

农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响*

吴树彪 崔 畅 张笑千 李 伟 庞昌乐 董仁杰
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 总结和归纳了国内外部分关于沼液农田施用增产提质效应及对水土环境影响的研究成果,表明沼液对于提高作物产量与品质、促进植物种子萌发、防治病虫害、提高土壤养分含量具有积极作用,但大量施用对于水土环境存在污染风险。说明在沼液施用程中,应充分考虑作物及农田对于沼液的承载能力,在对土壤及地下水没有污染的前提下选择用量,对其在农产品生产中的安全性进行系统、定量的监测和安全评价,这样既能节省对化肥的需求,减少农民的生产成本,又为沼气工程处理沼液提供了科学指导,有利于预防农田消纳沼液时潜在的环境风险发生。

关键词: 沼液 产量 品质 土壤 环境
中图分类号: S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0118-08

Effect of Biogas Slurry on Yield Increase, Quality Improvement, Water and Soil Environment

Wu Shubiao Cui Chang Zhang Xiaoqian Li Wei Pang Changle Dong Renjie
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper comprehensively summarized the research results from domestic and foreign studies of the effect of biogas slurry farmland application on plants yield and quality, and the effect on water and soil environment. It showed that biogas slurry played a positive role in improving the quality and yield of crops, improving plant seed germination, prevention and treatment of plant diseases and insect pests, and improving soil quality. However, an excess amount of biogas slurry application could lead to the pollution risks of water and soil environment. It should fully consider the land carrying capacity for biogas slurry and choose appropriate dosage which had no pollution on soil and groundwater, so that the demand of fertilizer could be saved and the production cost of farmers could be reduced. It could provide scientific guidance for biogas project handling biogas slurry.

Key words: Biogas slurry Yield Quality Soil Environment

引言

随着全球能源危机和环境问题的日益加剧,能源与环境已成为各国社会经济文化发展的重要议题,寻求新能源与环境保护一直是各国寻求可持续发展的重要问题之一。中国作为农业大国,近年来规模化畜禽养殖业获得了迅猛发展,以标准猪计全国规模化养殖数量自 2002 年的 9 995 万头增至

2009 年的 42 114 万头^[1],增长了 321%,畜禽养殖业的发展缓解了人口增长带来的食物压力,有效提高了农民收入,但同时也带来了巨大的环境问题。如果畜禽养殖场没有合理的粪污处置和综合利用设施,大量畜禽粪污未经处理直接排入水体,将对地面水体和地下水产生严重的污染,水中的致病微生物会导致存在大规模疾病暴发和流行的潜在危险,超量的未经发酵的粪便直接进入田地,粪便中的有害

收稿日期: 2013-01-25 修回日期: 2013-01-30
*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD47B00)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013XJ003)
作者简介: 吴树彪,讲师,博士,主要从事废弃物处理与资源化利用研究,E-mail: wushubiao@gmail.com
通讯作者: 董仁杰,教授,博士,主要从事生物质能源工程与低碳技术研究,E-mail: rjdong@cau.edu.cn

细菌会严重影响作物的生长。

沼气发酵技术是一种有效处理和利用畜禽粪便的方法,其产生的沼气是一种廉价的能源替代品,综合利用价值较高。在中国,由于能源、环境压力和政府的大力支持,我国沼气产业的发展突飞猛进,取得了显著成效,厌氧发酵工艺已在大中型沼气和农村户用沼气中得到了广泛应用,给人们生活带来了便利和清洁的能源,截至 2011 年底,全国沼气工程达 7.27 万处,其中大型沼气工程 4 631 处(单体装置容积 300 m³ 以上),中型沼气工程 2.28 万处(单体装置容积 50 ~ 300 m³)^[2]。

随着沼气技术的不断推广,沼气工程数量的不断增加,在产生沼气的同时还产生了大量副产物,即沼液沼渣,沼液沼渣的综合利用是沼气工程应用的关键技术之一。目前我国,经固液分离后大部分沼渣被当作肥料使用,还有少量沼渣被配制成基质,用于蔬菜、花卉的育苗或是食用菌的栽培,沼液多用于农田灌溉,以及浸种和叶面喷施等。农田施用沼

液已有很久的历史,关于其对农作物增产提质的报道很多,但是结论不一,此外有关农田施用沼液对水土环境影响的研究也较少,缺乏全面的综述来进行总结,指导未来生产。因此本文将对农田施用沼液对作物产量、品质和水土环境的影响进行综合分析和归纳,同时对今后农田施用沼液及减量化处理作出展望。

1 沼液营养分析

沼液含有大量丰富的营养成分,是农作物的无公害长效肥料,施用后能增产增收、改善土壤结构^[3],在研究农田施用沼液对作物的增产提质效应前,需要对沼液的营养成分进行分析。

沼液的主要成分包括发酵过程中产生的有机、无机盐类(如铵盐、钾盐、磷酸盐等)、微量元素(如钙、铜、铁、锌、锰等)和多种水解酶(如纤维素酶、蛋白酶、淀粉酶等)等可溶性物质^[4],不同发酵原料的沼液中营养成分的含量如表 1 所示。

表 1 沼液营养成分
Tab.1 Characteristics of biogas slurry

发酵原料	pH 值	总氮质量浓度/g·L ⁻¹	氨氮质量浓度/g·L ⁻¹	总磷质量浓度/g·L ⁻¹	总钾质量浓度/g·L ⁻¹	文献
猪粪	7.0 ~ 7.6	0.55 ~ 1.13	0.3 ~ 0.65	0.05 ~ 0.26	0.1 ~ 0.64	[5 ~ 13]
牛粪	7.33 ~ 8.47	1.73 ~ 3.45	1.2 ~ 2.9	0.51 ~ 0.21		[14 ~ 16]
猪粪 + 秸秆	8.26	1.04		0.26	1.45	[17]

此外,相关学者指出沼液中还含有一些具有生物活性的物质,其对植物有生理调节作用,且种类相当复杂,已经测出有氨基酸类(不少于 17 种)、植物激素类(吲哚乙酸质量浓度 332 μg/L、赤霉素类 GA₄ 质量浓度 0.86 μg/L、GA₁₉ 质量浓度 1.47 μg/L、GA₅₃ 质量浓度 0.27 μg/L、细胞分裂素 iPR 质量浓度 0.002 μg/L 等^[18])、B 族维生素类(维生素 B₁₂ 等)、抗生素类(多烯类)和抗冷物质(脯氨酸、亚油酸、黄腐酸等)等^[19 ~ 21],而且长期的厌氧发酵环境使大量的病菌、虫卵和杂草种子窒息而亡^[22]。由此看出,沼液的速效营养能力强,养分可利用率高,且不带活病菌和虫卵,是多元、卫生的速效复合肥料,具有较高的应用价值,目前国内沼气工程中产生的大量沼液已被作为高效的绿色肥料应用于农作物灌溉、浸种和喷施上^[23]。

2 农田施用沼液对作物产量、品质的影响

2.1 农田灌溉沼液

2.1.1 作物产量

沼液中含有丰富的营养物质和维生素、生长素等生物活性物质,这些在发酵过程中形成的小分子

物质,其结构简单,易于被作物吸收,能向作物提供氮、磷、钾等主要营养元素,并且有助于植物体内的氮代谢,可以促进植物根系发育,增强植株的抗病能力,使得沼液作为一种液态速效肥料,具有较好增产效果。沼液对部分农作物产量的影响如表 2 所示。

从表 2 可以看出,沼液作为肥料使用,已有学者在粮食作物、蔬菜、水果及牧草等的种植中展开了研究,通过对比不同地域及不同发酵原料的沼液施用效果,及沼液与化肥配施^[5, 32]、沼液灌溉结合叶面喷施来看^[31],作物产量较对照分别提高了 10% ~ 128%,表明沼液对于提高作物的产量具有普遍性,但是不同发酵原料的沼液对不同种类作物的增产机制还需进一步研究。

同时由表 2 看出,沼液的增产效果是建立在足量的氮素供应之上,当沼液的供氮量不足时,各实验中的沼液处理组增产效果不明显,有的甚至达不到化肥处理的产量,只有当沼液提供的氮素高于化肥,即加大沼液施用量时,才会表现出明显的增产效果^[7, 28]。以玉米的研究为例^[7],当沼液每公顷总用量低于 7.5 × 10⁴ kg 时,各处理玉米产量均低于化肥

处理,最大降幅达 6%;以辣椒为例^[28],当沼液供氮量与化肥处理相当时,辣椒产量约为 43 t/hm²,比化肥处理减产 16 t,减产 27%。同时随着沼液用量的增加,作物产量基本上呈增加的趋势^[7, 24~27]。分析原因可能是因为施用沼液后部分氮素会随着土壤水

分的下渗而分布到作物根区以下的土层,难以被其吸收利用,一部分氮素还会随着氨气挥发,而足量的沼液可以弥补这一损失,沼液中的一些微量元素如铁,及一些生长素如吲哚乙酸等开始表现出对细胞酶活性和作物生长的促进作用。

表 2 沼液对作物产量的影响
Tab.2 Effect of biogas slurry on crop yields

类型	作物	实验地点	发酵原料	结果	文献
粮食作物	水稻	浙江省嘉兴市	猪粪	3 种处理水平产量随沼液施用量提高而显著增加,最高产量达 140 175 kg/hm ² ,比前 2 个处理分别提高 14% 和 10%	[24]
	玉米	四川省资阳市	猪粪	每公顷沼液用量在 75 000 ~ 105 000 kg 时,才可获得与化肥处理相近的产量	[7]
	小麦	新德里		不同沼液用量都使产量提高达显著差异,最高为 40%	[25]
	高粱			通过盆栽实验表明,株高、鲜质量、干质量分别可比对照提高 72 cm、27 g、6 g	[26]
蔬菜	小白菜	上海市	猪粪	各处理较对照组都有增产,最高达 98%	[27]
	辣椒	浙江省嘉兴市		施用相当于 2 ~ 3 倍化肥氮的沼液量可获得与常规化肥处理相近的辣椒产量	[28]
	大葱	贵州省遵义市		最大沼液用量的处理产量达 46 725 kg/hm ² ,比对照提高 15%	[29]
	大白菜	上海市	猪粪	低沼液用量的处理达到最高产量,产量 20 460 kg/hm ²	[30]
	甘蓝	浙江省杭州市	猪粪	沼液与化肥配施较对照最高可增产 16%	[5]
水果	苹果	河北省保定市	猪粪	以沼液灌溉结合叶面喷施的方式,单棵产量平均最高为 400 kg,比对照提高 13% ~ 20%	[31]
	西瓜	北京市	鸡粪	沼液与化肥配施单果质量比化肥处理可提高 51%	[32]
牧草	牧草	福建省南平市	牛粪	用沼液灌溉 2 年后每公顷比对照增产 113 t,提高了 59%,但随着继续施用,增产效果降低	[33]
	皇竹草	重庆市江北区	牛粪	沼液处理产量均高于对照,最高达 163 kg,提高 128%,但随着沼液用量的增加,产量会下降	[14]

然而,随着沼液用量的增加,并不能完全保证作物产量随之一直提高^[14, 30],例如表 2 中以皇竹草^[14]为研究对象时发现,虽然施用沼液后各组产量均高于对照,但每小区施沼液 400 L 的处理总产量比施 100 L 和 200 L 的处理分别降低 28% 和 31%,分析其原因可能是由于大量施用沼液,土壤中的硝化机制被抑制所致。由于类似结论未见大量报道,所以不断提高沼液用量对于作物产量的影响,即不同作物对于沼液的耐受程度还需要做进一步研究。

2.1.2 作物品质

农作物的品质包括维生素、糖分、硝酸盐以及蛋白质和矿质元素等因子,其中以维生素 C 最为重要,因为人体不能自身合成,需要从蔬菜和水果中摄取,其次是糖分,可溶性糖是影响口感的主要因素之一,并对作物采后贮藏、运输中的营养品质变化也有重要影响^[34]。农作物体内的硝酸盐是影响人体健康的重要因子,硝酸盐本身没有毒性,但是人体摄取的硝酸盐在酶的作用下还原成亚硝酸盐,吸收到血液中与血红蛋白反应,形成高铁血红蛋白从而导致高铁血红蛋白症。据资料显示人体摄入的硝酸盐 80% 来自蔬菜,因此我国在 2001 年制定的农产品安全质量系列标准中,农产品的硝酸盐限量作为一个

重要指标列入其中^[5]。表 3 是一些研究中关于沼液施用对作物品质影响的研究结果。

由表 3 可以看出,施用沼液对于作物维生素 C 含量的影响不尽相同,虽然有学者在针对莴笋、玉米^[7, 35]等的研究中发现沼液使其维生素 C 含量降低,但大部分实验发现沼液对于提高作物维生素 C 含量具有积极影响^[27, 31~32, 36]。以甘蓝为研究对象时发现^[5],当沼液用量超过 13 kg/m² 时,促进作用不明显,潘丽娜等分析认为这是因为高浓度的沼液造成土壤溶液浓度过高,影响根系内外的水势,不利于沼液扩散,根系不能充分吸收,从而影响养分向地上部分运输,影响植株的品质^[37],这也印证了上文提到作物对于沼液用量有一定的耐受值,施用沼液时必须要有有一定的浓度限制,沼液浓度较大未必能达到较好的效果,还可能造成肥料浪费且不利于植物正常生长。

沼液对作物中硝酸盐含量的影响在各文献中得到了较为一致的结果,与化肥相比,沼液对于减少硝酸盐的含量具有显著作用^[5, 27, 32, 35~36],这可能是因为沼液中含有包括 Mo、Mn 等多种微量元素,有利于提高硝酸还原酶的活性,可以有效降低植株体内硝酸盐的积累。还有一种解释认为由于沼液中有有机质含量高,植株光合作用和蒸腾作用增强,加速了叶

表 3 沼液对作物品质的影响

Tab.3 Effect of biogas slurry on crop qualities

作物	维生素 C	硝酸盐	其他	文献
小白菜	追施不同浓度的沼液可明显提高维生素 C 含量,且中浓度处理最好,较对照提高 30%	沼液作追肥对小白菜硝酸盐含量有明显的降低作用,各处理较对照都降低 7.5% 以上	中浓度处理的可溶性糖含量比对照提高 66%,高浓度和低浓度处理比对照低	[27]
甘蓝	各处理维生素 C 含量较对照都有提高,最高达 20%,当用量增大到一定程度时,维生素 C 含量降低	沼液与化肥配施较单施化肥最大可降低 13%	施用沼液降低了甘蓝中还原糖的含量,施用量越大,还原糖含量越低	[5]
芹菜	施用沼液可显著提高维生素 C 含量	一次施用 900 mL 沼液做追肥的硝酸盐含量比化肥处理下降 32%	一次施用 900 mL 沼液做追肥的还原糖含量比化肥处理提高 51%	[36]
莴笋	沼液使莴笋叶、茎维生素 C 含量分别较对照下降 3% ~ 23%、7% ~ 30%,且用量越大降幅越大	每钵施沼液 500 mL,硝酸盐含量较对照降低 54%	还原糖降低 8% ~ 40%	[35]
苹果	比对照平均高 12 mg/kg		施用沼液的果实个大,着色好,脆硬多汁	[31]
西瓜	沼液与化肥配施,较对照可提高 17%	沼液与化肥配施较单施化肥降低了 20%,但两者较未施肥处理都有显著提高,最高达 35%		[32]
玉米	随着沼液用量的增加而降低		籽粒蛋白质、脂肪含量呈上升趋势	[7]

片硝态氮的转化,相对提高了叶片钾的含量,降低了叶片中的氮钾比例,从而降低作物体内硝酸盐的含量^[38]。

沼液对于作物其他品质,如口感、色泽、可溶性糖、还原糖、蛋白质等的影响与维生素 C 类似,当沼液用量在合适的范围内时,对提高作物上述品质具有促进作用。综上,当农户进行沼液灌溉时,不能盲目的提高沼液用量,要综合考虑沼液对于作物产量、品质的影响,选择合适的施用水平,这样才能在得到丰收的同时,保证产品的质量,降低生产成本,提高效益。

2.2 沼液浸种对幼苗发芽的影响

随着沼气事业的不断发展,沼液除了农田灌溉,用于作物增产提质外,沼液浸种的利用方式也已逐渐被广大农民认识。沼液浸种与其他药剂浸种相比,不仅可以提高种子的发芽率、成秧率,促进种子生理代谢,提高秧苗素质,而且可以增强秧苗的抗寒、抗旱、抗逆性能,是一项简便易行的实用技术^[39]。

沼液含有发酵原料中作物难以吸收的大分子被微生物分解后的产物,由于其结构相对简单,能够被作物直接吸收,向作物提供氮、磷、钾等主要营养元素,通过浸种可以刺激种子发芽和生长,为种子发芽及幼苗生长提供营养。沼液中还有一些活性物质,如氨基酸、生长素、赤霉素、纤维素酶、单糖、腐植酸、不饱和脂肪酸、维生素及某些抗菌类物质,它们对作

物生长发育具有重要调控作用,通过浸种,这些物质使种子内部酶的活性得到激发,刺激胚细胞分裂,促进细胞生长,调控生长基因,起到发芽快,芽齐、苗壮的作用^[39]。

同时,沼液浸种能有效地提高幼苗的抗寒功能,减轻低温胁迫下对原生质的伤害,具有保持细胞完整性的效应。众多文献报道,这与沼液中的脯氨酸、亚麻酸、亚油酸、脱落酸等抗冷物质有关。表 4 为邱凌等^[40]总结的不同发酵原料的沼液中各种抗冷物质的含量,其中脯氨酸是水溶性最大的氨基酸,它能促进蛋白质水合作用,由于亲水、疏水表面的相互作用,蛋白质胶体亲水面积增大,能使蛋白质沉淀,因此当植物处于低温胁迫时,它能使植物具有一定的抗性和保护作用^[41]。亚麻酸、亚油酸等饱和和脂肪酸能保护植物细胞质膜在低温下不因受冷而凝固、断裂,维护了胞膜的正常功能。脱落酸能有效地缓解在低温胁迫下幼苗叶绿素和水分含量的下降,有利于幼苗鲜质量相对提高^[42]。

表 4 沼液中含有的抗冷物质

Tab.4 Content of chill resistance agents in biogas slurry

沼液	脯氨酸 质量浓度 /mg·mL ⁻¹	亚麻酸质量 分数/%	亚油酸质量 分数/%	脱落酸 质量浓度 /μg·mL ⁻¹
猪粪发酵液	6.99 × 10 ⁻²	2.62	6.26	<0.1
鸡粪发酵液		2.38	10.17	<0.1
人粪发酵液	5.35 × 10 ⁻²	1.52	11.69	<0.1
混合发酵液	2.047 × 10 ⁻¹	1.09	7.08	<0.1

陈仙平等^[43]用不同浓度的沼液对新、陈水稻种子进行浸种实验,发现用沼液原液浸泡的高活力的新种子发芽率比清水浸种提高了 4%,成秧率提高了近 11%;低活力的陈种用沼液处理后发芽率与对照相比无显著差异,并且当沼液浓度很高或者浸种时间过长时,对种根有烧伤现象,发芽率反而会下降。丁肖兰^[44]对水稻的浸种实验也发现了类似结果,同时指出,作为判断根系生长状况的秧苗白根数,沼液浸种比对照的白根率提高了 5%,收获后浸种处理产量为 8 820 kg/hm²,比对照提高了 3%。

邱凌等^[40]在西北半干旱地区进行的小麦实验表明,浸种后小麦的出苗率高达 100%,比对照提高了 25%;苗期根质量、根苗比显著增加,次生根平均为 7.2 根,平均根长为 17.7 cm,分别比对照的 6.4 根和 7.1 cm 高出近 11.7% 和 149.2%;沼液浸种 16 株 22 d 总生物量为 3.1 g,比对照 1.9 g 多 63%,其根系生长量比对照增加 175%,茎叶生长量比对照增加 33%。

除了粮食作物,沼液浸种对其他农作物的影响也有学者开展了研究。袁大刚等^[45]通过 2 因素完全随机实验设计研究了不同沼液浓度、浸种时间对万寿菊种子发芽及幼苗生长的影响,表明质量分数 25%、50%、75% 的沼液浸种时间分别为 5、4、3 h 时,可达到该浓度的最佳效果,发芽率分别达到 81%、81%、79%;质量分数 25% 沼液浸种 2、3 h,根长达 3.7 cm;质量分数 50% 浸种 5 h,根长达 4.3 cm;质量分数 75% 浸种 4 h,根长达 3.7 cm。同时发现,低浓度沼液浸种时间适当延长可提高发芽率,而长时间原沼液浸种万寿菊种子发芽率最低,这可能是由于时间过长,影响种子呼吸作用,浓度过高,对种子造成毒害作用,从而影响种子发芽率。

2.3 沼液喷施防治病虫害

除了沼液肥用和沼液浸种,沼液通过直接喷施作物对病虫害的防治作用也已被大量的实践所证明。沼液作为厌氧发酵后的残留物,其中的虫卵含量显著减少,同时含有的大量抗生素和维生素等可有效地抑制和杀灭植物病原菌和害虫,因而沼液能防治多种农作物病虫害,减少病虫害的发生,从而可减少施或不施农药^[46]。

沼液喷施小麦,对小麦全蚀病、赤霉病、禾谷镰病的预防效果显著。小麦全蚀病是一种毁灭性病害,至今还无有效的防治办法,但喷施沼液后,对小麦全蚀病的防治效果相当显著,其白穗率仅为 6.0%,而对照则高达 40%;喷施沼液对小麦赤霉病防效与多菌灵相当,发病率比对照下降 20.7%,相对防治效果可提高 44.8%,对小麦禾谷镰病也有极

强的抑制作用^[46];用沼液对大麦叶锈病心病株进行泼施防治,病害不再蔓延;沼液对棉花炭疽病有极强的抑制作用,即使质量分数 10% 的沼液对其病菌也有抑制作用;沼液对玉米小斑核病菌和大斑核病菌的抑制作用,与抑制棉花炭疽病菌的效果是一致的;窖藏的甘薯,喷施沼液后,甘薯软腐病的发病率比对照降低 54.5%^[47]。

沼液对蚜虫、菜青虫、红蜘蛛、白粉虱等近 20 种害虫有明显的抑制作用,对多种青霉和曲霉有不同的抑制效果^[47]。据报道沼液对一些害虫的杀抑效果与许多现行使用的农药相当或更甚之,其中对红、黄蜘蛛的杀灭率为 95% 以上,矢尖蚱为 92%,蚜虫为 93%,清虫为 99.4%^[48]。

此外,也有学者对沼液与农药合用开展了研究,比如沼液与氧化乐果混合喷施麦地,平均杀虫率达 99.25%,比单用氧化乐果等农药防治的杀蚜率提高 5%;与乐果结合喷施麦地平均杀虫率达 98.3%,可提高杀虫率 15%;应用沼液防治蚜虫,可减少农药用量 60% 以上^[46]。

3 农田施用沼液对水土环境的影响

3.1 土壤环境

农田沼液施用对土壤理化性质的影响,如表 5 所示。针对不同地域、不同土壤类型的研究表明,沼液对于提高土壤有机质的含量具有一定促进作用,有机质能吸附较多的阳离子,使土壤具有保肥力和缓冲性,它还能使土壤疏松和形成结构,从而改善土壤的物理性状,它也是土壤微生物必不可少的碳源和能源,由此看来,长期施用沼液对培肥地力有着积极影响。同时有部分学者^[11, 13, 51]指出施用沼液也可能导致土壤 pH 值降低,电导率升高,长期施用可能会有土壤发生盐渍化的风险,易导致土壤板结。

另一方面,随着沼液的不断使用,沼液中含有的微量重金属开始在土壤中积累,虽然土壤-植物系统对沼液中的重金属具有较强的净化作用,在一定用量范围内不会对土壤造成污染,但现实的问题是,由于缺乏相应的沼液还田标准,长期大量的沼液灌溉,使得土壤中的重金属积累,有造成污染的风险。段然等^[52]对连续施用了沼液 6 年的土壤进行取样测定,研究发现施用沼液的土壤中 Cu、Zn 含量明显增高,其他重金属含量也均高于对照土壤。

3.2 水环境

由于沼液含有大量在厌氧发酵过程产生的氨氮及磷酸盐,使其本身造成对水体污染的威胁,沼液施入土壤后通过农田水分的运移,对周边地表水和地下水都有潜在的污染风险。资料表明,当施用沼液

表 5 沼液对土壤理化性质的影响

Tab.5 Effect of biogas slurry on soil qualities

土壤类型	实验地点	结果	文献
褐土	北京市大兴县	表层土壤全氮含量提高 65% ,土壤 pH 值下降 0.4	[11]
	浙江省宁波市	对 pH 值和速效成分影响不大,有机质和总 N 含量较对照分别可增加 23%、32%	[10]
红壤土	浙江省嘉兴市	全 N 质量分数、速效 P、K 质量分数较对照分别可增加 10%、16%、28% ,但土壤 EC 有上升趋势	[28]
	浙江省慈溪市	较化肥提高了土壤 pH 值,最高达 0.5 ,pH 值接近中性,对速效 N、P、K 的培肥效果不如化肥	[49]
	福建省福清市	0~30 cm 土壤全 N 出现积累,对碱解 N、全 P 和速效 P 没有影响	[50]
砂壤土	广西自治区南宁市	沼液与化肥配施有机质质量分数比对照提高近 50% ,速效 N、P、K 显著积累,但 pH 值有下降趋势	[51]
灰钙壤土	新疆自治区伊犁市	耕层土壤 pH 值减低 3% ,EC 增加 4% ,有发生土壤次生盐渍化的风险	[13]

于土壤后,沼液中大量的氨氮在硝化作用下会形成硝态氮,由于硝态氮与土壤颗粒均带负电荷,所以硝态氮不易停留在植物根区,而是随土壤中的渗滤液流入下部水层,对土壤和地下水造成污染,是水体富营养化的极大隐患。

袁新民等^[53]指出,土壤中累积的 NO₃⁻-N 在降水或灌溉作用下,会不断向下淋洗,直至污染地下水;Matsunaka 等^[54]采用奶牛场沼液连续灌溉 3 年梯牧草,发现硝态氮淋失占沼液总氮的 6%~12%;Yadav^[55]通过计算得出,每年大约有 15% 的当季氮肥,20% 的根层残留硝态氮,68% 的非根层残留的硝态氮进入地下水。

因此,有学者提出,对于不同地区的不同种植方式,应根据产量水平、作物的吸氮量等进行推荐施肥,这样就可减少土壤中 NO₃⁻-N 的累积及淋失^[56~57]。李彦超等^[58]采用杂交狼尾草盆栽实验,发现随着沼液灌溉强度的提高,渗滤液和土壤中总氮、氨氮、硝态氮含量升高,继续提高灌溉强度,可能导致硝态氮下降,由此确定沼液灌溉的适宜强度是控制沼液质量分数不超过 50% ,渗滤液总氮、氨氮、硝态氮质量浓度分别稳定在 53~58 mg/L、53 mg/L 和 3 mg/L 以内,这个强度与一定时间内的沼液灌溉量及其养分含量有关,并受气候、土壤、植被的影响。姜丽娜等^[59]发现连续 3 年水稻生长季消解沼液 135~540 kg/hm² 范围内,田面水中氨氮含量提高,

但对土壤渗滤液氮含量影响较小,年安全容量为 540 kg/hm²。

4 结束语

通过农田沼液施用、浸种及喷施对作物产量、品质和水土环境影响的总结看出,沼液对于提高作物产量与品质、提升土壤肥力、促进植物种子萌发、防治病虫害等方面具有积极作用,但长时间、大量使用对于作物品质及土壤、地下水存在污染风险。农户由于自身的局限性,在实际生产中往往只关注提高作物产量,一味的加大沼液用量,而忽视了此举给水土环境带来的不可逆污染,这就要求广大科研工作者对沼液在农业生产中的用量进行系统的、量化的监测和安全评价,充分考虑农田对于沼液的承载能力,在对土壤及地下水没有污染的前提下为农户提出合理的用量范围,还可以发展沼液膜处理、沼液氨氮吹脱、沼液回流等新兴技术,在源头上减轻沼液的处理压力,这样既能节省对化肥的需求,减少农民的生产成本,又为沼气工程处理沼液提供了科学指导,有利于预防农田消纳沼液时潜在的环境风险发生。同时,还应扩展传统的沼液处理方式,如开发沼液营养液、利用人工湿地等生态手段处理沼液,以期实现对其的高值利用与无害化排放,而沼液营养成分的变化规律及对农作物增产提质的机理还需开展深入研究。

参 考 文 献

1 付强, 诸云强, 杨红新, 等. 2002—2009 年中国规模化畜禽养殖量区域差异及政策建议[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 185~191.
Fu Qiang, Zhu Yunqiang, Yang Hongxin, et al. Regional differences of livestock and poultry breeding output in scale and policy suggestions during 2002—2009 in China[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(18): 185~191. (in Chinese)

2 郝先荣. 中国沼气工程发展现状与展望[J]. 中国牧业通讯, 2011(12): 28~31.
Hao Xianrong. Present situation and prospect of biogas projects in China[J]. China Animal Husbandry Bulletin, 2011(12): 28~31. (in Chinese)

3 姚向君, 郝先荣, 郭宪章. 畜禽养殖场能源环保工程的发展及其商业化运作模式的探讨[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 181~184.
Yao Xiangjun, Hao Xianrong, Guo Xianzhang. Commercialized operation model and development of integrated energy-environment engineering on scaled livestock farms[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 181~184. (in Chinese)

- 4 刘喜龙, 刘建伟, 刘宾. 沼液安全利用研究现状及进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(2): 968~971.
Liu Xilong, Liu Jianwei, Liu Bin. Research status and progress on safe use of biogas slurry[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(2): 968~971. (in Chinese)
- 5 覃舟. 施用沼液对紫甘蓝产量、营养品质及土壤质量的影响[J]. 江西农业学报, 2009, 21(7): 83~86.
Qin Zhou. Effect of biogas slurry application on yield, nutrition quality of purple cabbage and soil quality[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2009, 21(7): 83~86. (in Chinese)
- 6 王卫平, 朱凤香, 陈晓旻, 等. 沼液浇灌对土壤质量和萝卜产量品质的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 484~487.
Wang Weiping, Zhu Fengxiang, Chen Xiaoyang, et al. Influence of biogas slurry irrigating on the soil environment and radish quality[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(24): 484~487. (in Chinese)
- 7 陈璧瑕. 沼液农用以玉米产量、品质及土壤环境质量的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
Chen Bixia. Effect of the agricultural usage of biogas slurry on maize yield, quality and environmental quality of soil[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 8 王卫平, 朱凤香, 陈晓旻, 等. 沼液农灌对土壤质量和青菜产量品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(1): 73~76.
Wang Weiping, Zhu Fengxiang, Chen Xiaoyang, et al. Effect of biogas slurry irrigation on soil quality and yield quality in Brassica chinensis[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2010, 22(1): 73~76. (in Chinese)
- 9 王宗寿. 利用沼液种植黑麦草对土壤环境质量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 172~175.
Wang Zongshou. Effects of fertilization with biogas slurry on soil planting tetragold-ryegrass[J]. Journal of Agro-environment Science, 2007, 26(2): 172~175. (in Chinese)
- 10 王卫平, 陆新苗, 魏章焕, 等. 施用沼液对柑桔产量和品质以及土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2 300~2 305.
Wang Weiping, Lu Xinmiao, Wei Zhanghuan, et al. Influence of applying biogas slurry on yield and quality of cirrus and soil environment[J]. Journal of Agro-environment Science, 2011, 30(11): 2 300~2 305. (in Chinese)
- 11 陈永杏, 董红敏, 陶秀萍, 等. 猪场沼液灌溉冬小麦对土壤质量的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 154~158.
Chen Yongxing, Dong Hongmin, Tao Xiuping, et al. Effect of irrigating winter wheat with anaerobic digested swine farm wastewater on soil quality[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(3): 154~158. (in Chinese)
- 12 李彦超, 廖新悌, 林东教, 等. 不同沼液灌溉强度对土壤和渗滤液的影响[J]. 家畜生态学报, 2009, 30(4): 52~56.
Li Yanchao, Liao Xindi, Lin Dongjiao, et al. Effects of irrigation intensity of fermented slurry on soil and leaching liquid[J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2009, 30(4): 52~56. (in Chinese)
- 13 杨乐, 张凤华, 庞玮, 等. 沼液灌溉对绿洲农田土壤养分的影响[J]. 石河子大学学报, 2011, 29(5): 542~545.
Yang Le, Zhang Fenghua, Pang Wei, et al. Effect of biogas fluid irrigation on soil nutrient in oasis farmland[J]. Journal of Shihezi University, 2011, 29(5): 542~545. (in Chinese)
- 14 何玮, 王琳, 张健. 沼液不同施用量对皇竹草产量及土壤肥力的影响[J]. 草业与畜牧, 2012(2): 5~7, 15.
He Wei, Wang Lin, Zhang Jian. Effects of application amounts of biogas slurry on yield of *Pennisetum sinense* and soil fertility[J]. Prataculture and Animal Husbandry, 2012(2): 5~7, 15. (in Chinese)
- 15 郑苗壮, 胡林, 董仁杰, 等. 草坪-土壤系统消纳沼肥氮的环境影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 294~299.
Zheng Miao Zhuang, Hu Lin, Dong Renjie, et al. Environmental effect of turf-soil system disposing nitrogen in biogas fertilizers[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 294~299. (in Chinese)
- 16 赵凤莲, 孙钦平, 李吉进, 等. 不同来源沼肥对油菜、西芹产量及氮素利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(8): 156~161.
Zhao Fenglian, Sun Qiping, Li Jijin, et al. Effects of different biogas fertilizers on the yield and nitrogen use efficiency of the rape and western celery[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(8): 156~161. (in Chinese)
- 17 郝鲜俊, 洪坚平, 乔志伟. 沼液对甘蓝连作土壤生物学性质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(3): 384~387.
Hao Xianjun, Hong Jianping, Qiao Zhiwei. Effect of biogas slurry on biological properties of cabbage continuous cropping soil[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, 17(3): 384~387. (in Chinese)
- 18 霍翠英, 吴树彪, 郭建斌, 等. 猪粪发酵沼液中植物激素及喹啉酮类成份分析[J]. 中国沼气, 2011, 29(5): 7~10.
Huo Cuiying, Wu Shubiao, Guo Jianbin, et al. Analysis of phytohormone and quolin-ketone components in anaerobic digestion effluent[J]. China Biogas, 2011, 29(5): 7~10. (in Chinese)
- 19 邓可蕴. 中国农村能源综合建设理论与实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- 20 王金花. 沼气发酵生态系统与残留物综合利用技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
Wang Jinhua. Research on the biogas fermentation ecosystem and the comprehensive utilization of biogas residues[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 21 张全国. 沼气技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- 22 Pal M. Agriculture in Gloria land[J]. CIBA Foundation Symposium, 1993, 177: 158~160.
- 23 段茂盛, 王革华. 畜禽养殖场沼气工程的温室气体减排效益及利用清洁发展机制(CDM)的影响分析[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 386~389.

- Duan Maosheng, Wang Gehua. Greenhouse gas mitigation benefits of biogas project in livestock farms[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2003, 24(3): 386 ~ 389. (in Chinese)
- 24 Li Aifen, Li Jin, Zhang Xiaowei. Application techniques of biogas slurry in production of machine-transplanted single cropping late rice[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2011, 23(2): 382 ~ 387.
- 25 Garg R, Pathak H, Das D, et al. Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 107(1): 1 ~ 9.
- 26 Parvathy S, Vaishnavy S. Effect of biogas slurry on growth and biomass production of sorghum vulgare and oryza sativa[J]. *Journal of Ecotoxicology and Environment Monitoring*, 2009, 19(4): 339 ~ 342.
- 27 王远远, 刘荣厚, 沈飞, 等. 沼液作追肥对小白菜产量和品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2008(1): 220 ~ 224.
- 28 张学军, 刘琼, 刘勇. 沼液浸种和追施对辣椒产量影响[J]. *耕作与栽培*, 2008(3): 44 ~ 45.
- 29 刘琼. 沼渣沼液在大葱上的应用效果分析[J]. *耕作与栽培*, 2008(3): 46.
- 30 Wang Yuanyuan, Shen Fei, Liu Ronghou. 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 ~ 293.
- 31 钱靖华, 林聪, 王金花, 等. 沼液对苹果品质及土壤肥效的影响[J]. *可再生能源*, 2005(4): 34 ~ 36.
- Qian Jinghua, Lin Cong, Wang Jinhua, et al. Effect of biogas residues on apple quality and soil fertility[J]. *Renewable Energy*, 2005(4): 34 ~ 36. (in Chinese)
- 32 赵金华, 蒋卫杰, 余宏军. 沼液、化肥肥施对西瓜产量和品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010(5): 53 ~ 56.
- Zhao Jinhua, Jiang Weijie, Yu Hongjun. Effects of biogas slurry and chemical fertilizer on yield and quality of watermelon grown in substrates[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(5): 53 ~ 56. (in Chinese)
- 33 谢善松, 黄水珍, 林升平, 等. 施用牛粪尿沼液对高秆禾本科牧草及土壤的影响[J]. *当代畜牧*, 2010(10): 39 ~ 41.
- 34 李梦梅. 生物有机肥对提高蔬菜产量品质的作用机理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2005.
- Li Mengmei. Studies on the mechanism of bio-organic manure on improving yield and quality of vegetable[D]. Nanning: Guangxi University, 2005. (in Chinese)
- 35 徐卫红, 王正银, 权月梅, 等. 沼液对莴笋和生菜硝酸盐含量及营养品质的影响[J]. *农村生态环境*, 2003, 19(2): 34 ~ 37.
- Xu Weihong, Wang Zhengyin, Quan Yuemei, et al. Effect of application of biogas slurry on nitrate content and nutrition quantity of lettuce and romaine lettuce[J]. *Rural Eco-environment*, 2003, 19(2): 34 ~ 37. (in Chinese)
- 36 郝鲜俊, 洪坚平, 谢英荷, 等. 施用沼液对芹菜品质和产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(7): 408 ~ 412.
- Hao Xianjun, Hong Jianping, Xie Yinghe, et al. Effect of biogas slurry on quality and yield of celery[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(7): 408 ~ 412. (in Chinese)
- 37 潘丽娜, 陈吉力. 沼肥与其它肥料用于草莓生产的试验对比[J]. *中国沼气*, 2004, 22(2): 34 ~ 36.
- Pan Li'na, Chen Jili. Effects of biogas residue and other fertilizers on the planting of strawberry[J]. *China Biogas*, 2004, 22(2): 34 ~ 36. (in Chinese)
- 38 Abd El Baki GK, Siefert F, Man H M, et al. Nitrate reductase in *Zea mays* L. under salinity[J]. *Plant Cell and Environment*, 2000, 23(5): 512 ~ 513.
- 39 袁炳富, 汪立龙, 洪长才. 沼液浸种增产的原因及浸种方法[J]. *农村能源*, 1999, 83(1): 20 ~ 21.
- 40 邱凌, 杨保平, 张正茂, 等. 沼液浸种对旱地小麦苗期发育的影响[J]. *中国沼气*, 1999, 17(1): 42 ~ 44.
- Qiu Ling, Yang Baoping, Zhang Zhengmao, et al. Effect of seed soaking with biogas slurry on seedling growth of dry-land wheat[J]. *China Biogas*, 1999, 17(1): 42 ~ 44. (in Chinese)
- 41 张石城. 植物的抗寒生理[M]. 北京: 农业出版社, 1990.
- 42 郭确, 潘瑞炽. ABA 对水稻幼苗抗冷性的影响[J]. *植物生理学报*, 1984, 10(4): 26 ~ 33.
- Guo Que, Pan Ruichi. Effect of ABA on the resistance of rice seedlings to chilling injury[J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1984, 10(4): 26 ~ 33. (in Chinese)
- 43 陈仙平, 曹群芳. 不同浓度沼液浸种对杂交水稻种子发芽率、成秧率的影响[J]. *福建稻麦科技*, 2008, 26(3): 10 ~ 11.
- 44 丁肖兰. 沼液浸种对水稻秧苗和产量影响效果试验[J]. *中国稻米*, 2007(5): 39 ~ 40.
- 45 袁大刚, 刘成, 蒲光兰, 等. 沼液浸种对万寿菊种子发芽及幼苗生长的影响[J]. *中国中药杂志*, 2011, 36(7): 817 ~ 822.
- Yuan Dagang, Liu Cheng, Pu Guanglan, et al. Effects of seed soaking with biogas slurry on seed germination and seedling growth of tagetes erecta[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2011, 36(7): 817 ~ 822. (in Chinese)
- 46 王继军, 黄士忠. 沼液对农药的增效作用[J]. *农业环境保护*, 1998, 17(4): 190 ~ 191.
- Wang Jijun, Huang Shizhong. Liquid of anaerobic fermentation as pesticidal enhancer[J]. *Agroenvironmental Protection*, 1998, 17(4): 190 ~ 191. (in Chinese)
- 47 张无敌, 宋洪川, 丁琪, 等. 沼气发酵残留物防治农作物病虫害的效果分析[J]. *农业现代化研究*, 2001, 22(3): 167 ~ 170.
- Zhang Wudi, Song Hongchuan, Ding Qi, et al. Application of methane fermentative residues in control of crop diseases and insect pests[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2001, 22(3): 167 ~ 170. (in Chinese)
- 48 张晓辉. 沼肥在防治农作物病虫害方面的应用[J]. *农村能源*, 1994, 58(6): 23 ~ 25.

Gao Rongqiang, Fan Shifu, Yan Yanlu, et al. Preprocessing of near infrared spectroscopic data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(12): 1 563 ~ 1 565. (in Chinese)

25 徐宁, 魏萱, 任冰, 等. 发酵冬虫夏草菌粉水分腺苷的近红外光谱定量分析及波段选择[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1 762 ~ 1 765.

Xu Ning, Wei Xuan, Ren Bing, et al. Near-infrared spectroscopy analysis of adenosine and water in fermentation cordyceps powder and wavelength assignment[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 1 762 ~ 1 765. (in Chinese)

26 王凤花, 朱海龙, 戈振扬. 近红外光谱数据建模方法的研究进展[J]. 农业工程, 2011, 1(1): 56 ~ 61.

Wang Fenghua, Zhu Hailong, Ge Zhenyang. Progress of near-infrared spectral data modeling method [J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(1): 56 ~ 61. (in Chinese)

27 邢志娜, 王菊香, 申刚, 等. 近红外光谱分析模型传递简易方法研究[J]. 分析科学学报, 2011, 27(1): 128 ~ 130.

Xing Zhina, Wang Juxiang, Shen Gang, et al. A simple and practical model transfer method for the homotype near infrared spectrometers[J]. Journal of Analytical Science, 2011, 27(1): 128 ~ 130. (in Chinese)

28 刘君动, 叶正良, 李德坤, 等. 近红外漫反射光谱法快速测定注射用丹参多酚酸中的水分[J]. 中国实验方剂学杂志, 2012, 18(4): 91 ~ 94.

Liu Jundong, Ye Zhengliang, Li Dekun, et al. Rapid determination of moisture content in danshen polyphenols acid injection with near-infrared diffused reflection spectroscopy[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2012, 18(4): 91 ~ 94. (in Chinese)

29 胡永翔, 李援农, 张莹, 等. 基于水分胁迫系数的枣树园土壤含水率估算[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(3): 270 ~ 276.

Hu Yongxiang, Li Yuannong, Zhang Ying, et al. Estimation of soil moisture content of jujube orchard in loess plateau based on water stress coefficient from FAO-56[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3): 270 ~ 276. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 125 页)

49 倪亮, 孙广辉, 罗光恩, 等. 沼液灌溉对土壤质量的影响[J]. 土壤, 2008, 40(4): 608 ~ 611.

Ni Liang, Sun Guanghui, Luo Guang'en, et al. Effect of marsh gas sewage irrigation on soil quality[J]. Soils, 2008, 40(4): 608 ~ 611. (in Chinese)

50 吴飞龙, 叶美锋, 林代炎, 等. 沼液施用量对象草 N、P 吸收利用效率和土壤 N、P 养分含量的影响[J]. 福建农业学报, 2011, 26(1): 103 ~ 107.

Wu Feilong, Ye Meifeng, Lin Daiyan, et al. Effects of biogas sludge on N/P utilization of pennisetum purpureum and soil N/P content[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2011, 26(1): 103 ~ 107. (in Chinese)

51 甘福丁, 魏世清, 覃文能, 等. 施用沼液对玉豆品质及土壤肥效的影响[J]. 中国沼气, 2011, 29(1): 59 ~ 60.

Gan Fuding, Wei Shiqing, Qin Wenneng, et al. Effect of biogas slurry on tabe bean quality and soil fertility[J]. China Biogas, 2011, 29(1): 59 ~ 60. (in Chinese)

52 段然, 王刚, 杨世琦, 等. 沼肥对农田土壤的潜在污染分析[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(3): 310 ~ 315.

Duan Ran, Wang Gang, Yang Shiqi, et al. Reliminary research of potential pollution on farmland soil after using biogas[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2008, 30(3): 310 ~ 315. (in Chinese)

53 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 有机肥对土壤 NO<sub>3</sub>-N 累积的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 197 ~ 200.

Yuan Xinmin, Tong Yanan, Yang Xueyun, et al. Effect of organic manure on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(3): 197 ~ 200. (in Chinese)

54 Matsunaka T, Sawamoto T, Ishimura H, et al. Efficient use of digested cattle slurry from biogas plant with respect to nitrogen recycling in grassland[J]. International Congress Series, 2006, 1293: 242 ~ 252.

55 Yadav S N. Formulation and estimation of nitrate nitrogen leaching from corn cultivation[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(3): 808 ~ 814.

56 Chang C, Entz T. Nitrate leaching losses under repeated cattle feedlot manure applications in southern[J]. Alberta. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(1): 145 ~ 153.

57 Kandeler E, Eder G, Sobotik M. Microbial biomass, N mineralization, and the activities of various enzymes in relation to nitrate leaching and root distribution in a slurry-amended grassland[J]. Biology and Fertility of Soil, 1994, 18(1): 7 ~ 12.

58 李彦超, 廖新伟, 吴银宝. 施用沼液对杂交狼尾草产量和土壤养分含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1 527 ~ 1 531.

Li Yanchao, Liao Xindi, Wu Yinbao. Effects of slurry application on biomass of crossbred pennisetum and soil nutrient[J]. Journal of Agro-environment Science, 2007, 26(4): 1 527 ~ 1 531. (in Chinese)

59 姜丽娜, 王强, 陈丁江, 等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤与环境安全影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1 328 ~ 1 336.

Jiang Li'na, Wang Qiang, Chen Dingjiang, et al. Effects of paddy field disposal of biogas slurry on the rice production, soil quality and environmental safety[J]. Journal of Agro-environment Science, 2011, 30(7): 1 328 ~ 1 336. (in Chinese)