

猪场沼液高值化综合利用研究进展及前景分析

巫小丹^{1,2}, 岑庆静¹, 吴冬梅¹, 郑洪立^{1,2}, 向书玉^{1,2}, 廖钟娟¹, 罗玲³, 阮榕生^{1,2}, 刘玉环^{1,2}
(1. 南昌大学食品学院, 南昌 330031; 2. 南昌大学生物质转化教育部工程研究中心, 南昌 330047; 3. 南昌大学图书馆, 南昌 330031)

摘要: 生猪养殖是关系国计民生的重要产业, 近年来呈规模化、集约化发展态势, 养殖污水排放量大、污染负荷重, 直接威胁环境生态安全。沼气工程迅速发展, 沼液产量巨大, 如得不到合理利用处理, 不仅制约沼气工程的发展, 还会造成二次污染。沼液富含氮、磷等营养元素, 长期以来在种植业、林业和养殖业应用广泛。为实现养猪沼液梯度处理, 构建高值化综合利用体系, 文章对养猪沼液高附加值资源化利用现状进行了调查研究, 综述了膜分离浓缩技术、腐植酸膜提取技术、氨氮提取回收技术、生物质转化技术及光催化技术等沼液高值化利用的应用进展, 并展望了养猪沼液高值化综合利用体系发展前景。

关键词: 规模化养猪; 沼液; 综述; 高值化利用; 综合体系

中图分类号: S216.4; X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2019)02-0069-06

Progress and Prospect of Value-added Utilization OF Liquid Digestate from Pig Farm / WU Xiao-dan^{1,2}, CEN Qing-jing¹, WU Dong-mei¹, ZHENG Hong-li^{1,2}, XIANG Shu-yu^{1,2}, LIAO Zhong-juan¹, LUO Ling³, RUAN Rong-sheng^{1,2}, LIU Yu-huan^{1,2} / (1. School of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Engineering Research Center of Biomass Conversion, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330047, China; 3. Library of Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Pig farming is an important industry related to the national economy and the people's livelihood. In recent years, it presents the trend of large-scale and intensive development. However, large amount of wastewater and heavy pollution directly threaten the environmental and ecological safety. With the rapid development of biogas project, liquid digestate production is huge, if there's no reasonable treatment and utilization, not only restrict the development of biogas project, but also cause secondary pollution. Rich in nitrogen, phosphorus and other nutrients, liquid digestate has been widely used in the traditional crop-plantation, forestry, animal industry and aquaculture industry. In order to realize the gradient utilization of liquid digestate and construct the high-value utilization system, the present situation of high value utilization technology of liquid digestate was analyzed and summarized, including the membrane separation and concentration technology, humic acid extraction technology, ammonia nitrogen extraction and recovery technology, biomass conversion technology, photocatalytic technology and etc. The prospect of the comprehensive utilization system of liquid digestate from pig farm was also discussed.

Key words: large-scale pig farming; liquid digestate; summary; high-value utilization; multipurposesystem

随着经济的发展和人民生活水平的提高, 生猪养殖正朝着规模化、集约化的方向发展, 成为我国农村经济中最活跃的经济增长点和主要的支柱产业。随着规模化、集约化所带来高环境负荷量与耕地资源不断萎缩矛盾的日益加剧, 环境问题日益凸显, 成为制约养殖业可持续发展的瓶颈问题^[1], 在环保政

策的压力下, 我国生猪存栏量呈下降趋势^[2]。据中国环境保护部统计, 2015 年全国 131837 家规模化畜禽养殖场和 7578 家规模化畜禽养殖小区排放化学需氧量 1015.5 万吨、氨氮 55.2 万吨^[3]。近年来, 随着《畜禽养殖业污染防治技术政策》(环发[2010] 151 号)、《畜禽规模养殖污染防治条例》(国务院令

收稿日期: 2018-05-21 修回日期: 2018-07-26

项目来源: 江西省教育厅青年项目(GJJ160189); 江西省重点项目(20161BBF60057); 千人计划专项(GCXZ2014-4242); 江西省教育厅科技落地计划项目(KJLD 12011)

作者简介: 巫小丹(1984-), 女, 博士, 主要研究方向为生物质资源开发与利用, E-mail: wuxiaodan@ncu.edu.cn

通信作者: 刘玉环, E-mail: liuyuhuan@ncu.edu.cn

第 643 号)、《水污染防治行动计划》(国发[2015]17 号)、《畜禽养殖禁养区划定技术指南》(环办水体[2016]99 号)、《“十三五”生态环境保护规划》(国发[2016]65 号)、《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》(国发[2017]48 号)等政策法规的相继出台,国家明确要求对畜禽养殖业排放指标实施协同控制,大力推进畜禽养殖废弃物污染治理与资源化利用,以厌氧发酵技术为核心的沼气工程能消纳有机废弃物、缓解能源短缺,得到日益广泛的应用。根据《可再生能源中长期发展规划》,到 2020 年,我国将建成大型畜禽养殖场沼气工程 10000 座,工业有机废水沼气工程 6000 座,年产沼气约 140 亿立方米,沼气发电达到 300 万千瓦。沼气工程所产沼液数量庞大,沼液利用是循环农业产业链中的重要环节。养猪沼液中含有丰富的养分,可以作为有机肥料施用于农田,欧美发达国家对于沼液的处理均是经过长期贮存后作为肥料在大田消纳^[4]。由于沼液运输成本高,且沼液连续生产与季节性施肥存在矛盾,加上我国的沼气工程项目很少有足够的土地贮存和消纳沼液,导致养猪沼液的处理一直是我国畜禽养殖业和环保部门的棘手问题。面对数量庞大且日渐增多的沼液,若没有进行无害化、资源化处理,而将其任意排放,将会造成二次污染,严重制约沼气工程的发展。目前,我国畜牧业正处于转型升级的关键时期,为了保证沼气工程的稳定良好发展,促进畜禽养殖业的可持续发展,加快推进农村生态文明建设,养猪沼液高附加值资源化利用势在必行。

本文通过文献调研,综述了养猪沼液在传统产业应用现状和高附加值资源化利用研究进展,提出我国养猪沼液应推行梯度资源化利用,构建高值化综合利用体系,以期拓宽养猪沼液利用途径,实现其安全高效利用提供参考。

1 养猪沼液特性概述

养猪沼液是猪场粪污等有机物经厌氧发酵产生 CH_4 和 CO_2 等气体后的残留液。养猪沼液具有 COD 高、氨氮高、TP 高的特点,特征污染物含量如表 1 所示。沼液中富含氮、磷、钾等大量元素和铜、铁、锌等微量元素,还有各种氨基酸、维生素、水解酶、植物激素以及病虫抑制因子等物质。除此以外,沼液中可能还存在较高浓度粪大肠菌群^[5],少量兽药抗生素^[6],有毒副作用的激素,及 Hg、As、Cd、Pb、

Cr 等重金属离子^[7]。因此,在应用沼液过程中应形成安全处理和安全施用的意识。

表 1 养猪沼液特征污染物含量^[8-10] ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

pH 值	COD	NH_4^+-N	TN	TP
7.0 ~ 8.4	308 ~ 3850	259 ~ 1489	297 ~ 2979	13.8 ~ 191

2 养猪沼液传统资源化利用现状

2.1 沼液在种植业的应用

养猪沼液含有大量的营养元素、丰富的有机物质(如氨和铵盐、丁酸、植物激素赤霉素、吡啶乙酸以及维生素 B_{12} 等),速效营养能力强,养分可利用率高,不但能提高作物的产量和品质,而且具有防病抗逆作用,是一种优质的有机液体肥料^[11-12],享有“生物农药”之美称。目前,养猪沼液在种植业上的应用主要是在沼液浸种、沼液灌根、叶面喷施、改良土壤等方面(见表 2)。

表 2 沼液在种植业上的应用

应 用	功 能	参考文献
浸种	促进种子生根发芽、促进幼苗生长。	[13-15]
灌根	壮苗、增产、抗逆。	[16-18]
叶面喷施	营养全面、利于吸收,实现增产提质。	[19-21]
改良土壤	改善新垦红壤理化性质,增加其有机碳、氮、磷、钾等营养元素的含量,改善土壤微生物区系和土壤酶活性;改善土壤酸碱度,提高或恢复土壤肥力。	[22-23]

2.2 沼液在林业的应用

沼液在林业也有较广泛的应用,主要有根部施沼液和叶面喷施两种方式,施用沼液可降低虫口密度,提高坐果率 5% 以上,增产 10% ~ 30%,降低农业成本^[24]。元翠玲^[25]等的研究表明沼渣沼液穴贮对于果园水肥的补充效果较好,可使樱桃树单株产量增加 21.76%,单果重增加 28.89%。王炳华^[26]等对初果期香榧林施用不同浓度的沼液,发现合适浓度的沼液对香榧林的生长有促进作用。

2.3 沼液在养殖业的应用

沼液中含有多种氨基酸、维生素、有机酸和大量粗蛋白等营养物质,可以满足多种生命体的营养需求,可应用于禽畜饲养、水产养殖等方面。将沼液与水混合供应给禽畜食用后,发现沼液能够刺激家禽卵巢的排卵功能,促进其生产发育^[27]。将沼液施入鱼塘,沼液中丰富的营养元素能促进浮游生物生长,

成为鱼类饵料,同时沼肥中半消化或未消化的饲料可供鱼食用。沼液养鱼可弥补人工饲料营养不足的缺陷,减少饲料投放量,改善鱼塘生态环境,实现稳产、高产养鱼^[28]。

3 养猪沼液高附加值资源化利用现状

近年来,随着科技的发展,养猪沼液结合一些高新技术开启了高附加值资源化利用的研究道路。

3.1 膜分离技术获得高浓缩液体有机肥

膜处理技术是一项成熟的水净化技术^[29]。养猪沼液中单位体积养分含量低,储存、运输成本较高,随着膜分离技术的发展,可通过膜分离技术获得高浓缩液体有机肥以实现高值化利用。沼液经膜浓缩处理后,有机肥营养成分浓度可明显升高,重金属含量低于国家规定的安全标准,主要大分子有机物为腐植酸和氨基酸^[30]。范蓓蓓^[31]发现沼液 10 倍浓缩液各项指标含量均符合农业部 NY1106-2010、NY1429-2010 标准,将浓缩沼液配方肥与氨基酸水溶肥、“奥捷”水溶肥等的施用效果进行对比,发现浓缩沼液肥促进小白菜生长、改善土壤性质的效果最为显著,突出了浓缩有机液肥的优势^[32]。毛金刚^[33]采用超滤-纳滤膜耦合技术处理养猪沼液,得到的 20 倍浓缩液可用作灌溉有机肥。沼液中的悬浮物、胶体含量较高,因此在膜浓缩前,需要对料液进行预处理以防膜污染^[34]。王雷^[9]提出的化学絮凝-纳滤、电絮凝-纳滤组合工艺可以减轻纳滤膜污染程度。张智烨^[35]的研究表明采用生物基滤料和膜浓缩一体化技术可以达到有效保留营养物质并去除大分子污染物的目的,也能为后续浓缩减轻膜污染负担。

3.2 超滤膜技术提取腐植酸类物质

腐植酸是动植物残骸经过微生物的分解和转化及其他物理化学过程所积累的天然有机物质^[36]。沼液中难降解有机物腐植酸使其可生化性较差,但其特定的结构(含有羟基、羧基、烯醇基等多种官能团)给腐植酸带来了一定的化学活性和生物活性,可有效增加植物的抗逆性,改良农作物品质。有研究表明,腐植酸可以钝化重金属^[37],修复重金属污染土壤^[38],改善作物表现性状,并促进其对氮肥的吸收,提高产量^[36]。沼液中含有各种腐植酸^[39],尤其是户用型沼气池所产沼液中含有最高,可达 0.13%^[40]。从沼液中分离提取腐植酸类物质既可解决沼液中有机物难降解的处理难题,又可获得腐

植酸类物质,实现腐植酸资源化利用。目前,可采用超滤膜技术分离提取腐植酸类物质^[41],但该方法极易造成膜污染,膜运行成本高。岳东北^[42]等使用离子交换树脂-超滤膜提取沼液中的腐植酸类物质:先利用离子交换树脂选择性吸附沼液中腐植酸,树脂解吸可得以重复使用,再采取超滤膜分离法将腐植酸类物质和解吸药剂分离。腐植酸类物质回收率达 80% 以上,纯度大于 80%,解吸附药剂循环利用率大于 85%。

3.3 氨氮提取回收技术

3.3.1 石灰-吹脱技术获得氨气

沼液中富含氨氮,可通过投加石灰的方法调节 pH 值到 11 左右,使氮以 NH_3 的形式逸出,也可向沼液中通入蒸汽将 NH_3 高效吹脱提取出来^[43],可以氨水形式^[44]或制成硫酸铵晶体实现回收利用^[45],氮肥可用于农业生产。

3.3.2 鸟粪石结晶技术获得缓释肥料

鸟粪石($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)是一种难溶于水的白色晶体,含有丰富的氮磷和镁元素,可以为植物生长提供丰富的营养元素,可作为缓释肥料直接用于农业生产。鸟粪石结晶技术利用镁、氨和磷同时存在时自发形成难溶磷酸铵镁结晶从而达到回收氮磷的目的^[46-47]。苏双青^[48]等通过优化溶液的过饱和度, $n(\text{Mg}^{2+}):n(\text{NH}_4^+):n(\text{PO}_4^{3-})$,pH 值,杂质离子,反应时间和温度等条件,实现氨氮去除率达到 50%。平倩^[49]等采用间歇进水、固体投加镁源(氯化镁和氧化镁作为连用镁源)的投料方式,搅拌速度 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,停留时间 2 h,优化后氨氮去除率高达 93.5%。陶智伟^[50]等的分析结果表明采用连续流 MAP 结晶反应器处理养猪沼液,回收鸟粪石总费用为 $0.8 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ 沼液,远低于常规的养猪废水处理费用($1.5 \sim 2 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右)。从养猪废水中回收的鸟粪石不需洗涤只需经过空气干化即可得到约 95% 的纯度^[51]。鸟粪石结晶法回收氮磷制作农肥是一项低成本高效益的养猪沼液处理技术。

3.3.3 介质吸附技术回收氨氮

吸附法去除氨氮是利用多孔性固体(如硅胶钙、活性炭、生物炭、沸石等)吸收污水中的氨氮。袁基刚^[52]等采用自制的改性粉煤灰吸附沼液中氨氮,当改性粉煤灰添加量为 $0.013 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$,中性条件下吸附 30 min 时,吸附效果良好,氨氮吸附率高达 78.60%。Sanchol^[53]等通过集成天然沸石和中空纤维膜接触器,从生活污水中回收氮作为液体肥

料。生物碳对氨氮也有较好的吸附性能,蒋旭涛^[54]研究了以小麦秸秆作为原料制备的生物碳用于吸附氨氮。刑贻^[55]的研究表明吸附饱和的沸石可部分代替氮磷肥,改善冬小麦的生物学指标和酸性紫色土的理化性质。

3.4 生物质转化技术

3.4.1 微藻技术获得微藻生物质

随着能源危机和环境问题的日益加剧,微藻生物质能开发研究受到广泛关注^[56]。沼液中富含碳源、氮源等,能够为微藻生长提供基本营养要素^[57]。若将沼液用于微藻培养,可达到沼液低成本排放的目的,又可节约微藻培养的成本,同时微藻生物质还可加工成多种高附加值产品,在医药工业、食品工业、饲料工业、可再生能源等领域都有广阔的应用前景。Tan F^[58]等的研究发现,用稀释沼液培养微藻不仅可以有效去除氮磷,还可获得较多的碳水化合物产物。Park^[59]等的研究表明:当氨氮的浓度在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,微藻生长的细胞密度可达最大值,微藻细胞受其影响不大,当氨氮含量在 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,与正常生长的微藻相比,细胞密度会降低至 70%;而当氨氮值升高为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,细胞密度会降低至 35%,细胞的生长严重受影响。沼液养殖微藻应与以高值化利用为目标的降氨氮技术紧密结合。

3.4.2 现代农业技术获得绿色有机农产品

水培是一种新型环保的现代化蔬菜栽培技术,有效解决了土壤资源受限的问题。水培蔬菜生长周期短,需肥少,产量高,品质好,无环境污染,已成为发展现代农业的重要方式^[60]。养猪沼液经过一系列处理后,氮磷含量明显降低,可依托现代农业技术进行水培蔬菜,实现氮磷资源最大化利用。吴冬青^[61]等的研究发现,在营养液中添加 40% 的沼液可大大提高快菜的产量,而且能显著提高快菜中的维生素 C、可溶性糖、粗纤维和粗蛋白等的含量。俞超^[62]等研究表明,相比普通土壤栽培,沼液无土栽培对蔬菜根长、侧根长、总产量影响显著,可溶性糖含量明显提高,增幅为 68.5%;蔬菜中硝基氮含量显著降低,降幅为 31.5%。沼液中养分含量特性使得水培蔬菜过程中也存在一些问题,如需要进行较高倍数的稀释处理。梁飞虹^[63]等将沼液经脱氨处理后,对比不同浓度沼液水培生菜效果,发现沼液稀释倍数在 5~15 倍时,氨氮脱除率高达 98%,生菜相对增长量最大,外观品质与营养品质最佳。因此,

沼液水培蔬菜应紧密结合以高值化利用为目标的预处理技术。

3.5 光催化技术

光催化技术是一种新兴的高效节能的现代处理技术。将光催化技术应用于沼液处理,为解决沼液环境污染问题和沼液资源化利用提供了新的思路和方向。王菲凤^[64]研究 N 掺杂 TiO_2 纳米材料的催化性能及其对腐殖酸的降解效果,发现适当掺入 N 可显著提高可见光催化性能,腐殖酸的降解率可达 80%。肖文静^[65]等使用 TiO_2 作为催化剂,加入到经沉淀、过滤的预处理沼液中,紫外光照条件下进行光催化反应,发现光催化处理可降低沼液的 COD 值和降解腐殖酸等有机物。光催化技术还可为光解制氢提供水源,产生的氢气又可以作为甲烷的氢源,实现资源的循环利用。光催化处理技术具有成本低、效率高的优点,将光催化沼液处理装置与沼气工程结合,有望成为沼液资源化利用的新途径。

4 养猪沼液梯度处理及多级资源化利用体系的构建

目前,沼液利用存在沼肥生产的连续性与农业使用的季节性之间的矛盾,而规模化、集约化养殖模式更是加剧了养殖高环境负荷量与农用地有限的矛盾,沼气工程运转受到威胁,循环农业产业链亟待寻求突破。开展多渠道的养猪沼液高附加值资源化利用是打破这一局面的唯一出路,构建养猪沼液梯度处理及资源化利用体系迫在眉睫。徐畅^[10]采用“沸石吸附-斜生栅藻净化”两步法处理高氨氮养猪沼液,研究发现利用沸石吸附将沼液的氨氮值降低到 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右后斜生栅藻生长很好,而未经沸石吸附预处理的对照组沼液在斜生栅藻接种后第二天即出现死亡现象,且经过沸石处理沼液中养殖的栅藻油脂含量为 30%,明显高于稀释沼液中培养藻类的油脂含量,可用于开发微藻生物质能源,实现了高氨氮养猪沼液的梯度处理。“种养一体化”实现了养殖废水、沼渣沼液经过无公害处理后用于种植业,构建一种立体、循环的生态农业模式,可显著改善生态农业经济,合理利用农业资源、保护生态环境。石鹏飞^[66]等分析了沼液-有机肥-蔬菜种植等循环链,系统间物质循环减少了环境污染,证实了沼液多级处理的生态经济效益。

5 养猪沼液高值化综合利用可行性和前景分析

目前,养猪沼液高值化利用发展进程中,要更多

关注沼液成分的波动情况和影响因素,对沼液成分控制进行深入研究,将沼液的传统处理方法与高值化综合利用处理技术结合起来,实现养猪沼液梯度处理及多级资源化利用。可首先考虑回收大部分氮磷元素,再通过微藻培养、水培蔬菜、鱼类养殖等方式构建一个能量循环自供的良好生态体系,形成“生物固碳-废水深度净化-微藻生物质生产-水培蔬菜栽培-鱼类养殖”耦合系统,实现经济效益的进一步延伸,以期形成运行良好的循环农业产业链。

参考文献:

- [1] 姚文捷,王学渊. 家畜养殖生产的环境效应研究——基于浙江省 67 个县市的农业经济截面数据[J]. 湖北农业科学, 2016, (20): 5403–5407.
- [2] 金书秦,韩冬梅,吴娜伟. 中国畜禽养殖污染防治政策评估[J]. 农业经济问题, 2018, (3): 119–125.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 2015 年环境统计年报[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gzfw_13107/hjtj/hjtjnb, 2017–02–23.
- [4] 邓良伟,陈子爱. 欧洲沼气工程发展现状[J]. 中国沼气, 2007, 25(5): 23–31.
- [5] 叶小梅,常志州,钱玉婷,等. 江苏省大中型沼气工程调查及沼液生物学特性研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 222–227.
- [6] 宋小燕,刘锐,税勇,等. 一体式 MBR 工艺处理养猪沼液的中试研究[J]. 环境工程, 2017, 35(3): 47–51.
- [7] 李元高,潘海敏,敬巧巧. 畜禽养殖废水厌氧发酵沼液及沼渣成分研究[J]. 科技资讯, 2016, 14(7): 53–54.
- [8] 郭会真,陶智伟,冯亮,等. 化学絮凝-磷酸铵镁结晶-MBR 组合工艺处理养猪沼液研究[J]. 水处理技术, 2017, 1: 86–90.
- [9] 王雷. 猪场沼液化学絮凝/电絮凝-纳滤膜浓缩工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [10] 徐畅. 利用绿藻处理高氨氮养猪沼液的预处理方法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [11] 吴树彪,崔畅,张笑千,等. 农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 118–125.
- [12] 邵小达,李三红. 沼液在农业上的应用及其研究进展[J]. 农业装备技术, 2015, (05): 38–39.
- [13] 倪天驰,周长芳,朱洪光,等. 沼液浸种对水稻种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 594–599.
- [14] 邵天磊,邱凌,潘君廷,等. 沼液与木醋液浸种对小麦种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 西北农业学报, 2016, 11: 1608–1614.
- [15] 魏芳勤,吴玉红,陈永刚,等. 不同浓度沼液浸种对花魔芋实生种子萌发的影响[J]. 中国沼气, 2018, 36(2): 92–95.
- [16] 王辉,王成,孙国峰,等. 沼液灌根对丝瓜穴盘苗质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(3): 128–129.
- [17] 周瑾伟. 沼液灌根对当归增产及抗逆性试验研究[J]. 中国沼气, 2015, 33(5): 84–86.
- [18] 杜娟,屈荷丽,赵思峰. Bacillus subtilis S37 沼液发酵物对棉花生长产量及根际土壤生物学特性的影响[J]. 土壤通报, 2015, 4: 878–882.
- [19] 孙钦平,刘本生,李吉进,等. 沼液叶面喷施对油菜产量、品质和氮素利用率的影响[J]. 中国沼气, 2013, 31(1): 48–50.
- [20] 何梅,江铮,许建,等. 沼液叶面喷施对甜瓜产量和植株生理的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(11): 24–28.
- [21] 宋兵伟,曹新伟,马皓诚,等. 沼液叶面喷施对设施哈密瓜品质的影响[J]. 天津农业科学, 2016, 22(9): 11–14.
- [22] 张莉,鲍陈燕,章明奎. 利用沼肥培育新增耕地地力的研究[J]. 土壤通报, 2015, 6: 1472–1477.
- [23] 孙芹菊,凌玮,韩建刚,等. 沼液施肥对滨海盐碱地土壤形状及蔬菜品质的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42: 1–9.
- [24] 林瑞芬. 沼液在果树栽培中的应用技术及效益分析[J]. 现代农业科技, 2017, (01): 91.
- [25] 亓翠玲,浦碧雯,单洪涛,等. 沼渣沼液穴贮在樱桃栽培中的应用效果分析[J]. 山东农业科学, 2016, 48(11): 100–103.
- [26] 王炳华,范伟青,赖根伟,等. 不同浓度沼液对初果期香榧林生长的影响[J]. 林业科技, 2018, 43(1): 38–40.
- [27] 赵希彦. 沼气发酵残留物在养殖业中的综合利用[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(26): 12592–12594.
- [28] 荆丹丹,陈一良,戴成,等. 沼液养鱼的研究现状及发展趋势[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(22): 5886–5890.
- [29] Stoller M, Mendes R S. Advanced control system for membrane processes based on the boundary flux model[J]. Separation & Purification Technology, 2017, 175: 527–535.
- [30] 鹿晓菲,马放,王海东,等. 正渗透技术浓缩沼液特性及效果研究[J]. 中国沼气, 2016, 34(1): 62–67.
- [31] 范蓓蓓. 浓缩沼液的配方有机液肥开发研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [32] 范蓓蓓,倪亮,石伟勇. 浓缩沼液配方肥对小白菜生长及土壤特性的影响[J]. 土壤, 2015, (05): 868–873.

- [33] 毛金刚. 超滤—纳滤膜耦合处理养猪废水技术研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [34] 王雷, 段立安, 林孝昶, 等. 膜前预处理技术在畜禽养殖污水处理中的应用进展[J]. 水处理技术, 2016, (02): 6–10.
- [35] 张智烨. 沼液生物基滤料与膜浓缩一体化处理技术与工艺[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [36] 袁天佑, 王俊忠, 冀建华, 等. 施用腐植酸对夏玉米产量氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. 核农学报, 2017, (04): 794–802.
- [37] 候月卿, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭和腐植酸类对猪粪堆肥重金属的钝化效果[J]. 农业工程学报, 2014, (11): 205–215.
- [38] 马献发, 李伟彤, 孟庆峰, 等. 简述腐植酸在土壤重金属污染修复中的作用[J]. 腐植酸, 2016, (06): 3–8.
- [39] 王维晨. 沼液叶面肥配方的研制及应用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [40] 黄惠珠. 沼液营养成分与污染物分析研究[J]. 福建农业学报, 2010, (01): 86–89.
- [41] 许玉东, 方艺民. 垃圾焚烧发电厂渗滤液 MBR-NF 截留液中腐植酸的超滤分离回收[J]. 环境工程学报, 2014, 8(4): 1467–1474.
- [42] 岳东北, 聂永丰, 程熠晴, 等. 一种从沼液中提取腐植酸类物质的方法[P]. 中国专利: 201010107933, 2013–07–03.
- [43] 崔鹏, 张钦. 蒸汽吹脱法和 AO 法联合处理高氨氮废水的应用[J]. 科技创新与应用, 2013, (05): 36–37.
- [44] 李妍姝. 氨气回收系统及监控系统设计[J]. 现代制造技术与装备, 2016, 11: 63–65.
- [45] 龚川南. 氨吹脱对奶牛养殖场沼液脱氮与氮回收研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [46] 段鲁娟, 曹井国, 熊发, 等. 鸟粪石沉淀法处理鸡粪发酵沼液的试验研究[J]. 环境工程, 2015, (7): 66–71.
- [47] 沈颖, 叶志隆, 叶欣, 等. 鸟粪石法回收养猪废水中氮磷时产物的组分与性质研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 92–97.
- [48] 苏双青, 传秀云, 马鸿文. 鸟粪石结晶法回收氮磷及其用作缓释生态肥研究[J]. 无机盐工业, 2016, 48(12): 58–63.
- [49] 平倩, 陈静霞, 李咏梅. 鸟粪石法回收制肥工业废水中氨氮的中试研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3585–3590.
- [50] 陶智伟, 冯亮, 肖惠群, 等. 磷酸铵镁法回收养猪沼液中营养元素的研究[J]. 水处理技术, 2016, 42(1): 96–100.
- [51] Suzuki K, Tanaka Y, Kuroda K, et al. Removal and recovery of phosphorous from swine wastewater by demonstration crystallization reactor and struvite accumulation device[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(8): 1573–1578.
- [52] 袁基刚, 刘兴勇, 王成端, 等. 改性粉煤灰对沼液中氨氮吸附动力学研究[J]. 环境工程, 2013, 31(6): 16–19.
- [53] Sancho I, Licon E, Valderrama C, et al. Recovery of ammonia from domestic wastewater effluents as liquid fertilizers by integration of natural zeolites and hollow fibre membrane contactors[J]. Science of the Total Environment, 2017, 584–585: 244–251.
- [54] 蒋旭涛. 生物炭对水中氨氮和磷酸盐吸附性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [55] 邢曭. 沼液营养物的沸石吸附回收与利用[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [56] Zhu L, Yan C, Li Z. Microalgal cultivation with biogas slurry for biofuel production[J]. Bioresource Technology, 2016, 220: 629–636.
- [57] 杨伟, 陈立文, 陈必链, 等. 微藻净化沼液产业化研究进展[J]. 中国沼气, 2015, 33(4): 49–53.
- [58] Tan F, Wang Z, Zhouyang S, et al. Nitrogen and phosphorus removal coupled with carbohydrate production by five microalgae cultures cultivated in biogas slurry[J]. Bioresource Technology, 2016, 221: 385–393.
- [59] Park J M, Jin H F, Lim B R, et al. Ammonia removal from anaerobic digestion effluent of livestock waste using green algae *Scenedesmus* sp[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6): 8649–8657.
- [60] 杨鑫, 胡笑涛, 王文娥. 沼液水培蔬菜的研究进展[J]. 北方园艺, 2015, (18): 199–202.
- [61] 吴冬青, 刘明池, 李明, 等. 沼液营养液对快菜生长和生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2012, (8): 27–29.
- [62] 俞超, 汪财生, 盛梦俊, 等. 沼液无土栽培蔬菜的应用效果[J]. 核农学报, 2015, 29(1): 178–182.
- [63] 梁飞虹, 崔秋芳, 涂特, 等. 基于水培技术的沼液净化及生菜品质提升[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 788–795.
- [64] 王菲凤. N 掺杂 TiO₂ 纳米材料可见光催化性能及其降解水中腐殖酸[J]. 环境工程, 2017, 35(1): 6–10, 58.
- [65] 肖文静, 黎军. 沼液光催化处理研究[J]. 安徽化工, 2017, 43(5): 72–75.
- [66] 石鹏飞, 赵平, 赵吉祥, 等. 种养一体化循环农业园区的接口技术及其生态经济效益分析[J]. 中国农业资源与区划, 2016, (12): 167–172.