

畜禽养殖废弃物还田利用模式发展战略

贾伟^{1,2}, 臧建军³, 张强², 李德发³

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室 / 金正大生态工程集团股份有限公司, 北京 100022; 3. 中国农业大学动物科技学院饲料工业中心, 北京 100193)

摘要: 本文介绍我国畜禽养殖废弃物还田利用模式发展概况, 分析养殖废弃物循环利用产业发展的问题, 探讨下一步的发展战略。总结发现, 多年来国内外在探索畜禽养殖废弃物还田利用模式、农田适宜载畜量参数等方面取得了重要的进展, 但仍然存在种养结合养分不平衡、各种处理过程养分损失大、农田合理施用粪肥原则缺失等问题。下一步的研究应该以“还田利用, 环境友好”为目标, 引入种养结合粪便养分管理理念, 开展畜禽养殖废弃物的收集—贮存—处理—还田; 开展包括优化还田安全利用技术、种养循环过程温室气体减排、农田对养殖废弃物合理消纳量定量、减少氮磷养分损失避免面源污染等方面的研究, 同时在政策上引导畜禽养殖废弃物的高效资源化利用。

关键词: 规模化; 养殖场; 粪便; 废水; 种养结合; 养分

中图分类号: S82; S83 **文献标识码:** A

Development Strategies for Utilization Models for Returning Livestock and Poultry Manure to the Land

Jia Wei^{1,2}, Zang Jianjun³, Zhang Qiang², Li Defa³

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization/Kingenta Ecological Engineering Group Co. Ltd., Beijing 100022, China; 3. Ministry of Agriculture Feed Industry Centre, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: This paper summarizes the development of utilization models for the return of livestock and poultry manure to farmland in China. It analyzes the problems affecting the industrial development of the utilization of livestock and poultry manure recycling, and discusses development strategies for the next step in this process. In past years, important progress has been achieved in exploring utilization models for returning livestock and poultry manure to farmland, and in identifying suitable parameters for the farmland carrying capacity of livestock, both at home and abroad. However, problems remain such as unbalanced nutrients after combining planting and livestock systems, large nutrient losses, and a lack of reasonable principles for manure application on farmland. In the next step, studies should be based on the concept of the environmentally friendly return of manure to farmland and should introduce the concept of nutrient management after combining planting and livestock systems. Techniques should be carried out for the collection, storage, and processing of manure; for its return to farmland; for reasonable manure applications; for balancing nitrogen and phosphorus nutrients in order to reduce non-point source pollution; and for other aspects. In addition, policies about the efficient recycling of livestock and poultry manure should be promoted.

Keywords: large-scale; livestock farm; manure; wastewater; combining planting and livestock systems; nutrients

收稿日期: 2017-06-25; 修回日期: 2017-07-15

通讯作者: 臧建军, 中国农业大学动物科技学院饲料工业中心, 高级畜牧师, 研究方向为猪营养与环境; E-mail: zangjj@cau.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“生态文明建设若干战略问题研究(二期)”(2015-ZD-16); 国家高技术研究(863)计划“畜禽环境监控与数字化养殖关键装备开发”(2013AA10230602)

本刊网址: www.enginisci.cn

一、前言

1978—2012 年,我国畜牧业的增加值增长了 130 倍,种植业的增加值增长了 42 倍,畜牧业增加值的增幅远远超过种植业 [1]。规模化养殖是畜牧业现代化的重要标志。2014 年我国生猪出栏 500 头以上、肉鸡出栏 10 000 只以上、蛋鸡存栏 2 000 只以上的规模养殖比重分别达到 41.8%、73.3% 和 68.8% [2]; 2015 年奶牛存栏 100 头以上、肉牛出栏 50 头以上、肉羊出栏 100 只以上的规模养殖比重分别达到 45.2%、27.5%、36.5% [3]。按照“十三五”规划,到 2020 年我国生猪出栏 500 头以上、奶牛存栏 100 头以上的规模养殖比重将达到 52% 和 60%,畜牧业整体的规模化率达到 50% 以上。目前,在我国生猪、蛋禽和奶牛优势省区,猪肉、禽蛋和牛奶产量分别占我国猪肉、禽蛋和牛奶总产量的 92%、68% 和 88%。随着规模化发展,畜禽粪便总量持续增加且更趋集中;而我国长期以来的种养分离事实,导致畜禽粪便养分无法做到有效的还田利用,短期内优势养殖产业区的环境压力越来越大,养殖生产的环境问题更加凸显。

种养结合利用粪肥养分是当前有效利用畜禽粪肥的最优途径。我国畜禽粪便养分可提供的氮、磷和钾分别约相当于 3.602×10^7 t 尿素、 1.166×10^8 t 过磷酸钙和 2.122×10^7 t 氯化钾 [4,5]。据估计,我国畜禽粪便中氮、磷养分分别相当于同期化肥使用量的 79% 和 57%,高效利用养殖废弃物对于减少化肥使用量意义重大 [6]。粪肥替代化肥施用可以减少化肥生产和施用,避免资源的浪费和温室气体的排放 [7]。畜禽粪便养分还田利用涉及畜舍饲养、粪便收集、粪便贮存、土壤作物利用的整个种养循环过程,各环节的养分损失差异很大 [8,9]。在我国开展畜禽养殖废弃物种养结合还田利用模式,还缺少对于粪肥养分管理、农田合理施用粪肥等的研究。本文重点总结国内外畜禽

养殖废弃物还田利用模式,比较这些模式的实施效果,形成我国绿色养殖废弃物还田利用模式的发展战略思路,提出开展相关工程的措施和建议。

二、国外畜禽养殖废弃物还田利用模式及机制

(一) 国外畜禽养殖废弃物还田利用的主要模式

养殖废弃物还田利用模式是围绕固体粪便和尿液进行的全部活动,涉及从畜舍收集、贮存、发酵处理、运输到最终施用整个粪便链条中的损失和排放 [10]。常见养殖废弃物还田利用模式链条见图 1。

美国 Smithfield 公司猪场主要采用厌氧发酵塘处理后贮存的方式,粪便等最终全部作为有机肥用于农田施用。美国农业部调研发现,养殖畜禽粪便主要是直接还田模式,粪便—沼气—沼液还田模式很难与其竞争;从市场角度看,粪便—沼气—沼液还田模式更适合于粪便供应充足、肥料价值最小的区域。美国的畜禽粪便能源技术已经商业化使用多年,如焚烧厂、厌氧发酵沼气燃料发电等,但这些技术仍未大面积推广应用 [11]。美国畜禽养殖场废弃物还田利用基本情况,如表 1 所示。

英国的畜禽粪便主要利用途径是肥料还田,其模式为粪便—贮存—农田。液体粪便贮存方式主要分为地上储罐、围墙式贮存、氧化塘、地下储罐



图 1 养殖废弃物还田利用模式链条

表 1 美国畜禽养殖场废弃物还田利用基本情况

养殖场	养殖区分布	农田配套	粪便收集	施用作物	实施效果
奶牛	美国西部、加利福尼亚州、爱达荷州、新墨西哥州	16% 的奶牛场没有配套农田,需要长途运输到农田进行施用	水泡粪	玉米	***
猪	北卡罗莱纳州、俄克拉荷马州、犹他州、美国西部	22% 的猪场没有配套农田,需要长途运输到农田进行施用	水泡粪	玉米	***
肉鸡	美国南部	非常少的肉鸡场在周边配套农田	干清粪	花生、棉花	***

注: *** 代表还田实施效果非常好; ** 代表还田实施效果好; * 代表还田实施效果一般。

等。液体粪便主要施用方式为表层撒施、条施、浅层注射、深层注射、喷灌等 [12,13]。孟加拉国有 70%~80% 的农户贮存固体粪便，其中 50% 的固体粪便用于作物施肥。越南大部分的大中型养殖场有沼气工程设施，养殖场产生的 70%~90% 的沼渣用于农田施肥或水产养殖。阿根廷液体粪便贮存于氧化塘中，75% 的农场贮存固体粪便，50% 的农场粪便进行还田施用。哥斯达黎加有 50% 的规模化奶牛场将粪肥施用于牧场草地；大部分养猪场会收集和贮存粪便，其中 50% 的养猪场有沼气处理工程设备 [10]。部分国家畜禽养殖场废弃物还田利用情况，如表 2 所示。

(二) 欧美畜禽养殖废弃物还田利用的机制

美国养殖废弃物污染防治国家战略和国家污染物排放削减 (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 [14]。美国畜禽粪便综合养分管理计划，强制养殖大户必须实施、鼓励养殖小户自愿实施。欧盟国家的农业环境得到保护，养分管理政策起着非常重要的作用 [15]。养分管理政策推动了英国养殖废弃物还田利用，同时减少硝酸盐淋洗和温室气体对环境的影响，英国按照粪便养分管理计划进行了养殖粪肥的

施用 [12]。德国没有针对畜禽养殖废弃物管理和利用开展过专门的立法，但将养殖废弃物污染防治的相关规定融入到环保领域相关的法律法规中；在德国，80% 的农场采取种养结合，还田利用模式为养殖粪便—沼气—农田，农场用肥需考虑养分平衡，依据是不超出作物氮、磷养分的需求上限 [16]。

美国的粪便综合养分管理计划和欧盟养分管理政策实质是相同的，目的都是提高粪肥养分的利用率，减少养分的环境损失。美国和欧盟都制定了相关的法律法规来实现养分管理，如硝酸盐法案和硝酸盐敏感区、水保护法案、“590”法案、水洁净法案等 [17]。

粪便综合养分管理的核心是养分平衡，其主要考量畜禽所产生提供的养分量、作物目标产量氮磷养分需求量以及土壤养分水平，以减少粪便养分的环境排放。欧美国家已经用养分平衡方法表征了种养结合系统生产的可持续性，同时指导养殖废弃物的还田利用 [18~20]。欧美养分平衡应用以农场平衡法、养分利用率法、土壤表观平衡法使用最多 (见表 3)。为提高养分利用率，实施畜禽粪便养分综合管理计划，将环境保护与种植业、养殖业养分管理有机结合，在满足作物需求的同时，解决畜禽养殖污染问题，促进农业领域的可持续发展。

表 2 部分国家畜禽养殖场废弃物还田利用情况

国家	畜禽种类	还田利用模式	粪便收集	实施效果	文献来源
英国	猪、牛、家禽	粪便—贮存—农田	水泡粪、垫料收集	***	[12,13]
孟加拉国	鸡、鸭、牛	粪便—贮存—农田	干清粪	**	[10]
越南	猪、牛、家禽	粪便—沼气—农田 / 水产养殖	干清粪	**	[10]
阿根廷	肉牛	粪便—贮存—农田	干清粪	**	[10]
哥斯达黎加	奶牛、猪	粪便—牧草，粪便—贮存 / 沼气—农田	水冲粪	*	[10]

注：*** 代表还田实施效果非常好；** 代表还田实施效果好；* 代表还田实施效果一般。

表 3 养分平衡应用

国家	土壤表观平衡法	土壤系统平衡法	农场平衡法	养分利用率法	文献来源
美国	0	0	1	1	[21]
荷兰	6	0	8	8	[22~29]
丹麦	0	0	1	1	[30]
德国	0	1	1	1	[31]
意大利	1	0	1	0	[32]
英国	1	0	1	0	[33]
澳大利亚	0	0	0	0	[34]
日本	1	0	1	1	[35]
越南	0	0	0	0	[36]
总计	9	1	14	12	

(三) 农田合理施用粪肥

1. 粪肥施用推荐

英国和美国都推荐采用粪肥定量施用原则。农田作为畜禽粪便的消纳场所,其容量既取决于土壤的质地肥力,又受作物收获时籽粒和秸秆吸收量的影响[37]。控制粪肥施用量对减少氮挥发损失尤为重要[38]。粪肥中氮/磷大约是作物生长所需氮/磷的2倍,在粪肥为满足作物对氮的需要而进行施肥后,将会使土壤中磷的水平增加。建议根据作物磷需求量与土壤磷测定来确定施肥时磷的需求量,以达到使用适当粪肥施用量的目标[39]。欧盟的硝酸盐法案规定,在硝酸盐敏感区粪肥施用的最大量为 $170\text{ kg}\cdot\text{N}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$,该限值迫使养殖场将多余的粪便运输到其他的农场并加以利用[14]。

2. 施肥方式

粪肥在地表的时间越长,其被灌溉水或雨水径流导致的损失就越大,氮挥发造成的流失也就越大,因此将粪肥与表土混合可有效降低养分的流失状况,研究表明深施有利于减少氮的挥发和径流损失[40,41]。撒施后翻耕和条施后覆土处理能有效抑制氮的挥发和氧化亚氮的排放损失[42],液态粪肥喷施后翻耕比表土条施,氮的损失量低55%[38,43]。当液体、固体粪肥施用,深耕并立即覆盖是最有效的减排技术[44]。

3. 施肥季节

氮素的流失与季节有关,应尽量避免在秋季及初冬时节施肥,推迟到冬末或初春施肥有利于减少养分流失而增加作物对养分的吸收[45]。在作物生

长旺盛的季节,根系的吸收能力强,所施加的粪肥中的速效养分可以被作物迅速吸收,从而有利于减少养分的损失[40]。

三、我国畜禽养殖废弃物还田利用模式发展现状

(一) 养殖废弃物还田利用模式

种养结合是我国畜禽粪污处理的主要方式之一,是指养殖场固体粪便通过自然堆放或堆肥处理后的农田利用,污水与部分固体粪便进行厌氧发酵或者经过氧化塘贮存,沼渣、沼液或粪污用作农作物肥料[46]。

粪肥还田利用途径主要分为:第一类是畜禽养殖—贮存—农田模式,该模式粪便和污水全部贮存,全部粪便和污水作为有机肥直接还田利用。第二类是畜禽养殖—沼气—农田模式,以沼气池技术为核心,将粪便污水作为沼气池的原料,在缺氧的条件下生成沼气、沼渣和沼液,沼气用于燃料或发电,沼渣和沼液用于种植农作物等。第三类是畜禽养殖—堆肥+沼气—农田模式,该模式的粪污处理系统由预处理、厌氧处理、好氧处理、后处理、固液分离、沼渣沼液农田利用、沼气净化、沼气贮存与利用等部分组成。我国区域养殖废弃物还田利用模式,如表4所示[47]。

(二) 养殖废弃物还田利用量

我国在农田粪肥的合理施用方面,缺乏对粪

表4 我国区域养殖废弃物还田利用模式

区域	分区	农作物熟制	畜牧业	还田利用模式
东北区	东三省及内蒙古东北部 大兴安岭地区	一年一熟	发达	养殖废弃物—沼气/贮存—农田
华北区	河北平原、黄淮平原、京郊	一年两熟	城郊型畜牧业发达	养殖废弃物—堆肥+沼气—农田利用
西北区	西北内陆绿洲、黄土高原	一熟灌区	发展迅速	猪/牛—堆肥+沼气—玉米 猪/牛—贮存—粮食(菜、果) 猪/牛—沼气—粮/菜/果/草
华东区	长三角集约农区、江淮平原	一年两熟	集约化程度高	猪—沼气—稻田/粮/果/菜/茶/菌/藻 稻—鸭共生互作 猪—沼气—鱼—鸭—草 畜禽—沼气+有机肥—饲草/果/菜
中南区	洞庭湖和鄱阳湖农区	多熟种植	发达	养殖—沼气—稻/草
西南区	四川盆地、成都平原、 云贵高原河谷盆地、 滇南谷地	一年两熟	畜禽废弃物产量大	稻田—鱼共生互作 牛—沼—田 饲草—奶牛

肥施用推荐、施肥方式、施肥季节等的研究，而养殖废弃物还田利用量主要是通过适宜载畜量来进行判断。针对粮食、蔬菜和果树等农林作物不同的生产模式，大田作物、蔬菜的粪污氮、磷养分消纳量要大于果树 [48,49]；固液分离—液体厌氧发酵处理模式下，种植粮食作物、蔬菜、果树，每公顷农田每年分别可承载 32~33、56~69、7~18 头存栏猪所排放的废弃物 [50]；粪污直接厌氧发酵处理模式下，种植粮食作物、蔬菜、果树，每公顷农田每年分别可承载 35~37、53~67、8~17 头存栏猪所排放的废弃物 [51]。

（三）我国畜禽养殖废弃物还田利用模式发展战略问题

我国畜禽养殖废弃物没有做到充分还田利用，养殖废弃物还田利用技术模式没有大面积开展推广应用的主要原因包括：第一，我国与欧美国家在养殖业和土地、种植业情况等方面有很大差异，就我国国情而言，养殖业经过几十年的发展，养殖废弃物治理一直沿袭传统工业的达标排放管理办法，目前不少规模化养殖场周边已不再有开展种养结合的条件 [52]。第二，我国畜牧养殖废弃物还田利用模式缺乏规划，与西方发达国家大型的养殖场不同，我国的畜牧养殖业的规模化、产业化和科学化水平还相对较低，导致我国畜牧养殖粪污处理模式相对落后 [53]；此外，种植业发展缺乏对本区域内畜禽粪便有效利用的考虑，为增加产量而盲目地大量使用化学肥料，加大了环境污染的风险。第三，我国缺少粪便养分管理政策及相关法律法规来保证养殖废弃物的还田利用。美国养殖废弃物治理没有处理概念，只有养分管理的概念，这与我国有很大差别 [52]。第四，资金缺乏是限制建设畜禽养殖废弃物处理与还田利用设施的主要阻碍因素，畜禽养殖业是微利行业，对于养殖场而言，废弃物处理与利用设施的建设与运行成本较高，不少养殖场无力承担废弃物处理与利用设施的建设费用，或出现建设得起但运行不起的尴尬局面 [14]。第五，畜禽粪便从产生到施入农田的每个环节都有损失（见图 1），国内养殖场尺度废弃物还田利用缺少养分管理指导，较多研究是从区域尺度畜禽废弃物还田利用开展养分管理研究 [54~56]。为更好地利用养分资源，并减少 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体排放对环境

的影响，需要针对养殖场采取相应的措施以减少养分损失。

四、我国畜禽养殖废弃物还田利用战略建议

第一、开展试点建设政策引导。由国家农业、环保等部门牵头，在各地典型环境条件下的大中型养殖场，实施畜禽养殖废弃物还田利用试验示范工程，制定有机肥替代化肥的以奖代补政策，支持切合实际的各种形式的养殖废弃物还田循环利用模式。鼓励规模养殖场与周边农户形成新型合作社，配套一定规模的种植用地，实现养殖废弃物就地就近消纳，提高农业和农民的综合收益，推动养殖业与种植业绿色、可持续发展，建设社会生态文明。

第二、加大科技投入集成创新。针对我国在养殖废弃物还田利用方面诸多的研究空白，建议加大财政科技投入，引入不同形式的社会资金。针对养殖废弃物还田利用相关工程技术与装备的需要，整合各类资金或设立专项。基础研究与集成创新并重，在引进、消化、吸引、再创新以尽快形成完整的产业技术体系与综合生产力的同时，强化原创动力，推动养殖废弃物还田利用模式与技术的优化升级，实现创新式的发展。提高粪污还田利用收集、贮存、运输、使用各环节的机械化水平和处理效率。结合农作物秸秆的处理利用，制定相关的有机粪肥生产标准、检测办法及农田使用规范等，为标准化养殖废弃物还田利用模式的建立奠定基础。

第三、实施养殖粪便养分管理。突破粪便还田利用的瓶颈问题，一方面必须以农牧结合、循环利用为主体，调动养殖和种植两方面对粪便养分管理的积极性；另一方面，国家应以养分管理政策为指导，并建立健全法律法规来支撑养分管理政策的实施。推进养分管理计划，需要土地、技术、机制、设备的配套，选择有条件的地区，特别是新建的规模化养殖场应积极鼓励开展种养结合的模式。在畜禽养殖优势区域，因地制宜地开展畜禽粪便大中型沼气工程和沼液农田利用工程建设。在全国生猪、奶牛、肉牛等养殖优势区域，针对规模化养殖场或散养密集区，在一定区域内建设畜禽粪便收集无害化处理站，收集、贮存、堆肥处理区域内的畜禽粪便，堆肥后就地还田利用或转运至集中处理中心进行有机肥的加工。实施粪便养分管理计划不仅

可以提高养分利用率,更能减少温室气体排放等对环境造成的不良影响。

参考文献

- [1] 贾伟. 我国粪肥养分资源现状及其合理利用分析 [D]. 北京: 中国农业大学(博士学位论文), 2014.
Jia W. Studies on the evaluation of nutrient resources derived from manure and optimized utilization in arable land of China (Doctoral dissertation) [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [2] 中国畜牧兽医年鉴编辑委员会. 中国畜牧兽医年鉴2015 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
Editorial Committee of Yearbook of Animal Husbandry and Veterinary Medicine of China. China animal husbandry and veterinary medicine yearbook, 2015 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.
- [3] 中华人民共和国农业部. 全国草食畜牧业发展规划(2016—2020年) [J]. 北方牧业, 2016 (24): 35.
The Ministry of Agriculture of the PRC. National animal husbandry development program (2016—2020) [J]. Northern Animal Husbandry, 2016 (24): 35.
- [4] 苑亚茹. 我国有机废物的时空分布及农用现状 [D]. 北京: 中国农业大学(硕士学位论文), 2008.
Yuan Y R. Study on the temporal and spatial distribution of organic wastes and the utilization in farmland in China (Master's thesis) [D]. Beijing: China Agricultural University, 2008.
- [5] 徐伟朴, 陈同斌, 刘俊良, 等. 规模化畜禽养殖对环境的污染及防治策略 [J]. 环境科学, 2004, 25(s1): 105–108.
Xu W P, Chen T B, Liu J L, et al. Environmental pollution, comprehensive prevention and control tactics of the scale and intensify poultry farming [J]. Environmental Science, 2004, 25(s1): 105–108.
- [6] 王宇. 畜禽粪便高效堆肥技术及资源化利用 [D]. 武汉: 华中农业大学(硕士学位论文), 2008.
Wang Y. The technology on efficient composting and utilization of livestock manure (Master's thesis) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [7] Bouwman L, Goldewijk K K, Kw V D H, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900—2050 period [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(52): 20882–20887.
- [8] Rufino M C, Rowe E C, Delve R J, et al. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop-livestock systems [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 112(4): 261–282.
- [9] Rufino M C, Tittonell P, Wijk M T V, et al. Manure as a key resource within smallholder farming systems: Analysing farm-scale nutrient cycling efficiencies with the NUANCES framework [J]. Livestock Science, 2007, 112(3): 273–287.
- [10] Teenstra E, Vellinga T, Aektaeng N, et al. Global assessment of manure management policies and practices [J]. Conservation & Recycling, 2014, 84(4): 229–236.
- [11] Macdonald J M, Ribaldo M, Livingston M J, et al. Manure use for fertilizer and for energy [R]. Washington: Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture, 2009.
- [12] Smith K A, Williams A G. Production and management of cattle manure in the UK and implications for land application practice [J]. Soil Use & Management, 2016, 32(s1): 73–82.
- [13] Smith K A, Brewer A J, Dauven A, et al. A survey of the production and use of animal manures in England and Wales. I. Pig manure [J]. Soil Use & Management, 2000, 17(2): 124–132.
- [14] 陶秀萍, 董红敏. 畜禽废弃物无害化处理与资源化利用技术研究进展 [J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 37–42.
Tao X P, Dong H M. Research progress on animal waste treatment and recycling technology [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(1): 37–42.
- [15] 曾韵婷, 向玥皎, 马林, 等. 欧盟养分管理政策法规对中国的启示 [J]. 世界农业, 2011 (4): 39–43.
Zeng Y T, Xiang Y J, Ma L, et al. The implications of the European Union's nutrient management policies for China [J]. World Agriculture, 2011 (4): 39–43.
- [16] 廖新伟. 德国养殖废弃物处理技术及启示 [J]. 中国家禽, 2013, 35(3): 2–5.
Liao X D. German livestock waste treatment technology and enlightenment [J]. Chinese Poultry, 2013, 35(3): 2–5.
- [17] 王方浩, 王雁峰, 马文奇, 等. 欧美国家养分管理政策的经验与启示 [J]. 中国家禽, 2008, 30(4): 57–58.
Wang F H, Wang Y F, Ma W Q, et al. Experience and enlightenment on the nutrient management policies in the European and American countries [J]. Chinese poultry, 2008, 30(4): 57–58.
- [18] Oenema O, Kros H, Vries W D. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 20(1): 3–16.
- [19] Gerber P J, Uwizeye A, Schulte R, et al. Nutrient use efficiency: A valuable approach to benchmark the sustainability of nutrient use in global livestock production [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2014 (s9–10): 122–130.
- [20] Petersen S O, Sommer S G, Béline F, et al. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective [J]. Livestock Science, 2007, 112(3): 180–191.
- [21] Cela S, Ketterings Q M, Czymmek K, et al. Characterization of nitrogen, phosphorus, and potassium mass balances of dairy farms in New York State [J]. Journal of Dairy Science, 2014, 97(12): 7614–7632.
- [22] Oenema J. Transitions in nutrient management on commercial pilot farms in the Netherlands (Doctoral dissertation) [D]. Wageningen: Wageningen University, 2013.
- [23] Oenema J, Keulen H V, Schils R L M, et al. Participatory farm management adaptations to reduce environmental impact on commercial pilot dairy farms in the Netherlands [J]. Njas Wageningen Journal of Life Sciences, 2011, 58(1–2): 39–48.
- [24] Van Bruchem J, Schiere H, Keulen H V. Dairy farming in the Netherlands in transition towards more efficient nutrient use [J]. Livestock Production Science, 1999, 61(2–3): 145–153.
- [25] Groot J C J, Rossing W A H, Lantinga E A. Evolution of farm management, nitrogen efficiency and economic performance on Dutch dairy farms reducing external inputs [J]. Livestock Science, 2006, 100(2): 99–110.
- [26] Ondersteijn C, Beldman A, Daatselaar C, et al. The Dutch mineral accounting system and the european nitrate directive: Implications

- for N and P management and farm performance [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, 92(2): 283–296.
- [27] Van Keulen H, Aarts H F M, Habekotté B, et al. Soil-plant-animal relations in nutrient cycling: The case of dairy farming system ‘De Marke’ [J]. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13(2–3): 245–261.
- [28] Aarts H F M, Habekotté B, Keulen H V. Phosphorus (P) management in the ‘De Marke’ dairy farming system [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 56(3): 219–229.
- [29] Hilhorst G J, Oenema J, Van K H. Nitrogen management on experimental dairy farm ‘De Marke’, farming system, objectives and results [J]. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 2001, 49(2): 135–151.
- [30] Nielsen A H, Kristensen I S. Nitrogen and phosphorus surpluses on Danish dairy and pig farms in relation to farm characteristics [J]. *Livestock Production Science*, 2005, 96(1): 97–107.
- [31] Otten D. Nitrogen and phosphorus management on pig farms in Northwest Germany nutrient balances and challenges for better sustainability [J]. *International Journal of Livestock Production*, 2013, 4(4): 60–99.
- [32] Bassanino M, Grignani C, Sacco D, et al. Nitrogen balances at the crop and farm-gate scale in livestock farms in Italy [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 122(3): 282–294.
- [33] Cherry K, Mooney S J, Ramsden S, et al. Using field and farm nitrogen budgets to assess the effectiveness of actions mitigating N loss to water [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 147(1): 82–88.
- [34] Gourley C J P, Aarons S R, Powell J M. Nitrogen use efficiency and manure management practices in contrasting dairy production systems [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 147(1): 73–81.
- [35] Kobayashi R, Yamada A, Hirooka H, et al. Changes in the cycling of nitrogen, phosphorus, and potassium in a dairy farming system [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 87(2): 295–306.
- [36] Vu T K V, Vu C C, Médoc J M, et al. Management model for assessment of nitrogen flow from feed to pig manure after storage in Vietnam [J]. *Environmental Technology*, 2012, 33(6): 725–731.
- [37] 王方浩, 马文奇, 赛争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应 [J]. *中国环境科学*, 2006, 26(5): 614–617.
- Wang F H, Ma W Q, Dou Z X, et al. The estimation of the production of animal manure and its environmental effect in China [J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 614–617.
- [38] 张慧敏, 钱忠龙, 章明奎. 农地粪肥施用的环境风险评价及预防措施 [J]. *安徽农学通报*, 2007, 13(8): 68–69.
- Zhang H M, Qian Z L, Zhang M K. Environmental risk assessment and prevention measures of farmland manure application [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2007, 13(8): 68–69.
- [39] Satter L D, 胡伶, 李琍. 奶牛磷需要量及其对环境的影响 [J]. *国外畜牧科技*, 2001, 28(2): 5–8.
- Satter L D, Hu L, Li L. The dairy phosphorus requirement and its impact on the environment [J]. *Animal Science Abroad*, 2001, 28(2): 5–8.
- [40] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策 [J]. *生态环境学报*, 2000, 9(1): 1–6.
- Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1–6.
- [41] 张玉铭, 胡春胜, 董文旭. 华北太行山前平原农田氨挥发损失 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3): 417–419.
- Zhang Y M, Hu C S, Dong W X. Ammonia volatilization from wheat-maize rotation field in the piedmont of Taihang [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2005, 11(3): 417–419.
- [42] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 99–104.
- Li X, Ju X T, Zhang L J, et al. Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 99–104.
- [43] 王春丽, 龙锦林, 臧宏伟. 关于草地施肥方式减少氨挥发的研究 [J]. *水土保持应用技术*, 2004 (4): 20–21.
- Wang C L, Long J L, Zang H W. Study on fertilization methods to reduce ammonia volatilization in the grassland [J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2004, (4): 20–21.
- [44] Webb J, Brian P, Shabtai B, et al. The impacts of manure application methods on emissions of ammonia, nitrous oxide and on crop response—A review [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010; 137(1–2): 39–46.
- [45] Shepherd M, Gibbs P, Philipps L. Managing manure on organic farms [R]. Mansfield and Newbury: ADAS Gleadthorpe Research Centre and Elm Farm Research Centre, 2002.
- [46] 李登忠, 杨军香. 畜禽粪便资源化利用技术——种养结合模式 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016.
- Li D Z, Yang J X. Livestock and poultry waste resource utilization technology—Integrated crop and animal system mode [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2016.
- [47] 高旺盛, 陈源泉, 隋鹏. 循环农业理论与研究方法 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2015.
- Gao W S, Chen Y Q, Sui P. Circular agriculture theory and its research methods [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2015.
- [48] 陈微, 刘丹丽, 刘继军, 等. 基于畜禽粪便养分含量的畜禽承载力研究 [J]. *中国畜牧杂志*, 2009, 45(1): 46–50.
- Chen W, Liu D L, Liu J J, et al. Study on livestock carrying capacity based on manure nutrients [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2009, 45(1): 46–50.
- [49] 杨军香, 王合亮, 焦洪超, 等. 不同种植模式下的土地适宜载畜量 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49(2): 339–347.
- Yang J X, Wang H L, Jiao H C, et al. Stock capacity in different cropping systems [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(2): 339–347.
- [50] 盛婧, 孙国峰, 郑建初. 典型粪污处理模式下规模养猪场农牧结合规模配置研究 I. 固液分离-液体厌氧发酵模式 [J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(2): 199–206.
- Sheng J, Sun G F, Zheng J C. Pig farm-cropland configuration under typical waste treatment modes—A case study of anaerobic liquid fermentation following solid-liquid separation of waste [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(2): 199–206.
- [51] 盛婧, 孙国峰, 郑建初. 典型粪污处理模式下规模养猪场农牧结合规模配置研究 II. 粪污直接厌氧发酵处理模式 [J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(7): 886–891.
- Sheng J, Sun G F, Zheng J C. Pig farm-cropland configuration under typical waste treatment modes—A case study of direct anaerobic fermentation of manure [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(7): 886–891.
- [52] 廖新伟. 欧美养殖废弃物管理对策比较及对我国养殖废弃物治

- 理的启示 [J]. 中国家禽, 2017, 39(4): 1-3.
- Liao X D. Comparison of livestock waste management between Europe and the United States, and implications for livestock waste management in China [J]. *Chinese Poultry*, 2017, 39(4): 1-3.
- [53] 常维娜, 周慧平, 高燕. 种养平衡——农业污染减排模式探讨 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(11): 2118-2124.
- Chang W N, Zhou H P, Gao Y. Balance between crop-planting and livestock-raising: Perspective of agricultural pollution reduction [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11): 2118-2124.
- [54] 侯勇, 高志岭, 马文奇, 等. 京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征 [J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 1028-1036.
- Hou Y, Gao Z L, Ma W Q, et al. Nitrogen flows in intensive “crop-livestock” production systems typically for the peri-urban area of Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1028-1036.
- [55] Bai Z H, Ma L, Oenema O, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies in dairy production in China [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 990-1001.
- [56] Bai Z H, Ma L, Qin W, et al. Changes in pig production in China and their effects on nitrogen and phosphorus use and losses [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(21): 12742-12749.