉴别[J]. 中国食品学报, 2020, 20(5): 283-292.
- [34] 陈光静,郑炯,丁涌波,等. 顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱联用结合嗅闻法分析异味薏米的异味成分[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(1): 230-237.
- [35] 叶兴锋,张伟,周屹峰,等. 水稻籽粒香味性状研究进展[J]. 现代农业科技, 2013(6): 9-16.

- [36] 张涛,张红宇,蒋开锋,等. 水稻香味基因的精细定位[J]. 分子植物育种, 2008(6): 1038-1044.
- [37] STARR G, PETERSEN M A, JESPERSEN B M, et al. Variation of volatile compounds among wheat varieties and landraces[J]. Food Chemistry, 2015, 174: 527.
- [38] ROMINA B, CRISTIANO P, GIUSEPPE S, et al. Metabolic profiling and analysis of volatile composition of durum wheat semolina and pasta[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 49(2): 301-309.
- [39] 王俊. 四川烟区烤烟挥发性香气成分区域特征研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [40] 课净璇, 瞿媛, 黎杉珊, 等. 基于 GC-MS 建立花椒挥发油指纹图谱及在汉源红花椒鉴定中的应用[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(11): 124-134.
- [41] 张春丽, 王影丽, 袁新田. “香稻米”产地宿州市夹沟土壤和水质的分析[J]. 宿州学院学报, 2010, 25(11): 48-50.
- [42] SEITZ L M. Volatile compounds in wheat cultivars from several locations in Kansas[M]//CHARALAMBOUS G. Developments in food science. Amsterdam: Elsevier, 1995.
- [43] RICCARDO D F, SACCHETTI G, MASTROCOLA D. Wheat classification according to its origin by an implemented volatile organic compounds analysis[J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128217.
- [44] 张义茹, 刘龙龙, 李红英, 等. 禾谷加工、蒸煮过程中挥发性物质研究进展[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(12): 897-904.
- [45] 张蓝月. 小麦储藏期间指标、气味成分及谷蠹培养气味成分变化的研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2016.
- [46] 袁建, 付强, 高瑀琰, 等. 顶空固相微萃取-气质联用分析不同储藏条件下小麦粉挥发性成分变化[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(4): 106-109.
- [47] JI T, KANG M, BAIK B K. Volatile organic compounds of whole-grain soft winter wheat[J]. Cereal Chemistry, 2017, 94(3): 594-601.
- [48] 赵丹. 小麦储藏过程中挥发性物质与品质变化关系研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012.
- [49] TOMOYUKI N, HIDEO N, MARIE U, et al. Cultivar differences in lipoxygenase activity affect volatile compound formation in dough from wheat mill stream flour[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 87: 231-238.
- [50] 谢鸿光, 许惠滨, 潘丽燕, 等. 植物脂肪氧化酶的特性与功能[J]. 福建稻麦科技, 2019, 37(1): 56-60.
- [51] 赵丹, 张玉荣, 林家永, 等. 小麦储藏品质评价指标研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2012(2): 10-14.
- [52] 扎桑, 卓嘎, 徐东东, 等. 作物脂肪氧化酶的研究进展[J]. 大麦与谷类科学, 2015(2): 12-20.
- [53] 渠琛玲, 王红亮, 王芳婷, 等. 微波处理对小麦风味的影响[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(9): 26-28.
- [54] 刘晓庚. 类胡萝卜素的氧化降解及其对面粉品质的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(19): 457-460.
- [55] 苏东民, 胡丽花, 苏东海, 等. 不同干酵母发酵对馒头挥发性物质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 1-4, 11.
- [56] 张义茹, 刘龙龙, 李红英, 等. 禾谷加工、蒸煮过程中挥发性物质研究进展[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(12): 897-904.
- [57] 林静嫦, 钟先锋, 汪彩云. 美拉德反应对饼干品质及安全性的研究进展[J]. 农产品加工, 2020(11): 62-65.
- [58] CHAI D, LI C W, ZHANG X X, et al. Analysis of volatile compounds from wheat flour in the heating process[J]. International Journal of Food Engineering, 2019, 15(10): 252.
- [59] BREDIE W L P, MOTTRAM D S, GUY R C E. Effect of temperature and pH on the generation of flavor volatiles in extrusion cooking of wheat flour[J]. J Agric Food Chem, 2002, 50: 1118-1125.
- [60] 苏东海, 李自红, 苏东民, 等. 固相微萃取分析传统老酵头馒头挥发性物质[J]. 食品研究与开发, 2011, 6(32): 94-97.
- [61] 曾姝静. 小麦粉挥发物对赤拟谷盗趋向行为的作用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018.
- [62] 卫新菊. 小麦化感作用及其应用[J]. 小麦研究, 2005, 26(2): 25-29.
- [63] 庞林江, 王俊, 路兴花. 电子鼻判别小麦陈化年限的检测方法研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(8): 1717-1722.
- [64] 庞林江. 电子鼻技术在小麦陈化评定中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [65] 周博, 嵇云, 蔡国华, 等. 电子鼻检测农作物病虫害的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(15): 143-148.
- [66] 何莲, 易宇文, 彭毅秦, 等. 基于电子鼻和气质联用分析不同生长期茂县花椒叶挥发性风味物质[J]. 南方农业学报, 2019, 50(3): 641-648.
- [67] 刘潇. 小麦及其制品霉菌与呕吐毒素污染的快速检测方法研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2018.

(责任编辑: 张震林)