

我国畜禽养殖氨排放特征及减排体系构建研究

王文林, 杜薇, 韩宇捷, 曹秉帅, 李文静, 童仪, 戴钰蕴, 刘波

引用本文:

王文林, 杜薇, 韩宇捷, 等. 我国畜禽养殖氨排放特征及减排体系构建研究[J]. [农业环境科学学报](#), 2021, 40(11): 2305–2316.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1098>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

醋糟覆盖对堆存牛粪NH₃和CO₂排放的影响

张金瑞, 贾树云, 刘美玲, 张祎, 高志岭

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2193–2201 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1442>

实施清洁生产源头控制畜禽养殖污染

吴银宝, 吴根义, 廖新倬

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2283–2291 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1101>

京津冀地区农业源氨排放的时空格局与减排潜力

吾拉哈提·阿达力别克, 展晓莹, 周丰, 居学海, 习斌, 黄宏坤, 靳拓, 许丹丹

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2236–2245 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0129>

基于文献计量的畜禽养殖废弃物新污染物研究态势分析

曹燕, 胡双庆, 沈根祥, 张洪昌, 王振旗, 李贞金

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2296–2304 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1095>

稻田氨挥发损失及减排技术研究进展

肖其亮, 朱坚, 彭华, 李胜男, 纪雄辉

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 16–25 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0767>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王文林, 杜薇, 韩宇捷, 等. 我国畜禽养殖氨排放特征及减排体系构建研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2305–2316.

WANG W L, DU W, HAN Y J, et al. Ammonia emission characteristics and construction of an emission reduction system for livestock and poultry farming in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2305–2316.

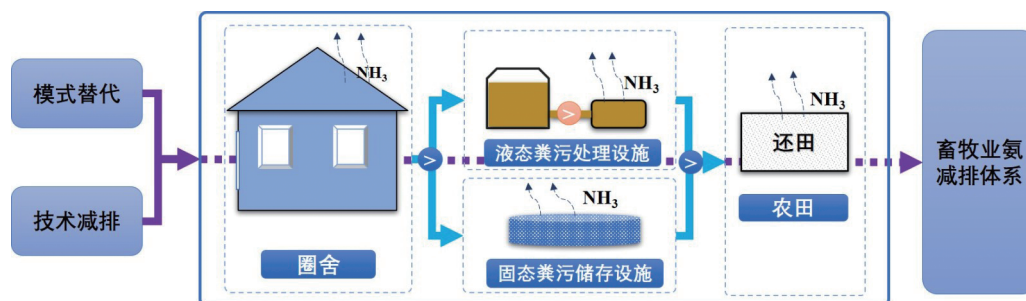


开放科学 OSID

我国畜禽养殖氨排放特征及减排体系构建研究

王文林¹, 杜薇¹, 韩宇捷², 曹秉帅¹, 李文静¹, 童仪¹, 戴铄蕴², 刘波^{2*}

(1. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 南通大学地理科学学院, 江苏 南通 226007)



摘要: 基于畜禽生产-污染防治大协同、污水-废气-固废处理小协同目标, 开展各畜禽养殖模式氨排放特征分析。研究发现: 相同清粪方式下, 机械通风封闭化圈舍氨排放速率要小于自然通风开放式圈舍, 相同通风方式下, 圈舍氨排放速率表现为水冲粪 < 干清粪 < 垫草垫料 < 水泡粪, 各畜种肥水储存模式氨排放最大; 通过养殖模式与减排技术的政策、规范协调性分析, 发现圈舍封闭化+机械通风、堆肥发酵、厌氧发酵等养殖模式, 低蛋白日粮、排风口处理、覆盖、密闭堆肥+废气处理、粪肥机械深施等控氨技术可作为畜牧业氨减排的方向。明确了氨减排模式与技术的对应关系, 构建了模式替代和技术减排相耦合的畜禽氨减排体系, 提出了制定大气氨环境质量标准、畜禽养殖氨排放标准及配套的氨监测技术规范、畜禽养殖场氨减排核算技术规范及配套的氨减排工程建设技术规范等配套落地政策建议, 为顺利推动畜禽氨减排试点工作提供技术支撑。

关键词: 畜禽养殖; 氨排放; 模式氨减排; 技术氨减排; 政策建议

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)11-2305-12 doi:10.11654/jaes.2021-1098

Ammonia emission characteristics and construction of an emission reduction system for livestock and poultry farming in China

WANG Wenlin¹, DU Wei¹, HAN Yujie², CAO Bingshuai¹, LI Wenjing¹, TONG Yi¹, DAI Shuoyun², LIU Bo^{2*}

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. School of Geography

收稿日期: 2021-09-24 录用日期: 2021-10-19

作者简介: 王文林(1981—), 男, 江苏南京人, 博士, 研究员, 主要从事多介质生态系统监测、评估与修复研究。E-mail: wangwenlin_jjl@126.com

*通信作者: 刘波 E-mail: lb@ntu.edu.cn

基金项目: 生态环境部事业费项目“大型规模化养殖场大气氨减排指南制定(2021)”；第二次全国污染源普查项目“畜禽养殖业氨排放技术规范、核算方案制定及华东、西南、西北区氨排放系数率定(2018)”“畜禽养殖业氨排放系数验证及数据审核技术支持(2019)”；国家“十四五”生态环境保护规划重点问题研究之“十四五”农业氨和秸秆排放控制思路研究；江苏省大学生创新训练计划项目(2021181)

Project supported: The Ministry of Ecology and Environment "Formulation of Atmospheric Ammonia Emission Reduction Guidelines for Large-scale Breeding Farms (2021)"; The Second National Pollution Source Survey Project "Formulation of Ammonia Emission Technical Specification and Accounting Scheme for Livestock and Poultry Breeding Industry and Determination of Ammonia Emission Coefficient in East China, Southwest and Northwest China (2018)"; "Technical Support for Ammonia Emission Coefficient verification and Data Review of Livestock and Poultry Industry (2019)"; Research on Agricultural Ammonia and Straw Emission Control in the Fourteenth Five-year Plan; College Students Innovation Training Program of Jiangsu Province (2021181)

Science, Nantong University, Nantong 226007, China)

Abstract: With the aim of pollution prevention through collaborative production and combined sewage-gas-solid waste processing as the target, the characteristics of ammonia emission in livestock and poultry breeding were analyzed. Ammonia emission in the closed enclosure with mechanical ventilation was lower than that in the open enclosure with natural ventilation. Under the same ventilation mode, ammonia emission in the enclosure was in the order of water flushed feces < dry cleaned feces < bedding straw and bedding material < blistering feces. Ammonia emission was the most in the fertilizer and water storage mode for each livestock breed. Analysis of the integration of breeding processes and policy standards of emission reduction technology indicated that a closed enclosure combined with mechanical ventilation, compost fermentation, anaerobic fermentation, low protein diet, exhaust air treatment, mulching, closed compost combined with waste gas treatment, mechanical deep application of manure and other ammonia control technologies can be used toward livestock ammonia emission reduction. The corresponding relationship of ammonia emissions reduction mode and technology was clear, and a livestock and poultry ammonia emission reduction system was established coupled with model substitution and reduction technology. In addition, proposals for establishing environmental quality standards for atmospheric ammonia, ammonia emission standards for livestock and poultry breeding, and supporting technical specifications for ammonia monitoring, including those for accounting and engineering construction for ammonia emission reduction in livestock and poultry farms, are suggested, to provide a basis for the promotion of pilot studies on ammonia emission reduction in livestock and poultry farming.

Keywords: livestock and poultry breeding; ammonia emissions; model of ammonia emission reduction; technology of ammonia emission reduction; policy suggestions

氨在大气化学和气溶胶形成过程中起着重要作用,在雾霾形成中扮演着重要角色^[1-3],是形成细颗粒物(PM_{2.5})的重要前体物^[4-6],且会加快细粒子的生成速度^[3,7]。欧美发达国家PM_{2.5}控制实践表明,通过对氨排放进行同步削减,可以大幅度降低大气环境中PM_{2.5}浓度,实现环境空气质量的大幅提升^[8]。由此可见,从源头上控制氨的排放,对降低大气二次无机盐及PM_{2.5}浓度水平,控制雾霾污染,大幅提升环境空气质量尤为重要^[9]。研究发现,畜禽养殖是大气氨的主要排放源。我国畜禽养殖氨排放量占总排放量的54.06%^[10]。可见,控制畜禽养殖氨排放对于削减人为源大气氨排放起到关键作用,进而对改善空气质量有着重要的意义。

“十三五”以来,我国已逐渐将氨防控提上环境管理日程,《“十三五”生态环境保护规划》(2016年)在国家政策层面提出了“氨防控”的要求^[11],《关于加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》(2018年)明确了在重点地区开展氨排放控制试点的要求^[12],《打赢蓝天保卫战三年行动计划》(2018年)提出了基于农业资源利用效率改善的氨减排行动计划^[13],其中畜禽养殖业因其较高的集约化水平成为氨重点减排试点方向。目前已有研究系统梳理了畜禽养殖氨排放的影响因素^[8,10],从源头(日粮优化)、场内(圈舍、粪水贮存处理)和田间(农田利用)3个环节提出了较为完备的畜禽养殖氨减排技术清单,并明确了减排效率^[14]。畜禽养殖事关我国肉类供给安全,在协

同畜禽生产与污染防治方面,农业农村部与生态环境部出台了一系列文件鼓励环境友好型养殖,推动养殖标准化及粪污资源化利用^[15-18]。但是,上述政策推广的养殖模式及减排技术基本都是从养分高效利用及水污染物减排角度出发^[15-16],而对氨减排考虑不足。目前各养殖模式的氨排放特征尚不清晰、减排效果尚不明确,各种氨减排技术与现行的各类政策、规范的协调性分析不足,严重制约了技术落地应用。

为此,本研究开展各畜禽养殖模式氨排放特征分析,筛选具有氨减排潜力的养殖模式,并结合氨减排技术清单研究基础,围绕畜禽生产-污染防治大协同、污水-废气-固废处理小协同目标,开展政策、规范协调性分析,最终构建模式替代和技术减排相耦合的畜禽氨减排体系,并提出配套落地政策建议,为顺利推动畜禽氨减排试点工作提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 养殖模式

畜禽养殖中的氨主要来自于饲养过程中产生大量的畜禽粪污(指畜禽养殖过程产生粪便、尿液和污水的总称),粪污中大量未被消化的含氮有机物在多种微生物作用下分解产生的氨气挥发至大气中^[18]。从畜禽粪污产生、输送、储存处理和后续利用的流程看,氨主要来自于养殖场和农田两个单元,养殖场单元包括圈舍和粪污储存处理设施2个环节,农田单元

为还田环节。圈舍环节的圈舍结构和清粪方式,粪污处理设施环节的液态粪污处理方式和固态粪污处理方式均会影响氨的排放过程。各养殖场按照圈舍结构、清粪方式、液态粪污和固态粪污处理形成的一定的组合方式,称之为养殖模式。

本研究养殖模式数据(圈舍结构、清粪方式、粪污处理方式等)来源于中国畜牧业年鉴、农业统计年鉴、各省各地级市年度统计年鉴及相关农业调查资料,并结合在全国开展的畜牧业氨排放调查工作获取的数据,涉及东北、华北、西北、华南、华东、西南大区共19个省,涵盖生猪、奶牛、肉牛、蛋鸡、肉鸡养殖场共142个。

经梳理获得我国主要畜种规模化养殖场典型养殖模式,见表1和表2。从养殖场圈舍结构来看,肉牛、奶牛圈舍多为自然通风开放式,肉鸡、蛋鸡圈舍多为机械通风封闭式,生猪圈舍两种类型兼有;从清粪方式来看,干清粪仍是规模化养殖场主要采用的清粪方式,水冲粪和水泡粪主要在生猪养殖场中有所运用,垫草垫料在生猪、肉牛、蛋鸡和肉鸡养殖中都有应用。从规模化养殖场的粪污处理模式来看,传统的肥水储存模式仍然是各畜种液态粪污的主要处理方式^[19-21];厌氧发酵在各类畜禽中都得到应用,普遍使用的厌氧发酵模式为沼气发电;好氧处理在生猪、肉牛、奶牛养殖场得到应用;堆肥发酵是目前固态粪污的主要处理模式^[22]。我国各畜种养殖户的养殖模式比较单

一,即圈舍养殖模式为自然通风圈舍结构,清粪方式多为干清粪,粪污处理基本采用肥水储存模式。

1.1.2 氨减排技术

聚焦畜牧业氨减排技术研究的综述文献,着重收集2018年以来的相关文献^[22-26],梳理出生猪、肉牛、奶牛、蛋鸡、肉鸡粪污管理全链条各自潜在氨减排技术,并围绕技术的减排效果、适用性和经济可行性进行整合分析。

1.1.3 畜禽污染治理政策与规范

本文通过全国人大、国务院、农业农村部、生态环境部等与畜禽生产和污染治理相关政府部门网站,收集筛选各类畜禽养殖生产及污染防治相关政策与规范文本。其中,重点梳理2018年以来出台的畜禽养殖生产及污染防治政策、文件和通知,以及目前在时效期内的畜禽养殖污染防治相关技术规范。最终获取各部门机构独立或合作颁布的27个相关政策与规范文本。

1.2 研究方法

1.2.1 养殖模式氨排放监测

针对梳理的典型养殖模式,在东北、华北、华东、华南、西南、西北地区,选取管理水平接近的养殖场进行实地监测,获取主要畜种典型养殖模式圈舍和粪污储置设施的氨排放速率,监测养殖场数量见表3。在监测过程中,确保同一畜种的生长阶段相同,各监测养殖场均处于正常生产情况,监测期间的温度和湿度

表1 规模化养殖场圈舍养殖模式

Table 1 The enclosure breeding model of large-scale breeding farm

圈舍结构 Housing structure	干清粪 Dry cleaning feces	水冲粪 Water flushes feces	水泡粪 Blistering feces	垫草垫料 Bedding straw and bedding material
自然通风开放式	■▲△	■	■	■▲
机械通风封闭式	■●○	■	■	■●○

注:■生猪,●肉鸡,○蛋鸡,▲肉牛,△奶牛。下同。

Note: ■pig, ●broiler, ○laying hen, ▲beef cattle, △dairy cattle. The same below.

表2 规模化养殖场粪污处理模式

Table 2 The manure treatment model of large-scale breeding farm

粪污形态 Waste form	处理工艺 Treatment technology	暴露设施 Exposed facility	清粪方式 Treatment model			
			干清粪 Dry cleaning feces	水冲粪 Water flushes feces	水泡粪 Blistering feces	垫草垫料 Bedding straw and bedding material
液态粪污 Liquid waste	肥水储存	肥水储存池	■▲△●○	■	■	—
	厌氧发酵	调节池、沼液池、氧化塘	■▲△●○	■	■	—
	好氧处理	调节池、曝气池、氧化塘	■▲△	■	■	—
固态粪污 Solid waste	堆肥发酵	堆肥场地	■▲△●○	■	■	■●○▲△

表3 规模化养殖场监测数量
Table 3 The Monitoring number of large-scale breeding farm

清粪方式 Manure treatment model	圈舍 House						液态粪污 Liquid waste															固态粪污 Solid waste				
	开放式			封闭式			肥水储存					厌氧发酵					好氧处理					堆肥发酵				
	■	▲	△	■	●	○	■	●	○	▲	△	■	●	○	▲	△	■	▲	△	■	●	○	▲	△		
干清粪	8	6	7	3	5	5	5	6	5	6	6	4	1	1	2	1	1	1	1	4	1	3	1	2		
水冲粪	3	0	0	2	0	0	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
水泡粪	2	0	0	2	0	0	4	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
垫草垫料	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0		

范围分别选取在(20±3)℃和50%~70%。开放式圈舍、封闭式圈舍和粪污设施的氨排放监测方法参照《畜禽养殖氨排放核算技术方法研究》^[27]。通过获取的氨气浓度核算单位畜禽的氨排放速率,核算方法参照《畜禽养殖氨排放核算技术方法研究》^[27]。

1.2.2 养殖模式氨排放特征

采用基准比较法进行养殖模式氨排放特征比较,将应用最为普遍而生产管理相对较差的养殖模式作为基准模式,通过对养殖模式的梳理,选取干清粪为圈舍环节基准模式,肥水储存为粪污处理设施环节基准模式,根据公式(1)进行减排效果分析:

$$I=C_i/C_0 \quad (1)$$

式中: I 为减排系数; C_i 为相比较的第*i*种养殖模式氨排放速率, $\text{g}\cdot\text{头}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$; C_0 为基准模式氨排放速率, $\text{g}\cdot\text{头}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

1.2.3 减排技术与养殖模式耦合

基于畜禽生产-污染防治大协同,污水-废气-固废处理小协同目标,结合各减排技术特点,筛选出现行畜禽养殖生产及污染防治政策、规范中具有氨减排效果的减排技术,再与典型养殖模式的组成设施及生产运行特征进行匹配性分析,从而将减排技术与养殖模式进行耦合。

2 结果与讨论

2.1 典型养殖模式氨排放特征

2.1.1 圈舍养殖模式

通过监测核算获得我国典型养殖模式各排放环节的氨排放速率。从圈舍结构来看,相同清粪方式的机械通风封闭化圈舍氨排放速率要小于自然通风开放式圈舍,以生猪圈舍为例(图1),干清粪、水冲粪、水泡粪和垫草垫料清粪方式封闭圈舍比相同清粪方式的开放式圈舍氨排放速率分别小25.41%、24.65%、13.94%和9.61%。机械通风圈舍在夏季运用智能机

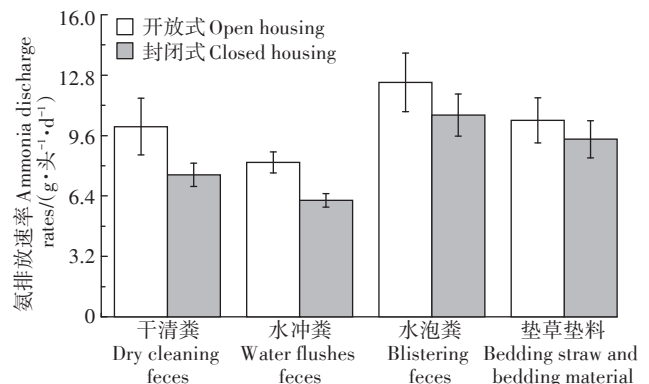


图1 生猪开放式和封闭式圈舍氨排放速率

Figure 1 Ammonia discharge rates of open and closed pigs housing

械通风降低舍内温度,并配以湿帘等设施提高舍内湿度,通过改变环境因素进而减少圈舍氨排放^[28-31]。研究发现,在封闭式育肥猪舍中,当通风频率提高到3倍,由于温度下降,氨排放只增加25%,舍内氨浓度降低到了原来的1/3。而在非封闭式育肥猪舍,通风频率提高5倍,由于温度几乎没有下降,氨排放也相应增加了5倍^[32]。

从清粪方式来看,相同通风方式圈舍氨排放速率表现为水冲粪<干清粪<垫草垫料<水泡粪,以生猪圈舍为例,封闭圈舍水冲粪、水泡粪和垫草垫料模式相比于干清粪模式的减排系数分别是0.81、1.23和1.03,对应的开放式圈舍分别是0.82、1.42和1.25,见图1。清粪方式决定了粪尿在舍内的存积时间和混合程度,以及粪尿受扰动的程度,进而会影响栏舍内氨排放^[32-33]。水冲粪相比干清粪,粪便扰动较小,加之水冲增加湿度,使氨溶解于水而减少禽舍氨气排放量,这在一定程度上减少了氨的排放^[8]。水泡粪圈舍粪污在舍内停留时间明显较长,从而加大了圈舍环节的氨排放^[8]。干清粪操作时会剧烈扰动粪尿,同时增加了粪尿在舍内的暴露面积,从而释放更多的氨

气^[34]。垫草垫料中温度相对较高,容易造成氨气挥发,并且其中的含氮物质会发生降解反应,进而产生氨气^[35]。

2.1.2 粪污处理模式

从粪污处理模式来看,干清粪生猪的厌氧发酵、好氧处理和堆肥发酵模式相比于肥水储存模式的减排系数分别是0.28、0.08和0.52;奶牛相应分别为0.28、0.21和0.28;肉牛相应分别为0.21、0.17和0.19;蛋鸡和肉鸡的厌氧发酵、堆肥发酵模式的减排系数分别是0.11、0.22和0.09、0.10(图2)。在传统的肥水储存模式中,畜禽粪尿以混合形式存在,尿液中的氮主要是以尿素形式存在,粪便中的脲酶会加速尿素分解,从而导致氨气的排放^[13]。在厌氧发酵过程中,随着有机物的矿化分解,虽然富含氮素的粪污会产生新的氨氮,但是反硝化和厌氧氨氧化等作用减少了粪污的氨排放,同时处理设施密闭的处理环境也间接减少了氨排放,其与粪污直接储存堆放相比一定程度上减少了氨排放潜力^[36]。好氧处理模式通过生物硝化作用将氨氮转化成硝酸盐,相比于肥水存储模式大幅降低了氨排放^[37]。堆肥发酵主要是通过微生物的氨化作用分解有机氮产生氨气,然而氨气又溶于堆体物从而形成铵态氮,铵态氮又可作为细胞生长的氮源供微生物同化,从而减少了氨气的排放^[38]。

2.2 畜牧业氨减排技术

基于已有的畜牧业氨减排技术研究基础^[39-42],对生猪、肉牛、奶牛、蛋鸡和肉鸡养殖源头(日粮优化)、场内(圈舍、粪水贮存处理)和田间(农田利用)氨减排技术进行梳理,围绕技术减排率和技术特点(适用性与经济性)进行归纳总结,结果见表4。

总的来看,我国在畜牧业氨排放控制方面的研究起步较晚,对氨的减排技术还停留在研究和成果的梳

理阶段,仅有某些基于畜牧废弃物资源化利用或恶臭防治目标的减排技术在一定范围内有所应用^[18]。目前所提出的氨减排技术都是针对某一粪肥管理阶段的某单项技术,着重某个具体节点而割裂了养殖场内部各养殖环节之间联系,忽略了全流程体系构建^[14]。此外,缺乏基于应用场景养殖模式特点的氨减排组合技术之间衔接性和综合评价,未能兼顾养殖模式对氨减排的作用^[42]。所提出的大多数技术措施起源或流行于国外,缺乏针对我国养殖条件应用场景的适应性分析^[39],以及与我国畜禽污染防治政策衔接性分析^[40-41]。

2.3 养殖模式与减排技术的政策、规范协调性分析

通过收集我国畜牧养殖相关的法律、法规、标准、规范、管理办法和行动计划,对畜牧业氨减排相关条文进行梳理,结合养殖模式排放特征、减排技术特点与减排效果,筛选出当前畜禽养殖生产及污染防治政策、规范中具有氨减排效果的养殖模式与污染防治技术,结果见表5。通过分析,发现圈舍封闭化+机械通风、堆肥发酵、厌氧发酵等养殖模式,低蛋白日粮、圈舍排风口处理、液态粪污覆盖、密闭堆肥+废气处理、粪肥机械深施等控氨技术与现行的畜禽养殖场相关法律、标准、规范、管理办法和行动计划存在一致性,可作为畜牧业氨减排的方向。

2.4 基于模式替代和技术减排相耦合的畜禽氨减排体系

通过对畜禽养殖模式排放特征的分析,发现在相同的管理水平下,同一畜种养殖场因养殖模式差异造成对氨排放影响因素的作用效果不同,最终导致同一畜种养殖场各养殖模式之间氨排放存在差异。可见,可通过优选具有氨减排潜力的模式进行养殖模式替代,从而实现养殖场氨减排,即模式氨减排。畜禽养

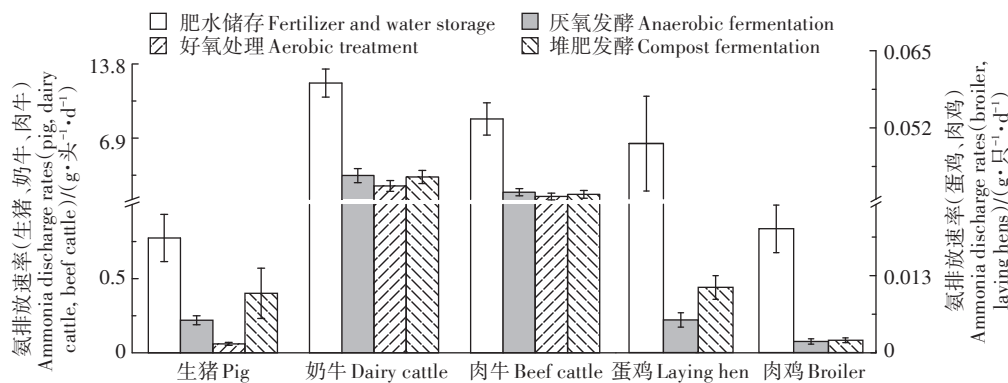


图2 各畜种各粪污储存模式氨排放速率

Figure 2 Ammonia discharge rate of each breed and manure storage mode

表4 畜牧业氨减排技术清单
Table 4 List of ammonia emission reduction technologies in animal husbandry

氨排放环节 Ammonia discharge link	减排技术 Emission reduction technology	减排率 Reduction rate/%	技术特点 Technical feature
源头 饲喂	日粮优化技术	低蛋白日粮	10~63 优点:提高饲料利用率,降低饲料成本;缺点:最优配比标准难以确定
		功能性饲料添加剂	10~50 优点:提高饲料利用率,降低饲料成本;缺点:过量使用易造成畜种中毒
场内 圈舍	环境改善技术	舍内喷淋	11~19 优点:夏季可降温增湿;缺点:喷嘴易堵塞,温度要求高,湿度难以控制
		机械快速清粪	10~93 优点:节省人工成本,操作简单;缺点:一次性投资大,运行和维护费用高
	垫料调节技术	添加固态吸附剂	45~93 优点:简单易行,吸湿除臭;缺点:垫料容易发霉,影响畜种健康
		添加生物菌剂	30~90 优点:简单易行,成本低;缺点:易受消毒药物影响而降低活性
	排风口废气处理技术	吸附+喷淋	44~90 优点:节省人工成本;缺点:一次性投资大
	液态粪污 局部覆盖技术	秸秆、塑料薄膜、轻质黏土颗粒覆盖	17~99 优点:成本较低;缺点:运行周期较短,稳定性差
	整体覆盖+废气处理技术	混凝土、玻璃纤维面板、聚酯板材,工膜、聚乙烯覆盖	65~99 优点:运行周期长,密封性好;缺点:增加粪污搅拌难度,一次性投资大
	粪体调节技术	酸化	54~84 优点:成本较低,可有效固持粪污中的氮素;缺点:易腐蚀设备,易造成粪污起泡膨胀
		添加尿酶抑制剂	50~81 优点:成本较低;缺点:抑制剂作用时间短
	固态粪污 密闭堆肥+废气处理技术	覆膜堆肥	3~58 优点:操作简单;缺点:无法连续生产,占地面积大
田间 农田利用		发酵罐堆肥+废气处理	45~81 优点:节省人工成本,堆肥时间短,占地面积小。缺点:易受低温影响,一次性投资大,运行和维护费用高
		堆肥场密闭化+废气处理	30~80 优点:稳定性较好;缺点:占地面积大,一次性投资成本高
	堆肥添加技术	添加脲酶抑制剂	50~81 优点:成本较低;缺点:作用时间短
		添加生物菌剂	17~92 优点:成本较低,提高堆肥效率;缺点:高温易造成菌剂失活
	深施技术	注射深施	70~99 优点:提高粪肥肥效,促进植物根部生长;缺点:人工或机械成本高
		覆土深施	55~94 优点:提高粪肥肥效,促进植物根部生长;缺点:人工或机械成本高

殖氨过程减排技术是针对畜禽养殖的源头、场内和田间等氨排放环节,通过一系列的物理、化学、生物等手段,强化模式对氨减排的作用效果,进而实现氨减排。可见,模式氨减排是实施技术减排的基础,技术氨减排是对模式氨减排的强化与提升,由此构建模式替代和技术减排相耦合的畜禽氨减排体系,见图3。

依据畜禽氨减排体系框架,结合排放效果与政策协调性分析,提出模式替代方向,即圈舍结构模式替代方向为机械通风封闭式圈舍替代自然通风开放式圈舍;液态粪污处理模式替代方向为厌氧发酵替代肥水储存;固态粪污处理模式替代方向为粪污堆肥发酵替代肥水储存。

将通过筛选的减排技术与典型养殖模式的组成设施及生产运行特征进行匹配性分析,将养殖模式与减排技术进行耦合,结果见表6和表7。从源头减排技术来看,低蛋白日粮技术适用于各畜种的养殖模式。对于封闭式管理的养殖场,如生猪场、蛋鸡场和肉鸡场等,可采用废气收集结合酸式洗涤器或生物滴

滤器技术。从液态粪污减排技术来看,因覆盖材料覆盖均匀性差、运行周期较短、稳定性低、易下沉或被吹走、受天气影响大等原因,局部覆盖技术一般用于雨水较少地区的小型养殖场肥水储存模式的存储池、厌氧发酵模式的沼液池和好氧处理模式的氧化塘等设施的氨减排。整体覆盖+废气处理技术适用于中大型养殖场肥水储存模式的存储池,厌氧发酵模式的沼液池,好氧处理模式的调节池、曝气池和氧化塘等设施的氨减排。从固态粪污减排技术来看,覆膜堆肥适用于每日生产粪污量几百千克到几吨的中小型养殖场堆肥发酵模式。发酵罐堆肥+废气处理技术占地面积小且可连续生产,但鉴于成本因素,该技术适用于中大型养殖场或粪污集中处理中心的堆肥发酵模式^[56-58]。堆肥场密闭化+废气处理技术,将传统的条垛式或槽式堆肥场地密闭,并配套废气收集处理系统,占地面积大,投资和运行成本高,适用于大型养殖场粪污集中处理中心的堆肥发酵模式^[59]。从田间减排技术来看,粪肥深施是有效的氨减排技术,经肥水

表5 具有政策一致性的氨减排养殖模式与污染防治技术列表

Table 5 List of ammonia emission reduction farming mode and pollution prevention technology with policy consistency

模式/技术类型 Mode/Technology type			依据政策及规范名称 Policy and standard	依据内容 Concrete content
养殖模式	圈舍结构	圈舍封闭化+机械通风	《国务院办公厅关于促进畜牧业高质量发展的意见》国办发[2020]31号 ^[17]	(六)提升畜牧业机械化水平。制定主要畜禽品种规模化养殖设施装备配套技术规范,推进养殖工艺与设施装备的集成配套
			《农业农村部关于加快畜牧业机械化发展的意见》(农机发[2019]6号) ^[43]	二、主要任务 突出抓好养殖生产全程机械化,加快提升畜禽养殖废弃物处理机械化水平,积极促进畜牧业机械化转型升级
			《畜禽养殖业污染防治技术政策》(环发[2010]151号) ^[44]	第五章 5.1 规模化畜禽养殖场(小区)应加强恶臭气体净化处理并覆盖所有恶臭发生源
			《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》(HJ 497—2009)	10.1.2 养殖场区应控制饲养密度、加强舍内通风
			《规模猪场建设》(GB/T 17824.1—2008)	10.2.5 夏季公猪舍宜采用湿帘机械通风方式降温
			《畜禽场环境质量及卫生控制规范》(NY/T 1167—2006)	6.2.1.1 采取科学的通风换气方法,保证气流均匀,及时排除舍内的有害气体
	固态粪污处理	堆肥发酵	《国务院关于印发全国农业现代化规划(2016—2020年)的通知》(国发[2016]58号) ^[45]	2.强化农业环境保护 推进畜禽粪污综合利用,推广污水减量、厌氧发酵、粪肥堆肥等生态化治理模式,建立第三方治理与综合利用机制
			《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》 ^[46]	5.2建设一批畜禽粪污原地收集储运、固体粪肥集中堆肥或能源化利用、污水高效生物处理等设施 and 有机肥加工厂
			《国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》(国办发[2017]48号) ^[15]	1.2以肥料化利用为基础,采取经济高效适用的处理模式,宜肥则肥,宜气则气,宜电则电,实现粪污就地就近利用
			《关于做好2020年畜禽粪污资源化利用工作的通知》(农办牧[2020]32号) ^[16]	1.以畜禽粪污肥料化和能源化利用为方向,聚焦生猪规模养殖场,全面推进畜禽粪污资源化利用
			《国务院办公厅关于印发全国农业现代化规划(2016—2020年)的通知》(国发[2016]58号) ^[45]	2.强化农业环境保护 推进畜禽粪污综合利用,推广污水减量、厌氧发酵、粪肥堆肥等生态化治理模式,建立第三方治理与综合利用机制
			《畜禽粪便无害化处理技术规范》(GB/T 36195—2018)	7.2.1 液态粪污宜采用厌氧发酵
			《畜禽规模养殖场粪污资源化利用设施建设规范(试行)》(农办牧[2018]2号) ^[47]	第11条:利用沼气发电或提纯生物天然气的,根据需要配套沼气发电和沼气提纯等设施设备
			《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020年)》(国办发[2017]48号) ^[48]	2.6 提高沼气和生物天然气利用效率
			《全国农村沼气发展“十三五”规划》(发改农经发[2017]178号) ^[49]	22重点用于支持规模化大型沼气和生物天然气工程试点项目建设
			《国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》(国办发[2017]48号) ^[15]	1 以沼气和生物天然气为主要处理方向
	液态粪污处理	厌氧发酵	《关于做好2020年畜禽粪污资源化利用工作的通知》(农办牧[2018]2号) ^[47]	2.7在种养殖密度较高的地区和新农村集中区因地制宜建设规模化沼气工程,同时支持多种模式发展规模化生物天然气工程
			《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020年)》(国办发[2017]48号) ^[48]	调整优化饲料配方结构,促进玉米、豆粕减量替代
			《全国农村沼气发展“十三五”规划》(发改农经发[2017]178号) ^[49]	5着力做好技术支撑。严格规范饲料添加剂和兽药的生产和使用,推广低蛋白日粮技术标准
			《国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》(国办发[2017]48号) ^[15]	引言:用动物蛋白替代植物蛋白
			《关于做好2020年畜禽粪污资源化利用工作的通知》(农办牧[2020]32号) ^[16]	6.2.2.4 适当进行通风换气,并在通风口设置过滤帘,保证舍内温度,及时排出、减少颗粒物及有害气体
			《畜禽粪便无害化处理技术规范》(NY/T 1168—2006)	10.1.3 粪污处理各工艺单元宜设计为封闭形式,减少恶臭对周围环境的污染
			《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》(HJ 497—2009)	第五章第51条:规模化畜禽养殖场(小区)应加强恶臭气体净化处理并覆盖所有恶臭发生源
			《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020年)》(国办发[2017]48号) ^[48]	重点支持规模养殖场密闭式贮存发酵以及堆(沤)肥设施建设、项目实施后规模养殖场臭气得到有效控制,液体粪污实现密闭贮存和处理
			《畜禽粪便无害化处理技术规范》(NY/T 1168—2006)	9.2 畜禽固体粪肥宜采用密闭仓式堆肥等技术进行无害化处理
			《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》(HJ 497—2009)	10.1.4 密闭化的粪污处理厂(站)宜建恶臭集中处理设施
减排技术	源头减排技术	低蛋白日粮	《国务院办公厅关于促进畜牧业高质量发展的意见》国办发[2020]31号 ^[17]	3化肥深施和有机肥机械化撒施装备;高效自动化施药设备
			《畜禽养殖废弃物资源化利用2019年工作要点》(农办牧发[2019]33号) ^[51]	3.2提升有机肥施用技术与配套设施水平
			农业农村部畜牧兽医局《饲料中玉米豆粕减量替代工作方案》2021年3月 ^[52]	(十七)大力推进畜禽养殖废弃物资源化利用。支持符合条件的县(市、区、旗)整县推进畜禽粪污资源化利用,鼓励液体粪肥机械化施用
			《畜禽养殖废弃物资源化利用2019年工作要点》(农办牧发[2019]33号) ^[51]	
	场内减排技术	圈舍粪污处理设施	《畜禽场环境质量及卫生控制规范》(NY/T 1167—2006)	
			《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》(HJ 497—2009)	
			《畜禽养殖业污染防治技术政策》(环发[2010]151号) ^[44]	
			《关于做好2020年畜禽粪污资源化利用工作的通知》(农办牧[2020]32号) ^[16]	
	田间减排技术	粪肥机械深施	《畜禽粪便无害化处理技术规范》(NY/T 1168—2006)	
			《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》(HJ 497—2009)	
			《农业绿色发展技术导则(2018—2030年)》(农科教发[2018]3号) ^[53]	
			《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》(农农发[2017]2号) ^[54]	

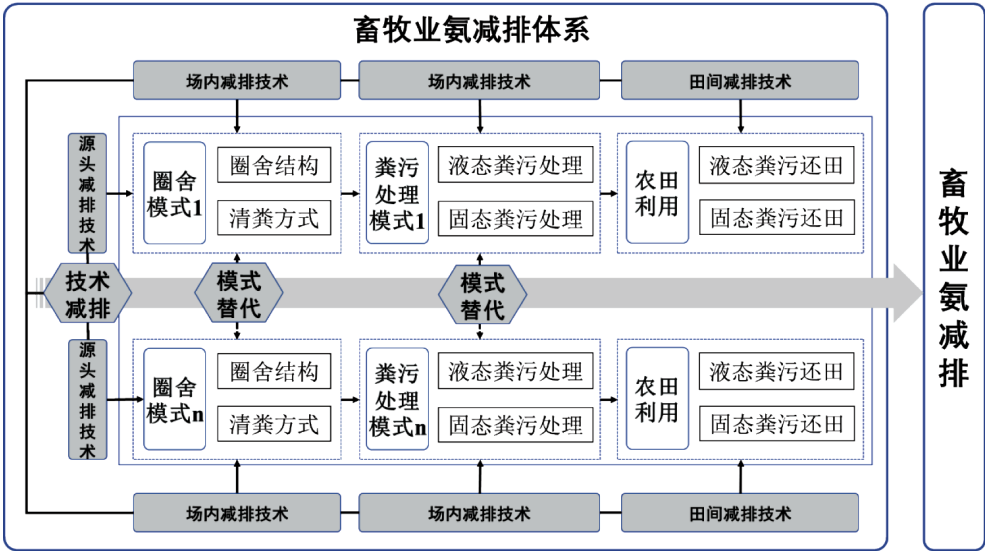


图3 基于模式替代和技术减排相耦合的畜牧业氨减排体系框架

Figure 3 The framework of livestock ammonia emission reduction system based on the coupling of model substitution and technology emission reduction

表6 圈舍模式与氨减排技术耦合列表

Table 6 List of the coupling of enclosure mode and ammonia abatement technology

圈舍模式 Enclosure mode			日粮优化技术 Diet optimization techniques	排风口废气处理技术 Exhaust vent waste gas treatment technology
畜种	圈舍结构	清粪方式	低蛋白日粮	吸附+喷淋
■▲△	开放式	干清粪	√	
■		水冲粪	√	
■		水泡粪	√	
■▲		垫草垫料	√	
■●○		干清粪	√	√
■		水冲粪	√	√
■		水泡粪	√	√
■●○	封闭式	垫草垫料	√	√

表7 粪污处理模式与氨减排技术耦合列表

Table 7 List of the coupling of manure treatment mode and ammonia abatement technology

粪污处理模式 Manure treatment mode			液态粪污处理 Liquid waste disposal		固态粪污处理 Solid waste disposal	田间利用 Field use		
畜种	清粪方式	处理工艺	局部覆盖技术	整体覆盖+废气处理技术	密闭堆肥+废气处理技术		深施技术	
			秸秆、塑料薄膜、 轻质黏土颗粒覆盖	混凝土、玻璃纤维面板、聚酯板 材,土工膜、聚乙烯覆盖	覆膜堆肥	发酵罐堆肥+废气 处理	注射深施	覆土深施
■▲△●○	干清粪	肥水储存	√	√			√	√
■▲△●○		厌氧发酵	√	√			√	
■▲△		好氧处理	√	√				
■▲△●○		堆肥发酵			√	√		√
■		水冲粪/水 泡粪	肥水储存	√	√			√
	厌氧发酵		√	√			√	
	好氧处理		√	√				
	堆肥发酵				√	√		√
■●○▲△	垫草垫料		堆肥发酵			√		

储存、厌氧发酵处理的液态粪污适宜采用注射施肥技术;经肥水储存处理的液态粪污和堆肥发酵处理的固态粪污适宜采用覆土深施技术^[60-62]。

3 结论与政策建议

3.1 结论

(1)通过实地监测发现,各养殖模式间氨排放存在差异。从圈舍结构来看,相同清粪方式下机械通风封闭化圈舍氨排放速率小于自然通风开放式圈舍,生猪圈舍干清粪、水冲粪、水泡粪和垫草垫料清粪方式封闭圈舍比相同清粪方式的开放式圈舍氨排放速率分别减小25.41%、24.65%、13.94%和9.61%;从清粪方式来看,相同通风方式圈舍氨排放速率表现为水冲粪<干清粪<垫草垫料<水泡粪,生猪封闭圈舍水冲粪、水泡粪和垫草垫料模式相比于干清粪模式的减排系数分别是0.81、1.23和1.03,对应的开放式圈舍分别是0.82、1.42和1.25;从粪污处理模式来看,各畜种的传统肥水储存模式氨排放最大,生猪的厌氧发酵、好氧处理和堆肥发酵模式相比于肥水储存模式的减排系数分别是0.28、0.08和0.52;奶牛相应分别为0.28、0.21和0.28;肉牛相应分别为0.21、0.17和0.19;蛋鸡和肉鸡的厌氧发酵、堆肥发酵模式的减排系数分别为0.11、0.22和0.09和0.10。

(2)基于养殖模式与减排技术的政策、规范协调性分析,发现圈舍封闭化+机械通风、堆肥发酵、厌氧发酵等养殖模式,低蛋白日粮、圈舍排风口处理、液态粪污覆盖、密闭堆肥+废气处理、粪肥机械深施等控氨技术与现行的畜禽养殖场相关法律、标准、规范、管理办法和行动计划存在一致性,可作为畜牧业氨减排的方向。

(3)系统辨析氨减排模式与技术的关系,构建模式替代和技术减排相耦合的畜禽氨减排体系,将通过筛选的减排技术与典型养殖模式的组成设施及生产运行特征进行匹配性分析,实现养殖模式与减排技术耦合,为我国畜牧业氨减排工作提供支撑。

3.2 政策建议

本研究基于畜禽生产-污染防治大协同、污水-废气-固废处理小协同目标,梳理了现行畜禽养殖生产及污染防治政策、规范中具有氨减排效果的养殖模式与污染防治技术,明确了氨减排模式与技术的对应关系,由此提出了模式替代和技术减排相耦合的畜禽氨减排体系,体现了“源头削减、清洁生产、资源化综合利用、防止二次污染”等技术特点,在氨高效减排的

同时,最大程度地实现恶臭、温室气体、废水、固废的协同减排,具有较好的推广性。但是,研究结果距离落实畜禽养殖氨排放控制试点工作,实现区域畜禽养殖氨总量减排目标,进而实现大气环境质量改善尚有较大差距,还应开展以下工作:

(1)制定大气氨环境质量标准,以大气环境承载力为纲科学指导畜禽养殖业发展。基于区域氨排放对雾霾形成的贡献影响,制定大气氨环境质量标准,主要在京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原地区等国家大气污染防治重点区域,开展大气环境承载力评价,结合土地承载力和水资源、水环境承载力分析结果,科学确定区域载畜量、养殖布局、养殖模式及氨减排技术。

(2)制定畜禽养殖氨排放标准及配套的氨监测技术规范,将畜禽氨排放逐步纳入固定污染源环境管理体系。根据《国家大气污染物排放标准制定技术导则》(HJ 945.1—2018)要求,重点对可推广的畜禽养殖氨减排技术效果开展调研、监测,制定养殖场圈舍、粪水贮存处理等关键排放节点氨排放限值及其配套的监测技术规范,推动《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)修订,将氨逐步纳入畜禽养殖环境影响评价、环境保护设施设计、竣工验收及其投产后排污许可管理等环境监管工作。

(3)制定畜禽养殖场氨减排核算技术规范及配套的氨减排工程建设技术规范,为区域养殖氨总量减排及评估考核提供依据。针对区域养殖全口径,主要考虑因养殖基量变化、养殖模式变化以及新氨减排技术措施等带来的氨减排量,基于可操作性和可落地目标,充分考虑农业普查、环境统计养殖活动水平及第二次全国污染源普查畜禽养殖氨排放因子等数据源结构,开展核算方法、数据质量管理、报告编制等内容设计,制定氨减排核算技术规范;为保障设施减排效果,应明确氨减排工程建设技术要求,推动《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》(HJ 497—2009)修订,切实为环境管理部门核算区域畜禽氨减排量、评估畜禽氨减排成效提供依据。

参考文献:

- [1] HO K. Chemical composition and bioreactivity of PM_{2.5} during 2013 haze events in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 126: 162-170.
- [2] LIAO L W. Legislation, plans, and policies for prevention and control of air pollution in China: Achievements, challenges, and improvements [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 1549-1558.
- [3] WANG J, WANG S, VOORHEES A S, et al. Assessment of short-term

- PM_{2.5}-related mortality due to different emission sources in the Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 123:440-448.
- [4] DE DOUSSI I C, BARRETT S. Air pollution and early deaths in the United States. Part II: Attribution of PM_{2.5} exposure to emissions species, time, location and sector[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 99: 610-617.
- [5] TITTEL F K. Role of atmospheric ammonia in particulate matter formation in Houston during summertime[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 77:893-900.
- [6] 韦莲芳, 段青春, 谭吉华, 等. 北京春季大气中氨的气粒相转化及颗粒态铵采样偏差研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(2): 216-226. WEI L F, DUAN J C, TAN J H, et al. Gas-to-particle conversion of atmospheric ammonia and sampling artifacts of ammonium in spring of Beijing[J]. *Science China Earth Science*, 2015, 45(2): 216-226.
- [7] CUI H Y, CHEN W H, DAI W, et al. Source apportionment of PM_{2.5} in Guangzhou combining observation data analysis and chemical transport model simulation[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 116:262-271.
- [8] 王文林, 刘波, 韩睿明, 等. 农业源氨排放影响因素研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(6): 870-878. WANG W L, LIU B, HAN R M, et al. Review of researches on factors affecting emission of ammonia from agriculture[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(6): 870-878.
- [9] GALLOWAY J N, DENTENER F J, CAPONE D G, et al. Nitrogen cycles: Past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [10] 白兆鹏, 朱海生, 高云峰. 畜禽舍内氨气减排措施的研究进展[J]. 饲料博览, 2011(9): 38-40. BAI Z P, ZHU H S, GAO Y F. Research progress of reducing ammonia of animal housing facilities[J]. *Feed Review*, 2011(9): 38-40.
- [11] 国务院关于印发“十三五”生态环境保护规划的通知[EB/OL]. (2016-11-24)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2016-12/05/content_5143290.htm. Notice of the State Council on the issuance of the 13th Five-Year Plan for the protection of the ecological environment[EB/OL]. (2016-11-24)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2016-12/05/content_5143290.htm.
- [12] 关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见[EB/OL]. (2018-06-16)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/jzhengce/2018-06/24/content_5300953.htm. Opinions on strengthening the protection of the ecological environment in an all-round way and resolutely fighting the battle against pollution[EB/OL]. (2018-06-16)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/jzhengce/2018-06/24/content_5300953.htm.
- [13] 打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知[EB/OL]. (2018-06-27)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm. Notice of the three-year action plan to win the Battle of the Blue Sky[EB/OL]. (2018-06-27)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm.
- [14] 刘学军, 沙志鹏, 宋宇. 我国大气氨的排放特征、减排技术与政策建议[J]. 环境科学研究, 2021, 34(1): 149-157. LIU X J, SHA Z P, SONG Y, et al. China's atmospheric ammonia emission characteristics, mitigation options and policy recommendations[J]. *Research of Environmental Science*, 2021, 34(1): 149-157.
- [15] 国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见[EB/OL]. (2017-05-31)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2017-06/12/content_5201790.htm. Opinions of the General Office of the State Council on speeding up the resource utilization of livestock and poultry reptiles[EB/OL]. (2017-05-31)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2017-06/12/content_5201790.htm.
- [16] 关于做好2020年畜禽粪污资源化利用工作的通知[EB/OL]. (2020-07-03)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/jzhengce/jzhengceku/2020-07/07/content_5524770.htm. Notice on the resource utilization of animal and poultry manure in 2020[EB/OL]. (2020-07-03)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/jzhengce/jzhengceku/2020-07/07/content_5524770.htm.
- [17] 国务院办公厅关于促进畜牧业高质量发展的意见[EB/OL]. (2020-09-14)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2020-09/27/content_5547612.htm. Opinions of the General Office of the State Council on promoting the high-quality development of animal husbandry[EB/OL]. (2020-09-14)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2020-09/27/content_5547612.htm.
- [18] 宇凌, 宋超, 徐梅, 等. 微生物治理畜禽粪便臭味的作用机理[J]. 饲料博览, 2018, 319(11): 54-56, 60. SONG L, SONG C, XUE M, et al. Mechanism of microbial treatment of stink of livestock and poultry excrement[J]. *Feed Review*, 2018, 319(11): 54-56, 60.
- [19] 段丽娟. 现阶段规模猪场主要粪污治理模式[J]. 畜牧兽医科技信息, 2016, 473(5): 101. DUAN L J. The main manure treatment mode of large-scale pig farm at this stage[J]. *Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2016, 473(5): 101.
- [20] 廖建军, 侯萍, 冯杰. 猪场粪污处理利用模式探究[J]. 中国动物保健, 2020, 22(2): 46, 62. LIAO J J, HOU P, FENG J. The pattern of utilization of pig farm manure treatment is explored[J]. *China Animal Health*, 2020, 22(2): 46, 62.
- [21] 朱志平. 水禽粪污处理典型技术模式解析[J]. 中国禽业导刊, 2019(21): 11-12. ZHU Z P. Analysis of typical technical patterns for waterfowl manure treatment[J]. *Guide to Chinese Poultry*, 2019(21): 11-12.
- [22] 史国翠, 王桂柱, 李莉. 堆肥发酵粪污处理模式示范推广[J]. 家禽科学, 2017(12): 23-24. SHI G C, WANG G Z, LI L. The demonstration and popularization of compost fermentation manure treatment model[J]. *Poultry Science*, 2017(12): 23-24.
- [23] 曹玉博, 邢晓旭, 柏兆海, 等. 农牧系统氨挥发减排技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 566-580. CAO Y B, XING X X, BAI Z H, et al. Review on ammonia emission mitigation techniques of crop-livestock production system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 566-580.
- [24] 刁立鹏, 张卓毅, 吴迪梅, 等. 畜禽场氨减排技术研究进展[J]. 畜牧与饲料科学, 2018, 39(4): 69-73. DIAO L P, ZHANG Z Y, WU D M, et al. Research progress on ammonia emission mitigation technologies in livestock and poultry farms[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2018, 39(4): 69-73.

- [25] 蒋一秀,李尚民,范建华,等. 畜禽养殖减排关键技术研究进展[C]. 中国畜牧兽医学学会2018年学术年会禽病学分会第十九次学术研讨会论文集, 2018. JIANG Y X, LI S M, FAN J H, et al. Progress in research on key technologies for animal and poultry breeding emission reduction[C]. The 19th Academic Symposium Essay Collection of the 2018 Annual Meeting of the Chinese Society of Livestock and Veterinary Medicine, 2018.
- [26] 朱春红,章双杰,陶志云,等. 禽舍内氨气产生、危害及其有效减排措施[J]. 家畜生态学报, 2019(6): 72-77. ZHU C H, ZHANG S J, TAO Z Y, et al. The production and hazard of ammonia in poultry house and its effective measures of emission reduction[J]. *Acta Ecologica Animalis Domastici*, 2019(6): 72-77.
- [27] 王文林,吴根义,刘波,等. 畜禽养殖氨排放核算技术方法研究[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2020. WANG W L, WU G Y, LIU B, et al. Study on accounting method of ammonia emissions from livestock and poultry breeding[M]. Beijing: China Environment Press, 2020.
- [28] LOW A G. Role of dietary fibre in pig diets[J]. *Recent Advances in Animal Nutrition*, 1985: 87-112.
- [29] WEBB J, BROOMFIELD V M, JONES S, et al. Ammonia and odour emissions from UK pig farms and nitrogen leaching from outdoor pig production. A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470/471(1): 865-875.
- [30] 王建彬,田林春,王倩倩,等. 谈利用营养调控减少猪粪尿中氮、磷对环境的污染[J]. 猪业科学, 2009, 26(2): 62-64. WANG J B, TIAN L C, WANG Q Q, et al. Talk about using nutrition regulation to reduce the pollution of nitrogen and phosphorus to the environment in pig dung urine[J]. *Swine Industry Science*, 2009, 26(2): 62-64.
- [31] 周忠凯,杨殿林,张海芳,等. 冬季侧窗通风猪舍氨气和温室气体排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 205-213. ZHOU Z K, YANG D L, ZHANG H F, et al. Ammonia and greenhouse gas emissions from enclosed pig house with side-vent ventilation in winter season[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 205-213.
- [32] AARNINK A, BERG A, KEEN A, et al. Effect of slatted floor area on ammonia emission and on the excretory and lying behaviour of growing pigs[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1996, 64(4): 299-310.
- [33] HARTUNG J, PHILLIPS V R. Control of gaseous emissions from livestock buildings and manure stores[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1994, 57(3): 173-189.
- [34] PHILIPPE F X, CABARAUX J F, NICKS B. Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques[J]. *Agriculture Ecosystems*, 2011, 141(3): 245-260.
- [35] 王树春. 舍内氨气对肉鸡的影响及有效控制措施[J]. 养殖技术顾问, 2018(4): 22. WANG S C. The effect of shen ammonia on broilers and effective control measures[J]. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2018(4): 22.
- [36] 刘波,刘筱,韩宇捷,等. 规模化养猪场典型沼气工程各排放节点氨排放特征研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 179-185. LIU B, LIU X, HAN Y J, et al. Study on emission characteristics of ammonia from anaerobic digesters in industrial pig farm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(23): 179-185.
- [37] 畜禽粪污资源化处理典型模式[J]. 农村工作通讯, 2017(15): 36-39. Typical model of resource treatment of animal and poultry manure[J]. *Newsletter About Work in Rural Areas*, 2017(15): 36-39.
- [38] 王慧杰,杨向科,刘党标. 微生态调节剂对猪粪堆肥过程中微生物生理群的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(2): 109-113. WANG H J, YANG X K, LIU D B. Changes in microbial physiological group diversity between pig manure composting with microorganism inoculants and without microorganism inoculants[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(2): 109-113.
- [39] 李晨艳,乔玮,严新荣. 养殖场粪污还田模式下氨减排技术比选[J]. 四川环境, 2017, 36(4): 55-61. LI C Y, QIAO W, YAN X R, et al. Comparison of ammonia reducing technologies under livestock manure returning pattern[J]. *Sichuan Environment*, 2017, 36(4): 55-61.
- [40] 刘建伟,栾昕荣. 规模化养殖场氨排放控制技术研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 52(10): 49-55. LIU J W, LUAN X R. Advances of ammonia emissions control technology in large-scale farms[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2016, 52(10): 49-55.
- [41] 乔燕,王成磊,马书贞,等. 我国畜禽养殖污染防治管理措施分析[J]. 甘肃畜牧兽医, 2016, 46(6): 21. QIAO Y, WANG C L, MA S Z, et al. Analysis of the management measures for the prevention and control of pollution in livestock and poultry breeding in China[J]. *Gansu Animal and Veterinary Sciences*, 2016, 46(6): 21.
- [42] 张增杰,张双,韩玉花,等. 农业源氨排放控制对策初步研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(1): 439-442. ZHANG Z J, ZHANG S, HAN Y H, et al. A preliminary study on the countermeasures for ammonia emission control from agricultural sources[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(1): 439-442.
- [43] 农业农村部关于加快畜牧业机械化发展的意见[EB/OL]. (2020-02-17) [2021-08-10]. http://www.njhs.moa.gov.cn/tzggjzcjd/202002/t20200217_6337230.htm. Opinions of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on accelerating the mechanized development of animal husbandry[EB/OL]. (2020-02-17) [2021-08-10]. http://www.njhs.moa.gov.cn/tzggjzcjd/202002/t20200217_6337230.htm.
- [44] 畜禽养殖业污染防治技术政策[EB/OL]. (2010-12-30) [2021-08-10]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2011/content_1858099.htm. Technical policy on pollution prevention and control in livestock and poultry aquaculture[EB/OL]. (2010-12-30) [2021-08-10]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2011/content_1858099.htm.
- [45] 国务院关于印发全国农业现代化规划(2016—2020年)的通知[EB/OL]. (2016-10-17) [2021-08-10]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-10/20/content_5122217.htm. Notice of the State Council on the issuance of the national agricultural modernization plan (2016—2020)[EB/OL]. (2016-10-17) [2021-08-10]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-10/20/content_5122217.htm.
- [46] 全国农业可持续发展规划(2015—2030年)[EB/OL]. (2015-09-14) [2021-08-10]. http://www.moa.gov.cn/tztl/mywrfz/gzgh/201509/t20150914_4827900.htm. National plan for sustainable agricultural

- al development (2015—2030) [EB/OL]. (2015-09-14) [2021-08-10]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/mywrfz/gzgh/201509/t20150914_4827900.htm.
- [47] 畜禽规模养殖场粪污资源化利用设施建设规范(试行)[EB/OL]. (2018-01-11)[2021-08-10]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201801/t20180111_6134801.htm. Livestock and poultry scale farm manure resource utilization facility construction norms (trial) [EB/OL]. (2018-01-11)[2021-08-10]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201801/t20180111_6134801.htm.
- [48] 畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020年)[EB/OL]. (2017-07-07)[2021-08-10]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dbq/201801/t20180103_6134011.htm. Action programme for the resource utilization of livestock and poultry dung (2017—2020) [EB/OL]. (2017-07-07)[2021-08-10]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dbq/201801/t20180103_6134011.htm.
- [49] 全国农村沼气发展“十三五”规划[EB/OL]. (2017-01-11)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-02/11/content_5167177.htm. National rural biogas development "13th Five-Year Plan" [EB/OL]. (2017-01-11)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-02/11/content_5167177.htm.
- [50] 关于打好农业面源污染防治攻坚战的实施意见[EB/OL]. (2015-09-14)[2021-08-10]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/mywrfz/gzgh/201509/t20150914_4827678.htm. Opinions on the implementation of the fight against pollution from agricultural sources [EB/OL]. (2015-09-14)[2021-08-10]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/mywrfz/gzgh/201509/t20150914_4827678.htm.
- [51] 畜禽养殖废弃物资源化利用2019年工作要点[EB/OL]. (2019-04-11)[2021-08-10]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/2019gzzd/sjgzyd/201905/t20190506_6288399.htm. Key points of work for the resource utilization of livestock and poultry breeding waste in 2019 [EB/OL]. (2019-04-11)[2021-08-10]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/2019gzzd/sjgzyd/201905/t20190506_6288399.htm.
- [52] 饲料中玉米豆粕减量替代工作方案[EB/OL]. (2021-03-18)[2021-08-10]. <http://www.cvonet.com/breed/detail/470170.html>. Alternative work programme for corn bean meal reduction in feed [EB/OL]. (2021-03-18)[2021-8-10]. <http://www.cvonet.com/breed/detail/470170.html>.
- [53] 农业绿色发展技术导则(2018—2030年)[EB/OL]. (2018-07-02)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5350058.htm. Guidelines for green development technologies in agriculture (2018—2030) [EB/OL]. (2018-07-02)[2021-08-10]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_5350058.htm.
- [54] 开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案[EB/OL]. (2017-02-08)[2021-08-10]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/derq/201712/t20171227_6130977.htm. Carrying out the action plan for organic fertilizer replacement fertilizer of fruit tea [EB/OL]. (2017-02-08)[2021-08-10]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/derq/201712/t20171227_6130977.htm.
- [55] 农业部关于加快推进畜禽标准化规模养殖的意见[EB/OL]. (2010-04-20)[2021-08-10]. <http://www.moa.gov.cn/was5/web/search>. Opinions of the Ministry of Agriculture on accelerating the standardization of livestock and poultry-scale farming [EB/OL]. (2010-04-20)[2021-08-10]. <http://www.moa.gov.cn/was5/web/search>.
- [56] 林昌源. 规模化养猪场粪污处理新技术: 密闭式堆肥反应器[J]. 中国畜牧业, 2014(17): 53-54. LIN C Y. Large-scale pig farm manure treatment technology—closed compost reactor [J]. *China Animal Industry*, 2014(17): 53-54.
- [57] 林昌源, 金元淑. COMPO 密闭式反应器在猪场粪污堆肥处理中的应用[J]. 猪业观察, 2015(1): 77-81. LIN C Y, JIN Y S. The application of COMPO closed reactor in the composting of pig farm manure [J]. *Journal of Rural Animal-Production Technology*, 2015(1): 77-81.
- [58] 谭莎莎. 好氧堆肥反应器的设计及鸡粪堆肥过程中细菌群落多样性分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2017. TAN S S. Design of an aerobic compost reactor and the analysis of bacterial community diversity in chicken manure compost [D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.
- [59] 王健, 麻小凤. 规模化羊场粪污资源化利用好氧生物发酵处理技术[J]. 畜牧兽医杂志, 2018, 37(4): 84-85. WANG J, MA X F. Biological fermentation technology and waste utilization of large-scale sheep farms [J]. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2018, 37(4): 84-85.
- [60] HUIJSMANS J, HOL J, HENDRIKS M. Effect of application technique, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to grassland [J]. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 2001, 49(4): 323-342.
- [61] HUIJSMANS J, HOL J, HENDRIKS M. Effect of application method, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to arable land [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(26): 3669-3680.
- [62] 常志州, 靳红梅, 黄红英, 等. 畜禽养殖场粪便清扫、堆积及处理单元氮损失率研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 1068-1077. CHANG Z Z, JIN H M, HUANG H Y, 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.