

# 沼渣特性及其资源化利用探究

葛 振<sup>1,2,3</sup>, 魏源送<sup>3,4</sup>, 刘建伟<sup>1,2</sup>, 赵玉柱<sup>4</sup>

(1. 北京建筑大学北京应对气候变化研究和人才培养基地, 北京 100044; 2. 北京建筑大学环境科学与工程系, 北京 100044; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 4. 鄂尔多斯固体废弃物资源化工程研究所, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要:** 随着我国沼气工程的大力发展, 产生了大量的厌氧消化残余物——沼渣和沼液, 它们具有营养成分丰富, 养分全面等优点, 是一种优良的有机肥原料。沼渣的资源化利用, 能更加全面发挥沼气工程的生态环保效益和社会效益, 完善其产业链。文章通过文献调研, 重点分析了不同原料产生的沼渣理化特性, 系统总结了沼渣资源化途径, 并对沼渣制肥这一方法做了经济性分析, 以期今后沼渣资源化利用提供借鉴。

**关键词:** 沼气工程; 沼渣; 资源化

中图分类号: X705; S216.4 文献标志码: B 文章编号: 1000-1166(2014)03-0074-09

**Characteristics of Digestate and Utilization; An Overview / GE Zhen<sup>1,2,3</sup>, WEI Yuan-song<sup>3,4</sup>, LIU Jian-wei<sup>1,2</sup>, ZHAO Yu-zhu<sup>4</sup> / (1. Beijing Climate Change Response Research and Education Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. Ordos Institute of Solid Waste Technology, Ordos 017000, China)**

**Abstract:** With the rapid development of the biogas plant in China, a lot of anaerobic digestate, including biogas residue and slurry, were produced. Due to it is rich in nutrients, digestate is considered as excellent organic fertilizer. The utilization of biogas residues could not only achieve the ecological, environmental and social benefits for biogas project, but also improve its industrial chain. Through literature review, the purpose of this paper was to analyze phys-chemical characteristics of biogas residues produced from different raw materials, summarized its reuse ways. And economic analysis was also made for digestate compost.

**Key words:** Biogas plant; Biogas residue; Reuse

近年来我国城镇化进程进一步加快, 生活垃圾产生量大, 据统计 2011 年全国城市生活垃圾清运量已达 16395 万吨<sup>[1]</sup>; 同时, 做为农业生产大国, 我国每年约有 40 多亿吨农业废弃物产生, 其中畜禽粪便排放量 26.1 亿吨, 农作物秸秆 7.0 亿吨<sup>[2]</sup>。这类有机固体废弃物具有良好的可生物降解性, 蕴含着大量的生物质能。随着节能减排的推行, 作为有机固体废弃物无害化、减量化和资源化<sup>[3]</sup>的有效途径, 厌氧消化日益得到重视。据不完全统计, 目前我国沼气工程从 2005 年的 1.2 万处猛增至 2008 年的 3.95 万处, 最近三年各种类型沼气工程的建设总量

翻了两番<sup>[4]</sup>。2012 年颁布的《“十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》和《“十二五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》大力鼓励污泥和餐厨垃圾厌氧消化产沼气<sup>[5]</sup>, 然而, 在沼气工程迅猛发展的同时, 产生了大量的厌氧消化残余物——沼液和沼渣, 它们的资源化利用已成为制约厌氧消化推广应用的瓶颈。厌氧消化残余物富含有机质、营养成分和生物活性物质, 是优质的有机肥, 广泛应用于农业, 可减少化肥和农药的用量<sup>[6]</sup>。国外发达国家很少对厌氧残余物做深度处理, 都是经过长期贮存后作为肥料在大田消纳。但我国的沼

收稿日期: 2013-12-13

项目来源: 国家科技支撑计划(2012BAC25B03); 公益性(农业)科研专项经费课题(201303091); “应对气候变化”北京市研究与人才培养基地(13年)(PXM2013\_014210\_00012)

作者简介: 葛 振(1989-)男, 汉族, 山东梁山人, 硕士, 主要从事固体废弃物资源化研究工作, E-mail: swatge@vip.qq.com

通信作者: 魏源送, E-mail: yswei@cees.ac.cn

气工程很少有足够的土地消纳沼液、沼渣,如果得不到合理充分的处置,其高含量的有机物、氮、磷和病原微生物进入环境,将会造成二次污染和资源浪费<sup>[7]</sup>。所以,我国沼气的可持续发展在很大程度上依赖于沼液、沼渣的合理处置<sup>[8]</sup>,沼液、沼渣的资源化利用对大中型沼气的可持续发展具有重要意义。目前国内外相继出现了多种沼液处置方式与技术,归纳起来包括低成本资源化利用、低成本的自然生态净化、高成本的工厂化处理和高附加值的开发性处理等四类<sup>[9]</sup>。对于沼渣,如未经处理并不适于直接土地利用<sup>[10]</sup>,因此,本文以沼渣为对象,通过文献调研,总结不同有机固体废弃物经厌氧消化处理后的沼渣理化特征,并对沼渣资源化的途径进行总结和分析,以期为我国沼渣的资源化利用提供参考。

## 1 沼渣特性

沼渣是指厌氧消化后残留在发酵罐底部的半固体物质<sup>[11]</sup>以及沼液脱水后形成的固形物质,主要由未分解的原料固形物、新产生的微生物菌体组成<sup>[12]</sup>。沼渣营养成分丰富,除含有大量的有机质和腐殖酸外,还含有丰富的N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O及微量元素<sup>[13]</sup>,是优质的有机肥。但由于我国沼气的原料来源广泛,城市有机固体废弃物、市政污泥、畜禽粪便及农作物秸秆等均可作为发酵原料,沼渣的性质也随原料的不同而不同,并可能存在重金属和病原菌等有毒有害物质。因此,在沼渣资源化利用之前,必须事先分析沼渣的成分<sup>[14]</sup>,因地制宜制定沼

渣资源化利用途径和使用条件,确保使用过程不会对生态环境造成不良影响。

### 1.1 原料特性

厌氧消化原料的特性是影响厌氧消化残留物安全利用的重要因素,根据其来源类型不同,可分为单一原料和混合原料。单一原料包括畜禽粪便、农作物秸秆、餐厨垃圾、污泥等,混合原料包括畜禽粪便/农作物秸秆、畜禽粪便/有机生活垃圾、有机生活垃圾/污泥等。不同原料所包含的有害物质也不同,对沼渣的特性影响也较大。表1列出了常见沼气工程原料的特性,从中可知,以畜禽粪便作为厌氧消化原料,因其含有一定浓度的抗生素,虽然厌氧发酵可以降解部分有害物质,但段然<sup>[15]</sup>对长期施用沼肥的土壤进行了安全性评价,发现土壤中抗生素类兽药检出率和含量比对照土壤明显上升,增加了安全隐患。农作物废弃物作为厌氧发酵原料时,可能含有痕量的除草剂和杀菌剂,Govasmark<sup>[16]</sup>在挪威三座沼气工程产生的厌氧消化残留物中发现了11种杀菌剂和1种杀虫剂,但欧洲食品标准局<sup>[17]</sup>(European Food Standards Agency, EFSA)认为沼渣中的杀虫剂浓度过低,不足以对农产品造成污染进而对人类健康构成威胁。此外,由于畜禽饲料中重金属过量添加导致粪便中重金属含量超标<sup>[18]</sup>、有机生活垃圾和污泥中含有一定量的重金属<sup>[19]</sup>,它们都易导致沼渣中重金属含量过高,限制其资源化利用。混合原料中的有毒有害物质从表1可以看出,它们基本由单一原料的有毒有害物质组成,其它理化性质差别不显著。

表1 常见沼气工程原料的特性

| 原料          | 主要有机物        | C/N比      | TS<br>% | VS/TS<br>% | 沼气产率<br>m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> VS | 有毒有害物质        | 参考文献     |
|-------------|--------------|-----------|---------|------------|---|---------------|----------|
| 畜禽粪便        | 碳水化合物、蛋白质、脂肪 | 3~20      | 3~30    | 70~80      | 0.23~0.6                                    | 抗生素、重金属、消毒剂   | [14]     |
| 秸秆          | 碳水化合物、脂肪     | 53~100    | 70~90   | 80~90      | 0.13~0.35                                   | 除草剂、杀菌剂       | [14, 20] |
| 草           | —            | 12~25     | 20~25   | 90         | 0.55  | 杀虫剂           | [14]     |
| 餐厨垃圾        | 碳水化合物、蛋白质、脂肪 | 10~25     | 15~20   | 80         | 0.32~0.8                                    | 消毒剂           | [14, 21] |
| 有机生活垃圾      | 碳水化合物、蛋白质、脂肪 | 15~23     | 24.8~30 | 79.1~84.9  | 0.23~0.74                                   | 重金属、有机污染物     | [22~23]  |
| 污泥          | 碳水化合物、蛋白质、脂肪 | 4.6~6     | 0.5~8   | 60~90      | 0.15~0.38                                   | 重金属、有机污染物     | [24~26]  |
| 有机生活垃圾/畜禽粪便 | 碳水化合物、蛋白质、脂肪 | 10~25     | 18~38   | 54~82      | 0.42~0.48                                   | 重金属、抗生素、有机污染物 | [27]     |
| 有机生活垃圾/污泥   | 碳水化合物、蛋白质、脂肪 | 11.2~15.1 | 20~40   | 40~94      | 0.4~0.6                                     | 重金属、有机污染物     | [28~30]  |

### 1.2 沼渣特性

一般认为<sup>[11][31]</sup>,沼渣大约含有30%~50%的

有机质,10%~20%的腐殖酸,0.8%~2%的全氮,0.4%~1.2%的全磷,0.6%~2%的全钾。由于沼

气工程中发酵原料不同,导致沼渣的理化特性有所差别(见表2)。

原料是影响沼渣理化特性的主要因素。沼渣的 pH 值基本呈中性至微碱性,较原料的 pH 值有所上升。沼渣含水率受厌氧消化工艺及沼液脱水方式不同而变化较大,但张昌爱<sup>[39]</sup>通过分析 4 种不同类型的沼渣沼液的养分后,发现沼渣中的有机质含量均在较小的范围内变化,在其资源化利用时基本可以忽略原料差异对有机质的影响。碳、氮是有机质中的主要元素,经过厌氧消化后,碳源主要转化为甲烷和二氧化碳,而氮源主要以氨氮的形式保存在厌氧消化残余物中<sup>[40]</sup>。大部分研究结果表明<sup>[42-43]</sup>,经过厌氧消化后,沼渣中的 C/N 比比原料下降许多,例如,Chaussod<sup>[41]</sup>在以猪粪为原料的厌氧消化过程中发现,C/N 比从初始的 17 降到了 10.5,但由于有机氮在厌氧消化过程中被降解,沼渣中的 C/N<sub>org</sub> 比

反而会上升<sup>[44]</sup>。沼渣中可溶性碳含量(Carbon soluble content, C<sub>sol</sub>)是反映其可生物降解性的重要指标,根据 Teglia<sup>[37]</sup>和 Kim<sup>[45]</sup>的研究结果,由于原料 TS 对厌氧消化的传质及水解过程影响较大,高 TS 厌氧消化产生的沼渣中 C<sub>sol</sub> 高于低 TS 的厌氧消化工艺沼渣,稳定性较差。此外,经过厌氧消化以后,沼渣中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/TN 比将会上升<sup>[46]</sup>,且 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量与厌氧消化原料的 TN 含量密切相关<sup>[47]</sup>,易降解的原料(如谷物类、家禽粪便以及猪粪)产生的沼渣一般具有高 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/TN 比和低 C/N 比的特征,而以牛粪和高纤维素含量的原料(氮含量较低)产生的沼渣 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/TN 比相对较低<sup>[48-50]</sup>。在沼渣土地利用过程中,高含氮量的沼渣会以氨气排放的方式迅速造成氮元素的损失<sup>[37]</sup>,同时,高浓度的无机氮化物也会对植物产生毒性<sup>[51]</sup>。

表 2 沼渣的理化特性

| 原料      | pH 值      | TS/%      | VS/%       | C/N       | 腐殖质/%     | TN                                 | TP                                | TK                               | 参考文献    |
|---------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------|
| 畜禽粪便    | 6.6~8     | 70.29     | 8.39~72.06 | —         | 15.3~29.4 | 0.462~<br>17.41 g·kg <sup>-1</sup> | 0.41~<br>31.02 g·kg <sup>-1</sup> | 1.2~<br>12.75 g·kg <sup>-1</sup> | [32-34] |
| 秸秆      | —         | —         | 49~62      | —         | 10~13     | 41.3 g·kg <sup>-1</sup>            | 21 g·kg <sup>-1</sup>             | 9 g·kg <sup>-1</sup>             | [35]    |
| 餐厨垃圾    | 5.63      | 27.52     | —          | 9.94      | —         | 3.21% DM                           | 0.908% DM                         | 0.309% DM                        | [36]    |
| 有机生活垃圾  | —         | 38.6~74.1 | 42.5~45.7  | 15.4~24.8 | —         | 1.3~1.4% DM                        | 0.2~0.9% DM                       | 0.6~1% DM                        | [37]    |
| 污泥      | —         | 18.9~20.9 | 56.7~59.9  | 6.2~8.6   | —         | 3.6~5.2% DM                        | 2.8~3.5% DM                       | 0.1~0.2% DM                      | [37]    |
| 畜禽粪便/秸秆 | 6.92~8.46 | —         | 65.9~83.3  | 10.4~19.7 | —         | 42.7 g·kg <sup>-1</sup>            | 8.25 g·kg <sup>-1</sup>           | 19.7 g·kg <sup>-1</sup>          | [38]    |

腐殖质能够改善土壤,提高肥力<sup>[52]</sup>,其含量是评价沼渣作为土壤改良剂和有机肥的重要参数。腐殖质主要以富里酸(Fulvic acids, FA)和胡敏酸(Humic acids, HA)为主,胡敏酸可改善土壤的缓冲能力和阳离子交换能力,而富里酸可与土壤中的重金属形成不同形态的可溶物<sup>[53]</sup>。Meissl<sup>[54]</sup>发现沼渣中腐殖酸含量较其原料高出 10% 左右,并认为厌氧消化过程能提供一个混合均匀的物料状态以及适宜的微生物环境,促进腐殖化过程。目前,一般采用 HA/FA 比值评价堆肥产品腐熟度及其腐殖化程度<sup>[55]</sup>,但还没有适合沼渣土地利用的最低腐殖质含量值。

若沼渣制作有机肥,需分析它的营养元素(氮、磷、钾)含量。氮元素在沼渣中主要以无机态和有机态方式存在<sup>[46]</sup>,Fouda<sup>[56]</sup>发现沼渣中的有机氮在土壤中矿化的同时会发生累积现象,例如,沼渣施用六个月后有机氮的矿化率仅为 12%<sup>[57]</sup>。实际生产

中因厌氧消化原料不同,导致沼渣中 C/N 比和 C<sub>org</sub>/N<sub>org</sub> 比的变化范围均较大,有机氮的累积现象并不适用于所有沼渣<sup>[42,56]</sup>。即使 C/N 比类似的沼渣,其化学组成不同,有机氮的矿化速率也不同<sup>[53]</sup>。由于厌氧消化残余物富含 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 K 元素, P 素含量相对较低<sup>[58-59]</sup>,且土壤中速效 K 含量较高, Furukawa<sup>[60]</sup>认为 N 素为沼肥的营养价值贡献最大。钟攀<sup>[58]</sup>调查了重庆地区的沼肥营养成分,发现沼渣的全量和有效养分平均含量均以 P 高于 N 和 K,与沼液的养分特点刚好相反。在自然界中,土壤里磷素含量很低,有效磷的浓度更低,有学者认为<sup>[61]</sup>,通过厌氧消化过程能够提高沼渣中有效磷的含量。大量的土地利用试验证明<sup>[62-64]</sup>,厌氧消化过程对改善有效磷的含量效果并不明显,反而有可能起到反作用<sup>[46]</sup>。磷的矿化作用主要与消化过程中的可溶性固体有关,并且沼液中 P, Ca, Mg 的含量在这过程之后均有所降低<sup>[65]</sup>。据统计<sup>[66]</sup>,磷元素在厌氧消化

后有微量损失 (<10%) ,但也有文献<sup>[59,67]</sup>指出 P 的流失率高达 25% 甚至到 36% ,该现象可能与厌氧反应器的固体停留时间有关。

### 1.3 微量元素与重金属

目前针对污泥在厌氧消化过程中微量元素迁移转化研究的较多 ,而关于沼渣中微量元素迁移转化的相关报道较少。Möller<sup>[46]</sup>认为 ,这也许和微量元素在沼渣资源化利用途径中会发生的复杂物理化学反应有关。以猪粪为原料 ,采用序批式厌氧反应器

进行处理 ,Masse<sup>[59]</sup>发现 ,大约有 8.7% 的 Ca , 21.0% 的 Mg ,18.4% 的 Zn 以及 41.5% 的 Cu 元素残留在厌氧反应器中 ,然而 K ,Na ,Mg 和 Fe 元素在反应器中没有明显的滞留。Marcato<sup>[67]</sup>在猪粪厌氧消化过程中也发现 ,厌氧反应器出料中 Ca ,Mg ,Mn 较原料中的元素分别损失了 44% ,32.5% ,32% 。产生这一现象的原因 ,可能与原料中金属离子的浓度、反应器中 pH 值和氧化还原电位的高低 ,以及液相中产生的沉淀、络合反应有关<sup>[68]</sup>。

表 3 不同地区不同沼渣中 Cu 和 Zn 的含量

| 原料/地区/标准          | 施用类型               | Cu                          | Zn                          | 参考文献     |
|-------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------|
|                   |                    | mg · kg <sup>-1</sup> ( DS) | mg · kg <sup>-1</sup> ( DS) |          |
| 猪粪沼渣              | —                  | 780                         | 2060                        | [70]     |
| 猪粪干沼渣             | —                  | 1016                        | 2628                        | [67 ,71] |
| 郑州天元生态农业示范园       | —                  | 32                          | 86.5                        | [72]     |
| 匈牙利东北部地区          | —                  | —                           | 2030                        | [73]     |
| 重庆地区              | —                  | 22.4 ~ 124.3                | 30.6 ~ 140.2                | [58]     |
| 内蒙古混合沼渣           | —                  | 38.94 ~ 319.66              | 152.4 ~ 471.68              | [18]     |
| 陕西杨凌混合沼渣          | —                  | 19.08 ~ 34.62               | 40.82 ~ 67.09               | [74]     |
| 畜禽粪便/农业有机废弃物      | —                  | 46 ~ 69.4                   | 169 ~ 250                   | [38]     |
| 农用污泥中污染物控制标准      | 酸性土壤 pH 值 < 6.5    | 250                         | 500                         | [75]     |
|                   | 中性和碱性土壤 pH 值 ≥ 6.5 | 500                         | 1000                        | [75]     |
| 城镇污水处理厂污泥处置农用泥质   | A 级污泥              | 500                         | 1500                        | [76]     |
|                   | B 级污泥              | 1500                        | 3000                        | [76]     |
| 城镇污水处理厂污泥处置园林绿化泥质 | 酸性土壤 pH 值 < 6.5    | 800                         | 2000                        | [77]     |
|                   | 中性和碱性土壤 pH 值 ≥ 6.5 | 1500                        | 4000                        | [77]     |

目前沼渣中重金属方面的研究主要以 Cu 和 Zn 为主 ,沼渣中 Cu 和 Zn 的含量分布见表 3。不同地区及原料产生的沼渣 ,重金属含量也有区别 ,但都基本满足《农用污泥中污染物控制标准 ( GB 4284-84) 》中的 B 级标准。以畜禽粪便为原料 ,其沼渣的重金属含量可能出现超标现象 ( GB 4284-84) 。这是在畜禽养殖过程中 ,饲料添加剂中的大部分 Cu 和 Zn 未被动物吸收利用而随粪便排出体外<sup>[69]</sup> ,成为沼渣的潜在污染源。沼渣中不同的重金属形态具有不同的生物有效性 ,陈苗<sup>[18]</sup>分析的 6 种沼渣中 ,79% ~ 99% 的 Cu 元素主要以有机物及硫化物结合态、残渣态形式存在 ,Zn 元素的几种形态均有明显分布。钟攀<sup>[58]</sup>调研的沼渣样本其重金属含量均未超过城镇生活垃圾农用控制标准 ( GB8172-87) 的限制 ,Hg ,Pb ,Cr 的含量远低于临界值。结合段然<sup>[15]</sup>对施用以畜禽粪便为原料的沼肥 4 ~ 7 年的土地利用试验得出 ,沼渣含有的重金属不会对其土地利用

造成不良影响。

## 2 沼渣资源化途径

目前关于厌氧消化残余物较为成熟的肥用模式主要有浇灌施用、叶面肥施用、沼液沼渣分离后将沼渣制成有机肥料施用<sup>[78]</sup>。本文主要讨论固液分离后的沼渣资源化利用方式 ,根据沼渣终端用户不同 ,对其处置要求方式也不同。过去我国主要以小型户用沼气池为主 ,在对厌氧残留物综合利用探索的过程中 ,形成了南方的“猪-沼-果”或“猪-沼-菜”、北方的“四位一体”、西北的“五配套”等生态模式<sup>[6]</sup> ,而对于大中型沼气工程来说 ,厌氧残余物的综合利用需进一步考虑其安全使用方式。因此 ,沼渣资源化途径大致可分为两类 ,分别为养殖业和土地利用 ,其中沼渣的养殖业利用因食品安全的考虑而愈来愈受到限制。

## 2.1 养殖业

近二十年,沼渣已在养殖业各个方面不同程度上得到应用,效果显著(见表4)。沼渣在养殖业上的利用主要是作为饲料或饲料添加剂,应用在水产和畜禽养殖等方面。由于饲料的不安全因素会通过食物链最终影响食品安全和人类健康,沼渣过量使用或因饲料添加剂的滥用,也可能带来一些负面的影响<sup>[79]</sup>,因此沼渣作为饲料原料其安全性显得尤为

重要。张浩<sup>[80]</sup>对牛粪和玉米秸秆做为厌氧消化原料生产的沼渣进行了重金属残留分析,认为沼渣具有一定的营养价值,部分重金属含量甚微,符合饲料原料的标准。考虑到不同地区、工艺、原料对沼渣营养成分影响较大,并基于食品安全性的考虑,沼渣作为饲料原料时应慎重,需检测重金属含量、病原微生物及其它有毒有害物质。

表4 沼渣在养殖业上的应用效果

| 利用途径 | 效果  | 参考文献         |
|------|---|--------------|
| 鱼饲料  | 鱼类增长迅速,肥效持久,部分可被底层杂食性鱼类直接食用,可替代或配合饲料使用,价格低廉。<br>沼肥养鱼较传统养鱼可以明显降低池塘水体溶解氧的消耗,提高浮游生物量,提高鱼苗的成活率。 | [81]<br>[82] |
| 猪饲料  | 日粮中添加沼渣降低了饲料成本,提高了经济效益。   | [83]         |
| 鸡饲料  | 产蛋龄提前,高峰期产蛋率提高10%;总产蛋率提高13%,产蛋量提高12%。   | [84]         |

## 2.2 土地利用

沼渣由于其营养成分较丰富,养分含量较为全面,被认为是一种优质高效的土壤改良剂和有机肥料。然而,未经处置的沼渣中可能存在植物毒性<sup>[10]</sup>、高粘度和刺激性气体<sup>[85]</sup>等特点,并且其施用操作复杂、成本较高<sup>[86]</sup>,这些因素都影响它的直接土地利用。因此,沼渣在施用于种植业之前,有必要通过相应的处理以提高其可适用性<sup>[87]</sup>,较为常见的处理方法为脱水 and 好氧堆肥。沼渣脱水后可有效提高运输距离,其缺点是N元素易以氨气挥发的形式流失<sup>[88]</sup>。据统计<sup>[46]</sup>,德国约有1%的农业沼气工程采用脱水方式处理产生的厌氧消化残留物。此外,脱水后的沼渣也可以采用烘干造粒的方式进行土地利用<sup>[89]</sup>,李占文<sup>[90]</sup>等考察了沼渣颗粒肥的营养元素组成、有效成分以及施用后对枣树生长发育和果实品质的影响,试验结果表明沼渣颗粒肥不仅能改良土壤,而且能够提高果实品质和产率。

采用好氧堆肥方式处理沼渣,可以弥补传统沼渣消纳方式的缺陷,提高有机肥品质<sup>[91]</sup>。关于沼渣堆肥方面的研究相对较多,主要争议部分在于堆肥过程中氮素流失问题上,方珊<sup>[92]</sup>在干式厌氧发酵残余物的堆肥过程中发现,NH<sub>3</sub>挥发量每天最大仅占原料总量的0.0014%,在整个堆肥过程中由NH<sub>3</sub>挥发导致的氮素损失并不多,而Möller<sup>[46]</sup>经过文献调研后认为,沼渣堆肥过程会造成大量的氮素流失,降低其营养价值,并从营养成分的角度考虑,堆肥方法并不完全适宜。

沼渣利用的其它方法主要如下:作为栽培基

质<sup>[93]</sup>和土壤改良剂、生产有机复合肥、作为固体燃料。张玮玮<sup>[36]</sup>等以餐厨垃圾为原料发酵后产生的沼渣作培养基生产Bt生物农药,其发酵性能优良并可降低生产成本;高袖<sup>[94]</sup>成功利用沼渣与有机辅料混合配制出高效保肥保水的营养土,用于花卉景观植物生长;作为土壤改良剂,杨春璐<sup>[95]</sup>等发现合理施用沼渣能提高土壤中钾素的有效性并减少土壤对新施入钾肥的固定量;生产有机复合肥<sup>[96-97]</sup>等,它们均能不同程度的提高沼渣作为厌氧消化副产品的经济价值。沼渣作为有机肥不仅能有效提高土壤酶活性<sup>[98]</sup>,对镉污染的土壤也具有一定解毒效果,它能有效改善铬在土壤中的形态分配,降低其有效性<sup>[99]</sup>。近年来,关于沼渣作为固体燃料的研究正处于起步阶段,Kratzeisen<sup>[100]</sup>对两种不同原料的脱水沼渣进行燃烧试验,发现其热值与木材相当,且产生的烟气能够达标排放,证明了沼渣作为燃料原料的可行性。

## 2.3 沼渣资源化过程中的潜在危害

国内过去对厌氧消化残留物开展的有益性研究较多,缺少危害性方面的系统研究与监测<sup>[35]</sup>,这方面的研究亟待加强。沼渣在使用过程中造成的危害主要集中在以下两个方面:1)沼渣的过量施用可能造成土壤污染,影响植物的正常生长;磷元素在土壤中的过度积累,增加了造成水体富营养化的可能性<sup>[101]</sup>。2)因为各种添加剂的使用,有可能造成沼渣中重金属、抗生素的累积,农田生态系统长期使用沼渣存在污染的隐患<sup>[79]</sup>。

## 2.4 经济分析

由于沼气工程一次性投资较大,仅依靠生产沼

气取得的经济效益不明显<sup>[11]</sup>,开发利用沼渣沼液有机肥,有利于促进沼气工程的可持续发展,环保和经济效益显著。由表5可知,开发利用厌氧消化残留物制作有机肥,能扩大沼气工程的盈利创收之路,大大缩减工程的投资回收期。林斌<sup>[103]</sup>通过对养殖场沼气工程项目进行敏感性分析中发现,沼气、沼渣等附加产品的利用率变化对沼气工程的净现值变动有较大影响;它们的综合利用程度可能是影响沼气工程投资决策的重要因素。同时,张国治<sup>[102]</sup>对大中型沼气工程沼渣沼液利用意愿调研中发现,沼渣有机肥的价格重要影响农户使用的积极性。因此在考

虑投资回报时,必须切合实际,不能单方面的期望能将沼渣沼液高价出售给附近农户以作为既能解决沼渣沼液的出路又可以回收部分投资的便捷方法<sup>[102]</sup>。此外,随着我国大中型沼气工程的发展建设,沼渣制取有机肥这一产业正逐步发展,农业部已颁布《沼气工程沼液沼渣后处理技术规范(NY/T 2374-2013)》,但仅适用于以畜禽粪便、农作物秸秆等农业有机废弃物为主要发酵原料的沼气工程,目前还没有相应的沼渣沼液有机肥技术标准,一定程度上制约了沼渣有机肥产业的发展。

表5 沼气工程回收期分析

| 投资规模<br>万元            | 沼气产量<br>m <sup>3</sup> ·万元 <sup>-1</sup> | 运行成本<br>万元·年 <sup>-1</sup> | 沼气单价<br>元·m <sup>-3</sup> | 沼气年收入<br>万元 | 设计运行期<br>年 | 生产沼液<br>t | 生产沼渣<br>t | 有机肥利润<br>元·t <sup>-1</sup> | 有机肥年利润<br>万元 | 投资回收期<br>年 |
|-----------------------|--|----------------------------|---------------------------|-------------|------------|-----------|-----------|----------------------------|--------------|------------|
| 200 <sup>[11]</sup>   | 7  | 3                          | 1                         | 7           | 50         | 10000     | 1000      | 30                         | 33           | 5.4        |
| 260 <sup>[7]</sup>    | 20                                       | 15                         | 1                         | 20.02       | 49         | 2520      | 1080      | 100                        | 36           | 7          |
| 61.7 <sup>[103]</sup> | 7.3                                      | 7.27                       | 1.2                       | 8.76        | 20         | -         | 809.4     | 65                         | 5.3          | 2.8        |

### 3 结语

沼渣作为厌氧消化后的副产物,具有营养成分丰富,养分全面等优点,它是一种优良的土壤改良剂和有机肥料。沼渣的资源化处置,其带来的环境效益与经济效益明显,有益于沼气工程的可持续发展。由于沼气的处理工艺及消化原料的不同,产生沼渣理化性质有所差异,总体上,沼渣中含有的重金属浓度基本符合我国城镇垃圾农用标准。

经过文献调研,作者认为关于沼渣资源化利用还存在以下不足:1)在大中型沼气工程中,缺乏针对不同类型沼渣的快速有效的处理方法,不同地域沼渣处理产品梯度化利用有待提高;2)缺少沼渣资源化技术的标准规范;3)未广泛得到沼渣资源化产品终端使用者的认可。因此,今后的研究工作应侧重于:1)因地制宜,明确不同类型沼渣的资源化方法;2)进一步深化沼渣制肥过程中营养元素迁移转化的研究;3)明确沼渣中有毒有害物质的分布特征及不良影响,探究其去除技术;4)制定沼渣综合利用技术标准规范,加强沼渣资源化利用方面的推广力度。

### 参考文献:

[1] 国家统计局环境保护部. 中国环境统计年鉴 2012

[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.

- [2] 孙振钧, 孙永明. 我国农业废弃物资源化与农村生物质能源利用的现状与发展[J]. 中国农业科技导报, 2006, (01): 6-13.
- [3] 赵立欣, 董保成, 田宜水. 大中型沼气工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [4] 李景明, 薛梅. 中国沼气产业发展的回顾与展望[J]. 可再生能源, 2010, 28(3): 1-5.
- [5] 国务院办公厅. “十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划[BL/OL]. (2012-05-04). Available at [http://www.gov.cn/zwgk/2012-05/04/content\\_2129670.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2012-05/04/content_2129670.htm).
- [6] 国务院办公厅. “十二五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划[BL/OL]. (2012-05-04). Available at [http://www.gov.cn/zwgk/2012-05/04/content\\_2129302.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2012-05/04/content_2129302.htm).
- [7] 姜文腾, 林聪. 大中型沼气工程厌氧残留物综合利用探究[J]. 猪业科学, 2008, 25(4): 84-87.
- [8] 谢晶, 陈理, 庞昌乐, 等. 山东省沼气工程发展调研报告[J]. 中国沼气, 2012, 30(4): 41-47.
- [9] Teglia, Tremier, Martel. Characterization of Solid Digestates: Part 1, Review of Existing Indicators to Assess Solid Digestates Agricultural Use[J]. Waste and Biomass Valorization, 2011, 2(1): 43-58.
- [10] 陈玉成, 杨志敏, 陈庆华, 等. 大中型沼气工程厌氧发酵液的后处置技术[J]. 中国沼气, 2010, (01): 14-20.

- [11] Poggi-Varaldo, Trejo-Espino, Fernández-Villagómez, et al. Quality of anaerobic compost from paper mill and municipal solid wastes for soil amendment [J]. *Water Science and Technology*, 1999, 40(11-12): 179-186.
- [12] 杨北桥. 宁夏沼渣沼液有机肥开发应用前景 [J]. *宁夏农林科技*, 2012, 53(6): 66-68.
- [13] 林剑锋. 沼气发酵产物的利用技术 [J]. *可再生能源*, 2003, (4): 36-38.
- [14] 王远远, 沈飞, 刘荣厚, 等. 施用沼气发酵残余物对土壤理化性质的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(6): 2389-2390.
- [15] 宋灿辉. 厌氧消化残余物处置研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [16] 段然. 沼肥肥力和施用后潜在污染风险研究与土壤安全性评价 [D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [17] Govasmark, Ståb, Holen, et al. Chemical and microbiological hazards associated with recycling of anaerobic digested residue intended for agricultural use [J]. *Waste Management*, 2011, 31(12): 2577-2583.
- [18] European Food Standards Agency. Conclusions regarding the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance fludioxylin [BL/OL]. (2007-12-13). Available at <http://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/110r.pdf>.
- [19] 陈苗, 白帆, 崔岩山. 几种沼渣中 Cu 和 Zn 的含量及其形态分布 [J]. *环境化学*, 2012(02): 175-181.
- [20] 陈同斌, 黄启飞, 高定, 等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势 [J]. *环境科学学报*, 2003, 23(5): 561-569.
- [21] 梁晓辉, 华栋梁, 许海朋, 等. 秸秆产沼气研究进展 [G]//中国农业工程学会. 全国农村清洁能源与低碳技术学术研讨会论文集. 郑州: 中国农业工程学会, 2011.
- [22] 刘晓英. 餐厨垃圾特性及厌氧消化产沼性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- [23] 蒋建国, 吴时雯, 隋继超, 等. 易腐有机垃圾单级高固体厌氧消化实验研究 [J]. *环境科学*, 2008, 29(4): 1104-1110.
- [24] 王劲然. 青岛市有机生活垃圾高温厌氧消化试验研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
- [25] 戴前进, 李艺, 方先金. 城市污水处理厂剩余污泥厌氧消化试验研究 [J]. *中国给水排水*, 2006, (23): 95-98.
- [26] 周利. 北京市城市污水处理厂污泥特征与热值研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [27] 李来庆, 李秀金, 郑明霞, 等. 不同城市不同类型污泥厌氧消化产气性能比较 [J]. *北京化工大学学报 (自然科学版)*, 2007, (S2): 16-19.
- [28] 杨广忠. 城市生物垃圾与畜禽粪便中温联合厌氧消化研究 [D]. 沈阳航空工业学院, 2010.
- [29] 李磊. 污水厂污泥与厨余垃圾厌氧/混合厌氧消化研究进展 [J]. *四川环境*, 2011, (02): 93-96.
- [30] 高瑞丽, 严群, 阮文权. 添加厨余垃圾对剩余污泥厌氧消化产沼过程的影响 [J]. *生物加工过程*, 2008, (05): 31-35.
- [31] 廖燕. 市政污泥与餐厨垃圾混合共厌氧消化性能研究 [D]. 广西大学, 2012.
- [32] 郭肖颖, 朱丽君, 李布青. 沼渣肥的特性与应用效果研究 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(27): 14986-14988.
- [33] 郝元元, 刘荣厚. 大中型沼气工程工艺流程·发酵原料及其产物测试分析 [J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(14): 3429-3431.
- [34] 武丽娟, 刘荣厚, 王远远. 沼气发酵原料及产物特性的分析——以四位一体北方能源生态模式为例 [J]. *农机化研究*, 2007, (7): 183-187.
- [35] 史玉红, 刘宏新. 沼气工程残余物资源化利用研究 [J]. *农机化研究*, 2012, 34(2): 211-215.
- [36] 张红涛. 沼气发酵残余物主要养分含量分析及发酵过程的监测 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2007.
- [37] 张玮玮, 弓爱君, 邱丽娜, 等. 以沼渣为原料固态发酵生产 Bt 生物农药 [J]. *农业工程学报*, 2013, (08): 212-217.
- [38] Teglia, Tremier, Martel. Characterization of Solid Digestates: Part 2, Assessment of the Quality and Suitability for Composting of Six Digested Products [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2011, 2(2): 113-126.
- [39] Bustamante, Albuquerque, Restrepo, et al. Co-composting of the solid fraction of anaerobic digestates, to obtain added-value materials for use in agriculture [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 43(0): 26-35.
- [40] 张昌爱, 王艳芹, 袁长波, 等. 不同原料沼气池沼渣沼液中养分含量的差异分析 [J]. *现代农业科学*, 2009, (01): 44-46.
- [41] 任南琪, 王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [42] Chaussod, Catroux, Juste. Effects of anaerobic digestion of organic wastes on carbon and nitrogen mineralization rates: Laboratory and field experiments [J]. 1986.
- [43] Möller, Stinner, Deuker, et al. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on nitrogen cycle and crop yield in mixed organic dairy farming sys-

- tems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 82 (3): 209–232.
- [44] Arthurson. Closing the Global Energy and Nutrient Cycles through Application of Biogas Residue to Agricultural Land-Potential Benefits and Drawback [J]. *Energies*, 2009, 2(2): 226–242.
- [45] Kirchmann Witter. Composition of fresh, aerobic and anaerobic farm animal dungs [J]. *Bioresource Technology*, 1992, 40(2): 137–142.
- [46] Kim, Ahn Speece. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic [J]. *Water Research*, 2002, 36(17): 4369–4385.
- [47] Möller, Müller. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review [J]. *Engineering in Life Sciences*, 2012, 12(3): 242–257.
- [48] Webb, Hawkes. Laboratory scale anaerobic digestion of poultry litter: Gas yield – loading rate relationships [J]. *Agricultural Wastes*, 1985, 13(1): 31–49.
- [49] Möller, Schulz, Müller. Substrate inputs, nutrient flows and nitrogen loss of two centralized biogas plants in southern Germany [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 87(2): 307–325.
- [50] de Boer. Co-digestion of animal slurry can increase short-term nitrogen recovery by crops [J]. *Journal of environmental quality*, 2008, 37(5): 1968–1973.
- [51] Emmerling, Barton. Anaerobic co-digestion of topinambour (*Helianthus tuberosus* L.) and properties of the remaining biogas manure [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2007, 53(6): 683–690.
- [52] Kapanen, Itävaara. Ecotoxicity Tests for Compost Applications [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001, 49(1): 1–16.
- [53] Campitelli, Ceppi. Effects of composting technologies on the chemical and physicochemical properties of humic acids [J]. *Geoderma*, 2008, 144(1–2): 325–333.
- [54] Diacono, Montemurro. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(2): 401–422.
- [55] K E. High quality composts by means of cocomposting of residues from anaerobic digestion [M]. Emmaus, PA, ETATS – UNIS: JG Press, 2007.
- [56] Tuomela, Vikman, Hatakka, et al. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 72(2): 169–183.
- [57] Fouda. Nitrogen availability of biogas residues [D]. München: Technische Universität München, 2011.
- [58] Gunnarsson, Bengtsson, Caspersen. Use efficiency of nitrogen from biodigested plant material by ryegrass [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(1): 113–119.
- [59] 钟攀, 李泽碧, 李清荣, 等. 重庆沼气肥养分物质和重金属状况研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(s1): 165–173.
- [60] Massé, Croteau, Masse. The fate of crop nutrients during digestion of swine manure in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(15): 2819–2823.
- [61] Furukawa, Hasegawa. Response of Spinach and Komatsuna to Biogas Effluent Made from Source – Separated Kitchen Garbage [J]. *J Environ Qual*, 2006, 35(5): 1939–1947.
- [62] Massé, Talbot, Gilbert. On farm biogas production: A method to reduce GHG emissions and develop more sustainable livestock operations [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 166–167(0): 436–445.
- [63] Bachmann, Wentzel, Eichler – Löbermann. Codigested dairy slurry as a phosphorus and nitrogen source for *Zea mays* L. and *Amaranthus cruentus* L [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174(6): 908–915.
- [64] Möller, Stinner. Effects of organic wastes digestion for biogas production on mineral nutrient availability of biogas effluents [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 87(3): 395–413.
- [65] Loria, Sawyer. Extractable Soil Phosphorus and Inorganic Nitrogen following Application of Raw and Anaerobically Digested Swine Manure [J]. *Agron J*, 2005, 97(3): 879–885.
- [66] Field, Caldwell, Jeyanayagam, et al. Fertilizer recovery from anaerobic digesters [J]. *Transactions of the Asae*, 1984, 27(6): 1871–&.
- [67] Schievano, D’Imporzano, Salati, et al. On-field study of anaerobic digestion full-scale plants (Part I): An on-field methodology to determine mass, carbon and nutrients balance [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(17): 7737–7744.
- [68] Marcato, Pinelli, Pouech, et al. Particle size and metal distributions in anaerobically digested pig slurry [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(7): 2340–2348.
- [69] Callander, Barford. Precipitation, chelation, and the availability of metals as nutrients in anaerobic digestion. I. Methodology [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1983, 25(8): 1947–1957.



- [70] 陈杖榴,杨桂香,孙永学,等. 兽药和饲料添加剂残留的毒性与生态毒理研究进展[J]. 广东饲料,2001,(1): 24-26.
- [71] Ramírez, Domene, Ortiz, et al. Toxic effects of digested, composted and thermally-dried sewage sludge on three plants[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(15): 7168-7175.
- [72] Marcato, Pinelli, Cecchi, et al. Bioavailability of Cu and Zn in raw and anaerobically digested pig slurry[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(5): 1538-1544.
- [73] 高红莉. 施用沼肥对青菜产量品质及土壤质量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(s1): 43-47.
- [74] Makúdi, Tomócsik, Orosz, et al. Effect of a biogas-digestate and bentonite on some enzyme activities of the amended soils[J]. *Cereal Research Communications*, 2007, 35(2): 741-744.
- [75] 张振华. 几种主要农业废弃物厌氧发酵条件优化与其残余物农用研究[D]. 西北农林科技大学, 2010.
- [76] GB 4284-84. 农用污泥中污染物控制标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1984.
- [77] CJ/T 309-2009. 城镇污水处理厂污泥处置农用泥质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [78] GB/T 23486-2009. 城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [79] 郜玉环, 张昌爱, 董建军. 沼渣沼液的肥用研究进展[J]. 山东农业科学, 2011(6): 71-75.
- [80] 徐远东, 范彦, 何玮. 沼液沼渣在养殖业的综合利用[J]. 畜禽业, 2011(08): 14-16.
- [84] 张浩, 雷赵民, 窦学诚, 等. 沼渣营养价值及沼渣源饲料和其生产的猪肉重金属残留分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1298-1301.
- [82] 欧少伟. 沼渣养鱼技术初探[J]. 渔业致富指南, 2003, (17): 27.
- [83] 郑敏. 沼肥养鱼实用技术研究[J]. 江西水产科技, 2002, (02): 32-33.
- [84] 雷赵民, 窦学诚, 张浩, 等. 饲料中添加沼渣对猪的肥育效果及经济效益评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2008, (04): 51-54.
- [85] 李良德, 白斌. 蛋鸡日粮中添加沼液的效果[J]. 家禽科学, 2011, (01): 45-46.
- [86] Smet, Van Langenhove, De Bo. The emission of volatile compounds during the aerobic and the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(8): 1295-1303.
- [87] AL Seadi, Lukehurst. Quality management of digestate from biogas plants used as fertiliser[J]. 2012.
- [88] Abdullahi, Akunna, White, et al. Investigating the effects of anaerobic and aerobic post-treatment on quality and stability of organic fraction of municipal solid waste as soil amendment[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(18): 8631-8636.
- [89] Maurer, Muller. Drying characteristics and nitrogen loss of biogas digestate during drying process [G]//Quebec City: Canadian Society for Bioengineering 2010.
- [90] 刘建伟, 夏晓华, 刘宾, 等. 城市固体废物综合处理技术与工程实践探讨[J]. 环境卫生工程, 2011, 19(6): 19-21.
- [91] 李占文, 刘建安, 李攀, 等. 沼渣有机肥在灵武长枣生产中的应用研究[J]. 宁夏农林科技, 2012, (11): 74-75 84.
- [92] 宋彩红, 夏训峰, 席北斗, 等. 响应曲面法优化沼渣混合物料堆肥配比研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(8): 1474-1479.
- [93] 方珊. 厌氧干发酵后残余物堆肥过程研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [94] 赵丽, 周林爱, 邱江平. 沼渣基质理化性质及对无公害蔬菜营养成分的影响[J]. 浙江农业科学, 2005, (2): 103-107.
- [95] 高袖. 沼气发酵残余物制备高效复合营养土研究[D]. 昆明理工大学, 2012.
- [96] 杨春璐, 梁成华, 孙铁珩, 等. 合理施用沼渣对土壤钾素有效性影响[J]. 生态科学, 2004, (03): 240-243.
- [97] 李庆晨, 王良成, 郝建民, 等. 用沼渣生产腐殖酸型有机复合肥技术及前景[J]. 河北化工, 2012, 35(7): 67-69.
- [98] 于红艳. 城市生活垃圾厌氧发酵沼渣制复混肥研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
- [99] 谷军, 沙长青, 张晓彦. 沼渣对土壤酶活性的影响[J]. 生物技术, 2008, 18(5): 81-85.
- [100] 王小玲. 厌氧发酵残余物对铬污染土壤的解毒效果研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [101] Kratzeisen, Starcevic, Martinov, et al. Applicability of biogas digestate as solid fuel[J]. *Fuel*, 2010, 89(9): 2544-2548.
- [102] 袁大刚, 蒲光兰. "三沼"在植物生产上的应用研究进展与展望[J]. 四川农业大学学报, 2009, 27(2): 258-267.
- [103] 张国治, 吴少斌, 王焕玲, 等. 大中型沼气工程沼渣沼液利用意愿现状调研及问题分析[J]. 中国沼气, 2010, 28(1): 21-24.
- [104] 林斌. 规模化养猪场沼气工程发展的影响因素研究——以福建为案例[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.