

专论与综述

中国大陆城市生活垃圾堆肥技术概况

陈世和

(同济大学环境工程学院, 上海 200092)

摘要 对生活垃圾堆肥技术的沿革、现状和展望进行了较系统的介绍, 综述了堆肥过程中微生物特性、氧的传递机理、堆肥工艺、堆肥过程影响因素、堆肥专用机械设备、堆肥技术试验工程存在问题等。为开发、完善城市生活垃圾堆肥技术的应用提供了参考。

关键词 城市生活垃圾, 堆肥技术。

自本世纪 30 年代开始, 世界各国对有机固体废物废弃物的堆肥化技术进行了系统的大规模的研究, 取得了很大的发展。目前该技术已被广泛应用于城市生活垃圾、城市污水处理厂污泥等固体废物的处理。我国非常重视该技术的推广和开发应用研究, 并取得了不少符合我国国情的成功经验和科学技术方法。

1 我国城市生活垃圾堆肥技术沿革

我国城市生活垃圾堆肥技术发展可分 3 个阶段。

1.1 初始阶段(50—60 年代)

本阶段在农村传统堆肥技术基础上进行较为简单的堆肥, 从工艺来说属一次性发酵, 堆肥方式为野积式堆垛, 用土覆盖保温, 通风方式主要为自然通风, 或厌氧发酵, 没有专用的机械设备, 采用手工筛选或振动筛进行筛选。总的来说初始阶段的工艺较为简单, 发展缓慢。

1.2 开发研究阶段(70—80 年代)

随着城市的发展, 人口的增加, 城市生活垃圾处理已成为各城市亟待解决的大事。在这种形势下, 垃圾堆肥技术的研究应用得到各级政府部门的重视, 各地纷纷开展各种新技术的开发研究, 并成立环卫科所, 国家下达了有关堆肥技术的攻关项目。例如, 国家经委下达的“六五”攻关项目《城市垃圾粪便无害化处理及其综合利用的研究》^[1]; 建设部下达的“七五”攻关项目《无锡市城市垃圾无害化处理新技术的开发研究》等。所以这个阶段是我国城市生活垃圾堆肥技术研究、发展的兴旺时期, 新工艺、新技术不断涌现,

堆肥专用机械设备得到开发, 堆肥机理得到深入研究。1990 年国家科委社会发展科技司及建设部科技司对我国城市生活垃圾处理技术进行了评估, 其中堆肥技术有 11 项分别评为推广技术和试点推广技术^[11]。

1.3 推广应用阶段(90 年代)

在评估基础上, 对推广技术由国家科委、建设部列入推广计划, 按有关推广应用规定执行。对试点推广技术, 继续加强工作, 完善配套、提高技术水平, 待完善后, 经评估按推广技术执行。将确定一些重点研究、攻关技术项目列入“八五”科研计划, 使我国城市生活垃圾堆肥技术提高到国际先进水平。

2 我国城市生活垃圾堆肥技术现状

2.1 堆肥应用基础理论的研究

陈世和^[8]等就堆肥全过程的机理进行了较为系统的实验分析证明, 堆肥全过程包括中温、高温、中温 3 个阶段。在不同温度阶段由不同类型的微生物类群参与反应, 中温阶段由中温微生物参与完成, 高温阶段由高温微生物参与完成。并进一步阐明了有机物氧化稳定和腐熟度的关系, 中温阶段和高温阶段之间的相互关系等, 初步阐明了堆肥全过程机理, 为各种工艺和工程设计提供了理论依据和设计参数。

2.1.1 堆肥过程中微生物特性

陈世和^[2]等对堆肥过程中的微生物类群进行了分离鉴定。中温菌共分离出 57 株, 经复筛得 12 株进行鉴定。高温菌共分离出 32 株, 经复筛

得 7 株进行鉴定。并对上述各菌株进行了蛋白酶、淀粉酶、果胶酶、纤维素酶活力的测定和温度对酶活力的影响的研究。实验证明,在高温阶段,高温微生物其各种酶的反应速率远大于中温微生物的反应速率,其生理最佳温度可达 70℃。堆肥中微生物特性的研究成果为工程中堆肥极限温度的控制和通风量等提供了可靠依据。

2.1.2 好氧堆肥中氧的传递机理

氧的传递过程是好氧堆肥中的重要基础理论问题,李国建^[4]等就堆肥中氧的传递过程作了较深入的探讨,提出了堆层中氧扩散传递的几种供氧方式的扩散模式,并得到如下结论:堆肥(好氧发酵)一次性发酵不能只靠堆层表面氧扩散供氧、翻堆供氧。根据扩散模式可求得堆肥表层氧扩散的极限深度值。氧的传递机理的研究对堆肥中的强制通风和自然通风的应用及它们之间的关系,具有很重要的应用价值。

2.2 堆肥工艺的研究

(1)70 年代以前我国垃圾堆肥,主要采用的是一次性发酵工艺,80 年代开始,更多的城市采用二次性发酵工艺。

我国较早建立的一次性发酵工艺堆肥厂有天津河西区堆肥厂。规模最大的为上海安亭垃圾处理厂,处理量为 300t/d。二次性发酵工艺最早由北京环卫科研所进行小试^[1],以后由同济大学、无锡市环卫处共同承担的建设部“七五”科研项目规模为 100t/d 的无锡环境卫生工程实验厂^[6],是目前我国规模最大的二次性发酵工艺垃圾处理厂,建厂 3 年多来一直正常运行。

(2)上述的一次性发酵工艺和二次性发酵工艺的研究和处理,是在静态条件下进行的发酵,称之为“静态发酵”。是现阶段我国城市气化率低、垃圾组成中有机质含量在 15%—40%、并含有 30%—70% 煤渣条件下适宜采用的工艺。随着城市气化率的提高和人民生活水平的提高,垃圾组成中有机质含量达到 50%—70%,由于有机质含量的提高导致含水率提高而影响到通风的进行。因此,高有机质含量组成的城市生活垃圾不能采用静态发酵,而必须采用动态发酵工艺,堆肥物在连续翻动或间歇翻动的情况下,有

利于孔隙形成和水分的蒸发、物料的均匀、发酵周期的缩短。我国在 1987 年前后开始了动态堆肥的研究。北京董村建立了规模为 100t/d 的间歇式翻堆工艺的堆肥厂,正进行试运行生产。杭州市环卫科研所建立了规模为 10t/d 的试验装置,采用了间歇式出料的动态工艺^[11]。城市建设研究院在海口市建立了 50t/d 规模的 DANO 式连续动态发酵试验装置。陈世和^[7,8]等承担了国家自然科学基金资助项目《堆肥动态工艺的研究》,他们在实验模型条件下对 DANO 式反应器进行模型设计的研究,对传动、通风、排气、排水等系统及物料在反应器的运动工况、停留时间控制等作了较深入的分析研究。总的来说,随着城市生活垃圾中有机成分含量的提高,我国堆肥技术的应用将由静态发酵转向动态发酵。目前我国城市生活垃圾动态工艺的基础研究还刚开始,有关的论文发表尚属鲜见。小规模装置及 50—100t/d 规模动态堆肥的试验厂,虽有几处建立,但尚处试运行阶段。

2.2.1 堆肥过程影响因素的研究

目前堆肥过程影响因素的研究已由原来的单因素发展到多因素及相关影响的探讨。李国建^[5]等就堆肥发酵最佳含水率与极限水分的关系,提出了极限含水率概念,大量的试验数据证明,极限水分的 60%—80% 是堆肥物料发酵的适宜含水率。堆肥物含水率与有机物含量关系由下式表示:

$$y = 0.67x + 12.38 \pm 0.15x$$

x ——垃圾中有机物含量(湿重)

y ——堆肥原料适宜含水率

在堆肥的耗氧速率和通风量研究方面,李国建^[3]等研制了堆肥发酵气体采集测定器,能采集测定堆层中任意位点的氧气含量变化。吴一民等对堆肥物料孔隙率建立了测定方法。这些研究成果使堆肥过程中微生物的真实耗氧速率和相对耗氧速率得到测定和换算。相对耗氧速率和真实耗氧速率的关系式为:

$$R_{O_2} [O_2^{mole}/m^3 \text{ 堆层} \cdot \min]$$

$$= r_{O_2} [\Delta O_2 \%/min] \times \frac{\varepsilon \times 273 \times 10^3}{22.4 \times (273 + t)}$$

式中, R_{O_2} ——真实耗氧速率

r_{O_2} ——相对耗氧速率

ε ——堆层孔隙率

t ——堆层温度

气体采集测定器和垃圾堆肥物料孔隙率测定方法的建立,使堆肥中微生物的耗氧速率测定成为现实,为堆肥发酵过程中进行合理的通风提供了依据。

2.2.2 堆肥腐熟度的研究

腐熟度是堆肥工程中一个重要概念,它在堆肥工艺的研究、工程设计、堆肥产品评价等方面都非常重要。其基本含义是:①通过微生物的作用,堆肥产品要达到稳定化、无害化,对环境不产生不良影响;②堆肥产品的使用不影响作物的生长和土壤耕作能力。显然它与稳定化概念是有区别的,农用堆肥产品应该达到完全腐熟。因此,多年来用什么作为腐熟度标准,一直是人们研究的重点之一。张所明^[9]等对采用耗氧速率作为腐熟度指标进行了大量实验研究,对各种理化指标(VM、COD、BOD₅、C/N、淀粉含量、纤维素含量、含水率、温度)、工艺指标进行横向比较。实验结果证明用耗氧速率与其它各种指标表现有明显的相关性和一致性。理论上,耗氧速率反映了微生物对有机物的分解速率,当有机物达到稳定时,微生物的耗氧速率也达到趋向稳定的最低值。

2.3 堆肥专用机械设备的研究

我国堆肥专用机械设备的研究,早期都选用现成的矿山机械设备加以套用。由于当时对堆肥工艺的研究还处于初始阶段,许多基础研究尚未进行,对我国城市生活垃圾组成的物理特性等也缺乏认识,因此其效果很不理想。到70年代以后,随着城市生活垃圾堆肥工艺和基础研究的发展,垃圾堆肥技术专用机械设备的研究得到应有的重视和发展。近年来涌现出一批适合于我国垃圾组成的堆肥技术专用机械设备的科研成果。虽然与堆肥工艺研究的成果相比,显得还不够完善、成熟,但已能满足工艺设计需求,起到了一定的积极推动作用。

2.4 堆肥技术试验工程的研究

堆肥技术的工程化,实际在各大、中、小城市已经较普遍地展开。可分为2种类型:机械化堆肥工程和简易堆肥工程。在全国城市生活垃圾处理技术评估中,上报的堆肥处理技术项目就有26项之多^[11]。经专家评估后被定为可推广技术的城市有无锡、杭州、天津、武汉4城市。被定为试点推广技术的城市有天津、上海、百色、安阳、北京7城市。这些项目不论机械化堆肥或简易堆肥,实际上都已形成一定生产规模。因此,我国在城市生活垃圾堆肥厂工程的设计上已积累了一些经验,例如在厂址选择、总体布置的合理性、构筑物系统的通风、排水管道的设计以及二次污染的控制等方面都日趋完善,为今后制定我国城市生活垃圾堆肥厂工程设计标准化、规范化、提供了良好的基础和依据。

2.5 存在的问题

(1)对应用基础研究缺乏应有的重视,课题和论文甚少。有些地方甚至未经小试就上较大规模的工程项目,结果带来了许多不应有的后果,造成一定的损失。

(2)堆肥专用机械设备方面的研究,无论从应用基础理论到机械产品的研制方面都落后于堆肥工艺的研究,表现为产品种类少、质量差。因此,在很长一段时间里,由于没有较理想的适合我国生活垃圾组成的堆肥专用机械设备,影响了我国堆肥技术的发展和新工艺的开发。

(3)与环保行业相比,环卫行业的资金投入,显得严重不足,由于资金缺乏,有些课题不能立项,有些工程项目不能按原设计要求实现,有些已建成的堆肥厂,因运行费不能保证而停产。这种现象国内比较普遍,这就是造成在我国已建成的不同规模和类型的堆肥厂有几十个,但真正能正常维持全年连续生产的则不多的主要原因。

(4)我国堆肥技术的研究,以往偏重于静态工艺的研究,这是与我国现阶段的生活垃圾组成中有机物含量低相适应的。但随着城市气化率的提高,一些城市生活垃圾中有机物含量已明显增加,因此大力开展动态堆肥工艺和动态堆肥专用机械设备的研究已提到日程上来。

3 今后我国城市生活垃圾堆肥技术的发展方向

开发研究适合国情、经济、适用的城市生活垃圾堆肥技术是今后我国城市生活垃圾堆肥技术所面临的战略任务。在过去几年中,尽管已取得了令人瞩目的成绩,但仍存在不少亟待解决的技术问题,今后的发展研究方向是:

(1)确定今后的重点研究和攻关技术,要体现出有高技术水平,有发展前景的特点。有些是针对现有堆肥技术存在问题而提出的,另一些则是为了适应将来发展的需要,必须现在列入开发研究计划的。

(2)将堆肥专用机械设备的研发列入重点攻关科研计划,形成适合我国国情的多种类、低能耗、低成本的成套机械设备,以适应,满足各种工艺流程的选用。并逐渐向产品化、系列化、标准化方向发展。

(3)将动态堆肥工艺和其它各种新工艺的研究列入重点攻关计划,以适应高有机质含量组成的城市生活垃圾处理的需要。重视和加强城市生活垃圾堆肥技术的应用基础研究,它将有助和加快我国城市生活垃圾堆肥技术水平的提高,

并达到国际先进水平。

(4)制定城市生活垃圾堆肥技术有关的标准和规范,例如:动态好氧堆肥工艺技术规程、堆肥厂设计规范、堆肥技术中各项物理、化学、工艺参数等测定技术的规范化等。

参考文献

- 1 北京市环境卫生科学研究所. 城市垃圾粪便无害化处理及其综合利用. 北京: 化学工业出版社, 1988
- 2 陈世和等. 上海环境科学. 1989, 8(8): 17
- 3 李国建等. 城市环境卫生通讯. 1985, 2: 39
- 4 李国建等. 同济大学 80 周年校庆学术论文集. 上海: 同济大学出版社, 1988: 166
- 5 李国建等. 全国城市环境卫生科学论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 337
- 6 陈世和等. 上海环境科学. 1987, 6(1): 16
- 7 陈世和等. 上海环境科学. 1991, 10(12): 10
- 8 陈世和等. 上海环境科学. 1992, 11(5): 13
- 9 张所明等. 上海环境科学. 1988, 7(10): 9
- 10 陈世和等. 城市垃圾堆肥原理与工艺. 上海: 复旦大学出版社, 1990
- 11 聂梅生等. 城市垃圾处理技术推广项目. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992

(上接第 24 页)

(10) 用 $t_{(0.05, n-1)} \frac{S}{\sqrt{N}}$ 计算标准值的不确定度。

4.2 定值原则

GBW07409-07411 环境土壤标准物质定值由各元素的最佳估计值, 据下列原则审核, 确定标准值。

(1) 参加统计数据组不少于 7 组。

(2) 相对不确定度见表 10。

(3) 参加统计数据组中, 有 2 种(含 2 种)以上不同原理分析方法的结果, 且分析方法间无明显系统偏倚。

(4) 若数据一致性好, 相对不确定度优于要求的一个等级, 不同原理分析方法不少于 3 种, 参加统计数据组不少于 6 组时, 亦定为标准值。

5 GBW07409-07411 环境土壤标准物质的应用

GBW07409-07411 环境土壤标准物质定值后, 在环保、农业、医疗卫生、地矿、科研、大专院校等部门, 采用以分散剂溶散样品、固体进样, 石墨炉原子吸收光谱法, 氢化物-无色散原子荧光光谱法, 普通发射光谱法, 火焰原

子吸收光谱法, 等离子焰发射光谱法, X-射线荧光光谱法等不同原理的不同分析方法, 进行了应用分析测试, 结果见表 11。

从应用分析测试结果看出, GBW07409-07411, 环境土壤标准物质定值结果准确、可靠、稳定, 样品加工均匀, 符合标准物质要求。

致谢 陈万峰、许丽娟、刘洪年、尹占熙、张显辉、周连池等参加了工作。

参考文献

- 1 地球化学标准参考样研究组. 地球化学标准参考样的研制与分析方法. 北京: 地质出版社, 1987: 3
- 2 韩恒斌等. 环境化学. 1985, 1975—1985 专辑: 104
- 3 陈超五. 中国环境监测. 1990, 6(1): 23
- 4 黄敬豪等. 环境化学. 1984, 3(3): 43
- 5 邓勃. 数理统计方法在分析测试中的应用. 北京: 化学工业出版社, 1984: 51—63
- 6 地球化学标准参考样研究组. 地球化学标准参考样的研制与分析方法. 北京: 地质出版社, 1986: 176

Abstracts

Chinese Journal of Environmental Science

chem., Qingdao Univ., Qingdao 266071); *Chin. J. Environ. Sci.*, 15(1), 1994, pp. 42—45

The adsorptions of cationic, disperse, reducible, neutral, active and direct dyes on bentonite are studied respectively and the decolorization effects of treating dye-containing aqueous solution by using bentonite adsorption-flocculation method and only flocculation method are compared. The decolorization rate of the former will be 40%—200% higher than that of the latter. Using 0.01% of bentonite with 0.005% of PAC can decolorize the dye-containing wastewater by 94%—100%, where in the dye consists mainly of cationic dye.

Key words: bentonite, adsorption, flocculation, treatment of wastewater, organic dye.

Treatment of Effluent Containing Cu Ions by Means of a Packed Bed Electrochemical Reactor. Xu Wenlin, Wang Yaqiong (Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024); *Chin. J. Environ. Sci.*, 15(1), 1994, pp. 46—49

A treatment process for effluent containing Cu ions is studied by means of a packed bed electrochemical reactor which is designed using one dimensional reactor model. Experimental results show that such a process particularly suitable for the treatment of the diluent effluent and the treated water can meet the requirement of the outlet concentration $< 1 \times 10^{-6}$; the factors affecting the effluent treatment process, such as Cu ions input concentration, operation temperature, operation voltage, solution flow rate, effluent conductivity and the kind of the packed material, are also discussed. This process is economically viable and provides an effective way of removing trace metal based on the assessment of the experimental process.

Key words: effluent containing Cu ions, packed bed electrode, electrochemical reactor, wastewater treatment.

Studies on the Treatment of Pharmaceutical Wastewater with Upflow Anaerobic Sludge Blanket. Cheng Yu et al. (The Research Institute of Environmental Protection for Pharmaceutical Industry of Shenyang 110026); *Chin. J. Environ. Sci.*, 15(1), 1994, pp. 50—52

In this paper, described were some research results about the treatment of wastewater from Vitamin-C, SD and glucose production processes at a normal temperature with upflow anaerobic sludge blanket. The reactor has a volume of 100 litres, at a fermentation temperature of 17—24°C and the influent COD_{Cr} of 3000—5000 mg/L. The organic load was 3—6 kg COD/(m³ · d), the hydraulic retention time (HRT) was 18—24h and the rate of gas generation reached to 0.3 m³/kg COD with 70%

methane in the gas. The COD_{Cr} removal was up to 90%. All the experimental results were satisfactory. This process is found appropriate for treating the lower concentration pharmaceutical wastewater under the anaerobic condition.

Key words: upflow anaerobic sludge, blanket granular sludge, *methanosarcina*, total volatile acid.

Survey on Municipal Domestic Wastes Composting Technology in Mainland China. Chen Shihe (School of Environmental Engineering, Tongji University, Shanghai 200092); *Chin. J. Environ. Sci.*, 15(1), 1994, pp. 53—56

This article deals with a general survey on the composting technology for municipal domestic wastes in mainland China, including: (1) the history of composting technology for municipal domestic wastes; initial stage, development and research stage, and application stage; (2) studies on composting technology; microorganism characteristic in composting process, oxygen delivery mechanism, composting process, factors affecting composting process, special-purpose machinery, trial engineering of composting technology, and existing problem; (3) the trend of composting technology for municipal domestic wastes in mainland China. This article gives a detailed and complete description on the evolution, current status and prospects of composting technology for municipal domestic wastes in mainland China.

Key words: municipal domestic wastes, composting technology.

Monitoring Methods for Genetically Engineered Microorganisms in the Environment. Tong Yongyi (Institute of Microbiology and Epidemiology, Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100071); *Chin. J. Environ. Sci.*, 15(1), 1994, pp. 57—60

This paper deals with the monitoring principle and methods for genetically engineered microorganisms (GEM) in the environment, including the requirements of marker system on GEM for monitoring purpose, some recently developed marker systems and the monitoring methods for environmental GEM culture method, immunological method, genetic method, bioluminescent method and application of flow cytometry.

Key words: genetically engineered microorganism (GEM), environment, monitor.

Analysis of the Reversible Mechanism of Inhibition by Synthetic Organics in Anaerobic Digestion. Bian Rulin (Department of Environmental Engineering, Xi'an Institute of Metallurgy and Construction Engineering, Xi'an 710055); *Chin. J. Environ.*