

规模化好氧堆肥温氧监测系统设计与试验^{*}

曾剑飞 张安琪 黄光群 韩鲁佳
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为实时获取规模化好氧堆肥过程关键数据,实现自动化控制、优化堆肥工艺、提升产品品质,在已有研究基础上,设计了一种集成度高、便携性好的适用于规模化好氧堆肥过程的温度和氧体积分数实时监测系统,该系统主要包括温度数据获取模块、氧体积分数数据获取模块、信号处理模块、数据显/存模块。并系统开展了实验室和实际规模化好氧堆肥性能试验和分析研究。其中,温度监测相对标准偏差均小于3.02%,响应时间均小于45 s;氧体积分数监测相对标准偏差均小于2.96%,响应时间均小于30 s。研究结果表明:该系统在精确性、稳定性和响应速率等方面均具有良好性能,可满足规模化好氧堆肥过程温度和氧体积分数空间数据实时监测以及科研需求。

关键词: 好氧堆肥 规模化 温度 氧体积分数 实时监测

中图分类号: X705; S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0186-06

Design of Temperature and Oxygen Monitoring System for Large-scale Aerobic Composting

Zeng Jianfei Zhang Anqi Huang Guangqun Han Lujia
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To obtain real-time data during large-scale aerobic composting, realize automation control, optimize the composting process and improve product quality, a real-time monitoring system for temperature and oxygen concentration during large-scale aerobic composting with high integration and easy portability was developed on the basic of current studies. The system was consisted of temperature acquisition module, oxygen concentration acquisition module, signal processing module and data display and storage module. Performance experiments were operated in laboratory and actual large-scale aerobic composting, respectively. The results showed that the relative standard deviation (RSD) of temperature monitoring was inferior to 3.02% and response time was less than 45 s; the RSD value and response time of oxygen concentration was inferior to 2.96% and 30 s. In conclusion, the system has good performances such as high accuracy, good stability and fast response speed; it can satisfy the need of real-time monitoring of temperature and oxygen concentration in the process of large-scale aerobic composting and the need of scientific research.

Key words: Aerobic composting Large-scale Temperature Oxygen concentration Real-time monitoring

引言

近年来,随着我国经济、社会的快速发展,各类

有机固体废弃物产量巨大,若不加以科学合理利用,不仅会导致资源浪费,对生态环境和人类健康也会造成严重威胁^[1-2]。为此,我国规模化养殖场提倡

收稿日期: 2014-07-30 修回日期: 2014-08-30

^{*} 国家自然科学基金资助项目(31201684)、教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0524)和北京高等学校青年英才计划资助项目(YETP0319)

作者简介: 曾剑飞,博士生,主要从事生物质资源利用研究,E-mail: zengjianfei2013@126.com

通讯作者: 黄光群,副教授,博士生导师,主要从事生物质资源利用研究,E-mail: huangguangqun@126.com

以沼气工程和有机肥工程为核心的有机固体废弃物循环利用模式(《畜禽规模养殖污染防治条例》)。好氧堆肥化(Aerobic composting)是有机固体废弃物无害化、减量化、资源化处理和利用的重要途径之一。好氧堆肥过程中,空间堆体温度、氧体积分数是影响堆肥化进程和堆肥产品质量的 2 个关键工艺控制参数^[3]。适宜的温度和氧体积分数能有效促进堆体迅速升温 and 保持良好的高温期,加速有机质降解,大量减少温室气体和恶臭气体产排,并提升堆肥产品质量^[4]。另外,堆肥发酵环境较为恶劣,不利于人员长时间进入操作,因此,研发在线监测规模化好氧堆肥过程温度、氧体积分数数据的成套装备技术对于实现好氧堆肥过程自动化控制,提升堆肥品质和开展数值模拟等科学研究均具有重要意义。

目前,针对有机固体废弃物好氧堆肥过程温度和氧体积分数数据获取方面已有相关研究报道^[5-8]。但这些研究在立足规模化好氧堆肥实际工况,面向物料特性,提升获取数据整体性能和使用便携性等方面尚存在不足之处。

本文针对规模化好氧堆肥需求,研发一种适用于工厂化好氧堆肥过程温度、氧体积分数数据实时在线准确获取的便携式监测系统。

1 系统设计

1.1 设计思路与系统组成

本研究的设计思路和系统组成如图 1 所示。

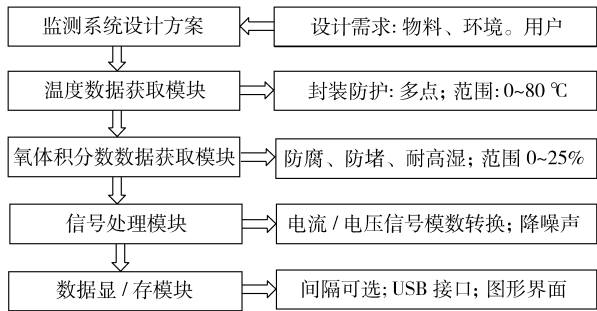


图 1 规模化好氧堆肥温氧监测系统设计方案

Fig.1 Designing scheme of monitoring system for temperature and oxygen during large-scale composting

该规模化好氧堆肥温氧监测系统主要包括温度数据获取模块、氧体积分数数据获取模块、信号处理模块和数据显/存模块等。

1.2 各功能模块设计

1.2.1 温度数据获取模块

温度数据获取模块包括温度传感器、数据传输线和防护层,其中温度传感器为其核心。

好氧堆肥过程温度区间可分为升温期、高温期和降温期 3 个主要阶段,高温期持续时间较长,最高

温度可达 70℃ 左右。Guardia 等^[7] 在好氧堆肥反应器中选用 3 个 PT100 型温度传感器对堆体上、中、下层进行温度监测;Coelho 等^[9] 在堆肥过程中选用 4 个 PT100 型温度传感器,对堆体的中心和两侧进行温度监测,精度均较高。同时,PT100 型温度传感器具有适用环境广泛、价格低廉等优点,被广泛应用于温度监测^[10]。因此,本文采用 PT100 型温度传感器(Heraeus 32208551 型,德国),其主要性能参数如下:精度标准为 Class1/3B,电阻温度系数为 $3.85 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$,温度最高测量值为 150℃,响应时间 3 s。

另外,规模化好氧堆肥堆制环境为弱酸或弱碱环境,具有腐蚀性,温度传感器外设计有不锈钢封装防护结构,壳体封装防护等级为 IP 65;数据传输线选用镀银四氟屏蔽线。

1.2.2 氧体积分数数据获取模块

氧体积分数数据获取模块包括氧体积分数传感器及防护层、数据传输线、不锈钢保护套、进气口及防堵装置、手柄等。

目前应用于堆肥领域的主流氧体积分数实时监测传感器有氧化锆型和电化学型 2 种。考虑到规模化好氧堆肥堆制环境具有腐蚀性,且物料湿度和粘度较大,传统的电化学型氧体积分数传感器易失效,不利于堆肥过程氧体积分数数据的实时在线监测,本文选用氧化锆型氧体积分数传感器(Honeywell GMS10-RVS 型,美国),其主要性能参数如下:预热时间 30 s,精度等级为小于 500 Pa,氧气压力测量范围为 200 Pa ~ 300 kPa,灵敏度为 0.0105 ms/Pa,容许气体温度范围为 -100 ~ 250℃,其具有较高的测量精度和良好的高温稳定性^[11],能够很好地满足在线监测准确性高、稳定性好、响应速度快^[5]的要求。

考虑到规模化好氧堆肥堆体的平均高度,不锈钢保护套有效长度设计为 1.2 m,与手柄通过螺纹连接。为了减少插入堆体摩擦阻力,其顶端设计为 20°圆锥状。整个保护套为中空结构,氧化锆传感器置于中空结构中央位置。进气口为位于保护套圆锥状尖端上部 2 cm 处,规格为 8 cm × 2.5 cm 的 2 个长方形孔,在保护套圆周对称分布。考虑到堆肥物料高湿、高粘易导致堵塞及气流不畅,基于流体力学和防堵原理,进气口处设计有双叠层网状结构。氧化锆氧体积分数传感器外设有防护层,为不锈钢套管结构,并通过螺纹旋紧于手柄上,数据传输线为阻燃 PVC 材料。

氧体积分数数据获取模块结构如图 2 所示。

1.2.3 信号处理模块

信号处理模块包括信号采集器和信号传输线。

信号采集器通过变送器将电阻和氧分压信号转

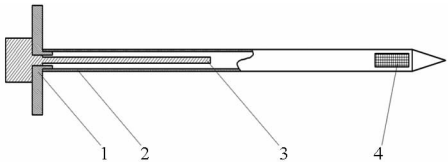


图2 氧体积分数数据获取模块示意图

Fig.2 Schematic diagram of oxygen concentration acquisition module

- 1.手柄 2. 不锈钢保护套 3. 氧体积分数传感器及防护层
4. 进气口及防堵装置

换成电压信号,然后通过模数转换器将电压信号转换成数字信号,数字信号进入以单片机为核心的处理系统,并以十进制数的形式在显示屏上显示。本文设计的信号采集器主要性能参数为:温度数据信号处理精度(FS)±1%,分辨率0.1℃;氧体积分数数据信号处理精度(FS)±2%,分辨率0.1%。

经试验研究,校正后在0~70℃区间温度传感器温度输出值与电压信号之间的连续函数关系式和 在 0~21% (不包括0)区间氧体积分数传感器氧体积分数输出值与电压信号之间的连续函数关系式分别为

$$T=41.665\,989E_t-24.999\,588 \tag{1}$$

$$C_{O_2}=10.094\,435E_{O_2}-6.056\,661 \tag{2}$$

式中 T ——温度输出值,℃

E_t ——温度对应的电压信号值,V

C_{O_2} ——氧体积分数输出值,%

E_{O_2} ——氧体积分数对应的电压信号值,V

1.2.4 数据显/存模块

数据显/存模块包括多通道温度和氧体积分数数据信号输入接口、存储终端和图形化软件。多通道信号输入接口包括8个温度数据输入接口和1个氧体积分数数据输入接口。

基于工程控制和科学研究等不同需求,监测系统数据获取频率应可调,本文采用VB语言编程技术开发了一套人机交互图形化软件,在存储终端上安装并打开图形化软件后,调整参数可获取不同时间间隔下温、氧数据,并实现实时存储。图形化软件界面如图3所示。

考虑到存放与携带的便捷性,系统置于专用便携式工具箱内,以便于存放及携带。

根据上述设计,经集成研发获取该物化系统,如图4所示。

2 性能试验

2.1 材料与方法

2.1.1 实验室性能试验

(1) 将系统置于特定环境中测定室温以及氧体

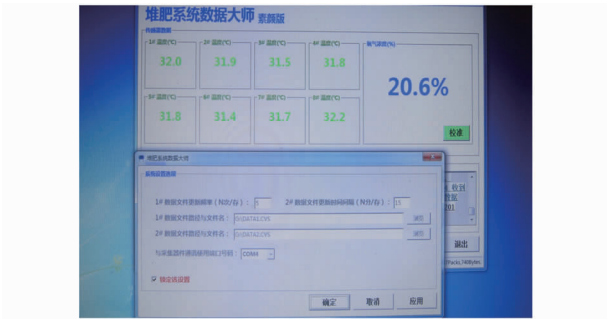


图3 图形化软件界面

Fig.3 Graphical interface of data-acquisition software



图4 规模化好氧堆肥温氧监测系统

Fig.4 Monitoring system for temperature and oxygen during large-scale composting

积分数,以验证本系统数据测量的精确性和稳定性。

(2) 将系统的温度传感器置于水浴锅(Julabo TW20型,优莱博技术有限公司;精度为0.1℃)中,分别调整水温至25℃、30℃、40℃、45℃、50℃、55℃、60℃、65℃、70℃和80℃,在各个温度水平下每6s监测一个数据,各监测8min,并记录存储升温阶段和恒温阶段的温度数据^[12],用于分析本系统的温度监测精确性、稳定性和响应速率。

(3) 以高纯氧气作为目标气体,高纯氮气作为稀释气体,按照氧体积分数分别为0.001%、6.98%、13.98%、21.12%精确配制标准混合气体,分别利用本系统监测各混合气体中的氧体积分数,在各氧体积分数水平下每6s监测一个数据,各监测2min,并记录存储氧体积分数数据变化情况,以分析本系统的氧体积分数监测精确性、稳定性和响应速率。

2.1.2 规模化好氧堆肥性能试验

在北京一特有机肥厂开展工厂化高温好氧堆肥试验,试验以鸡粪和蘑菇渣为原料,在堆肥过程的第5天,同时监测堆体上、下两层温度由环境初始值达到实际稳定值的变化过程^[7-8, 13],以及堆体中心位置氧体积分数由环境初始值达到实际稳定值的变化过程;然后将温度传感器和氧体积分数传感器置于环境中,同时监测温、氧数据由堆体实际稳定值达到环境初始值的变化过程,以分析本系统在实际堆肥过程中获取数据的精确性和稳定性以及其响应速率。

2.1.3 数据处理与性能评价

利用 SPSS Statistics V.21 软件进行数据的统计分析,利用 Origen V.8.5 软件进行数据动态变化图绘制。

采用响应时间 t_{resp} 评价本系统的响应速率,采用相对标准偏差 D_{RSD} 和决定系数 R^2 评价本系统的精确性和稳定性。其中,响应时间 t_{resp} 表示系统在监测过程中由初始值达到稳定值的 95% 所用的时间,相对标准偏差的计算公式为

$$D_{\text{RSD}} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \times 100\%$$

式中 x_i ——第 i 次测量值
 $\bar{x}$ —— n 次测量值的平均值
 n ——测量次数

2.2 结果与讨论

2.2.1 实验室性能试验

图 5 所示为本系统在不同温度环境下的温度数据监测结果, R^2 为 0.999 7,各监测点相对标准偏差均小于 3.02%。

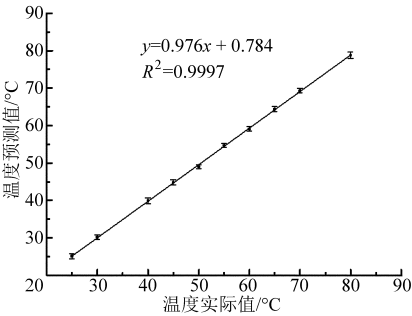


图 5 监测系统在不同水温中的温度监测结果
Fig.5 Temperature monitoring results in different temperatures of water

图 6 所示为本系统在室温下温度监测结果。在试验过程中,每 6 s 采集一个数据,总计监测 60 min 左右。将采集所得数据进行以下处理:自首个数据起,每 5 个数据取其平均值作为首个数据对应的时间处的温度测量值,即:以每 30 s 内的温度测量值的平均值作为该时间段内的温度实际值,以减小试验过程中周围环境因素对监测过程的干扰。对所监测数据进行统计分析,其平均值为 21.6℃,相对标准偏差为 1.45%。

在堆肥过程中,微生物分解有机质会释放大量的热,大量研究表明,堆体的最高温度及高温持续时间与堆肥物料的无害化水平直接相关,一般认为堆肥最高温度在 50℃ 以上、持续时间在 5~7 d 以上较佳,因此,50℃ 的堆体温度对于堆肥过程具有重要意义^[14-15]。图 7 所示为本系统温度数据获取模块对

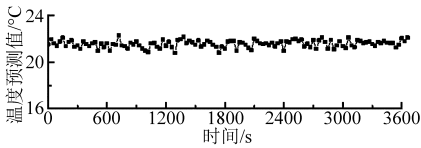


图 6 监测系统在室温下的温度连续监测结果
Fig.6 Temperature monitoring results in atmospheric environment

50℃ 水进行温度监测的结果,温度传感器于第 84 秒置于 50℃ 水中,至 126 s 达到稳定值的 95%,温度测量响应时间为 42 s。

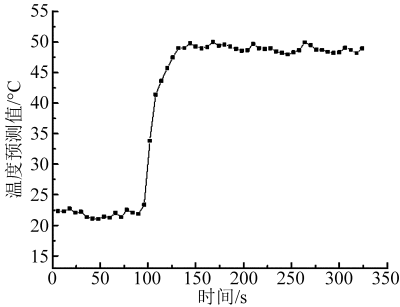


图 7 监测系统对 50℃ 水进行温度监测的结果
Fig.7 Temperature monitoring results of 50℃ water

图 8 所示为本系统在不同氧体积分数下的混合气体中的氧体积分数实际测量结果, R^2 为 0.999 7 且非零值相对标准偏差小于 1.90%。

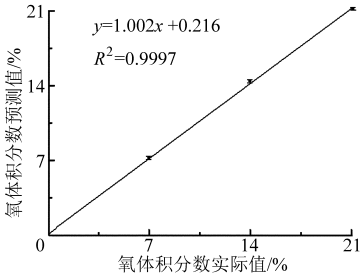


图 8 监测系统在不同氧体积分数混合气体中的监测结果
Fig.8 Oxygen concentration monitoring results in mixed gas of different oxygen concentrations

图 9 所示为本系统在环境中的氧体积分数监测结果。在试验过程中,每 6 s 采集一个氧体积分数数据,总计监测 40 min。将采集所得数据进行以下处理:自首个数据起,每 5 个数据取其平均值作为首个数据对应的时间处的氧体积分数测量值,即:以每 30 s 内的氧体积分数测量值的平均值作为该时间段内的氧体积分数实际值。对所监测的数据进行统计分析,其平均值为 20.6%,相对标准偏差仅为 0.33%。

氧体积分数是堆肥成功的一个重要因素,它主要与堆肥过程通气量与微生物消耗量有关。一般认为,通气量过小,氧体积分数低于 5%,好氧微生物的活性就会受到抑制,堆体局部会出现厌氧发酵,并且产生恶臭,影响堆肥质量,延长堆肥周期;而通气量过高,会带走堆体中大量的热,从而导致不能大量

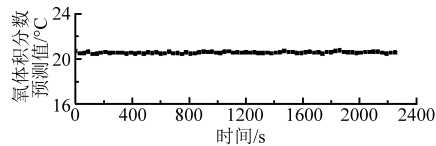


图 9 监测系统在环境中的氧体积分数监测结果
Fig.9 Oxygen concentration monitoring results
in atmospheric environment

杀灭病原菌,通常堆肥过程的氧体积分数会控制在 5% ~ 15%^[16]。为验证本系统的氧体积分数测量响应速率,将本系统氧体积分数数据获取模块置于氧体积分数为 13.98% 的高纯氧气、高纯氮气混合气体中进行氧体积分数测量(图 10)。氧体积分数传感器于第 48 秒开始监测氧体积分数,至 66 s 达到稳定值的 95%,氧体积分数测量响应时间为 18 s。

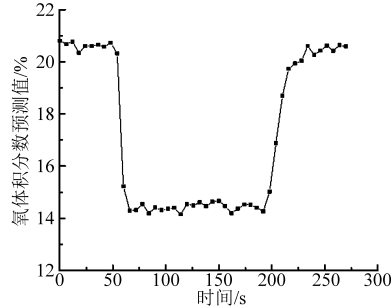


图 10 监测系统对氧体积分数为 13.98% 混合气体的监测结果
Fig.10 Oxygen concentration monitoring results in mixed
gas of 13.98% oxygen concentration

2.2.2 规模化好氧堆肥性能试验

堆肥化是一个复杂的生物化学反应过程,在这个过程中涉及到有机质降解、温度升降、水分蒸发与冷凝、臭气和温室气体的产生、pH 值的变化、微生物的生长等^[17],堆体环境复杂多变,对温度和氧体积分数的实际工况监测要求更高。图 11 和图 12 所示为本系统在工厂化好氧堆肥过程中对温度和氧体积分数的实时监测结果。

本系统在工厂化好氧堆肥过程中对温度进行监测,每 3 s 采集一个温度数据,总共监测 22 min。将采集所得数据进行以下处理:自首个数据起,每 3 个

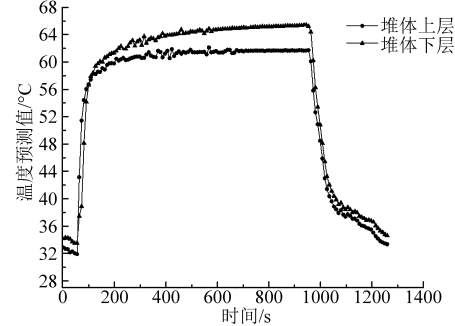


图 11 监测系统在堆体中的温度监测结果
Fig.11 Temperature monitoring results in composting pile

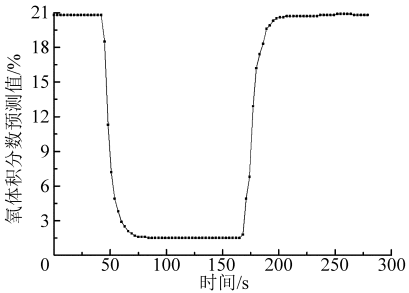


图 12 监测系统在堆体中的氧体积分数监测结果
Fig.12 Oxygen concentration monitoring
results in composting pile

数据取其平均值作为首个数据对应的时间处的温度测量值,即:以每 9 s 内的温度测量值的平均值作为该时间段内的温度实际值。所得数据如图 11 所示,温度传感器于第 45 秒放入堆体上、下两层,至 90 s 达到稳定值的 95%,响应时间为 45 s,并且在温度稳定时堆体上层温度相对标准偏差仅为 0.54%,堆体下层温度相对标准偏差为 1.07%。

本系统在工厂化好氧堆肥过程中对氧体积分数进行监测,每 3 s 获取一个氧体积分数数据,总计监测 5 min,数据如图 12 所示,氧体积分数传感器于第 42 s 放入堆体中心位置,至 72 s 达到稳定值的 95%,响应时间为 30 s,并且在氧体积分数稳定时的相对标准偏差为 2.96%。

在实验室和实际规模化好氧堆肥性能试验中,温度和氧体积分数监测相对标准偏差均为 3.02% 以下,且响应时间均小于 45 s,优于郑玉琪等^[4]所报道的响应时间 50 s。

综上,所研制的规模化好氧堆肥温、氧实时监测系统具有良好的准确性、稳定性、较快的响应速率和便携性,能够满足准确、连续在线获取堆体温度和氧体积分数数据的需求。

3 结论

(1) 设计了一套规模化好氧堆肥过程温、氧实时监测系统,主要包括温度数据获取模块、氧体积分数数据获取模块、信号处理模块、数据显/存模块,集成度高,便携性好。

(2) 针对本系统通过开展实验室和实际规模化好氧堆肥性能试验和分析研究,研究结果显示温度监测相对标准偏差均小于 3.02%,响应时间均小于 45 s;氧体积分数监测相对标准偏差均小于 2.96%,响应时间均小于 30 s。表明本系统在准确性、稳定性和响应速率等方面均具有良好性能,可用于我国工厂化好氧堆肥过程温度和氧体积分数不同空间梯度多维数据实时在线监测,为实现堆肥过程自动化控制、优化堆肥工艺、提升产品品质提供技术支撑。

参 考 文 献

1 廖青, 韦广泼, 江泽普, 等. 畜禽粪便资源化利用研究进展[J]. 南方农业学报, 2013, 44(2): 338 – 343.
Liao Qing, Wei Guangpo, Jiang Zepu, et al. Research progress on resource utilization of livestock and poultry manure [J]. Journal of Southern Agriculture, 2013, 44(2): 338 – 343. (in Chinese)

2 李文哲, 徐名汉, 李晶宇. 畜禽养殖废弃物资源化利用技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 135 – 142.
Li Wenzhe, Xu Minghan, Li Jingyu. Prospect of resource utilization of animal faeces wastes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 135 – 142. (in Chinese)

3 张田, 卜美东, 耿维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1241 – 1249.
Zhang Tian, Bu Meidong, Geng Wei. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(5): 1241 – 1249. (in Chinese)

4 张军, 陈同斌, 高定, 等. 好氧生物堆肥中温度、氧气和水分模型的研究进展[J]. 中国给水排水, 2010, 26(11): 148 – 152.
Zhang Jun, Chen Tongbin, Gao Ding, et al. Research progress in mathematical models of temperature, oxygen and moisture in aerobic composting process [J]. China Water and Waste Water, 2010, 26(11): 148 – 152. (in Chinese)

5 郑玉琪, 陈同斌, 高定, 等. 堆肥氧气实时、在线自动监测系统的开发[J]. 环境工程, 2003, 21(4): 55 – 57.
Zheng Yuqi, Chen Tongbin, Gao Ding, et al. Development of real-time on-line oxygen monitoring system for composting [J]. Environmental Engineering, 2003, 21(4): 55 – 57. (in Chinese)

6 Mathava K, Yan L, Jih L. Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio [J]. Waste Management, 2010, 30(4): 602 – 609.

7 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.

8 张安琪, 黄光群, 张绍英, 等. 好氧堆肥反应器试验系统设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 156 – 161.
Zhang Anqi, Huang Guangqun, Zhao Shaoying, et al. Design and test on an experimental aerobic composting reactor system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 156 – 161. (in Chinese)

9 Coelho L, Reis M, Dionísio L. Variation in microbial population during composting of agro-industrial waste [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(9): 4179 – 4186.

10 栗鹏飞, 杨永平. 太阳能制冷系统温度传感器测量的准确性研究[J]. 自动化与仪表, 2014(3): 48 – 51, 55.
Li Pengfei, Yang Yongping. Research on measuring accuracy of solar cooling system of temperature sensor [J]. Automation and Instrumentation, 2014(3): 48 – 51, 55. (in Chinese)

11 路顺, 林健, 陈江翠. 氧化锆氧传感器的研究进展[J]. 仪表技术与传感器, 2007(3): 1 – 3, 6.
Lu Shun, Lin Jian, Chen Jiangcui. Progress of research on zirconia oxygen sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2007(3): 1 – 3, 6. (in Chinese)

12 吕黄珍, 韩鲁佳, 张锐. 实验室好氧堆肥反应器系统性能试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 91 – 96.
Lü Huangzhen, Han Lujia, Zhang Rui. Experimental investigation on the performance of laboratory scale aerobic composting reactor system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 91 – 96. (in Chinese)

13 王莉丽. 槽式堆肥体温度等理化性质的空间变异及其相关研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
Wang Lili. Study on spatial variability of the temperature and other physic-chemical characteristic in composting [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)

14 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2011.

15 GB 7959—2012 粪便无害化卫生要求[S]. 2012.

16 薛文博, 张增强, 易爱华, 等. 基于质量作用定律的堆肥反应动力学模型[J]. 环境卫生工程, 2006, 14(6): 34 – 35, 38.
Xue Wenbo, Zhang Zengqiang, Yi Aihua, et al. Dynamics model of compost reaction based on mass action law [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2006, 14(6): 34 – 35, 38. (in Chinese)

17 曾光明, 黄国和, 袁兴中, 等. 堆肥环境生物与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2006.