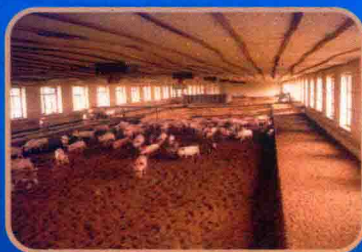


中国农业科学院科技创新工程
水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07103006) 资助
流域农业面源污染防控整装技术与农业清洁流域示范(2015ZX07103007)

畜禽养殖污染微生物 发酵床控制技术

◎ 朱昌雄 耿兵 刘雪 等/著



中国农业科学技术出版社

中国农业科学院科技创新工程
水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07103006) 资助
流域农业面源污染防治整装技术与农业清洁流域示范(2015ZX07103007)

畜禽养殖污染微生物 发酵床控制技术

◎ 朱昌雄 耿兵 刘雪 等/著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

畜禽养殖污染微生物发酵床控制技术 / 朱昌雄等著. —北京:
中国农业科学技术出版社, 2017.12

ISBN 978-7-5116-3310-1

I. ①畜… II. ①朱… III. ①微生物—发酵—应用—畜禽—养
殖业—污染防治 IV. ①X713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 261140 号

责任编辑 崔改泵 金 迪
责任校对 马广洋
出 版 者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街12号 邮编: 100081
电 话 (010) 82109194 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)
(010) 82109709 (读者服务部)
传 真 (010) 82106650
网 址 <http://www.castp.cn>
经 销 者 各地新华书店
印 刷 者 北京建宏印刷有限公司
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 16
字 数 270千字
版 次 2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷
定 价 58.00元

《畜禽养殖污染微生物发酵床控制技术》

著者名单

主 著：朱昌雄 耿 兵 刘 雪

著 者：国 辉 董立婷 张 丽 叶成红 郑 宏

孙 雷 于金成 邓春生 郭 萍 田云龙

叶 婧 李 峰 李红娜

前 言

近年来,我国畜禽养殖业发展迅速,但是畜禽养殖废弃物无害化处理和综合利用的工作开展不够,畜禽养殖废弃物引起的环境污染现象时有发生。相关报道表明,2015年我国畜禽粪便产生量为47.6亿t,折算成氮、磷和钾的纯养分为0.4亿t,但是畜禽粪便的还田利用率仅为约50%。《第一次全国污染源普查公报》的数据显示,畜禽养殖业排放的化学需氧量1 268.26万t,总氮102.48万t,总磷16.04万t,分别占我国污染物总排放量的41.9%、21.7%和37.9%,占农业源排放量的95.8%、37.9%和56.3%。再有,畜禽饲料生产中含有重金属元素的预混剂和添加剂被大量使用,从而形成重金属土壤污染的潜在风险。如果将重金属含量不达标的养殖废弃物进行还田利用,则会造成对土壤生态系统的危害,进而危害到人类的食品安全和身体健康。如果土壤中积累过多的重金属元素锌,会阻碍植物生长,甚至导致植物停止生长。2014年4月公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国土壤总的超标率为16.1%,其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为11.2%、2.3%、1.5%和1.1%。还有,畜禽养殖业产生的恶臭气体可以引起人不愉快的感觉或者会对人的身体健康造成威胁。相对于畜禽粪尿引起的水体和土壤污染,人对恶臭气体造成的空气污染更为敏感。畜禽养殖舍内各种气体都有其浓度限值要求,超过一定限值会引起畜禽的健康不适或导致疾病的发生,重者引起中毒,甚至死亡。畜禽养殖业面源污染问题已威胁到农业和社会经济的可持续发展。

微生物原位发酵床养殖技术最早起源于日本与韩国,随后在中国大面积推广应用。在国外称为Deep-litter-system、In situ decomposition of mature或The microbial fermentation bed。其优点是畜禽在发酵床中运动,增加其运动量,提高了其生长性能;畜禽口服益生菌,优化肠道微生物的菌群结构,提高了畜禽免疫力及饲料利用率;避免每天对饲养场地清理,减少废水产生,降低臭气浓度,不会对环境造成影响;使用后的垫料中含有丰富的营养物质,有机质含量较高,可用于生产有机肥,进而实现废弃物的资源化利用。

关于原位生物发酵床技术的研究，已经报道的主要是以原位发酵床技术为主，该技术虽然具有减少环境污染、提高畜禽饲养管理效率以及促进农民增收等方面的优势，但是在实际生产应用中依然存在很多问题。首先，原料方面的问题。锯末和谷壳是生态发酵床垫料中常用的材料，对于一个规模化养殖场来说，如果在短期内筹备大面积采用生物发酵床技术所需要的原料，造价成本高。其次，在发酵床养殖模式下，只能对养殖屋舍及垫料表面进行消毒，但是在部分发酵不完全的垫料中仍然保存了大量的各类微生物。在饲养畜禽过程中，一些生病的畜禽携带的病原菌可能保留在垫料中，成为造成病害累积爆发的隐患。最后，发酵床畜禽养殖的基本原理就是利用发酵来消解粪尿。垫料中的中温、嗜温微生物利用一些可溶性有机物质进行繁殖并转化为热能，随着温度的积聚，导致嗜温菌大量繁殖，引起更多有机物降解并释放出更多的热能，发酵床温度可以达到40~55℃甚至更高，此时高温将非常不利于畜禽的正常生长。

随着生产实践的发展，微生物异位发酵床养殖废弃物处理技术得到了较为广泛的研究和应用。微生物异位发酵床养殖废弃物处理技术通过排污漏口将畜禽养殖废弃物引入发酵沟中，利用发酵沟中的垫料对粪污进行分解转化，避免了原位发酵床养殖技术面临的诸多问题。异位发酵床在控制养殖场用水量的情况下可以同时处理养殖粪便和废水，解决了养殖场废水直排对周围水体和环境的污染问题；可以实现对填料的机械化翻堆，降低人工成本，提高养殖废弃物的处理效率；将农作物秸秆（油菜、水稻和玉米秸秆）应用于异位发酵床填料，实现养殖污染和秸秆焚烧污染的同步解决。

本书得到了以下项目课题的支持：中国农业科学院科技创新工程、农业行业专项“功能性微生物制剂在农业副产物资源化利用中的研究与示范”、国家水体污染控制与治理科技重大专项（“南淝河流域农村有机废弃物及农田养分流失污染控制技术研究及示范”“苕溪流域农业面源污染控制技术集成与管理模式”“种—养—加农业废弃物一体化循环利用成套技术研究”“生猪、奶牛及家禽养殖废弃物发酵床工程污染控制共性与整装技术研究及验证”“农村饮用水源污染防控技术研究及示范”“华南村镇塘坝地表饮用水安全保障技术研究及示范”和“受农业面源污染入湖河流污染控制与生态修复技术及工程示范”）等。本书重点阐述了当前我国畜禽养殖业面源污染的状况，总结了目前微生物发酵床养殖技术在控制奶牛、生猪和家禽养殖业面源污染取得的进展，通过技术案例展示了相关技术在实践中的应用情

况，介绍了以微生物发酵技术为核心的畜禽养殖污染控制与治理系统方案，并阐述了作者结合实践对我国畜禽养殖业面源污染防治提出的建议（包括红线倒逼、种养结合、模式转化、技术升级、生态奖补和完善法规等）。本书介绍的相关研究成果不仅丰富了畜禽养殖业面源污染防治的理论和方法，同时对高等院校和科研单位相关从业者也具有一定的借鉴作用和参考价值。

限于作者水平，书中难免存在错误及不妥之处，恳切希望同行专家和读者给予批评指正。

著者

2017年11月

目 录

第一章 畜禽养殖污染现状及对环境的影响.....	1
第一节 畜禽养殖规模及污染现状	1
第二节 畜禽养殖污染物对土壤的影响	2
第三节 畜禽养殖污染物对水体的影响	3
第四节 畜禽养殖污染物对大气的影响	4
第二章 微生物发酵床控制技术概述.....	9
第一节 畜禽养殖中常用的污染控制技术	9
第二节 生物发酵床技术的研究进展	15
第三章 生猪养殖场废弃物污染微生物异位发酵床控制技术.....	31
第一节 微生物原位发酵床养殖技术优势与存在的问题	31
第二节 玉米秸秆异位发酵床养殖技术处理生猪废弃物的 应用研究	33
第三节 稻壳、椰壳粉混合物异位发酵床养殖技术处理生 猪废弃物的应用研究	40
第四节 两种异位发酵床废弃填料的安全性评价	46
第四章 奶牛养殖场废水污染微生物异位发酵床控制技术.....	55
第一节 嗜热纤维素降解菌株的筛选	56
第二节 微生物异位发酵床小试试验	69
第三节 添加不同比例牛粪对发酵的影响	80
第四节 微生物菌剂在中试异位发酵系统中的作用	85
第五节 微生物群落结构的多样性分析	100
第六节 异位发酵床技术的综合评价	117

第五章 肉鸭养殖场废弃物污染微生物异位发酵床控制技术.....	121
第一节 垫料预发酵功能菌的筛选及鉴定	121
第二节 垫料预发酵菌群的构建	131
第三节 鸭舍发酵床垫料的预发酵过程及其使用效果	134
第四节 模拟发酵床粪便消解过程中气体排放规律	138
第五节 模拟发酵床粪便消解过程环境因子及其相关性分析	144
第六节 模拟发酵床粪便消解过程微生物群落及环境因子相关性分析	168
第七节 鸭舍发酵床垫料细菌菌群的组成及变化趋势	188
第八节 鸭舍发酵床垫料碳素演化	195
第九节 鸭舍发酵床垫料后熟堆肥的可行性分析	197
第六章 畜禽养殖污染微生物发酵床控制技术案例.....	202
第一节 淮河流域生猪养殖污染微生物异位发酵床控制技术	202
第二节 海河流域生猪养殖污染微生物异位发酵床控制技术	208
第三节 松花江流域牛养殖污染微生物原位发酵床控制技术	220
第四节 辽河流域牛养殖污染微生物原位发酵床控制技术	231
第七章 畜禽养殖污染控制系统方案与防治建议.....	242
第一节 以微生物发酵技术为核心的畜禽养殖污染控制与治理系统方案	242
第二节 我国畜禽养殖业面源污染防治建议	243

第一章 畜禽养殖污染现状及对环境的影响

第一节 畜禽养殖规模及污染现状

随着人们生活水平的提高，对肉蛋奶需求量逐渐增大，畜禽养殖业得以快速发展，逐步趋于集约化、规模化。据中国统计年鉴的资料，2005—2015年中国肉猪出栏量由60 367.4万头增至70 825.0万头，增长了17.32%（国家统计局，2016）。鸭的养殖在中国历史悠久，中国是世界最大的鸭生产国。根据联合国粮食及农业组织（FAO）公布的数据（表1-1），2013年世界的养鸭出栏量为28.86亿只，亚洲的出栏量为26.28亿只，中国的出栏量为21.71亿只，占到亚洲的82.61%，占世界的75.24%。中国的养鸭数量从2008年到2012年呈逐年递增的趋势，是亚洲和世界增长的主要贡献者，是鸭肉、鸭蛋和羽绒产量的最大生产国。

表1-1 2008—2013年养鸭出栏量

(单位：亿只)						
国家/地区	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
中国	19.08	19.30	20.12	20.70	22.03	21.71
美国	0.49	0.48	0.49	0.51	0.51	0.51
亚洲	23.04	23.27	24.16	25.18	26.57	26.28
欧洲	1.70	1.69	1.66	1.67	1.66	1.58
世界	25.67	25.90	26.78	27.81	29.22	28.86
中国占亚洲（%）	82.80	82.93	83.27	82.19	82.92	82.61
中国占世界（%）	74.32	74.49	75.11	74.40	75.39	75.24

注：来自FAOSTAT（2016）数据

畜禽养殖业规模发展壮大的同时，不可避免地会带来诸多的环境问题，这是每个国家在畜牧养殖业发展中必经的瓶颈时期。在20世纪60年代初，一些发达国家同样经历过畜禽密集发展对环境造成威胁的阶段，英国曾经每年要处理8 000万t畜禽粪便（Withers and Lord，2002），荷兰曾因畜禽粪便在

农田的过量使用而引起硝酸盐污染等。目前在中国，畜禽养殖造成的环境问题也已经达到了不容忽视的程度。

根据第一次污染源普查的相关指标及相关文献的排泄系数估算，2009年中国畜禽粪尿的总量约达21.83亿t猪粪当量，而根据未来对畜禽产品需求量的预测值，估算2020年的畜禽粪尿产量可达到28.11亿t猪粪当量（林源等，2012）。虽然畜禽养殖业的高速发展，但配套的污染控制措施却没有与之齐头并进，多数畜禽养殖场没有相应的恶臭气体控制处理设施和粪尿处理设施。据调查苏州吴江区的20多个畜禽养殖场，粪污处理设施大多匮乏，其中分散型养殖场的临时堆粪场仅占60%左右，堆粪场有防雨设施只占37%，粪污不处理不防渗给环境造成极大影响（高建峰等，2016）；1999年，调查发现全国90%的畜禽养殖场建立时不会考虑对环境的影响，60%缺乏防治污染的设施（武淑霞，2005）；这些相对滞后的粪污治理技术与处理措施，是畜禽粪便成为环境污染的重要来源之一。大量粪便和废水给周边的环境空气、土壤及水体造成了严重的污染，引起水体的富营养化、土壤退化、甚至带来全球性的酸雨、温室效应和臭氧层破坏。

第二节 畜禽养殖污染物对土壤的影响

利用农田来消纳畜禽粪便是粪便处理最常用的一种方法，一方面这为种植业提供了有机肥料，另一方面提高了农业生态物质循环中氮磷的利用效率，是自然生态循环的重要部分。然而，必须考虑土地与耕地是否能够完全消纳所产生的粪便，即农田受载畜量的影响。载畜量对农田的主要影响因素有氮磷负荷、能源潜力及畜禽粪便资源总量的影响（耿维等，2013）；也要考虑到随着养殖集约化的发展，受地区经济发展程度差异的影响，畜禽粪便污染呈现明显的地域性特征。张绪美等对中国畜禽养殖结构及其粪便氮污染特征分析的结果表明，中国的畜禽粪便氮污染负荷呈现从西北内陆向东南沿海逐渐加重的趋势，以400mm等降水量线为界，以东区域污染负荷量多高于 $20\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{年})$ ，为高污染负荷区，以西大多低于 $18\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{年})$ 为低污染负荷区（张绪美，2007）。预警分析结果中全国只有8个省（自治区、直辖市）污染负荷警报值属于1级，即畜禽粪便农田负荷风险指数 $r \leq 0.4$ （沈根祥和汪雅谷，1994）。杨世琦等通过构建畜禽粪便的农田消纳量及承载负荷模型，分析省域尺度下畜禽粪便产生的总氮对农田容纳量和承载量的影响，计算结

果表明TN的承载负荷均低于欧盟标准 $175\text{kg}/\text{hm}^2$ ，风险指数小于0.5（杨世琦等，2016）。说明中国畜禽粪便的产生量并不是过量而导致的土壤污染，而是由相对集中的粪便处理方式与粗放管理而导致的。这一处理结果为畜禽业发展增加希望的同时，也对改变畜禽养殖模式和管理方式提出了要求。

另外，畜禽粪便对土壤的污染体现在对土壤的重金属污染、抗生素污染及富营养化造成的土壤退化。畜禽规模化养殖的进程中，养殖场为了追求较高的经济利益，从提高饲料的利用率、提高肉质品质和增强饲养动物的机体免疫力等方面来节约成本，增加收益。而Cu、Zn、As等重金属作为畜禽的重要养分，既可以提高饲料利用率，也可达到防治畜禽病害的效果，因此被广泛用作饲料添加剂（Barker and Bryson, 2002; Tufft and Nockels, 1991）；畜禽食用饲料后，重金属大部分沉积在粪便中，畜禽粪便的资源化利用最主要途径是制作有机肥，王飞等对华北地区的分析表明高Pb、高Hg、高Cu和高Zn饲料添加剂是该地区商品有机肥中重金属的主要来源（王飞等，2013）。在对奶牛粪便、羊粪和鸡粪的测定中发现Mn和Zn的浓度最高，其次是Cr、Cu、Ni，同时还发现了Cd、Co、Pb（Sungur et al., 2016）。畜禽粪便中的重金属经肥料在土壤中富集，从而使土壤受到污染。相对于没有经过处理的粪肥，农场用硫酸铝处理的粪便降低了As、Cu、Fe和Zn从地块使用的禽类粪便流失（Moore et al., 1998）。堆肥生产的有机肥中重金属的含量已成为衡量肥料质量的重要标准之一（Ko et al., 2008）。改变这种重金属对土壤污染的现状，除了从饲料源头抓起外，还需要为畜禽提供良好的饲养环境，即建立生态养殖模式，提高畜禽的免疫力，在保证畜禽产量和品质的情况下，养殖场自然会减少抗生素和饲料添加剂的使用。

第三节 畜禽养殖污染物对水体的影响

畜禽养殖粪便污染水体的方式与污染土壤的方式不同，主要是通过污水的径流以及淋溶方式来污染地表水及地下水。大型牧场或规模化养殖场的粪便等污染物会通过施肥或雨水冲刷等方式，经土壤滤析或直接流失导致水体的污染（Sanderson et al., 2010）。污染扩散的重要转移机制被认为是地表径流和土壤团聚体大孔隙淋溶的共同作用（商冉，2008）。目前，各国的面源污染已基本成为地下水和地表水污染的主要来源（Kourakos and Harter, 2014）。据研究美国60%的水污染源于面源污染（Zhuang et al., 2012）。加

利福尼亚州曾有10万m³的地下水受到养牛场等造成的硝态氮污染；韩国将面源污染引起的环境问题列为造成健康水源威胁的严重问题（Kim et al., 2013）。在中国，研究也证明了面源污染是水质恶化的重要原因之一（Liu et al., 2016）。农业畜禽养殖是面源污染的主要来源之一，尤其20世纪60年代以来，畜禽的规模化养殖常用水冲式清粪方式，为了避免粪水的运输成本，养殖户通常将粪水简易沉淀后直接排入沟渠；流域水体氮的10%~30%和磷的3%来源于此，而随意堆放畜禽粪便造成氮磷富营养化的贡献率分别高达10%和10%~20%（张维理等，2004）。

第四节 畜禽养殖污染物对大气的影响

一、温室气体对大气的影响

由于畜禽养殖场管理上的密集化和规模化，大量的气体被排放到空气中。据FAO的数据统计，2014年来源于农业的CO₂当量为2.04Gt，比过去的五年提高了5.56%。而从2005年到2009年，来自农业的氨气量从63.39%增高到94.17%。在中国，畜禽养殖数目庞大，2014年约占世界的22.65%，来源于粪便管理中的CO₂当量占13.28%、N₂O释放量占31.82%（表1-2）。美国2014年NH₃释放量为216万t，动物粪便管理过程中约释放86.6Tg的CO₂当量，以农业源释放量的14%来计算，过去的6年增加了24.56Tg。特别是在欧盟，农业源有360万t NH₃的释放，其中58.9%是来自于粪便的管理。温室气体CO₂、CH₄、N₂O会造成大气臭氧层的破坏，其中N₂O和CH₄是重要的贡献者，其全球变暖潜势（Global Warming Potential, GWP）超过100年期分别是CO₂的298倍和25倍（Solomon et al., 2007）。

表1-2 中国、亚洲和世界来自粪便管理过程的温室气体排放量

	饲养动物（1 000头）	CO ₂ （Gg）	CH ₄ （Gg）	N ₂ O（Gg）
世界	2.79E+10	351 813	9 760	474
亚洲	1.52E+10	162 423	4 007	253
中国	6.32E+09	46 728	1 327	151
中国占亚洲%	41.58	28.77	33.12	59.68
中国占世界%	22.65	13.28	13.60	31.86

注：数据来自FAO（2014）

二、NH₃对大气的影响

NH₃是地球氮循环过程中的一个重要组成部分，NH₃沉降到地面后，会增加酸化和氮的富营养化，使生境脆弱；NH₃与空气中酸性的微粒反应会显著增加微粒量，严重威胁人们的健康（表1-3）（Zhao et al., 2014）；因此，阻止或降低其临界量和水平，对消除NH₃引起的多种影响和减少其形成污染物是至关重要的。据估计，在欧洲80%~90%的NH₃排放来源于农业，而农业中80%~90%的排放来源于畜禽业（Sutton et al., 1999）。

在大量排出气体中，CO₂、CH₄、N₂O是可以直接造成温室效应的重要气体，而NH₃则是间接温室气体。NH₃可以通过NO和N₂O的释放而引起温室效应（Clemens and Ahlgrimm, 2001）。而且，NH₃会引起生态系统的富营养化和酸化效应，同时也是与PM结合形成二级胶粒的主要前导气体（Behera and Sharma, 2010）。

表1-3 人对不同氨气浓度水平的反应

浓度（mg/L）	特征信息
50	刺激眼睛、鼻子和喉咙（暴露2h）
100	快速刺激眼睛和呼吸道
250	多数人还可以忍受（暴露30~60min）
400~700	肺气肿、咳嗽、喉痉挛
>1 500	致命（暴露30min）
5 000~10 000	气道阻塞而迅速致命

三、微尘颗粒物对大气的影响

对空气带来直接影响的还有微尘颗粒物（Particular matter，PM）。影响养殖舍内PM浓度水平的因素有：圈舍的类型和饲喂方向、动物类型以及环境因素（Cambralópez et al., 2010）。高浓度的PM会威胁大气环境，同样也会影响人类和动物的健康。通常畜禽舍内微尘颗粒（PM）的污染被认为会对动物的行为和产率造成不良影响（Donham and Leininger, 1984；Homidan and Robertson, 2003），同时也会影响养殖场农民的健康及工作环境。畜禽舍内的微尘颗粒是粗糙、未经过处理和有机质的，其可以吸附各种气体、有臭味的复合物，以及微生物等增强了微尘颗粒的生物效应。最近的研究还表

明 NH_3 是微小颗粒物形成过程中的重要因素,通过与 SO_2 , NO_x 等酸性物质的反应形成含铵的气溶胶体,构成了空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组成部分(Behera and Sharma, 2010; Updyke et al., 2012)。 $\text{NH}_4^+ / (\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3)$ 和硫酸盐—硝酸盐—铵(SNA)气溶胶、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有很强的指数正相关,说明氨从气体到颗粒的转化是SNA气溶胶形成的重要条件(Wang et al., 2015)。提高对微粒形态、大小、组成成分、浓度水平以及影响因素的认识,对于更加精确地鉴定和量化PM来源,估测其的影响,以及提出减少PM的有效策略至关重要。

参考文献

- 高建峰, 韩国新, 陈雪明, 等. 2016. 吴江区畜禽废弃物处理情况调查报告[J]. 上海农业科技(5): 22-25.
- 耿维, 胡林, 崔建宇, 等. 2013. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报, 29: 171-179.
- 林源, 马骥, 秦富. 2012. 中国畜禽粪便资源结构分布及发展展望[J]. 中国农学通报, 28: 1-5.
- 商冉. 2008. 有机酸和猪粪对土壤中铜锌吸附、积累和迁移的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学.
- 沈根祥, 汪雅谷. 1994. 上海市郊农田畜禽粪便负荷量及其警报与分级[J]. 上海农业学报, 10: 6-11.
- 王飞, 赵立欣, 沈玉君, 等. 2013. 华北地区畜禽粪便有机肥中重金属含量及溯源分析[J]. 农业工程学报, 29: 202-208.
- 武淑霞. 2005. 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.
- 杨世琦, 韩瑞芸, 刘晨峰. 2016. 省域尺度下畜禽粪便的农田消纳量及承载负荷研究[J]. 中国农业大学学报, 21: 142-151.
- 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 2004. 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, 37: 1 009-1 009.
- 张绪美, 董元华, 王辉, 等. 2007. 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, 28: 1 311-1 318.
- Barker A V, Bryson G M. 2002. Bioremediation of heavy metals and organic toxicants by composting [J]. SCI World J., 2: 407-420.
- Behera S N, Sharma M. 2010. Investigating the potential role of ammonia in ion chemistry of

- fine particulate matter formation for an urban environment [J]. *Sci. Total Environ.*, 408: 3 569–3 575.
- Cambralópez M, Aarnink A J A, Yang Z, et al. 2010. Airborne particulate matter from livestock production systems: a review of an air pollution problem [J]. *Environ. Pollut.*, 158: 1–17.
- Clemens J, Ahlgrimm H J. 2001. Greenhouse gases from animal husbandry: mitigation options [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 60: 287–300.
- Donham K J, Leininger J R. 1984. Animal studies of potential chronic lung disease of workers in swine confinement buildings [J]. *Am. J. Vet. Res.*, 45: 926–931.
- Homidan A A, Robertson J F. 2003. Effect of litter type and stocking density on ammonia, dust concentrations and broiler performance [J]. *Brit. Poultry Sci.*, 44: S7–S8.
- Kim J Y, Lee H, Lee J E, et al. 2013. Identification of human and animal fecal contamination after rainfall in the Han River, Korea [J]. *Microbes. Environ.*, 28: 187–194.
- Ko H J, Kim K Y, et al. 2008. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure [J]. *Waste Manage.*, 28: 813–820.
- Liu R, Xu F, Liu Y, et al. 2016. Spatio-temporal characteristics of livestock and their effects on pollution in China based on geographic information system [J]. *Environ. Sci. Pollut. R.*, 23: 14 183–14 195.
- Moore P A, Daniel T C, Gilmour J T, et al. 1998. Decreasing metal runoff from poultry litter with aluminum sulfate [J]. *J. Environ. Qual.*, 27: 92–99.
- Sanderson M A, Feldmann C, Schmidt J, et al. 2010. Spatial distribution of livestock concentration areas and soil nutrients in pastures [J]. *J. Soil. Water Conserv.*, 65: 180–189.
- Sungur A, Soylak M, Yilmaz S, et al. 2016. Heavy metal mobility and potential availability in animal manure: using a sequential extraction procedure [J]. *J. Mater. Cycles. Waste*, 18: 563–572.
- Sutton A L, Kephart K B, Verstegen M W, et al. 1999. Potential for reduction of odorous compounds in swine manure through diet modification [J]. *J. Anim. Sci.*, 77: 430–439.
- Tuftt L S, and Nockels C F. 1991. The effects of stress, *Escherichia coli*, dietary ethylenediaminetetraacetic acid, and their interaction on tissue trace elements in chicks [J]. *Poultry Sci.*, 70: 2 439–2 449.
- Updyke K M, Nguyen T B, Nizkorodov S A. 2012. Formation of brown carbon via reactions of ammonia with secondary organic aerosols from biogenic and anthropogenic precursors [J].

Atmos. Environ., 63: 22-31.

Withers P J A, and Lord E I. 2002. Agricultural nutrient inputs to rivers and groundwaters in the UK: policy, environmental management and research needs [J]. Sci. Total Environ., 282: 9-24.

Zhuang Y, Thuminh N, Niu B, et al. 2012. Research trends in non point source during 1975—2010 [J]. Phys. Procedia., 33: 138-143.