

畜禽废弃物无害化处理与资源化利用技术研究进展

陶秀萍, 董红敏*

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,
农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081)

摘要: 畜禽废弃物中含有大量的有机物, 也含有病原菌和抗生素残留物等有害物质, 具有极大的环境污染风险, 必需采取适当措施对其处理与利用。综述了国内外畜禽废弃物处理与利用技术, 并对未来研究重点和技术趋势进行了展望, 以期为解决我国当前畜禽废弃物环境污染问题提供借鉴和参考。

关键词: 养殖废弃物; 屠宰废弃物; 死畜禽; 抗生素; 资源化

doi: 10.13304/j.nykjdb.2016.764

中图分类号: X713 文献标识码: A 文章编号: 1008-0864(2017)01-0037-06

Research Progress on Animal Waste Treatment and Recycling Technology

TAO Xiuping, DONG Hongmin*

(Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management in Agricultural Structures, Ministry of Agriculture;
Institute of Environment & Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences,
Beijing 100081, China)

Abstract: Animal wastes contain a considerable amount of organic matters, as well as pathogens and veterinary antibiotic residues, which pose tremendous threats to the surrounding environment. Appropriate measures must be adopted for treating and recycling animal wastes to prevent the environmental pollutions. This paper reviewed the technologies developed and applied for animal waste treatment and recycling technology all over the world, also predicted the future research focuses and technical development trend. It is expected to provide references for tackling the environmental issues incurred by animal wastes in China.

Key words: animal waste; slaughterhouse waste; dead animal; antibiotic; recycling

畜禽生产过程中不可避免地产生废弃物, 畜禽废弃物的产生量随着养殖和屠宰总量的增加而增多, 尽管产业发展和科技进步使畜禽废弃物的处理和利用水平逐步提升, 但是畜禽废弃物的环境污染问题依然突出。据业内统计, 全国每年产生 38 亿 t 畜禽粪污, 综合利用率不到 60%, 2014 年规模畜禽养殖化学需氧量和氨氮排放量分别为 1 049 万 t 和 58 万 t, 占当年全国总排放量的 45% 和 25%, 占农业源排污总量的 95% 和 76%, 全国共有 24 个省份的畜禽养殖场(小区)和养殖专业

户化学需氧量排放量占到本省农业源排放总量的 90% 以上^[1]。畜禽废弃物的环境污染问题严重制约了我国畜牧业的可持续发展。发达国家曾经借助先进、实用技术的研发和应用使之得到妥善解决; 相比之下, 我国畜禽废弃物污染防治技术研究起步较晚, 在当前严峻的环保形势下, 亟需借鉴国外的技术经验, 研究开发符合我国畜禽产业发展需求的畜禽废弃物无害化处理与资源化利用技术, 为畜禽废弃物污染的有效防治提供技术支持, 促进我国畜牧业可持续发展。

收稿日期: 2016-12-16; 接受日期: 2016-12-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0501400) 资助。

作者简介: 陶秀萍, 研究员, 博士, 主要从事畜禽养殖环境控制与废弃物处理研究。E-mail: taoksiuping@caas.cn。* 通信作者: 董红敏, 研究员, 博士, 主要从事农业生物环境工程技术研究。E-mail: donghongmin@caas.cn

1 畜禽废弃物处理与利用技术研究现状

畜禽废弃物包括养殖废弃物和屠宰废弃物,养殖废弃物主要有动物排泄物和死畜禽,屠宰废弃物则由屠宰副产物和污水组成。畜禽废弃物的形态及其特性有差异,因而其处理与利用技术也有所不同。

1.1 畜禽粪便处理和利用技术研究现状

畜禽粪便是动物粪、尿与冲洗水的混合物,其中含有大量有机物和氮磷等养分、病原微生物(甚至人畜共患病原微生物)以及抗生素和重金属残留等,如果处理得当,可成为植物养分、土壤有机质和生物能源的重要资源。不同形态畜禽粪便(固体粪便、养殖污水和粪浆)的资源化利用技术也不尽相同。

1.1.1 固体粪便处理与利用技术 固体粪便最常用的处理技术是堆肥,利用好氧细菌、真菌等微生物的代谢产热所致高温($>60^{\circ}\text{C}$)有效杀灭病原体^[2],同时将有机物质分解成稳定的有机物,包括农作物生长所需要的大量氮、磷以及氨基酸、蛋白质和胡敏酸等有机成分^[3,4],对提高作物品质和改善土壤质量具有重要意义。日本开发了静态通气、槽式和塔式发酵等高效堆肥技术和设备^[5,6],对奶牛、肉牛和猪粪进行肥料化应用。堆肥过程中会产生大量有害气体,其中主要成分是氨气,氨气挥发不仅污染环境,而且使堆肥的肥料价值降低,为此,发达国家研究开发了化学、生物添加减排,以及生物质过滤和生物洗涤除臭等技术^[7,8],对堆肥过程中挥发气体进行控制和回收利用。

对于水分含量较低的蛋鸡粪,荷兰和日本等国也通过直接干燥后生产有机肥^[5,9],或集中焚烧发电后飞灰用于肥料生产^[10],由于鸡粪(干物质约60%)焚烧的净热值低,加上不同养殖场鸡粪的能量密度有差别,因而实际大规模应用的效益低于预期。

热解和气化是近年来粪便堆肥或固体粪便热化学转化新技术,热解将堆肥或粪便生物质转化成非冷凝气体和冷凝蒸汽、液体生物原油、固体生物炭或灰^[11,12],气化则将堆肥或粪便生物质转化为高热值的富氢混合气体^[13]。热化学转化技术能借助高温杀灭固体粪便中的病原体,使粪便体

积显著降低,并获取有用能量和增值产品,但目前研究尚处于对热解条件及其产品特性的探讨。

1.1.2 养殖污水处理与利用技术 养殖污水中也含有有机物、氮、磷等成分,但是肥料价值低,对其主要采取深度处理、养分浓缩利用等方式。国内外养殖污水的深度处理有人工湿地净化、生物膜处理、以及厌氧-好氧组合处理等技术^[14,15],其中以厌氧-好氧组合处理技术最为常用,但该技术能耗高、处理过程中排放氧化亚氮,而且将可作为肥料利用的氮转化成氮气造成资源浪费。发达国家基于养分浓缩利用,开发了微滤、超滤、纳滤和反渗透等非生物膜技术^[16]。微滤和超滤分别截留污水中 $0.1\sim 5\ \mu\text{m}$ 以及 $0.001\sim 0.05\ \mu\text{m}$ 的分子和颗粒,纳滤膜能截留污水中分子量大于200 Da的有机分子和溶解盐,反渗透膜则可截留污水中所有溶解盐和分子量大于100 Da的有机分子。养殖污水中有机物大分子、铵和磷酸盐等被截留而浓缩,同时产生的高等级出水可回用于养殖场生产^[9]。

磷是不可再生资源,养殖污水中磷回收技术研究也备受重视。利用磷酸盐增溶真菌或激活微生物吸收磷酸盐,将其转变成肥料的生物除磷技术,其运行效率取决于真菌和微生物,难以获得稳定的去除效果^[17];相比之下,鸟粪石结晶技术的研究和应用更为普遍,高浓度的铵离子、镁离子和磷酸根离子在1:1:1条件下结晶沉淀生产鸟粪石,可作为肥料循环利用^[18],但是鸟粪石结晶的pH较高需要使用大量化学试剂;鸟粪石结晶易沉积在搅拌装置和管道上,影响系统稳定运行;鸟粪石在非酸性的正常土壤中肥效低。为此,近年来国外对基于铁离子吸收和解析的磷酸盐回收、氧化铁纳米管磷酸盐回收等技术进行了研究^[17]。

1.1.3 粪浆处理与利用技术 粪浆即为液体粪便,其固体物含量高于养殖污水,将其直接作为有机肥料进行农田利用是一种经济实用且相对简单的方法,被世界各国广泛接受和应用。美国提出的畜禽粪便综合养分管理计划(comprehensive nutrient management plan, CNMP),将液体粪便贮存后直接进行农田利用,配套开发的液体粪便贮存、养分平衡、运输和农田施用等技术及设备,使其成为国际上液体粪便农田利用的成功典范。欧洲将液体粪便(主要为猪粪和牛粪)与能源作物混合厌氧发酵成沼肥进行农田利用^[19],通过混合

厌氧发酵沼气产生数学模型、高固体料液高效传质技术、沼气发电及余热高效转化技术等开发^[20]、以及沼液浓缩技术和沼肥长期农田利用重金属累积效应研究^[9, 19], 实现了畜禽粪便进行能源化和肥料化应用。

由于液体粪便和沼肥在贮存过程中会挥发大量的臭气物质, 其中以氨气为主, 为了防止污染环境和液体肥料肥效降低, 丹麦等欧洲国家提出了减少氨气挥发的粪浆酸化技术^[9]。

1.1.4 畜禽粪便抗生素残留处理技术 兽用抗生素因治疗、疾病预防和控制、以及促生长的需要被广泛应用于畜禽生产, 然而 30%~90% 的兽用抗生素以原形或初级代谢产物的形式随动物粪便和尿液排出体外^[21], 其中约 75% 的四环素类抗生素以母体化合物形式排出体外^[22], 金霉素和磺胺甲噁啉通过粪尿排泄比例分别为 75% 和 90%^[23], 60% 的恩诺沙星和 30% 的环丙沙星被直接排泄^[24]。兽用抗生素残留随着畜禽粪便进入环境后, 最终通过食物链影响畜禽甚至人类健康, 已成为备受关注的新型痕量污染物。

已有的研究主要集中于测定方法建立和残留现状调查。国内外结合现代先进的仪器设备建立了气相色谱-质谱(GC-MS)、超高效液相色谱-飞行时间质谱(UPLC-TOF-MS)、液相色谱-飞行时间质谱(LC-TOF-MS)、液相色谱-串联质谱(LC-MS/MS)、超高效液相色谱-串联质谱(UPLC-MS/MS)、荧光-高效液相色谱(FD-HPLC)、二极管阵列-高效液相色谱(DAD-HPLC)、紫外-高效液相色谱(UV-HPLC)和生物传感器等多种畜禽粪便抗生素残留测定方法^[25-27], 其中以 LC-MS/MS 和 UPLC-MS/MS 方法最为多见。在此基础上, 各国对畜禽粪便中兽用抗生素残留情况进行调查分析^[25, 28, 29]。

研究表明, 固体粪便堆肥^[30]、厌氧发酵^[31]、养殖污水生物膜技术和非生物膜技术以及人工湿地系统^[32]等对抗生素残留均具有降解作用, 同时也发现抗生素或代谢产物对厌氧发酵等过程具有一定的负面作用。美国、英国、西班牙、丹麦、德国和中国等国家对兽用抗生素的生物转化、光降解以及高级氧化等去除技术进行了研究^[22, 32, 33], 目前尚处于实验室研究阶段。

1.2 死畜禽处理与利用技术研究现状

国内死畜禽处理主要采取填埋、焚烧、化制和

高温生物降解等方式^[34], 但各有利弊。填埋后的动物尸体所产生的降解化学产物对地表和地下水具有极大的污染风险; 焚烧动物尸体不仅能耗高, 而且会产生二恶英和呋喃等大气污染物; 化制设施的投资高且处理过程中臭气污染严重, 动物尸体收集运输存在疫病传播风险; 高温生物降解将高温化制与生物降解相结合, 在高温化制杀菌的基础上采用辅料对产生的油脂进行吸附, 投资和运行成本相对较高。近年来, 研究开发的死猪与猪粪一体化堆肥技术取得了较好的研究进展^[35]。

国外死畜禽处理技术除填埋、焚烧和化制外, 研究和应用最多的是堆肥发酵技术, 该技术的研究始于 20 世纪 80 年代早期美国养禽业, 之后很快应用于猪、牛等其他动物尸体处理, 2002-2007 年间美国奶牛尸体堆肥处理比例从 7% 升高到 17%^[36], 澳大利亚、新西兰、美国和加拿大等国家将其作为日常和紧急死亡动物处理的首选方法^[37], 但是由于朊病毒和炭疽杆菌杀灭试验数据缺乏, 欧盟尚未将其列入法规处理方法^[38]。厌氧发酵在很多国家用于死禽和死猪的处理, 常用做法是将动物尸体与畜禽粪便一起厌氧发酵处理, 但厌氧发酵不能杀灭朊病毒, 因此欧盟现有的法规要求对动物尸体进行前处理(如化制)后才能进行厌氧发酵, 为了保证沼肥的生物安全性, 最好对死畜禽厌氧发酵产生的沼渣沼液进行高温处理^[39]。碱解是 20 世纪 90 年代开发的新技术, 利用氢氧化钠或氢氧化钾催化水解动物尸体, 该技术能彻底杀灭各种病原微生物, 包括朊病毒和禽流感病毒^[40], 在生物安全和处理效果方面具有优势。

1.3 屠宰废弃物处理与利用技术研究现状

屠宰副产物包括血、骨、皮、蹄、脂肪和内脏等, 其中肚和肝等内脏及血等在世界许多国家如中国均可被食用, 但在另一些国家则规定屠宰副产物全部不可食用。源自于健康动物的屠宰副产物, 如可食用部分可加工成食品原料、饲料、宠物食品、生物活性物质和酶等^[41]; 对于不可食用部分或带有病原菌的屠宰副产物, 其处理和利用技术基本与死畜禽处理和利用技术相同^[42, 43], 在此不再赘述。

屠宰场的污水产生量大, 现有屠宰污水的处理技术与城市污水的处理技术相近, 常用技术包括土地利用、物理化学处理、生物处理、高级氧化

和组合处理技术。土地利用通常将屠宰污水直接用于农田灌溉,可能导致臭气、土壤和水体污染,并具有疫病传播风险;物理化学处理先通过沉淀或絮凝后,再采用电凝或膜技术处理^[44];生物处理包括厌氧处理、好氧处理和人工湿地等技术,其中好氧系统的处理量大也最常用^[45];高级氧化技术利用羟基自由基($\cdot\text{OH}$)氧化和降解屠宰污水中的有机和无机物质,该技术对病原菌有很好的灭活效果^[46],可单独使用或者与生物处理技术组合使用;组合处理兼备单项技术的优点,比单项技术处理的运行和维护费用低^[47],且处理效果好、经济性高。

2 畜禽废弃物处理与利用的主要影响因素

畜禽废弃物处理与利用技术研发及应用受诸多因素的影响,主要有政策和法规、监管等促进因素和经济能力等阻碍因素。

2.1 畜禽废弃物处理与利用的主要促进因素

纵观各国畜禽废弃物污染防治历史,政策和法规、监管是畜禽废弃物处理与利用技术研发及其应用的重要促进因素。

2.1.1 政策和法规 美国的养殖废弃物污染防治国家战略和国家污染物排放削减(national pollutant discharge elimination systems, NPDES)许可证制度推动了畜禽粪便综合养分管理计划相关技术的研发和应用。欧盟的硝酸盐指令规定粪肥使用最大量为 $170\text{ kg N/hm}^2\cdot\text{a}$ ^[9],该限值迫使养殖场对多余的粪便进行处理或者运输到其他的农场进行利用;国家排放限值指令促进了除臭和氨气减排及控制技术的研发,可再生能源指令推动了欧洲沼气工程技术的发展。

在我国,农业部发布的《关于促进南方水网地区生猪养殖布局调整优化的指导意见》^[48],将促进我国畜禽粪便处理及其农田利用配套技术的开发,但是由于相当长一段时间以来我国畜牧业发展的主要目标是满足日益增长的畜产品消费需求,导致农牧脱节问题突出,目前大部分畜禽场粪便不具备农田利用条件,将推动畜禽粪便远距离资源化利用以及养殖污水深度处理等实用技术开发。

2.1.2 监督管理 由于技术及资金缺乏等原因,

我国畜禽养殖污水对周围河道污染、养殖及其废弃物处理过程中的大气污染事件时有发生。随着我国环境监督管理体制的完善和监管力度日益加强,使畜禽废弃物偷排现象难以遁形;而且随着社会进步和全民环保意识增强,畜禽废弃物环境污染相关的群众环境投诉和污染纠纷案件不断上升,使养殖场承担相应的法律责任,环保监管和群众监督对养殖场废弃物处理与利用也有较好的促进作用。

2.2 畜禽废弃物处理与利用的主要阻碍因素

畜禽养殖业是微利行业,同时疫病、市场和自然灾害等使畜禽养殖业伴随着高风险。对于畜禽养殖场而言,废弃物处理与利用设施的建设成本较高、且运行成本也较高,不少养殖场无力承担废弃物处理与利用设施建设费用,或出现建设得起但运行不起的尴尬局面,资金是畜禽废弃物处理与利用的首要障碍因素。在畜禽废弃物污染防治过程中,世界各国通过不同项目对畜禽场废弃物处理与利用设施建设给予一定的资助。

3 畜禽废弃物处理与利用技术的发展趋势

目前,发达国家主要致力于畜禽废弃资源潜力开发前沿技术研究;而发展中国家,尤其是畜禽废弃物环境污染问题突出的中国,其研究以实用技术开发和现有技术水平提升为主、兼顾前沿技术探索。

利用畜禽粪便和(或)堆肥热解生产生物原油或催化气化转化富氢混合气体、利用养殖污水和畜禽粪便堆肥养殖微藻及其微藻新用途开发均为养殖废弃物处理与利用前沿技术,未来具有很大的发展空间;畜禽粪便中抗生素残留的生态毒性、环境归趋以及有效去除技术仍是未来研究的热点;在死畜禽处理与利用方面,研究堆肥过程高致病性细菌、病毒包括朊病毒的杀灭情况,将有望为死畜禽堆肥技术的推广提供可靠依据,同时环境友好和生物安全的死畜禽处理与利用新技术开发也是未来规模化应用的重要基础;在屠宰废弃物处理和利用方面,开辟新的应用途径和开发新的高附加值产品是未来技术发展方向。

畜禽废弃物处理与利用技术一直是国际同行的研究热点,各国畜禽养殖业所处发展阶段不同,

对畜禽废弃物处理与利用技术的需求也不相同。现有技术水平的提升和新技术的开发将使畜禽废弃物资源化利用效率不断提高,并为畜禽废弃物资源化利用开辟更多的新途径。

参 考 文 献

- [1] 中国农业信息网. 于康震副部长在全国畜禽标准化规模养殖暨粪污综合利用现场会上的讲话[EB/OL]. http://www.agri.cn/V20/ZX/tzgg_1/tz/201510/t20151023_4875680.htm, 2015-10-20.
- [2] Usui M, Kawakura M, Yoshizawa N, et al.. Survival and prevalence of *Clostridium difficile* in manure compost derived from pigs [J]. *Anaerobe*, 2016, 43: 15-20.
- [3] 曹云, 常志州, 黄红英, 等. 畜禽粪便堆肥前期理化及微生物性状研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(11): 2198-2207.
Cao Y, Chang Z Z, Huang H Y, et al.. Chemical and biological changes during early stage of composting of different animal wastes [J]. *J. Agro-Environ. Sci.*, 2015, 34(11): 2198-2207.
- [4] Zhu L D, Hiltunen E. Application of livestock waste compost to cultivate microalgae for bioproducts production: A feasible framework [J]. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, 54: 1285-1290.
- [5] Haga K. Managing manure on Japanese livestock and poultry farms[J]. *Biocycle*, 2001, 42(6): 66.
- [6] Fukumoto Y, Suzuki K, Waki M, et al.. Mitigation option of greenhouse gas emissions from livestock manure composting [J]. *Japan Agric. Res. Quarterly*, 2015, 49(4): 307-312.
- [7] Pagans E, Font X, Sánchez A. Biofiltration for ammonia removal from composting exhaust gases [J]. *Chem. Engin. J.*, 2005, 113: 105-110.
- [8] Kuroda K, Waki M, Yasuda T, et al.. Utilization of *Bacillus* sp. strain TAT105 as a biological additive to reduce ammonia emissions during composting of swine feces [J]. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 2015, 79(10): 1702-1711.
- [9] Hou Y, Velthof G L, Case S D C, et al.. Stakeholder perceptions of manure treatment technologies in Denmark, Italy, the Netherlands and Spain [J]. *J. Cleaner Production*, 2016, 129: 1-11.
- [10] Melse R W, Timmerman M. Sustainable intensive livestock production demands manure and exhaust air treatment technologies [J]. *Bioresour. Technol.*, 2009, 100: 5506-5511.
- [11] Cantrell K B, Hunt P G, Uchimiya M, et al.. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar [J]. *Bioresour. Technol.*, 2012, 107: 419-428.
- [12] Jeong Y W, Choi S K, Choi Y S, et al.. Production of biocrude-oil from swine manure by fast pyrolysis and analysis of its characteristics [J]. *Renew. Energy*, 2015, 79: 14-19.
- [13] Burra K G, Hussein M S, Amano R S, et al.. Syngas evolutionary behavior during chicken manure pyrolysis and air gasification [J]. *Appl. Energy*, 2016, 181: 408-415.
- [14] 李清, 胡启春, 祝其丽, 等. 高含氮养殖污水厌氧-好氧组合处理实验研究[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(12): 189-193.
- Li Q, Hu Q C, Zhu Q L, et al.. Experimental study on treatment of poultry manure with high nitrogen content by anaerobic-aerobic co-treatment [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2011, 34(12): 189-193.
- [15] Sharma P K, Takashi I, Kato K, et al.. Seasonal efficiency of a hybrid sub-surface flow constructed wetland system in treating milking parlor wastewater at northern Hokkaido [J]. *Ecol. Engin.*, 2013, 53: 257-266.
- [16] Makara A, Kowalski Z. Pig manure treatment and purification by filtration [J]. *J. Environ. Manage.*, 2015, 161: 317-324.
- [17] Kim M, Park K, Kim J M. Phosphate recovery from livestock wastewater using iron oxide nanotubes [J]. *Chem. Engin. Res. Design*, 2016, 114: 119-128.
- [18] Rahman M M, Liu Y H, Kwag J H, et al.. Recovery of struvite from animal wastewater and its nutrient leaching loss in soil [J]. *J. Hazardous Materials*, 2011, 186(2-3): 2026-2030.
- [19] Ondoua R N. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review [J]. *Agron. Sustain. Dev.*, 2014, 34(2): 473-492.
- [20] Linke B, Muha I, Wittum G, et al.. Mesophilic anaerobic co-digestion of cow manure and biogas crops in full scale German biogas plants: A model for calculating the effect of hydraulic retention time and VS crop proportion in the mixture on methane yield from digester and from digestate storage at different temperatures [J]. *Bioresour. Technol.*, 2013, 130: 689-695.
- [21] Heuer H, Schmitt H, Smalla K. Antibiotic resistance gene spread due to manure application on agricultural fields [J]. *Ecol. Ind. Microbiol.*, 2011, 14(3): 236-243.
- [22] Widyasari-Mehta A, Suwito H R K A, Kreuzig R. Laboratory testing on the removal of the veterinary antibiotic doxycycline during long-term liquid pig manure and digestate storage [J]. *Chemosphere*, 2016, 149: 154-160.
- [23] Kim K R, Owens G, Kwon S, et al.. Occurrence and environmental fate of veterinary antibiotics in the terrestrial environment [J]. *Water Air Soil Pollut.*, 2011, 214(1): 163-174.
- [24] Slana M, Dolenc M S. Environmental risk assessment of antimicrobials applied in veterinary medicine—A field study and laboratory approach [J]. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 2013, 35: 131-141.
- [25] Ho Y B, Zakaria M P, Latif P A, et al.. Simultaneous determination of veterinary antibiotics and hormone in broiler manure, soil and manure compost by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *J. Chromatography A*, 2012, 1262: 160-168.
- [26] Le-Minh N, Stuetz R M, Khan S J. Determination of six sulfonamide antibiotics, two metabolites and trimethoprim in wastewater by isotope dilution liquid chromatography/tandem mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2012, 89: 407-416.
- [27] 顾欣, 张鑫, 严凤, 等. 基于 UPLC-MS/MS 同时测定猪粪便中 5 种兽药残留量的研究 [J]. *中国兽药杂志*, 2015, 49(10): 32-36.

- Gu X, Zhang X, Yan F, *et al.*. Simultaneous determination of five veterinary drug residues in swine manure by ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Chin. J. Vet. Drug*, 2015, 49(10): 32-36.
- [28] Zhou L, Ying G, Liu S, *et al.*. Excretion masses and environmental occurrence of antibiotics in typical swine and dairy cattle farms in China [J]. *Sci. Total Environ.*, 2013, 444: 183-195.
- [29] Dahshan H, Abd-Elall A M M, Megahed A M, *et al.*. Veterinary antibiotic resistance, residues, and ecological risks in environmental samples obtained from poultry farms, Egypt [J]. *Environ. Monit. Assess.*, 2015, 187: 2.
- [30] Bao Y, Zhou Q, Guan L, *et al.*. Depletion of chlortetracycline during composting of aged and spiked manures [J]. *Waste Manage.*, 2009, 29: 1416-1423.
- [31] Shi J C, Liao X D, Wu Y B, *et al.*. Effect of antibiotics on methane arising from anaerobic digestion of pig manure [J]. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 2011, 166-167: 457-463.
- [32] Fernandes J P, Almeida C M R, Pereira A C, *et al.*. Microbial community dynamics associated with veterinary antibiotics removal in constructed wetlands microcosms [J]. *Bioresour. Technol.*, 2015, 182: 26-33.
- [33] Gao Y Q, Gao N Y, Deng Y, *et al.*. Ultraviolet (UV) light-activated persulfate oxidation of sulfamethazine in water [J]. *Chem. Engin. J.*, 2012, (195-196): 248-253.
- [34] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 16548-2006 病害动物和病害动物产品生物安全处理规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [35] 郭东坡, 陶秀萍, 尚斌, 等. 死猪堆肥处理的通风率选择探讨 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 187-193.
- Guo D P, Tao X P, Shang B, *et al.*. Selection of ventilation rates on dead pig composting [J]. *Transact. CSAE*, 2013, 29(5): 187-193.
- [36] Price C, Carpenter-Boggs L, Goldberger J. On-farm mortality composting in Washington State: Outreach and producer survey [J]. *J. Extension*, 2009, 47(6): 6RIB8.
- [37] Berge A C B, Glanville T D, Millner P D, *et al.*. Methods and microbial risks associated with composting of animal carcasses in the United States [J]. *J. Am. Vet. Med. Assoc.*, 2009, 234(1): 47-56.
- [38] Gwyther C L, Williams A P, Golyshin P N, *et al.*. The environmental and biosecurity characteristics of livestock carcass disposal methods: A review [J]. *Waste Manage.*, 2011, 31: 767-778.
- [39] Masse D I, Masse L, Hince J F, *et al.*. Psychrophilic anaerobic digestion biotechnology for swine mortality disposal [J]. *Bioresour. Technol.*, 2008, 99: 7307-7311.
- [40] Kalambura S, Kricka T, Jurisic V, *et al.*. Alkaline hydrolysis of animal waste as pretreatment in production of fermented fertilizers [J]. *Cereal Res. Commu.*, 2008, 36(1): 179-182.
- [41] Toldrá F, Mora L, Reig M. New insights into meat by-product utilization [J]. *Meat Sci.*, 2016, 120: 54-59.
- [42] Jensen P D, Sullivan T, Carney C, *et al.*. Analysis of the potential to recover energy and nutrient resources from cattle slaughterhouses in Australia by employing anaerobic digestion [J]. *Appl. Energy*, 2014, 136: 23-31.
- [43] Franke-Whittle I H, Insam H. Treatment alternatives of slaughterhouse wastes, and their effect on the inactivation of different pathogens: A review [J]. *Critical Rev. Microbiol.*, 2013, 39(2): 139-151.
- [44] Eryuruk K, Tezcanun U, Ogutveren B U. Electrocoagulation in a plugflow reactor: The treatment of cattle abattoir wastewater by iron rod anodes [J]. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2014, 8(2): 461-468.
- [45] Pan M, Henry L G, Liu R, *et al.*. Nitrogen removal from slaughterhouse wastewater through partial nitrification followed by denitrification in intermittently aerated sequencing batch reactors at 11°C [J]. *Environ. Technol.*, 2014, 35(4): 470-477.
- [46] Mohajerani M, Mehrvar M, Ein-Mozaffari F. Photoreactor design and CFD modelling of a UV/H₂O₂ process for distillery wastewater treatment [J]. *Canadian J. Chem. Engin.*, 2012, 90(3): 719-729.
- [47] Bustillo-Lecompte C F, Mehrvar M, Quiñones-Bolaños E. Cost-effectiveness analysis of TOC removal from slaughterhouse wastewater using combined anaerobic-aerobic and UV/H₂O₂ processes [J]. *J. Environ. Manage.*, 2014, 134: 145-152.
- [48] 中华人民共和国农业部. 农业部关于促进南方水网地区生猪养殖布局调整优化的指导意见 [EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/XMYS/201511/t20151127_4917216.htm, 2015-11-27.