

种养平衡——农业污染减排模式探讨

常维娜^{1,3}, 周慧平^{1*}, 高 燕²

(1.环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2.江苏理工学院中德国际学院, 江苏 常州 213001; 3.南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要:种植业与养殖业缺乏协调规划导致“种养分离”日趋明显, 由此影响了种养系统间物质循环利用过程, 导致畜禽粪便过量对生态环境造成极大危害。为此, 从种养系统间物质循环与农业污染之间的内在联系出发, 提出“种养平衡”发展模式, 分别从以种定养、以养促种的角度探讨了种植业与养殖业平衡发展模式的实现途径: “以种定养”是从种养系统物质循环的角度合理规划养殖规模, 防止畜禽粪便过量产出增加环境压力; “以养促种”是通过畜禽粪便无害化处理和科学合理地还田利用等手段, 降低畜禽粪便资源化的环境风险。通过建立“以种定养”、“以养促种”的农业生产模式, 实现废弃物高效循环利用, 降低环境污染风险, 从而缓解农业污染减排压力。

关键词:农业污染; 种养平衡; 污染减排; 养殖业

中图分类号: X71 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)11-2118-07 doi:10.11654/jaes.2013.11.003

Balance Between Crop-planting and Livestock-raising: Perspective of Agricultural Pollution Reduction

CHANG Wei-na^{1,3}, ZHOU Hui-ping^{1*}, GAO Yan²

(1. Nanjing Institute for Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China; 2. Sino-German International College, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Lack of integrated planning of both crop planting and livestock raising systems causes excessive outputs of livestock feces, leading to serious hazards to the ecological environment. Here we explored the linkage of agricultural pollution to material cycling between crop-planting and livestock-raising. We also discussed the approaches to achieve simultaneous development of crops and livestock in two aspects of “Crop-planting determines livestock-raising” and “Livestock-raising promotes crop-planting”. “Crop-planting determines livestock-raising” means that the scale of livestock system should be reasonably determined by crop system according to the law of material cycling between two systems, with an aim at relieving the environmental pressure caused by livestock wastes. “Livestock-raising promotes crop-planting” is that applying livestock wastes after their harmless treatments would improve soil fertility and crop production. It is concluded that balancing production between “crop planting and livestock raising” would fully utilize wastes, reduce the risk of environmental pollution and ultimately achieve the goal of agricultural pollution reduction.

Keywords: agricultural pollution; balance between planting breeding; pollution reduction; livestock breeding

近年来, 我国养殖业特别是畜禽养殖业发展迅速, 集约化、规模化养殖场数量不断增加, 由此造成的环境问题也日益凸显。有关研究表明, 有 80% 以上的

规模化养殖场周边没有足够数量的配套耕地消纳畜禽粪便^[1], 加之粪便处理及转移运输的成本等因素, 使得大量畜禽粪便无法及时处置, 随意堆放和缺乏管理造成了明显的脏乱和水环境问题。种植业和养殖业之间这种缺乏协调互补的“种养分离”模式忽视了种植系统与养殖系统之间的物质循环利用规律, 导致养殖业大量可利用废物在环境中流失。据《第一次全国污染普查公报》显示, 畜禽养殖业对农业非点源污染 COD、TN、TP 的贡献率分别为 96%、38%、56%^[2], 畜禽

收稿日期: 2013-02-05

基金项目: 环保公益性行业科研专项(201009017-1); 国家自然科学基金(41101496); 江苏省自然科学基金(BK2011080); 中央级公益性科研院所基本业务专项(jbywf1203)

作者简介: 常维娜(1987—), 女, 江苏徐州人, 硕士生, 主要研究方向为流域水污染控制与环境管理。E-mail: changwn@yahoo.cn

* 通信作者: 周慧平 E-mail: zhp@nies.org

养殖污染已经成为农业非点源污染的主要因素。明确“种养分离”对种养系统间物质循环利用与环境的负面影响,充分理解种养系统物质循环利用的必要性,从而倡导和推进“种养平衡”的农业发展模式,对于促进农业生态系统健康稳定发展及农业污染减排具有十分重要的意义。

1 种养分离及其环境影响

“种养分离”是指在一定区域内,种植业与养殖业之间缺乏统一规划或协调,未充分考虑两者之间存在的能量和物质循环的规律,未能根据双方特点分别从生产规模和方式上实现协调发展。当前“种养分离”的结果,一方面是畜禽养殖规模过大,表现在对环境的影响上,就是大量的畜禽粪便无法通过区域内种植业消纳,而成为废弃物排放,这不仅使资源大量浪费,也因此加剧了畜禽粪便与环境之间的矛盾;另一方面是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,对环境造成的风险可谓“雪上加霜”。自1985年以来,全国畜禽养殖量持续大幅增长,2009年猪、奶牛、肉牛与鸡的养殖量较1985年分别增长了3.6、20倍和33倍,畜禽粪便产生量也随之陡增。刘忠等对全国猪粪产生量及其环境效应的评价结果显示,2003年全国主要农区中粤桂北部山地丘陵区、豫西南丘陵盆地区、燕山太行山区和粤桂南部平原丘陵区猪粪当量负荷超过 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的还田限量值。不仅如此,湘鄂西部丘陵区、贵州高原区、滇北山原区、黄淮海平原区、闽东南丘陵区、琼雷海南岛丘陵台地区、长白山地区、江南丘陵区 and 山东丘陵区的猪粪当量负荷也高于 $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的全国平均水平^[3]。张绪美等利用全国31个省1997—2004年的牛、猪、羊和家禽的养殖量统计数据,计算不同地区的畜禽粪便农田负荷量,结果表明全国有23个省污染负荷量对环境造成威胁,其中海南、广西和贵州3省的畜禽粪便污染负荷一直处于较高的水平,原因在于这3个省份耕地面积相对较少,所以畜禽粪便污染负荷相对较高^[4]。张田等研究发现,尽管2009年北京畜禽粪便氮素排放量在全国31个省份中排名第29位,但由于缺乏消纳畜禽粪便的农用地,畜禽粪便氮素耕地负荷报警值居全国首位,对环境的影响最为严重^[5]。李帷等对北京地区畜禽粪便施用耕地的可达性分析及耕地承载力研究也表明了种植业对于消纳畜禽粪便的重要意义^[6]。

2 发展“种养平衡”模式的必要性

农业生态系统是在人为活动影响下形成的“社会-经济-自然”复合生态系统,其内部物质养分遵从“土壤→植物→动物→土壤”的顺序流通、循环^[7]。要保证种养系统健康稳定发展,就必须遵从种养系统物质循环规律,维持种养系统间物质循环平衡。在种养平衡的农业生态系统中,种植系统作为废弃物和能量转化的基础,养殖系统则为种植系统提供有机肥料^[8],并通过资源的高效循环利用,实现种养系统间物质投入产出环境效益最优化、可再生资源高效循环化和污染物排放的最小化^[9]。因此,要实现“种养平衡”的发展模式,一方面要在充分考虑农田畜禽粪便承载力的基础上,合理确定畜禽养殖量,实现以种定养,从而提高农业生产的环境效益;另一方面要提高还田粪肥质量和利用效率,实现以养促种,促进种养系统间资源高效循环与污染物减量排放。

3 “种养平衡”模式的实现

3.1 以种定养

种养系统间的物质循环是开放型的^[10],受到多种因素的综合影响,畜禽粪便还田区域的土地利用方式^[11]、与城镇居民区的距离^[12]、与水体的距离^[13]、与道路的距离^[14]、与养殖场的距离^[15]、土壤质地^[16]、土壤肥力^[17]、坡度^[18]、降雨量^[19]等均为环境影响限制因子,这就决定了不同区域土地利用畜禽粪便的适宜程度不同,从而影响了农田载畜量的大小。在确定农田载畜量时,应首先根据该区域畜禽粪肥还田适宜程度,遴选出适宜还田的区域,并在此基础上综合考虑适宜还田区域农田养分水平^[20]、不同作物养分需求^[21]和该区域不同种类畜禽粪便的养分含量^[22],最终在确定本区域农田载畜量基础上制定畜禽养殖规划。

3.1.1 畜禽粪便农田利用适宜性评价

畜禽粪便还田适宜区域的选择涉及空间因素及多影响因素的叠加,而地理信息系统作为专业的空间数据管理和分析工具^[23],可充分描述自然、社会因素的空间差异和人为因素对土地利用畜禽粪便适宜性的影响,使评价结果更加定量化、规范化、综合化。畜禽粪便土地利用适宜性评价是通过评价单元划分、评价因子选取及其量化分级、评价因子权重确定,利用地理信息系统技术的空间分析功能及图形和属性结合,将区域自然、环境、社会和经济等多因素通过权重线性加和模型来实现的。曾悦等利用该方法研究福建

省龙岩市新罗区铁山镇土地利用畜禽粪便的适宜性,结果表明该研究区域仅有 24.05%的土地适宜施用畜禽粪便,并依据土地适宜程度分别对高度、中度、临界适宜区提出不同的施用措施^[24]。但在研究较大尺度范围的畜禽粪便土地利用适宜性的空间差异,确定影响畜禽粪便农田施用的关键因子时,相同的限制因子对整个研究区域与某个子区域的影响程度是不同的。为解决研究中的不足,李帷、李艳霞等在进行大尺度研究时引入了聚类分析,分别对北京市、东北三省进行了畜禽粪便农田利用适宜性评价^[25-26]。聚类分析依据各项因子(土壤质地、坡度等)相应评价标准限制的耕地面积将该区域农田进行聚类,可更有针对性地提出各子区域畜禽粪便土地利用的措施。从上述研究结果可知,在社会、经济、环境、自然等因素的约束下,并非所有农田都适宜施用畜禽粪便,畜禽粪便土地利用适宜性评价可从空间的角度综合分析研究区域的适宜程度,依据不同的适宜度合理确定耕地畜禽粪便施用量,能够有效降低粪肥还田的环境风险,从而为区域农田载畜量的计算提供更加科学的依据。

3.1.2 农田载畜量计算

农田载畜量是以某特定地理区域土壤畜禽粪便承载能力为基础,遵循氮、磷等营养物质在种养系统中流动循环规律,综合考虑作物养分合理需求与减少农业污染排放的客观要求下确定的畜禽养殖量。目前农田载畜量的计算一般采用两种方法。

第一种方法是依据农田畜禽粪便消纳能力进行计算。陈微等在综合考虑农田消纳畜禽粪便 N、 P_2O_5 能力的基础上,根据各畜种每头(只)存栏动物年均粪便养分产生量、每公顷作物养分年均消耗量,计算出各类用地每季畜禽承载量,并依据各地区复种指数估算出年均畜禽承载量。结果表明,以 N 作为承载标准时,农用地所承载的畜禽数量比以 P_2O_5 作为标准时多(最高为 6.6 倍)或者两者持平,并且畜禽种类、作物类型、化肥施用量及作物化肥利用率和复种指数都会影响畜禽承载力的大小。因此,可通过提高作物对肥料的利用率、调整化肥与粪肥用量、调整种植结构等方式改变畜禽承载力的大小^[27]。但此种方法并没有进一步指出实际农田载畜量与估算农田载畜量之间的关系,这就无法准确反映出畜禽养殖规模对特定区域环境的影响程度。陈天宝等基于氮元素在种养系统中“耕地-作物-畜禽”的循环规律计算农田载畜量时,改进了计算方法,将耕地畜禽承载力估算值与农田畜禽承载实际负荷进行对比,评价养殖环境风险程

度,并依据风险程度计算出在不同有机肥施用比例约束条件下研究区域可承载新增畜禽数量^[28]。这种方法为合理配置区域畜禽养殖规模提供了科学依据,可有效防止畜禽粪便产生量超过环境承载能力,从源头控制畜禽粪便流失污染,促进种养的平衡发展。

第二种方法是综合考虑农田提供饲料的能力和农田畜禽粪便消纳能力进行计算。涂远璐等以规划一个万头养殖规模羊场种养结合系统为例,依据作物秸秆-畜禽和畜禽粪便-农田等两个环节中的养分供需平衡关系,建立作物的秸秆载畜量和作物的农田载畜量定量化数学模型。此研究方法针对不同作物种植模式、秸秆营养特点、作物需肥量及畜禽营养需求量和排放量,定义单位面积土地消纳畜禽粪便能力和提供畜禽饲料能力的家畜标准单位,可更加精确地建立农田承载力和畜禽养殖规模之间的平衡关系^[29]。但这种方法仅适用于农场等小尺度范围种养平衡关系的计算,原因在于我国绝大多数畜禽养殖场周围没有与之配套的农田提供畜禽饲料,且不同区域生产的饲料会在全中国范围内流通,在进行较大尺度的研究时,无法精确建立饲料作物-畜禽之间的平衡关系,故不能采用此方法进行计算。

3.2 以养促种

在推进“种养平衡”农业发展模式过程中,“以种定养”是从种养系统物质循环的角度合理规划养殖规模,防止畜禽粪便过量产出增加环境压力。而由于不同种类畜禽的粪便所含环境有害成分及其适用的作物和土壤均存在差异,如果不进行无害化处理和科学有效的利用也会影响作物生长并产生一系列的环境问题,如畜禽粪便中的硝酸盐、磷酸盐、有机物对水体的污染^[30],恶臭气体对空气的污染^[31]。除此之外,畜禽粪便中的重金属在畜禽粪便还田利用的过程中也会随着氮、磷等营养元素一同进入土壤,当含有过量重金属的畜禽粪便长期施用于农田时,重金属会在土壤-水-植物系统中积累转化,不仅会污染土壤而且会最终通过食物链对人体健康造成影响^[32]。张庆利等在对南京郊区菜地研究中发现,土壤中有效 Cu 含量与牛粪施用量呈正比^[33]。姜萍等对江西省余江县长期施用猪粪的菜地土壤及蔬菜中重金属含量研究结果发现,土壤总 Zn 和总 Cd 含量超标严重,且空心菜和芋头中 Cd 含量超标^[34]。还有研究指出,施用畜禽粪便可增加可溶性有机碳(DOC)的含量,可溶性有机碳易与重金属形成可溶性金属络合物,从而通过淋失而污染地下水^[35]。由此可见,畜禽粪便中

的环境有害成分或利用方式不当都会带来很大的环境风险。因此,在“以种定养”的基础上实现“以养促种”,降低畜禽粪便资源化利用环境风险,也是保障种养系统平衡的关键环节。

3.2.1 畜禽粪便无害化处理

按处理机理划分,畜禽粪便的处理方法包括物理处理法(分离、蒸发、干燥)、化学添加剂处理法和生物处理法(好氧、厌氧、自然处理、综合处理)等^[36]。但这些技术仅能从某一方面对畜禽粪便进行处理且在处理过程中存在诸多问题,如物理处理法只能初步处理污水,且分离出的固态粪便多采用无防渗、防淋失设施的露天晾粪场处理,粪便的理化特征改变较小、处理效率低、去除率低;化学处理法则存在二次污染问题^[37]。而综合处理技术结合了生物法、物理法和化学添加剂处理法,弥补了单一处理工艺中的不足,对畜禽粪尿进行全面消毒、有效地分离和回收畜禽粪尿中的氮并消除了异味、降低了磷与重金属含量,可有效地降低畜禽粪便中有害物质对环境的影响,不仅实现了无害化处理,而且生产出高效的有机肥产品。较单一的处理工艺而言,综合性畜禽粪便处理工艺处理畜禽粪便污染能力更强,能够有效处理养殖密度大、高

度污染的畜禽养殖区域的粪污。胡云才等分别对德国的 FAL 处理畜禽废物工艺、西班牙的 VALPUREN 处理畜禽废物工艺与荷兰的 HERCULES 猪圈内粪便处理工艺进行了分析(表 1)^[38]。

3.2.2 畜禽粪肥特性及施用方式

在无害化处理的基础上,合理选择畜禽粪便资源化利用方式,对于促进种养系统间物质养分良性循环至关重要。目前,畜禽粪便资源化的方式主要有畜禽粪便能源化、饲料化、肥料化等。畜禽粪便能源化是进行厌氧发酵生产沼气,为生产生活提供能源,同时沼渣和沼液可作为有机肥料和饲料^[39]。畜禽粪便饲料化是利用畜禽粪便中未消化的蛋白质、B 族维生素、矿物质元素、粗脂肪、碳水化合物和氨基酸等,经过加工处理制作成畜禽饲料或鱼类饵料^[40]。畜禽粪便肥料化是通过生物发酵将畜禽粪便制成无公害高效活性有机肥,可利用于农田种植或林地,这是目前畜禽粪便资源化的最主要方式^[41]。

畜禽粪便经生物发酵无害化处理后还田,改土培肥效果显著,可促进作物生长、提高产量和改善品质^[42]。但由于不同种类畜禽粪肥的养分含量、适用作物、土壤和施用方式之间均存在差异^[43-48](表 2),若在利用

表 1 欧洲畜禽废弃物综合处理工艺对比分析
Table 1 Comparative analysis of disposal technologies of livestock and poultry wastes in European

工艺名称	工艺特点	处理能力	优点	缺点	畜禽粪尿资源化产物
FAL	好气性嗜热技术结合氮再生和利用化学添加剂降低可溶性磷含量	年处理 1.5 万 t 畜禽粪尿	好气性嗜热工艺可很好地实现消毒、氮分离、减少异味	无法通过好气性嗜热工艺来降低磷含量	有机肥
VALPUREN	采用厌氧生物降解粪尿生产沼气技术与蒸发、干燥技术相结合	年处理 11 万 t 畜禽粪尿	粪尿异味去除效果好	投资大、回收成本时间长	颗粒有机肥
HERCULES	利用堆沤处理器生产高效有机肥和具有蒸发和气体洗涤功能的反应器生产液体氮肥	适用猪圈范围的小型处理工艺	产品营养成分高、产品含水量低,减少了储存和运输费用		有机肥、液态氮肥

表 2 不同种类畜禽粪肥特性及施用方式
Table 2 Characteristics and application of livestock and poultry manures

畜禽粪肥种类	养分含量	肥料特性	适用作物及土壤	施用方式
猪粪	丙氨酸、酪氨酸、光氨酸等含量较高,且氮、磷、钾含量丰富	易腐熟,腐熟过程中形成大量的腐殖质和蜡质,含量高于其他畜肥,其离子交换量较高,施入土壤后能增加保水、保肥性能,且蜡质对抗旱保墒也有一定的作用	适于各种农作物和土壤	可作基肥或追肥使用
牛粪	有机质丰富,含钾量较高	具有改良土壤的作用,但大量施用会使土壤干燥,造成发芽障碍,氮过剩引起作物徒长、倒伏。稻科最高施用量为 300 t·hm ⁻² ,蔬菜和茶为 100 t·hm ⁻² ,豆类、麦类等为 150 t·hm ⁻²	适于各种农作物和土壤	通常只用作底肥,若用作追肥应提早施用
禽粪	养分含量高于畜类(其中鸡粪养分含量最高)	氮素以尿酸态为主,尿酸盐类对根系生长有毒害,必须先堆腐后施用	适用于菜地	用作追肥效果最佳
羊粪	有机质含量较高,氮、磷、钾含量相对较低	粪质较细、肥分浓厚,可改善土质,防止土地板结,经济价值好	适于各种农作物和土壤	可作基肥、追肥和种肥施用
兔粪	氮、磷含量较高,钾含量较低	具有明显的杀虫和抗菌作用,不仅能够防治地老虎、麦秆蝇、粘虫等,还能预防白发病的发生	施在番茄、白菜、玉米、豆角等作物根际,可防止地下害虫危害;适宜缺磷土壤	宜作追肥

过程中未充分考虑这些因素,长期不合理地施肥将会引起土壤养分的非均衡化,使得农田生态环境恶化、生产力减弱^[49]。王丽英等对不同种类畜禽粪肥与化肥配施对设施番茄产量、品质和土壤养分影响的研究发现,施用猪粪、牛粪、鸡粪对产量与品质的影响并不显著,但牛粪与化肥配施处理的根层土壤没有出现明显的氮素积累和电导率升高,是较安全的利用模式^[50]。由此可见,充分掌握农田生态过程规律,依据各类畜禽粪肥特性进行还田利用是保证粪肥高效利用与实现“零污染”的关键因素。

4 问题与展望

4.1 存在问题

要实现“种养平衡”的农业发展模式,在接下来的研究中仍有很多问题亟待解决与完善。如现有的“种养平衡”定量计算过程仍存在不足,在农田载畜量计算前未对研究区域施用畜禽粪便的适宜性等非定量因素进行评价,在实际应用过程中由于不同区域所处的特定地理位置会影响土壤对畜禽粪便消纳的能力,如不进行农田土壤施用畜禽粪便的适宜性评价将会影响农田载畜量计算的准确性与科学性;另一方面,由于畜禽粪便中的重金属元素随氮、磷等营养物质同时进入土壤,现有的农田载畜量计算方法仅将氮、磷等元素作为限制因子进行定量计算,并未考虑畜禽粪便中重金属元素含量对土壤造成的污染,这将加剧畜禽粪便利用的环境风险。此外,种养平衡农业发展模式的相关配套设施和政策还不完善,如畜禽粪便处理补贴体系还没有建立起来,畜禽粪便转移运输、集中处理还存在很大问题,需要进一步系统而深入地研究。

4.2 展望

种植业与养殖业缺乏协调规划导致“种养分离”,过量养殖造成畜禽粪便产生量超过农田环境承载力引发的环境问题已经引起了各方的关注。当前从种养系统间物质循环与农业污染之间内在联系的角度来研究农业污染减排,尚属新兴视角。种养平衡的发展模式针对种养系统污染物产生环节,以种养系统物质养分循环平衡为基础,以种养殖业适度规模发展为核心,以种养结合为重点,建立“以种定养”、“以养促种”的生产模式,实现废弃物高效循环利用,降低环境风险。可以预料,种养平衡的农业发展模式是今后农业污染减排的重要推动力,将极大促进我国农业污染治理和农业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 苏 杨. 我国集约化畜禽养殖场污染问题研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 15-18.
SU Yang. Research of countermeasures on waste treating of intensive livestock and poultry farms in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(2): 15-18.
- [2] 第一次全国污染普查公报[Z]. 2010.
The first national pollution source survey bulletin[Z]. 2010.
- [3] 刘 忠, 段增强. 中国主要农区畜禽粪尿资源分布及其环境负荷[J]. 资源科学, 2010, 32(5): 946-950.
LIU Zhong, DUAN Zeng-qiang. Distribution of manure resources and environmental loads of agro-ecological regions in China[J]. *Resources Science*, 2010, 32(5): 946-950.
- [4] 张绪美, 董元华, 王 辉, 等. 中国畜禽养殖结构及其粪便 N 污染负荷特征分析[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1311-1318.
ZHANG Xu-mei, DONG Yuan-hua, WANG Hui, et al. Structure of livestock and variation of fecal nitrogen pollution load in China[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2007, 28(6): 1311-1318.
- [5] 张 田, 卜美东, 耿 维. 中国畜禽粪便污染现状与产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1241-1249.
ZHANG Tian, BU Mei-dong, GENG Wei. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5): 1241-1249.
- [6] 李 帷, 李艳霞, 杨 明, 等. 北京市畜禽养殖的空间分布特征及其粪便耕地施用的可达性[J]. 自然资源学报, 2010, 25(5): 746-755.
LI Wei, LI Yan-xia, YANG Ming, et al. Spatial distribution of livestock and poultry production and land application accessibility of animal manure in Beijing[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(5): 746-755.
- [7] 金鉴明, 卞有生, 田兴敏. 生态农业: 21 世纪的阳光产业[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
JIN Jian-ming, BIAN You-sheng, TIAN Xing-min. Ecological agriculture: The 21st century sunshine industry[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [8] 郝 利, 黄治平, 高尚宾, 等. 物质流、能量流和信息流分析应用于养殖种植一体化系统的探讨[J]. 农业环境与发展, 2012, 29(3): 83-86.
HAO Li, HUANG Zhi-ping, GAO Shang-bin, et al. Exploring integrated systems of breeding and planting based on material flow, energy flow and information flow analyses[J]. *Agro-Environment and Development*, 2012, 29(3): 83-86.
- [9] 郑建初, 陈留根, 甄若宏, 等. 江苏省现代循环农业发展研究[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(1): 5-8.
ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, ZHEN Ruo-hong, et al. Study on modern circular agriculture development in Jiangsu Province[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 26(1): 5-8.
- [10] 王秀芝. 浅论农田物质循环与养分平衡的关系[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(19): 74, 169.
WANG Xiu-zhi. Discussion on the relationship between nutrient cycling and nutrient balance of farmland[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2008, 14(19): 74, 169.
- [11] 沈晔娜. 流域非点源污染过程动态模拟及其定量控制[D]. 杭州: 浙

- 江大学, 2010.
- SHEN Ye-na. Modeling about non-point source pollution and quantity control for it within watershed[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [12] 刘巧芹, 潘瑜春, 张清军, 等. 基于 GIS 的北京市城郊农村土地利用格局分析[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(4): 457-460.
- LIU Qiao-qin, PAN Yu-chun, ZHANG Qing-jun, et al. Land use patterns analysis based on GIS in suburban area of Beijing City [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2009, 30(4): 457-460.
- [13] 马永喜. 规模化畜禽养殖废弃物处理的技术经济优化研究: 以北京北郎中村为例的生态经济模型分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- MA Yong-xi. Study on optimization of scale livestock waste treatment based on agricultural-ecological economic model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [14] Basnet B B, Apan A A, Raine S R. Geographic information system based manure application plan[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64: 99-113.
- [15] 阎波杰, 潘瑜春, 赵春江, 等. 县域畜禽养殖场空间布局规划适宜性评价[J]. 地理研究, 2010, 29(7): 1214-1222.
- YAN Bo-jie, PAN Yu-chun, ZHAO Chun-jiang, et al. Suitability evaluation of livestock farm spatial layout at county-level based on GIS[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(7): 1214-1222.
- [16] HJ/T 81—2001, 畜禽养殖业污染防治技术规范[S].
- HJ/T 81—2001, The guide technical standard of preventing pollution for livestock and poultry breeding[S].
- [17] Sharpley A, Tunney H. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st century[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 176-181.
- [18] 中华人民共和国水土保持法[Z]. 2010.
- Law of the People's Republic of China on water and soil conservation[Z]. 2010.
- [19] 史伟达, 崔远来. 农业非点源污染及模型研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2009(5): 60-64.
- SHI Wei-da, CUI Yuan-lai. Research progress of agriculture non-point source pollution and models[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(5): 60-64.
- [20] 武兰芳, 欧阳竹. 基于农田氮磷收支的区域养殖畜禽容量分析: 以山东禹城为例[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2277-2285.
- WU Lan-fang, OUYANG Zhu. Regional livestock density under environmental capacity based on nitrogen and phosphorus budget of farmland: A case study of Yucheng County in Shandong Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11): 2277-2285.
- [21] 武兰芳, 欧阳竹. 种养结合生产区农田磷素平衡分析: 以山东禹城为例[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1444-1450.
- WU Lan-fang, OUYANG Zhu. Phosphorus budget of farmland in crop-animal mixed farming area: A case study of Yucheng County in Shandong Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1444-1450.
- [22] 王成贤, 石德智, 沈超峰, 等. 畜禽粪便污染负荷及风险评估: 以杭州市为例[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2562-2569.
- WANG Cheng-xian, SHI De-zhi, SHEN Chao-feng, et al. Pollution load and risk assessment of livestock manure: A case study in Hangzhou[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2562-2569.
- [23] 王少平, 陈满荣, 俞立中, 等. GIS 在农业非点源污染研究中的应用[J]. 农业环境保护, 2000, 19(5): 289-292.
- WANG Shao-ping, CHEN Man-rong, YU Zhong-li, et al. Application of GIS in researches on agricultural non-point source pollution[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(5): 289-292.
- [24] 曾悦, 洪华生, 王卫平, 等. 基于 GIS 的畜禽养殖废弃物土地处理适宜性评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3): 595-599.
- ZENG Yue, HONG Hua-sheng, WANG Wei-ping, et al. GIS-based evaluation of suitability for application of animal wastes on land[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(3): 595-599.
- [25] 李帷, 李艳霞, 林春野, 等. 北京市畜禽粪便土地利用适宜性分析[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 882-889.
- LI Wei, LI Yan-xia, LIN Chun-ye, et al. Analysis of land suitability for manure application in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(4): 882-889.
- [26] 李艳霞, 李帷, 韩伟, 等. 基于 GIS 的东北农田畜禽粪便施用适宜性分析[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 1092-1100.
- LI Yan-xia, LI Wei, HAN Wei, et al. GIS-based analysis of the land suitability for manure application in the Northeastern Provinces[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2010, 31(4): 1092-1100.
- [27] 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 Wei, LIU Dan-li, LIU Ji-jun, et al. Study on livestock carrying capacity based on manure nutrients[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2009, 45(1): 46-50.
- [28] 陈天宝, 万昭军, 付茂忠, 等. 基于氮素循环的耕地畜禽承载能力评估模型建立与应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 191-195.
- CHEN Tian-bao, WAN Zhao-jun, FU Mao-zhong, et al. Modeling and application of livestock supporting capacity estimation of cropland based on nitrogen cycling in Southwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(2): 191-195.
- [29] 涂远路, 白云峰, 严少华, 等. 基于养分循环的种养生态平衡匹配方法[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(2): 247-249.
- TU Yuan-lu, BAI Yun-feng, YAN Shao-hua, et al. Planting and breeding ecological balance matching method based on nutrient cycling[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(2): 247-249.
- [30] 李秀芬, 朱金兆, 顾晓君, 等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4): 81-84.
- LI Xiu-fen, ZHU Jin-zhao, GU Xiao-jun, et al. Current situation and control of agricultural non-point source pollution[J]. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 2010, 20(4): 81-84.
- [31] 陈鹏举, 向忠菊. 畜禽粪便资源化处理技术在农业环境污染防治中的应用[J]. 家畜生态学报, 2010, 31(2): 106-108.
- CHENG Peng-ju, XIANG Zhong-ju. The comprehensive utilization technology of livestock and poultry feces resource in the prevention of the agricultural environment pollution[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2010, 31(2): 106-108.
- [32] 杨慧敏. 畜禽粪便中重金属的去除研究[D]. 北京: 矿业大学, 2010.
- YANG Hui-min. Study on removing technology of heavy metal in animal manure[D]. Beijing: China University of Mining and Technology,

- 2010.
- [33] 张庆利, 史学正, 黄 标, 等. 南京城郊蔬菜基地土壤有效态铅、铜和镉的空间分异及其驱动因子研究[J]. 土壤, 2005, 37(1): 41-47.
- ZHANG Qing-li, SHI Xue-zheng, HUANG Biao, et al. Characteristics of spatial variability of soil available lead, zinc, copper and cadmium in a vegetable base in the suburbs of Nanjing[J]. *Soil*, 2005, 37(1): 41-47.
- [34] 姜 萍, 金盛杨, 郝秀珍, 等. 重金属在猪饲料-粪便-土壤-蔬菜中的分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 942-947.
- JIANG Ping, JIN Sheng-yang, HAO Xiu-zhen, et al. Distribution characteristics of heavy metals in feeds, pig manures, soils and vegetables[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 942-947.
- [35] 沈 秀, 杨增玲, 韩鲁佳. 畜禽粪便引发的重金属污染的研究现状[C]. 北京: 中国农业工程学会, 2011.
- SHEN Xiu, YANG Zeng-ling, HAN Lu-jia. Research status of heavy metals pollution caused by livestock and poultry manures[C]. Beijing: Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011.
- [36] 彭 里. 畜禽养殖环境污染及治理研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 19-22.
- PENG Li. Research progress in pollution caused by raising poultry and its controlling countermeasures[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(2): 19-22.
- [37] 侯百枝. 养殖场环境污染的治理[J]. 中国家禽, 2007, 29(14): 39-40.
- HOU Bai-zhi. Pollution treatment in poultry farm[J]. *China Poultry*, 2007, 29(14): 39-40.
- [38] 胡云才, Urs Schmidhalter. 欧洲综合处理畜禽粪尿的工艺技术[J]. 磷肥与复肥, 2005, 20(6): 76-79.
- HU Yun-cai, Schmidhalter Urs. Current processing of livestock and poultry manure in Europe[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2005, 20(6): 76-79.
- [39] 朱 磊, 卢剑波. 沼气发酵产物的综合利用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊1): 176-180.
- ZHU Lei, LU Jian-bo. Integrated utilization of fermentation products from biogas generator[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl1): 176-180.
- [40] 张振都, 吴景贵. 畜禽粪便的资源化利用研究进展[J]. 广东农业科学, 2010(1): 135-138.
- ZHANG Zhen-du, WU Jing-gui. Progress of the researches on resource utilization of livestock and poultry manure[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010(1): 135-138.
- [41] 李书田, 刘荣乐, 陕 红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 179-184.
- LI Shu-tian, LIU Rong-le, SHAN Hong. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179-184.
- [42] 薛智勇, 汤江武. 畜禽废弃物的无害化处理与资源化利用技术进步(下)[J]. 浙江农业科学, 2002(2): 99-100.
- XUE Zhi-yong, TANG Jiang-wu. Advances in harmless treatment and resource utilization technology of livestock and poultry wastes (part tow)[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2002(2): 99-100.
- [43] 雷小文, 苏 州, 钟云平, 等. 我国猪粪资源化利用技术的现状及展望[J]. 湖南畜牧兽医, 2012(4): 3-5.
- LEI Xiao-wen, SU Zhou, ZHONG Yun-ping, et al. Present situation and prospect of utilization of pig manure in China[J]. *Hunan Journal of Animal Science & Veterinary Medicine*, 2012(4): 3-5.
- [44] 杜会英, 张 爱, 夏 维, 等. 4种畜禽粪便中磷特征研究[J]. 畜牧与兽医, 2011, 43(11): 27-29.
- DU Hui-ying, ZHANG Ai, XIA Wei, et al. Study on four kinds of livestock and poultry manure phosphorus characteristics[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2011, 43(11): 27-29.
- [45] 刘基伟, 胡成华, 张国梁, 等. 牛粪的污染与处理[J]. 黑龙江农业科学, 2010(11): 82-84.
- LIU Ji-wei, HU Cheng-hua, ZHANG Guo-liang, et al. Pollution and treatment of cow manure[J]. *Heilongjiang Agricultural Science*, 2010(11): 82-84.
- [46] 高 定, 陈同斌, 刘 斌, 等. 我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略[J]. 地理研究, 2006, 25(2): 311-319.
- GAO Ding, CHEN Tong-bin, LIU Bin, et al. Releases of pollutants from poultry manure in China and recommended strategies for the pollution prevention[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(2): 311-319.
- [47] 郑海霞, 齐 莎, Kölbl Angelika, 等. 氮肥和羊粪对内蒙古典型草原土壤多糖含量及组成的影响[J]. 土壤通报, 2008, 9(6): 1298-1301.
- ZHENG Hai-xia, QI Sha, Kölbl Angelika, et al. Effects of nitrogen fertilizer and quantity and composition in typical sheep manure application on of soil polysaccharides steppe[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 9(6): 1298-1301.
- [48] 文 斌, 傅祥超, 范 康, 等. 兔粪堆肥技术初步研究[J]. 畜牧与兽医, 2010, 42(10): 15-19.
- WEN Bin, FU Xiang-chao, FAN Kang, et al. Preliminary study on the rabbit manure composting process[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2010, 42(10): 15-19.
- [49] 杨林章, 孙 波, 范晓晖, 等. 中国农田生态系统养分循环与平衡及其管理[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- YANG Lin-zhang, SUN Bo, FAN Xiao-hui, et al. Nutrient cycling and balance and management of agro-ecosystem in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [50] 王丽英, 张彦才, 陈丽莉, 等. 不同种类畜禽粪肥与化肥配施对设施番茄产量、品质和土壤养分的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(增刊2): 152-156.
- WANG Li-ying, ZHANG Yan-cai, CHEN Li-li, et al. Effects of different kinds of manure combination with chemical fertilizer on yield, quality and soil nutrient content in greenhouse tomato[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(Suppl2): 152-156.