沼气工程对环境的影响因素及应对措施

刘向东 (河南省洛阳市农村合作经济与能源环境保护站, 河南洛阳 47100)

摘要 阐述了沼气工程影响环境的主要因素, 分析了沼气工程影响环境的原因, 最后从完善沼液储存装置建设、加强沼肥利用技术研究、增加沼液后处理技术及加强沼气工程监管几方面提出了应对措施。

关键词 沼气工程; 环境影响; 智能监测系统; 技术途径

中图分类号 S210.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)08-0061-03

Influence Factors and Countermeasures of Biogas Project on Environment

LIU Xiang-dong (Rural Cooperative Economy and Energy Environmental Protection Station of Luoyang City, Luoyang, Henan 471000)

Abstract The main factors that affect the environment of biogas engineering were discussed, the reasons for the environmental impact of biogas engineering were analyzed, the response measures were put forward from the aspects of perfecting the construction of biogas slurry storage device, speeding up the use of biogas technology research, increasing biogas slurry postprocessing technology, strengthening supervision biogas engineering.

Key words Biogas project; Environmental impact; Intelligent monitoring system; Technical way

随着我国农村沼气建设的转型升级, 我国农村沼气建设将由农村户用沼气建设、村级沼气服务网点建设、沼气工程建设的模式转变为以沼气工程建设为主的发展模式^[1]。沼气工程建设不仅能解决规模化畜禽养殖场粪便问题、各类秸秆荒废造成的环境污染问题, 同时能实现秸秆、粪便的能源化转变, 沼气工程发酵后产生的沼液、沼渣还可以作为肥料进行还田技术等综合利用, 对于提高土壤有机质含量、农作物增产和农业生态环境建设也将发挥积极的作用。在关注沼气工程对环境正面影响的同时, 还应认识到沼气工程是一个复杂的生物发酵过程, 沼液、沼渣中富含有机质和氮、磷、钾等营养元素, 同时还富集有各类重金属。而人们大多将沼液作为肥料直接用于农业生产, 因此, 应该认清沼气工程对环境的负面影响。笔者从沼气工程各工艺环节分析了沼气及沼液储存及使用过程对环境、土壤、农作物安全可能产生的影响, 并提出了应对措施, 以期为今后科学、合理利用沼气, 减轻其对环境的污染提供借鉴。

1 沼气工程影响环境的主要因素

1.1 沼气排空 沼气的成分主要为 CH_4 和 CO_2 , CH_4 燃烧不会产生 SO_2 、 N_xO_y 等有害物质, 因此被认为是清洁能源。 CH_4 和 CO_2 是影响大气温室效应的主要有害物质, 等质量 CH_4 的增温潜力值(GWP)是 CO_2 的 21 倍。大中型沼气工程对温室气体减排的影响主要表现在 2 个方面: 一是沼气可作为燃料用于发电、供热或居民炊事用能, 替代煤炭、薪柴和秸秆, 减少 CO_2 排放; 二是畜禽粪便和有机废水等经过厌氧处理, 可避免 CH_4 直接向大气排放。因此, 沼气工程在应用中应坚决不允许出现“沼气排空”的现象。但是由于我国大型沼气工程建设受到建设资金、建设工艺、沼气使用途径等因素的制约, 加上沼气工程的建设单位多为养殖场主, 沼气工程在日常运营中出现多余沼气没有储存和使用, 他们在沼气工程建设和使用过程中多为自身企业利益和保护沼气工

程设备正常运行角度出发, 就可能会出现“沼气排空”的现象。

1.2 原料预处理引起的污染 沼气工程发酵原料在预处理过程中大多是露天存放, 作物秸秆一般都是在还未充分晾干之前已被收集完成, 在储存过程中遇到降雨或外部其他水分的侵入都将引起秸秆的腐烂降解, 生成的 CO_2 和 CH_4 等气体直接释放到周围环境中, 造成温室气体的排放。畜禽粪便在运输、调配等预处理中都是在露天环境下进行的, 空气中散发有恶臭的味道, 同时预处理过程中自然发酵产生的 CO_2 和 CH_4 等气体直接释放到周围环境中。

1.3 沼液露天储存 由于当前大中型沼气工程的建设模式主要为能源型生态型和能源环境型, 目前我国沼气建设业主多为规模养殖场, 受到建设资金等因素的制约, 大型沼气工程建设模式多为能源生态型。建设中对沼液的处理设计都是作为液体肥料和灌溉使用, 沼液的储存一般都是露天设计。由于沼液中残存的有机质在厌氧、好氧的共同作用下转化生成 CH_4 、 CO_2 、 NH_3 、 H_2S 、 NO_x 而直接释放到周围环境中, 造成周围的大气污染。

1.4 沼液直接施用引起的卫生问题 目前, 我国沼气工程的沼液虽然已经过厌氧发酵, 大量的病菌、虫卵、杂草种子死亡, 但是受发酵原料、发酵温度等因素的影响, 沼液中仍含有有害物质。根据国家农田灌溉水质标准要求, 农田灌溉用水水质基本控制项目按照大肠杆菌含量 $\leq 400\ 000$ 个/mL、蛔虫卵数 ≤ 2 个/L 的标准值进行对照分析^[2], 主要超标项目是大肠杆菌。聂莹等^[3]对江苏 18 家正在运行的沼气工程进出料液进行了抽样分析, 结果表明, 18 个沼气工程进料中, 粪大肠菌群数均在 $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^9$ CFU/L, 远远高于农田灌溉水质标准。如果沼液未经任何处理直接用于农业生产, 生产的农产品质量堪忧。

1.5 抗生素超标 以畜禽粪便为发酵原料的沼气工程, 由于畜禽在养殖过程中需要大量使用抗生素进行各种疾病的预防, 以畜禽粪便为发酵原料的沼气工程的沼液中都普遍含有大量抗生素。叶小梅等^[4]对湖南长沙的养猪场沼气工程

作者简介 刘向东(1968—), 男, 河南洛阳人, 高级农艺师, 从事农村能源开发和研究推广工作。

收稿日期 2017-01-10

开展了调查,结果表明,沼气工程沼液中主要存在3种抗生素,且含量普遍偏高,土霉素0.083 47 mg/mL、四环素0.049 07 mg/mL、金霉素0.042 99 mg/mL。这种沼液如果长期直接施用于农田,农田生产的农产品存在安全隐患。

1.6 重金属超标引起的食品安全问题 沼液作为养殖废水厌氧发酵副产物,其重金属含量不容小觑。以畜禽粪便为发酵原料的沼气工程的沼液,使用的畜禽粪便中Cu、Zn含量常常超标。钟攀等^[5]对重庆市3个地区11个沼液样品的研究表明,所有样品中As的总超标率达到60%,超标现象严重,是沼液中主要重金属污染物,Cr、Hg、Cd次之,不存在Pb超标现象。张继方等^[6]研究表明,Pb、As、Cu和Zn是北京地区猪粪沼液中含量最高的4种重金属。研究表明,长期施用沼肥的土壤重金属残留现象总体并不明显,但Cu、Zn含量明显增加,造成土壤Cu、Zn的积累,为作物带来潜在危害,同时农产品的质量也受到威胁。朱泉雯^[7]研究表明,沼液中Cu、Zn、As含量分别为3.37、34.49、0.36 mg/L,均严重超标,沼渣中Cu、Zn、Pb、Cd和Ni,分别达到1 348.20、10 525.03、1 254.45、57.36、10 49.99 mg/kg,均严重超标,沼肥均不能直接施用农田。据测算,1个万头猪场连续使用高Cu日粮,每年可向猪场周边土壤排放约2 t的Cu,导致土壤中Cu严重富集^[6]。日本土壤肥料学会报道,如果把日本养猪业所产生的猪粪全部施用到土壤中,土壤中Cu含量将在23年内超过80.00 mg/kg的限量标准。

1.7 对土壤的结构及肥力的影响 当前我国土壤肥力的基本特征是“缺钾、少磷、富氮”。沼气发酵在一定程度上可以将秸秆、粪便中的磷、钾回用,弥补土壤磷、钾缺失的问题,长期大量使用沼液作为灌溉用水及有机肥料会造成土壤部分养分供应不均衡,导致氮剩余。在作物生长缓慢的季节,施用沼液处理的土壤氮、磷养分盈余,表层土壤出现磷累积,并且出现氮淋洗损失等环境问题。

1.8 引起地下水水质恶化 适量使用沼液作为有机肥可有效促进作物增产,但大量试验表明,当大量沼液直接施用土壤后,大量的氮通过渗透液进入周围环境,其中相当一部分以硝态氮形式渗透到地下水中,造成地下水水质污染。

2 原因分析

2.1 缺少必要卫生处理技术装置和消毒措施 欧洲的沼气工程技术较为先进,如德国、丹麦、澳大利亚、瑞典等国家,尤其是德国的沼气工程机械化程度很高。欧盟国家十分重视沼肥的安全利用和生态卫生研究,如德国对沼肥的安全利用有严格的管理规定,沼气发酵处理后的残余物——沼肥必须在70℃下处理1 h才可作为肥料使用。为了环境卫生和肥效的充分利用,制度规定秋季以后不得将沼肥施于农田,必须贮存6个月后才能使用。如果沼肥要做饲料利用,必须在90℃下处理1 h;如果要达到处理疯牛病菌(BSE)的效果,则需要更高的温度、更高的压力和更长的时间。丹麦等国家能源和环境部规定了农场沼气装置的最短滞留时间(MGRT),要求高温(>52℃)水力停留时间(HRT)至少7 d,中温(20~52℃)HRT至少14 d,在对沼液后处理中,还包括

巴氏灭菌高温消毒过程,以防止处理过程中病菌传播^[8]。与这些国家相比,我国的沼肥安全利用目前尚处于起步阶段,沼肥利用的研究仍以提高农作物产量为主,对沼肥的安全利用还没有法规性的文件和管理制度。目前我国沼气工程发酵装置多数为中常温度发酵,HRT一般较短(数小时到数天),缺少必要卫生处理技术装置和消毒措施,尚不足以有效杀灭有害病菌和寄生虫卵。严格上讲,目前我国多数农场沼气工程发酵后出水很难达到《畜禽养殖业污染物排放标准GB 18596—2001》卫生要求。

2.2 发酵原料中抗生素、重金属超标 我国沼气工程沼液中抗生素、重金属超标的主要原因是沼气工程的发酵原料中这2类物质超标^[9]。规模化养殖畜禽粪便中的抗生素、重金属超标是沼液中超标的主要因素;秸秆原料中重金属超标主要与农作物生长过程中农药使用、土壤迁移及添加畜禽粪便等因素有关。随着集约化、规模化养殖业的迅速发展,一些重金属元素如Cu、Zn、As等被广泛应用于饲料添加剂,微量元素作为酶的必需组分和激活剂,是维持动物生命活动和生长发育的重要营养物质,它在保证动物体健康生长和高效生产方面起着重要作用。一是饲料中过量添加Cu、Zn、As、Cr等微量元素;二是微量元素在动物体内生物效价很低,在畜禽粪便中,Cu和Zn的直接排泄量占总量的95%以上,只有微量排放到尿中。猪粪中Cu、Zn、Mn、Ni的平均含量均较高,其中Cu、Zn最为明显,鸡粪中Cr的平均含量较高,而牛粪中各重金属含量低于其他粪便^[10-11]。

2.3 沼气工程管理和维护不当 一是由于沼气工程产气率受发酵温度的影响,大多数沼气工程产气不稳定,普遍表现为产气率在夏季高、冬季低。在夏季高温季节,由于产气率的提高,许多沼气工程在正常的沼气利用情况下,往往会造成大量沼气剩余,沼气工程企业没有办法利用多余的沼气,出于保护沼气工程安全的需要,部分沼气工程就会出现偷偷进行CH₄排空的违规行为。二是缺乏有效的监管措施,难以及时判断、发现沼气工程出现“沼气排空”的违规行为,更难以对这种违规行为进行处罚。三是当沼气工程发酵装置出现故障无法正常进行,由于配套维护设施不完备,造成CH₄直接排放到空气中。

2.4 沼液安全使用技术不成熟 沼液还田利用具有处理量大、成本低以及对氮、磷去除效果好等优点,是目前我国普遍认为最易实施、有效的沼液处理方式。目前,我国沼液安全利用的研究往往以提高产量为主,对沼液的安全使用缺乏法规性的文件或管理制度,对管理、施用数量、施用性质还很模糊。主要表现为:①目前我国农作物种植结构仍以适应自然气候条件的农业生产模式为主,复种指数较小的农业种植额外用水主要集中在春季和初秋季,由此造成沼气工程冬季大量发酵液的剩余。对于沼液季节性过剩问题,一般做法是在田间建1座储肥池,平时把沼肥积存在储肥池内备用。沼液季节性过剩不仅给农民造成了沼肥肥效的损失,还造成了经济上的损失。这样使矿质的氮更容易渗漏到土壤中进入到地下水中,氮气的挥发也可能造成生物的富营养化,从而对

敏感的环境造成土壤酸化作用。在考虑占地和建设成本的情况下,储液池建设容积受到限制,在冬季农田用水量减少的情况下,一部分沼液不得不直接排放,由此造成地表径流的富营养化,形成了水体污染源。②沼液在运输、储存过程中由于各种设施的不完善,易形成沼液直接排放和沼液中残存的有机质在厌氧、好氧的共同作用下转化生成 CH_4 、 CO_2 、 NH_3 、 H_2S 、 NO_x 而直接释放到周围环境中,引起二次污染环境。③沼液施灌所引起的氨挥发和温室气体排放也是值得关注的问题。

3 应对措施

3.1 完善沼液储存装置建设 沼液储存装置目前主要有露天的敞口池型和半封闭的罐型 2 种形式,由于建设资金有限,前者在我国沼气工程中多为常见,但其自然储存过程中由于沼液中有有机质的降解必然伴随着有害气体的释放,仍存在一定的环境污染。而欧美发达国家由于对空气质量有较为严格的限制,为减少沼液储存过程气体挥发对空气质量的影响,其沼气工程的储液装置一般设计为半封闭式储液罐,且多数储液罐直接建设于农场,从发酵罐中排出的沼液通过密封罐车运送至储液罐,其一方面可以方便沼液使用,另一方面通过沼液的分散处理,避免了有害气体在一个地点的高浓度富集。

3.2 增加沼液后处理技术 由于沼气工程沼液的用途多以资源化利用为目的,主要用于农田的灌溉、制作水溶性肥料和浓缩性肥料。完善沼液后处理技术是保障沼液卫生安全及开展沼液综合利用的前提。沼液卫生杀菌方法大致分为 2 类^[8]:一类为加热处理,另一类为非加热处理。传统的高温灭菌方法能耗较大、处理时间长,在粪便处理中使用该方法杀菌,需要增加设备,费用也较高。近年来,学者多致力于非加热灭菌方法的研究,并取得了一定进展,常见方法主要有紫外线—C、氯气、臭氧和电脉冲法。在沼气工程沼液沼渣的后处理技术规范(NY/T 2374—2013)中分别对沼液用于农田的灌溉、制作水溶性肥料和浓缩性肥料的后处理技术作出了相应的规定,重点强调了要对沼液进行消毒处理,消毒主要采用臭氧消毒和紫外线消毒 2 种方法。

3.3 加强沼气工程监管措施 目前我国对沼气建设的监管还仅限于工程建设阶段的监管,采取的各种措施也是多用于监管沼气工程建设单位按照工程的设计目标、建设期限、建设投资等各种批复目标完成建设任务,未对于沼气的日常运营和其他方面进行监管,缺乏对沼气应用情况进行全面监管的能力,不能及时发现沼气工程出现“沼气排空”的行为。今后在沼气工程建设方面要增设沼气工程智能监控系统,每个建设的沼气工程都要安装这类智能监控系统,监控终端设备可以设置在环境监测部门,监测部门可以在办公室通过终端系统全面监管沼气工程运行情况,可以及时发现沼气工程每天的沼气产气量、沼气的使用量和沼气的用途,一旦出现“沼气排空”的现象,监管部门可以根据相应的法律、法规对企业进行处罚,这样可从制度上防止沼气工程随意排空沼气行为的发生。

3.4 加快沼肥利用技术研究 加快沼肥利用技术研究,科学施用沼肥,减少不当施用造成的环境污染。一是选用科学的施用方法,推广配方施肥、按需施肥、按季节施肥是提高沼肥肥效及减少沼肥施用对环境影响的重要措施。不同地区的土壤性质、降雨特性不同,土壤中肥料成分也不尽相同,对于不同的土壤应根据土壤中肥料组分构成确定沼肥的施用量,过少施用沼肥则难以满足作物生长的影响需要,过多则易引起地下水、地表水的污染。同时,农作物不同的生长周期对营养成分的需求也不相同,沼气施用应选择作物的适宜生长期,以提高作物对肥料的吸收利用率。二是加强沼液增值产品开发,拓展沼液的用途。目前对沼液使用形式的单一性是造成沼液大量储存和剩余的根本问题,加大沼液的增值产品开发可提供沼液的利用途径,从根源上解决沼液富余和过量施用所造成的环境污染。以沼液为原料经浓缩、净化处理制取富含氮、磷、钾营养元素的缓释肥和沼液提纯后制取植物抗病杀虫剂是目前沼液增值利用的典型代表^[12]。利用沼液作为营养物质进行高能饲料和生物蛋白生产也是沼液增值利用的重要形式。三是加大对重金属污染防治研究。目前重金属去除技术主要包括离子交换、电化学、氯化、化学沥浸、生物沥浸^[8]等。重金属去除技术不可避免地存在一定缺陷,如离子交换树脂粒径小,易导致污泥与小球难于分离等问题,电化学方法处理经济成本较高,氯化处理法溶解重金属存在溶解效率低、成本高、操作繁琐及可能生成毒性氯代有机物等问题,而化学沥浸中无机酸成本高,对受纳土壤和水体易带来负面影响,不适于实际应用,有机酸的酸性一般较弱,仅能去除部分络合性较强的重金属,对于络合性较差的重金属则难以去除。四是推广沼液沼渣堆肥处理技术^[13]。堆肥是当前固体废弃物中重金属污染控制的主要技术,其主要机理是利用畜禽废弃物有机物形态变化络合固定重金属,使堆肥物料中重金属的活性被钝化,生物有效性降低,是实现废弃物减量化、无害化和资源化利用最便捷、最经济有效的方式。

4 结语

沼气工程发酵过程及发酵产物对环境的危害是客观存在的,主要表现为沼气的排空、沼液排放和大量使用造成的湖泊河流富营养化、土壤和地下水污染等环境问题,以及沼液储存及使用过程中有害气体的释放。重金属严重超标的沼液、沼渣不能直接用于农田,长期施用会造成表层土壤的重金属累积。改善和配套沼液储存设施,减少有害气体排放,合理施用沼肥,建设沼气智能系统是减少沼气工程危害环境的主要技术途径。沼液施用前的预处理技术以及农闲季节大量沼液的消纳问题将成为我国今后沼气利用研究的重要方向。

参考文献

- [1] 农业部生态总站. 2015 年农村沼气工程转型升级工作方案[EB/OL]. (2015-04-14)[2017-01-11] <http://www.zgswm.com/gnxw/961.htm>.
- [2] 农业部环境保护科研监测所. 农田灌溉水质标准:GB 5084—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

面流速试验因采集系统表层水样净化率不高以外,其余处理下各植物对中水 TN、TP 去除效果较好,尤以菖蒲和美人蕉优势最为明显,其 TP 去除效果达到 II 类水体要求、TN 去除效果达到 III 类水体要求,显示出中水用于湿地供水的优势。我国水资源短缺,中水因其回用成本较低及水源含量相对丰富等特点,非常适合作为景观水体的补给。

3.2 净化效果与水力条件的相关性 水力条件对湿地净化效果影响显著,且在各水力条件间存在动态平衡,以达到最优去除率。结合该试验结果,适当延长水力停留时间可以提高人工湿地氮、磷的去除率;而水深试验结果在不同植物间受“机会窗”影响较大,但总体趋势表明,一定范围内,水深增大会导致湿地净化性能降低。水流速度的减缓有利于植物和基质对氮、磷的吸附和沉淀,在连续进出水的情况下,表面流速设置在 0.01 m/s 时效果最好;而渗滤流速处理对 TN、TP 的去除率影响不明显。

3.3 5 种植物消氮纳磷能力及配置建议 在 5 种供试植物中,菖蒲、美人蕉为湿生植物或挺水植物,梭鱼草、再力花为挺水植物,狐尾藻为沉水植物,试验结果显示,狐尾藻对 TN、TP 的去除率低于另外 4 种植物。这是由于挺水植物比沉水植物有更大的生物量和更为发达的根系,因此挺水植物对污水的净化效果和对污染负荷变化的适应性均优于沉水植物。本着人工湿地景观美化及污水净化的功能需求,结合各湿地植物生长特性及氮、磷去除效果的动态特征,以“高+中+低”立体式层次搭配为基础诉求,在实际植物配置应用中,可以考虑将沉水植物区域置于挺水植物区域之前。

4 结论

(1) 5 种供试植物对中水 TN、TP 均有一定的去除效果,其中美人蕉和菖蒲去除率较高,且去除效果稳定,其 TP 系统出水含量符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水体要求, TN 含量符合 III 类水体要求。

(2) 在 3 组水力停留时间(1、2、3 d)处理下,5 种供试植物对 TN、TP 的去除率基本呈先上升后下降的趋势,因此可将水力停留时间设置在 2 d 最为合适。不同水深处理(10、20、40 cm)下对 TN、TP 的去除效果在植物种间差别较大,但总体趋势显示水深 40 cm 处效果不如水深 20 或 10 cm 处。

(3) 不同表面流速处理(0.01、0.03、0.05 m/s)对中水

TN、TP 的去除效果影响明显, TN 平均表面去除率达到 21.08%, TP 平均表面去除率达到 17.63%。而不同渗滤流速处理(0.05、0.10、0.20 m/d)对中水 TN、TP 的去除效果影响不明显, TN 和 TP 的平均系统去除率分别为 57.72% 和 64.84%。

参考文献

- [1] 王世和,王薇,俞燕. 水力条件对人工湿地处理效果的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版),2003,33(3):359-362.
- [2] 宋新山,邓伟. 基于连续性扩散流的湿地表面水流动力学模型[J]. 水利学报,2007,37(10):1166-1171.
- [3] 何江涛,马振民,张金炳,等. 污水渗滤土地处理系统中的堵塞问题[J]. 中国环境科学,2003,23(1):85-89.
- [4] 张建,黄霞,魏杰,等. 地下渗滤污水处理系统的氮磷去除机理[J]. 中国环境科学,2002,22(5):438-441.
- [5] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 人工湿地污水处理技术导则:RISN-TG 006—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [6] 国家环境保护总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准:GB 18918—2002[S]. 北京:中国环境出版社,2002.
- [7] 杨长明,顾国泉,李建华,等. 潜流人工湿地系统停留时间分布与 N、P 浓度空间变化[J]. 环境科学,2008,29(11):3043-3048.
- [8] 郑艳侠,冯绍元,刘培斌. 水温与水力停留时间对人工渗滤系统的影响[J]. 环境科学学报,2008,28(12):2509-2513.
- [9] HEALY M G, RODGERS M, MULQUEEN J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters[J]. Bioresource technology,2007,98(12):2268-2281.
- [10] REDDY K R, PATRICK W H JR. Effect of alternate aerobic and anaerobic conditions on redox potential, organic matter decomposition, and nitrogen loss in a flooded soil[J]. Soil biology & biochemistry,1975,7(2):87-94.
- [11] 王海洋,陈家宽,周进. 水位梯度对湿地植物生长、繁殖和生物量分配的影响[J]. 植物生态学报,1999,23(3):269-274.
- [12] 刘永,郭怀成,周丰,等. 湖泊水位变动对水生植被的影响机理及其调控方法[J]. 生态学报,2006,26(9):3117-3126.
- [13] GAFHY S, GASITH A. Spatially and temporally sporadic appearance of macrophytes in the littoral zone of Lake Kinneret, Israel: Taking advantage of a window of opportunity[J]. Aquatic botany,1999,62(4):249-267.
- [14] HOLLAND J F, MARTIN J F, GRANATA T, et al. Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristics[J]. Ecological engineering,2004,23(3):189-203.
- [15] 郭长强,董斌,刘俊杰,等. 水深对塘堰湿地水力性能的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(11):3287-3295.
- [16] MÜNCH C H, KUSCHK P, RÖSKE I. Root stimulated nitrogen removal: Only a local effect or important for water treatment[J]. Water science and technology,2005,51(9):185-192.
- [17] 李林锋,年跃刚,蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. 环境科学研究,2009,22(3):337-342.
- [18] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [9] 王飞,赵立欣,沈玉君,等. 华北地区畜禽粪便有机肥中重金属含量及溯源分析[J]. 农业工程学报,2013,29(19):202-208.
- [10] 祁玉峰,祁玉峡,祁凌云. 饲料质量安全问题解析[J]. 河南农业科学,2003(10):60-61.
- [11] 沈秀丽,杨增玲,韩鲁佳. 畜禽粪便引发的重金属污染的研究现状[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. 重庆:中国农业工程学会,2011.
- [12] 李刚,岳建芝,郭前辉. 秸秆沼气工程化对环境的影响及应对措施[J]. 农业工程学报,2011,27(S1):200-204.
- [13] 鲍艳宇,娄翼来,颜丽,等. 不同畜禽粪便好氧堆肥过程中重金属 Pb Cd Cu Zn 的变化特征及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报,2010,29(9):1820-1826.

(上接第 63 页)

- [3] 裴莹,曾晓楠. 沼液中几种抗生素的检测与樱花细菌性穿孔病防效研究[J]. 中国园艺文摘,2014(1):76-77.
- [4] 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.
- [5] 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):165-171.
- [6] 张继方,袁海荣,邹德勋,等. 沼液养分和重金属农用安全风险分析[J]. 安徽农业科学,2012,40(19):10246-10250.
- [7] 朱泉雯. 重金属在猪饲料-粪污-沼液中的变化特征[J]. 水土保持研究,2014,21(6):284-289.
- [8] 郑阳选,李健. 德国沼肥利用的安全性及生态卫生[J]. 中国沼气,2009,27(2):45-48.