

植物工厂生物质废弃物厌氧消化循环利用可行性探讨

徐得天¹, 石惠娴^{1*}, 裴晓梅², 孟祥真¹, 朱洪光¹

(1. 同济大学新农村发展研究院, 同济大学国家设施农业工程技术研究中心, 上海 200092; 2. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092)

摘要 针对植物工厂生物质废弃物的特点, 在总结已有文献的基础上, 参考传统预处理和厌氧发酵系统常用工艺, 制订了植物工厂废弃物厌氧消化循环利用系统, 创造性地将单乙醇胺法脱硫用于沼气脱硫上, 对系统进行了完善。从该系统主要组成部分包括预处理系统、厌氧消化系统、沼气净化系统、沼气、沼液和沼渣(三沼)利用等方面, 从植物工厂生物质废弃物厌氧消化循环利用的角度, 对其进行了可行性分析。结果表明: 植物工厂生物质废弃物厌氧消化循环利用三沼可行, 但受植物工厂规模的限制, 不同规模的植物工厂生物质厌氧消化沼气产量不同, 小型植物工厂废弃物厌氧发酵后沼气不适合用于供热、发电, 仅适合小规模使用(如沼气灯、沼气灶等), 大型植物工厂废弃物厌氧发酵产生的沼气可以用于供热和发电。

关键词 厌氧消化; 沼气; 脱硫; 沼液; 沼渣; 循环利用

中图分类号 S210.3; S216.4; S141.9 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)34-0093-05

Feasibility Assessment of the Anaerobic Digestion and Cyclic Utilization System of Biomass Wastes in Plant Factory

XU De-tian¹, SHI Hui-xian^{1*}, PEI Xiao-mei² et al (1. Modern Agriculture Science and Engineering College of Tongji University, Shanghai. 200092; 2. College of Architecture and Urban Planning of Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract According to the characteristics of biomass wastes in plant factory and on the basis of conventional pretreatment and anaerobic fermentation technology, a cyclic utilization system aiming to dispose bio-waste and replace the chemical fertilizer was designed. In this system, the mono ethanol amine desulfurization was used for purifying biogas, gradually perfecting the system's function. The system includes five component: Raw material screening, crushing, pretreatment system; anaerobic digestion system; Biogas purification system and biogas slurry as fertilizer to plant factory application technology. The feasibility of the system is analyzed and calculated from the point of view of recycling. Results shows that the cyclic utilization system of biogas wastes is practicable. Nevertheless, it was limited by the scale of plant factory. Depending on the size of the plant factory, anaerobic digestion biogas yield is different, bio-wastes in small plant factory product a little methane, it is not suitable for heating or power generation, only for small scale use such as gas lights, gas stoves and so forth, large scale plant factory produced biogas can be used for heating and power generation.

Key words Anaerobic digestion; Biogas slurry; Cyclic utilization

植物工厂系统是未来生产植物的必然趋势, 目前, 日本和我国的植物工厂已培育出高利润的幼苗、香草、水果和蔬菜^[1]。植物工厂废弃物是指植物工厂中植物自然凋落或人工修剪所产生的残体, 包括枯枝败叶、树枝修剪物、杂草、种子、残花、腐烂果实、根系, 废弃的培养基等, 同时也包括园林类废弃物(Garden Waste, GW)和果蔬类废弃物(Fruit and Vegetable Waste, FVW)^[2-3]。与其他种类垃圾相比, 植物工厂植物废弃物具有高含碳量、高含水量(>80%)、高挥发性固体含量(>95%)、高生物降解性、较高的C/N、高营养成分和基本无重金属类毒害性的特性^[4-5]。目前, 处理这类废弃物的主要方法有焚烧、掩埋及好氧堆肥和厌氧消化等^[6]。如果按照传统掩埋、焚烧等处理方式, 必将浪费大量土地资源和有机物资源。厌氧消化可产生沼气, 同时由其发酵液制取的沼肥可作为化肥或者水培的营养液进行二次循环利用, 采用这种方法可以实现植物工厂的废弃物零排放, 真正做到植物-微生物环境间的和谐共处生态环境, 使植物工厂完成生态圈内的能量循环和物质循环, 同时也不会因为排出的废液而影响植物工厂外的环境, 造成污染。此外, 可以避免沼液沼渣包装、运输等带来的成本增加问题。因此, 厌氧消化处理植物工厂废弃物是合理的选择^[7-8]。目前, 国内外对植物

工厂废弃物厌氧消化循环利用系统的应用与研究较少。笔者设计了植物工厂废弃物循环利用系统, 提出沼液、沼渣应用于植物工厂的观点, 并分析了循环利用的可行性及应用前景, 以期对生物废弃物科学应用提供借鉴。

1 植物工厂废弃物厌氧消化循环利用系统的组成部分

1.1 系统流程 植物工厂生物质废弃物厌氧消化循环利用系统流程见图1。植物工厂废弃物厌氧消化循环利用系统通过厌氧消化处理植物工厂生物质废弃物, 产生的沼渣、沼液制成的肥料返回植物工厂供施有机肥用, 实现废弃物的循环利用, 减少植物工厂生产对传统矿物质化肥的需求。该系统主要由几个部分组成: ①预处理系统; ②厌氧消化系统; ③沼气净化系统; ④沼气利用系统; ⑤沼液、沼渣利用系统。

1.2 组成部分

1.2.1 预处理系统。植物工厂的生产具有分类化、规模化的特征, 其废弃物的产生也较为集中, 更易于分类收集。在实施收集前, 首先对植物工厂内植物生长周期进行估测, 计算出原材料的产量和收集时间, 充分考虑收集的季节性。植物叶子通常可以从10月中旬开始收集, 持续到12月, 次年春天再次收集, 树枝一般在春天和秋天收集, 残败蔬菜瓜果可以在成熟季收集; 由于较大段的树枝不易降解, 因此理想的收集方式是将粉碎之前的树枝和草、叶子、果实分类收集^[9]; 其次, 建立合理的收集站, 可从土地取得的可行性, 成本核算的有效性, 环境影响的最小化及收集半径服务于植物工厂的便捷性等方面确定收集站的位置与处理量^[10]。虽然收集站建立初期成本较高, 但相比运输至政府建立的废弃物

基金项目 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA103006-02)。

作者简介 徐得天(1991-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 研究方向: 温室供热及生物质能源应用。*通讯作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事可再生能源应用与农业设施领域理论和实践研究。

收稿日期 2016-10-12

处理站节约了运输费用,并且建立收集站更有利于保证厌氧发酵中持续进料。在收集过程中应注意防止废弃物被重金属、油污等污染,且避免混入土、石块、铁丝、铁钉、花盆等园

艺装饰用材料和塑料等不可循环降解的材料。此外,如果废弃物已受到病菌和虫卵的危害,应该与其他废弃物分开收集^[11]。

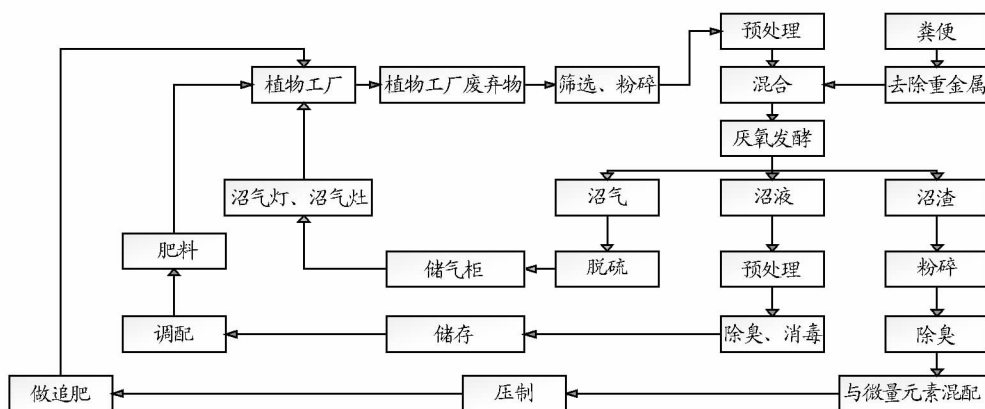


图1 植物工厂废弃物厌氧消化循环利用系统流程

Fig.1 Recycling system flow chart in Plant Factory

由于反应物颗粒大小会明显影响厌氧消化速度和稳定性,因此要将废弃物粉碎,以限制颗粒大小。黄彩娣等^[12]研究发现,对于废弃物颗粒需要进行2次粉碎,第1次粉碎之后,物料粒径一般为5 cm以下。如果此时发酵,会出现发酵不透彻,表面腐熟而内芯木质部一些纤维素尚未完全分解的情况,发酵不完全的“夹生”基质使用在土壤内会进行第2次发酵,造成“烧苗”。因此,第1次粉碎后,可将物料堆放几天,蒸发一部分水分再进行第2次粉碎,粉碎效率可提高30%左右,控制粒径在5 mm以下,可增加表面积,加快反应速度,使废弃物充分发酵。

为使厌氧消化反应更快进行并得到更高的 CH_4 产气率,Rodrigue等^[13]总结了目前主要的厌氧发酵预处理技术,包括超声波法、微波法、热处理水、热处理、化学法、生物法等。在化学法预处理中,Hassana等^[14]研究发现,用质量分数45%的 H_2O_2 试剂处理玉米秸秆会提升66.27%的 CH_4 产气率,降低近45.00%的木质素含量,并把预处理时间从几天提升至1 h左右,且成本低廉。在生物法中,很多学者发现,堆肥预处理对厌氧发酵产沼气量有一定影响。陈广银等^[15]研究发现,堆肥预处理产生的高温对破坏秸秆内半纤维素等结构及提高厌氧生物转化性能有较大影响,当秸秆堆体温度升至55℃时应停止堆肥,此时产气量最大,应进行厌氧发酵产沼气。丁方文等^[16]对园林废弃物、污泥、生物质碎末混合接种,用堆肥预处理的方法使厌氧消化作用得到增强,试验证明,将堆肥预处理时间控制在4~5 d能得到最佳产气效果,产气质量得到明显提升。因此,植物工厂废弃物厌氧消化循环利用应考虑收集时间、收集分类、收集地点等。从植物工厂生物质废弃物厌氧消化循环利用的角度,主要收集植物工厂残败蔬菜茎叶及瓜果作为厌氧消化的原料。之后进行人工筛选,剔除塑料、金属等物质,再送入粉碎机进行粉碎,粒径控制在5 mm以下,置于预处理反应器中,有条件再加入少量 H_2O_2 ,进行好氧堆肥预处理。该过程需控制反应时间、温度、pH等参数,将预处理后的污泥混合物运输至厌氧发酵罐

中进行下一步发酵。

1.2.2 厌氧消化系统。厌氧消化产 CH_4 过程是一个复杂的生物转化过程,生物质降解和转化过程可以分为4个阶段,即水解阶段(Hydrolysis)、酸化阶段(Acidogenesis)、产乙酸阶段(Acetogenesis)和 CH_4 转化阶段(Methanogenesis)^[17]。沼气发酵过程实际上是由不同微生物进行的一系列生物化学的偶联反应。 CH_4 的产量及产生速率是由产气工艺、原料、原料粒度、pH、温度、发酵时间、菌类等诸多因子共同作用的结果。为了优化厌氧发酵反应,需合理设计控制参数。

1.2.2.1 保证适宜发酵反应温度。Maria等^[18]在研究淤泥与果蔬废弃物联合发酵过程中发现,35℃下增大有机负荷率(OLR)可增加产气量(由1.46 kgVS/ m^3 增大到2.8 kgVS/ m^3),并可减少水力停留时间(14 d降至10 d)。刘荣厚等^[19]研究发现,对于废弃的甘蓝叶,中温条件[(35±1)℃]挥发酸质量浓度、氨态氮质量浓度以及pH均在正常范围内,且优于高温、低温组,符合蔬菜废弃物厌氧发酵的特性,可保证系统顺利运行。

1.2.2.2 选择合理进料方式。Mges等^[20]在使用CSTR反应器研究甜菜、黑小麦和玉米的厌氧消化特性中发现,连续式搅拌釜比批量式搅拌釜运行更稳定,能产生更多 CH_4 。这3种农作物以甜菜的厌氧发酵最稳定,水力停留40 d时产气率最大,增加水力停留时间不会提高 CH_4 产量。如果甜菜中加入黑小麦则会降低反应效果。因此,连续式进料可促进产气均匀,更适合植物工厂废弃物这种大中型厌氧发酵沼气工程。

1.2.2.3 控制反应物配比及浓度。蔬菜废弃物的含酸量高且含氮量不足,其自然酸化速度很快,产气后容易造成有机酸积累,因此蔬菜废弃物作为单一基质不适于厌氧消化^[4-6],必须掺入粪便等进行联合厌氧消化反应。

联合厌氧发酵工艺能有效地促进营养平衡,协调微生物之间的反应,增加可生物降解有机物的负载和提供更高的沼气产率。Bouallagui等^[21]使用ASBR反应器,探究果蔬类废

弃物中加入鱼类废弃物、屠宰场废弃物和活性污泥进行联合厌氧发酵反应,结果表明,加入屠宰场废弃物和污泥与果蔬类废弃物联合发酵能提高产气效率,加入鱼类废弃物却难以改善果蔬类废弃物的厌氧消化产气效率,该试验同时表明,C/N 是产 CH₄ 反应和有机物降解反应中的决定性参数。为调整反应物中的 C/N,刘荣厚等^[22]以甘蓝菜叶为发酵原料进行试验研究,结果表明,接种物浓度对于蔬菜废弃物的厌氧发酵有大影响,在 20%、30%、50% 3 个水平的接种物中,接种物浓度为 30% 试验组的挥发酸含量、铵态氮含量及 pH 均在正常范围内,总产气量和沼气中最高 CH₄ 含量分别为 7 790.81 mL 和 42.814%,明显高于其他 2 组及空白试验。同时,单纯用蔬菜废弃物进行厌氧消化,其产气量和沼气中 CH₄ 含量小于以猪粪为原料产生的 CH₄,因此可考虑猪粪-蔬菜废弃物联合发酵,以得到更高的产气量。Wang 等^[23]在研究小、中规模厨房废弃物和果蔬类废弃物联合厌氧发酵中发现,两相发酵比单相发酵有更高的有机负荷率[5.0 g·VS/(L·d)],同时证明了两相发酵更有优势。李科^[24]对玉米芯、水果皮、叶草等不同种类、不同浓度的果蔬类废气物分别进行厌氧消化试验,结果表明,不同植物工厂废弃物的最适宜反应浓度不同,具体应视其种类而定。如玉米芯类的产气总量和产气速率明显优于水果皮类与叶草。因此,对于植物工厂生物质废弃物厌氧消化反应,需要对不同种类生物质废弃物分别进行试验研究与联合发酵研究,寻求原料的最佳配比与最适宜浓度。

1.2.2.4 控制 pH。厌氧消化反应的微生物活性与 pH 关系密切,同时 pH 变化会引起厌氧消化反应吉布斯自由能的变化^[25],因此 pH 应控制在 6.21~7.21^[26-28]。一般由于产乙酸阶段生成的酸导致 pH 低于正常范围,工业上常用 NaOH、Ca(OH)₂ 等增大 pH^[29]。总之,如果想使 CH₄ 产气率最大化,同时尽量减少 H₂S 的生成,需要做到以下几点:①进料恒定;②多种废弃物联合厌氧发酵时,原料配比均衡,如有条件,把每种废弃物分装储存,发酵时按一定比例投入^[30]。

厌氧消化系统采用植物工厂废弃物与猪粪按照 1:1 混合联合厌氧消化,中温(35℃)发酵,采用连续式搅拌釜进料,pH 控制在 6.21~7.21。发酵后将沼液及沼渣输送至固液分离装置分别利用。

1.2.2.5 沼气产量预测。为确定沼气净化系统的脱硫方式、负荷、脱硫剂的用量,选择沼气的使用方式,需估算沼液产量和沼气产量。其中,沼气产量可用下式计算:

$$G_i = M \times \eta_p \times \eta_g \times \eta_d$$

式中, G_i 为总产气量, m³; M 为种植的蔬菜、瓜果年产量, t/a; η_p 为蔬菜的平均产废系数; η_g 为综合产气率, m³/kg TS; η_d 为干物质含量。据文献^[31],蔬菜中的叶菜类、瓜果类、根茎类的产废系数分别是 9.70%、4.70%、3.80%,则

$$\eta_p = \frac{9.70\% + 4.70\% + 3.80\%}{3} = 6.07\%$$

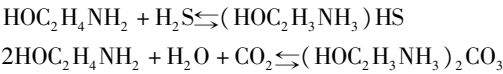
猪粪与果蔬类废弃物厌氧消化的 η_g 为 0.3~0.4 m³/(kgTS),取 0.35 m³/(kgTS)。由于笔者将植物工厂生物

质废弃物和猪粪进行 1:1 混合,因此干物质含量取均值。干物质按均值按照 18.29% 计算^[32],猪粪的干物质含量一般按照 20.00% 计算,则 $\eta_d = (18.29\% + 20.00\%)/2 = 19.15\%$ 。因此,可以计算出不同规模植物工厂厌氧消化的 G_i ,结果见表 1。

表 1 植物工厂蔬菜产量及总产气量预测
Table 1 The predict yield of gas emission from plant factories

植物工厂 Plant plant	面积 Area m ²	蔬菜产量 Vegetable production t	总气体产量 Total gas yield m ³
马坊镇植物工厂 Mafang Town plant factory	26 000	7 000	28 478.9
锦绣大地植物工厂 Jinxiudadi plant factory	14 000	1 825	7 424.9
福井县植物工厂 Fujing County plant factory	2 870	252	1 025.2

1.2.3 沼气净化系统。沼气是一种混合气体,其组成取决于发酵原料的种类及其相对含量,且随发酵条件和阶段的不同而变化,一般沼气中含有 CH₄ 50%~75%,CO₂ 25%~45%,水 2%~7%,N₂ 0~2%,少量的 O₂ 及 H₂ 和 H₂S 1%~3%^[4]。沼气中存在的 H₂S 是腐蚀设备的主要因素,因此含硫化合物的去除是生物燃气综合利用中必不可少的环节。目前,沼气脱硫可参考焦炉煤气脱硫工艺,主要有物理法、化学法和生物法脱硫。该系统采用化学法中的单乙醇胺法脱硫,即用 15% 的单乙醇胺试剂(MEA)进行脱硫反应。单乙醇胺脱硫法的优点在于脱硫效率较高,可达 98%,其解析出的硫可用于制取硫酸,操作简便,流程简单,同时单乙醇胺可回收利用,该方法成本较低,在工业使用上比较成熟^[33]。除脱硫之外,单乙醇胺还可以脱除部分 CO₂,使沼气中 CH₄ 含量相对增加,更易于燃烧。主要反应方程式^[34]:



该系统脱硫工艺主要由脱硫和解析 2 部分组成,经过厌氧消化反应产生的沼气通入脱硫塔与 15% MEA 溶液进行逆流接触,吸收沼气中的 H₂S 和一部分的 CO₂ 之后,沼气从塔顶排出,通往储气罐。贫液因吸收了沼气中的 H₂S 等酸性气体而成为富液从塔下部排出,富液经过过滤器过滤后,进入解吸塔进行解析。在解析塔中,大部分的 CO₂、H₂S 被闪蒸出来。蒸出酸性气体后,富液成为贫液从塔底排出,如有多余部分可溢流入 MEA 调整槽,在过滤器中除去杂质后贫液循环回脱硫塔。被闪蒸出的酸气在回流冷凝器内冷凝冷却后生成的气液混合物在储液器内进行气液分离,分离出的酸气送入硫酸制造工序,可以生产浓硫酸等含硫化合物,完成整体脱硫过程。

1.2.4 沼气利用系统。沼气的利用一般包括供热、发电两方面,从供热角度来看,假设 CH₄ 占沼气的 62.50%,CH₄ 净热值为 35 900 kJ/m³ (产物为液态水),因此可算出燃烧总热值,并按照标准煤热值 29 307 kJ 折合为标准煤;如果用于发电,一般 1 m³ 沼气可发电 1.8 kW·h。沼气利用价值见表 2。

表2 植物工厂废弃物厌氧发酵产沼气总能量

Table 2 Total energy of anaerobic digestion of bio-waste in Plant Factory

植物工厂 Plant plant	总热值 Gross calorific value //kJ	合标准煤 Standard coal //t	发电量 Generating capacity kW · h
马坊镇植物工厂 Mafang Town plant factory	664 555 131.5	22.675 9	51 748.20
锦绣大地植物工厂 Jinxiudadi plant factory	173 260 041.5	5.911 8	13 364.80
福井县植物工厂 Fujing County plant factory	23 923 042.0	0.816 4	1 845.18

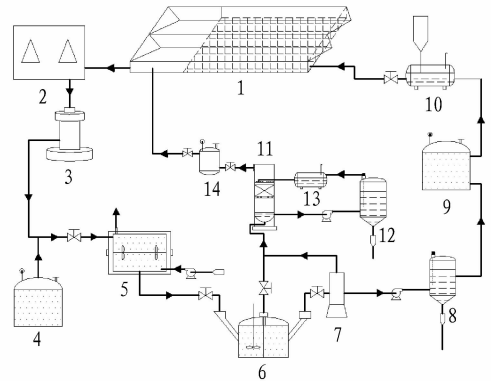
对于福井县植物工厂,1年的生物质废弃物厌氧发酵产生的沼气的热值仅相当于1 t左右的标准煤,即使利用发电设备产生的电量也非常少,因此并不适合投入供热或发电设备,产生的沼气仅可以在植物工厂用作沼气灶或沼气灯。沼气灯不仅可提供照明,释放出的二氧化碳可辅助植物工厂施CO₂肥。但是对于马坊镇这种大型植物工厂,就可以产生足够的沼气用来发电,并且发电量可观。因此,一般对于小型植物工厂(<1 000 m²),沼气适合作为沼气灯或沼气灶,且使用比较合理,但对于大型植物工厂(>10 000 m²),沼气就可以用作供热或发电,甚至输配给附近农户使用。介于小型和大型之间的植物工厂,要根据具体面积及成本等进行评估后再确定沼气的利用方式。

1.2.5 沼液、沼渣利用系统。厌氧发酵后会存在大量的固液残留混合物。粗略计算每生产1 m³沼气可产出250 kg左右的厌氧发酵液,因此,沼液、沼渣的产量巨大。这些残液中不仅存在大量催腐微生物和产沼气微生物,还含有多种微量元素、生物活性物质(如氨基酸)、多种植物生长刺激素(B族维生素)及抗菌素(如赤霉素、吡啶乙酸)等,COD含量整体偏高。一般来说,沼液、沼渣含有机质30.0%~50.0%,含总氮0.9%~1.7%,全磷(P₂O₅)0.5%~1.2%,全钾(K₂O)0.8%~2.0%,还包括未分解的木质素和纤维素。总体来说,沼渣具有营养成分丰富、养分全面等优点,可作为有机肥料。由于发酵反应物中猪粪已经在反应前脱除重金属,植物工厂废弃物中重金属含量极少,因此沼渣中含重金属浓度基本符合我国城镇垃圾农用标准^[35-36],此外,沼渣最值得利用的原因是其可以减少因施用传统无机肥料引发的环境问题,土壤施肥利用沼液、沼渣时,会补充氮、磷、钾,减少土壤有机质的流失,同时任何厌氧消化反应都会生成大量沼液沼渣,因此较传统无机肥料在经济上更有优势^[37]。Koszela等^[38]使用沼液和化肥培养苜蓿草,发现用沼液施肥,相比于无机肥料,可使苜蓿草中氮上升0.55%,磷上升0.02%,钾上升0.29%,钙上升0.11%,镁含量上升0.01%。此外,单独施加无机化肥可能会由于用量不当而造成烧苗等情况,而沼液肥含水量较高,不存在这类风险。因此,植物工厂生物质废弃物厌氧发酵后的沼液可以代替化肥。此外,沼液还有杀菌功能^[39],沼液中的生物活性物质能够抑制和杀灭常见寄生虫以及霍乱沙门氏菌、巴氏杆菌、魏氏梭菌、丹毒杆菌、大肠杆菌等常见病菌。Alburquerque等^[40]研究发现,果蔬类废弃物

厌氧发酵后的沼渣可以在西瓜种植中作为基肥,在夏季迅速催熟作物,同时可补充氮元素,使蔬菜的营养更加平衡,可以弥补传统肥料营养单一的缺点。该系统直接将厌氧发酵后的沼液进行沉淀、过滤、除臭处理,稀释、配比后直接作为肥料输送至营养液中,完成有机质的循环利用。

2 植物工厂废弃物厌氧消化循环利用系统总流程

综上,植物工厂生物质厌氧消化产生的沼液、沼气、沼渣全部得到充分利用,该循环系统总流程如图2所示。从图2可见,植物工厂产生的生物质废弃物(1),经过收集站(2)收集、粉碎机(3)粉碎,与粪便(4)按照固定比例投入预处理设备(5)中,预处理结束后,将混合物送入发酵罐(6)中进行厌氧发酵,其中沼气进入脱硫设备(11)中进行脱硫,然后将纯净的沼气储存(14),沼液经过气液分离(7)和固液分离(8)后,进入除臭池(9)中,再送入调配池(10)进行微量元素的调配,制成肥料后返回植物工厂(1)。



注:1. 植物工厂;2. 废弃物收集站;3. 粉碎设备;4. 粪便;5. 预处理设备;6. 厌氧消化设备;7. 气液分离器;8. 固液分离器;9. 沼液除臭池;10. 沼液调配池;11. 净化塔;12. 解析塔;13. MEA罐;14. 储气罐。

Note:1. plant factor;2. waste collection station;3. crushing equipment; 4. faeces;5. pretreatment equipment;6. anaerobic digestion equipment;7. gas-liquid separator;8. solid-liquid separator;9. biogas pool deodorization;10. the deployment of biogas pool;11. purification tower;12. analytical tower;13. EMA tank;14. gas storage tank.

图2 植物工厂废弃物厌氧消化循环利用系统总流程

Fig.2 The engineering drawings based on recycling system

张国治等^[41]对沼渣利用意愿进行问卷调研,结果表明,如果沼液沼渣能解决运输问题,98%以上的农户愿意使用;如果需要自己运输,78%的农户将放弃使用。因此,运输不方便是限制沼液、沼渣继续利用的主要问题。从节约运输费用这一角度来看,就地使用是最佳方案。植物工厂废弃物循环利用的优势之一在于就地使用,大大减少了运输成本。

崇明岛前卫村有较完整的沼液沼渣利用工程^[42],前沿村具有规模的养殖场,禽畜粪便产生量为5 m³/d,将这些原料厌氧发酵后,沼气产量为150 m³/d以上,沼肥产量4 m³/d,该沼肥不仅营养全面,还含有各类氨基酸、赤霉素生长素等对植物生长发育具有调控作用的微量元素,并且沼渣中含有的抗生素类物质还可以防治病虫害。目前,通过施沼肥该村

生产的有机蔬菜每年增值约 150 万元,有效减少了化肥施用量约 400 t/a,价值约 2.5 万元。目前,沼液、沼渣作为化肥已有比较成熟的工艺,积累了一定经验,在植物工厂中使用由沼液、沼渣发酵的化肥风险较小,可行性好。

3 结论与展望

综上所述,植物工厂生物质废弃物厌氧消化循环利用可行,但沼气的利用受植物工厂规模的限制,不同规模的植物工厂生物质厌氧消化沼气产量不同,小型植物工厂废弃物厌氧发酵后沼气不适合用于供热、发电,仅适合小规模使用(如沼气灯、沼气灶等),大型植物工厂废弃物厌氧发酵产生的沼气可以用于供热和发电。目前植物工厂废弃物厌氧发酵的沼液、沼渣的循环利用有以下优势:①实现了植物工厂废弃物的资源化处理,减少因焚烧、填埋垃圾带来的环境问题;②利用厌氧消化后沼液、沼渣作为肥料,代替传统无机化肥,节约成本,减少因施用不当引发的土壤污染、地下水污染等。

以下几个方面仍需深入研究:①植物工厂种植的范围不仅局限于水果、蔬菜,还包括花卉、产油类植物、药材等,因此厌氧发酵的原料在选取上有待进一步研究;②虽然提倡垃圾分类,但是有时不同种废弃物混合反而更利于厌氧消化反应元素的配比,因此需深入探索不同反应物之间的反应机理;③不同植物在不同季节、不同温度下对肥料的吸收量不同,如何妥善处理循环利用过程中三沼与实际需求匹配的问题值得探讨;④植物工厂生物质废弃物厌氧消化循环利用环保效益明显,但经济效益值得进一步研究。

参考文献

- [1] DONG C, SHAO L Z, FU Y M, et al. Evaluation of wheat growth, morphological characteristics, biomass yield and quality in Lunar Palace-1, plant factory, green house and field systems[J]. *Acta astronautica*, 2015, 111: 102-109.
- [2] VIÉITEZ E R, MOSQUERA J, GHOSH S. Kinetics of accelerated solid-state fermentation of organ-rich municipal solid waste[J]. *Water science and technology*, 2000, 41(3): 231-238.
- [3] 孙健, 罗文遂, 汪洋. 园林植物废弃物资源化利用现状与展望[C]//2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第五卷). 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [4] 王远远. 蔬菜废弃物沼气发酵工艺条件及沼气发酵残余物综合利用技术的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [5] 倪文清. 园林绿化废弃物处理的现状及政策分析[J]. *现代园艺*, 2014(24): 161.
- [6] JIANG Y, HEAVEN S, BANKS C J. Strategies for stable anaerobic digestion of vegetable waste[J]. *Renewable energy*, 2012, 44(4): 206-214.
- [7] 张丽颖, 姜永海, 邓舟, 等. 城市生物质废弃物厌氧消化处理可行性分析[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(5): 143-146, 150.
- [8] 宫亚斌. 沼液利用及处理方法[J]. *陕西农业科学*, 2014, 60(6): 40-42.
- [9] 吕子文, 方海兰, 黄彩娣. 美国园林废弃物的处置及对我国的启示[J]. *中国园林*, 2007, 23(8): 90-94.
- [10] 宣明军. 园林绿化废弃物收集点的选址规划: 以上海市静安区为例[J]. *中国城市林业*, 2014, 12(3): 50-52.
- [11] 方海兰, 吕子文, 杨意, 等. 绿化植物废弃物处置技术规范[J]. *园林*, 2012(2): 38-41.
- [12] 黄彩娣, 陆觉民, 李桥, 等. 园林废弃物循环利用(一): 处置生产技术的研究[J]. *园林*, 2010(9): 48-50.
- [13] RODRIGUE Z C, ALASWAD A, MOONEY J, et al. Pre-treatment techniques used for anaerobic digestion of algae[J]. *Fuel processing technology*, 2015(138): 765-779.
- [14] HASSANA M, DING W M, BI J H, et al. Methane enhancement through oxidative cleavage and alkali solubilization pre-treatments for corn stover with anaerobic activated sludge[J]. *Bioresource technology*, 2016, 200(3): 405-412.
- [15] 陈广银, 马慧娟, 常志州, 等. 堆肥预处理温度控制促进麦秸厌氧发酵产沼气[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 179-185.
- [16] 丁万文, 蒋明, 臧廷亮. 堆肥预处理对园林废弃物厌氧消化的影响[J]. *农家科技*, 2014(10): 143-144.
- [17] 赵光. 两段式厌氧工艺产甲烷发酵特性及微生物生态调控机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [18] MARIA F D, SORDI A, CIRULLI G, et al. Amount of energy recoverable from an existing sludge digester with the co-digestion with fruit and vegetable waste at reduced retention time[J]. *Applied energy*, 2015(150): 9-14.
- [19] 刘荣厚, 王远远, 孙辰. 温度对蔬菜废弃物沼气发酵产气特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(9): 116-121.
- [20] NGES I A, BJÖRNSSON L. High methane yields and stable operation during anaerobic digestion of nutrient-supplemented energy crop mixtures[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 47(6): 62-70.
- [21] BOUALLAGUI H, LAHDEH H, ROMDAN E B, et al. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition[J]. *Journal of environmental management*, 2009, 90(5): 1844-1849.
- [22] 刘荣厚, 王远远, 孙辰, 等. 蔬菜废弃物厌氧发酵制取沼气的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 209-213.
- [23] WANG L, SHEN F, YUAN H R, et al. Anaerobic co-digestion of kitchen waste and fruit/vegetable waste: Lab-scale and pilot-scale studies[J]. *Waste management*, 2014, 34: 2627-2633.
- [24] 李科. 果蔬垃圾分类厌氧发酵产沼气[J]. *中国沼气*, 2015, 33(1): 33-35.
- [25] 李刚, 杨立中, 欧阳峰. 厌氧消化过程控制因素及 pH 和 Eh 的影响分析[J]. *西南交通大学学报*, 2001, 36(5): 518-521.
- [26] 潘锋, 浦定艳, 王连军. 肠衣废水的厌氧生物处理[J]. *中国沼气*, 2006, 24(4): 9-12.
- [27] 张波, 史红钻, 张丽丽, 等. pH 对厨余废物两相厌氧消化中水解和酸化过程的影响[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(5): 665-669.
- [28] 刘存芳, 袁兴中, 曾光明, 等. 城市有机垃圾间歇厌氧消化 pH 控制动力学研究[J]. *环境科学*, 2006, 27(8): 1687-1691.
- [29] 张波, 蔡伟民, 何晶晶. pH 调节方法对厨余垃圾两相厌氧消化中水解和酸化过程的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(1): 45-49.
- [30] SCANO E A, ASQUER C, PISTIS A, et al. Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant[J]. *Energy conversion and management*, 2014, 77(1): 22-30.
- [31] 韩雪, 常瑞雪, 杜鹏洋, 等. 不同蔬菜种类的产废比例及性状分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(4): 377-382.
- [32] 刘松毅, 李伟, 李文进, 等. 厌氧发酵生物技术处理果蔬废弃物分析及展望: 基于北京新发地农产品批发市场的调查[J]. *农业展望*, 2013, 9(10): 58-61.
- [33] 张鹏飞, 冯宝兴. 单乙醇胺法煤气脱硫生产实践[J]. *燃料与化工*, 2014, 45(1): 41-43.
- [34] 要步轩, 刘永华. 单乙醇胺脱硫与含硫酸性气体催化转化制酸工艺的组舍[J]. *燃料与化工*, 2009, 40(3): 47-49.
- [35] MOLINUEVO-SALCES B, GONZALEZ-FERNÁNDEZ C, GÓMEZ X, et al. Vegetable processing wastes addition to improve swine manure anaerobic digestion: Evaluation in terms of methane yield and SEM characterization[J]. *Applied energy*, 2012, 91(1): 36-42.
- [36] 葛振, 魏源送, 刘建伟, 等. 沼渣特性及其资源化利用探究[J]. *中国沼气*, 2014, 32(3): 74-82.
- [37] PIVATO A, VANIN S, RAGA R, et al. Use of digestate from a decentralized on-farm biogas plant as fertilizer in soils: An ecotoxicological study for future indicators in risk and life cycle assessment[J]. *Waste management*, 2016, 49: 378-389.
- [38] KOSZELA M, LORENCOWICZ E. Agricultural use of biogas digestate as a replacement fertilizers[J]. *Agriculture and agricultural science proceedings*, 2015, 7: 119-124.
- [39] 韩斌, 刘克锋, 高程达. 沼液无害化处理和资源化利用文献综述[C]//2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第五卷). 北京: 中国环境科学出版社, 2013: 3658-3671.
- [40] ALBURQUERQUE J A, DE LA FUENTE C, CAMPOY M, et al. Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties[J]. *European journal of agronomy*, 2012, 43(11): 119-128.
- [41] 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.
- [42] 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, 36(14): 3429-3431.