

引用格式: 刘建伟, 赵高辉. 城市生活垃圾资源化综合处理技术研究和应用进展[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(34): 40-47

Liu Jianwei, Zhao Gaohui. Research progress of city life solid waste comprehensive treatment technology and application progress[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(34): 40-47

环境科学、安全科学

城市生活垃圾资源化综合处理技术研究和应用进展

刘建伟 赵高辉

(北京建筑大学环境与能源工程学院 北京 100044)

摘要 随着中国经济快速发展,城市生活垃圾产生量巨增,“垃圾围城”现象日益严重。传统的生活垃圾处理技术——焚烧、堆肥、填埋已不能满足垃圾资源化处理的要求,具有减量化、无害化和资源化的综合处理技术逐步受到人们的重视。首先分析了中国城市生活垃圾的现状,接着阐述了近年来国内外“垃圾综合处理”(综合分选、好氧堆肥、厌氧发酵、焚烧工艺)技术及其进展,最后分析了综合处理技术存在的不足,提出加快垃圾分类规范实施、强化垃圾处理技术攻关、加强垃圾资源化产品推广等建议,以期为中国城市生活垃圾处理提供借鉴。

关键词 城市生活垃圾 减量化 无害化 资源化 综合处理技术

中图分类号 X705; **文献标志码** A

城市生活垃圾是指在城市日常生活中或者为城市日常生活提供服务的活动中产生的固体废物以及法律、行政法规规定视为城市生活垃圾的固体废物^[1]。2016年,国内外214个大、中城市生活垃圾年产生量为 $18\,850.5 \times 10^4 \text{ t}$ ^[2],其中大量生活垃圾由于处理不当产生大量的废水、废气及固废污染物,直接影响了人们的生活居住环境,同时造成了大量可回收资源的浪费^[3]。特别是近年来发生的垃圾围城现象,生活垃圾处理厂恶臭、农田及地下水污染等事件,使人们意识到了城市生活垃圾处理的重要性和紧迫性。

1 城市生活垃圾的现状分析

中国城市生活垃圾采用混合收集方式,具有复杂的成分,如表1所示。目前这些混合垃圾多采用卫生填埋与露天堆放,少数采用堆肥和焚烧的处理方法;填埋是对混合垃圾进行简单操作,占地面积大,易对周边环境,如地下水、土壤等造成污染;此外,因垃圾成分复杂难辨且重金属等含量不易控制,采用堆肥法处理存在肥效低、周期长、销量不好等问题。除了上述特点,与发达国家相比,中国城市生活垃圾中厨余垃圾占比较大,因此如何对大量厨余垃

圾分类收集并实现资源化是垃圾处理的关键问题。由于混合垃圾中厨余垃圾(含水率高)所占比例较高,垃圾整体热值低,焚烧技术难以发挥其减量的优势,且易产生二噁英等有害气体^[19]。

针对中国城市生活垃圾的上述两个特点,单一的填埋、堆放或者焚烧等传统方法都无法从根本上解决垃圾减量化、无害化及资源化等需求,不能充分发挥每种方法的优势,因此选择一种有效的垃圾综合处理技术已成为当前中国垃圾处理迫在眉睫的任务。针对此问题,近年来人们提出了分选加多种处理技术,分选是指将生活垃圾分为可回收物和不可回收垃圾,将可回收物,如纸类、塑料、玻璃、金属等,进行回收利用,实现垃圾减量及资源化,并缓解垃圾围城的威胁^[20]。对不可回收垃圾进行处理,如焚烧或者堆肥等。综合处理技术指在现有各类技术优势识别基础上,通过多种单一处理方式的综合运用,实现多样成分垃圾高效处理的一类垃圾处理技术^[21]。

目前,国外大力推行生活垃圾综合分类,将可回收物,如金属、玻璃等直接回收利用,对有机物进行厌氧发酵、堆肥或焚烧;将残渣等进行填埋,由传统单一的处理方式转变为综合处理方式^[22]。例如,比利时Brecht厂处理规模为 $12\,000 \text{ t/a}$,收集的垃圾经综合分选,发酵的物料按比例混合后送入发酵罐,物料在罐内发酵时间为20 d,吨垃圾产沼气量 43 m^3 ^[23]。加拿大安大略省Newmarket厂采用BTA

2019年3月17日收到

第一作者简介:刘建伟(1979—),男,博士,副教授。研究方向:固体废物资源化技术。E-mail: liujianwei0322@163.com。

表 1 中国典型城市生活垃圾物理组分
Table 1 Physical components of typical urban domestic waste in China

地区	生活垃圾各组分所占比例/%									参考文献
	厨余	纸类	橡塑类	玻璃	金属	竹类	布类	无机物	其他	
北京	63.39	11.07	12.70	1.76	0.27	1.78	2.46	0.62	5.95	[4]
上海	72.49	6.01	13.79	3.09	0.24	1.88	2.14	0.36	0	[5,6]
成都	58.15	13.00	9.90	0.80	0.10	2.45	0.75	14.60	0.25	[7—9]
天津	56.90	8.70	12.10	1.30	0.40	1.90	2.50	16.20	0	[10]
沈阳	60.97	7.79	12.19	5.07	1.67	2.48	4.39	3.36	2.08	[11]
杭州	58.20	13.30	18.80	2.70	1.00	2.60	1.50	0	2.00	[12]
广州	54.43	8.96	12.59	3.00	0.30	7.08	7.70	1.80	4.14	[12,13]
兰州	55.99	12.44	13.00	1.30	0.18	0.76	1.16	15.02	0.15	[14]
拉萨	20.45	23.74	14.84	4.73	5.12	2.76	4.50	22.83	1.03	[15]
青岛	69.00	9.50	8.40	2.20	0.90	0.30	3.00	6.60	0.10	[16—18]

注:各组分质量分数以湿基计。

厌氧发酵技术年处理 150 000 t 有机垃圾,占地 2.2 hm²,收集的垃圾经分选后与水混合,并送入发酵罐,停留时间 15 d,处理厂每年产生 60 000 t 有机肥,产生的沼气用于发电,每年产生约 5 MW·h 电力^[24]。综合分选+厌氧发酵技术在国外已经得到广泛应用,并较好地实现生活垃圾综合处理^[25]。

相比而言,国内的研究起步晚,且由于中国国内垃圾采用混合收集的模式,有必要对垃圾进行综合分选,针对不同垃圾分类处理。甄峰等^[26]以处理能力为 500 t/d 的垃圾综合处理项目为例,通过水介质进行前分选工艺,将混合垃圾分为有机部分、惰性重物质、金属、塑料和高热值杂物,实现资源的再生;目前,厨余垃圾处理方式有厌氧发酵、好氧堆肥等,这两种技术均有益于垃圾处理水平的提高^[12],因此有关学者围绕这两种技术进一步研究探索。班福忱等^[27]通过自动分选—除渣—厌氧消化工艺处理某市有机垃圾,经实践,该工艺处理餐厨垃圾 200 t/d,系统运行稳定,为避免过度

加热带来的能源消耗,在自动分选过程中物料加热温度不能超过 75 ℃,反应条件有待降低。以上项目为垃圾资源化综合处理技术广泛应用奠定了基础。

2 城市生活垃圾综合处理工艺

当前城市生活垃圾处理方式较多,由表 2 可看出,从资源利用、能源可持续发展等方面考虑,城市生活垃圾综合处理是一种较为合理的垃圾处理方式。城市生活垃圾综合处理工艺主要包括:综合分选—好氧堆肥、综合分选—厌氧发酵和综合分选—焚烧等技术。

近年来,不少学者对城市生活垃圾综合处理工艺进行研究,其中综合分选—好氧堆肥工艺指先将塑料、玻璃、金属、石块等可回收垃圾分选出来进行再利用,剩余有机垃圾进行堆肥处理^[29]。垃圾好氧堆肥是指堆体在有氧条件下,通过好氧微生物(细菌、真菌、放线菌等)分泌胞外酶将有机固体废弃物

表 2 城市生活垃圾常见处理技术优缺点
Table 2 Advantages and disadvantages of common treatment technologies for municipal domestic waste

技术分类	现有优势	存在问题	参考文献
卫生填埋	技术成熟、操作管理简单、处理量大、投资和运营费用较低;适用所有类型垃圾;可回收部分能量	占用大量土地资源;产生的垃圾渗滤液对地下水和环境造成污染;垃圾发酵产生的甲烷等易爆气体,加剧火灾及爆炸隐患;原生垃圾自然稳定化周期过长(需 20~30 年)	[1,28]
焚烧处理	占地少、减量化效果显著、无害化程度高、处理周期短、可回收垃圾焚烧热量用于供热或发电	焚烧设备价格昂贵,工程一次性投资巨大;焚烧产生大量二噁英等有害气体污染环境,危害人体健康	[28]
堆肥处理	工艺技术成熟、消除环境污染、杀灭垃圾中的病菌;堆肥产生的肥料用于改善农作物质量,提高产量	处理效率不高;处理周期长;只能处理可生物降解的垃圾;堆肥产品肥效不高,产品质量不能保证,毫无市场竞争优势;堆肥产品中残余的重金属会产生二次污染	[1,28]
综合分选—好氧堆肥	工艺成熟、资源化利用率高、环境污染较小,堆肥产品肥效高	前期分选设备运行管理成本较大	[29]
综合分选—厌氧发酵	能源消耗小、环境污染小、资源化利用率高;发酵产品质量好;产生沼气可作为清洁能源使用	处理效率低、设备运行不稳定	[30,31]
综合分选—焚烧	垃圾减量化效果显著;处理周期短	产生二噁英等有害气体污染环境	[32]

分解转化为可溶性有机质,再参与微生物细胞的新陈代谢,最终把固体废弃物转化为稳定的腐殖质,成为有机肥料^[33]。综合分选—厌氧发酵工艺是通过综合分选技术分离出可发酵物质和不可发酵物质,对可发酵垃圾进行厌氧发酵处理。使用厌氧发酵工艺占地面积少,能够减少有机垃圾带来的污染和二氧化碳量的排放,产生的沼气还可作为清洁能源使用^[30]。发酵后的沼渣、沼液经加工处理用作有机肥^[34]。综合分选—焚烧、填埋工艺是首先从垃圾中分选出不可燃物(如金属、玻璃、砖块等),对可回收部分资源回收利用,再填埋处理无机渣土;其余可燃垃圾送入焚烧炉进行焚烧发电。以上工艺既解决了“垃圾围城”的环境公害难题,又实现了垃圾减量化、无害化、资源化的处理目标^[32, 35, 36]。基于中国城市生活垃圾特性和综合处理技术现有优势考虑,综合分选—好氧堆肥工艺更适用于中国现阶段的垃圾资源化处理。

3 城市生活垃圾综合处理技术研究进展

城市生活垃圾综合处理技术是将垃圾综合分选与好氧堆肥、厌氧发酵、焚烧等技术有机结合起来,由表3看出,不同处理技术有其各自的适用范围,根据区域差异选取合适的处理技术,可以最大限度地实现各地区垃圾合理利用与处理^[41]。

表3 城市生活垃圾综合处理技术适用范围

Table 3 Scope of application of urban domestic waste comprehensive treatment technology

综合处理技术分类	适用范围	参考文献
综合分选—好氧堆肥	适用于有机垃圾含量高、垃圾分类收集效果好的区域	[37—39]
综合分选—厌氧发酵	适用于土地资源丰富、地价低、对环境要求高的地区	[31]
综合分选—焚烧	适用于土地资源稀缺、人口密集、经济发达的地区	[35, 40]

3.1 综合分选工艺研究进展

中国城市生活垃圾在一定时期内将保持混合收集的特性,以减量化、资源化、无害化为处理垃圾的目标,综合分选工艺的重要性日益凸显出来。综合分选是根据垃圾中各组分的物理性质差异,如粒径大小、密度、磁化率与光电性质等,选择适当的设备,实现垃圾各组分的分离^[42]。早在1995年,武汉交通科技大学轮机学院有关学者就提出用分选发酵法,垃圾分选采用气流分选、静电分选和滚筒筛分结合的综合分选技术;垃圾破碎后,通过控制气流的压力大小将垃圾中的轻重组分分离,轻组分垃圾(塑

料、纸类)经静电分选将纸类与塑料分开,各组分垃圾分别回收利用;重组分垃圾送入滚筒筛分,筛下物用做铺路原料,筛筒中剩下的有机物进行发酵^[43]。为了解决垃圾中诸如绳子和塑料容易缠绕和钩住分选设备,2011年,Cui等^[44]对设备的一些关键部件进行分析和最优化,提出采用实心凸轮轴,提高设备的性能和可靠性。在凸轮结构的特殊运动原理下,有关学者开发了一种新型滚筒式城市生活垃圾分拣设备,该设备可以通过固定的凸轮轴实现分拣功能;滚筒式垃圾分选设备用于垃圾分类过程的中间阶段,为后续垃圾分类工作做准备,提高资源综合利用效率^[45]。同年,相关学者提出气动分离器来分类垃圾,空气作为气动分离器的分离介质,垃圾颗粒在气流作用下根据密度和尺寸分离,通过调整风速、风扇角度、进料方式、气流平衡等结构外的参数实现垃圾分离^[46]。另外,重力分选是利用在流动的介质中,按颗粒密度差异进行混合物的分选;重力分选的介质一般是空气、水或密度大于水的液体等,技术简单,成本较低,在垃圾综合分选中应用广泛^[47]。Iovino团队^[48]研究表明,现代化的技术比如视觉传感器、金属探测器、重量测量和触觉反馈数据有助于综合分选;研究表明,装配有上述传感器的机器人可以识别十几种材料,包括不同的塑料,它可以在垃圾沿输送带移动时从废物中抽出混凝土、金属和木材;且装配有光谱仪的机器人根据垃圾反射的独特光谱能识别更多的垃圾类型。从上述研究结果可看出,在滚筒筛分过程中,根据垃圾组分差异选择多种分选工艺组合处理垃圾,可实现各组分的有效分离。

3.2 好氧堆肥工艺研究进展

中国城市生活垃圾中的有机物(特别是厨余垃圾)含量高,C/N值低,适合进行好氧堆肥。早在20世纪40年代,美国已研制出家庭厨余垃圾堆肥设施,解决了家庭垃圾处理的难题;20世纪末,日本知名电器公司大力研制堆肥设施并推广^[49]。韩国的Kim等^[50]从垃圾堆肥中分离出嗜热酸性细菌,命名为芽孢杆菌属,该菌具有生理生化特性,能够加速垃圾堆肥的高温过程。在中国,冯明谦等^[51]通过定量的研究垃圾好氧堆肥中微生物菌群的种类和数量,指出芽孢杆菌是堆肥中的优势菌群。马溪曼等^[52]学者筛选出与碳氮代谢相关的微生物并制成菌剂添加到垃圾堆肥中,发现添加菌剂使有效微生物迅速成为优势菌群,促进了堆肥腐熟。2002年陈志强等^[53]提出垃圾好氧堆肥中最适合的含水率为50%~60%,C/N为(25:1)~(35:1),氧浓度为14%~17%,pH为6.5~7.5,温度为35~55℃。之后相关学者先后研究了调理剂对垃圾好氧堆肥的

影响,如2016年袁金鹏等^[54]分别以玉米芯、锯末、麦麸、稻壳和堆肥腐熟物作为调理剂,分析了各种调理剂对垃圾堆肥过程中温度、含水率、pH、总氮等的变化情况。研究表明,麦麸不仅使得堆体产生更多热量(温度达到58.9℃)并保持高温时间最长(9 d),且能有效地降低堆肥初期的氮含量和pH,达到无害化要求。

目前国内外好氧堆肥工艺研究取得重大进展,国外集中在分类后的垃圾好氧堆肥反应特性研究,国内集中在混合垃圾好氧堆肥反应影响研究。结合源头垃圾分类、微生物菌群和调理剂的添加以及改变反应条件的等文献少见。

3.3 厌氧发酵工艺研究进展

厌氧发酵工艺有助提高所产肥料内的有机物含量,改善土壤结构、生成清洁能源(如甲烷)以及提高农作物产量的效果^[55]。其中预处理、最佳发酵条件、总固体含量、原料配比等方面是影响厌氧发酵工艺效果的重要指标。在2000年Weemaes等^[56]、Clarkson等^[57]、Angelidaki等^[58]、Palmowski等^[59]研究发现,通过减小物料粒径可有效提高产气量(10%~20%)、加快反应速率并减少反应体积;虽然减小物料粒径有利于促进反应进行,但并不是越小越好,当粒径在5~20 mm时,沼气产量的提高与粒径无关。2005年张记市等^[60]研究了反应温度、pH、TS、碳氮比、碳磷比对垃圾厌氧发酵产沼气的影响。结果发现,在反应温度50~55℃,总固体含量23%~28%,pH=6.8~7.4,碳氮比20~30,碳磷比50的条件下,可制取含甲烷60%~75%的生物气,总产气量达到最大。2016年魏珞宇等^[61]研究了在发酵过程中pH维持在6.0~7.5产气效果较好,当pH低于6时,厌氧发酵受到明显抑制。2015年高燕等^[62]以城市有机生活垃圾和人粪便为发酵原料,研究不同原料比对产气和消化效率的影响,在生活垃圾与人粪便总固体含量(totae sotids, TS)之比为2:1时厌氧消化效果较好,单位干物质产气量为96.81 mL/g TS。综上表明,不同的处理方法有各自的优势,目前的研究大多集中于单一参数的变化,如何将它们有机结合起来,充分发挥其优势,对城市生活垃圾厌氧发酵具有重要意义。

3.4 焚烧工艺研究进展

焚烧是以焚烧为主、填埋为辅,有效减少垃圾填埋量,实现垃圾资源化综合处理的一项工艺。根据张益^[63]的报道,中国国内焚烧主要以流化床和炉排炉技术为主。

流化床技术是依靠炉膛内大量高温物料的作用,使送入炉膛的垃圾快速升温着火,适合焚烧各种

发热值的废弃物。流化床焚烧炉具有以下优点:①处理各类废弃物适应性强:流化床内温度场均匀,燃料燃烧稳定。由于床层的热容量大,能为低热值、高含水率的垃圾燃烧提供所需的热量,所以适宜处理各类发热值的废弃物。同时,以煤为辅助燃料,可大大降低运行成本;②焚烧效率高:炉内垃圾与气体强烈混合,增加了垃圾的燃烧程度;③烟气排放性能好:炉膛内各处温度均匀,并加入合适的吸附剂(如石灰石),能彻底分解有毒有害物质,有效控制氮氧化物、硫化物的生成。缺点:流化床焚烧炉耗电量较高,飞灰量大^[64]。2015年魏国侠等^[64]在300 t/d的垃圾循环流化床焚烧炉进行试验,研究掺烧燃料与煤的比例对焚烧效果的影响。实验中选择污泥衍生燃料掺烧,且给煤量在1 t/h左右,掺烧污泥衍生燃料1.5 t/h时,焚烧炉可取得较好的混烧效果:垃圾处理量提高到2.63 t/h,炉床出口平均温度为863℃,比混烧前提高11.5℃,同时烟气中CO、SO₂浓度的平均值分别降低到51.5、40.1 mg/m³。

炉排炉技术的主要特征是焚烧火焰从垃圾堆料层的着火面向未着火面一层一层燃烧的过程,工艺流程主要包括干燥加热、高温燃烧和燃尽阶段,适用处理高水分、低热值的垃圾,该工艺最大优点是技术成熟、适用范围广、飞灰量少^[65-66]。2017年刘瑞媚等^[67]对某750 t/d垃圾焚烧炉排炉,研究二次风对炉排炉焚烧过程的影响;模拟结果显示,炉膛上二次风对冲布置或适当增大二次风速(从45 m/s增大到65 m/s)能有效促进烟气混合,提高炉膛烟气的充满度,改善温度分布的均匀性,从而提高炉内垃圾的燃烧效率。

综合表明,这两种技术各有优缺点,现阶段国内的垃圾焚烧还需要结合两者的优点。2015年毛永宁等^[68]通过分析两种技术的工程经济性、环境影响等方面,综合对比流化床和炉排炉等焚烧技术。指出在无排放标准的情况下,流化床焚烧技术的工程效益最佳,但随着排放标准的严格,流化床技术的收益率下降显著。基于以上分析,2017年王穗兰等^[69]开发了一种新型两段式反应器,前段往复炉排作为垃圾干燥热解段,后段旋转流化床作为物料燃尽段。研究控氧量对垃圾转化及污染物的影响;结果表明,控制气化室过量空气系数对热转化过程及污染物的生成影响显著,气化室过量空气系数为0.5~0.7时有利于提高燃室温度;系数为1.52左右有利于常规污染物转化并能抑制二噁英气体生成。

4 结论

基于中国垃圾混合收集现状,推广应用城市生

活垃圾资源化综合处理技术,有助于中国环境效益和经济效益提高。同时,依据城市生活垃圾处置标准,综合处理对实现垃圾资源化也有着重要意义。另一方面,城市生活垃圾因城市空间位置、经济社会的不同呈现多样化特征。垃圾综合处理技术也符合“因地制宜、对症下药”的基本要求。

从实践看,中国城市生活垃圾综合处理技术还存在以下不足:①混合垃圾分选技术缺少相应的规范标准;②垃圾处理工程中,不同地域垃圾处理的资源化利用效率有待提高;③垃圾处理所得的资源化产品,难以在市场上产生经济价值。基于以上分析,今后研究的侧重点应包含:①垃圾分选技术及分类收集标准规范的制定、实施,同时加强垃圾分类方面的宣传;②因地制宜,明确不同区域垃圾的资源化方法;③垃圾中的有毒有害成分及其去除技术研究;④垃圾资源化中营养元素的迁移转化机制,加强垃圾资源化的产品推广力度。

参 考 文 献

- 张英民,尚晓博,李开明,等.城市生活垃圾处理技术现状与管理对策[J].生态环境学报,2011,20(2):389-396
Zhang Yingmin, Shang Xiaobo, Li Kaiming, et al. Technologies status and management strategies of municipal solid waste disposal in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(2): 389-396
- 中华人民共和国生态环境部.2017年全国大、中城市固体废物污染环境防治年报[J].环境保护,2018(增刊1):90-106
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2017 Annual report on prevention and control of solid waste in China's large and medium-sized cities[J]. Environmental Protection, 2018(S1): 90-106
- 周咏馨,黄国华,高荣,等.生态环境产权保护视角下的垃圾处理问题研究[J].城市发展研究,2015,22(9):29-32
Zhou Yongxin, Huang Guohua, Gao Rong, et al. Research on waste disposal problem from the perspective of ecological environment property protection[J]. Urban Development Studies, 2015, 22(9): 29-32
- 陈仪,夏立江,于晓勇,等.不同类型农村住户生活垃圾特征识别[J].农业环境科学学报,2010,29(4):773-778
Chen Yi, Xia Lijiang, Yu Xiaoyong, et al. Characteristics identification of rural solid wastes based on different types of farmers[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(4): 773-778
- 梁斯敏,樊建军.中国城市生活垃圾的现状与管理对策探讨[J].环境工程,2014,32(11):123-126,136
Liang Simin, Fan Jianjun. Current status and management strategies of municipal solid wastes in China[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(11): 123-126, 136
- 贾悦,董晓丹,夏苏湘,等.上海市分类垃圾理化特性分析及处置方式探讨[J].绿色科技,2013(8):236-238,244
Jia Yue, Dong Xiaodan, Xia Suxiang, et al. Physical and chemical characteristics and disposal ways of sorting waste in Shanghai[J]. Journal of Green Science and Technology, 2013(8): 236-238, 244
- 刘育辰,王莉琳,伍钧,等.四川城市生活垃圾重金属污染状况及来源分析[J].环境工程学报,2015,9(12):6010-6018
Liu Yuchen, Wang Lilin, Wu Jun, et al. Pollution and source analysis of heavy metals in municipal solid waste in Sichuan[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(12): 6010-6018
- 黄明星,刘丹.四川省城市生活垃圾的组成及特性[J].中国环境监测,2012,28(5):121-123
Huang Mingxing, Liu Dan. Characteristic and composition of municipal solid waste in Sichuan Province[J]. Environmental Monitoring in China, 2012, 28(5): 121-123
- 银燕春,刘育辰,王莉琳,等.成都城镇生活垃圾特性及处理方案[J].环境工程学报,2016,10(10):5964-5970
Yin Yanchun, Liu Yuchen, Wang Lilin, et al. Characteristics and treating method of municipal solid waste in Chengdu, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(10): 5964-5970
- 王媛,何彧,颜蓓蓓.城市生活垃圾主要处理方式的温室气体协同减排效应比较——以天津市为例[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2014,47(4):349-354
Wang Yuan, He Yu, Yan Beibei. Comparison of collaborative effects of greenhouse gas emission reduction among main municipal solid waste (MSW) disposal ways: a case study of Tianjin[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2014, 47(4): 349-354
- 韩树丽.沈阳市垃圾处理方式对温室气体减排影响的研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2011
Han Shuli. Research progress of Shenyang City different waste disposal methods on the impact of greenhouse gas emissions reduction[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2011
- 董越勇,邹道安,刘银秀,等.我国城市生活垃圾特点及其处理技术浅析——以杭州市为例[J].浙江农业学报,2016,28(6):1055-1060
Dong Yueyong, Zou Daoan, Liu Yinxiu, et al. Study on characteristics of domestic waste in China and its comprehensive treatment technologies: taking Hangzhou City as an example[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(6): 1055-1060
- 陈姝,马晓茜.广州地区生活垃圾干燥特性与动力学分析[J].农业机械学报,2014,45(4):208-213
Chen Shu, Ma Xiaoqian. Drying Characteristics and kinetic analysis on municipal solid waste in Guangzhou[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 208-213
- 苟剑锋,曾正中,姬爱民,等.兰州市生活垃圾物理成分及含水特性分析[J].环境工程,2012,30(6):101-105
Gou Jianfeng, Zeng Zhengzhong, Ji Aimin, et al. Physical composition and moisture characteristics of municipal solid waste of Lanzhou city[J]. Environmental Engineering, 2012, 30(6): 101-105
- 旦增,韩智勇.青藏高原地区旱季城市生活垃圾特性研究[J].中国沼气,2012,30(6):33-36
Dan Zeng, Han Zhiyong. Analysis on the characteristics of MSW during dry season in Tibetan Plateau[J]. China Biogas, 2012, 30(6): 33-36
- 卞荣星,孙英杰,李卫华,等.农村生活垃圾产生特性及处理处置对策研究[J].环境工程,2014,32(12):100-102,171
Bian Rongxing, Sun Yingjie, Li Weihua, et al. Study on production

- characteristics and disposal countermeasures of rural solid wastes [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(12): 100-102, 171
- 17 曲旭朝. 青岛市生活垃圾处理系统生命周期评价研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011
- Qu Xuzhao. Life cycle assessment of domestic waste treatment system in Qingdao [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2011
- 18 姜震, 张文霞, 齐文静. 青岛市生活垃圾物理特性分析及变化趋势研究[J]. *环境卫生工程*, 2011, 19(3): 36-37 #1
- Jiang Zhen, Zhang Wenxia, Qi Wenjing. Physical properties and change regularity of domestic waste in Qingdao City [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2011, 19(3): 36-37 #1
- 19 王毅琪, 赵玉柱, 刘佳. 城市生活垃圾综合处理工艺及发展趋势探讨[J]. *环境卫生工程*, 2014, 22(1): 8-10
- Wang Yiqi, Zhao Yuzhu, Liu Jia. Domestic waste comprehensive treatment technologies and development trend [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2014, 22(1): 8-10
- 20 程亚莉, 毕桂灿, 沃德芳, 等. 国内外餐厨垃圾现状及其处理措施[J]. *新能源进展*, 2017, 5(4): 266-271
- Cheng Yali, Bi Guican, Wo Defang, et al. Status quo of kitchen waste and its treatment measures at home and abroad [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2017, 5(4): 266-271
- 21 陈庚. 海伦市生活垃圾综合处理中资源回收研究与工程应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015
- Chen Geng. Research and engineering application of resource recovery in comprehensive treatment of domestic waste in Helen City [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015
- 22 Ionescu G, Rada E C, Ragazzi M, et al. Integrated municipal solid waste scenario model using advanced pretreatment and waste to energy processes [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 76: 1083-1092
- 23 Luning L, Zundert E H, Brinkmann A J. Comparison of dry and wet digestion for solid waste [J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(4): 15-20
- 24 Goldstein N. Source separated organic as feedstock for digesters [J]. *Biocycle*, 2005, 46(8): 42-46
- 25 付钟. 国外生活垃圾厌氧发酵技术的工程应用[J]. *江苏环境科技*, 2008(4): 75-78
- Fu Zhong. Engineering application of anaerobic digestion technology on municipal solid waste disposal in overseas [J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2008(4): 75-78
- 26 甄峰, 李东, 孙永明, 等. 生活垃圾处理项目中综合处理技术的应用[J]. *可再生能源*, 2012, 30(5): 119-124
- Zhen Feng, Li Dong, Sun Yongming, et al. Application of integrated treatment technology in municipal waste treatment program [J]. *Renewable Energy Resources*, 2012, 30(5): 119-124
- 27 班福忱, 姜亚玲, 韩雪. 自动分选—除渣—厌氧消化处理有机垃圾[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(8): 4032-4036
- Ban Fuchen, Jiang Yaling, Han Xue. Treatment of organic waste by automatic sorting-slag-anaerobic digestion [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(8): 4032-4036
- 28 钱睿, 韩健. 北京城市生活垃圾处理转型新思路——垃圾热解气化技术[J]. *环境工程*, 2014, 32(S1): 689-692
- Qian Rui, Han Jian. Transformation of MSW treatment in Beijing: pyrolysis and gasification technology of domestic refuse [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(S1): 689-692
- 29 刘海. 关于混合垃圾分选堆肥技术的探讨[J]. *中国环保产业*, 2017(3): 59-60
- Liu Hai. Discussion on mixed garbage sorting and composting technology [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2017(3): 59-60
- 30 于美玲, 张大雷, 李玉婷, 等. 有机生活垃圾半干发酵菌群的分布变化特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 253-258
- Yu Meiling, Zhang Dalei, Li Yuting, et al. Microbial community characteristics of semi-dry anaerobic digestion with organic waste [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 253-258
- 31 万顺刚, 孙蕾, 胡朝华. 城市固体有机废弃物厌氧消化处理技术研究进展[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(23): 138-144
- Wan Shungang, Sun Lei, Hu Chao-hua. Review on anaerobic digestion technology of municipal organic solid waste [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(23): 138-144
- 32 李艺, 徐日生, 韦民建, 等. 城市生活垃圾环保再生煤的研发与应用评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(增刊1): 113-117
- Li Yi, Xu Risheng, Wei Minjian, et al. The evaluation of development and application about waste environmental-friendly regeneration coal WERC [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(S1): 113-117
- 33 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
- Cai Wangwei, Chen Lihui, Wang Weimu, et al. Summary of town kitchen waste aerobic composting research in China [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(6): 8-13
- 34 闫骏, 王则武, 周雨琨, 等. 我国农村生活垃圾的产生现状及处理模式[J]. *中国环保产业*, 2014(12): 49-53
- Yan Jun, Wang Zewu, Zhou Yujun, et al. Generation status and treatment mode of rural domestic refuse in China [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014(12): 49-53
- 35 李煜. 我国城市生活垃圾焚烧处理发展分析[J]. *中国环保产业*, 2014(7): 36-38
- Li Yu. Developing analysis on incineration treatment of urban domestic refuse in China [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014(7): 36-38
- 36 再协. 垃圾焚烧“十三五”行业支柱[J]. *中国资源综合利用*, 2015, 33(5): 19
- Zai Xie. The pillar of the “13th Five-Year” industry for waste incineration [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2015, 33(5): 19
- 37 陶佳慧, 许梦, 李旭, 等. 好氧堆肥阶段对蚯蚓堆肥的影响[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(23): 226-230
- Tao Jiahui, Xu Meng, Li Xu, et al. Effects of aerobic composting periods on earthworm composting [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(23): 226-230
- 38 倪梅娣. 猪粪好氧堆肥过程中氧气浓度变化规律的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006
- Ni Meidi. Study on the change law of oxygen concentration during the process of aerobic composting of pig manure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006
- 39 郭瑞敏. 辽河流域吉林省部分畜禽养殖污染的负荷估算与好氧

- 堆肥研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014
- Guo Ruimin. Load estimation and aerobic composting of some live-stock and poultry breeding in Jilin Province of Liaohe river basin [D]. Changchun: Jilin University, 2014
- 40 梁丽丽. 垃圾焚烧发电烟气中 NO_x 污染控制技术综述[J]. 环境工程, 2017, 35(2): 64-67, 88
- Liang Lili. Control technology on NO_x from MSW incineration power plant[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(2): 64-67, 88
- 41 林晓东, 彭绪亚, 王小铭, 等. 生活垃圾综合处理前分选工艺的调试研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(5): 4-7, 11
- Lin Xiaodong, Peng Xuya, Wang Xiaoming, et al. Commissioning study on sorting process before comprehensive treatment of domestic garbage[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(5): 4-7, 11
- 42 王亚琢. 基于分选的城市生活垃圾综合处理技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015
- Wang Yazhuo. Research on comprehensive treatment technology of urban domestic waste based on sorting[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015
- 43 武汉交通科技大学轮机学院. 用分选发酵法处理我国城市生活垃圾[J]. 环境科学, 1995(5): 21
- Wuhan University of Technology, College of marine engineering treatment of urban domestic waste in China by sorting fermentation [J]. Environmental Science, 1995(5): 21
- 44 Cui Z X, Du H J, Yang T, et al. Structure optimum and analysis of an easily hooking garbage sorting equipment[J]. Advanced Materials Research, 2011, 6: 356-360
- 45 Cui Z X, Du H J, Zhao Y Z, et al. Design and force analysis of a roller-type garbage sorting equipment[J]. Advanced Materials Research, 2011, 199-200: 470-475
- 46 Li W K, Yang S, Yang X L. Sorting mechanism and airflow simulation of garbage pneumatic separator[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 148-149: 297-300
- 47 袁志业, 白根云, 张文涛, 等. 生活垃圾废塑料分选技术与资源化工艺综述[J]. 环境工程, 2015, 33(增刊1): 615-618, 622
- Yuan Zhiye, Bai Genyun, Zhang Wentao, et al. Analysis of separation technology and resource utilization for municipal solid waste [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(S1): 615-618, 622
- 48 Iovino Z. Garbage-sorting robot gets its hands dirty[J]. New Scientist, 2011, 210(2806): 22
- 49 邵 蕾. 厨余垃圾家庭好氧生物处理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012
- Shao Lei. Study on aerobic biological treatment of kitchen waste [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012
- 50 Kim C H, Nam S W, Choi W B, et al. Aerobic composting process of garbage using thermoacidophilic bacillus sp. SJ-45. [J]. Journal of Life Science, 2007, 17(5): 735-739
- 51 冯明谦, 刘德明. 滚筒式高温堆肥中微生物种类数量的研究[J]. 中国环境科学, 1999(6): 490-492
- Feng Mingqian, Liu Deming. Study on the number of microbial species in drum type high temperature compost[J]. Chinese Environmental Science, 1999(6): 490-492
- 52 马溪曼, 陆彦宇, 谢志全, 等. 添加碳氮代谢相关微生物对堆肥过程中菌群结构的影响[J]. 环境工程, 2015, 33(12): 95-99, 104
- Ma Ximan, Lu Yanyu, Xie Zhiqian, et al. Effect of adding carbon and nitrogen metabolism related microorganisms on the structure of bacteria during composting[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(12): 95-99, 104
- 53 陈志强, 吕炳南, 于春晓, 等. 城市垃圾好氧堆肥处理的几个关键问题[J]. 城市环境与城市生态, 2002(6): 45-47
- Chen Zhiqiang, Lü Bingnan, Yu Chunxiao, et al. Several important problems about aerobic composting process of municipal solid waste [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2002(6): 45-47
- 54 袁金鹏, 王敬平, 周少奇, 等. 不同调理剂对有机垃圾好氧堆肥效果的影响[J]. 环境工程, 2016, 34(11): 85-89
- Yuan Jinpeng, Wang Jingping, Zhou Shaoqi, et al. Effect of different conditioning agents on aerobic composting effect of organic waste [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(11): 85-89
- 55 Zhang Q, Xu S Y. Research of disposal method for repast garbage based on anaerobic fermentation technology[J]. Advance Journal of Food Science & Technology, 2015, 8(4): 238-241
- 56 Weemaes M, Grootaerd H, Simoons F. Anaerobic digestion of ozonized biosolids[J]. Water Research, 2000, 34(8): 2330-2336
- 57 Clarkson W W, Xiao W. Bench-scale anaerobic bioconversion of newsprint and office paper[J]. Water Science & Technology, 2000, 43(3): 93-100
- 58 Angelidaki I, Ahring B K. Methods for increasing the biogas potential from the recalcitrant organic matter contained in manure [J]. Water Science & Technology, 2000, 41(3): 189-194
- 59 Palmowski L M, Mueller J A. Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion[J]. Water Science & Technology, 2000, 41(3): 155-162
- 60 张记市, 张 雷, 王 华. 城市有机生活垃圾厌氧发酵处理研究[J]. 生态环境学报, 2005(3): 321-324
- Zhang Jishi, Zhang Lei, Wang Hua. Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2005(3): 321-324
- 61 魏路宇, 罗臣乾, 张 敏, 等. 农村生活垃圾厌氧发酵产沼气性能研究[J]. 中国沼气, 2016, 34(6): 42-45
- Wei Luoyu, Luo Chengqian, Zhang Min, et al. Biogas production potential of rural domestic waste[J]. China Biogas, 2016, 34(6): 42-45
- 62 高 燕, 徐 霞, 张 磊, 等. 生活垃圾与人粪便不同比例混合对厌氧消化过程的影响[J]. 中国沼气, 2015, 33(6): 33-37
- Gao Yan, Xu Xia, Zhang Lei, et al. Effects of mixing ratio of municipal organic waste and toilet waste on anaerobic co-digestion[J]. China Biogas, 2015, 33(6): 33-37
- 63 张 益. 我国生活垃圾焚烧处理技术回顾与展望[J]. 环境保护, 2016, 44(13): 20-26
- Zhang Yi. Review and prospect of living garbage incineration technologies in China [J]. Environmental Protection, 2016, 44(13): 20-26
- 64 魏国侠, 武振华, 徐 仙, 等. 污泥衍生燃料在流化床垃圾焚烧炉混烧试验[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(5): 130-133
- Wei Guoxia, Wu Zhenhua, Xu Xian, et al. Co-incineration of sludge derived fuel with municipal solid waste in a fluidized bed incinerator[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(5): 130-133
- 65 唐 伟, 何 平, 张新学. 城市生活垃圾焚烧处理技术的比选

- [J]. 应用能源技术, 2009(8): 8-40
Tang Wei, He Ping, Zhang Xinxue. Comparison and selection of municipal solid wastes incineration technology [J]. Applied Energy Technology, 2009(8): 8-40
- 66 邹包产, 韩秋喜, 王文凯, 等. 炉排炉垃圾焚烧控制策略 [J]. 环境工程, 2013, 31(2): 80-82, 86
Zou Baochan, Han Qiuxi, Wang Wenkai, et al. Grate furnace waste incineration control strategy [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(2): 80-82, 86
- 67 刘瑞媚, 刘玉坤, 王智化, 等. 垃圾焚烧炉排炉二次风配风的 CFD 优化模拟 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(3): 500-507
Liu Ruimei, Liu Yukun, Wang Zhihua, et al. CFD optimization simulation of secondary air distribution in waste incinerator [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(3): 500-507
- 68 毛永宁, 汪小嫖, 赵黛青, 等. 不同城市生活垃圾焚烧技术的综合评价 [J]. 环境污染与防治, 2015, 37(2): 32-37, 41
Mao Yongning, Wang Xiaohan, Zhao Daiqing, et al. Comprehensive evaluation of municipal solid waste incineration technology in different cities [J]. Environmental Pollution & Control, 2015, 37(2): 32-37, 41
- 69 王穗兰, 王汝佩, 李 祺, 等. 生活垃圾的控氧热转化中试实验 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 3107-3114
Wang Suilan, Wang Rupei, Li Qi, et al. Pilot test of heat transfer in solid waste control oxygen [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(5): 3107-3114

Research Progress of City Life Solid Waste Comprehensive Treatment Technology and Application Progress

LIU Jian-wei, ZHAO Gao-hui

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

[Abstract] With the accelerate of China's economic development, the amount of municipal solid waste has increased dramatically. The phenomenon of "garbage siege" is becoming more and more serious. The traditional domestic waste treatment technologies-incineration, composting, and landfilling-have been unable to meet the requirements of waste resource treatment. Comprehensive treatment technologies with reduction, harmlessness, and resource utilization have gradually received people's attention. First the current status of urban domestic waste in China was analyzed, and then the technologies and progress of "rubbish comprehensive treatment" (integrated sorting, aerobic composting, anaerobic fermentation, incineration process) at home and abroad in recent years was elaborated. The shortages of comprehensive treatment technologies include proposing measures to speed up the implementation of waste classification and specification, strengthen the research of waste treatment technologies, and promote the promotion of waste resource-based products, with a view to provide reference for the treatment of municipal solid waste in China.

[Key words] municipal solid waste reduction harmless recycling comprehensive treatment technology