

李梦洋,孙耀杰,张馨,等.堆肥过程环境感知分析技术研究现状与展望[J].江苏农业科学,2018,46(21):21-27.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.21.005

堆肥过程环境感知分析技术研究现状与展望

李梦洋¹,孙耀杰¹,张馨²,郑文刚^{3,4}

(1. 河北工业大学电子信息工程学院,天津 300401; 2. 北京农业智能装备技术研究中心,北京 100097;

3. 国家农业智能装备工程技术研究中心,北京 100097; 4. 农业部农业信息技术重点实验室,北京 100097)

摘要:农业废弃物堆肥处理是当前最主要且有效的处理方式之一,目前我国堆肥方式较为粗放,传统的露天堆肥不易于管理,污染环境,还导致堆肥产品质量不高,因此须要系统了解堆肥过程环境感知分析技术并作出合理选择与优化,并对堆肥过程中环境参数进行准确稳定地监测,将微生物活动控制在合适的环境范围内,减少臭气排放,生成高质量的堆肥产品。本文在分析堆肥环境监测感知设备在产业和科研需求的基础上,从关键参数感知原理、封装结构、应用适用性以及系统集成等方面介绍国内外研究、应用现状及存在问题,提出以提高传感器稳定性、可靠性为核心,针对好氧发酵堆体特性与环境特征研究新的气体浓度、含水量感知方法,优化已有传感器以符合智能化、无线微型化、监测管理无人化、诊断维护便捷化、标准化的发展方向,为智能化堆肥环境测控研发与应用提供技术支撑。

关键词:好氧发酵;监测;堆肥;电子鼻;智能传感器

中图分类号: TP212.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)21-0021-06

当前,我国农村生活、农业生产、畜禽养殖过程中排放废弃物造成的污染和农作物秸秆焚烧导致的环境问题日益严峻,农业废弃物中的养分含量较高,这些从土壤中带走的营养物质只靠化肥是不足以返还的^[1-2]。好氧发酵堆肥以其稳定性和无害性成为当前最主要且较有效处理农业废弃物的方法之一。2013 年国务院颁布的《畜禽规模养殖污染防治条例》中指出,鼓励和支持采取粪肥还田、制造沼气及有机肥等方法,对畜禽养殖废弃物进行综合利用^[3]。中国共产党第十六届中央委员会第五次全体会议以来,国家提出要建立资源节约型、环境友好型社会,其核心目标是降低生产过程中产生的污染。对好氧发酵核心技术深入研究是加快我国资源节约型、环境友好型社会建设的重要方式,是实现农业现代化、自动化的重要途径。

堆肥过程中在线自动监测堆体环境参数,实现堆肥管控一体化,能够减少人力成本,加快发酵过程,提高发酵效率,符合密闭、环保的反应器堆肥系统发展趋势,有利于减缓环境压力,完成了从自然堆制、污染严重的传统堆肥方式到传感器监测、机器控制的智能化生产过程的转变,对于进一步提高堆肥效率和质量、实现我国智能化堆肥有着重要的实际意义。堆肥成功的关键是使微生物生活在一个较为适宜的环境中,目前,美国、德国、澳大利亚在商业应用和科学研究等方面取得较大的进展,具体的无线监测网络与云服务技术已经得以应用并形成标准,同时在臭气浓度、含水量、pH 值等测量分析与处理方面取得了突破。但我国在堆肥监测方面的研究还处于

起步阶段,监测传感器感知参数少,环境适应性差,准确度不够,测量方式较为传统,缺少有效的测量办法,未能充分利用信息与物联网技术提升堆肥环境监测水平,难以实现系统智能化、标准化,相对其他行业处于滞后状态,导致资源浪费、堆肥产物质量下降,对堆肥过程智能化生产产生不利影响,也影响了我国环境资源循环再利用的进程。

本文在综合分析堆肥环境监测需求的基础上,介绍堆体温度、含水量、氧气浓度、臭气值等参数的监测原理和方法及国内外研究现状,并介绍堆肥探针封装结构、监测系统数据传输方式及监测平台应用现状,最后分析提出该领域存在的问题和今后发展趋势,以期智能化监测堆肥环境提供参考。

1 堆肥环境监测需求分析

目前堆肥方式分为开放式和密闭式^[4-5],开放条垛式和室外静态堆肥采用原料简单的堆积,在自然好氧条件下进行物料堆制的方法,并加以定时的翻堆或通风以保持堆体环境最佳,由于堆体较高,环境测量需要 >1 m 的探杆,当不需要抛翻时,可以长时间在线监测,如需抛翻堆体时,固定在线监测会影响抛翻过程,须定时拔掉测量探头。密闭式堆肥是指将物料投放在密闭空间中,通过监测堆体温度、氧气浓度等参数控制其通风并搅拌,使物料进行生物降解和转化^[6],温度、氧气浓度测量探杆需要长时间固定在反应器壁上,且其探头不能影响反应器中搅拌工作。图 1 为不同场景传感器的应用。

尽管堆肥的物料来源有多种,但是适合微生物生存的环境是固定的,在配比物料时,配制质量含水率 45% ~ 65%, C : N (质量比)为 20 : 1 ~ 30 : 1, pH 值为 5 ~ 8^[7-14]。好氧微生物的新陈代谢释放大能量,产生水,消耗氧气,在堆肥初期,温度从室温逐步上升到 45 ℃,产生大量酸, pH 值下降到 5 左右,之后进入高温阶段(45 ~ 65 ℃), pH 值恢复到 6 ~ 8,释放氨气,前 2 个阶段耗氧速率很快,氧气浓度降低,应保持氧浓度 >8%;最后是降温阶段,有机物趋于稳定,氧气含量

收稿日期:2017-07-19

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0800602)。

作者简介:李梦洋(1993—),女,河北沧州人,硕士研究生,从事电子与通信工程、农业信息化方面的研究。E-mail:892525147@qq.com。

通信作者:孙耀杰,博士,教授,主要从事通信与测控技术研究。E-mail:sunyaojie@hebut.edu.cn;张馨,博士,副研究员,从事设施环境测控与能源管理方面的研究,E-mail:zhangx@nercita.org.cn。



图1 堆肥环境监测现场

趋于平缓。由此可见,堆肥过程中高温(50 ~ 70 ℃)、高湿(含水率 45% ~ 65%,部分鸡粪原料更高)、堆体腐蚀性(pH 值 5 ~ 8)的环境,要求传感器能工作在高温高湿环境下,温度测量范围 30 ~ 80 ℃,精度应达到至少 1 ℃;氧气浓度监测范围为 0 ~ 25% 即可,精度应为 0.1%;湿度应该可以监测 20% ~ 80%,精度最好为 0.1%。传感器封装采用耐腐蚀材料,在监测气体时,须要对被测气体进行预处理,避免影响气体测量元件,如堆体中氨气浓度一般为 500 ~ 1 000 $\mu\text{mol/mol}$,测量时采用扩散或气泵抽气方式,且须快速滤除水分,以避免气体溶于水,同时须将气体温度调整为感知元件可接受范围。

堆肥过程中一般测量堆体温度、含水量、氧气浓度、pH 值、电导率等以及堆制产生的氨气、硫化氢、含氮有机物、含硫有机物等参数的浓度,过程监测有在线、离线的需求且设备须适应室外操作环境,同时由于堆体内部环境恶劣,对传感器稳定性、可靠性、安全性、可维护性提出较高的要求。

2 堆肥过程环境参数感知原理研究与应用

2.1 堆体温度感知

传统的温度监测方法有热电偶、热电阻、热敏电阻、集成温度传感器、红外测温等。热电偶、热电阻和集成数字式温度传感器在堆体温度测量中的应用较多。其中,热电阻的结构简单、体积小,经过信号调理能获得较高测量精度,是目前应用与研究的主流。德国 LOGIDATATECH 公司生产的温度探杆使用 5 个 Pt100 传感器,具有低功耗、多点多层测温的特点,实现了堆肥过程中温度的自动化监测;de Guardia 等在好氧堆肥反应堆中使用 3 个 Pt100 温度传感器监测堆体上、中、下 3 层温度^[15];李鉴明采用 Pt100 温度传感器采集堆肥过程的温度,热响应时间 < 2 s,实现了系统的稳定性和可靠性^[16]。热电偶具有测温范围广、成本低等特点,但其调理电路相对于其他传感器复杂,堆体温度测量相对较少。美国 REOTEMP 公司生产的温度探杆,采用 K 型热电偶,测量范围为 -46 ~ 538 ℃,分辨率为 1 ℃^[17],能够较方便地测量出堆肥温度,如图 2 所示,该公司生产的无线温度探杆,设计上、下 2 个温度传感器,从堆体内部测量温度,探杆上部的 3 层密闭外壳可保护电子元件,防止水汽和腐蚀性气体的损坏,尖端部分采用非金属材料,既保证了传热还防止腐蚀。随着数字集成电路的发展,集成式数字温度传感器具有集成度高、免校准、能耗低、成本低等优点,目前最高精度已经达到 ± 0.2 ℃,符合堆体温度测量精度要求,是今后应用的主要趋势。张海波等设计了以 STC89C52 单片机为主控单元、DS18B20 为温度传感器的时

间-温度控制系统,将该系统安装在某堆肥厂中,结果证明,该系统操作简便,运行较稳定^[18]。其他如红外测温仪更多地被用在表面温度测量方面,测量精度在 ± 1 ℃ 以上,应用较少。



图2 REOTEMP 公司生产的无线温度探杆结构示意图

2.2 堆体含水量测量

对于堆体含水量的监测,有取样监测和原位监测 2 种方法^[19]。取样监测就是从堆体上取出样品进行测试,常见的是捏挤法和称质量法。捏挤法就是抓取一定的堆肥物料用力挤压,凭借测试人员的感官判断当前物料的湿度情况,该方法测量快速,但受人主观意识的影响较大,准确性低^[20]。称质量法是对比堆肥物料去除水分前后的质量或体积,从而计算出质量含水率或者体积含水率,该方法操作比较简便,使用设备价格较低,是目前在测量堆肥含水率时最常用的方法,但是在去除水分的加热时,会使得一些易挥发的固体挥发掉^[21],如甲硫醚(沸点 37.5 ℃)、丙醛(沸点 48.0 ℃)等^[22],称质量测量一般须要将样本带回实验室,不能够实现实时监测,且取出样本后破坏堆体,影响堆体微生物的生长环境^[23]。原位监测主要是直接在堆体上测量,常采用电导法、电容法、红外法、微波法等,REOTEMP 公司生产的水分监测仪通过测量堆肥物料的导电性判断含水率,Morgan Scientific 公司的监测设备可以同时监测温度、氧气浓度和含水率,通过测量堆体小孔中的空气湿度得出含水率。时域反射法(TDR)使用电脉冲测量电信号在介质中的传输时间,测量出堆体的介电常数再转换成含水率,该方法更加精确,对堆体的影响较小,可实现在线监测,但受土壤酸性、盐度等的影响较大^[24],德国 ESI 环境传感器公司将 TDR 水分传感器应用到堆肥含水量测量上。

2.3 堆体氧气浓度测量

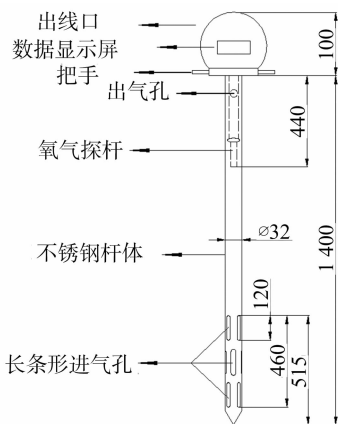
当前堆肥过程对于氧气浓度的测量,一般是测定堆层中的氧浓度或者耗氧速率。常用的氧气传感器有 3 种,分别为电化学氧气传感器、氧化锆传感器和光纤氧气传感器,3 种测氧方式比较如表 1 所示。

氧化锆传感器具有耐高温的特性,适用于环境比较恶劣的氧气浓度监测。当附着有多孔铂膜的氧化锆陶瓷层两侧存在氧浓度差时,氧离子就会从浓度高一侧向浓度低一侧迁移,在 2 个铂电极之间产生电动势,输出的电动势与电池工作温度和两侧氧浓度具有一定关系,利用这种方式即可测量出氧气浓度。相比其他氧气传感器,它具有寿命长、精度高、稳定性强的特点,但是由于传感器内部气泵需要加压抽气,功耗较

表 1 氧气浓度测量方法比较

监测方法	原理	量程	精度	优、缺点	应用情况
电化学传感器	待测气体与其发生反应产生与浓度成正比的电流	0 ~ 25 %	较高	低功耗,高精度,高灵敏度,抗干扰能力强,价格较高,外部电路较为复杂	广泛应用于工业、矿下及环保中氧气的监测
氧化锆传感器	稳定的氧化锆在高温下的离子导电现象	0 ~ 25 % 或 0 ~ 100 %	较高	功耗较大,寿命长,精度高,稳定性强,价格昂贵,外部电路较简单	广泛应用于工业燃烧和环境保护中
光纤氧气传感器	氧气对荧光具有淬灭作用,根据荧光被淬灭的程度监测氧气浓度	0 ~ 25 %	较高	低功耗,更长的寿命,工作范围广,灵敏度高,价格较高,外部电路简单	广泛应用于氧气浓度监测尤其在便携设备、实验室设备上

大,需要持续供电。曾剑飞等选用氧化锆型氧体积分数传感器(Honeywell GMS10-RVS型,美国)监测堆体氧体积分数,其氧分压测量范围为0.2~300.0 kPa,精度<500 Pa,灵敏度0.010 5 ms/Pa,具有较高测量精度和稳定性,使用前须预热30 s^[25]。北京瑞阳恒兴科技有限公司开发的数显氧气浓度探针(BRET-O500-P),具有1个测氧点,采用英国SST双氧化锆氧传感器,精度为2% Fs,测氧范围可选0~25%或0~100%,且线性输出。图3为该氧气探针外观结构示意图,敏感头通过一个不锈钢杆体安装在探头的一端,下方的进气孔采集气体进入杆体并从上方排出,以保持内部气压平衡。德国LOGIDATATECH公司也设计生产了核心为氧化锆的氧气传感器。



图中各数据单位为 mm
图3 堆肥氧气探针结构示意图

光纤氧气传感器,一般以荧光物质作为指示剂,利用氧气对荧光具有淬灭作用的原理,通过一定波长的光激发荧光物质产生荧光,根据荧光被淬灭程度,可监测氧气浓度。光纤氧气传感器无需标定,内置压强传感器,通过测量环境压强和氧分压的大小来判断氧气浓度;具有传统电化学传感器低功耗的特点,非消耗的传感原理使其拥有更长的寿命;传感器自身有氧压和温度补偿,使其可以精确工作在较宽环境范围内而不需额外的补偿电路;非常稳定、环保,不含铅或其他任何有毒材料,并且不受其他气体交叉干扰的影响。Chen 等对光纤氧气传感器的研究证明,光纤氧传感器具有响应时间短、灵敏度高、测量范围广、使用寿命长、对环境适应性好的特点^[26-27]。

2.4 臭气浓度监测

堆肥过程中产生的臭气中除了氮化物、硫化物以外,还有一些挥发性有机物,如含氮有机物、含硫有机物、胺类、挥发性脂肪酸等^[28-30]。目前常见的用于监测臭气浓度的方法有化学法、嗅觉测试法、光谱仪分析法和传感器监测法。

化学法就是利用气体与化学试剂产生化学反应,根据发生的颜色变化等现象来判断气体浓度。该法通常是抽取一定

的气体进行试验,简单易行,所用试剂价格低廉,但得出的结果不是实时的,且只能得出大致结果,不适于实时、精确测量。

嗅觉监测法是一些比较有经验的技术人员,通过感官直接估计有味气体的含量值,方法简便,但是存在估计不准确、依赖于经验且容易对技术人员的身心健康产生影响的缺点^[31],一般用来与其他测臭气浓度的方法进行比较。Hamacher 等针对接近浓度阈值的臭气使用嗅觉监测法测量困难的问题,引出电子鼻测量方法^[32]。

光谱分析法测臭气浓度一般使用气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)法,这是用气相色谱法分离并定性与用质谱法定性相联用的分析方法,具有高分辨率、高灵敏度、重复性好等特点,一直以来被用作复杂成分的分离和鉴定,但是与此同时,由于气相色谱-质谱仪的价格较为昂贵,体积较大,不易于搬动,不能够实现实时监测而受到了一定的限制,由于其精确度高,一般被作为其他方法的准确性参考。Dickert 等使用其设计的电子鼻监测堆肥逸出的乙酸乙酯、柠檬烯等气体浓度,并与用 HP 5890 系列气相色谱仪进行的 GC-MS 法得到的数据进行比较^[33-34];Romain 等在监测堆肥逸出气体时,将电子鼻测得的数据与气相色谱-质谱分析法测量的结果进行对比^[35-36],均得出 2 种方法监测结果一致的结论。Delgado-Rodriguez 等利用 GC-MS 方法监测一些挥发性有机物含量,将安捷伦 6890 气相色谱仪和四极安捷伦 5973 电子电离质谱探测仪结合起来,通过主成分分析(PCA)法得出与电子鼻方法测得的数据在统计学上相似的结论^[37]。

传感器测臭气浓度主要包括金属氧化物半导体式传感器、电化学传感器、催化燃烧式传感器等监测方式,具有体积小、实时监测、价格便宜等特点,表 2 为几种传感器原理性能比较。电子鼻是近几年发展起来的一种模仿动物嗅觉器官的高科技产品,是由有选择性的电化学传感器阵列和适当的识别方法组成的仪器,能够识别混合的气体,具有强大的信息处理能力和较高的分辨率,并且对恶劣环境的耐受性强,体积小,便于携带与安放。电子鼻的工作原理可以分为 3 部分:气体传感器阵列、信号处理单元和模式识别部分,图 4 为 Li 等设计的电子鼻阵列^[38],从上到下依次对应这 3 部分。气体传感器阵列是多个具有不同选择性气敏元件的组合,信号处理单元是将各传感器数据归一化处理,并对数据进行滤波,模式识别部分对处理后的数据进行特征提取,并使用模式识别算法进行数据处理。Delgado-Rodriguez 等利用电子鼻监测城市固体废弃物堆肥挥发出的挥发性有机物浓度,采用 10 个金属氧化物半导体传感器组成的阵列监测柠檬烯、 β -蒎烯、2-丁酮等气体浓度,利用 PCA 精简了数据集,可以将几种气体进行很好的分类^[37]。Romain 等使用由 4 个金属氧化物传

传感器(TGS880、TGS822、TGS2610、TGS842)阵列组成的电子鼻测量堆肥产生的臭气浓度,试验说明,可以使用同一种电子鼻仪器监测不同原料堆肥过程中相同时期的不同参数^[36]。一些质量敏感型气体传感器也能够更好地作为电子鼻的一部分满足工业上的不同要求。Dickert 等设计了一个具有 6 个石英晶体微量天平(QCM)阵列,用于堆肥过程的在线监测,得

出柠檬烯等物质的浓度变化过程曲线,之后在实际中应用这一电子鼻,证明了其能够定量测量不同的有机物浓度^[33-34]。Hamacher 等提出,使用石英微量天平(QMB)传感器阵列设计电子鼻来监测低于臭气浓度阈值的臭气,试验证明,该传感器系统具有良好的性能,运用主成分分析法(PCA)之后,还能够预测堆肥的变化过程^[32]。

表 2 几种臭气传感器测量方法比较

监测传感器	原理	量程	精度	应用情况	特点
半导体气敏传感器	在清洁空气中电导率很低,空气中存在被测气体时,传感器的电导率升高	较宽	一般	成本低,外部电路简单,需预热,主要用于工业自动化、家用电器、环境污染监测、医药工程等	灵敏度高、响应速度快、体积小、质量轻、便于集成化
电化学传感器	通过与被测气体发生反应并产生与气体浓度成正比的电信号	一般	高	成本一般,外部电路较为复杂,广泛应用于包含多个传感器的可移动仪器中	功耗低,对电源要求低,应用广泛
催化燃烧式传感器	感应电阻与环境中的可燃气体发生无焰燃烧,感应电阻的阻值发生变化	较宽	一般	成本一般,外部电路简单,用于工业现场的天然气、液化气等可燃性气体及汽油、醇等有机溶剂蒸汽的浓度检测	结构简单,监测的气体必须为可燃燃烧气体,对环境要求较高

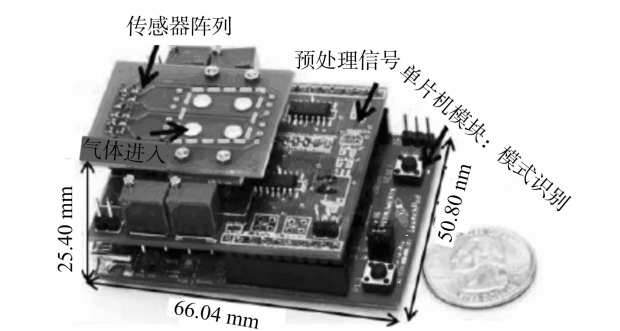


图4 电子鼻系统实物

2.5 其他

2.5.1 堆体 pH 值测量方面 pH 值是影响微生物生长繁殖的重要因素之一,一般在堆肥初期进行 pH 值的调节,在堆肥过程中监测 pH 值以了解其变化情况。常见的 pH 值测量使用的是电位测定法,把对 pH 值敏感的玻璃电极和电位稳定的参比电极放在同一溶液中,构成一个测量电池,其电动势和溶液的 pH 值之间符合能斯特方程,从而测得其溶液 pH 值。秦莉等在对于生活垃圾堆肥理化性质的研究中,使用 pH S-3C 型 pH 值计测量 pH 值^[39];Chikae 等使用日本 HORIBA 公司生产的 pH 值测量仪测量样本 pH 值,以观察整体堆肥腐熟度情况^[40]。新近研发出并应用于工业领域的 pH 值离子敏感场效应晶体管(ISFET)测量技术,具有寿命长、精度和准确度高、响应速度快的特点。ISFET 与传统的场效应管(MOSFET)结构相似,区别是氢离子敏感膜代替了 MOSFET 的金属栅极,当氢离子存在时,ISFET 就会产生对其敏感的能斯特电位,使漏极电流发生变化。目前被广泛应用于土壤和水质的 pH 值测量上,美国 Spectrum pH400/600 土壤 pH 值测量仪使用 ISFET 电极,可以用在堆体 pH 值监测中。

2.5.2 生物传感器方面 堆肥过程中微生物的浓度和分布、酶的活性和变化及各种有机物的浓度等的原位、实时监测是当前研究热点。生物传感器是生物化学技术和传感器技术的结合,在堆肥过程的各种参数监测中起着越来越重要的作用。周雯婧等分析了生物传感器在堆肥过程中动态监测的应用,得出酶传感器、微生物传感器、免疫传感器等可用于堆肥过程

中酶浓度、微生物浓度、有毒有害物质浓度监测的结论,因此适当的运用生物传感器可以有效帮助人们判断堆肥腐熟情况^[41]。章毅等将生物传感器中的免疫传感器进行细化,阐述了免疫传感器在堆肥物料固态、液态、气态参数监测中的应用,指出免疫传感器为进一步细化堆肥产物提供了技术支持,并提出了当前与监测物质对应的抗体有限并且难以稳定的问题^[42]。刘灿等阐述了基因传感器的应用,指出将基因传感器用于堆肥中微生物功能基因检测是今后的主要研究方向^[43]。

2.5.3 堆体腐熟度监测方面 采用光学仪器对堆肥腐熟度监测是一种很好的分析方法,基于原子团的振动产生的光谱可提供有关原子团组成方面的信息,得到堆肥过程中产生物质的情况,一般使用的有近红外光谱、红外光谱和紫外光谱等。黄光群等采用美国 Perkin Elmer 公司生产的 Spectrum one NTS 基于傅里叶变换近红外光谱仪进行腐熟度分析,光谱采集范围为 10 000 ~ 4 000 cm⁻¹,使用数学方法建立近红外校正模型,得出近红外漫反射光谱可以快速准确测定堆肥中水分、挥发性固体、总有机碳、总氮含量和电导率的结论^[44]。段旭光等也进行了类似的研究,得出红外光谱分析法有助于堆肥腐熟度监测的结论^[45]。Domeizel 等通过紫外光谱去卷积的方法来判断堆肥成熟度并指出,这种指示方法比成熟度指数使用更频繁,且可简单快速得出结果^[46]。郭峰等使用荧光光谱对堆肥过程进行监测分析并指出,相关参数可以较好地表征堆肥腐熟度^[47]。祝虹煜等介绍了荧光光谱在堆肥腐熟度中的应用并指出,该技术可以为堆肥腐熟度评价提供参考,在堆肥研究中具有广阔的应用前景^[48]。

3 堆肥环境监测系统研究与应用

传统的数据传输通过数据采集卡(传感器采用 4 ~ 20 mA 或 0 ~ 5 V 等模拟信号)或者 RS232/485 接口向电脑传输数据,这种有线的传输方式易受到距离的限制,且线缆易腐蚀或被人破坏,维护困难。曾剑飞等设计的好氧堆肥温氧监测系统,可显示单片机采集到的温氧值,并可利用数据采集器将数据传到电脑上^[25]。Sironi 等针对堆肥厂臭气的产生情况,使用 RS232 或者 USB 接口连接电脑实现数据采集、存储和远程控制^[49]。

随着工业现场总线、物联网及云服务等通信信息技术的

发展,无线传感器网络开始与监控设备系统结合,摆脱了传统堆肥参数监测时线缆的约束,蓝牙、Wi-Fi、Sub-GHz 等在堆肥监测系统中都有应用,图 5 为澳大利亚 OneTemp 公司的智能化堆肥环境监测系统示意,堆肥探杆监测到相关参数后无线传输到云端,然后云端发送数据到电脑上进行记录和监测,预警数据发送给手机端以通知用户。Casas 等设计无线传感网络用于堆肥监测和控制,将节点测得的数据汇集在网关处,然后通过无线传到电脑上保存,并上传到云服务器,服务器保存节点的状态并自动更新;节点使用美国德州仪器公司生产的 CC430,在 60 °C 条件下工作良好,无线传输在 433 MHz 频率;该系统在新西兰、澳大利亚和西班牙进行了试验,传感器具有一定的鲁棒性,低能耗、精度高、量程范围广、充电时间较短^[50]。随后,López 等对上述监测控制系统进行了改进,实现了对于温度和水分含量等参数的实时多点监测^[51]。美国的 REOTEMP 公司设计了 ECOPROBE 智能堆肥系统,采用 902 ~ 928 MHz 频段进行数据无线传输,传输距离约 300 m,开发的 Compost Watch 软件可以实时监测当前堆体情况并存储历史数据。陈朝旭等研究设计基于 ZigBee 技术的堆肥控制系统,传感器节点分布在堆肥车间,对堆体参数进行实时采集并传输到协调器节点,计算机接收、显示并存储协调器发来的数据^[52]。除了通过无线模块传输数据外,还可以使用蓝牙进行通信,不过传输距离有限,多用于实验室研究。邓志辉等为监测发酵仓参数,设计了以 C8051F020 单片机为核心的无线参数监测系统,采集温度、发酵速率、pH 值、电导率及含氧量,通过 BF10-1 型蓝牙模块进行数据传送,计算机上的蓝牙适配器接收数据后传到计算机上^[53]。

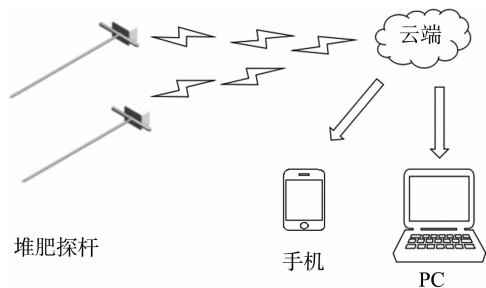


图5 智能化堆肥环境监测系统示意

针对好氧堆肥过程建立相关的数学模型,有利于实现对堆肥相关参数的预估,阐释堆肥动态变化过程,更有效控制堆肥过程。一般通过研究有机物降解过程来推算温度、含水率、氧气浓度等堆肥参数的变化情况。利用质量或者能量守恒原则,建立固相、水相、气相平衡以及能量热平衡的数学公式,除所求值的其他参数采用经验公式、一级反应动力学公式或 Monod 降解动力学方程表示外,联合求出所需要的关键参数表达式。这种方法一般建立模型简单,参数较少,运算速度快,但是在参数选择上须要考虑堆肥物料性状、堆体均一性等诸多因素,须要对模型方程和参数进行优化,以获得更加准确的预测结果。王永江等通过建立水分蒸发一级动力学模型及等式,得出水分随时间变化模拟曲线^[54]。Petric 等建立基于有机质降解的一级动力学反应模型,将其与温度变化相联系,得出温度模拟值^[55]。在氧气参数预测方面,Sole - Mauri 等利用 Monod 微生物反应方程模拟微生物生长速率,并建立其与氧气消耗速

率(OUR)的关系,得到 OUR 的动态变化情况^[56]。Higgins 等则通过建立一级反应模型来计算氧气的消耗速率^[57-58]。

4 存在问题与发展方向

4.1 存在问题

随着半导体技术、传感器技术、计算机技术及通信技术的发展,国内外对于堆肥监测方法的技术研究有了很大的提升。但在研究应用过程中存在以下问题:(1)传统工业监测模式影响堆肥环境监测,很多传感器直接采用工业领域产品,导致传感器针对性不足,部分参数难以在线测量,传感器稳定性、可靠性有待提高;(2)监测传感器以模拟信号输出为主,且测量参数单一,不具备智能传感器特点,存在能耗高,测量误差大等问题,难以实现多参数、多点测量;(3)有线测量方式占有较大比重,现场布线对施工、维护带来不便,同时堆肥现场具有较强的腐蚀性会对传输线缆产生较大影响,且过多线缆对机械自动化作业产生阻碍;(4)先进的感知原理、物联网、云服务技术在堆肥监测系统中应用较少,导致在测量手段、通信方式、服务模式等方面落后于其他行业。

4.2 发展方向

针对目前行业中存在的问题,堆肥环境参数监测要朝着成本低、稳定性好、可靠性强以及多点监测、无线监测、综合参数监测的方向发展。

(1)整个堆肥感知系统的中心,能够适应高温、高湿、高腐蚀性的工作环境,低功耗、稳定性强、可靠性好的传感器监测是将来的重要研究方向之一。

(2)精度高、成本低、能够区分相似气体的电子鼻将成为堆肥行业气体监测发展的趋势。

(3)低成本、低功耗、稳定性强的无线化数据传输方式是通信技术的重点。

(4)包括堆肥参数的实时监测、数据的采集、传输并保存以及软件建立堆肥过程模型,判断堆体状态、实现相关控制在内的综合监测方式,将不断促进堆肥过程参数的集中分析管理和统一控制,是未来的发展方向。

(5)随着信息技术的发展、网络时代的到来,堆肥环境参数感知系统也应该向着便捷式的方向发展,控制平台可以逐渐的从电脑终端发展到嵌入式平台,手机、平板电脑等编写设备应成为重要的一环。

5 结论

本文首先介绍了好氧堆肥环境的恶劣性、国内外关键参数监测仪器使用情况及堆肥监测系统研究、应用现状,之后提出存在的问题和发展方向,得出堆肥过程环境参数感知系统是智能堆肥发展必然趋势的结论。前人研究表明,将监测到的全部参数进行集中管理,可减少人力成本,加快发酵过程,提高发酵效率。对于堆肥过程环境感知的关键参数进行深入研究,应致力于开发堆肥过程参数的高智能、高精度、低能耗监测方式,建立堆肥过程参数监测通用模式。解决现有的问题,对堆肥参数监测方法进行研究,对于我国堆肥过程自动化、智能化发展具有重要的意义。

参考文献:

[1] 孙永明,李国学,张夫道,等. 中国农业废弃物资源化现状与发展

- 战略[J]. 农业工程学报,2005,21(8):169-173.
- [2]董雪云,张金流,郭鹏飞. 农业固体废弃物资源化利用技术进展及展望[J]. 安徽农学通报,2014,20(18):86-89.
- [3]国务院. 畜禽规模养殖污染防治条例(国务院令 第 643 号)[Z/OL]. (2013-11-11)[2017-07-19]. http://www.gov.cn/flfg/2013-11/26/content_2535095.htm.
- [4]余群,董红敏,张肇鲲. 国内外堆肥技术研究进展(综述)[J]. 安徽农业大学学报,2003,30(1):109-112.
- [5]陈俊,陈同斌,高定,等. 城市污泥好氧发酵处理技术现状与对策[J]. 中国给水排水,2012,28(11):105-108.
- [6]de Bertoldi M, Vallini G, Pera A. The biology of composting; a review[J]. Waste Management & Research, 1983, 1(2):157-176.
- [7]田赞. 园林废弃物堆肥化处理及其产品的应用研究[D]. 北京:北京林业大学,2012.
- [8]蔡旺炜,陈俐慧,王为木,等. 我国城市厨余垃圾好氧堆肥研究综述[J]. 中国土壤与肥料,2014(6):8-13.
- [9]常勤学. 通风控制方式对动物粪便堆肥过程和氮磷转化的影响[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.
- [10]王丽英,吴硕,张彦才,等. 蔬菜废弃物堆肥化处理研究进展[J]. 中国蔬菜,2014(6):6-12.
- [11]张卫,崔鑫. 寿光市蔬菜垃圾高温好氧堆肥处理技术研究[J]. 再生资源与循环经济,2014,7(10):36-39.
- [12]罗维,陈同斌. 湿度对堆肥理化性质的影响[J]. 生态学报,2004,24(11):2656-2663.
- [13]石文军. 全程高温好氧堆肥快速降解城市生活垃圾及其腐熟度判定[D]. 长沙:湖南大学,2010.
- [14]万小春,张玉华,高新星,等. 农村有机生活垃圾和秸秆快速好氧发酵技术参数研究[J]. 农业工程学报,2008,24(4):214-217.
- [15]de Guardia A, Petiot C, Benoist J C, et al. Characterization and modelling of the heat transfers in a pilot-scale reactor during composting under forced aeration[J]. Waste Management, 2012, 32(6):1091-1105.
- [16]李鉴明. 无线测温在垃圾堆肥发酵中的应用[J]. 肇庆学院学报,2016,37(2):59-63,67.
- [17]REOTEMP. Compost products[Z/OL]. [2017-07-19]. www.reotemp.com/compost/.
- [18]张海波,武占银,郑凤玲,等. 基于单片机的堆肥好氧发酵时间-温度反馈控制系统研究[J]. 安徽农业科学,2015(29):364-367.
- [19]蔡璐,陈同斌,刘洪涛,等. 污泥堆肥含水率监测方法的选择与探讨[J]. 环境科学学报,2012,32(6):1281-1288.
- [20]Rynk R. Monitoring moisture in composting systems[J]. BioCycle, 2000, 41(10):53-57.
- [21]Komilis D P, Ham R K, Pack J K. Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solid wastes[J]. Water Research, 2004, 38(7):1707-1714.
- [22]Akdeniz N, Koziel J A, Ahn H K, et al. Field scale evaluation of volatile organic compound production inside biosecure swine mortality composts[J]. Waste Management, 2010, 30(10):1981-1988.
- [23]岳波. 堆肥物料水分含量的在线监测方法及其影响因素研究[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2008.
- [24]Yoshikawa K, Overduin P P. Comparing unfrozen water content measurements of frozen soil using recently developed commercial sensors[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 42(3):250-256.
- [25]曾剑飞,张安琪,黄光群,等. 规模化好氧堆肥温氧监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(3):186-191.
- [26]Chen R S, Farmery A D, Obeid A, et al. A cylindrical-core fiber-optic oxygen sensor based on fluorescence quenching of a platinum complex immobilized in a polymer matrix[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1):71-75.
- [27]Nakamura Y, Ito D, Yokoyama T, et al. Development of a fiber-optic oxygen sensor for long-term corrosion monitoring of radioactive-waste repository[J]. Sensor Letters, 2008, 6(6):951-955.
- [28]刘璐,陈同斌,郑国砥,等. 污泥堆肥厂臭气的产生和处理技术研究进展[J]. 中国给水排水,2010,26(13):120-124.
- [29]沈玉君,陈同斌,刘洪涛,等. 堆肥过程中臭气的产生和释放过程研究进展[J]. 中国给水排水,2011,27(11):104-108.
- [30]郭小品,羌宁,裴冰,等. 城市生活垃圾堆肥厂臭气的产生及防控技术进展[J]. 环境科学与技术,2007,30(6):107-111.
- [31]周苗. 生猪养殖环境监测及氨气浓度预警模型研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2014.
- [32]Hamacher T, Niess J, Lammers P S, et al. Online measurement of odorous gases close to the odour threshold with a QMB sensor system with an integrated preconcentration unit[J]. Sensors and Actuators B:Chemical, 2003, 95(1/2/3):39-45.
- [33]Dickert F L, Lieberzeit P A, Achatz P, et al. QCM array for on-line monitoring of composting procedures[J]. Analyst, 2004, 129(5):432-437.
- [34]Lieberzeit P A, Rehman A, Najafi B, et al. Real-life application of a QCM-based e-nose: quantitative characterization different plant-degradation processes[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2008, 391(8):2897-2903.
- [35]Romain A C, Godefroid D, Nicolas J. Monitoring the exhaust air of a compost pile with an e-nose and comparison with GC-MS data[J]. Sensors and Actuators B:Chemical, 2005, 106(1):317-324.
- [36]Romain A C, Godefroid D, Kuske M, et al. Monitoring the exhaust air of a compost pile as a process variable with an e-nose[J]. Sensors and Actuators B:Chemical, 2005, 106(1):29-35.
- [37]Delgado-Rodriguez M, Ruiz-Montoya M, Giraldez I, et al. Use of electronic nose and GC-MS in detection and monitoring some VOC[J]. Atmospheric Environment, 2012, 51:278-285.
- [38]Li H T, Mu X Y, Yang Y N, et al. Low power multimode electrochemical gas sensor array system for wearable health and safety monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(10):339-3399.
- [39]秦莉,李玉春,李国学,等. 城市生活垃圾堆肥过程中腐熟度指标及控制参数[J]. 农业工程学报,2006,22(12):189-194.
- [40]Chikae M, Kerman K, Nagatani N, et al. An electrochemical on-field sensor system for the detection of compost maturity[J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 581(2):364-369.
- [41]周雯婧,曾光明,龚继来,等. 生物传感器在堆肥过程控制与动态监测中的研究进展[J]. 化学传感器,2007,27(2):1-6.
- [42]章毅,曾光明,汤琳. 免疫传感器用于堆肥复杂系统监测的研究进展[J]. 中国生物工程杂志,2006,26(8):115-122.
- [43]刘灿,谢更新,汤琳,等. 基因传感器在环境微生物功能基因检测中的应用[J]. 微生物学通报,2008,35(4):565-571.
- [44]黄光群,韩鲁佳,杨增玲. 近红外漫反射光谱法快速测定畜禽粪

雷国风,李至敏,王小琴,等. 柑橘果实采后绿霉病防治研究进展[J]. 江苏农业科学,2018,46(21):27-30.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.21.006

柑橘果实采后绿霉病防治研究进展

雷国风¹,李至敏²,王小琴¹,李志敏¹

(1. 江西农业大学生物科学与工程学院,江西南昌 330045; 2. 江西农业大学理学院,江西南昌 330045)

摘要:柑橘类水果的采后病害在贮藏和运输期间会造成相当大的损失。绿霉病是柑橘类水果主要的采后疾病。综述植物源提取物、微生物保鲜剂、天然化合物、食品添加剂、公认安全化合物等物质在柑橘果实采后绿霉病防治中的应用情况。2 种或多种方法的联合使用将是柑橘绿霉病防治的发展方向之一。

关键词:柑橘;指状青霉;植物源提取物;天然化合物;食品添加剂;拮抗菌

中图分类号:S436.661.1⁺9 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)21-0027-04

柑橘是芸香科(Rutaceae)柑橘亚科(Aurantioideae)柑橘族(Citreae)柑橘亚族(Citrinae)真正的柑橘果树类植物的总称。我国是世界上最早栽培柑橘,也是最重要的栽培国家之一,有甜橙、柚、柑、橘、葡萄柚、柠檬等重要栽培类型。柑橘果实外形美观,味道鲜美,营养丰富,是世界上最重要的水果之一,在国际农产品贸易中占有非常重要的地位^[1]。柑橘类果实采后极易感染腐败菌,导致果实腐烂变质,造成严重的经济损失而阻碍柑橘产业的发展。柑橘果实在贮藏期间由于腐烂

造成的经济损失非常严重,以青霉菌属(*Penicillium*)真菌引起的病害最为严重,该病害在贮藏期造成的损失一般为 10% 左右,有的甚至超过 30%,引起柑橘采后腐烂的青霉菌主要为意大利青霉(*P. italicum* Wehmer)和指状青霉(*P. digitatum* Sacc.)^[2]。指状青霉可以导致柑橘采后绿霉病,绿霉病是一种主要的柑橘采后疾病,可造成严重的经济损失,一般采用抑霉唑、噻苯唑、邻苯基苯酚钠等化学杀菌剂来控制^[3-4]。化学杀菌剂的使用不仅会造成抗药性,还会导致一定的化学残留和环境污染,从而对人体有潜在的风险,因此各国研究人员努力研究相应的替代方法来控制柑橘绿霉病,并取得了一定的成果。柑橘采后绿霉病的替代防治研究主要包括植物源提取物、微生物保鲜剂、天然化合物、食品添加剂、公认安全(generally recognized as safe,简称 GRAS)化合物等 5 个方面及其联合使用的策略。本文对上述方法进行归纳分析,并对柑橘绿霉病防治的研究发展趋势进行展望。

收稿日期:2017-06-13

基金项目:国家自然科学基金(编号:31400054,31560250);江西省青年科学基金重大项目(编号:20161ACB21012);江西省教育厅科技研究重点项目(编号:GJJ160353)。

作者简介:雷国风(1994—),男,江西上饶人,硕士研究生,主要从事果蔬保鲜及其机制研究。E-mail:leiguofengx@163.com。

通信作者:李志敏,博士,副教授,主要从事酶催化反应机制研究。E-mail:zmlizm@126.com。

便堆肥多组分含量[J]. 光谱学与光谱分析,2007,27(11):2203-2207.

[45]段旭光,曾雷,付美云,等. 红外光谱对有机废弃物堆肥的监测研究[J]. 湖南农业科学,2009(5):74-76,80.

[46]Domeizel M, Khalil A, Prudent P. UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost[J]. Bioresource Technology,2004,94(2):177-184.

[47]郭烽,张传存,姚杰,等. 三维荧光光谱结合荧光区域指数分析方法评估堆肥腐熟度[J]. 环境科学研究,2012,25(12):1410-1415.

[48]祝虹煜,何小松,吴修所,等. 荧光光谱技术在堆肥腐熟度评价中的应用[J]. 环境污染与防治,2010,32(6):69-73,80.

[49]Sironi S, Capelli L, Céntola P, et al. Development of a system for the continuous monitoring of odours from a composting plant: focus on training, data processing and results validation methods[J]. Sensors and Actuators B:Chemical,2007,124(2):336-346.

[50]Casas O, López M, Quilez M, et al. Wireless sensor network for smart composting monitoring and control[J]. Measurement,2014,47:483-495.

[51]López M, Martínez - Farre X, Casas O, et al. Intelligent composting

assisted by a wireless sensing network[J]. Waste Management,2014,34(4):738-746.

[52]陈朝旭,曾庆东,韦建吉. 基于 ZigBee 技术的堆肥控制系统设计[J]. 现代农业装备,2014(4):29-32,41.

[53]邓志辉,张西良. 基于蓝牙技术的堆肥发酵仓参数检测系统的设计[J]. 农机化研究,2013(11):211-214.

[54]王永江,黄光群,韩鲁佳. 猪粪麦秸反应器好氧堆肥水分平衡模型研究[J]. 农业机械学报,2012,43(6):102-106.

[55]Petric I, Selimbašić V. Development and validation of mathematical model for aerobic composting process[J]. Chemical Engineering,2008,139(2):304-317.

[56]Sole - Mauri F, Illa J, Magri A, et al. An integrated biochemical and physical model for the composting process[J]. Bioresource Technology,2007,98(17):3278-3293.

[57]Higgins C W, Walker L P. Validation of a new model for aerobic organic solids decomposition: simulations with substrate specific kinetics[J]. Process Biochemistry,2001,36(8/9):875-884.

[58]Das K, Keener H M. Numerical model for the dynamic simulation of a large scale composting system[J]. Transactions of the ASAE,1997,40(4):1179-1189.