

农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践 ——氮磷养分循环利用技术

常志州, 黄红英, 靳红梅, 马 艳, 叶小梅, 薛利红, 杨林章

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业部长江下游农业环境重点实验室, 江苏省农业废弃物资源化工程技术中心, 南京 210014)

摘 要: 农业面源污染已经取代点源成为水环境污染最重要的来源, 其主要的污染物为各种途径排放的氮和磷, 有效减少氮和磷的排放或循环利用这部分养分, 不仅可以减少污染物的排放, 也是实现氮磷养分资源化利用的重要途径。本文在以往研究成果的基础上, 结合国内外已有研究报道, 重点阐述了畜禽粪便、作物秸秆、农村生活污水及工程处理尾水中的氮磷养分利用方式、应用效果及环境效应。畜禽粪便固体部分经高温好氧堆肥后可直接还田, 养殖肥水和沼液可替代 25%~75% 的化肥。农作物秸秆可直接还田或经堆肥化处理及资源化利用后还田。农村生活污水、农田排水及富营养化河水中的氮磷养分可利用稻田人工湿地进行处理和回用。在循环利用农业废弃物中的氮磷等养分资源时, 要考虑废弃物自身及农田的特征, 并与农作物的水肥管理技术相结合, 兼顾环境和经济效益。

关键词: 农业废弃物; 氮和磷; 循环利用; 农田; 面源污染

中图分类号: X506 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)10-1901-07 doi:10.11654/jaes.2013.10.001

Reduce-Retain-Reuse-Restore Technology for the Controlling the Agricultural Non-point Source Pollution in Countryside in China: Reuse of Nitrogen and Phosphorous in Agricultural Wastes

CHANG Zhi-zhou, HUANG Hong-ying, JIN Hong-mei, MA Yan, YE Xiao-mei, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-Environment in downstream of Yangze Plain, Ministry of Agriculture, Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Nanjing 210014, China)

Abstract: The agricultural non-point source pollution has been the main cause of water quality deterioration in countryside in China. It is often characterized by nitrogen and phosphorous overloading, which is directly linked to eutrophication. It is critical to think at agricultural ecosystem level and to act in technology integrations of Reduce-Retain-Reuse-Restore (4R) for the nutrient overloading and for the control of non-point source pollution. In this article, the 4R technology to reuse nitrogen and phosphorous in animal manures, straws, wastewater from rural domestic treatments and tail water treatments was reviewed. The experiments on the reuse rates and patterns were conducted; and the application effects and the environment influence were investigated. For animal manures, the solid fraction could be applied with chemical fertilizer after the composting; while the liquid slurries could replace the chemical fertilizer by 25%~75%. For straws, returning to field directly or after composting, or using as energy production resources were effective ways to reuse nutrients. To reduce the pollution risk of wastewater from rural domestic treatments and tail water treatments, the paddy-rice-wetland system was used in the experiments, which had achieved good expectation of nitrogen and phosphorous removal. The characteristics of both agricultural wastes and farmland should be considered while applying wastes. The reuse of nutrients in wastes should be combined with the management of water and fertilizer to achieve sustainability in agriculture.

Keywords: agricultural wastes; nitrogen and phosphorus; reuse; farmland; non-point source pollution

收稿日期: 2013-08-28

基金项目: 国家水专项太湖项目(2012ZX07101-004-3)

作者简介: 常志州(1957—), 男, 研究员, 研究方向为农业废弃物资源化利用。E-mail: czhizhou@hotmail.com

农业面源污染已经取代点源成为水环境污染的最重要来源,严重影响了农业可持续发展、生态环境和老百姓健康^[1-2]。根据国家环境保护部2010年发布的“全国第一次污染源普查公报”数据^[3],全国畜禽养殖业粪便年产量为2.43亿t,尿液产生量1.63亿t,未经处理利用而直接排放到环境中的化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)分别为:1 268.3、102.5、16.0万t,畜禽养殖场氮磷等大量排放,既对水体环境构成了威胁,又造成了养分资源的极大浪费。规模养殖场粪污治理已成为农业面源污染防治的重中之重^[2,4]。此外,农村普遍存在的秸秆焚烧及随意丢弃现象,不仅造成了大气污染,秸秆中的氮磷养分也流失到水环境中,造成了水体污染^[5]。加上小型分散农村生活污水未经处理排放,或达标排放的农村生活污水处理工程尾水、农田排水等,也直接导致了水环境的恶化。

这些农业废弃物以及农村废水中的氮磷进入水体是污染源,但进入农业生产系统就是作物必需的大量营养元素。因此,对这些氮磷养分进行循环利用,是控制农村面源污染的有效途径之一,也是农村面源污染治理的“4R”控制技术中不可或缺的一个环节^[1]。国内外大量研究表明,养分回用不仅能控制水体氮磷污染,且能减少化肥投入,实现生产和环境的双赢^[1-2]。本文以畜禽粪便、作物秸秆和农村废水及处理尾水为主要研究对象,从养分回用的角度出发,重点阐述这些农业废弃物和农村废水中氮磷的循环利用技术及污染控制效应,旨在为从事农村面源污染治理和农业废弃物管理的相关人员提供借鉴参考。

1 畜禽粪便氮磷养分农田回用技术

1.1 畜禽粪便养分产生量与损失量

弄清规模畜禽场排泄物和养分产生量,是畜禽养殖排泄物氮磷养分有效管理与农田回用的前提与基础。已发布的畜禽产排污系数及相关文献报道的畜禽粪便产生量数据,均未考虑养殖场存栏结构、动物死亡等因素,难以准确估算动物排泄系数,产生量估算数据偏差较大,不利于其养分的有效管理和养分回用农田的合理配置。黄红英等将各类畜禽饲养周期统一划分为幼龄期、育成期、成熟期3个饲养阶段,根据不同饲养阶段动物日排泄量与群体结构比,以加权法创建了标准存栏动物排泄物产生量模型,计算出一个标准存栏动物单位的日排泄量(表1)^[4]。

在此基础上,通过对6个不同规模养殖场动物排泄物在堆放、储存及处置过程中的养分损失量监测,

摸清了畜禽粪便从排泄产生到农田回用过程中的养分损失率:粪便清扫出圈舍后,堆积过程中氮损失率为0.1%~60%,磷通过径流方式损失约为20%以上;高温好氧堆肥过程中氮损失率为13%~78%,磷损失较少;厌氧发酵过程中,总氮损失率为1%~12%,总磷损失率为2%~3%;沼液贮存90d,其中的总氮和总磷含量分别下降67.2%~84.3%和59.7%~93.5%。值得注意的是,在厌氧发酵过程中虽然只可能有1%~3%以磷化氢气体形式损失,但沼液中磷有77%以上会转移到固相(沼渣)中,大大减少养殖场由污水带入农田的磷量^[6]。

1.2 固体有机肥的农田回用技术

以固体畜禽粪便、秸秆等农业废弃物为主要原料,添加微生物发酵菌,经堆制、发酵、粉碎等工艺,达到行业产品质量标准的商品有机肥,不仅肥效好、施用方便,也是规模化处理畜禽粪便的有效方法^[7]。但由于有机物料中养分释放缓慢,对于生育期较短的作物,单纯施用有机肥会导致作物减产等问题。因此,采用有机肥、无机肥配施可保证作物产量,同时减少面源污染物的排放。稻麦轮作系统采用有机肥和无机化肥配施,可减少稻季径流损失6%~28%,麦季径流和渗透损失减少25%~46%^[8-9]。菜地有机无机配施可削减地表径流氮损失40%以上,削减磷损失40%~48%^[10]。在稻麦轮作系统、玉米地、菜地和经济作物(烟草)中,

表1 各类畜禽排泄物及氮磷产生量

Table 1 Generation coefficient of livestock and poultry

项目	粪尿量/kg·d ⁻¹ ·头 ⁻¹		粪便总量/ kg·d ⁻¹ ·头 ⁻¹	粪便氮磷产生量/g·d ⁻¹ ·头 ⁻¹	
	粪	尿		N	P
奶牛	25.42	16.18	41.59	190.48	34.16
肉牛	11.15	6.63	17.78	115.09	14.89
羊	1.62	0.81	2.43	20.07	2.18
肉猪	1.42	3.44	4.86	33.63	4.25
能繁母猪	1.58	5.06	6.64	46.64	6.02
肉鸡	0.14		0.14	0.65	0.48
蛋鸡	0.13		0.13	0.95	0.30
草鸡	0.09		0.09	0.44	0.21
鸭	0.13		0.13	0.61	0.30
鹅	0.18		0.18	0.84	0.41

注:计算公式(1) $QF=\sum(qFi \times Ri)$; (2) $QU=\sum(qUi \times Ri)$; (3) $QM=\sum(qFi \times Ri + qUi \times Ri)$; (4) $QP=\sum[(qFi \times Ri + qUi \times Ri) \times Ci]$,式中, QF 、 QU 、 QM 和 QP 分别为每头标准存栏动物单位的日产粪量、日产尿量、日产粪便量和日产污量,kg·d⁻¹; qFi 、 qUi 分别为第*i*生产阶段粪、尿产量,kg·d⁻¹; Ri 为第*i*生产阶段群体中结构比例; Ci 为第*i*生产阶段粪尿中氮、磷浓度,g·kg⁻¹。

有机肥替代量分别以 20%~30%^[11]、<50%^[12]、10%~20%^[13]和<20%^[14]为宜。同时,以基肥施入既能维持土壤肥力和作物产量,又控制了成本投入,是减少农业面源污染的主要施用技术^[8-9,11]。除了施肥模式,应用有机肥替代减量技术时,还应考虑作物类型、土壤类型、气候特征、径流发生时间等问题。

1.3 养殖肥水和沼液的农田回用技术

除了固体粪便,养殖场还产生大量的动物尿液和冲洗水^[15]。由于其 COD、总氮、总磷等含量高^[16],目前国内外的普遍做法是将其直接还田利用或者进行厌氧发酵后还田。试验结果表明,养殖肥水和沼液替代化肥 25%~75%,可提高水稻、小麦、玉米等作物产量 7%左右^[4,17];沼液施用可提高萝卜等 5 种蔬菜、水蜜桃及玉米籽粒的品质^[17-18]。在水稻、水芹等水田中施用沼液或养殖肥水,田面水中氮和磷的浓度可达 110.6 mg·L⁻¹ 和 20.0 mg·L⁻¹^[18],此时减少排水可降低氮磷污染物进入水体的风险;在水蜜桃、蔬菜等旱作植物上施用,应充分考虑与水分管理相结合^[4,19],达到施肥与灌溉的双重目的。此外,畜禽粪便沼液中较高的铵态氮及厌氧形成的腐殖物质对植物有良好的抑菌作用^[20-22],利用沼液制备的生物药肥可防治土传病害,不仅可以增加其消纳途径,而且可提高沼液的附加值。

养殖肥水和沼液在农田施用时,需要采取不同的田间运筹方式,以降低其中的氮、磷损失^[23-29]。沼液在农田施用中应避免高温、高 pH 土壤以及降水前或灌溉后施用^[24,30]。一次性施肥比分次施肥能有效减少 NH₃ 挥发量^[31-32]。麦季将沼液一次性作为基肥施入可降低 23.0% 的氮素损失。直接滴灌是减少液体肥料入田后氮素挥发损失及磷素径流最有效的方式。但因沼液中颗粒物和微生物絮凝体含量较高会堵塞滴灌设备,肥水或沼液中氮磷浓度过高会伤害植物根系,造成作物减产等问题,因此需要设置防堵装置(对沼液进行过滤和灭菌的一体机,实用新型专利,专利号:ZL201220551073.6),并选用配备前处理装置的沼液滴灌设备^[33-34]。

2 农作物秸秆中氮磷养分的农田回用技术

2.1 作物秸秆中储存的养分量

中国是世界第一秸秆产生国,稻秸、麦秸和玉米秸是中国产量最高的 3 大作物秸秆^[35-37]。据估算,2005 年中国秸秆总产量达到 8.4 亿 t,与 1990 年相比增长了 21.19%,年均增长 1.3%^[36]。作物秸秆中氮、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)养分资源数量分别为 776 万 t、249 万

t 和 1342 万 t^[37-39]。但秸秆的处理利用率不高,2006 年中国作物秸秆氮、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)养分还田量分别为 304.6 万 t、175.6 万 t、966.7 万 t,占秸秆养分资源量的比例分别为 39.3%、70.5%和 72.0%^[37]。其余的秸秆约 20%以上被焚烧或随意丢弃,如果将这部分秸秆还田利用,可降低 27.4%以上的氮素流失^[40],而且能替代约 30%化肥用量,实现养分循环利用。

2.2 秸秆直接还田技术

直接还田是秸秆的主要利用方式,在常见还田作物秸秆中,麦秸还田的比例最大,稻秸次之,玉米秸最低^[37]。主要的机械化还田方式有粉碎匀抛还田、整秆还田、覆盖免耕还田等。秸秆还田有效地增加了秸秆的消纳量,降低了在河道附近随意丢弃造成水体污染的风险。秸秆还田可减少稻麦周年的氮磷径流损失量 7%~8%^[41],与有机无机配施可减少径流和淋溶,无机氮损失减少 23%和 25%。此外,秸秆直接还田对土壤质量、微生物、作物及农田生态环境有积极的作用^[42-44]。

2.3 基于堆肥化处理的秸秆间接还田技术

植物秸秆常带有作物病菌,直接还田时往往会加重病害。采取高温好氧堆肥技术,可以有效杀灭病菌,减少秸秆直接还田带来的耕作难度和风险^[45];与畜禽粪污混合堆肥,每处理 1 t 麦秸可消纳废水 1.8~3 t,这不仅可以克服畜禽粪便和秸秆单独堆肥时的不利因素,同时可以解决粪水单独处理费用高与利用困难等问题。利用秸秆自身的有机碳和养分堆制后返还土壤,可以提供给作物生长所必需的养分,减少化肥用量,降低面源污染的风险。秸秆与猪场废水高温堆肥过程是氮和磷累加的过程,有机碳含量降低 10.7%以上^[46-47]。但联合堆肥过程中微生物种类、数量、降解酶活性等与传统堆肥方式有所不同^[48],其肥效是否与常规堆肥一致,尚需进一步研究。

2.4 基于能源利用的秸秆间接还田技术

利用作物秸秆为原料或与畜禽粪便混合厌氧发酵生产可再生能源是解决环境污染和生产清洁能源的重要途径之一^[49]。通过厌氧发酵的方式可将秸秆转化成可利用的清洁能源——沼气,出料液一般经过固液分离机进行脱水,液体回流进入消化罐再利用,固体则作为肥料使用,此模式适应了现代农村发展的需求,具有良好的经济、环境和生态效益^[50-54]。与畜禽粪便厌氧发酵后的沼渣相比,秸秆沼渣的碳氮比^[55]、有机质^[56],以及木质素、纤维素等较难被微生物分解利用的有机物含量较高^[57-58]。稻秸沼渣施入土壤后可明

显提高土壤有机碳矿化速率和微生物生物量碳,秸秆发酵半年的沼渣矿化特性优于发酵1年的秸秆沼渣。相比商品有机肥,秸秆沼渣农肥化对提高蔬菜产量和品质有很好的效果^[55]。“猪-沼-稻-果”综合农业利用模式下,沼气池技术节能减排效果明显^[59]。

2.5 其他还田技术

通过秸秆梯级利用来延伸产业链条,提升秸秆的附加值,不但部分解决了秸秆随意丢弃所造成的面源污染问题,对提高农民积极性和促进增收以及改善农村生态环境具有多种效益^[57]。如食用菌渣还田和过腹还田等,尽可能实现秸秆和其他废弃物的资源化,减少其中的氮磷等向环境的直接排放^[60]。

3 农村生活污水、农田排水及富营养化河水氮磷养分的稻田处理技术

3.1 农村生活污水及处理尾水中的氮磷养分及处理现状

分散农户产生的生活污水大多未经任何处理就直接排放至周围河道。即使经分散式农村生活污水处理工程处理,其尾水中TN浓度依然高达10~15 mg·L⁻¹,仍旧是一个不容忽视的污染源。太湖流域稻田广泛分布,而稻田作为一种特殊的人工湿地,不仅提供了我国三分之二人口的主食,对于我国粮食安全举足轻重,而且在蓄滞洪水、补充地下水、保护环境、维护生态平衡中具有重要作用。污水中的氮磷进入水体是污染源,但其对于农业生产系统来说是一种必需的大量营养元素。研究表明,当灌溉水源中氮浓度在3 mg·L⁻¹以上时,稻田具有净化水体的作用^[9,61-62]。在日本的实践也表明,采用循环灌溉技术,稻田能有效净化河道中的氮磷养分^[63-64]。袁俊吉等研究发现利用稻田生态系统在1周内就可以有效控制污水中的无机氮。Li等^[65]发现采用农村生活污水替代地表水灌溉稻田湿地,可在保证产量的同时高效除磷,去除效率高达75.2%~98.2%。

3.2 农村生活污水及处理尾水中氮磷养分的稻田处理技术

薛利红和杨林章等在“十一五”期间研发了基于稻田湿地的生活污水工程尾水净化技术,利用稻田人工湿地这一功能,通过土壤的吸附作用、硝化反硝化作用以及水稻植株的吸收利用等去除污水中的氮磷,从而实现生产与环境的双赢。稻田可设置成地表漫流型湿地(即传统的畦作稻田),或设置成沟灌渗滤型湿地,沟渠占地比以10%为宜。为了保证稻田的生产力,

在水稻生长前期可适当施用一些化肥,以80~120 kgN·hm⁻²为宜。水稻进入旺盛生长期后(分蘖肥施用后10 d)即可利用稻田人工湿地来净化这些低污染水。采用动态布水方式,地表漫流型湿地每日进水量为2~3 mm深,沟灌渗滤型保证沟渠水面与畦面基本持平,水力停留时间以3 d左右为宜。如遇降雨则停止进水,并关闭出水口。研究结果表明,在水稻拔节期和灌浆期,稻田人工湿地对低污染水中氮、磷的净化效率分别可达75%~81%、82%~96%,进水TN浓度变化在2~8.57 mg·L⁻¹之间,出水TN浓度则稳定在2 mg·L⁻¹以下,沟灌渗滤型的处理效率高于漫流型湿地;水稻前期施肥90 kg N·hm⁻²,产量可达7~8.5 t·hm⁻²。此外,旱地如桃园和菜地的径流排水也可引入稻田人工湿地,对排水中的氮磷进行再次回用。施卫明等在“十一五”期间的研究表明,稻季菜地排水TN浓度最高可达39.2 mg·L⁻¹,平均16.45 mg·L⁻¹,经过稻田吸收消纳后,排水总氮浓度可降低至0.24~4.17 mg·L⁻¹,平均2.16 mg·L⁻¹,脱氮效果显著。

4 研究展望

农村面源污染已成为我国湖泊富营养化及水环境污染的最重要来源。对农业废弃物中的氮磷等养分资源进行循环利用,可节约资源、减少污染、增加经济效益,实现生产和环境的双赢。前期的工作对畜禽粪便、作物秸秆以及农村生活污水、农田排水及富营养化河水中的氮磷养分在农田的利用技术做了大量且深入的研究,明确了其实际入田量、施用条件及方式、经济及环境效益等。但仍有一些问题亟待解决,如:缺乏基于农产品质量安全、环境友好及经济合理性的废弃物氮磷养分农田回用的预警分析;农业废弃物及农村生活污水氮磷养分农田回用与优质、高效、环境友好的农作物水、肥管理技术的耦合,还有待系统深入的研究。农业废弃物或生活污水在处理、运输以及农田施用过程中不可避免地产生跑、滴、漏现象,加上过量或不合理的施用等,也都会造成农田氮、磷径流负荷增加。因此,还需要通过一些水体生态工程修复措施,进一步消纳这部分氮、磷,实现对面源污染的有效控制。

参考文献:

- [1] 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的“4R”治理技术——总体思路与“4R”治理技术[J].农业环境科学学报,2013,32(1):1-8.
YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-Re-

- tain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 1-8.
- [2] 常志州, 靳红梅, 黄红英, 等. 畜禽养殖场粪便清理、堆积及处理单元氮损失研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 1068-1077.
- CHANG Zhi-zhou, JIN Hong-mei, HUANG Hong-ying, et al. Nitrogen loss during cleaning, storage, compost and anaerobic digestion of animal manures in individual treatment unit[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 1068-1077.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 第一次全国污染源普查公报[M]. 中华人民共和国国家统计局, 2010.
- [4] 黄红英, 常志州, 叶小梅, 等. 区域畜禽粪便产生量估算及其农田承载预警分析: 以江苏为例[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(4): 777-783.
- HUANG Hong-ying, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Regional production of livestock manure and its alarming of cropland loading: A case study of Jiangsu province[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 29(4): 777-783.
- [5] 常闻捷, 边博, 蔡安娟, 等. 太湖重污染区麦季养分输入与流失规律研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(2): 8-13.
- CHANG Wen-jie, BIAN Bo, CAI An-juan, et al. Nutrient inputs and runoff losses during wheat season in highly-contaminated zone of Taihu Lake Region[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(2): 8-13.
- [6] 付广青, 叶小梅, 靳红梅, 等. 厌氧发酵对猪与奶牛两种粪污固液相中磷含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 179-184.
- FU Guang-qing, YE Xiao-mei, JIN Hong-mei, et al. Effect of anaerobic digestion on phosphorus transformation of both pig and dairy manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 179-184.
- [7] 刘秀梅, 罗奇祥, 冯兆滨, 等. 我国商品有机肥的现状与发展趋势调研报告[J]. 江西农业学报, 2007, 19(4): 49-52.
- [8] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻麦轮作系统不同氮肥管理模式对麦季氮素利用与流失的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2475-2482.
- YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Nitrogen use efficiency and loss from runoff and leaching in wheat season with rice-wheat rotation system under different nitrogen management methods in Taihu Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2475-2482.
- [9] 薛利红, 俞映惊, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 222-227.
- XUE Li-hong, YU Ying-liang, YANG Lin-zhang. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake Region[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 222-227.
- [10] 黄东风, 王果, 李卫华, 等. 不同施肥模式对小白菜生长、营养累积及菜地氮、磷流失的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 619-624.
- HUANG Dong-feng, WANG Guo, LI Wei-hua, et al. Effect of fertilization mode on growth and nutrition accumulation in vegetables, and loss of nitrogen and phosphorus in vegetable fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(4): 619-624.
- [11] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 881-888.
- XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 881-888.
- [12] 黄涛, 仇少君, 杜娟, 等. 碳氮管理措施对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量、秸秆腐解、土壤CO₂排放的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(4): 756-768.
- HUANG Tao, QIU Shao-jun, DU Juan, et al. Effects of different carbon and nitrogen managements on yield, straw decomposition, soil CO₂ flux of the winter wheat/summer maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(4): 756-768.
- [13] 张雪艳, 田蕾, 高艳明, 等. 生物有机肥对黄瓜幼苗生长、基质环境以及幼苗根系特征的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 117-125.
- ZHANG Xue-yan, TIAN Lei, GAO Yan-ming, et al. Effects of bioorganic fertilizer on cucumber seedling growth, substrate nutrient content and seedling root characteristics [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1): 117-125.
- [14] 邹芳芸, 李建伟, 党先碧. 烟草农艺性状、经济性状及化学性状对不同营养调控措施的响应[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(8): 96-99.
- [15] Lu J B, Zhu L, Hu G L, et al. Integrating animal manure-based bioenergy production with invasive species control: A case study at Tongren Pig Farm in China[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34(6): 821-827.
- [16] 靳红梅, 常志州, 叶小梅, 等. 江苏省大型沼气管沼液理化特性分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 291-296.
- JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 291-296.
- [17] 吴华山, 郭德杰, 马艳, 等. 猪粪沼液施用对土壤氨挥发及玉米产量和品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(2): 163-168.
- WU Hua-shan, GUO De-jie, MA Yan, et al. Effects of pig manure-biogas slurry application on soil ammonia volatilization and maize output and quality[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(2): 163-168.
- [18] 赵莉. 施用沼液对水芹产量、品质及土壤氨挥发的影响[D]. 南京农业大学, 2013.
- ZHAO Li. Effect of biogas slurry application on the growth and quality of *Oenanthe javanica* and ammonia volatilization from soils[D]. Nanjing Agricultural University, 2013.
- [19] 汪吉东, 曹云, 常志州, 等. 沼液配施化肥对太湖地区水蜜桃品质及土壤氮素累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 379-386.
- WANG Ji-dong, CAO Yun, CHANG Zhi-zhou, et al. Effects of combined application of biogas slurry with chemical fertilizers on fruit qualities of *Prunus persica* L. and soil nitrogen accumulation risk[J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 379-386.
- [20] 马艳, 李海, 常志州, 等. 沼液对植物病害的防治效果及机理研究 I: 对植物病原真菌的抑制效果及抑菌机理初探[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 366-374.
- MA Yan, LI Hai, CHANG Zhi-zhou, et al. Biocontrol effect and mech-

- anism of biogas slurry on plant disease I: Primary study of growth inhibition effects and mechanism on phytopathogen fungi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2): 366-374.
- [21] 曹云, 常志州, 马艳, 等. 沼液施用对辣椒疫病的防治效果及对土壤生物学特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 507-516.
- CAO Yun, CHANG Zhi-zhou, MA Yan, et al. Effects of application of anaerobically digested slurry on suppression of pepper (*Capsicum frutescens* L.) blight and soil biological characteristics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(3): 507-516.
- [22] Cao Y, Chang Z, Wang J, et al. The fate of antagonistic microorganisms and antimicrobial substances during anaerobic digestion of pig and dairy manure[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 136: 664-671.
- [23] Thompson R B, Meisinger J J. Management factors affecting ammonia volatilization from land-applied cattle slurry in the Mid-Atlantic USA [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(4): 1329-1338.
- [24] Meijide A, Díez J A, Sanchez-Martin L, et al. Nitrogen oxide emissions from an irrigated maize crop amended with treated pig slurries and composts in a Mediterranean climate[J]. *Agricultural, Ecosystem & Environment*, 2007, 121(4): 383-394.
- [25] Marcato C -E, Pinelli E, Cecchi M, Winterton P, Guirese M. Bioavailability of Cu and Zn in raw and anaerobically digested pig slurry[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(5): 1538-1544.
- [26] 靳红梅, 付广青, 常志州, 等. 猪、牛粪厌氧发酵中氮素形态转化及其在沼液和沼渣中的分布[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 208-214.
- JIN Hong-mei, FU Guang-qing, CHANG Zhi-zhou, et al. Distribution of nitrogen in liquid and solid fraction of pig and dairy manure in anaerobic digestion reactor[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(21): 208-214.
- [27] 黄红英, 曹金留, 常志州, 等. 猪粪沼液施用对稻麦轮作系统土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2353-2361.
- HUANG Hong-ying, CAO Jin-liu, CHANG Zhi-zhou, et al. Influence of application of digested pig slurry on nitrous oxide emission under rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2353-2361.
- [28] 靳红梅, 常志州, 郭德杰, 等. 追施猪粪沼液对菜地氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 98-105.
- JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, GUO De-jie, et al. Effect of topdressing with digested pig slurry on ammonia volatilization in vegetable fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1): 98-105.
- [29] 靳红梅, 常志州, 吴华山, 等. 菜地追施猪粪沼液后 NH_3 和 N_2O 排放特征及氮损失率[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 待刊.
- JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, WU Hua-shan, et al. NH_3 and N_2O emissions and nitrogen loss rate after topdressing liquid digested pig slurry on vegetable fields[J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2013, inpress.
- [30] Mkhabela M S, Gordon R, Burton D, et al. The impact of management practices and meteorological conditions on ammonia and nitrous oxide emissions following application of hog slurry to forage grass in Nova Scotia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 130(1-2): 41-49.
- [31] Rotz C A. Management to reduce nitrogen losses in animal production [J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(E-Suppl): E119-137.
- [32] Sommer S G, Hutchings N J. Ammonia emission from field applied manure and its reduction-invited paper[J]. *European Journal of Agronomy*, 2001, 15(1): 1-15.
- [33] Martines A M, Nogueira M A, Santos C A, et al. Ammonia volatilization in soil treated with tannery sludge[J]. *Bioresource Technology* 2010, 101(12): 4690-4696.
- [34] Nyord T, Schelde K M, Søgaard H T, et al. A simple model for assessing ammonia emission from ammoniacal fertilizers as affected by pH and injection into soil[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(19): 4656-4664.
- [35] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291-296.
- CUI Ming, ZHAO Li-xin, TIAN Yi-shui, et al. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(12): 291-296.
- [36] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211-217.
- BI Yu-yun, GAO Chun-yu, WANG Ya-jing, et al. Estimation of straw resources in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 211-217.
- [37] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173-179.
- GAO Li-wei, MA Lin, ZHANG Wei-feng, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 173-179.
- [38] 全国农业技术推广中心. 中国有机肥料养分分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 53-81.
- [39] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆利用现状 [J]. 华中农业学报, 2002, 21(3): 242-247.
- GAO Xiang-zhao, MA Wen-qi, MA Chang-bao, et al. Analysis on the current of utilization of crop straw in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2002, 21(3): 242-247.
- [40] 王静, 郭熙胜, 王允青. 秸秆覆盖与平衡施肥对巢湖流域农田氮素流失的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 331-335.
- WANG Jing, GUO Xi-sheng, WANG Yun-qing. Effects of straw mulch and balanced fertilization on nitrogen loss from farmland in Chaohu Lake region[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(2): 331-335.
- [41] 刘红江, 郑建初, 陈留根, 等. 秸秆还田对农田周年地表径流氮、钾流失的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1031-1036.
- LIU Hong-jiang, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of straw-returning on annual overland runoff NPK loss in farmland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6): 1031-1036.
- [42] 朱普平, 常志州, 郑建初, 等. 太湖地区稻田主要种植方式氮磷径流损失及经济效益分析[J]. 江苏农业科学, 2007(3): 216-218.
- [43] 常丽丽. 秸秆直接还田形式及其效应分析[J]. 现代农业科技, 2011, (19): 298-299, 318.
- [44] 沈明星, 姚月明, 刘凤军, 等. 有机培肥方式对设施蔬菜-水稻种植模式产量及肥力的影响[J]. 江苏农业科学, 2004(6): 154-156.

- [45] 李瑞鹏, 于建光, 常志州, 等. 麦秸和奶牛场废弃物联合堆肥试验[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(1): 65-71.
LI Rui-peng, YU Jian-guang, CHANG Zhi-zhou, et al. Co-composting of wheat straw and dairy waste[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 28(1): 65-71.
- [46] 邓良伟, 蔡昌达, 陈铭铭, 等. 猪场废水厌氧消化液后处理技术研究及工程应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 92-94.
DENG Liang-wei, CAI Chang-da, CHEN Ge-ming, et al. Study and application of technology for post-treatment of anaerobic digested effluent of piggery wastewater[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(3): 92-94.
- [47] 邓良伟, 李建, 谭小琴, 等. 秸秆堆肥化处理猪场废水影响因子的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3): 506-511.
DENG Liang-wei, LI Jian, TAN Xiao-qin, et al. Influencing factors of treatment and reuse of piggery wastewater through compost using straw as carrier[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(3): 506-511.
- [48] 谭小琴, 邓良伟, 伍钧, 等. 猪场废水堆肥化处理过程中微生物及酶活性的变化[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 244-248.
TAN Xiao-qin, DENG Liang-wei, WU Jun, et al. Variations of the amount of microbe and the activity of decomposing enzyme during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1): 244-248.
- [49] Pohl M, Mumme J, Heeg K, et al. Thermo- and mesophilic anaerobic digestion of wheat straw by the upflow anaerobic solid-state (UASS) process[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 124: 321-327.
- [50] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87-91.
HAN Lu-jia, YAN Qiao-juan, LIU Xiang-yang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(3): 87-91.
- [51] 吴楠, 孔垂雪, 刘景涛, 等. 农作物秸秆产沼气技术研究进展[J]. 中国沼气, 2012, 30(4): 14-20.
WU Nan, KONG Chui-xue, LIU Jing-tao, et al. Research progress on crop straw biogas technology[J]. *China Biogas*, 2012, 30(4): 14-20.
- [52] 史玉红, 刘宏新. 沼气工程残余物资源化利用研究[J]. 农机化研究, 2012(2): 211-214.
SHI Yu-hong, LIU Hong-xin. Methane project residue utilization research[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012(2): 211-214.
- [53] Jin H M, Chang Z Z. Distribution of heavy metal contents and chemical fractions in anaerobically digested manure slurry[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2011, 164(3): 268-282.
- [54] 张浩, 雷赵民, 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): 1298-1301.
ZHANG Hao, LEI Zhao-min, DOU Xue-cheng, et al. Analysis of nutritive value of biogas residues and heavy metal content in feedstuff with biogas residues and the pork fed on it[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(5): 1298-1301.
- [55] 高白茹, 常志州, 叶小梅, 等. 稻秸沼渣矿化特征及对青菜生长和品质的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(4): 647-652.
GAO Bai-ru, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Mineralization characteristics of biogas residues of rice straw and its effect on vegetable growth[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(4): 647-652.
- [56] 李玉春, 陈广银, 常志州, 等. 碳氮比对稻秸厌氧发酵过程的影响[J]. 中国沼气, 2012, 30(4): 25-29.
LI Yu-chun, CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, et al. Effect of C/N on anaerobic digestion of rice straw[J]. *China Biogas*, 2012, 30(4): 25-29.
- [57] Abiven S, Recous S. Mineralization of crop residues on the soil surface or incorporated in the soil under controlled conditions[J]. *Biological and Fertility of Soils*, 2007, 43(6): 849-852.
- [58] 柳敏, 张璐, 宇万太, 等. 有机物料中有机碳和有机氮的分解进程及分解残留率[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2503-2506.
LIU Min, ZHANG Lu, YU Wan-tai, et al. Decomposition process and residual rate of organic materials C and N in soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2503-2506.
- [59] 陈绍晴, 宋丹, 杨谨, 等. 户用沼气模式生命周期减排清单与环境效应分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(8): 76-83.
CHEN Shao-qing, SONG Dan, YANG Jin, et al. Life-cycle emission mitigation inventory and environmental benefit of household biogas mode[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(8): 76-83.
- [60] 冯伟, 张利群, 庞中伟, 等. 中国秸秆废弃焚烧与资源化利用的经济与环境分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 350-354.
FENG Wei, ZHANG Li-qun, PANG Zhong-wei, et al. The economic and environmental analysis of crop residues burning and reutilization in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(6): 350-354.
- [61] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 II. 稻田土壤氮素养分的累积、迁移及其生态环境意义[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 256-260.
CAO Zhi-hong, LIN Xian-gui, YANG Lin-zhang, et al. Ecological function of “paddy field ring” to urban and rural environment II. Characteristics of nitrogen accumulation, movement in paddy field ecosystem and its relation to environmental protection[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2): 256-260.
- [62] 袁俊吉, 马永玉, 周鑫斌, 等. 稻田生态系统对污水中无机态氮的消纳[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(9): 7-15.
YUAN Jun-ji, MA Yong-yu, ZHOU Xin-bin, et al. Inorganic nitrogen sequestration in rice-based ecosystems[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2009, 31(9): 7-15.
- [63] Takeda I, Fukushima A, Tanaka R. Non-point pollution reduction in a paddy-field watershed using a circular irrigation system[J]. *Water Research*, 1997, 31(11): 2685-2692.
- [64] Feng Y W, Yoshinaga I, Shiratani E, et al. Nutrient balance in a paddy field with a recycling irrigation system[J]. *Water Science and Technology*, 2005, 51(3-4): 151-157.
- [65] Li S, Li H, Liang X Q, et al. Phosphorus removal of rural wastewater by the paddy-rice-wetland system in Tai Lake Basin[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1-3): 301-308.