

农业面源污染现状及防控技术

武淑霞¹, 刘宏斌¹, 刘申², 王耀生³, 谷保静⁴, 金书秦⁵, 雷秋良¹, 翟丽梅¹, 王洪媛¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业农村部农业面源污染控制重点实验室, 北京 100081;

2. 航天信息股份有限公司, 北京 100195; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

4. 浙江大学, 杭州 310058; 5. 农业农村部农村经济研究中心, 北京 100810)

摘要: 农业面源污染是造成我国水环境污染的主要因素之一, 具有随机性强、污染排放不固定、污染负荷变化大等特点, 防治较点源污染更为困难, 了解农业面源污染现状及其防控技术是进行面源污染治理的前提。本文概述了农业面源污染成因及其现状, 指出种植业中肥料的不合理施用和规模化畜禽养殖排污是当前最重要的农业面源污染来源, 较全面地介绍了种植业和畜禽养殖业中较为成熟的面源污染防控技术, 提出“源头控制为主、过程阻控与末端治理相结合”是当前进行农业面源污染防控的主要途径, 应因地制宜地采用相应的面源污染防控技术, 实现环境效益、经济效益和社会效益的同步发展。

关键词: 农业面源污染; 农田养分流失; 畜禽养殖排污; 防控技术

中图分类号: X506 **文献标识码:** A

Review of Current Situation of Agricultural Non-Point Source Pollution and Its Prevention and Control Technologies

Wu Shuxia¹, Liu Hongbin¹, Liu Shen², Wang Yaosheng³, Gu Baojing⁴, Jin Shuqin⁵,
Lei Qiuliang¹, Zhai Limei¹, Wang Hongyuan¹

(1. Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Aisino Corporation, Beijing 100195, China;

3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences,

Beijing 100081, China; 4. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 5. Research Center for Rural Economy,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100810, China)

Abstract: Agricultural non-point source pollution is one of the main factors causing water pollution in China. Due to its characteristics of randomness, unfixed pollution discharge, and changes in pollution load, it is more difficult to control and prevent the pollution from non-point sources than that from point sources. Making clear of the current situation of non-point agricultural pollution and its prevention and control technologies is the premise of non-point pollution control. This paper summarizes the causes and present situation of agricultural non-point source pollution, and points out that the unreasonable fertilizer application and the pollutant discharge from large-scale livestock and poultry breeding farms are the most important sources of agricultural non-point pollution. The current mature

收稿日期: 2018-09-18; 修回日期: 2018-09-26

通讯作者: 刘宏斌, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 研究员, 主要研究方向为农业面源污染防控; E-mail: liuhongbin@caas.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国农业资源环境若干战略问题研究”(2016-ZD-10); 农业部专项“生态环境保护专项”; 中英牛顿基金项目(BB/N013484/1)

本刊网址: www.enginsci.cn

non-point source pollution prevention and control techniques in planting and livestock industry are introduced. It also proposes that the combination of source control, process control, and end treatment is the most important prevention method for agricultural non-point source pollution. Corresponding prevention and control technologies of non-point source pollution should be adopted according to local conditions to realize the simultaneous development of environmental, economic, and social benefits.

Keywords: agricultural non-point source pollution; farmland nutrient runoff; pollutant discharge from livestock industry; prevention and control technology

一、前言

点源和面源污染是导致湖泊水体恶化的两大污染方式,随着人们对点源污染控制的重视,点源污染已得到较好的控制和管理,面源污染逐渐成为或已成为影响水环境质量的主要污染形式,其中来自农业的面源污染是面源污染系统中分布最广泛、对水环境威胁最大的一部分[1,2]。农业面源污染是当今世界各国环境污染治理最棘手的难题之一。其污染物主要来自畜禽养殖、种植业生产及城乡结合部农村生活三大污染源,包括粪尿中的化学需氧量(COD)、氮、磷、病原微生物、重金属等污染物的不合理排放,从农田通过水土流失或者径流、淋溶等方式随着降水或灌溉流入到水体的氮、磷及农药等,最终造成水体污染。农业面源污染具有随机性强、污染物的排放点不固定、污染负荷的时间空间变化幅度大、其发生具有相对滞后性和模糊性以及潜在性强等特点,使得面源污染的监测、控制与管理更加困难与复杂[3]。

农业面源污染已经成为威胁国外众多国家水环境安全的主要因素,重视农业面源污染是国际大趋势。据美国环境保护署(EPA)报道,农业面源污染是河流、湖泊等地表水体污染的第一大污染,贡献了污染负荷总量的2/3。丹麦的270条河流中94%的氮负荷和52%的磷负荷是由农业面源污染造成的;在爱尔兰某一农业流域,59%的总磷来源于农业面源污染[4];挪威的河流中农田面源污染贡献了50%的总氮和30%的总磷负荷[5];瑞典农业面源污染贡献了波罗的海40%的总磷入湖负荷[6];荷兰来自农业面源污染的总氮、总磷分别占水环境污染总量的60%和40%[7];芬兰20%的湖泊水质发生恶化,农业面源排放的磷素和氮素占总排放量的50%以上,尤其是在高投入农业比例大的流域该比例更大[8];英国农业面源污染对总磷负荷总量的贡献在30%~50%[9]。

我国的农业面源污染形势比发达国家更为严重,农业生产集约化程度高,化肥、农药使用量大。根据《第一次全国污染源普查公报》对2007年的调查结果(见图1),全国农业源排放的污染物对水环境的影响较大,农业污染源(包括种植业、畜禽和水产养殖)是总氮、总磷的主要来源,其排放量分别为 2.705×10^6 t和 2.847×10^5 t,占排放总量的57.2%和67.4%,COD排放量为 1.324×10^7 t,占总量的43.7%。地膜、秸秆、尾菜等虽然被认为是农业面源的来源,但是该次普查没有对这些污染物进行调查。

二、农业面源污染成因及现状

(一) 种植业化肥的不合理施用现象普遍

根据《中国农村统计年鉴2016》,我国2016年蔬菜、瓜类播种面积为 2.493×10^7 hm²,占农作物总播种面积的14.8%,在1978—2016年呈递增趋势(见图2),2016年的蔬菜瓜果、果园和茶园播种面积为1978年的5.67倍、6.83倍和1.77倍。根据农业部开展的农业面源污染调查和监测结果,这些种植模式在全国各主要分区均存在施肥量大、通过径流和淋溶排出到水体中的量大等特点[10,11],是种植业造成农田面源污染的最主要的来源。张维理等[1]的研究也表明,在水体污染严重的滇池、太湖、巢湖和三峡库区,占流域农田总面积15%~35%的菜果花农田,对流域水体富营养化的贡献率,接近或大大超过约占农田总面积70%的大田作物。

我国氮、磷化肥施用量自1980年来一直呈增加趋势(见图3),氮肥、磷肥用量分别增加了2.23倍和4.54倍。2014年以来肥料用量开始稳中有降,主要是受到国家政策的影响。2014年农业部提出农业面源污染防治的目标为“一控两减三基本”,并于2015年发布了《农业部关于打好农业面源污染防治攻坚战的实施意见》和《到2020年化肥使用

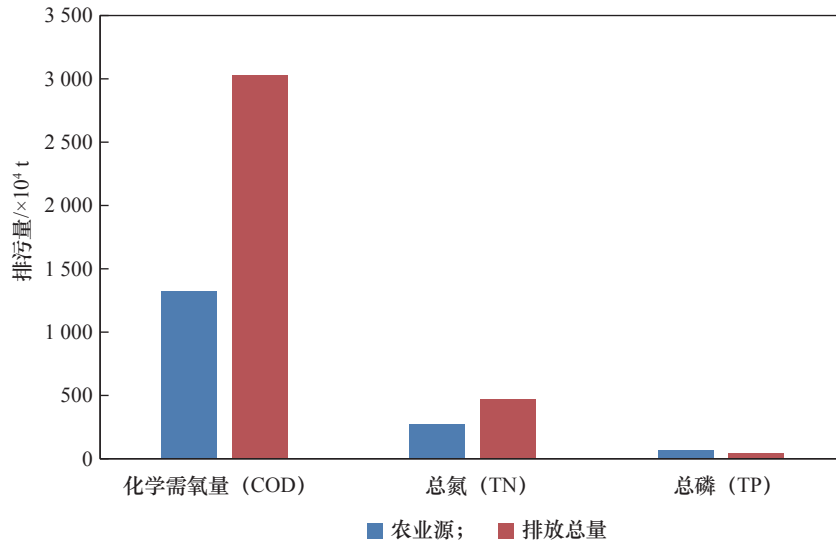


图1 农业源污染物排放量与全国排污总量对比

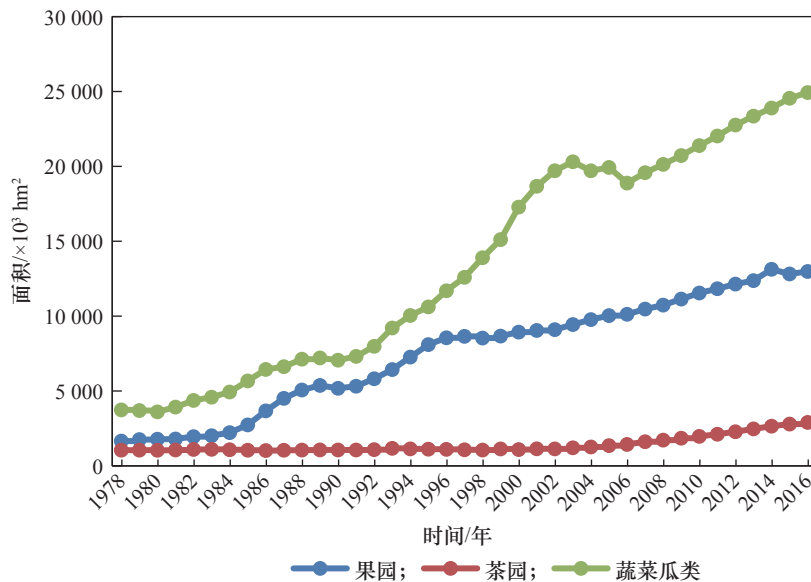


图2 我国蔬菜瓜果、果园及茶园的播种面积

量零增长行动方案》，意味着农业面源污染防治工作由过去口号式的倡导转入带有明确目标的具体实践，并且由部门行动上升到国家意志 [12]。应在国家政策指导下，重点对施肥量高的蔬菜及瓜类作物、果树等采用更合理的施肥方式，调整作物布局，优化农田管理，在不增加施肥量的情况下实现粮食安全生产，减少因氮、磷养分从农田里流失进入到水体而造成的环境污染。

(二) 规模化畜禽养殖排污是农业面源污染的主要来源

畜禽养殖业产生的污染物主要有污水、固体粪

便、恶臭气体和大量的氮、磷、悬浮物及致病菌，其中所携带的 COD、总氮、总磷是最大的污染物。

总体看来，1978 年来我国畜禽养殖业一直呈现稳步发展趋势（见图 4）。2016 年生猪的存栏量及出栏量均居世界第一位，约占世界总量的一半。家禽生产、牛羊肉生产基本保持平稳。2016 年我国牛年末存栏数为 1.067×10^8 头，其中肉牛占 69.7%，奶牛占 13.4%；猪年末存栏数为 4.35×10^8 头，羊年末出栏数为 3.011×10^8 头，家禽为 5.899×10^9 只。牛出栏数为 5.11×10^7 头，猪出栏数为 6.85×10^8 头，羊出栏数为 3.069×10^8 头，家禽出栏数为 1.237×10^{14} 只。肉类总产量为 8.538×10^7 t，其中猪牛羊肉产量合计

为 6.475×10^7 t, 以猪肉为主, 产量为 5.299×10^7 t, 牛肉、羊肉、禽肉产量分别为 7.168×10^6 t、 4.594×10^6 t、 1.888×10^7 t。禽蛋总产量为 3.095×10^7 t。肉类和禽蛋产量长期稳居世界第一位, 人均肉类达到中等发达国家水平、人均禽蛋消费达到发达国家水平。

畜禽养殖业在给人们提供大量肉蛋奶的同时也产生大量的废弃物 [3]。尤其是随着大量规模化养殖场和养殖小区的出现, 畜禽粪尿和养殖污水难以得到有效处理和利用。随着畜禽养殖的不断增长及

城市对肉蛋奶的需求量的加大, 畜禽养殖规模化程度提高, 并向城乡结合带转移, 导致可承载、消纳畜禽粪便的农田面积不断减少 [1]。畜禽养殖粪污在部分地区远远超过周围农田的消纳能力, 肆意排放到附近水体中而产生污染, 成为水域的重要污染源。在过去相当长时间内, 畜禽养殖业普遍存在重发展、轻环保的现象, 随着畜禽养殖业规模化程度不断提高, 在人力受限和经济效益等因素驱动下, 采取水冲粪、水泡粪等清粪工艺的养殖场越来越多, 而距离农田较远, 使得将这些粪水运往农田的费用

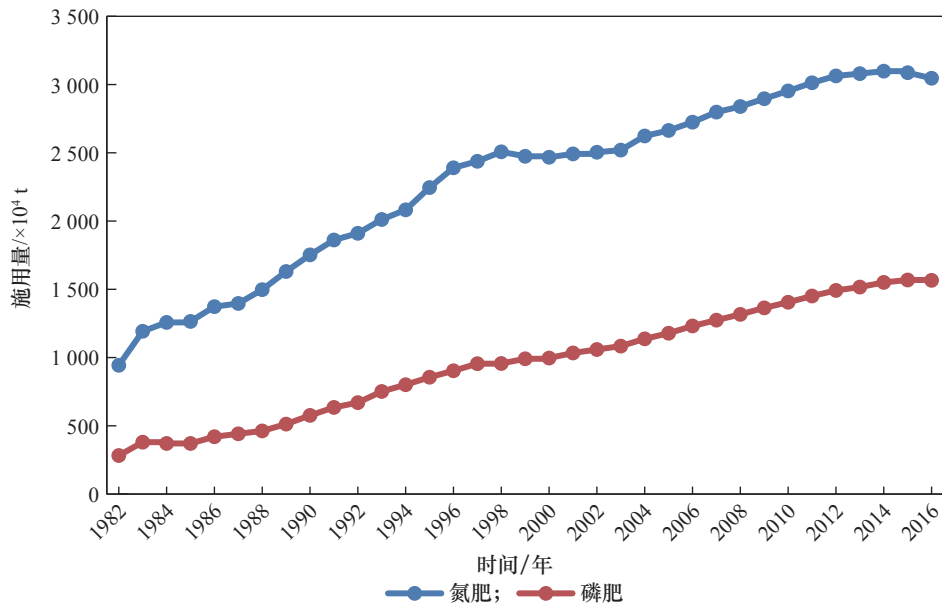


图3 我国氮、磷化肥的施用量

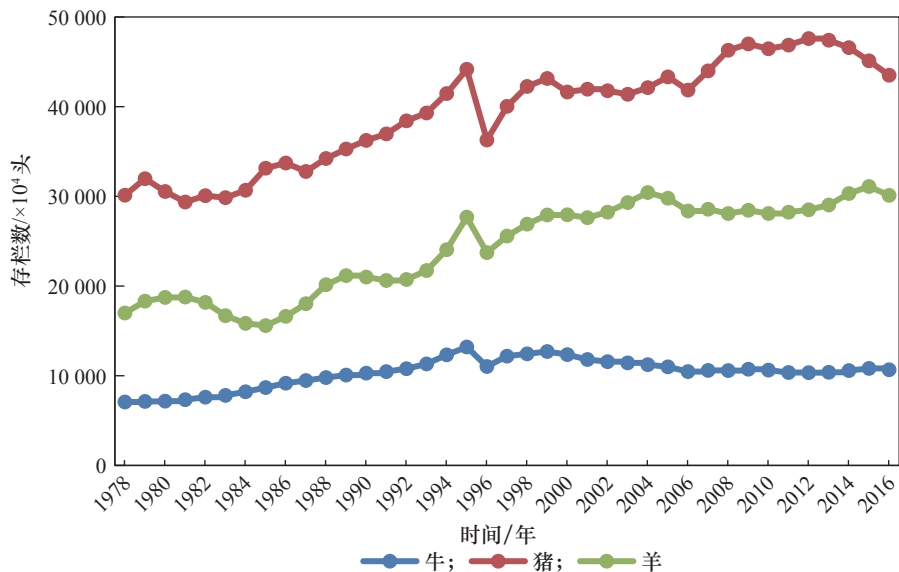


图4 我国主要畜禽养殖年末存栏数

大大增加,在业主投入不足的情况下,往往造成相当一部分粪水就地排放,加剧了畜禽养殖对环境的污染,成为我国农业面源污染的主要来源之一。

三、农业面源污染防治技术

农业面源污染防治较为成熟的技术可以分为源头控制、过程拦截和末端净化三大类。源头控制技术主要通过优化农业生产工艺达到减少农业源污染物产生与排放的目标,包括清洁种植技术和清洁养殖技术;过程拦截技术是指在农业面源污染物产生以后,针对其迁移途径采用物理、化学或生物的方法进行拦截、降解或处理利用,从而降低污染物向水体的排放量,减轻农业面源污染;末端净化技术是指在污染产生后,针对污染类型采取相应的工程措施进行污染治理、净化的综合防控技术。

(一) 农田面源污染防治技术

对于种植业面源污染,在不影响农业产量和效益的前提下,源头总量控制是根本。通过优化农艺管理措施,达到从源头上控制化肥农药用量,减少土壤扰动和农田出水,控制农业面源污染产生的目标。主要包括肥料高效施用技术等,在传统施肥技术的基础上,结合灌溉、耕作等田间管理措施和工程措施等,形成针对性较强的面源污染综合防控技术,是当前种植业污染防治的一种发展趋势。

1. 肥料高效施用技术

针对目前普遍存在的施肥结构与基追肥比例不当、追肥时期与作物养分吸收高峰期错位所带来的肥料利用率偏低、流失风险加剧等问题,根据不同作物、不同生育期、不同土壤供肥特点,优化施肥时期、方法和用量,适期分次追肥,同时结合化肥深施技术,提高氮、磷肥料利用效率,减少农田氮、磷流失风险。

2. 测土配方施肥技术

根据土壤养分测试结果和作物需肥特性提出施肥配方,包括:①依据作物需肥规律、土壤供肥性能和肥料效应等,提供能够满足作物营养要求的养分含量、比例、形态;②给出所需要的基础肥料的品种、数量等信息,并能满足加工和成型的要求,要求基础肥料有稳定的来源;③提出氮、磷、钾及

中、微量元素等肥料的施用品种、数量、施肥时期和施用方法。该技术效果较好,但推广成本较高。

3. 区域性农田养分管理技术

通过GPS、GIS等现代信息技术与传统农化技术的结合,综合应用数字土壤、当地社会经济状况及气象资料,详尽迅速地地了解一个地区的土壤有效养分的分区状况。并在此基础上为这一地区配制出适合主要轮作和土壤类型的专用肥。适合在集约化作物生产地区采用。

4. 植株营养诊断施肥技术

对生长期间的作物进行营养分析以诊断作物营养亏缺状况,根据作物当时自身营养状况适时、适量追肥以满足作物最佳生长的营养诊断技术。

5. 养分平衡窗技术

在详细了解农户养分投入与产出状况基础上,分析其农田养分平衡状况。采集基础数据,对农田养分投入、产出、丰缺进行评价,并根据计划种植作物种类将数据输入施肥专家系统,给出地块养分平衡结果及土壤质地、种植季节、目标产量、养分平衡等指标,并给出地块肥料用量、肥料分配方式、合理施肥方法等施肥建议。适合分量经营下的蔬菜、花卉生产。

6. 有机肥与无机肥平衡施用技术

氮肥与有机肥配合施用对获取作物高产、稳产、降低成本具有重要作用。这样做不仅可以更好地满足作物对养分的需要,而且还可以培肥地力,减少氮磷流失。

7. 新型肥料和作物专用肥技术

新型肥料主要指依据当地土壤、作物、气候等条件而制作的缓、控释肥料,通常是利用包膜材料来控制肥料的养分释放速度,使之与作物生长周期需肥速度相一致,从而提高肥料利用率,减少养分的淋失与挥发。

作物专用肥配方中不仅根据土壤肥力状况和作物需肥特征配有氮、磷、钾大量元素,而且根据各地土壤养分限制因子配有作物需要的各种微量元素,充分把宏观控制和微观调节有机地结合起来,使生产出的肥料能适合不同地区、不同作物需要。专用配方肥含有氮、磷、钾、钙、镁、硫、铁、硼等多种营养元素,且总养分含量一般高达40%~50%,满足农作物对养分的需求,以保证作物的正常生长。通常专用配方肥的利用率比一般

化肥利用率高 10%~15%，可显著降低氮磷养分流失量。

8. 水肥综合管理技术

通过灌溉系统为植物提供营养物质的过程，即按照作物生长不同阶段对养分的需求、土壤、气候等条件，将适量肥料在灌溉过程中溶于水施用，从而准确地将肥料均匀施在根系附近，供植物根系直接吸收利用。随灌水所用的肥料应全是水溶性化合物或液体肥料，微量元素肥料应是水溶态或螯合态化合物。在条件具备的情况下，可结合滴灌、喷灌、渗灌等灌溉技术，节约灌溉用水和肥料用量，减少氮磷流失，实现水肥一体化管理，提高肥效。

9. 水土保持耕作技术

包括免耕、少耕、间套复种技术、秸秆还田覆盖技术等，主要通过对农田实行免耕少耕和秸秆覆盖还田、控制土壤风蚀水蚀和农业面源污染、提高土壤肥力和抗旱节水能力以及节能降耗和节本增效的先进农业耕作技术。间套复种技术的使用，可以利用不同作物对营养物需求比例的差异，充分利用土壤养分，减轻养分残余对周围水体造成的富营养化程度，调节土壤中各养分的比例，避免土地板结和盐碱化。

10. 种植结构调整与布局优化技术

该技术是通过宏观调控措施，根据不同作物的适生性及其在不同土壤、气候、地形等条件下的农业面源污染发生潜力，对某一区域内的种植业重新进行布局，调整种植结构，高肥作物如蔬菜花卉等优先种植在低污染风险地区，而在高污染风险区则优先发展需肥量低、环境效益突出的豆科或发展粮食、经济林等 [13]，可以有效减少农业生产对化肥的依赖，有效控制农业面源污染。

11. 植物篱技术

植物篱为由木本植物或一些茎干坚挺、直立的草本植物组成的无间断式或接近连续的狭窄带状植物群。它具有一定的密集度，在地面或接近地面处是密闭的。一般是在土埂或坡地上种植多年生且有一定经济效益的木本或草本植物，从而控制水土流失和增加经济效益。主要有两种形式：一是经济植物篱+农作物，二是经济植物篱+经济作物。

12. 缓冲带技术

在农田尾水进入人工湿地或入江支流以前，沿

江或入江支流方向每隔一定距离（200 m）建立一定宽度（10 m 左右）的农田作为缓冲带，缓冲带内不施氮、磷肥料以及化学农药，按照正常生产方式种植水稻、芦苇、菖蒲等有一定经济价值的水生植物，使缓冲带内植物依靠上游径流氮、磷养分生长，达到农田径流氮、磷资源化再利用的目的。带内植物正常收割（收获），既可带来经济效益，又可促进畜禽养殖业和农产品粗加工业的发展。

13. 生态拦截技术

生态拦截技术是在当地地形条件下，结合农用地已有的排水沟渠、池塘、湿地等，种植能够有效吸收和富集氮磷及农药等物质的水生植物，配合相应的工程措施对污染物进行拦截、吸附、降解等，通过生态拦截改善、净化水质，实现农业面源污染防治。氮磷生态拦截技术在不同区域要因地制宜，根据当地地形、农作物种植类型及布局、降水、排灌沟渠等因素，科学地选择用来净化的植物与其他处理工艺。

从治理途径来看，这些施肥技术当中，第 1~10 项技术均为源头控制技术，第 11~13 项技术为过程阻控和末端治理技术。在特定的地区，这些面源污染防治技术应相辅相成，最大限度地减少农田氮磷污染物流出到水体。

（二）畜禽养殖污染防治技术

畜禽养殖排污防控的源头控制技术主要是进行清洁养殖，以减少畜禽养殖过程中的粪污排放量，便于后续处理利用为目标，较为成熟的技术包括生态发酵床生猪养殖技术、饲料优化技术等；过程阻控减污技术主要包括粪污收集贮存技术、干清粪工艺等技术；而粪便资源化利用和污水处理技术等可以归为畜禽养殖末端治理技术。

1. 生态发酵床生猪养殖技术

生态发酵床是一种新型、无污染养殖模式，具有“三省、两提、一增、零污染”等特点，即省水、省料、省劳力，提高抵抗力、提高猪肉品质，增加养殖效益，无污染 [14]，适用于中等规模的生猪养殖场。零排放生态养殖舍改造工程包括现有养殖舍改造、垫料配制。利用微生物菌种将一定比例混合的锯末屑、粉碎棉秆（树叶或杂草）、营养添加剂、水所组成的垫料进行发酵，消除粪便的污染，从源头上达到环境保护和促进生猪生长的一种规模化生

猪养殖技术模式。

2. 畜禽养殖粪便收集贮存技术

畜禽专业养殖户养殖量较大且分散，畜禽粪便在随意堆放情况下，容易在雨季随地表径流直接进入水体，造成严重的水体污染。为避免畜禽粪污在贮存期间被雨水冲刷流失，建设有防雨功能的粪污收集贮存设施是防止畜禽粪便流失造成环境污染的最为基础的必备设施。畜禽粪污在储存池中储存一定的周期，经过厌氧、好氧、兼氧等微生物处理过程后，将其还田，可增加土壤有机质含量，有助于改善土壤结构、渗透性和可耕性，控制土壤侵蚀，使之持水能力增加，粪液作为灌溉用水，提供植物生长所需水资源。畜禽粪污在经过一定周期的贮存后直接还田，是专业户养殖粪污处理最为经济、有效的处理方式。

3. 干清粪工艺

干清粪工艺是进行干捡粪、粪水分别处理的方式，固体粪便可以用于生产有机肥，而所产生的污水量比水冲粪、水泡粪工艺降低70%，污水中的COD含量降低90%，悬浮物(SS)降低95%。

4. 畜禽粪便堆肥技术

根据所采用的环境条件的不同，堆肥技术可分为好氧堆肥和厌氧堆肥，分别是在好氧和厌氧的条件下，通过微生物活动分解有机质，生成容易被作物吸收利用的腐殖质。厌氧堆肥技术所需要的时间较长，而好氧堆肥是一种高温高效发酵过程，发酵周期短，有机物分解彻底，无害化程度高，因此更多地被应用。

5. 畜禽养殖废弃物肥料化还田利用技术

畜禽粪污含有较多的有机质、氮、磷、钾和微量元素，施入土壤中能稳定长期地释放养分，提供作物生长所需的多种必需元素。畜禽粪污肥料化还田技术是最广泛也最有效的一种资源化方式，不仅可减少对环境的污染，还能促进种植业发展。适用于养殖场周边有足够农田消纳粪便污水的地区，特别是种植需肥量较高的集约化蔬菜等作物的地区。

6. 自然处理技术

自然处理技术主要是采用氧化塘、人工湿地等自然处理系统对养殖场畜禽粪污进行处理[15]，通常是在养殖场进行过厌氧处理之后采用的技术。需要的投资较少，运行管理费用低，不需要复杂的工程体系。该技术适用于离城市较远，气温较高，有

滩涂、荒地、林地或低洼地可作粪污自然处理系统的地区。该技术在美国、澳大利亚等国家应用时，由于土地宽广，畜禽粪污一般未经厌氧处理就直接进入氧化塘，采用多级氧化塘方式增加污水停留时间和处理效率。

7. 工程处理技术

对于位于大城市近郊的畜禽养殖场，在没有足够的农田消纳粪污时，需要引入工程处理技术，占地少，但投资大、运行费用高。根据养殖场具体情况，可采用厌氧处理、好氧处理或者厌氧-好氧处理组合等。适用于规模较大、清粪工艺采取水冲粪等污水量大的养殖场。

8. 大中型沼气工程技术

大中型沼气工程技术主要适用于位于农村的规模化养殖场，为居民提供清洁生活能源。该技术包括发酵池以及一系列相应的设施，即预处理设施、沼气利用设施和沼肥利用设施等，即“一池三建”工程[16]。沼气池提供了厌氧条件下有机物分解的场所；预处理设施主要包括沉淀、调节、计量、进出料、搅拌等装置；沼气利用设施包括沼气净化、储存、输配和利用装置；沼肥利用设施则包括沼渣、沼液综合利用等设施。

四、农业面源污染防治小结

种植业和畜禽养殖业是农业面源污染成因中两个最主要的来源。采用“源头控制为主、过程阻控与末端治理相结合”是当前进行农业面源污染防治的主要途径。

种植业上引进国外4R技术的精准施肥、精准施药，并通过优化农艺管理措施，达到从源头上控制化肥农药用量，节水减排，控制农业面源污染产生的目标。在传统施肥技术基础上，结合灌溉、耕作等田间管理措施和工程措施等，形成针对性较强的面源污染综合防控技术，是当前的种植业污染防治的一种发展趋势。

畜禽养殖业在进行减量化、无害化、资源化的前提下，以地定养、以水定养，采取清洁养殖技术，从源头控制以减少畜禽养殖过程中的粪污排放量。畜禽排泄物是一种资源，是制造有机肥料与生物能源的良好材料，而且技术工艺成熟，政府部门应予以鼓励和推动，以促进农业资源的循环利用。

农业面源污染治理是一项长期和艰巨的工作。在国家和各地区所制定的相关政策、法规的约束下,根据各地区农业面源污染现状,因地制宜地采用相应的防控技术。坚持保护与发展相结合,农艺防治与工程治理相结合,源头控制与过程阻断、末端治理相结合,政策引导与生态补偿相结合,科技支撑与技术推广相结合,既要注重科学性、可行性,还要具有一定的前瞻性,抓住主要矛盾,解决突出问题,为实现环境效益、社会效益、经济效益持续发展提供保障。

参考文献

- [1] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策I. 21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
Zhang W L, Wu S X, Ji H J, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [2] Ongley E D, Xiaolan Z, Tao Y. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1159-1168.
- [3] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院(博士学位论文), 2005.
Wu S X. The spatial and temporal change of nitrogen and phosphorus produced by livestock and poultry & their effects on agricultural non-point pollution in China [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences (Doctoral dissertation), 2005.
- [4] McGarrigle M L, Donnelley K. Phosphorus loading from a rural catchment—River Deel, County Mayo, Ireland—A tributary of Lough Conn [C]. Dublin: International Water Association, Diffuse Pollution Conference Proceedings, 2003.
- [5] Skarbovik E, Stalnacke P G, Austnes K, et al. Riverine inputs and direct discharges to Norwegian coastal waters [R]. Oslo: Norwegian institute for water research, 2013.
- [6] Ulen B, Bechmann M, Folster J, et al. Agriculture as a phosphorus source for eutrophication in the north-west European countries, Norway, Sweden, United Kingdom and Ireland: A review [J]. British Society of Soil Science, 2007, 23 (sup 1): 5-15.
- [7] Boers P C M. Nutrient emissions from agriculture in the Netherlands: Causes and remedies [J]. Water science and technology, 1996, 33: 81.
- [8] Grizzetti B, Bouraoui F, Granlund K, et al. Modelling diffuse emission and retention of nutrients in the Vantaanjoki watershed (Finland) using the SWAT model [J]. Ecological Modelling, 2003, 169(1): 25-38.
- [9] White P J, Hammond J P. Updating the estimate of the sources of phosphorus in UK waters [R]. Final Report on Defra project WT0701CSF, 2006.
- [10] 连慧妹,刘宏斌,李旭东,等. 太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3657-3665.
Lian H S, Liu H B, Li X D, et al. Analysis of spatial variability of water quality and pollution sources in Lihe River watershed Taihu Lake Basin [J]. Environmental Science, 2017, 38(9): 3657-3665.
- [11] 崔超,刘申,翟丽梅,等. 兴山县香溪河流域农业源氮磷排放估算及时空特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 937-946.
Cui C, Liu S, Zhai L M, et al. Estimates and spatio-temporal characteristics of nitrogen and phosphorus discharges from agricultural sources in Xiangxi River Basin, Xingshan County [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(5): 937-946.
- [12] 金书秦,邢晓旭. 农业面源污染的趋势研判、政策评述和对策建议[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 593-600.
Jin S Q, Xing X X. Trend analysis, policy evaluation, and recommendations of agricultural non-point source pollution [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(3): 593-600.
- [13] 黄现民,王洪涛. 山东省环渤海地区农业面源污染防治对策研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(15): 6300-6303.
Huang X M, Wang H T. Research on the prevention and cure countermeasure of agricultural non-point source pollution around Bohai Region in Shandong [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(15): 6300-6303.
- [14] 韩晓盈. 畜牧业清洁生产关键技术实例研究——生态发酵床在规模化养猪场的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(6): 82-85.
Han X Y. Key Technologies for animal husbandry clean production-application of ecological fermentation bed in large-scale pig farms [J]. Environmental Science and Management, 2014, 39(6): 82-85.
- [15] 邓良伟,陈子爱,袁心飞,等. 规模化猪场粪污处理工程模式与技术定位[J]. 养猪, 2008 (6): 21-24.
Deng L W, Chen Z A, Yuan X F, et al. Sewage treatment pattern and technical orientation of large-scale pig farming [J]. Swine Production, 2008 (6): 21-24.
- [16] 詹慧龙,严昌宇,杨照. 中国农业生物质能产业发展研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(23): 397-402.
Zhan H L, Yan C Y, Yang Z. Research on the development of agricultural biomass energy industry [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(23): 397-402.