

多源有机固体废弃物资源化路径研究

彭涛声

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南
Email: 2990483307@qq.com

收稿日期: 2021年5月14日; 录用日期: 2021年6月15日; 发布日期: 2021年6月23日

摘 要

选取了多源有机固体废弃物中具有代表性的农作物秸秆、生活垃圾进行研究。先是介绍了它们当前的资源现状以及研究现状, 然后针对这两种有机固体废弃物的资源化方式和技术归纳出了它们的资源化路径。

关键词

有机固体废弃物, 资源化路径, 农作物秸秆, 生活垃圾

Study on the Resource Utilization Path of Multi-Source Organic Solid Waste

Taosheng Peng

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui
Email: 2990483307@qq.com

Received: May 14th, 2021; accepted: Jun. 15th, 2021; published: Jun. 23rd, 2021

Abstract

The representative crop straw and domestic waste in multi-source organic solid waste were selected for research. Firstly, the current resource status and research status of these two kinds of organic solid wastes are introduced, and then the resource utilization paths of these two kinds of organic solid wastes are summarized.

Keywords

Organic Solid Waste, Recycling Path, Crop Straw, Domestic Waste



1. 引言

社会经济的快速发展、人们生活水平不断提高使得有机固体废弃物的产生量日益加大，同时有机固体废弃物中含有的大量可回收利用的生物质能也在被浪费。若能将其进行资源化利用，在实现资源可回收利用的同时也能减少碳排放，对人类经济社会的可持续发展具有重大意义。国内对于有机固体废弃物的资源化方式主要有卫生填埋、高温焚烧以及好氧堆肥处理，同时热解法、蚯蚓处理技术等新式资源化方式也开始兴起。国外例如日本，由于土地资源紧缺，对于有机固体废弃物多采用焚烧法。目前日本和瑞士每年把超过 65% 的都市肥料进行焚烧而使能源再生。欧洲国家较早也采用焚烧处理有机固体废弃物。以生活垃圾处理为例，日本的生活垃圾一直都是以焚烧为主，2005 年开始推进循环型社会后，垃圾产生量减少，资源化等中间处理的比例占到了 13% 左右，焚烧比例达到 78% 左右。本文通过对有机固体废弃物的资源化处理技术进行了系统综述和分析，从而归纳总结出了其资源化路径，旨在为有机固体废弃物的可回收利用和资源化提供方向。

2. 有机固体废弃物概述

多源有机固体废弃物是指人们在生产活动中产生的丧失原有利用价值或虽未丧失利用价值但被抛弃或放弃的固态有机类物品和物质，主要包括农业有机固体废物(主要包括农作物秸秆藤蔓、畜禽粪便和水产废弃物等)、工业有机固体废物(主要包括高浓度有机废渣等)、市政有机垃圾(主要包括园林绿化废弃物、市政污泥、餐厨垃圾等)三大类。农作物秸秆、禽畜粪便、餐厨餐饮垃圾和污泥等是典型的有机废弃物。

2016 年经国家农业部、住建部的估算，全国每年产生畜禽粪 3.8×10^9 t，综合利用率不到 60%；每年产生秸秆近 9×10^8 t，未利用的约 2×10^8 t；城市污泥产生量达到约 3.5×10^7 t，处置率在 50%~70%；城市生活垃圾产生量达到 1.8×10^8 t。依据 2020 年第二次全国污染普查公报显示，畜禽粪污化学需氧量的排放量远远超过中国工业废水和生活废水的排放量之和，占比全部排放量的 49.8%。不同种有机固体废弃物的理化性质见表 1。

Table 1. Physical and chemical properties of main organic solid wastes

表 1. 主要有机固体废弃物的理化性质

	水分含量(%)	有机物含量(%)	C/N
作物秸秆	11~12.5	80~90	45~65
生活垃圾	45~55	35~50	20~35
禽畜粪便	70~95	70~85	3~10
脱水污泥	78~81	55~62	6.5~14

从表 1 可以看出不同种类的有机固体废弃物有机质含量差异较大，其中作物秸秆的有机物含量最高(80%以上)，而生活垃圾的有机质含量较低(50%以下)，从能源回收的角度来看有机质含量越高具有的热值也越高，可以从中获得更高的能量。畜禽粪便和脱水污泥具有较高的含水率和有机质含量，但是二者的 C/N 比较低[1]，同时具有较好的生物转化率[2] [3]，通常采用厌氧消化的方法回收能源。

3. 有机固体废弃物资源化

资源化从广义上讲,表示资源的再循环。从狭义上讲,可以说是为了再循环利用废弃物而回收资源和能源。有机固体废弃物资源化的定义包括以下3个:1) 物质回收,即处理废弃物并从中回收指定的二次物质,如纸张、玻璃、金属等物质。2) 物质转换,即利用废弃物制取新形态的物质,如利用废玻璃和废橡胶生产铺路材料,利用有机垃圾和污泥生产堆肥等。3) 能量转换,即从废物处理过程中回收能量,包括热能和电能,例如,通过有机废弃物的焚烧处理回收热量,还可以进一步发电;利用垃圾或污泥厌氧消化产生沼气,作为能源向企业和居民供热或发电。

对有机固体废弃物进行回收和利用,不仅可以实现有机固废的减量化、无害化和资源化,而且可以提高社会效益,做到物尽其用,并可以取得一定的经济效益,同时还能达到保护环境的目的。

3.1. 农作物秸秆资源化路径

3.1.1. 我国农作物秸秆现状

秸秆是农业生产系统中非常重要的生物质资源。我国18亿亩耕地,近年来每年农作物秸秆资源理论产量约为9.0亿吨[4]。农作物光合作用产生的能量有50%以上储存在作物秸秆中,据统计,我国秸秆资源占主要生物质资源72.2%,是生物质资源最重要的组成部分[5]。秸秆中富含氮、钾、磷、镁、钙等重要元素以及粗纤维和有机质,具有很大的利用价值[6]。国家发展改革委、农业农村部(原农业部)对全国“十二五”期间秸秆综合利用情况的终期评估结果显示,我国每年农作物秸秆理论资源量超过 10×10^8 t,其中可收集资源量约为 9×10^8 t,为世界第一秸秆产量大国,占全球秸秆总产量的18.50%左右[7]。

3.1.2. 国内外研究现状

国内外对于农作物秸秆的资源化利用做了许多相关的研究。首先是利用农作物秸秆厌氧发酵产甲烷。A dl等[8]研究棉花秸秆厌氧消化时得到甲烷的实际产量为240 mL/g-VS,而棉花秸秆厌氧发酵的甲烷理论产量为356.7 mL/g-VS。Chen等[9]将牛粪和米草进行共消化,其甲烷产量提高了7.09%~44.26%。Zhang等[10]将三种作物秸秆(小麦、玉米和水稻)与羊粪进行共消化,甲烷产量相对于秸秆单独消化提高了62.1%~111.28%,相对于羊粪单独消化提高了23.04%~54.44%。张继泉等[11]将用稀硫酸预处理后的玉米秸秆进行固液分离发酵,在36℃、60 h的条件下,得到0.327 g 乙醇·(g 还原糖)⁻¹。刘娇等[12]研究发现,湿氧化预处理可以将玉米秸秆的半纤维素和木质素转化为纤维素,可发酵糖的含量增加。研究表明,水解液中的副产物如糠醛等会抑制细菌活性。黄秀梅等[13]利用经活性炭和氢氧化钙联合脱毒的玉米秸秆水解液生产丁二酸,产量为66.23 g·L⁻¹,较未脱毒的水解液提高了25.3%。

其次是利用农作物秸秆进行堆肥。黄继川等[14]给芥菜施用玉米秸秆堆肥,发现堆肥和化肥对土壤中水解性氮的提升差异不大,堆肥/化肥联用可以增加芥菜中的可溶性蛋白和维生素C的含量,同时堆肥的使用可以缓解单施化肥带来的土壤酸化问题。赵英等人[15]发现,玉米秸秆堆肥可以促进人参根系生长,降低发病率,改善土壤物理性质,施肥量为15 kg·m⁻²时,参根、茎、叶片中的皂苷含量分别提高15.0%、14.1%、11.3%,氨基酸含量提高10.34%、12.75%、13.86%,人参产量提高23.4%。

3.1.3. 我国农作物秸秆资源化路径

目前,可用于示范推广或产业应用的秸秆利用技术已有很多模式,为便于宣传推广和数据统计,国务院办公厅印发《关于加快推进农作物秸秆综合利用的意见》(国办发[2008]105号),自此各地区、各部门逐步将秸秆综合利用技术归纳为肥料化、饲料化、燃料化、原料化、基料化五类主要途径,简称“五化”或“五料化”[16]。针对这五类主要的资源化方式,归纳出农作物秸秆的资源化路径见图1。

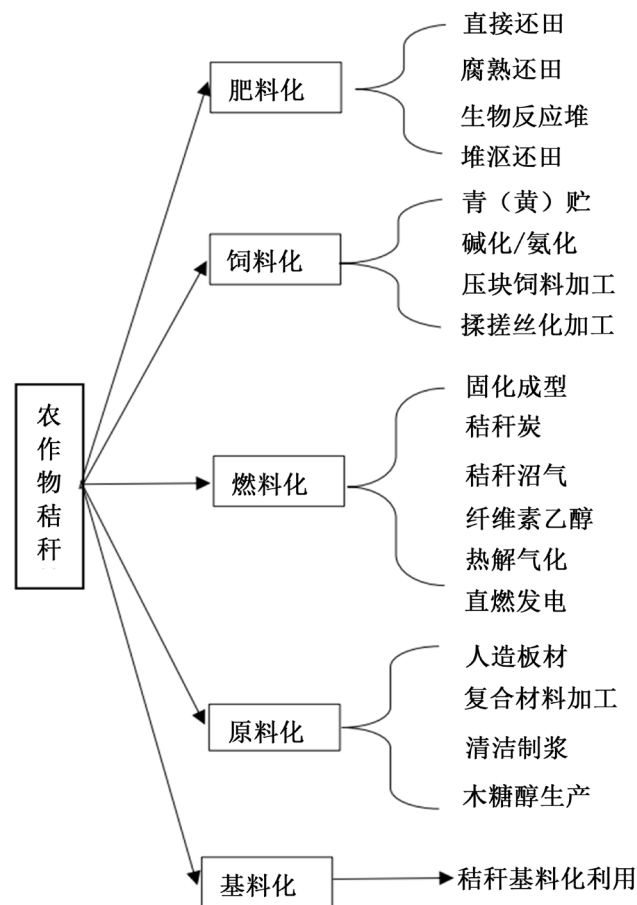


Figure 1. Resource utilization path of crop straw
图 1. 农作物秸秆的资源化路径

秸秆肥料化利用最为广泛，除包括直接还田外，还包括过腹还田以及菌肥联产、气肥联产等。秸秆饲料化利用包括青贮、黄贮、微贮、膨化、成型、干草等秸秆饲料加工技术，适合饲料化利用的秸秆主要包括玉米、油菜和豆类等[17]。秸秆燃料化利用主要包括发电(热电联产)、成型、热解、燃烧等能源化利用技术，其中，秸秆发电(热电联产)是目前秸秆燃料化利用最重要的技术形式[18]。秸秆基料化指以秸秆为主要原料，加工或制备为微生物、植物或动物生长提供一定营养和良好条件的有机物料，主要包括食用菌技术、植物栽培育苗基质技术和动物饲养垫料技术等[19]。秸秆原料化指秸秆作为工业原料进行加工利用的技术，主要包括人造板材、复合材料加工、清洁制浆等[20]。

3.2. 生活垃圾的资源化路径

3.2.1. 我国生活垃圾现状

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。我国城市生活垃圾产生量增长迅速，在过去 30 年，我国城市生活垃圾产生量增长迅速，由 1980 年的 3.132×10^7 t 增长到 2017 年的 2.15×10^8 t，平均年增长率为 5.34% [21]。预计到 2030 年，将增长到 4.80×10^8 t [22]。而生活垃圾中餐厨垃圾占了绝大部分比例，据商务部数据测算，2018 年我国厨余垃圾产生量达 1.08 亿万吨，2019 年我国餐厨垃圾产生量达 1.18 亿万吨，保守估计 2020 年我国厨余垃圾产生量达 1.18 亿万吨。

然而生活垃圾产生量日益增长的同时,垃圾处理能力却没有达到相对应的水平。据《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理实施建设规划》,到“十三五”末,力争提高厨余垃圾处理能力达到 3.44 万吨/日,处理率近 14%,即近 86%的厨余垃圾没有无害化处理。表 2 为 2016 年至 2019 年全国生活垃圾处理情况。

Table 2. Domestic waste treatment in China from 2016 to 2019

表 2. 2016~2019 年全国生活垃圾处理情况

	清运量(万吨)	无害化处理场座数(座)	无害化处理能力(吨/日)	无害化处理量(万吨)
2016	20,362	940	621,351	19,674
2017	21,521	1013	679,889	21,034
2018	22,802	1091	766,195	22,565
2019	24,206	1183	869,875	24,013

从表中我们可以看到,从 2016~2019 年,无论是垃圾清运量、无害化处理场座数、无害化处理能力以及无害化处理量都在逐年增长,可见我国对于生活垃圾的无害化处理越来越重视。

3.2.2. 生活垃圾研究现状

目前,对于餐厨垃圾的厌氧消化处理多采用共消化的方法,裴占江等[23]在中温条件下研究了餐厨垃圾与牛粪的共消化过程,当餐厨垃圾和牛粪的比例为 2:1 时,共消化的沼气产量和甲烷产量最高; Tian 等[24]在研究餐厨垃圾与猪粪的共消化时发现当两者的混合比例为 1:1 时,生物降解性最大,甲烷的产量也最大,达到 409.5 mL/g-VS。班福忱等[25]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。

其次,生活垃圾好氧堆肥也成为另外一种资源化方式。罗珈柠等[26]研究了餐厨垃圾的成分对堆肥的影响,发现果蔬残余比食物残余更适宜于堆肥,二者的复合产品有更好的肥力和较低的生物毒性。韩国的 Kim 等[27]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[28]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[29]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[30]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℃。

最后是生活垃圾的其他资源化方式。任连海等[31]发现,高含盐量会抑制好氧菌的活性,造成堆肥高温期减少,堆肥效果下降。曲伟国等[32]从工艺上分析了餐厨垃圾制油的可行性,采用酸碱催化酯交换法制取生物柴油,设备占地小,成本低。甄峰等[33]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。

3.2.3. 生活垃圾的资源化路径

目前,国内能达到现代化大规模生产水平的城市垃圾处理技术主要是卫生填埋技术、焚烧技术、高温堆肥技术、厌氧消化技术和回收利用技术。针对生活垃圾的各种资源化方式总结归纳出其资源化路径,见图 2。

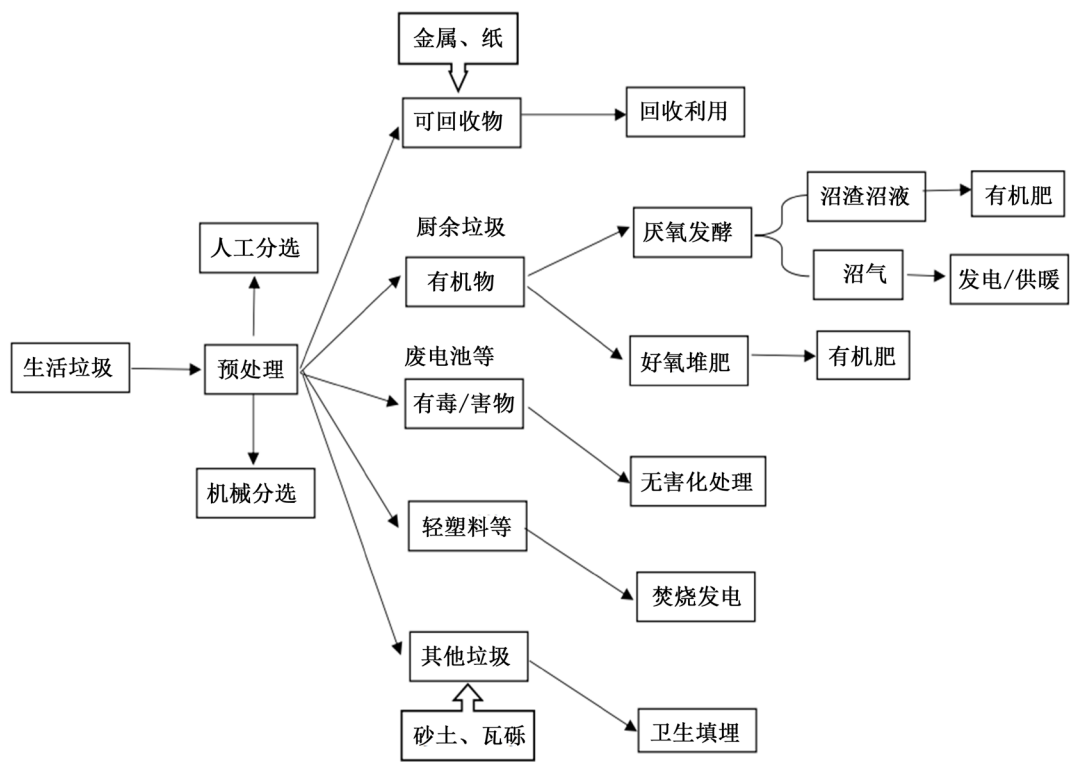


Figure 2. Resource utilization path of domestic waste
图 2. 生活垃圾的资源化路径

生活垃圾通过垃圾回收车和垃圾中转站集中收集后，对收集的垃圾进行预处理，预处理即对生活垃圾进行简单的分选，包括人工分选和机械分选。垃圾经过分选后可分为五大类：以金属和纸为代表的可回收物、厨余垃圾等有机物、废电池等有毒/有害物、轻塑料和其他垃圾。其中，对于可回收物可以进行回收利用处理；容易对环境造成毒害污染的有害物进行无害化处理；轻塑料等可燃物可用于焚烧发电以实现热能的回收；对于以沙土、沙砾为代表的其他垃圾则进行卫生填埋处理；对于生活垃圾中占绝大部分的厨余垃圾则对其进行厌氧发酵或者好氧堆肥处理，厌氧发酵产生的沼渣沼液和好氧堆肥产生的有机肥可用于农业生产所需的肥料，厌氧发酵产生的沼气可用于发电或者供暖，这样实现了生活垃圾的资源化利用。

由于传统的生活垃圾处置技术在适用性与产品化方面存在一定局限，一些新兴技术应运而生。等离子气化[34]、超临界水氧化[35]及高速活性制肥[36]等技术，有效克服传统技术占用大量土地资源、处理周期长、产生二次污染的弊端，逐渐成为了近几年的研究热点。

等离子体与气化技术结合是一种处理固体废物的新型技术。利用热等离子体几乎能将有机物完全转化为合成气(一氧化碳和氢气)和玻璃体炉渣，其中合成气可用作燃料发电或制氢[37] [38]，产生的玻璃体炉渣，可作为催化剂或替代建筑材料参与陶瓷工业过程[39]。高速活性制肥技术结合了水热法和湿式氧化法的技术特点，快速地将固体废物制成肥料或土壤调理剂。此技术可用于处理畜禽粪便、餐厨垃圾、死亡畜禽等固体废物。微生物电解池技术是将生活垃圾中可生物降解的组分被粉碎后形成浆液，经过微生物电解池(MECs)将其转化为氢气、生物燃料和其他增值产品[40]。

4. 结论

1) 对于农作物秸秆，目前，秸秆综合利用技术归纳为肥料化、饲料化、燃料化、原料化、基料化五类主要途径，简称“五化”或“五料化”，其中秸秆肥料化利用最为广泛。秸秆饲料化利用是把适合饲

料化的秸秆例如玉米秸秆等制成动物饲料。秸秆燃料化利用中秸秆发电(热电联产)是目前秸秆燃料化利用最重要的技术形式。秸秆基料化指以秸秆为主要原料,加工或制备有机养料。秸秆原料化指秸秆作为工业原料进行加工利用的技术,主要包括人造板材、复合材料加工、清洁制浆等。

2) 生活垃圾作为人们日常生活中不可避免会产生的物质已经越来越受到人们的关注,其资源化方式也一直是国内外研究学者致力于解决的问题。当前,国内能达到现代化大规模生产水平的城市垃圾处理技术主要是卫生填埋技术、焚烧技术、高温堆肥技术、厌氧消化技术和回收利用技术。其中,填埋和焚烧仍是我国城市生活垃圾处理的主要技术,它们有效地解决了生活垃圾堆腐与二次污染问题,实现了生活垃圾减量化、资源化,但部分技术仍存在土地资源占用大、处理周期长等弊端。因此,等离子气化、超临界水氧化及高速活性制肥等用于处理生活垃圾的新型技术也开始成为研究热点。

固体废弃物一直被称为“放错地方的资源”,而固体废弃物中的有机固体废弃物更是占据了绝大部分的比例,它们身上更是蕴含了丰富的潜在能源,倘若能够得到充分利用,使它们能够得到最大的资源化,在实现资源可回收利用的同时也能减少碳排放,对人类经济社会的可持续发展具有重大意义。

参考文献

- [1] Surendra, K.C., Takara, D., Jasinski, J. and Khanal, S.K. (2013) Household Anaerobic Digester for Bioenergy Production in Developing Countries: Opportunities and Challenges. *Environmental Technology*, **34**, 1671-1689. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.824012>
- [2] Esposito, G., Frunzo, L., Giordano, A., et al. (2012) Anaerobic Codigestion of Organic Wastes. *Reviews in Environmental Science Bio/Technology*, **11**, 325-341. <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9277-8>
- [3] Rico, J.L., Garcia, H., Rico, C. and Tejero, I. (2007) Characterisation of Solid and Liquid Fractions of Dairy Manure with Regard to Their Component Distribution and Methane Production. *Bioresource Technology*, **98**, 971-979. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.04.032>
- [4] 柴如山, 王擎运, 叶新新, 等. 我国主要粮食作物秸秆还田替代化学氮肥潜力[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2583-2593.
- [5] 秦世平. 农作物秸秆气化的效果和前景——关于山东省莱州市秸秆气化集中供气的调查(上) [J]. 农业机械, 2001, 11(12): 37-38.
- [6] 贾凡, 刘青松, 姜达. 农作物秸秆不同利用产生的环境效应[J]. 农业技术与装备, 2013(10): 4-6+8.
- [7] 农业部新闻办公室. 我国主要农作物秸秆综合利用率超过 80% [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-05/26/content_5077037.htm, 2016-05-26.
- [8] Adl, M., Sheng, K.C. and Gharibi, A. (2012) Technical Assessment of Bioenergy Recovery from Cotton Stalks through Anaerobic Digestion Process and the Effects of Inexpensive Pre-Treatments. *Applied Energy*, **93**, 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.065>
- [9] Chen, G.Y., Zheng, Z., Yang, S.G., Fang, C.X., Zou, X.X. and Zhang, J.B. (2010) Improving Conversion of *Spartina alterniflora* into Biogas by Co-Digestion with Cow Feces. *Fuel Processing Technology*, **91**, 1416-1421. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.05.015>
- [10] Zhang, T., Liu, L.L., Song, Z.L., Ren, G.X., Feng, Y.Z., Han, X.H. and Yang, G.H. (2013) Biogas Production by Co-Digestion of Goat Manure with Three Crop Residues. *PLoS ONE*, **8**, e66845. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066845>
- [11] 张继泉, 孙玉英, 王瑞明, 等. 玉米秸秆水解液生产燃料酒精的研究[J]. 西部粮油科技, 2003, 28(5): 63-65.
- [12] 刘娇, 宋公明, 马丽娟, 等. 不同预处理方法对玉米秸秆水解糖化效果的影响[J]. 饲料工业, 2008, 29(1): 31-32.
- [13] 黄秀梅, 李建, 陈可泉, 等. 利用玉米秸秆水解液厌氧发酵产丁二酸的研究[J]. 中国酿造, 2009, 28(6): 31-34.
- [14] 黄继川, 彭智平, 于俊红. 玉米秸秆堆肥处理对芥菜品质及土壤肥力的影响[J]. 广东农业科学, 2009(12): 88-91.
- [15] 赵英, 王秀全, 侯玉兵, 等. 施用秸秆堆肥对人参根系生长及产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2010, 32(3): 307-311.
- [16] 国家发展改革委办公厅, 农业部办公厅. 关于印发《秸秆综合利用技术目录 2014》[EB/OL]. http://www.china-nengyuan.com/m/news_82952.html, 2015-09-15.
- [17] 楚天舒, 杨增玲, 韩鲁佳. 中国农作物秸秆饲料化利用满足度和优势度分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 1-9.

- [18] 王强. 生物质能耦合发电的产业政策与经营模式[J]. 中国电力企业管理, 2017(34): 70-71.
- [19] 杨晓东. 农作物秸秆基料化利用技术及效益分析[J]. 农业科技与装备, 2017(12): 41-43.
- [20] 苑鹤, 李威, 蔡丹, 等. 秸秆原料化利用技术简介[J]. 河北农业, 2018(8): 33-34.
- [21] 许博, 赵月, 鞠美庭, 等. 中国城市生活垃圾产生量的区域差异: 基于 STIRPAT 模型[J]. 中国环境科学, 2019, 39(11): 4901-4909.
- [22] Xu, Q.Y. and Ge, J.J. (2011) Reduction of CO₂ Emission Using Bioreactor Technology for Waste Management in China. *Energy Procedia*, 5, 1026-1031. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.181>
- [23] 裴占江, 刘杰, 王栗, 等. 餐厨垃圾与牛粪联合厌氧消化效率研究[J]. 中国沼气, 2014, 32(4): 3-7.
- [24] Tian, H.L., Duan, N., Lin, C., Li, X. and Zhong, M.Z. (2015) Anaerobic Co-Digestion of Kitchen Waste and Pig Manure with Different Mixing Ratios. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 120, 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.11.017>
- [25] 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.
- [26] 罗珈柠, 郑思俊, 王妍婷, 等. 原料对餐厨垃圾堆肥产品的影响及其绿地应用适宜性分析[J]. 环境工程学报, 2014, 8(11): 4977-4983.
- [27] Kim, C.H., Nam, S.W., Choi, W.B., et al. (2007) Aerobic Composting Process of Garbage Using Thermo Acidophilic *Bacillus* sp. SJ-15. *Journal of Life Science*, 17, 735-739. <https://doi.org/10.5352/JLS.2007.17.5.735>
- [28] 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, 19(6): 490-492.
- [29] 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.
- [30] 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, 15(6): 45-47.
- [31] 任连海, 黄燕冰, 王攀. 含盐量对餐厨垃圾堆肥理化特性变化规律的影响[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(7): 104-109.
- [32] 曲伟国, 王琦, 靳俊平, 等. 餐厨垃圾提取生物柴油技术及其应用[J]. 环境卫生工程, 2013, 21(1): 35-36.
- [33] 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.
- [34] Tavares, R., Ramos, A. and Rouboa, A. (2019) A Theoretical Study on Municipal Solid Waste Plasma Gasification. *Waste Management*, 90, 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.051>
- [35] Chen, Z., Zheng, Z., Li, D., et al. (2020) Continuous Supercritical Water Oxidation Treatment of Oil-Based Drill Cuttings Using Municipal Sewage Sludge as Diluent. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121-225. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121225>
- [36] 席北斗, 刘东明, 李鸣晓, 等. 我国固废资源化的技术及创新发展[J]. 环境保护, 2017, 45(20): 16-19.
- [37] Lemmens, B., Elslander, H., Vanderreydt, I., et al. (2007) Assessment of Plasma Gasification of High Caloric Waste Streams. *Waste Management*, 27, 1562-1569. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.027>
- [38] Sanlisoy, A. and Carpinlioglu, M.O. (2017) A Review on Plasma Gasification for Solid Waste Disposal. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 1361-1365. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.008>
- [39] Ramos, A., Berzosa, J., Espí, J., et al. (2020) Life Cycle Costing for Plasma Gasification of Municipal Solid Waste: A Socioeconomic Approach. *Energy Conversion and Management*, 209, Article ID: 112508. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112508>
- [40] Lu, L. and Ren, Z.J. (2016) Microbial Electrolysis Cells for Waste Biorefinery: A State of the Art Review. *Bioresource Technology*, 215, 254-264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.034>