

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.  
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2019.15.033

# 电子鼻检测农作物病虫害的研究进展

周 博<sup>1</sup>,嵇 云<sup>1</sup>,蔡国华<sup>1</sup>,王 俊<sup>2</sup>,曾 勇<sup>1</sup>

(1.盐城工学院机械工程学院,江苏盐城 224051; 2.浙江大学生物系统工程与食品科学学院生物系统工程系,浙江杭州 310029)

**摘要:**农作物在生长和储藏过程中会受到多种病虫害侵害,由于病虫害危害情况复杂多变、检测难度大、准确率低,现代检测技术还不能有效地解决病虫害诊断难题。电子鼻可以快速、高效、实时地识别复杂气味,在挥发物检测方面具有其他仪器无法比拟的优势,随着技术的不断成熟,电子鼻的应用研究已深入农作物病虫害检测领域,这突出反映了电子鼻技术实际应用的发展趋势。但是,电子鼻在农作物病虫害实时检测中也遇到许多困难,通过对电子鼻检测农作物病虫害的优势及存在问题进行分析,阐明电子鼻技术应用研究的发展方向。

**关键词:**电子鼻;农作物;病虫害;实时检测

**中图分类号:**S126 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2019)15–0143–05

农作物是人类重要的生活资料,是人们赖以生存的主要食物来源,在生长和储藏过程中容易受到病虫害危害,据联合国粮农组织(FAO)估计,全世界每年因病虫害草害损失的粮食约占粮食总产量的1/3,其中因病害造成的损失约10%,因虫害损失约14%。农作物病虫害除造成产量损失外,还可以直接造成农产品品质下降,使农产品腐烂、霉变等,营养、口感也会变异,甚至产生对人体有毒、有害的物质。减少农作物病虫害危害首先要做到对病虫害进行有效的监测和预警,有针对性地采取科学合理的防控方案。但是,农作物病虫害的种类众多,不同种类、不同生育期的农作物病虫害发生种类与为害程度也不相同,具有隐蔽性、不可预见性、突发性和灾害性等特点。另外病虫害的发生、发展与气候因素、地理因素和作物品种之间有着密切的关系,它同时受到多种因素的影响,具有不确定、模糊、随机性等特征,是一个复杂的非线性系统,因此农作物病虫害检测一直被认为是农业研究领域的难点和热点。

传统的农作物病虫害检测主要依靠人工观察,这种方法的可靠性取决于观察者的经验,主观性强、准确性差,难以满足实时检测的需要。近年来国内外学者已将图像识别、近红外光谱、雷达和遥感等现代技术引入农作物病虫害检测领域,这些现代检测技术在某些方面对农作物病虫害能起到有效检测作用,但也存在一些局限。例如,王志彬等采用图像识别技术对黄瓜叶部病害种类进行了有效识别<sup>[1]</sup>,但是图像识别法适合静态样本的检测,而田间所采集动态图像的处理和分析较为复杂,如何快速地从农作物群体图像中提取有效图像特征并进行矫正,是尚未解决的难题<sup>[2]</sup>。近红外光谱法具有无损伤、可靠和快速等特点,李震等研制了基于光谱技术的柑橘

全爪螨虫害快速检测仪,并通过试验检验了仪器的使用效果<sup>[3]</sup>,但是近红外光谱受环境影响大,对样本湿度比较敏感,检测精度低<sup>[4]</sup>。雷达法适合大范围迁飞害虫的检测,但检测成本过高<sup>[5]</sup>;遥感方法适用于大面积的农情调查工作,但受天气条件影响较大,检测精度不高<sup>[6]</sup>。总的来说,由于农作物病虫害影响因素众多,现有的机器检测技术还不能有效地解决病虫害诊断难题,农作物病虫害诊断技术尚需进行深入研究。

电子鼻是一种模拟生物嗅觉工作原理的新颖仿生检测仪器,与传统化学分析方法相比,电子鼻技术不需要复杂的样本前处理过程,具有在线检测速度快、灵敏度高、操作简单、费用少等优点,在农业、食品、医疗、环境等行业均有着广阔的应用前景,各发达国家都把电子鼻列为跨世纪的关键技术,并给予特别的重视和支持<sup>[7]</sup>。随着传感器技术和模式识别算法的进步,电子鼻技术日益成熟,其应用研究已经深入到农作物病虫害检测领域。农作物挥发物含有农作物的指纹信息,采用电子鼻对农作物挥发物进行检测可以间接地实现对农作物病虫害的诊断。本文首先从作物果实和田间农作物2个方面对国内外电子鼻技术在农作物病虫害领域的应用研究进行综述;然后从挥发物信息采集技术、模式识别算法、电子鼻与气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术3个方面详述农作物挥发物检测的电子鼻技术,并分析电子鼻技术在作物病虫害研究领域的现存问题;最后,结合农作物病虫害检测阐明电子鼻技术应用研究未来的发展方向。

## 1 电子鼻在农作物病虫害检测中的应用

### 1.1 作物果实病虫害检测

作物果实与田间农作物相比在样品准备、试验条件控制、试验操作等方面都较为简单易行,且检测结果更准确,因此电子鼻最初的农作物检测对象都是作物果实。农作物果实在储藏过程中,会释放出自身新陈代谢的中间产物或终产物,同时也容易受到病虫害的侵害产生特殊的挥发物,这些挥发性物质反映的样本指纹信息可以被电子鼻检测和识别。谷物检测是电子鼻在农作物方面最早的应用,美国学者1993年就使用电

收稿日期:2018–05–31

基金项目:国家自然科学基金(编号:31671583);江苏省产学研前瞻性联合研究项目(编号:BY2016065–48)。

作者简介:周 博(1971—),男,湖南长沙人,博士,副教授,主要从事电子鼻检测方面的研究。Tel:(0515)88168237;E-mail:zjzhobo@163.com。

通信作者:王 俊,博士,教授,博士生导师,主要从事农产品物理性质及其加工与检测方面的研究。E-mail:jwang@zju.edu.cn。

化学气体传感器阵列结合模式识别方法对小麦样品质量进行分类<sup>[8]</sup>。作物果实病虫害最早的研究对象也是谷物,1997 年 Jonsson 等使用电子鼻对燕麦、黑麦和大麦样品进行分类并预测发霉的程度<sup>[9]</sup>。我国对电子鼻的研究相对滞后,2004 年邹

小波等研制出一套能快速检测谷物是否霉变的电子鼻装置<sup>[10]</sup>。目前,电子鼻在谷物、土豆、花生、洋葱、苹果、芒果、草莓等病虫害检测方面都有成功的应用,表 1 列举了与电子鼻检测作物果实病虫害密切相关的部分文献。

表 1 电子鼻在作物果实病虫害检测中的应用

对象	应用	电子鼻仪器	数据处理方法	参考文献
谷物	对燕麦、黑麦和大麦进行分类并预测发霉程度	自制(14sensors)	ANN	[9]
	识别小麦中常见的腥黑穗病	自制(15sensors)	PCA、PLS	[11]
	检测小麦中的螨虫	自制(14sensors)	PCA、LDA	[12]
	使用真菌挥发性代谢物检测谷物中霉菌毒素	商业(VCM 422)	PCA、PLS	[13]
	区分不同年份的小麦和不同程度的昆虫损害	商业(PEN2)	PCA、LDA	[14]
	预测稻谷中米象害虫的数量和贮藏时间	商业(PEN2)	PCA、LDA、BPNN	[15]
	对含有霉菌毒素的小麦样品进行鉴别	自制(12sensors)	DFA	[16]
	对包含赤拟谷盗的稻米虫害程度进行检测	商业(PEN3)	LDA、BPNN	[17]
	使用电子鼻检测储藏稻谷变质情况	自制(6sensors)	FSMLR	[18]
	对霉变的小麦、水稻、玉米 3 种谷物进行检测	自制(8sensors)	PCA、RBFNN	[10]
	对 6 个霉变程度的稻谷进行检测	自制(8sensors)	PCA、BPNN	[19]
	测量大米、小米、燕麦和红豆的霉变程度	自制(8sensors)	随机共振信噪比	[20]
	对燕麦( <i>Avena sativa</i> L.)霉变程度进行区分	自制(8sensors)	随机共振、PCA	[21]
	对黄曲霉类、寄生曲霉类和青霉类谷物样品检测	商业(Fox3000)	PCA、LDA	[22]
	玉米赤霉烯酮和黄曲霉毒素 B1 的定量测定	自制(14sensors)	BPNN	[23]
马铃薯	检测马铃薯软腐病	商业(Fox3000)	PCA、PLS、SVM	[24]
	采用仿生电子鼻检测马铃薯块茎软腐病	自制(15sensors)	RBFNN、SVM	[25]
花生	对储藏的花生腐败进行分类和预测	商业(Fox4000)	MLR、Fuzzy logic	[26]
	花生有害霉菌污染的快速检测	商业(Fox3000)	PCA、LDA、PLSR	[27]
苹果	分析苹果青霉病及棒曲霉的预测模型	商业(Fox3000)	PCA、PLS	[28]
芒果	用电子鼻、声传感设备检测芒果储藏期病害	商业(Cyranose 320)	PCA、ANN	[29]
	对 4 种芒果病害病原菌发酵液的气味进行检测	商业(PEN3)	PCA、LDA、CA	[30]
草莓	采后草莓果实病原真菌病的早期检测	商业(PEN3)	PCA、MLPNN	[31]
	对草莓贮藏期常见霉菌感染进行早期检测	商业(PEN3)	PCA、LDA	[32]
洋葱	检测接种葡萄孢菌和刺胞杆菌的洋葱	自制(32sensors)	PCA、CA	[33]

注:PCA 表示主成分分析;LDA 表示线性判别分析;DFA 表示判别函数分析;CA 表示聚类分析;PLS 表示偏最小二成;MLR 表示多元线性回归;FSMLR 表示模糊集多元线性回归;Fuzzy logic 表示模糊逻辑;ANN 表示神经网络;BPNN 表示 BP 神经网络;RBFNN 表示径向基函数(RBF)神经网络;MLPNN 表示多层感知神经网络;SVM 表示支持向量机;PLSR 表示偏最小二乘回归。

从国内外电子鼻在农作物果实中的应用研究来看,谷物方面的研究最多,时间跨度与电子鼻在农作物检测领域的应用高度吻合。国内外在 2017 年均有相关的研究报道,Baskar 等使用含有 6 个传感器的自制电子鼻检测了稻谷在不同温度和不同湿度储藏时变质的情况<sup>[18]</sup>。于慧春等用电子鼻对不同霉变程度玉米样品进行检测,并用理化分析方法分别测定霉变玉米中的玉米赤霉烯酮、黄曲霉毒素含量,采用 BP 神经网络建立不同霉变程度下玉米赤霉烯酮、黄曲霉毒素含量的预测模型<sup>[23]</sup>。研究采用的电子鼻设备有自制和商业两大类,自制的电子鼻通常采用商业气体传感器组成传感器阵列,传感器数量在 6~32 个范围内,文献[9-12,18-21,23,25]均使用日本 Figaro 传感器构建电子鼻。商业电子鼻主要有德国 AIRSENSE 公司的 PEN2、PEN3,法国 Alpha Mos 公司的 Fox3000、Fox4000 等。从使用的电子鼻可以看出,早期研究更多地采用自制的电子鼻,而近期的研究使用商业电子鼻较多。这反映出早期研究主要集中在电子鼻技术的理论基础方面,后期研究更注重电子鼻技术的实际应用,研究对象从谷物向马铃薯、花生、洋葱、苹果、芒果、草莓等其他农作物延伸。

从研究的具体内容来看,作物果实随着储藏条件、储藏时间的变化其品质会发生改变,品质下降往往同致病菌作用相

关,因此病害通常与储藏时间、货架期、品质等密切相关,且相关文献较多。Jonsson 等对不同储藏时间的谷物霉变程度进行了研究<sup>[9,14,20-21]</sup>;Raigar 等对储藏的花生腐败进行了分类和预测<sup>[26]</sup>;Zakaria 等用电子鼻、声传感设备检测芒果储藏期病害<sup>[29]</sup>。有的研究直接针对病原菌进行检测,但仅采用电子鼻技术不能获得挥发性物质的成分信息,无法做到定量分析,因此通常采用电子鼻与 GC-MS 技术结合分析,既能获得挥发物整体信息也能测定各组分的浓度。沈飞等利用电子鼻与 GC-MS 技术对 6 种谷物中常见霉菌在不同生长阶段的特征挥发性气味物质进行了检测分析,对黄曲霉类、寄生曲霉类和青霉类样品的整体判别正确率分别达到 100.0%、100.0% 和 97.4%<sup>[27]</sup>。相对病害而言虫害研究较少,虫害研究基本集中在谷物方面,Ridgway 等研究了小麦受螨虫和甲虫的危害情况<sup>[12,14]</sup>;Zhou 等对感染米象、红粉甲虫的稻谷进行了研究<sup>[15]</sup>。上述研究通常是基于电子鼻传感器响应与害虫数量的关系对谷物虫害情况进行预测,也有直接针对玉米象虫态进行研究的报道<sup>[17,34]</sup>。

1.2 田间农作物病虫害检测

植物挥发物信号是植物间进行信息交流的“语言”,生物和非生物因素均可诱导产生植物挥发物,特别是植食性昆虫

和病原菌危害可以诱导植物产生特异性挥发物,植物挥发物已经成为当前研究的热点。但是对采集的植物挥发物的研究一直采用 GC-MS 技术,由于 GC-MS 仪器体积大、移动性差,加上样品分析耗时较长,不可能消除植物昼夜生长周期的影响,无法实现田间植物挥发物实时监测。电子鼻的发展弥补了 GC-MS 的不足,与 GC-MS 不同,电子鼻得到的不是被

测样品中某种或某几种成分的定性与定量结果,而是样品中挥发性成分的整体信息。农作物田间病虫害的电子鼻检测研究基于病虫害胁迫诱导植物产生特异性挥发物的原理,由于田间环境复杂多变,病虫害影响因素众多且产生机制不明确,相关研究起步较晚,到 2008 年才出现电子鼻检测农作物病虫害的报道,表 2 是电子鼻田间农作物病虫害检测相关文献。

表 2 电子鼻在田间农作物病虫害检测中的应用

研究内容	检测仪器	数据处理方法	参考文献
使用电子鼻研究黄瓜、辣椒和番茄叶片发生机械损伤或病虫害侵袭情况	电子鼻:ST214,英国;GC-MS:ATD 400	PCA、DFA、CA、SVM、RBF	[35-36]
区分健康和病菌侵害的葡萄藤;鉴别苹果树苗火疫病、花腐病	电子鼻:EOS507C、PEN3;GC-MS、PTR-ToF-MS 8000	PCA、LDA	[37-39]
使用电子鼻检测棉花害虫,区分健康棉花和受害棉花;开发用于棉花虫害检测的电子鼻	电子鼻:Cyranose 320,自制 PAD (6-10sensors);GC-MS	PCA	[40-42]
区分健康和受茎腐病感染的棕榈树;开发金属氧化物传感器的电子鼻检测棕榈树干的灵芝真菌	电子鼻:Cyranose 320,自制 (12sensors);	PCA、ANN	[43-44]
使用电子鼻和 GC-MS 检测褐飞虱虫害诱导的水稻挥发物;对受到褐飞虱危害、二化螟危害和机械损伤的水稻样本进行区分和预测;采用不同特征参数提取方法对感染早疫病病害的番茄苗进行区分	电子鼻:PEN2;GC-MS	PCA、LDA、LVQ、SDA、BPNN、GABPNN	[45-48]
使用电子鼻对棉花盲椿象成虫的种类和性别进行分类;识别棉铃虫信息素及鉴别不同时间和浓度的信息素;区分不同数量和不同虫龄的水稻褐飞虱害虫	电子鼻:Cyranose 320,PEN3;GC	PCA、LDA、PNN、BPNN	[49-51]
对棉花植株常见挥发性化合物进行定性分析,构建棉花植株常见挥发性化合物特征谱库;采用电子鼻和 GC-MS 对茶尺蠖取食诱导的茶树挥发物进行同步分析,研究损伤茶树叶片后绿叶气味物质的释放规律	电子鼻:zNoseTM4300 (EST 公司,美国);GC-MS QP2010 (岛津公司,日本)	统计分析	[52-53]

注:GABPNN 表示遗传 BP 神经网络;LVQ 表示学习矢量量化;PNN 表示概率神经网络;SDA 表示逐步判别分析;PTR-ToF-MS 表示质子转移反应-飞行时间质谱仪。

目前电子鼻在田间作物病虫害检测方面的研究还处于试验阶段,研究成果均出自国内外高校、科研机构,表 2 中文献的研究内容多数是验证电子鼻检测田间作物病虫害的可能性。英国兰卡斯特大学 Laothawornkitkul 等分别于 2008 年和 2012 年研究了电子鼻检测黄瓜、辣椒、番茄 3 种植物受到的虫害、病害情况的可能性<sup>[35-36]</sup>。意大利波罗尼亚大学 Cellini 等于 2010 年使用电子鼻和 GC-MS 技术研究了 2 种葡萄藤受损伤的情况,采用线性判别分析方法区分健康和病菌侵害葡萄藤的准确率为 83.3%<sup>[37]</sup>;2016 年采用气相色谱-质谱和质子识别飞行时间质谱鉴别遭受火疫病、花腐病危害的苹果苗挥发性化合物,并对比 2 个商业电子鼻检测结果,表明电子鼻可以用于植物早期病害的检疫<sup>[38]</sup>;2017 年对电子鼻在植物病害的诊断进行了综述<sup>[39]</sup>。美国克莱姆森大学 Degenhardt 等于 2010 年采用 Cyranose 320 电子鼻对棉花害虫和受害棉花进行检测,其中受虫害样品与电子鼻的响应信号相关性为 0.95<sup>[40]</sup>;2012 年研究表明,电子鼻区分受虫害损失 2 d 后的棉铃与健康棉铃的准确率在 80%~90% 之间<sup>[41]</sup>;2014 年报道了用于植物虫害检测的 4 代电子鼻(PAD)开发过程<sup>[42]</sup>。马来西亚 Perlis 大学的 Markom 等在 2009 年利用商业电子鼻与人工智能融合检测由灵芝菌引起的棕榈树基础茎腐病害<sup>[43]</sup>;2011 年开发了用于植物病害检测的金属氧化物传感器电子鼻<sup>[44]</sup>。Zhou 等于 2011 年采用电子鼻和 GC-MS 技术检测了褐飞虱虫害诱导的水稻挥发物,表明电子鼻技术可以诊断田间水稻虫害<sup>[45]</sup>;2012 年对受到褐飞虱危害、二化螟危害和机械损伤的水稻样本进行了研究,采用 BP 神经网络

和学习矢量量化模型对各水稻处理样本进行预测,2 种模型都取得了较好的预测结果<sup>[46]</sup>;2014 年采用不同特征参数提取方法对感染早疫病病害的番茄苗进行了区分研究<sup>[47]</sup>。美国德州农工大学 Lan 等于 2008 年针对农作物害虫进行了检测,采用 Cyranose 320 电子鼻分类调查棉花盲椿象<sup>[49]</sup>;2011 年采用电子鼻识别棉铃虫信息素及鉴别不同时间、浓度的信息素<sup>[50]</sup>;2014 年与华南农业大学 Xu 等合作区分了不同数量和不同虫龄的水稻褐飞虱害虫<sup>[51]</sup>。国内田间农作物病虫害发表的文献较少,2009 年蔡晓明等使用电子鼻研究机械损伤茶树绿叶气味物质的释放规律,并对茶尺蠖取食诱导的茶树挥发物与 GC-MS 技术进行同步对比分析<sup>[53]</sup>;2010 年潘洪生等应用电子鼻构建棉花植株常见挥发性化合物特征谱库,建立棉铃虫幼虫危害棉花植株的指纹图谱<sup>[52]</sup>。

## 2 电子鼻技术在农作物挥发物检测中的应用

### 2.1 挥发物信息采集技术

为了将挥发物引入电子鼻检测系统可以使用多种采样技术,如静态顶空技术、动态顶空技术、吹扫和捕集、固相微萃取法、吸附萃取法等。目前使用电子鼻检测农作物病虫害过程中,农作物挥发物的采集方法主要有 2 种:吸附剂萃取法和顶空法。其中,吸附剂萃取法是利用吸附剂吸附气体中的挥发物成分,然后经过高温解吸附再由电子鼻检测,该方法检测精度较高,但是检测过程增加了中间环节不适合于快速检测。顶空法操作简单,使用较多,如棉盲蝽害虫挥发性气味的采集,水稻虫害诱导挥发物的采样,但是由于顶空法采集的挥发

性化合物浓度相应较低,因此具有低灵敏度的缺点。为了提高农作物检测准确度必须使用采样袋对挥发物进行预浓缩,但是多数的研究是采用简易的采样袋进行挥发物采集,温度、顶空时间是采样时必须优化的主要参数。所以,电子鼻挥发物信息的实时、快速提取是农作物病虫害检测尚未很好解决的难题。

## 2.2 模式识别算法

建立基于电子鼻挥发物信息的病虫害检测模型必须通过适当的模式识别算法,其中 PCA、LDA、DFA、CA、ANN、PLS、MLR、SDA、SVM、ANN、GABPNN、Fuzzy logic 等已经被用于建立农作物病虫害的诊断模型。PCA、LDA、DFA、CA 方法是电子鼻检测中最常用的模式识别分类方法,这类分析方法可以对多维电子鼻传感器信息进行降维处理,提取样品分类的有效信息并且可以做到可视化,同时经上述方法优化的电子鼻信息也可作为神经网络、支持向量机等输入数据对样品进行预测,提高预测的准确性。Lan 等采用 PCA 对捕捉的棉盲椿象进行分类<sup>[49]</sup>;Zhou 等采用 PCA、LDA、SDA 和 BP 神经网络诊断了水稻褐飞虱虫害情况<sup>[46]</sup>。PLS、MLR、SDA 是回归方法,可以建立电子鼻传感器信号与被测样品指标之间的量化关系,但量化模型的建立必须对多维传感器信号进行特征提取,消除传感器冗余信息。而 ANN、SVM、GABPNN 属于非线性模式识别方法,可以对非线性样本数据进行预测,但是由于受到环境、样品特性、受害机制不明等多种因素影响,农作物病虫害预测的准确性有待提高。为了处理电子鼻农作物病虫害信息中的不确定、模糊、随机、非线性数据,已有研究采用随机共振信噪比克服电子鼻传感器漂移造成的干扰,也有研究采用模糊逻辑算法判别不同传感器信号的贡献率<sup>[20,26]</sup>。

## 2.3 电子鼻与 GC-MS 技术

仅使用电子鼻传感器数据只能对样品进行定性的分析,若要研究电子鼻诊断农作物病虫害的机制,需结合挥发性化合物具体成分标准的分析方法,很多研究采用电子鼻与 GC-MS 技术结合的方法,这既弥补了 GC-MS 无法判断所检测出的化合物对样品整体贡献的不足,也能避免电子鼻检测挥发物成分定量分析不准确的缺点,使挥发物中复杂组成成分的浓度得到系统的、高精度的测定。Blasioli 等使用电子鼻和 GC-MS 技术研究了 2 种葡萄受损伤的情况<sup>[37]</sup>;Zhou 等分析了电子鼻和 GC-MS 技术检测褐飞虱虫害诱导水稻挥发物的关联机制<sup>[45-46]</sup>;蔡晓明等使用电子鼻研究机械损伤茶树绿叶气味物质的释放规律,并对茶尺蠖取食诱导的茶树挥发物与 GC-MS 同步比对分析<sup>[53]</sup>。

## 3 电子鼻应用研究未来发展方向

### 3.1 电子鼻仪器的发展方向

从农作物病虫害领域的应用逐渐可以看出,电子鼻的应用逐渐向监测难度大、不确定性高的复杂领域发展,与这种发展趋势相适应电子鼻装备趋向于便携式、集成化、智能化、小型化。从已有的研究来看,现在的应用研究更多地使用商业的电子鼻,这主要由于开发的电子鼻受到传感器精度、适用性、开发成本等影响不能推广应用,而商业电子鼻传感器精度高、重复性好、有成熟的数据处理软件,对不同挥发性气体的综合评价已能满足基本的需要,因此便携式、小型化、商业化

的电子鼻是今后的主要发展方向。现在对电子鼻的气体采样系统、气敏传感器阵列、信号处理系统、模式识别 4 个组成部分又有更高的要求。对于气体采样系统更趋于简化,多数情况下电子鼻不配备专门的采样装置,仅采用高精度的气泵将挥发性气体引入传感器阵列室;对于气敏传感器阵列要求提高传感器阵列的精度、选择性和稳定性,目前新的传感器如生物传感器、纳米传感器已用于电子鼻的研制<sup>[54]</sup>;信号处理方面主要是对信号特征提取方法的研究,特别是多传感器信息融合的特征提取;针对模式识别的研究主要是通过不同的模式识别算法对电子鼻数据进行分析,提高测试样品检测的精度和准确性。今后的研究应该更注重对样品检测规则的建立,即检测对象影响因素的分析以及检测机制的确定,而具体的建模方法可以直接使用商业的数据处理软件。

### 3.2 多种现代技术融合应用

电子鼻的应用研究已经进入复杂领域,如农作物病虫害检测,由于病虫害具有不可预见性、突发性和灾害性等特点,加上环境复杂多变,单一的现代检测技术只能获得病虫害的部分信息,要提高电子鼻的检测精度及效率,须要采用多种技术相结合的组合式检测方法,从多个角度获取样品的相关信息,相互进行实证检验。电子鼻已经与一些现代分析仪器结合使用,如 GC-MS、质子转移反应-飞行时间质谱仪,这些仪器与电子鼻联合使用对相同样品的挥发物进行分析,能提供检测样品挥发物成分定量信息,可以更准确地对样品进行预测。电子鼻还可以和检测原理不同的其他分析仪器结合使用,如机器视觉、近红外光谱、电子舌、遥感等,这些方法可以获得检测对象另外的特性信息,未来电子鼻的研究,会趋向于多种分析仪器结合的方式。但是,多分析仪器结合应该充分考虑检测对象的特性,必须是能提高检测对象特性信息贡献率的方法,否则会导致数据冗余,降低检测精度。此外,对于融合信息的数据处理需要合适的模式识别方法,不同种类数据的特征提取、建模以及模型的稳定性、适应性是今后的研究方向。

## 4 结语

电子鼻在农作物病虫害领域的成功应用说明其技术在复杂领域具有很大的应用前景,但是复杂环境下有效信息的实时、快速提取,传感器数据的漂移和冗余,模型的精度以及稳定性、适应性等一直是电子鼻研究中亟待解决的难题。随着其应用的拓展,高精度、重复性好、便携式、小型化、商业化的电子鼻是今后的主要发展方向,其应用必会趋向于多种现代分析仪器结合的方式。

## 参考文献:

- [1] 王志彬,王开义,王书锋,等. 基于动态集成的黄瓜叶部病害识别方法[J]. 农业机械学报,2017,48(9):46-52.
- [2] 周志艳,罗锡文,张 扬,等. 农作物虫害的机器检测与监测技术研究进展[J]. 昆虫学报,2010,53(1):98-109.
- [3] 李 震,洪添胜,王 建,等. 柑橘全爪螨虫害快速检测仪的研制与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(14):49-56.
- [4] 朱丽伟,马文广,胡 晋,等. 近红外光谱技术检测种子质量的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(2):346-349.
- [5] Dean T J, Drake V A. Monitoring insect migration with radar: the ventral - aspect polarization pattern and its potential for target

- identification[J]. *Int J Remote Sens*, 2005, 26(18): 3957–3974.
- [6] 卢辉, 韩建国, 张录达. 高光谱遥感模型对亚洲小车蝗危害程度研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(3): 745–748.
- [7] 王俊, 崔绍庆, 陈新伟, 等. 电子鼻传感技术与应用研究进展[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 160–167.
- [8] Stetter J R, Findlay M W, Schroeder K M, et al. Quality classification of grain using a sensor array and pattern recognition[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1993, 284(1): 1–11.
- [9] Jonsson A, Winquist F, Schttrir J, et al. Electronic nose for microbial quality classification of grains[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 1997, 35(2): 187–193.
- [10] 邹小波, 赵杰文. 电子鼻快速检测谷物霉变的研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 121–124.
- [11] Björjesson T, Johnsson L. Detection of common bunt infestation in wheat with an electronic nose and a human panel. [J]. *Journal of Plant Diseases & Protection*, 1998, 105(3): 306–313.
- [12] Ridgway C, Chambers J, Portero – Larragueta E, et al. Detection of mite infestation in wheat by electronic nose with transient flow sampling[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1999, 79(15): 2067–2074.
- [13] Olsson J, Björjesson T, Lundstedt T, et al. Detection and quantification of ochratoxin A and deoxynivalenol in barley grains by GC – MS and electronic nose[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2002, 72(3): 203–214.
- [14] Zhang H M, 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.
- [15] Zhou B, Wang J. Detection of insect infestations in paddy field using an electronic nose[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2011, 13(5): 707–712.
- [16] Lippolis V, Pascale M, Cervellieri S, et al. Screening of deoxynivalenol contamination in durum wheat by MOS – based electronic nose and identification of the relevant pattern of volatile compounds[J]. *Food Control*, 2014, 37: 263–271.
- [17] Sai X, Zhou Z Y, Keliang L, et al. Recognition of the duration and prediction of insect prevalence of stored rough rice infested by the red flour beetle (*Tribolium castaneum* Herbst) using an electronic nose[J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 688.
- [18] Baskar C, Nesakumar N, Rayappan J B B, et al. A framework for analysing E – nose data based on fuzzy set multiple linear regression: paddy quality assessment[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2017, 267: 200–209.
- [19] 张红梅, 王俊, 叶盛, 等. 电子鼻传感器阵列优化与谷物霉变程度的检测[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(6): 1207–1210.
- [20] 惠国华, 倪或. 基于信噪比分析技术的谷物霉变快速检测方法[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 336–340.
- [21] 尹芳缘, 黄洁, 王敏敏, 等. 用电子鼻区分霉变燕麦及其传感器阵列优化[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(20): 263–269.
- [22] 沈飞, 吴启芳, 魏颖琪, 等. 谷物霉菌挥发性物质的电子鼻与 GC – MS 检测研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(7): 148–152.
- [23] 于慧春, 彭盼盼, 殷勇, 等. 电子鼻融合 BP 神经网络预测玉米赤霉烯酮和黄曲霉毒素 B1 含量模型研究[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(5): 117–121.
- [24] Massimo F R, Daciana I, John P C. Early identification of potato storage disease using an array of metal – oxide based gas sensors [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 116: 50–58.
- [25] Chang Z Y, Lv J H, Qi H Y, et al. Bacterial infection potato tuber soft rot disease detection based on electronic nose[J]. *Open Life Sci*, 2017, 12(1): 379–385.
- [26] Raigar R K, Upadhyay R, Mishra H N. Storage quality assessment of shelled peanuts using non – destructive electronic nose combined with fuzzy logic approach[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 132: 43–50.
- [27] 沈飞, 刘鹏, 蒋雪松, 等. 基于电子鼻的花生有害霉菌种类识别及侵染程度定量检测[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 297–302.
- [28] Karlshoj K, Nielsen P V, Larsen T O. Prediction of *Penicillium expansum* spoilage and patulin concentration in apples used for apple juice production by electronic nose analysis[J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55(11): 4289–4298.
- [29] Zakaria A, Shakaff A Y M, Masnan M J, et al. Improved maturity and ripeness classifications of *Magnifera indica* cv. Harumanis mangoes through sensor fusion of an electronic nose and acoustic sensor[J]. *Sensors – Basel*, 2012, 12(5): 6023–6048.
- [30] 李敏, 胡美姣, 张正科, 等. 电子鼻在芒果采后病原菌种类判别中的应用研究[J]. *热带作物学报*, 2014, 35(12): 2455–2458.
- [31] Pan L Q, Zhang W, Zhu N, et al. Early detection and classification of pathogenic fungal disease in post – harvest strawberry fruit by electronic nose and gas chromatography – mass spectrometry[J]. *Food Research International*, 2014, 62: 162–168.
- [32] 朱娜, 毛淑波, 潘磊庆, 等. 电子鼻对草莓采后贮藏早期霉菌感染的检测[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 266–273.
- [33] Li C Y, Schmidt N E, Gitaitis R. Detection of onion postharvest diseases by analyses of headspace volatiles using a gas sensor array and GC – MS[J]. *Lwt – Food Sci Technol*, 2011, 44(4): 1019–1025.
- [34] 唐培安, 侯晓燕, 孔德英, 等. 电子鼻检测玉米象不同虫态的技术研究[J]. *中国粮油学报*, 2015(12): 87–91.
- [35] Laothawornkitkul J, Moore J P, Taylor J E, et al. Discrimination of plant volatile signatures by an electronic nose: a potential technology for plant pest and disease monitoring[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(22): 8433–8439.
- [36] Ghaffari R, Laothawornkitkul J, Iliescu D, et al. Plant pest and disease diagnosis using electronic nose and support vector machine approach[J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2012, 119(5/6): 200–207.
- [37] Blasioli S, Biondi E, Braschi I, et al. Electronic nose as an innovative tool for the diagnosis of grapevine crown gall[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 672(1/2): 20–24.
- [38] Cellini A, Biondi E, Blasioli S, et al. Early detection of bacterial diseases in apple plants by analysis of volatile organic compounds profiles and use of electronic nose[J]. *Annals of Applied Biology*, 2016, 168(3): 409–420.
- [39] Cellini A, Blasioli S, Biondi E, et al. Potential applications and limitations of electronic nose devices for plant disease diagnosis[J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2596.
- [40] Henderson W G, Khalilian A, Han Y J, et al. Detecting stink bugs/ damage in cotton utilizing a portable electronic nose[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 70(1): 157–162.

潘晓曦,关一鸣,李美佳,等. 人参内生细菌 GS-1 的分离鉴定及对灰霉病菌的拮抗作用[J]. 江苏农业科学,2019,47(15):148-150.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.15.034

# 人参内生细菌 GS-1 的分离鉴定及对灰霉病菌的拮抗作用

潘晓曦,关一鸣,李美佳,张亚玉

(中国农业科学院特产研究所,吉林长春 130112)

**摘要:**从人参根部分离出 4 株内生细菌,以灰葡萄孢菌为靶向病原菌,采用平板对峙法筛选出 1 株拮抗细菌 GS-1,并结合形态学和分子生物学特征对其进行鉴定。结果表明,GS-1 为多黏类芽孢杆菌,其活菌体能够抑制病原菌菌丝的生长;发酵液对病原菌孢子萌发有抑制作用,抑制率达 62.47%。由此判断菌株 GS-1 是一株具有生防潜力的内生细菌,值得进一步开发利用。

**关键词:**人参灰霉病;灰葡萄孢菌;内生细菌;拮抗作用;多黏类芽孢杆菌

**中图分类号:** S435.675 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)15-0148-03

灰霉病由灰葡萄孢菌(*Botrytis cinerea* Pers)引起,该病作为一种常见的真菌病害对全球几百种作物造成严重损失<sup>[1]</sup>。我国于 1984 年首次发现灰霉病原菌能够侵染药用植物人参,侵染部位以根部为主。由于病原菌孢子通过空气传播,在适宜的环境条件下,短时间内便可造成栽培人参大面积感染病害。目前,我国人参灰霉病发生率依然偏高,已成为影响人参质量、产量的主要病害之一。农业上主要采取化学药剂来控

制人参灰霉病,但化学防治不仅会对生态环境造成污染,增加人参中农药残留量及病原菌的耐药性,还会威胁施药者的身体健康<sup>[2-4]</sup>。因此,探索新的方法来控制和解决人参灰霉病备受关注,其中微生物农药由于其低毒性和不受病原菌抗性影响的特点,被研究并开发利用<sup>[5]</sup>。近年来,从植物内生菌中寻找生防菌资源逐渐成为研究热点<sup>[6]</sup>。

植物内生菌生活在植物体内,它们数量众多,种类多样,在整个或部分生长周期中不仅不会引起宿主植物的病害症状,还会与宿主共同抵御外界病害的侵染,它们与病原菌竞争生长位置、营养物质和微量元素,一些内生菌可以通过产生抗生素等活性物质直接杀死病原菌或诱导植物产生激素间接提高其抗病性<sup>[7-8]</sup>。综上所述,开发内生菌作为生防菌株发展前景广阔,笔者从人参根部筛选拮抗内生细菌,以灰葡萄孢菌

收稿日期:2018-05-17

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-21)。

作者简介:潘晓曦(1983—),女,吉林长春人,硕士,助理研究员,主要从事植物病理研究。E-mail:pxxfirst1@163.com。

通信作者:张亚玉,博士,研究员,主要从事植物营养学研究。E-mail:zyy1966999@sina.com。

[41] Degenhardt D C, Greene J K, Khalilian A. Temporal dynamics and electronic nose detection of stink bug - induced volatile emissions from cotton bolls[J]. *Psyche: A Journal of Entomology*, 2012(2): 340-345.

[42] Lampson B D, Han Y J, Khalilian A, et al. Development of a portable electronic nose for detection of pests and plant damage[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 108: 87-94.

[43] Markom M A, Shakaff A Y M, Adom A H, et al. Intelligent electronic nose system for basal stem rot disease detection[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 66(2): 140-146.

[44] Abdullah A H, Adom A H, Shakaff A Y M, et al. Electronic nose system for ganoderma detection[J]. *Sensor Lett*, 2011, 9(1): 353-358.

[45] Zhou B, Wang J. Use of electronic nose technology for identifying rice infestation by *Nilaparvata lugens*[J]. *Sensor Actuat B - Chem*, 2011, 160(1): 15-21.

[46] Zhou B, Wang J. Discrimination of different types damage of rice plants by electronic nose[J]. *Biosyst Eng*, 2011, 109(4): 250-257.

[47] 叶盛,王俊. 水稻虫害信息快速检测方法实验研究——基

于电子鼻系统[J]. *农机化研究*, 2010, 32(6): 146-149.

[48] 程绍明,王俊,王永维,等. 基于电子鼻技术的不同特征参数对番茄苗早疫病病害区分效果影响的研究[J]. *传感技术学报*, 2014, 27(1): 1-5.

[49] Lan Y B, Zheng X Z, Westbrook J K, et al. Identification of stink bugs using an electronic nose[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2008, 5(S1): 172-180.

[50] Suh P C, Ding N, Lan Y. Using an electronic nose to rapidly assess grandlure content in boll weevil pheromone lures[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2011, 8(4): 449-454.

[51] Xu S, Zhou Z Y, Lu H Z, et al. Estimation of the age and amount of brown rice plant hoppers based on bionic electronic nose use[J]. *Sensors*, 2014, 14(10): 18114-18130.

[52] 潘洪生,赵秋剑,赵奎军,等. 电子鼻 zNose™ 构建棉花挥发物指纹图谱及被害棉花挥发物释放节律分析[J]. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(4): 468-473.

[53] 蔡晓明,孙晓玲,董文霞,等. 应用 zNose™ 分析被害茶树的挥发物[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 169-177.

[54] 庄柳静,高克强. 仿生嗅觉和味觉传感技术的研究进展[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(12): 1313-1321.