



黄宗文, 吕建华, 郭亚飞, 古成才. 储粮环境挥发性化合物与储粮害虫的关系研究进展 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (1): 74–84.

## 储粮环境挥发性化合物与储粮害虫的关系研究进展

黄宗文, 吕建华\*, 郭亚飞, 古成才

(河南工业大学粮油食品学院粮食储藏安全河南省协同创新中心, 郑州 450001)

**摘要:** 每种粮食的储粮环境中都存在有其特性挥发物, 储粮害虫的发生对储粮环境中挥发物具有重要影响。本文简述了顶空式固相微萃取法、浸入式固相微萃取法、电子鼻检测法等储粮挥发物的提取方法及其优缺点, 对小麦 *Triticum aestivum* L.、稻谷 *Oryza sativa* L.、玉米 *Zea mays* L. 和燕麦 *Avena sativa* L. 等主要储藏粮食种类的挥发性化合物成分、粮食挥发物对昆虫行为反应的影响、主要储粮害虫 (赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*、锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* 和象虫 *Sitophilus* spp.) 发生与粮食挥发物的关系等研究进展进行综述, 探讨了储粮环境挥发性化合物与储粮害虫关系未来的研究方向, 以期对今后储粮害虫生态防治研究与应用提供参考信息。

**关键词:** 挥发性化合物; 提取方法; 储粮害虫; 储粮环境; 害虫防治

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 01-0074-11

### Research progress on volatile compounds in stored grain environment and their relationship with stored grain insects

HUANG Zong-Wen, LV Jian-Hua\*, GUO Ya-Fei, GU Cheng-Cai (Henan Collaborative Innovation Center for Grain Storage Security, School of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Each grain has its characteristic volatiles in the storage environment, and the occurrence of grain storage pests has an important impact on the volatiles in the storage environment. Firstly, the extraction methods of stored grain volatiles such as headspace solid-phase microextraction, immersion solid-phase microextraction, electronic nose detection and their advantages and disadvantages were briefly summarized, then reviewed the research progress on the composition of volatile compounds of major stored grain species such as *Triticum aestivum* L., *Oryza sativa* L., *Zea mays* L. and *Avena sativa* L., the effects of grain volatiles on behavioral responses of insects, and the relationship between the occurrence of major grain storage pests (*Tribolium castaneum*, *Cryptolestes ferrugineus* and *Sitophilus* spp.) and grain volatiles. Finally, future research directions on the relationship between volatile compounds and insects in grain storage environments were discussed, with a view to providing reference information for future research and application of ecological control of grain storage insects.

**Key words:** Volatile compound; extract method; stored grain insects; grain storage environment; pest control

基金项目: 国家自然科学基金 (31870395)

作者简介: 黄宗文, 女, 河南平顶山人, 硕士研究生, 研究方向为储粮害虫综合治理及储粮品质控制, E-mail: 503920308@qq.com

\* 通讯作者 Author for correspondence: 吕建华, 男, 博士, 教授, 研究方向为储粮害虫综合治理及储粮品质控制, E-mail: jianhly@163.com

收稿日期 Received: 2020-10-29; 接受日期 Accepted: 2020-12-22

粮食是人类赖以生存的生活必需品,其营养物质丰富,储藏期间极易遭受储粮害虫为害。虫害不仅会导致粮食营养价值降低,而且其代谢物会造成粮食污染,影响储粮品质。新鲜的粮食收获后会挥发出特有的气味,可通过感官评价对粮食质量进行判断 (Evans *et al.*, 2000)。随着储存时间的变化,粮食储藏期间会释放出不同的挥发性化合物,除了其本身的气味以外,还包括粮粒内部的化学反应及害虫发生时产生的特征性挥发物 (张玉荣等, 2019)。储粮挥发性成分在储藏过程的变化规律与储粮品质有较强的相关性,可作为粮食储藏过程中品质劣变的早期指标 (牛永浩, 2015)。通过监测储粮环境挥发性化合物成分及其含量变化对害虫发生进行预警是目前世界害虫防治领域的一个研究热点。

本文对储粮环境挥发性化合物种类、提取检测方法及其与储粮害虫发生的关系研究进展进行综述,以期对今后储粮害虫的发生进行早期预警、储粮害虫生态防治研究与应用有所裨益。

## 1 粮食环境挥发物不同提取方法

挥发性成分常用的提取方式有溶剂直接萃取 (Extraction method) (赵谋明等, 2018)、同时蒸汽蒸馏 (Simultaneous-distillation) (Pollien *et al.*, 1997)、氮气吹扫蒸馏法 (Nitrogen purge steam distillation) (Song *et al.*, 2015)、固相微萃取法 (Solid-phase microextraction, SPME) 和电子鼻检测 (Electronic Nose Detection) 等。固相微萃取是一种集采样、提取、浓缩、注射为一体的样品预处理技术。与气相色谱或液相色谱相结合,可以有效地分析样品中的微量有机化合物。固相萃取装置由萃取手柄和萃取头两部分组成,固相微萃取头为一根长约 1 cm,表层涂有二氧化硅的熔融石英纤维。SPME 因具有制备简单、分析快速、成本低、无有机溶剂等特点,广泛应用于食品、环境、化工、医药等行业 (Lin *et al.*, 2010)。根据提取方式的不同,可分为顶空式固相微萃取、浸入式固相微萃取。顶空式固相微萃取是使用萃取头在提取样品上方的气相中进行萃取。浸入式固相微萃取即萃取头直接插入样品提取液中,适用于大多数有机化合物,萃取快,但易受基体干扰。电子鼻检测通过模拟生物嗅觉系统,对气味物质进行数字化信息表征。不同的提取方法各有其优

缺点 (表 1)。

### 1.1 顶空式固相微萃取 (Headspace-solid phase Micro-Extraction SPME, HS-SPME)

顶空萃取方法根据萃取状态可分为静态顶空、动态顶空、顶空吸附萃取和顶空固相微萃取 (Sansenya *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2019)。其中,顶空固相微萃取被认为是一种简单、快速、灵敏的收集顶空挥发物的方法。顶空固相微萃取是将待测样本置于一恒温密闭容器中,通过加热升温使得挥发性组分从样本中挥发出来;当顶空瓶里面的气液 (气固) 两相中达到热力学平衡后,将纤维膜暴露于气相中,对样品顶空中的挥发性物质进行萃取。崔丽静等 (2011) 采用 HS-SPME 技术对不同品系玉米中挥发性成分进行萃取分析,检测到的玉米挥发物有醇类、醛类、酮类、酯类、烃类、有机酸类以及杂环类化合物等,且不同品种之间的挥发性成分组成和含量差异较大。Lin 等 (2010) 采用 HP-SPME 萃取稻谷中的挥发性化合物,对提取时间、提取温度、样品量和平衡时间等条件进行优化,稻谷中的挥发性化合物有醇类、醛类、酮类、酯类、烃类、有机酸类以及杂环类化合物。Wawrzyniak 等 (2019) 验证了 HS-SPME 从咖啡豆中提取丙烯酰胺的可行性,采用气相色谱-质谱法 (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS) 在选择离子监测 (Selected ion monitoring, SIM) 模式下对丙烯酰胺含量进行定量,丙烯酰胺的定量限 (LOQ) 为 3  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。Wei 等 (2013) 将 HS-SPME 与 GC-MS 结合使用鉴定亚麻籽油中的芳香活性化合物,初步鉴定出共 60 种化合物,其中 6 种芳香活性化合物被认为是造成亚麻籽油异味的主要因素。

### 1.2 浸入式固相微萃取 (Direct immersion-Solid phase microextraction, DI-SPME)

浸入式固相微萃取将纤维膜直接浸入样品提取液中对挥发性较差的化合物进行富集,需要萃取纤维在样品中暴露足够的时间。若样品蒸汽压很小或没有时,适宜采用浸入式萃取。范文来等 (2007) 对比顶空式和浸入式固相微萃取对白酒的萃取效果,将样品于 30 $^{\circ}\text{C}$  预热 15 min,插入 PDME 萃取头萃取 30 min 后运行 GC-MS 分析,结果表明浸入式固相微萃取更适用于酯类化合物的萃取。郭亚芸等 (2017) 研究证实侵入式固相微萃取可有效测定出葡萄酒样中痕量的戊菌唑、氟硅唑、烯唑醇和苯醚甲环唑。Hasan 等 (2018) 采用浸入

式固相微萃取对不同交配阶段（交配前、交配中、交配后）的地中海果蝇 *Ceratitis capitata* 的挥发性化合物进行萃取，用气相色谱-质谱（GC/MS）对化合物进行收集、分离和鉴定。研究发现交配前和交配过程中化合物组成没有显著差异。但交配后产生了新的化合物，如 1-碘癸烷、9-(Z)-三聚烯和 11, 13-二甲基-12-十四碳烯-1-醋酸酯。张军翔等（2007）比较研究了浸入式固相微萃取和液液萃取对不同葡萄酒香气成分的萃取率，结果表

明浸入式固相微萃取对一些分子量较小的酯类物质和醛类物质具有较好的萃取性，可用于挥发性较强的成分。张凌芳（2018）用浸入式固相微萃取技术对 15 日龄未交配的玉米象 *Sitophilus zeamais* 和米象 *Sitophilus oryzae* 雄虫表皮化合物进萃取行分析，结果表明玉米象雄虫表皮化合物中酯类含量最高，而米象雄虫表皮化合物中则是醇类即甾醇含量最高。

表 1 挥发性化合物不同提取方法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of different extraction methods for volatile compounds

| 提取方法 Extract method   | 优点 Advantages   | 缺点 Disadvantages   |
|---|---|--|
| 顶空式固相微萃取<br>(HS-SPME)<br>Headspace solid phase<br>microextraction         | <p>样本制备简单方便；成本效益高、无需溶剂；对于一些挥发性组分以及半挥发性组分灵敏度较好；能有效地避免污染；减少误差累积</p> <p>Sample preparation is simple and convenient, cost-effective and solvent-free, and the sensitivity is better for some volatile components and semi-volatile components, effectively avoid pollution, reduction of error accumulation.</p> | <p>挥发性成分的竞争现象会影响定量；纤维涂层敏感且多次使用会降低使用寿命；检测范围较窄，检测周期较长；定量检测的精确度不高</p> <p>The competition of volatile components affects the quantification. Fiber coating is sensitive and repeated use will reduce the service life, the detection range is narrow and the detection period is long. The accuracy of quantitative detection is not high.</p>                                     |
| 浸入式固相微萃取<br>(DI-SPME)<br>Direct immersion solid phase<br>micro-extraction | <p>分析时间短，所需样品量少；操作简单，成本低；一次性分析成分多，且无需大量的有机溶剂；具有环境友好性</p> <p>Short analysis time, low sample volume, simple operation, low cost, many components in one analysis, and without the need for large amounts of organic solvents, environment friendly.</p>  | <p>价格昂贵，普适性不广；萃取头易受到基体污染，使用寿命较短；目标化合物的回收率和精密度要低于液-液萃取，与大分子紧密结合后无法分离</p> <p>Expensive, not widely applicable. Extraction head is susceptible to matrix contamination, short service life, the recovery rate and precision of the target compound are lower than the liquid-liquid extraction, and can not be separated from the macromolecules after the close combination.</p> |
| 电子鼻检测法<br>Electronic nose   | <p>适用于提取液体或固体样品的顶空挥发物；没有样品准备阶段；单一分析的成本相对较低；使用方便</p> <p>Suitable for extraction of headspace volatiles from liquid or solid samples, no sample preparation stage, relatively low cost for a single analysis, easy to use.</p>  | <p>需要大型仪器，价格昂贵；分析时间较长，需要载气、高能耗；中等敏感性，缺乏定性信息；传感器易污染</p> <p>Large instruments are needed and are expensive. Long analysis time, carrier gas needed, high energy consumption, medium sensitivity and lack of qualitative information. Sensor is easy to be polluted.</p>  |

### 1.3 电子鼻检测法

电子鼻（E-nose）由具有不同选择性的气体传感器、信号收集单元和模式识别软件组成

（2018）。基于传感器阵列和适当的模式识别方法的电子鼻可以模拟人的嗅觉来评价食品质量。它提供了挥发物的全场景，而不仅仅是挥发物的定

量分析 (Lu *et al.*, 2019), 主要用于预测水稻样品之间的差异程度, 研究储藏过程中香气化合物的变化 (Lin *et al.*, 2018)。电子鼻检测技术具有分析快速、无损检测等优点, 在食品及粮食检测领域得到了广泛应用。Abramson 等 (2005) 通过嗅觉化学传感器阵列检测不同湿度处理后硬质小麦的气味挥发物, 研究发现 12 个传感器中的 9 个能够跟踪初始水分含量 20% 小麦的气味挥发性物质的变化, 且两种处理在采样时间内会产生明显不同的信号。Zhang 和 Wang (2007) 使用电子鼻静态顶空取样法对不同储存期和不同虫害程度的小麦进行了评估和分类, 结果表明对电子鼻数据进行主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 和线性判别分析 (Linear discrimination analysis, LDA), 可以成功区分不同贮藏期和不同虫害程度的小麦。代雨婷等 (2020) 研究证明电子鼻在棉花的早期棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 虫害检测上具有可行性, 通过特征值优化可以提高电子鼻的识别准确率。

## 2 主要粮食种类的挥发性物质

粮食挥发物指粮食在常温下储藏过程中所散发的特有物质, 是组成粮食各种气味的重要成分 (曾淑静等, 2017)。小麦、稻谷和玉米是我国的三大主粮。

### 2.1 小麦挥发物

小麦是世界上分布最广、种植面积最大、贸易量最多的粮食作物之一, 世界上约有 43 个国家、35% 的人口以小麦为主食 (吕修涛, 2006)。在西方国家, 2017 年小麦产量超过 7.7 亿吨 (Rahman *et al.*, 2019)。张玉荣等 (2010) 通过顶空固相微萃取 (HS-SPME) 对不同储藏时间小麦中的挥发性物质进行提取分析, 证实了小麦挥发性成分主要是羟基化合物, 如烃类、醛类、醇类和酮类等。Xu 等 (2017) 对普通小麦粉和糯硬小麦粉采用同样热处理后, 通过顶空固相微萃取提取挥发性物质进行气相色谱分析, 对比处理前后挥发性成分的变化, 发现糯硬小麦粉比普通小麦粉更容易产生气味活性化合物, 如醛类、醇类、呋喃类和酮类等。Sambaraju 等通过实验证明小麦挥发物可吸引印度谷螟 *Plodia interpunctella* 雌虫产卵 (2008)。通过对不同霉变程度小麦的挥发性气体进行检测, 严松等 (2019) 发现新鲜小麦中主

要的挥发性物质为异戊醛、己醛及壬醛 3 种醛类物质; 随着小麦霉变程度的加剧, 开始检测出 1-辛烯-3-醇、2-丁基-1-辛醇、甲酸异戊酯等物质。从小麦粉到馒头的加工过程中, 烃类和醛类挥发性物质的数量先减少后增多, 醇类、酯类和其他物质数量先增多后减少。任国宝等 (2017) 研究发现, 与全麦粉馒头相比, 挤压膨化全麦馒头的醛类化合物相对含量急剧增加, 且新增了吡嗪类和酚类化合物, 这可能是挤压膨化全麦粉馒头有特殊异味的主要原因。因此, 小麦挥发性物质在不同加工阶段会有所变化, 可能会产生新的化合物 (燕雯等, 2012)。

### 2.2 稻谷挥发物

稻谷作为主要粮食作物之一, 其产量占世界谷物总产量的 1/3。稻米香气品质的评估和研究在促进稻米市场竞争和农业经济方面发挥着重要作用, 其中特征性挥发性化合物的鉴定对稻米香气分析至关重要。作为我国的主要储备粮食种类, 稻谷在储藏期间由于自身的呼吸和各种酶的作用, 其品质会随着储藏时间的延长而不断变化, 甚至劣变。迄今为止, 稻谷中已报告了 300 多种挥发性化合物, 主要有烷烃类、苯环类、醛类、酮类、醇类、酸酯类和杂环类 7 大类 (Champagne, 2008; Hashemi *et al.*, 2013)。林家永等 (2009) 采用顶空固相微萃取气质联用法对不同品种稻谷的挥发性成分进行分析, 结果表明挥发性成分总含量最高的是醛类和烃类, 其次为醇类、酮类和杂环类。曹俊等 (2017) 对不同储藏温度下稻谷的挥发物进行检测, 研究发现在低温 (10℃) 储藏时, 检测到的稻谷挥发性成分最多, 其中 2, 6-二叔丁基对甲酚、辛基酚、肉桂腈是新鲜稻谷中的特征性挥发性物质。Buda 等 (2016) 在挥发性化合物中发现了茶香酮并证明其能引起印度谷螟雌虫的嗅觉反应。夏雨杰等 (2020) 测定稻谷储藏期间感染霉菌前后挥发性物质的变化, 研究发现酮基、醛基、羟基等含氧基团和含氮基团是稻谷的挥发性气味的来源, 此类物质在稻谷储藏期间随着霉变程度的加深会产生较大差异。

### 2.3 玉米挥发物

玉米是全球三大谷物之一, 也是我国主要的储备粮食种类, 在我国农业生产中占有重要地位。它不仅可以直接供给人们食用, 还可以生产加工成饲料。玉米在储藏期间易遭受虫害, 且因呼吸作用会发生劣变, 致使其种用、食用和加工品质

降低。采用顶空固相微萃取不同储藏时间玉米的挥发性物质,周显青等(2008)研究发现随着储藏时间的延长,玉米的挥发物含量逐渐增加。其中,总挥发性物质含量、丙酮、对环己二烯、环戊乙炔、乙酸、己醛等的含量与储藏时间、生理生化指标有较高相关性,可作为玉米储存品质变化的评判指标。钱佳成和宋伟(2020)模拟仓储条件,采用顶空固相微萃取-气质联用(GC-MS)对玉米挥发性物质进行检测,确定了香兰素、不饱和烯烃、不饱和烯醇等物质可有效判别玉米储藏状态。褚能明等(2017)检测了不同品种鲜玉米的挥发性物质,主要成分有醇类、醛类、酮类、酯类、烃类、有机酸类以及杂环类化合物等。徐瑞等(2019)对不同储藏温度条件下的玉米样品进行挥发性成分萃取分析,研究发现随着储藏温度的降低,玉米中的烃类、酮类物质相对含量逐渐减小。

#### 2.4 燕麦挥发物

燕麦作为另一类具有独特香味的谷物,因营养价值全面,膳食纤维丰富,受到国内外研究人员的重视。Schuh 和 Schieberle(2005)对燕麦片挥发性物质的研究报告称,(E,E,Z)-2,4,6-壬烯醛是影响燕麦片风味的特征性挥发物。该物质在空气中的极低气味阈值为0.0002 ng/L时,表现出强烈的燕麦片状气味。汪新洁等(2018)采用SPME技术对经过不同挤压膨化热处理的燕麦片挥发性成分进行提取分析,结果表明1-辛烯-3-醇、己醛、壬醛和2-戊基呋喃可作为挤压燕麦片独特风味的关键风味化合物。孙培培等(2011)采用同时蒸馏萃取气质联用(SDE-GC-MS)对燕麦片中的挥发性成分进行了提取分析,得到72种挥发性化合物,其中含量最高的成分为芥酸酰胺。Klensporf等(2008)采用气相色谱-嗅觉测定法和香气提取物稀释分析法(Aroma extract dilution analysis, AEDA)鉴定出燕麦片的主要香气成分是2-甲基-3-呋喃硫醇,脱壳后燕麦片中总挥发性物质减少至430.8  $\mu\text{g/kg}$ ,这可能是去除麸皮的效果,因为麸皮中也含有少量挥发性物质。

### 3 储粮害虫和粮食挥发物的关系研究

#### 3.1 粮食挥发物对昆虫行为反应的影响

不同植物在自然条件下会释放出不同的挥发

性物质,且在受到害虫取食刺激后会释放出挥发性成分,主要是萜类、含氮和含硫类化合物(莫圣书等,2006)。早在20世纪90年代,Dicke等(1992)研究发现,植物挥发物会刺激蛾类昆虫的性信息素合成和释放速率,对雌雄虫的吸引和交配行为起到促进作用。通过研究植物挥发物对昆虫行为反应的影响可为研究储粮害虫与储粮环境中挥发物的关系提供新思路。Phillips等(1993)研究了粮食挥发物对米象和赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 的引诱性,结果表明米象对新鲜谷物中的戊醛、麦芽酚和香兰素表现出趋向性,而赤拟谷盗无明显反应。Ukeh等(2010)研究发现象虫对玉米和小麦种子挥发物均有较强的趋向性,但对姜 *Zingiber officinale* Roscoe、胡椒 *Piper nigrum* L. 等刺激性植物挥发物的气味表现出明显的驱避反应。周强等(2003)通过研究发现褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stal.) 成虫对水稻挥发物主要成分2-庚醇表现出明显驱避性。刘鑫宇(2020)研究了10种谷物挥发性物质对印度谷螟幼虫的引诱效果,其中燕麦、薏仁醛类物质和高粱 *Sorghum bicolor* (L.) Moench 中酸类物质对幼虫的引诱效果最好。Trematerra等(2010)通过研究发现相较于完整粮粒和虫害粮粒,锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis* 和赤拟谷盗等储粮害虫更容易被机械损伤粮粒释放的挥发物吸引。夹竹桃叶干粉对赤拟谷盗有一定的控制作用,且对幼虫的驱避效果好于成虫(段爱菊等,2005)。Cao等(2018)通过试验发现,药材甲 *Stegobium paniceum* 对不同的药材挥发物会表现出显著的寄主气味偏好,这说明昆虫能够根据气味刺激来区分不同的寄主,并证实了挥发性物质在药材甲成虫寻找寄主过程中起着重要作用。Zhang(2020)通过对害虫发生率的调查发现挥发性物质戊酸与昆虫的伤害率呈负相关,适当浓度的戊烷酰胺可保护稻谷受害虫害。已有研究表明,粮食挥发性成分多且复杂,对昆虫的行为具有重要影响,可以用作天然引诱剂、驱避剂、拒食剂和产卵抑制剂。目前,谷物挥发物在控制储存的谷物害虫中的应用主要是将谷物挥发物与昆虫信息素结合以形成食物引诱剂,并通过调节其行为来控制害虫(Niu et al., 2016)。

#### 3.2 害虫发生对储粮挥发物的影响

中国有226种储藏性害虫,其中大多数是鞘翅目,其次是鳞翅目(李丹丹等,2019)。不同的储粮种类、不同的储粮害虫发生时环境当中的挥发性化合物组成与含量不同(表2)。

表 2 不同检测样品中的挥发性化合物  
Table 2 Volatile compounds in different test samples

| 检测样品<br>Test samples  | 特征挥发性化合物<br>Characteristic volatile compounds  | 检测方式<br>Detection mode | 参考文献<br>References            |
|---|--|------------------------|-------------------------------|
| 赤拟谷盗<br><i>Tribolium castaneum</i>                                    | 甲基苯醌 ( methyl-1,4-benzoquinone )、乙基苯醌 ( ethyl-1,4-benzoquinone )、1-十三烯   | HP-SPME-GC/MS          | Senthilkumar ,2010            |
| 感染赤拟谷盗的小麦粉<br>Wheat flour infected with<br><i>Tribolium castaneum</i> | 3-戊烯-2-酮 ( 3-penten-2-one )、3-辛酮 ( 3-octanone )、2-辛烯醛 ( 2-octenal ) 和 2-丁基-1-辛醇 ( 2-butyl-1-octanol )  | SPME-GC/MS             | Abuelnnor <i>et al.</i> ,2010 |
|   | 2-乙基-2,5-环己二烯-1,4-二酮 ( 2-ethyl-2,5-cyclohexadiene-1,4-dione )  | HP-SPME-GC/MS          | Niu <i>et al.</i> ,2015       |
| 锈赤扁谷盗<br><i>Cryptolestes ferrugineus</i>                              | 4,8-二甲基-(E,E)-4,8-癸二烯内酯 ( I ) ( (E,E)-4,8-dimethyl-4,8-decadien-10-olide ( I ) )、(3Z,11S)-十二烯-1-内酯 ( (3Z,11S)-3-dodecen-11-olide ( II ) )              | HP-SPME-GC/MS          | Wong <i>et al.</i> ,1983      |
| 谷象<br><i>Sitophilus granarius</i>                                     | 2-甲基丙酸 ( 2-methylpropanoic acid ) 和 3-甲基丁酸 ( 3-methylbutanoic Acid )   | SPME-GC/MS             | Abuelnnor ,2010               |
| 感染谷象的小麦<br>Wheat infected with<br><i>Sitophilus granarius</i>         | 甲基呋喃 ( 2-methylfuran )、2-甲基呋喃 ( 2-ethylfuran )、2-甲基-1-丁醇 ( 2-methyl-1-butanol )、2-乙基-2-戊烯醛 ( 2-ethyl-2-pentenal ) 和 2,5-二甲基吡嗪 ( 2,5-dimethylpyrazine ) | SPME-GC/MS             | Abuelnnor <i>et al.</i> ,2010 |
| 小麦 <i>Triticum aestivum</i> L.  | 烃类化合物 Hydrocarbon  | HP-SPME-GC/MS          | 张玉荣等 ,2010                    |
| 稻谷 <i>Olyza sativa</i> L.   | 烃类化合物 Hydrocarbon  | E-NOSE 和<br>SPME-GC/MS | 曹俊等 ,2017                     |
| 玉米 <i>Zea mays</i> L.   | 醇类化合物 Alcohol  | E-NOSE GCMS            | 钱佳成和宋伟 ,2020                  |

3.2.1 赤拟谷盗发生与储粮挥发物的关系

赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* ( Herbst ) 是粮食储藏和加工期间的主要害虫，常存在于储藏的小麦及加工后的小麦粉当中，不仅会对粮食造成直接的危害，而且会导致粮食品质劣变。已有研究表明其主要挥发性成分有甲基-1,4-苯醌 ( MBQ ) 和乙基-1,4-苯醌 ( EBQ ) ( Atrygalle *et al.* ,1991; Eisner *et al.* ,1998 )，通常与大量的 1-戊二烯 ( C15: 1 ) 一起存在。Villaverde 等 ( 2007 ) 采用固相微萃取技术 ( SPME ) 提取赤拟谷盗释放的挥发性物质，结合 GC-MS 鉴定分析在样品中检测出苯醌，表明 SPME 分析在检测害虫挥发物方面存在巨大潜力。Niu 等 ( 2016 ) 通过提取赤拟谷盗的挥发性成分，首次检测到 2-甲基-对苯醌和 4-乙基-1,3-苯并二醇。2-乙基-2,5-环己二烯-1,4-二酮仅存在于赤拟谷盗感染的小麦粉中，被认为是检测小麦粉中赤拟谷盗发生的特征性物质。Abuelnnor 等 ( 2010 ) 对赤拟谷盗感染的小麦粉中特征性挥发性化合物进行检测，除了已知物质外还检测出 4

种被赤拟谷盗感染的小麦粉所特有的挥发性物质：3-戊烯-2-酮、3-辛酮、2-辛烯醛和 2-丁基-1-辛醇。通过检测特征性挥发物的含量变化，可预测储粮环境中的赤拟谷盗发生情况。

3.2.2 锈赤扁谷盗发生与储粮挥发物的关系

锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* ( Stephens ) 是一种广泛分布于小麦和其他谷物中的害虫。Senthilkumar ( 2010 ) 采用顶空萃取锈赤扁谷盗释放的挥发性物质进行分析，研究发现挥发性物质含量会随着虫口密度的不同而变化，高温和低温会促进害虫释放更多的挥发性化合物。Borden 等 ( 1979 ) 证实锈赤扁谷盗对小麦挥发物表现出明显选择趋向性。孙博 ( 2018 ) 比较了 12 种常见粮食的挥发性化合物对锈赤扁谷盗的引诱效果，晚粳稻米和小黄米的引诱效果最显著，其中戊醛、庚醛、异辛醇对锈赤扁谷盗有明显的引诱作用。Collins 等 ( 2007 ) 提取豆角花生的挥发性物质，研究其对锈赤扁谷盗的吸引效果。结果表明异丁酸壬基、戊烷-2-1、辛烷-3-1、3-甲基丁醇、己酸、

4-乙基苯乙酮、*e*-3-辛烷-2-*l*、*e*-2-壬烯醛和壬醛等有助于增强锈赤扁谷盗的活性,使得诱捕率大大提升。

### 3.2.3 象虫发生与储粮挥发物的关系

Abuelnnor 等 (2010) 研究发现被谷象 *Sitophilus granarius* 侵染的小麦会产生 2-甲基呋喃、2-乙基呋喃、2-甲基-1-丁醇、2-乙基-2-戊烯醛和 2,5-二甲基吡嗪等挥发性化合物。张凌芳 (2018) 研究表明  $\beta$ -谷甾醇乙酸酯、胆固醇乙酸酯、 $\gamma$ -谷甾醇和  $\beta$ -谷甾醇为米象特有的挥发性化合物,可用来进行种的验证。Li (2013) 发现不同品种的小麦提取物对玉米象和赤拟谷盗的吸引力不同。Srivastava 等 (2019) 通过检测稻谷中尿酸和蛋白质的含量变化与传感器的响应情况进行对比,验证了电子鼻传感器可用于监测存储稻谷中米象侵染的可行性。玉米在储存过程中会受到玉米象和镰刀菌的侵染,从而导致粮食变质和经济损失。Usseglio 等 (2017) 研究发现暴露于 1-辛烯-3-醇和 3-辛醇的玉米籽粒损害较小,暴露于真菌挥发物的玉米籽粒对玉米象的吸引力较小,不易受到伤害。说明感染真菌的玉米释放出的 VOCs 可以减少玉米象的侵害。

### 3.2.4 其他储粮害虫

Xie 等 (2014) 鉴定了小麦植物挥发物中的 4 种成分:水杨酸甲酯、醋酸顺式己烯、己烯醇和 1-己醇。水杨酸甲酯只对异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 有吸引力,顺-3-己烯乙酸和己烯醇的混合物对麦长管蚜 *Sitobion avenae* 和异色瓢虫有吸引力,顺-3-己烯乙酸对麦长管蚜有较强的吸引力,而 1-己醇对麦长管蚜的吸引力大于对其天敌的吸引力。Behzad 等 (2019) 采用电子鼻 (E-nose) 系统对小麦粉中地中海粉螟 *Ephestia kuehniella* 密度进行检测,其中对 5 龄幼虫的灵敏性最高,准确率达 90%。Laopongsi 等 (2014) 采用顶空固相微萃取法 (SPME) 检测储藏小麦中害虫感染情况,结果表明 SPME 法可有效提取几种常见储粮害虫所释放的挥发性化合物。其中,对谷蠹 *Rhyzopertha dominica* 挥发物检测的灵敏度最高,其次分别是对赤拟谷盗和锈赤扁谷盗挥发物的检测。在 1 kg 小麦小麦粉当中能够成功地检测出 1 头谷蠹或者赤拟谷盗;在 1 kg 小麦粉中至少放置达到 20 头锈赤扁谷盗时才能够被检测出来。Carroll 等 (2006) 研究发现草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 幼虫对损伤玉米的挥发性化合物表现出显著趋向性,芳樟醇和 4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯是玉米

受到虫害 1 h 后主要的挥发性化合物。张玉荣等 (2019) 通过研究发现被害虫侵害后的小麦中烷烃类物质含量先下降后上升,烯烃类和酮类物质含量上升,醛类物质含量下降。这些挥发性化合物可能是害虫的特征性物质,可以通过监测以上物质的含量变化预测粮食品质的变化,为储粮害虫预防及治理提供新思路。

## 4 结论与展望

国内外对于谷物挥发物的相关研究主要集中在挥发物的提取鉴定、不同储藏条件对其挥发物含量的影响、以及不同害虫的挥发物成分组成和含量的差别等,对于将储粮环境挥发物组成及含量变化用于害虫预测预报与防治的研究较少。植物挥发性化合物会影响昆虫性信息素的合成及昆虫行为反应,昆虫的为害也会影响植物挥发物成分和含量的变化 (祝传书等,2003;张秀歌等,2015)。赤拟谷盗发生时会产生苯醌类特征性挥发物,可作为判断储藏环境中是否有赤拟谷盗发生的依据。但经赤拟谷盗感染的小麦粉会产生 3-戊烯-2-酮和 3-辛酮等新的挥发性成分 (NIU *et al.*, 2016)。因此,苯醌并不是判断赤拟谷盗发生的唯一物质。在实际储粮环境中,害虫取食、运动或交配等行为发生时会对环境中的 CO<sub>2</sub> 含量产生影响,同时可能产生某些特殊物质,引起储粮环境中的挥发性物质的组成与含量变化。因此在日常仓储管理工作中可通过监测 CO<sub>2</sub> 浓度变化、害虫特征性挥发物的出现判断粮食是否受到害虫侵染,并可作为判断粮食品质变化的依据。如何通过高效、及时、便捷检测储粮环境中特征性挥发物组成与含量的变化对害虫发生进行早期预警是未来储粮害虫综合治理的研究热点。今后可通过联合改进挥发物提取、分离、分析鉴定技术,建立储粮环境特征性挥发物与储粮害虫发生的数学模型,结合互联网、大数据技术实现对储粮环境中害虫发生的远程实时监测,对储粮害虫的发生进行早期预警,为高效防治储粮害虫、确保安全储粮保驾护航。

### 参考文献 (References)

- Abramson D, Hulasare R, York RK, *et al.* Mycotoxins, ergosterol, and odor volatiles in durum wheat during granary storage at 16% and 20% moisture content [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2005, 41 (1): 67-76.
- Abuelnnor NA, Jones PRH, Ratcliffe NM, *et al.* Investigation of the

- semiochemicals of confused flour beetle *Tribolium confusum* Jaquelin du Val and grain weevil *Sitophilus granarius* (L.) in stored wheat grain and flour [R]. UK: 10<sup>th</sup> International Working Conference on Stored Product Protection, 2010.
- Al-Khshemawee H, Du X, Agarwal M, et al. Application of direct immersion solid-phase microextraction (DI-SPME) for understanding biological changes of Mediterranean fruit fly (*Ceratitis capitata*) during mating procedures [J]. *Molecules*, 2018, 23 (11): 2951.
- Attygalle AB, Blankespoor CL, Meinwald J, et al. Defensive secretion of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1991, 17 (4): 805–809.
- Behzad N, Kobra F, Seyed SM, et al. Detection of different densities of *Ephestia kuehniella* pest on white flour at different larvae instar by an electronic nose system [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2019, 84: 1–6.
- Borden JH, Dolinski MG, Chong L, et al. Aggregation pheromone in the rusty grain beetle, *Cryptolestes ferrugineus* (Coleoptera: Cucujidae) [J]. *Canadian Entomologist*, 1979, 111 (6): 681–688.
- Buda V, Apsegaite V, Cereskiene LB, et al. Response of moth *Plodia interpunctella* to volatiles of fungus-infected and uninfected wheat grain [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2016, 69: 152–158.
- Cao J, Liu X, Chen WR, et al. The volatile compositions from rice stored with dynamic temperature and humidity based on SPME-GC/MS and electronic nose (e-nose) technic [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (1): 142–160. [曹俊, 刘欣, 陈文若, 等. 基于E-NOSE与SPME-GC/MS技术分析温湿度动态变化过程中稻谷的挥发性成分 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (1): 142–160]
- Cao Y, Li S, Benelli G, et al. Olfactory responses of *Stegobium paniceum* to different Chinese medicinal plant materials and component analysis of volatiles [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2018, 76: 122–128.
- Carroll MJ, Schmelz EA, Meagher RL, et al. Attraction of *Spodoptera frugiperda* larvae to volatiles from herbivore-damaged maize seedlings [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2006, 32 (9): 1911–1924.
- Champagne ET. Rice aroma and flavor: A literature review [J]. *Cereal Chemistry*, 2008, 85 (4): 445–454.
- Collins LE, Bryning GP, Wakefield ME, et al. Progress towards a multi-species lure: Identification of components of food volatiles as attractants for three storage beetles [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2007, 43 (1): 53–63.
- Cui LJ, Lin JY, Zhou XQ, et al. Analysis on volatile compounds in corn by headspace solid-phase microextraction and GC-MS [J]. *Grain Storage*, 2011, 40 (1): 36–40. [崔丽静, 林家永, 周显青, 等. 顶空固相微萃取与气-质联用法分析玉米挥发性成分 [J]. 粮食储藏, 2011, 40 (1): 36–40]
- Dai YT, Zhou B, Wang J. Application of electronic nose in detection of cotton bollworm infestation at an early stage [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36 (3): 313–320. [代雨婷, 周博, 王俊. 电子鼻技术在棉花早期棉铃虫害检测中的应用 [J]. 农业工程学报, 2020, 36 (3): 313–320]
- Dicke M, Sabelis MW. Costs and Benefits of Chemical Information Conveyance: Proximate and Ultimate Factors [M]. Chapman & Hall, 1992.
- Duan AJ, Liu TS, Zhang ZQ, et al. Study on the repellent effect of *Nerium indicum* power on *Tribolium castaneum* [C]. The 6<sup>th</sup> National Youth Academic Exchange Meeting of Chinese Entomological Society, 2005.
- Eisner T, Eisner M, Attygalle AB, et al. Rendering the inedible edible: Circumvention of a millipede's chemical defense by a predaceous beetle larva (Phengodidae) [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1998, 95 (3): 1108–1113.
- Evans P, Persaud KC, Meneish AS, et al. Evaluation of a radial basis function neural network for the determination of wheat quality from electronic nose data [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2000, 69 (3): 348–358.
- Fan WL, Xu Y. Determination of aroma compounds of Chinese liquors by direct immersion-solid phase microextraction (DI-SPME) [J]. *Liquor Making*, 2007, 1: 18–21. [范文来, 徐岩. 应用浸入式固相微萃取 (DI-SPME) 方法检测中国白酒的香味成分 [J]. 酿酒, 2007, 1: 18–21]
- Guo YY, Shi HM, Han XM, et al. Development and application of a screening method for triazole fungicides determination in wine samples using DI-SPME-GCMS [J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2017, 36 (7): 811–814. [郭亚芸, 史红梅, 韩晓梅, 等. 浸入式固相微萃取-气相色谱-质谱联用法分析葡萄酒中三唑类农药 [J]. 分析试验室, 2017, 36 (7): 811–814]
- Hashemi FSG, Rafil MY, Ismail MR, et al. Biochemical, genetic and molecular advances of fragrance characteristics in rice [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2013, 32 (6): 445–457.
- Klensporf D, Jejen HH. Effect of heat treatment on the flavor of oat flakes [J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48 (3): 656–661.
- Laopongsit W, Szrednicki G, Craske J. Preliminary study of solid phase micro-extraction (SPME) as a method for detecting insect infestation in wheat grain [J]. *Grain Storage*, 2014, 59: 88–95.
- Lee YS, Oh YJ, Kim TH, et al. Quantitation of 2-acetyl-1-pyrroline in aseptic-packaged cooked fragrant rice by HS-SPME/GC-MS [J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7 (1): 266–272.
- Li DD, Zhu YG, He Y, et al. Investigation on the species and distribution of stored grain insects in northwest China [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34 (10): 83–86. [李丹丹, 朱延光, 何洋, 等. 中国西北地区储粮昆虫种类及分布调查 [J]. 中国粮油学报, 2019, 34 (10): 83–86]
- Li X, Zhang X, Lu Y. Alluring effects of different varieties of broken wheat extracts on stored grain pests [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52 (19): 4661–4664.
- Lin H, Man ZX, Kang WC, et al. A novel colorimetric sensor array based on boron-dipyrromethene dyes for monitoring the storage time of rice [J]. *Food Chemistry*, 2018, 268: 300–306.
- Lin JY, Fan W, Gao YN, et al. Study on volatile compounds in rice by HS-SPME and GC-MS [J]. *Julius-Kühn-Archiv*, 2010, 425: 125–134.
- Lin JY, Gao YN, Wo SF, et al. Headspace solid phase microextraction



- coupled to GC-MS for analyzing volatile components in paddy [J]. *Food Science*, 2009, 30 (20): 277–282. [林家永, 高艳娜, 吴胜芳, 等. 顶空固相微萃取-气质联用法分析稻谷挥发性成分 [J]. *食品科学*, 2009, 30 (20): 277–282]
- Liu XY, Wang DX, Zeng FF, *et al.* Volatile organic compounds analyzed of ten species of cereal by HS-SPME/GC-MS and the comparison of their larva attraction on *Plodia interpunctella* (Hübner) [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2020, 28 (5): 79–88. [刘鑫宇, 王殿轩, 曾芳芳, 等. 常温下 10 种谷物挥发物气相-质谱测定及对印度谷螟幼虫引诱率比较 [J]. *粮油食品科技*, 2020, 28 (5): 79–88]
- Lu L, Fang CY, Hu ZQ, *et al.* Grade classification model tandem BpNN method with multi-metal sensor for rice eating quality evaluation [J]. *Sensors and Actuators*, 2019, 281: 22–27.
- Lv XT. Thoughts on wheat production, market and technology development. In: China Agro-technological Extension Association. The 5<sup>th</sup> China Agricultural Extension Research Essay Collection [C]. Beijing: China Agro-technological Extension Association, 2006, 22: 369–374. [吕修涛. 小麦生产、市场与技术发展情况的思考. 见: 中国农业技术推广协会. 第五届中国农业推广研究征文集 [C]. 北京: 中国农业技术推广协会, 2006, 22: 369–374.]
- Majchrzak T, Wojnowski W, Dymerski T, *et al.* Electronic noses in classification and quality control of edible oils: A review [J]. *Food Chemistry*, 2018, 246: 192–201.
- Mo SS, Zhao DX, Chen Q. Advances on relationships between plant volatiles and insect behavior [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2006, 6: 84–93. [莫圣书, 赵冬香, 陈青. 植物挥发物与昆虫行为关系研究进展 [J]. *热带农业科学*, 2006, 6: 84–89]
- Niu YH, Hardy G, Agarwal M, *et al.* Characterization of volatiles *Tribolium castaneum* (H.) in flour using solid phase microextraction-gas chromatography mass spectrometry (SPME-GCMS) [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2016, 5 (1): 24–29.
- Niu YH. Detection of Volatiles in Stored Grain and Stored Grain Insect with Solid Phase Microextraction-Gas Chromatography Mass Spectrometry [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2015. [牛永浩. 固相微萃取与气质联用检测储粮及储粮害虫挥发性化合物的研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015]
- Phillips TW, Jiang XL, Burkholder WE, *et al.* Behavioral responses to food volatiles by two species of stored-product coleoptera, *Sitophilus oryzae* (Curculionidae) and *Tribolium castaneum* (Tenebrionidae) [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1993, 19 (4): 723–734.
- Pollien P, Chaintreau A. Simultaneous distillation extraction: Theoretical model and development of a preparative unit [J]. *Analytical Chemistry*, 1997, 69 (16): 3285–3292.
- Qian JC, Song W. Analysis of volatile components of corn under different storage conditions [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41 (16): 252–258. [钱佳成, 宋伟. 不同储藏条件下玉米挥发性成分研究 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41 (16): 252–258]
- Rahman HU, Yue XF, Yu QY, *et al.* Specific antigen based and emerging detection technologies of mycotoxins [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99 (11): 4869–4877.
- Ren BG, Ren CG, Zeng WP, *et al.* The quality properties and volatile compounds of whole wheat flour [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32 (10): 8–15.
- Sambaraju KR, Phillips TW. Effects of physical and chemical factors on oviposition by *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2008, 2 (5): 955–963.
- Sansanya S, Hua YL, Chumanee S. The correlation between 2-Acetyl-1-pyrroline content, biological compounds and molecular characterization to the aroma intensities of Thai local rice [J]. *Journal of Oleo Science*, 2018, 67 (7): 893–904.
- Schuh C, Scjieberle P. Characterization of (E, E, Z)-2, 4, 6-nonatrienal as a character impact aroma compound of oat flakes [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53 (22): 8699–8705.
- Senthilkumar T. Characterization of Volatile Organic Compounds Released by Stored Grain Insects [D]. Winnipeg: University of Manitoba, 2010.
- Song YR, Jeong DY, Baik SH. Monitoring of yeast communities and volatile flavor changes during traditional Korean soy sauce fermentation [J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80 (7–9): 2005–2014.
- Srivastava S, Mishra G, Mishra H. Fuzzy controller based E-nose classification of *Sitophilus Oryzae* infestation in stored rice grain [J]. *Food Chemistry*, 2019, 283 (15): 604–610.
- Sun B. Studies on the Biological Characteristics of *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) and the Control Effect of Push-pull Technology [D]. Guangdong: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2018. [孙博. 锈赤扁谷盗生物学及“Push-pull”技术对其控制作用研究 [D]. 广东: 仲恺农业工程学院, 2018]
- Sun PP, Huang MQ, Sun BG, *et al.* Study on volatile components in oats flakes by simultaneous distillation extraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32 (12): 479–483.
- Trematerra P, Sciarreta A, Tamasi E. Behavioural responses of *Oryzaephilus surinamensis*, *Tribolium castaneum* and *Tribolium confusum* to naturally and artificially damaged durum wheat kernels [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2010, 94 (2): 195–200.
- Ukeh DA, Birkett MA, Bruce TJ, *et al.* Behavioural responses of the maize weevil, *Sitophilus zeamais*, to host (stored-grain) and non-host plant volatiles [J]. *Pest Management Science*, 2010, 66 (1): 44–50.
- Usseglio VL, Pizzolitto RP, Rodriguez C, *et al.* Volatile organic compounds from the interaction between *Fusarium verticillioides* and maize kernels as a natural repellents of *Sitophilus zeamais* [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2017, 73 (5): 109–114.
- Villaverde ML, Juarez MP, Mijailobsky S. Detection of *Tribolium castaneum* (Herbst) volatile defensive secretions by solid phase microextraction-capillary gas chromatography (SPME-CGC) [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2007, 43 (4): 540–545.
- Wang XJ, Liu FJ, Zheng J, *et al.* Effects of different extrusion temperatures on the flavor components of oatmeal [J]. *Modern Food*

- Science and Technology*, 2018, 34 (6): 188–196. [汪新洁, 刘凤杰, 郑俊, 等. 不同挤压膨化温度对燕麦片风味成分的影响 [J]. 现代食品科技, 2018, 34 (6): 188–196]
- Wawrzyniak R, Jasiewicz B. Straightforward and rapid determination of acrylamide in coffee beans by means of HS-SPME/GC-MS [J]. *Food Chemistry*, 2019, 301: 125264.
- Wei CQ, Xi WP, Nie XY, et al. Aroma characterization of flaxseed oils using headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-olfactometry [J]. *European Journal of Lipid Science & Technology*, 2013, 115 (9): 1032–1042.
- Xia YJ, Wang J, Chen SB, et al. Analysis of mould volatile substances and quality during rice storage [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41 (8): 242–246. [夏雨杰, 汪静, 陈尚兵, 等. 稻谷储藏过程霉菌挥发性物质和品质分析 [J]. 食品工业科技, 2020, 41 (8): 90–95]
- Xie HC, Delphine D, Jia F, et al. Effect of wheat plant volatiles on aphids and associated predator behavior: Selection of efficient infochemicals for field study [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2014, 51 (6): 1470–1478.
- Xu JT, Zhang WB, Adhikari K, et al. Determination of volatile compounds in heat-treated straight-grade flours from normal and waxy wheats [J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 75: 77–83.
- Xu R, Li HJ, He ZF, Changes and principal component analysis of volatile compounds in corn ears during frozen storage [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45 (1): 201–218. [徐瑞, 李洪军, 贺稚非. 玉米冻藏过程中挥发性成分变化及主成分分析 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45 (1): 210–218]
- Yan S, Lin H. GC-MS of volatile organic compounds for identification of moldy wheat based on olfactory visualization [J]. *Food Science*, 2019, 40 (2): 275–280. [严松, 林颢. 基于嗅觉可视化技术和气相色谱-质谱联用鉴别霉变小麦 [J]. 食品科学, 2019, 40 (2): 275–280]
- Yan W, Zhang ZM, Liu LP. Headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometric analysis of volatile composition changes of steamed bread during processing [J]. *Food Science*, 2012, 33 (12): 254–258. [燕雯, 张正茂, 刘拉平. 顶空固相微萃取-气质联用分析小麦馒头制作过程中的挥发性成分变化 [J]. 食品科学, 2012, 33 (12): 254–258]
- Zeng SJ, Lv JH, Huo MF, et al. Effect of cereal volatile matter on behavior of stored-grain insects and its application [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2017, 25 (6): 70–74. [曾姝静, 吕建华, 霍鸣飞, 等. 谷物挥发物对储粮害虫行为的影响及其应用研究进展 [J]. 粮油食品科技, 2017, 25 (6): 70–74]
- Zhang HM, Wang J. Detection of age and insect damage incurred by wheat, with an electronic nose [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2007, 43 (4): 489–495.
- Zhang JX, Feng CG, Li H. Aroma composition of wine studied by different extraction methods [J]. *Liquor Making*, 2007, 2: 69–71. [张军翔, 冯长根, 李华. 不同萃取方法对葡萄酒香气成分的研究 [J]. 酿酒, 2007, 2: 69–71]
- Zhang LF. Effects of Volatile on the Mating and Feeding Behavior of *Sitophilus zeamais* and *Sitophilus oryzae* [D]. Zhengzhou: Journal of Henan University of Technology, 2018. [张凌芳. 挥发性物质对玉米象和米象交配及取食行为影响研究 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2018]
- Zhang XG, Li X, Sun XX, et al. Effect of plant volatiles on moth sex pheromone [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2015, 52 (6): 1333–1344. [张秀歌, 李祥, 孙小旭, 等. 植物挥发物对蛾类昆虫性信息素的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2015, 52 (6): 1333–1344]
- Zhang Y, Teng B, Wang D, et al. Discovery of a specific volatile substance from rice grain and its application in controlling stored-grain pests [J]. *Food Chemistry*, 2020, 339: 128014.
- Zhang YR, Gao JY, Lin JY, et al. Analysis of volatile compounds changes of wheat during storage by headspace solid phase microextract and gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2010, 38 (7): 953–957. [张玉荣, 高艳娜, 林家勇, 等. 顶空固相微萃取-气质联用分析小麦储藏过程中挥发性成分变化 [J]. 分析化学, 2010, 38 (7): 953–957]
- Zhang YR, Shao S, Yu YW, et al. Effects of growth and reproduction of boring pests on volatile components of wheat [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 40 (2): 85–94. [张玉荣, 邵帅, 于英威, 等. 蛀蚀性害虫生长繁殖对小麦挥发性成分的影响 [J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2019, 40 (2): 85–94]
- Zhao MM, Xu Y, Su GW, et al. Effects of starch materials on the aroma quality of high-salt liquid fermentation soy sauce [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34 (6): 130–142. [赵谋明, 许瑜, 苏国万, 等. 不同淀粉质原料对高盐稀态酱油香气品质的影响 [J]. 现代食品科技, 2018, 34 (6): 130–142]
- Zhou Q, Xu T, Zhang GR, et al. Repellent effects of herbivore-induced rice volatiles on the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2003, 6: 739–744. [周强, 徐涛, 张古忍, 等. 虫害诱导的水稻挥发物对褐飞虱的驱避作用 [J]. 昆虫学报, 2003, 6: 739–744]
- Zhou XQ, Zhang YR, Zhang Y. Aging mechanism of stored maize and the relationship between its volatile components and quality [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 7: 242–246. [周显青, 张玉荣, 张勇. 储藏玉米陈化机理及挥发物与品质变化的关系 [J]. 农业工程学报, 2008, 7: 242–246]
- Zhu CS, Zhao HY. Plant volatile – a kind of indirect defense pathway [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2003, 31 (S1): 183–186. [祝传书, 赵惠燕. 虫害诱导的植物挥发物 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2003, 31 (S1): 183–186]
- Zhu NM, Ke JH, Yuan L. Principal components analysis for volatility of flavor compositions in different fresh sweet glutinos corn [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31 (11): 2175–2185. [褚能明, 柯剑鸿, 袁亮. 不同鲜食甜糯玉米挥发性风味物质主成分分析 [J]. 核农学报, 2017, 31 (11): 2175–2185]