

# 校园垃圾堆肥处理方案研究及实践意义

程梓伦, 杨成方\*, 高 鹏, 刘宇航, 葛令芽

徐州工程学院环境工程学院, 江苏 徐州  
Email: \*1310427281@qq.com

收稿日期: 2021年3月20日; 录用日期: 2021年4月21日; 发布日期: 2021年4月28日

## 摘 要

学校规模的扩大、学生人数的增加, 导致校园垃圾的处理成为亟待解决的问题。本文通过对校园垃圾特征的分析, 分别阐述好氧堆肥与厌氧堆肥的优缺点, 相比厌氧堆肥而言, 好氧堆肥有分类要求高和生产成本较高等缺点, 但是具有过程更快、占地面积更小、设备要求更低、参数较容易控制等优点。在校园通过堆肥处理校园生活垃圾具有十分重要的实践意义。在此基础上分析好氧堆肥的技术、经济、社会可行性, 初步制定一套校园堆肥的方案, 包括了位置选择、工艺流程、物料等。

## 关键词

校园垃圾, 好氧堆肥, 可行性, 厌氧堆肥

# Research and Practical Significance of Campus Waste Compost

Zilun Cheng, Chengfang Yang\*, Peng Gao, Yuhang Liu, Lingya Ge

School of Environment Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou Jiangsu  
Email: \*1310427281@qq.com

Received: Mar. 20<sup>th</sup>, 2021; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2021; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

With the expansion of the school scale and the increase of the number of students, the disposal of campus waste has become an urgent problem to be solved. In this paper, through the analysis of the characteristics of campus waste, the advantages and disadvantages of aerobics composting and anaerobic composting are elaborated respectively. Compared with anaerobic composting, aerobic composting has the disadvantages of high classification requirements and higher production cost, but its process is faster, a smaller area is occupied, equipment requirements are lower,

\*通讯作者。

parameters are easier to control, etc. It is of great practical significance to treat campus household garbage by compost on campus. Based on the analysis of the technical, economic and social feasibility of aerobic composting, a set of campus composting scheme is preliminarily formulated, including location selection, process flow, materials, etc.

## Keywords

Campus Garbage, Aerobic Compost, Feasibility, Anaerobic Compost

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

校园垃圾具有很强的集中性, 主要分布在食堂、宿舍楼和教学区等地点。在不同的集中点中, 垃圾成分又较为单一。例如, 教学区的垃圾主要为可回收的废纸以及塑料瓶等。其次, 校园垃圾又具有较强的流动性。校园垃圾的产生与师生们的日常生活密切相关, 伴随着学生们的流动, 其产生的垃圾所处地点也将流动起来。校园垃圾的可回收、再利用性较强, 例如, 废纸、电池、快递包装盒和衣物等可以选择回收再利用。最后, 校园垃圾中一次性用品所占的比重大。同学们为了贪图方便, 经常使用一次性用品, 特别是外卖、食堂打包所用的塑料盒、塑料袋和一次性餐具等, 这便造成校园内白色垃圾泛滥的现象。

同样, 外卖软件的普及, 使校园宿舍区内产生了更多的餐厨垃圾, 由于缺乏专门的餐厨垃圾桶和人员来处理, 导致经常出现垃圾溢出垃圾桶的现象。与其他生活垃圾混到一起堆放, 若气温较高或无法及时清理, 容易滋生细菌、散发恶臭, 影响校园的整体美观, 对广大师生的健康造成危害。

根据吴文涛等在《合肥工业大学校园生活垃圾现状》的调查结果, 人均垃圾日产量为 0.5 kg [1]。徐州工程学院目前拥有全日制在校生 2.2 万人, 有教职员工 1466 人, 日产生生活垃圾总量大约在 11.7 t。学校占地 1990.5 亩, 绿化面积占比近校园的 60%。自然脱落的树叶进入校园水体中, 容易造成水体富营养化和黑臭等。随着校园规模的扩大和师生人数的增加, 校园里的生活垃圾总量也在不断增加, 带来的环境问题也因此日益严峻。对这样大量的校园垃圾进行运输和填埋处理, 既需要支付一大笔处置费用, 也是对资源的浪费和对生态环境的破坏。

校园垃圾进行无害化和资源化处理已经成为一种必然的趋势。采用堆肥方式处理校园垃圾, 可以达到无害化水平, 减量化程度高, 且堆肥产物可以作为肥料使用因此资源化程度较高。校园垃圾堆肥处理符合减量化、资源化、无害化的“三化”的原则。校园垃圾堆肥具有较多的优势: 1) 外卖垃圾中可堆肥物质为 80%左右[2]; 2) 校园种植绿化的土壤肥沃而且没有遭到污染, 重金属及其他有害物质含量低, 产生的堆肥产品安全无污染[3]; 3) 餐饮外卖产生的垃圾与绿植垃圾等经过适当的组合可以形成堆肥原料; 4) 校园垃圾堆肥化处理后, 可以制成有机肥料, 实现有机物质的循环利用, 还可以回馈土地, 改善土壤环境。

## 2. 校园堆肥工艺的比选

### 2.1. 垃圾堆肥现状

堆肥是一种优秀的垃圾处理方式, 并且这项技术在我国古代农村已经得到广泛的应用, 是实现废物

利用的重要手段。但随着社会的发展,传统的堆肥技术因为其占地面积大且周期长、容易散发恶臭等缺点逐渐落伍并被淘汰。科学技术的进步促进了堆肥技术的改进,使堆肥技术可以焕发新的生命,通过查阅资料,当前生活垃圾堆肥处理工艺主要有微生物菌剂处理、翻堆、通风和分选等。本方案堆肥工艺的选择必须坚持因地制宜的原则,而本文研究校园垃圾堆肥必须考虑到堆肥的地点在大学校园,常见的露天堆肥、翻堆显然不合适。因此,我们应当选择适应校园的高效堆肥工艺。

## 2.2. 好氧堆肥

好氧堆肥是在氧气充足的条件下利用好氧微生物的作用,实现堆肥材料的腐熟化,转化为腐殖质[4]。好氧堆肥被广泛应用于餐厨垃圾、校园生活垃圾、农业秸秆等堆肥处理过程中。校园好氧堆肥主要过程如图1所示。



Figure 1. Aerobic composting process

图1. 好氧堆肥流程图

前处理一般包括校园生活垃圾的收集、分拣、粉碎;对其含水率和碳氮比的监测与调整。主发酵阶段主要的反应过程为:微生物的作用下分解有机物,产生二氧化碳和水,释放热量使堆体的温度上升。后发酵阶段:对尚未分解的校园生活垃圾进一步分解,最终获得完全成熟的校园生活垃圾堆肥产品[5]。后处理阶段为:对堆肥产品进行杂物剔除以及校园堆肥产品施用。具体应用到校园绿化肥料、老师学生花草种植等用途。

## 2.3. 厌氧堆肥

厌氧堆肥是一种在无氧或者厌氧条件下依靠厌氧细菌的作用将校园垃圾中的有机物快速转化为甲烷、氨和最终产物,使得垃圾无害化过程。其过程反应式如图2所示。



Figure 2. Anaerobic composting reaction

图2. 厌氧堆肥反应式图

厌氧堆肥的阶段:1) 水解发酵阶段,将校园垃圾中有机物质在脂肪和蛋白质等各种分解菌的作用下,将复杂有机物分解为简单有机物:如蛋白质水解为肽和氨基酸,脂肪分解为甘油和脂肪酸、二氧化碳等;2) 产酸产乙酸阶段,利用产酸菌的帮助,生产氢、乙酸、二氧化碳等物质;3) 产甲烷阶段,产甲烷菌群会利用第一和第二阶段所形成的产物形成甲烷[6]。

## 2.4. 两种堆肥方案比较

通过对好氧堆肥与厌氧堆肥的优缺点进行对比(图3),两者优缺点比较明显。厌氧堆肥工艺简单,不需要补充氧源,可以有效降低能耗,但其反应速度慢,所需要的时间较长,但是在此过程中会产生有机脂肪酸、硫醇以及硫化氢等刺激性气体,不利于周边环境卫生及师生安全;另外在产物中含有许多喜热细菌也可能对师生的身体健康造成影响,因此厌氧堆肥不利于同学们进行实习实践。

好氧堆肥在整个过程下须保持充足的氧环境,需要不断补充氧源,能耗较大,但其反应速度较快,所需的时间较短,不产生臭味气体,同时堆肥过程中可以杀死所有病原菌。综合考虑大学校园内的设备

布置场地、周期、物料结构等影响因素,好氧堆肥更加适合校园垃圾处理处置。好氧堆肥的过程还可以为学生的堆肥处理、环境监测实习、固体废弃物处理与处置实习、环境微生物学等实践课提供场地支持。

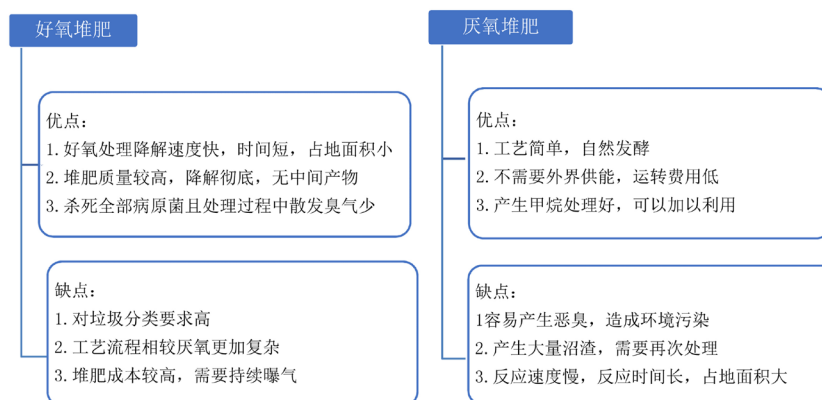


Figure 3. Comparison of scheme advantages and disadvantages  
图 3. 方案优劣对比

### 3. 好氧堆肥处理方案研究进展

#### 3.1. 堆肥物料设计方案研究

生活垃圾利用垃圾运输车从宿舍楼下的垃圾桶中获取,挑拣出有机成分(主要为丢弃的零食、用过的纸巾和水果皮等)将其破碎,过 10 mm 孔径筛。淤泥从校内河道中获取,含水率在 70%左右,先进行晾晒预处理,使含水率降至 50%~60%,然后过 10 mm 孔径筛。枯枝落叶等绿化废弃物经过收集后进入粉碎机进行粉碎,直径在 1.5~2.0 mm 之间,用作流程中的膨松剂。将外卖垃圾经过滤去油、破碎等预处理后,过 10 mm 孔径筛。由于原材料有含水量较高的外卖垃圾,为降低其含水率,调节堆体理化性质,掺入含水量约为 10%的枯枝落叶制成的锯末膨松剂。将膨松剂加入到外卖垃圾中可以改善堆肥环境得、改良堆料结构、吸收垃圾中多余的水分、提高原料的孔隙度、调节碳氮含量比,为后续堆肥过程中微生物营造良好的生长环境,堆体中的微生物数量增多、保持种群结构层次丰富稳定,从而迅速分解垃圾中的有机物[7]。

前人研究发现在堆肥方案的设计过程中要注意以下参数[8] [9]:含水率在 40%~60%、碳氮比在 50 以下的好氧堆肥要求,参照前人的研究成果,结合学校的实际情况,对校园堆肥进行方案的设计(见表 1),各组原料配比(质量比)及 EM 菌的加入量。配合环境工程及其他相关专业的实习实训及熟化后肥料的质量需要重点关注环境指标: pH、有机质、全氮、全磷、全钾以及肥料中的 Cr、Cd、Pb 金属离子等。

Table 1. Proportion and feeding amount of each group  
表 1. 各组配比及加料量

组号	垃圾配比/kg	外卖垃圾/kg	河道淤泥/kg	生活垃圾/kg	枯枝落叶/kg	EM 菌加入量/g
A	1:2:2:1	1	2	2	1	100
B	1:2:3:1	1	2	3	1	100
C	1:2:4:1	1	2	4	1	100

#### 3.2. 好氧堆肥处理反应系统研究进展

从外形结构上分,堆肥反应系统主要有箱式系统、桶式堆肥发酵仓、立式堆肥发酵塔等。其中,箱

式系统常见于国外家庭式堆肥处理[4]，其工艺简单，但是存在容量和系统维护方面的劣势。目前国外大学堆肥过程中应用最为广泛的是桶式堆肥系统[10]。此系统主要包括堆肥器、生物滤膜、除臭系统三个模块[11]。同时存在占地面积小和操作时间短等优点，但是仍然需要后期不断维护，进行后发酵。Arrigoni等[12]设计了一种立式圆柱静态好氧堆肥反应器，通风管道被设置在圆柱体的中心部位，可以在没有外界热源的情况下生产出堆肥。但是其立式结构不方便人员进行运输料等操作。以上几种堆肥反应器具有结构简单，成本较低等特点，但是自动化程度都较低，需要专门的人员操作。

黄晶晶等[13]设计了一套垃圾处理设备，可挥发性固体降解率达到约 52.1%。这套垃圾处理设备便于操作，具有搅拌和自动化控制系统，使得温度、通风率得到有效控制，物料混合均匀，稳定性较好。在大学校园内进行垃圾堆肥处理要求反应器系统应该具有自动化程度高、易操作、安全性强等特点。结合校园垃圾堆肥反应系统的特点，校园堆肥物料设计和工艺流程等情况，此垃圾处理设备更加契合当前校园垃圾堆肥处理。

### 3.3. 好氧堆肥处理工艺流程

结合物料和堆肥反应器系统设计校园垃圾堆肥工艺流程，对校园垃圾进行好氧堆肥处理，以徐州工学院校园中的枯枝落叶、草屑、外卖垃圾和学生生活垃圾为主要原料，加入腐熟菌剂在反应器内进行好氧发酵处理。

校园堆肥的规模不宜过大，堆肥流程选用好氧静态堆肥工艺。首先对校园中的枯枝落叶等绿化废弃物进行清扫堆放，然后用粉碎机将其制作成直径 0.5~1.0 mm 的木屑锯末，再与其他校园有机垃圾混合均匀后添加腐熟菌剂，结合堆肥对碳氮比、含水率要求，通过增加氮源和菌种的方式调节进料的碳氮比和含水率。投入到堆肥设备中，启动设备开始进行好氧堆肥。在堆肥的过程中不再添加新的原料，等待其完全发酵腐熟后，结束处理。

在堆肥处理过程中要对堆肥条件进行控制，以保证其中的好氧微生物正常生长，提高降解效率。加入适量的碱性试剂例如熟石灰调节堆体 pH 值。碳氮比要大于 25:1，在堆肥过程中保持在 30:1~50:1 之间。将原料放入堆肥设备，组织学生定期记录堆体内部温度和排气氧含量(每天 8:00 和 21:00)。设备运行期间，可组织学生开展实践实习，及时对肥料的情况进行记录并实际操控这套带有自动化系统的堆肥设备。好氧堆肥工艺流程如图 4 所示。

正如图 4 所示，将在校园里收集到的生活垃圾进行预处理后加入反应器内发酵，并添加校园绿化产生的垃圾制成的蓬松剂和腐熟菌剂。由于堆肥是一个放热的过程，高温会导致肥料中的有机物消耗并且降低微生物的活性从而降低肥料品质和堆肥效率与速率，所以在反应过程中要注意控制整个反应器的温度。同样值得注意的是反应过程中的 C/N 比。C/N 比过高使得细菌、微生物的生长受到限制；C/N 比过低则会导致大量的氮损失，堆肥肥料的品质大大下降。充分反应制成成品之后，继续测定其指标，方便掌握堆肥产品品质，确保肥料后期使用的安全性。

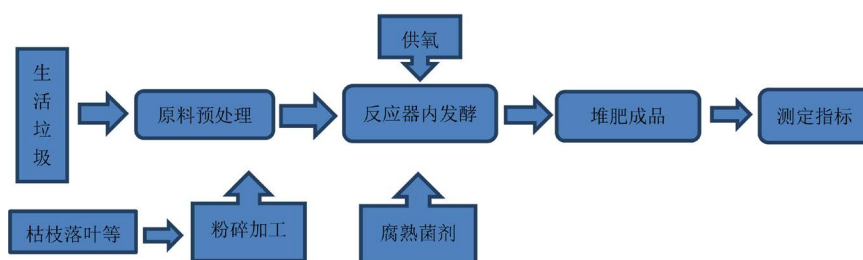


Figure 4. Aerobic composting process flow chart  
图 4. 方案优劣对比

### 3.4. 堆肥位置及功能区分布

将原料集中堆放在校园空闲地(远离生活和教学区)堆肥边搭建简易棚作为垃圾收集区,并放置粉碎机,将材料就近粉碎进行预处理。在堆肥反应设备下可加筑一些木条支架,提高堆体通透性和氧气的含量,以保证富氧环境。在完成分解发酵过程后,将有机肥料在空地上完成晾晒、加工等操作。堆肥位置功能区分布如图5所示。



Figure 5. Site lay diagram  
图5. 现场布置示意图

## 4. 实践意义及可行性分析

### 4.1. 技术可行性分析

通过调查,堆肥处理校园生活垃圾方案可行,已有小型堆肥反应器或者堆肥方案在国内外部分高校投入运行,并取得良好的效果。例如,来自武汉二职的一名老师,带领该校的学生环保社团,5年来在校园一角的小花园开展通气式堆肥。通过堆肥每年可以处理2吨左右的垃圾。同样,国外的曼彻斯特大学每年利用桶式反应器堆肥系统,处理700t园林垃圾和厨余垃圾[10]。垃圾堆肥处理技术在校园环境内是可以实施的,此外本校环境工程专业老师和同学可以为校园垃圾处理提供技术支持,也能为堆肥工艺的不断优化和提升提供帮助。风景园林和园林专业老师和同学也可以为堆肥的利用提供帮助。

### 4.2. 经济可行性分析

对整个方案的处理费用进行分析,如下表2所示。主要由三部分组成:堆肥反应设备装置的制作和购买、场地修建费用、实验过程中的人工费用(收集、处置等)。前两个部分主要可以通过结合学校实践实训购置设备等进行购买,总费用可以用景观绿化过程中肥料投入经费抵销以及生产有机肥料销售进行补贴。同时,堆肥过程中能够有效减少学校固体废弃物的数量和处理费用,节约垃圾外运产生的费用。相较普通堆肥厂拥有了师生的共同参与,节省了大量人工费用。统计分析几部分成本及作为普通有机肥销售收益,校园生活垃圾的处理成本为95.5元/t,学校生活垃圾的处理费用为180元/t。校园生活垃圾堆肥处理具有较好的经济效益。

Table 2. Waste disposal cost analysis table

表2. 垃圾处理费用分析表

序号	项目	成品消耗量(m <sup>3</sup> )	单位	消耗单价(元)	立方米成品(元/t)
—	原料				
1	校园垃圾	0.8	t/m <sup>3</sup> 原料	0	0
2	腐熟菌剂	1	kg/m <sup>3</sup> 原料	10	10
3	N类辅料	1.5	kg/m <sup>3</sup> 原料	2	3
4	合计				13

## Continued

二	辅助材料及动力		
1	电耗		30
2	包装袋		0.5
三	其他		
1	设备折旧	1	190
2	土建及其他折旧	1	12
堆肥产品及有机覆盖物成本总计(元/m <sup>3</sup> 成品)			245.5
四	销售收益		
1	有机肥料		150
最终处理费用 (元/m <sup>3</sup> )			-95.5

### 4.3. 社会可行性分析

欧美等发达国家在 2005 年市场上就已经开始售卖包括小型生物反应器等家庭厨余垃圾堆肥成套设备[14], 通过家庭的模式自产堆肥, 回用于家庭的土壤。既减少了购买化肥和垃圾处理的费用, 也同样保持了土壤的肥力, 防止化学肥料对土壤的污染。同理我们国内大学校园也应加强对生活垃圾进行垃圾分类以及“三化”的实践宣传等, 校园垃圾堆肥有利于生态环保理念的宣传, 具有重要的社会意义和可行性。

### 5. 校园堆肥在实践教学的实践意义

堆肥处理既是实现垃圾资源化的重要方法, 也是环境工程专业所需学习的重要内容。利用校园垃圾进行堆肥处理, 使得老师们在讲解堆肥技术时可以更实际、生动、贴近生活, 也更加有利于同学们的理解与记忆。堆肥产品的各项环境指标需要进行分析测定, 这些内容是环境工程专业的必修课, 同时也是重要的实践实习项目, 结合专业实习实训等来完成, 既节省了送出检测的费用和成本, 更重要的是为学生提供了实习的场地。同理, 认识实习和固体废弃物处理等实习等实践项目都可以直接在这个项目内进行, 方便了同学们开展实习实践。此外, 围绕校园垃圾堆肥处理设备可以设置其他相关专业的综合实训实验课程。在社会实践意义方面, 利用校园垃圾进行堆肥处理的宣传, 不仅仅提高了师生们的环境意识和环保意识, 同时也可以将这种充分利用资源与环保相结合的思想传播出去[15]。

### 6. 结语

校园堆肥处理可以有效减少校园生活垃圾。通过分析生活垃圾堆肥处理工艺、物料以及堆肥设备等, 坚持因地制宜的原则, 选定好氧堆肥作为校园垃圾堆肥处理的主要工艺, 本方案将前人发明出的高效堆肥技术与装置通过比选与整合, 创新地应用到大学校园中并在此基础上阐述校园垃圾堆肥的可行性和实践意义等。校园垃圾堆肥可以使得师生们对充分利用资源的环保理念拥有更加深刻的认识, 可以增加师生的环保意识, 更好构建生态校园。

### 基金项目

国家自然科学基金项目: (41807368); 江苏省徐州市科技计划(重点研发)项目: (KC18148); 徐州工程学院培育项目(XKY201813); 徐州工程学院大学生创新创业训练计划项目(XCX2020029)和(XCX2020037)。

## 参考文献

- [1] 吴文涛, 庆承松, 彭书传. 合肥工业大学校园生活垃圾现状调查与分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(11): 1424-1426.
- [2] 郭延柱, 王艳艳, 王聪杰. 绿色学校垃圾分类回收体系的建设及运行[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(1): 181-183.
- [3] 聂阳, 姜尚亮, 张雅君, 等. 基于枯枝落叶堆肥资源化利用初探[J]. 广东化工, 2017(15): 40-41.
- [4] 王月伶, 刘训东, 蒋建国, 等. 有机固体废物好氧堆肥实验装置设计[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(12): 65-67.
- [5] 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.
- [6] 张万里. 餐厨垃圾厌氧消化特性及调控策略研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [7] 席北斗, 刘鸿亮, 孟伟, 等. 厨余垃圾堆肥蓬松剂技术研究[J]. 安全与环境学报, 2003(3): 41-45.
- [8] 李承强, 魏源送, 樊耀波, 等. 通气静态仓式污泥好氧堆肥的中试研究[J]. 环境工程, 2001(1): 41-43.
- [9] 聂二旗, 郑国砥, 高定. 适量通风显著降低鸡粪好氧堆肥过程中氮素损失[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1773-1780.
- [10] 刘芳, 马俊伟. 国外大学校园垃圾堆肥技术与应用[J]. 环境卫生工程, 2005, 13(2): 5-6.
- [11] Gautam, S.P., Bundela, P.S., Pandey, A.K., *et al.* (2010) Composting of Municipal Solid Waste of Jabalpur City. *Global Journal of Environmental Research*, **4**, 43-46.
- [12] Arrigoni, J.P., Paladino, G., Garibaldi, L.A., *et al.* (2018) Inside the Small-Scale Composting of Kitchen and Garden Wastes: Thermal Performance and Stratification Effect in Vertical Compost Bins. *Waste Management*, **76**, 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.010>
- [13] 黄晶晶, 戴思慧, 张良, 等. 生活垃圾有机肥制造设备的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(3): 332-336.
- [14] 王星, 王德汉, 张玉帅, 等. 国内外餐厨垃圾的生物处理及资源化技术进展[J]. 环境卫生工程, 2005, 13(2): 25-29.
- [15] 徐志高, 尹忠芹, 汪佳其, 等. 三峡大学校园垃圾分类回收现状及回收机制的建立初探[J]. 绿色科技, 2011, 10(4): 117-119.