

有机废弃物沼渣资源化利用现状及发展趋势

Present Situation and Development Trend of Biogas Residue Resource Utilization

张青青 陈平 李跃忠 张浪 梁晶*

ZHANG Qingqing CHEN Ping LI Yuezhong ZHANG Lang LIANG Jing*

基金项目:

湿垃圾处置固态残余物资源化利用途径研究(编号: G200202)

文章编号: 1000-0283 (2020) 06-0002-06

DOI: 10.12193/j.laang.2020.06.0002.001

中图分类号: TU986

文献标识码: A

收稿日期: 2020-04-24

修回日期: 2020-05-05

张青青

1992年生/女/山西运城人/硕士/上海市园林科学规划研究院、上海城市困难立地绿化工程技术研究中心、城市困难立地生态园林国家林业局重点实验室助理工程师/研究方向为城市土壤质量评价与改良修复(上海200232)

陈平

1984年生/男/浙江乐清人/博士/上海市园林科学规划研究院、上海城市困难立地绿化工程技术研究中心、城市困难立地生态园林国家林业局重点实验室工程师/研究方向为有机废弃物再利用(上海200232)

梁晶

1981年生/女/山西长治人/博士/上海市园林科学规划研究院土壤研究所所长、上海城市困难立地绿化工程技术研究中心、城市困难立地生态园林国家林业局重点实验室高级工程师/研究方向为城市土壤质量评价、修复及有机废弃物再利用(上海200232)

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: liangjing336@163.com

摘要

有机废弃物沼渣作为厌氧堆肥发酵的残留物,富含植物生长所需的氮、磷、钾等大量元素以及铜、铁、锰、锌等中、微量元素,将其资源化利用可以减少对环境的污染,对创建资源节约型、环境友好型社会具有重要意义。文章在总结前人研究的基础上阐述了沼渣的特性、资源化利用途径,梳理资源化利用过程中存在的问题,并提出相应对策。

关键词

沼渣;资源化利用途径;存在问题

Abstract

As a residue of anaerobic compost fermentation, biogas residue is rich in nitrogen, phosphorus, potassium, and other significant elements required for plant growth. As well as medium and trace elements such as copper, iron, manganese, and zinc, and its resource utilization can reduce the environmental impact pollution which is of great significance for creating a resource-saving and environment-friendly society. Based on summarizing previous research, the article expounds on the characteristics of biogas residue, the way of resource utilization, sorts out the problems existing, and proposes countermeasures.

Key words

biogas residue; resource utilization approaches; existing problems

随着中国城市建设和乡村振兴融合发展,生活垃圾、畜禽粪便、秸秆等有机废弃物的产量与日俱增,如2018年城市生活垃圾的清运量为2.28亿T^[1],2016年畜禽粪污产生量约38亿T,秸秆资源量为9.95亿T^[2],将这些废弃物进行无害化、减量化、资源化开发利用,对创建资源节约型、环境友好型社会具有重要意义。目前,城市主要通过厌氧发酵技术处置湿垃圾,农村通过沼气工程实现畜禽粪便、秸秆、有机垃圾等农业有机废弃物的无害化处理、资源化利用。沼渣作为厌氧发酵技术、沼气工程的副产物,如何合理资源化利用成为现在的研究热点。如上海市园林科学规划研究院开展了湿垃圾处置固态残余物资源化利用途径研究,重庆市风景园林科学研究院开展污泥和餐厨垃圾沼渣处理和园林资源化利用技术研究等。沼渣不仅富含氮、磷、钾等大量元素,还含有对作物生长起重要作用的有机质^[3],及铜、铁、锰、锌等中、微量元素^[4]。为了探究沼渣资源化利用现状及未来发展对策,文章从沼渣的特性、利用途径及发展趋势三方面进行研究。



1 沼渣的特性

目前,沼渣的原料主要为餐厨垃圾、畜禽粪便、农业废弃物、污泥等。不同原料厌氧发酵后的沼渣的理化性质不同(表1)。其中,不同沼渣的pH值差异不大,在6.54~8.41范围内,均符合NY525-2012《有机肥料》。含水率因发酵工艺的不同而差异较大,在7.7%~81.82%之间,其中覃银红等^[9]发现剩余污泥发酵的沼渣含水量在79.24%~81.82%。沼渣有机质含量差异较大,其中餐厨垃圾的有机质含量最高,约73.22%。畜禽粪便、秸秆、污泥等沼渣的总养分含量低于或略接近NY525-2012《有机肥料》,餐厨垃圾沼渣的总养分含量为8.97%,远高

于NY525-2012《有机肥料》总养分5%。秸秆沼渣中的中、微量元素含量远低于猪粪、猪粪+秸秆沼渣的含量。张浩等^[6]发现沼渣的营养价值较高,猪粪+玉米秸秆沼渣中干物质、粗蛋白、粗脂肪、粗灰分、粗纤维含量分别为8577 mg/g、99.0 mg/g、34.9 mg/g、10.7 mg/g、252.7 mg/g。

学者研究发现^[7,9],不同原料的沼渣均含有作物所需的N、P、K等大量元素、有机质,及Ca、Fe、Mg、Zn、Cu、Mn等中、微量元素,还含有畜禽鱼虾等所需的氨基酸、维生素等。因此,沼渣资源化利用途径较多,将其作为肥料施用于土壤,或制备育苗基质、营养土,或制备为饲料用于畜禽鱼虾具有很大潜力。

表1 不同原料厌氧发酵后的沼渣的理化性质(根据资料绘制)

	pH	含水率 (%)	有机质 (%)	腐殖质 (%)	总养分 (%)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	有效钾 (mg/kg)
牛粪	6.54	65.7	36.78	20.25	3.13	14.7	4.1	12.5	9.86	8.12	10.83 ^[6]
秸秆	8.41		60.3		4.84	19.4	5.7	23.3	440	2220	356 ^[6]
猪粪	7.62		47.4		5.10	26.2	19.9	4.87	1780	8480	180 ^[8]
牛粪+秸秆	7.71	7.7	49.53		5.88	21.12	19.22	18.52	427.3	427.3	531.9 ^[9]
猪粪+秸秆	6.62~8.01	22.36~39.60	5.06~15.44		<2.34	2.31~3.85	5.57~11.5	2.36~7.99	329.7~584.9	266.1~918.0	469.6~1400.2 ^[10]
剩余污泥	6.28~6.79	79.24~81.82	9.17~9.26		4.22~4.48						
餐厨垃圾	8.37	25.96	73.22	27.40	8.97	31.2	50.7	7.8			
NY525~2012	5.5~8.5	≤30	≥45		≥5						

2 沼渣资源化利用方式

2.1 基肥或追肥

沼渣可作为基肥或追肥用于农作物、蔬菜等，不仅可以提高了作物的抗病害性，减少化肥、农药的施用量，降低成本，又能有效地提高作物的产量和品质^[11]。许爱霞等^[12]发现大棚黄瓜施用沼渣作基肥，喷施沼液做追肥，可有效调节作物代谢、补充营养、增强光合作用、杀灭和抑制细菌，促使黄瓜生长健壮，且产量较对照处理提高39.98%，产值增加25.7万元/hm²。李会隆等^[7]发现在磷酸二铵使用量相同的情况下，制种玉米增施5 140 kg/hm²沼渣（鲜重）做基肥，具有促进植株生长，提高产量的作用，增产2 000 kg/hm²。Shi等^[13]发现沼渣按4 kg/m²、8 kg/m²、12 kg/m²的施用量在短期内可以改善盐渍土的有机质、含水量和pH值，提升谷子的品质。郭玉英等^[14]发现以沼渣配施复合肥或单施沼渣作基肥，生长前期追肥沼渣可以使黄瓜的始花期、始收期提前，采收期延长，使黄瓜增产和提升品质，同时也增强了黄瓜的抗病抗逆能力。刘龙海^[14]等将沼渣作基肥1亩施2 390 kg可以防辣椒日灼病，防效可达90%以上，且可以使辣椒增产600 kg。Wang^[15]通过田间试验，研究了不同沼气发酵渣处理对大白菜产量、品质及土壤养分积累的影响。结果表明，大白菜的产量和品质（维生素C和硝酸盐含量）均显著提高。厌氧发酵沼渣的施用提高了土壤pH值，增加了土壤有效氮、磷、钾的积累。

由于一些沼渣的营养含量低于肥料标准，不能够满足作物、花卉等的生长需求，故可将沼渣二次加工进行堆肥处置^[17-18]，提高沼渣的肥力。彭苏怡等^[19]发现紫茎泽兰发酵后的沼渣中腐殖酸含量为9.6%，有机碳含量为6.07%，再向其中添加氮磷元素可制备成腐殖酸肥料。张玉凤等^[20]发明一种沼渣有机肥及其制备方法，即将以沼渣为主要原料（用量大于80%），与腐植酸、氮肥、磷肥、钾肥及微量元素配合而制备。

2.2 制备育苗基质、营养土

沼渣可以同改良材料制备成育苗基质、营养土。杨秉康等^[21]发现木薯沼渣经过脱水、除去残余甲烷、搅拌、调酸、摊堆后可制备成育苗基质。尹淑丽等^[22]发现将猪粪沼渣同蛭石、吸附代谢产物草炭、珍珠岩按照重量比2.5~3.5:3:2.5~3.5:1可制备成黄瓜育苗基质。于海龙等^[21]发现55%~65%沼渣、15%~35%玉米芯、13%麸皮、5%玉米粉、2%石膏混合可作鸡腿菇培养料。高袖^[24]发现沼渣和有机辅料可以配制花卉营

养土，且当沼渣:锯末:泥土:骨粉的比例为6:2:20:1时营养土中养分含量较高，其有机质含量为43.26 g/kg、全氮11.33 g/kg、全磷0.67 g/kg、铵态氮1.65 mg/kg、速效磷57.86 g/kg、pH值7.46、含水率9.84%、容重1.09 g/cm³、比重2.38 g/cm³、孔隙率54.25%。罗之洋^[25]发现沼渣和泥土为1:1制备的营养土有利于早春糯玉米育苗。

2.3 制备生物炭

沼渣可以制备成生物炭吸附废水中氨氮、重金属等污染物。郑杨清等^[26]发现以猪粪和秸秆为原料发酵产甲烷的副产物沼渣可以制备生物炭，且用氢氧化钾活化的生物炭对沼液中氨氮的吸附效果较好，拟合计算最大吸附容量能达到120 mg/g。Xia等^[27]以猪粪沼渣为原料，制备了介孔活性生物炭，用于吸附水溶液中的As(III)。研究发现，在600℃下用2.5 mol/L ZnCl₂溶液活化的介孔活性生物炭表现出良好的热稳定性和介孔分布，总比表面积和介孔比表面积分别达到892.3 m²/g和701.7 m²/g，孔径主要在4~40 nm之间，As(III)的间歇吸附理论吸附量为5 861 μg/g。

2.4 制备土壤保水剂

王宇欣等^[28]以玉米秸秆沼渣为试验原料，采用硝酸-乙醇法提纯，丙烯酸为接枝单体、过硫酸钾为自由基引发剂、N,N-亚甲基双丙烯酰胺为交联剂，在微波加热条件下，通过接枝聚合反应制备沼渣纤维素土壤保水剂。其中，单体丙烯酸与秸秆沼渣纤维素的质量比为7，中和度为70.0%，引发剂与单体质量比为2.0%，交联剂与单体质量比为0.1%，合成的秸秆纤维素保水剂具有较高的吸水倍率。

2.5 饲料

沼渣由于富含畜禽鱼生长所需的氨基酸、维生素等，常被加工处理，制作成饲料。湖南旺森农牧有限公司采用“猪—沼—饲—蚓—肥”多元循环综合利用模式，将猪粪发酵后的沼渣用于饲养蚯蚓^[29]。福建省永安市和明溪县等地部分养殖场示范验证“猪—沼—萍—鱼”养殖模式可以大大降低养殖成本，节能减排，减少鱼类病害，提高鱼的品质^[30]。虞方伯等^[31]发现将木薯或红薯沼渣同黄芪药渣、紫苏、杜仲叶、马齿苋、预混料、玉米等材料混合可以制作鸡饲料，这种方法配制的鸡饲料营养丰富，提高了雏鸡机体的免疫能力，在饲养

过程中减少了各种疾病或感染的发生,减少药物的使用。徐翔等^[32]发现小麦制酒精废水生产的沼渣中富含蛋白质,蛋白质中的氨基酸含量均衡且高于鸡饲养标准(ZBB3005-86)所需的氨基酸,其制备的饲料对鸡有一定的营养价值。Bian等发现^[33]以小麦为原料生产沼气时产生的沼渣可以作为猪的蛋白质饲料,在20%的替代水平下作为饲料添加剂是安全的。

2.6 制备建筑材料

目前的研究常将沼渣作为造孔剂制备建筑材料,提高该材料的性能。冯云生等^[34]研究表明以沼渣为造孔剂、风积沙为骨料、废玻璃粉为烧结粘结剂、黏土为助粘结剂经高温烧制制备的烧结多孔材料具有良好的抗压强度和透水性,可用于透水材料。蹇守卫等^[35]发现利用干化沼渣作为造孔剂加入烧结墙体材料原料体系中,将沼渣掺量控制在10%、烧结温度制度控制在1 000 ℃并保温3 h时,制备出的烧结墙体材料满足MU10(GB 5101-2003)各项性能指标条件并符合环境保护要求。吴世明等^[36]以湖泊底泥和沼渣为主要原料,添加1% Fe₂O₃粉末,烧结温度为1 175 ℃、保温时间为30 min时,发现可制得轻质多孔的高性能陶粒。

3 存在问题及对策

由于沼气工程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,导致其资源化利用方式不同。目前,沼渣的资源化利用方式主要是制备肥料和饲料,但成本较高,且

当其过量使用时,会造成土壤盐化、重金属污染等环境问题,影响人畜健康^[37]。因此,如何高效对沼渣进行资源化利用,并对其产品进行无害化应用,是当前需要重点考虑的问题。

3.1 现存问题

(1) 沼渣的肥效低,需要进行二次堆肥发酵。在沼渣二次堆肥发酵的过程中,有机物质在微生物的作用下会散发大量臭味气体^[38],并且产生渗滤液,污染地下水。部分沼渣的含盐量较高,在二次堆肥发酵时需要耗费精力、成本去除。堆肥后的含杂率较高,可能会携带大量未经灭活的菌群,容易引起疾病传播。而且堆肥后的肥料成本较高,没有市场竞争力,销售困难。因此,如何高效、经济地解决除臭、除盐、含杂率等问题有待进一步的研究。

(2) 沼渣的施用会增加土壤中盐分以及地下水中硝态氮的风险。如郭全忠等^[39]发现长期使用沼肥会增加土壤养分,同时也增加了土壤中的盐分,连续使用沼肥7年,土壤电导率为0.366 mS/cm,是未施用沼肥土壤的4.74倍。沈月等^[40]发现沼渣资源化利用存在促进土壤次生盐渍化的潜在风险。

(3) 沼渣有增加土壤、动植物中重金属、多环芳烃等污染的风险(表2)。杨军芳等^[41]研究发现长期大量施用沼渣存在重金属积累导致土壤污染的风险,且在有机肥用量为22 500 kg/hm²时,与猪粪相比,沼渣作为有机肥的肥效低且污染风险性高。宋彩虹等^[42]发现沼渣堆肥处理后As、Cr、Cu、Pb、Zn总量均有不同程度的增加,As、Cr、Pb生物性降低,Cu、Zn的生物性增加。

表2 不同原料沼渣以及沼渣堆肥后的重金属含量

重金属	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cr (mg/kg)	As (mg/kg)
牛粪+秸秆	0.437	0.264	5.143	1.22	7.9 ^[9]
猪粪	0.15	0.03	8.66	19.2	8.12 ^[44]
猪粪	0.29	0.12	6.84	16.7	21.6 ^[8]
秸秆	0.23	0.11	12.7	14.0	5.46 ^[8]
猪粪+秸秆	0.78	0.0425	2.86	10.29	3.94 ^[10]
剩余污泥	1.16~1.57	1.67~1.94	41.23~48.29	116.57~137.06	9.76~10.75 ^[5]
餐厨垃圾	1.42	—	6.61	27.8	3.15
沼渣堆肥	669.63	未测	8.39	33.82	22.63
NY525-2012	≤3	≤2	≤50	≤150	≤15
GB 13078-2017	≤5	≤0.5	≤30	≤1	≤4
GB 4284-2018 (A级)	≤3	≤3	≤300	≤500	≤30



Stefaniuk 等^[43]对沼气固体残渣在三种热解温度(400℃、600℃和800℃)下产生的生物炭进行了分析,发现随着热解温度的升高,沼渣生物炭中多环芳烃和重金属(Cr、Cu、Cd、Pb、Mn)的含量增加。在800℃下产生的生物炭对植物和节肢动物不利,不利于土壤修复。整体来看,多数沼渣的重金属含量符合NY525-2012《有机肥料》、GB 13078-2017《饲料卫生》、GB 4284-2018《农用污泥污染物控制标准》等的要求,但仍有少部分的沼渣、沼渣堆肥产品中重金属含量超标。

(4) 为了加强沼渣作为肥料、饲料使用的安全性、规范化和程序化,各省市制定了一系列标准GB 4284-2018《农用污泥污染物控制标准》、DB62/T 2278-2012《沼液沼渣利用技术规程》、DB64/T 898-2013《水稻沼渣复混肥施用技术规程》、DB37/T 3482-2018《沼渣沼液在葡萄栽培上的应用技术规程》、DB37/T 1949-2011《设施黄瓜栽培沼渣沼液的应用技术规程》、GB 13078-2017《饲料卫生》等,但目前没有统一制定的国家标准。

3.2 解决对策

为了加快沼渣减量化、资源化、无害化的进程,可以从以下几个方面来解决现存的问题:(1) 开展将微生物菌剂及枯枝落叶应用于沼渣资源化利用的相关研究,进一步提高沼渣的发酵工艺、堆肥工艺,以提高沼渣肥效;(2) 明确沼渣在肥料和饲料中的施用阈值,探索沼渣中重金属等有毒有害物质的去除

技术,通过化肥和沼肥的配施降低硝态氮在土壤、水体中的累积;(3) 制定统一的沼渣资源化利用的技术标准规范,加强沼渣资源化利用方面的安全性把控和推广。

4 结语

沼渣作为厌氧发酵的产物,富含有机质、N、P、K等营养元素,资源化利用途径多样,可作为肥料、栽培基质、生物炭、保水剂等改良土壤,作为饲料养殖畜禽鱼类,也可作为多孔的建筑材料。但在资源化利用过程中仍存在沼渣肥效低;对土壤和水体存在潜在的致病细菌、盐分、硝态氮、重金属、多环芳烃等的污染;利用技术不统一、不规范,推广性差等问题。因此,在今后的工作中,提高沼渣肥效、去除或钝化沼渣中重金属、制定沼渣利用统一标准对提高沼渣的资源化利用率至关重要。■

参考文献

- [1] 分地区城市生活垃圾清运和处理情况(2018年)[EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexch.htm>.
- [2] 赵娜娜,滕婧杰,陈琪. 中国农业废物管理现状及分析[J]. 世界环境,

- 2018, (4): 44-47.
- [3] Coban H, Miltner A, Elling F J, et al. The Contribution of Biogas Residues to Soil Organic Matter Formation and CO₂ Emissions in an Arable Soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 86: 108-115.
- [4] 王德楷, 郑钦玉, 李建中. 三峡库区沼渣利用途径[J]. *中国沼气*, 2006, 24(3): 54-57.
- [5] 覃银红, 易艳, 王兰亭, 等. 剩余污泥发酵沼渣成分分析及脱水性能研究[J]. *环境污染与防治*, 2016, 38(8): 36-38+43.
- [6] 张浩, 雷赵氏, 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): 232-235.
- [7] 李会隆, 蒋自元, 鲁好余, 等. 制种玉米应用沼渣做基肥试验研究初报[J]. *农业科技与信息*, 2013(17): 33-33,37.
- [8] 董志新, 卜玉山, 续珍, 等. 沼气肥养分物质和重金属含量差异及安全农用分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (3): 105-110.
- [9] 张颖, 刘益均, 姜昭. 沼渣养分及其农用可行性分析[J]. *东北农业大学学报*, 2016, 47(3): 59-63.
- [10] 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(z1): 165-171.
- [11] Abubaker J, Risberg K, Pell M. Biogas Residues as Fertilisers – Effects on Wheat Growth and Soil Microbial Activities[J]. *Applied Energy*, 2012, 99(none): 126-134.
- [12] 许爱霞, 王永生. 沼肥在无公害黄瓜种植中的应用效果研究[J]. *园艺与种苗*, 2019, 39(5): 32-33.
- [13] Shi C F, Xie Y Y, Leng X Y, et al. Short-term Effects of Biogas Residue on Millet Properties, Soil Properties and Microbial Functional Diversity in Saline Soil[J]. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2020, 14(1): 108-113.
- [14] 郭玉英, 黎书伟, 赵世乐, 等. 黄瓜施用沼肥试验效果初报[J]. *现代农业科技*, 2007(17): 13-14.
- [15] 刘海龙, 周琦, 刘松奇. 沼渣做基肥对辣椒日灼病及产量影响试验[J]. *中国沼气*, 2010, 28(6): 50-51.
- [16] Wang Y, Shen F, Liu R, et al. Effects of Anaerobic Fermentation Residue of Biogas Production on the Yield and Quality of Chinese Cabbage and Nutrient Accumulations in Soil[J]. *International Journal of Global Energy Issues*, 2008, 29(3): 284.
- [17] 邱珊, 赵龙彬, 马放, 孙颖. 不同通风速率对厌氧残余物沼渣堆肥的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(8): 2402-2408.
- [18] 杨明超, 余光辉, 徐阳春, 等. 同步辐射红外显微成像原位表征沼渣堆肥前后有机物结构[J]. *农业工程学报*(B11): 138-142.
- [19] 彭苏怡, 庞兴翊, 唐郑康, 等. 以紫茎泽兰沼渣制作腐植酸肥料的实验研究[J]. *云南化工*, 2019, 46(10): 18-23.
- [20] 张玉凤, 董亮, 陈广思, 等. 沼渣有机肥及其制备方法[P]. 中国专利: CN101774848B, 2012-10-03.
- [21] 杨秉康, 邵建国, 陈琴笙. 木薯沼渣育秧基质及其生产工艺[P]. 中国专利: CN102219566B, 2013-11-27.
- [22] 尹淑丽, 李书生, 张丽萍, 等. 一种以猪粪沼渣为肥源的黄瓜育苗基质的制备方法[P]. 中国专利: CN102924174B, 2014-07-02.
- [23] 于海龙, 吕贝贝, 谭琦, 等. 一种鸡腿菇工厂化生产用培养料[P]. 中国专利: CN104860735B, 2018-05-08.
- [24] 高袖. 沼气发酵残余物制备高效复合营养土研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [25] 罗之洋. 沼渣和泥肥不同配比作营养土育糯玉米苗对比试验总结[J]. *农业科技与信息*, 2013(24): 41-42.
- [26] 郑杨清, 郝强强, 王海涛, 等. 沼渣制备生物炭吸附沼液中氨氮[J]. *化工学报*, 2014, 65(5): 1856-1861.
- [27] Xia D, Li H, Chen Z, et al. Mesoporous Activated Biochar for As(III) Adsorption: a New Utilization Approach for Biogas Residue[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(38).
- [28] 王宇欣, 王越, 王平智. 玉米秸秆沼渣土壤保水剂制备与性能表征[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 199-206.
- [29] 张艳春. “猪-沼-饲-蚓-肥”多元循环综合利用模式[J]. *湖南农业*, 2017(12): 21.
- [30] 樊海平, 薛凌展, 吴斌. “猪-沼-萍-鱼”草鱼池塘高效生态养殖模式[J]. *科学养鱼*, 2011(5): 43-44.
- [31] 虞方伯, 单胜道, 骆林平, 等. 一种含沼渣的鸡配合饲料[P]. 中国专利: CN103315175B, 2014-05-07.
- [32] 许翔, 卞宝国, 李吕木, 等. 小麦制酒精废水生产沼气后沼渣饲喂鸡的营养价值评定[J]. *饲料工业*, 2015, 036(017): 23-26.
- [33] Bian B G, Li L M, Si X Y, et al. Safety and Nutritional Evaluation of Biogas Residue Left After the Production of Biogas from Wastewater[J]. *Italian Journal of Animal Science*, 2015, 14(3).
- [34] 冯云生, 王天瑞, 夏宁, 等. 沼渣为掺料的风沙烧结透水材料的研究[J]. *化学工程师*, 2018, 32(12): 80-82.
- [35] 蹇守卫, 何桂海, 马保国, 等. 利用沼渣为掺料制备多孔烧结墙体材料的可行性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 034(11): 2222-2227.
- [36] 吴世明, 雷超, 张鹏, 等. 烧结制度和氧化铁含量对轻质多孔陶粒相关性能的影响研究[J]. *新型建筑材料*, 2018, 45(4): 9-12.
- [37] 王立国, 成剑波, 何腾兵. 沼肥还田下土壤硝态氮淋溶研究进展[J]. *贵州农业科学*, 2019, 47(03): 31-38.
- [38] Cerda A, Artola A, Font X, et al. Composting of Food Wastes: Status and Challenges[J]. *Bioresource Technology*, 2017: 57-67.
- [39] 郭全忠, 龚晓松, 刘化隆. 长期施用沼肥对设施菜田土壤养分和盐分累积量的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(01): 127-134.
- [40] 沈月, 叶波, 陆若辉. 沼液沼渣资源化利用对土壤次生盐渍化的潜在影响[J]. *土壤科学*, 2018, 6(1): 22-26.
- [41] 杨军芳, 史建硕, 黄少辉, 等. 施用沼渣对设施黄瓜及土壤重金属含量的影响[J]. *河北农业科学*, 2017, 21(04): 82-86.
- [42] 宋彩红, 魏自民, 席北斗, 等. 沼渣混合物料堆肥处理对重金属形态的影响[J]. *安全与环境学报*, 2013, 32(02): 64-68.
- [43] Stefaniuk M, Oleszczuk P, Bartmiński, Piotr. Chemical and Ecotoxicological Evaluation of Biochar Produced from Residues of Biogas Production[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 318: 417-424.
- [44] 武立叶, 石鹏飞, 王贵彦, 等. 猪粪发酵沼液沼渣在豇豆种植中的应用及重金属积累研究[J]. *作物杂志*, 2015 (6): 141-145.