

朱志平, 董红敏, 魏 莎, 等. 中国畜禽粪便管理变化对温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 743–748.

ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, WEI Sha, et al. Impact of changes in livestock manure management on greenhouse gas emissions in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 743–748.



开放科学 OSID

中国畜禽粪便管理变化对温室气体排放的影响

朱志平^{1,2}, 董红敏^{1,2}, 魏 莎^{1,2}, 马金智^{1,2}, 薛鹏英^{1,2}

(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. 农业农村部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 畜禽粪便是重要的温室气体排放源, 不同粪便管理方式对温室气体排放的影响差异显著, 科学分析我国畜禽粪便管理温室气体排放变化及其影响因素, 对提高畜禽粪便管理和推进畜禽粪污资源化利用, 实现畜禽低碳养殖具有重要意义。本文分析了我国国家信息通报中报告的 1994—2014 年畜禽粪便管理温室气体排放变化, 结果表明: 我国畜禽粪便管理温室气体排放量占农业源温室排放总量的比例逐步提高, 2014 年占比达到 17.7%。基于第一次和第二次污染源普查相关数据, 分析结果表明目前我国畜禽规模养殖场清粪方式以干清粪为主, 粪便管理以固体粪便贮存、液体粪便贮存和厌氧发酵后沼液还田为主; 比较分析了不同清粪工艺和粪便管理方式变化对温室气体排放的影响, 提出了通过源头减量-过程控制-末端利用的全链条技术创新建议, 以期促进我国畜禽低碳养殖和绿色发展。

关键词: 畜禽养殖; 干清粪; 好氧堆肥; 厌氧发酵; 温室气体

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)04-0743-06 doi:10.11654/jaes.2020-0095

Impact of changes in livestock manure management on greenhouse gas emissions in China

ZHU Zhi-ping^{1,2}, DONG Hong-min^{1,2}, WEI Sha^{1,2}, MA Jin-zhi^{1,2}, XUE Peng-ying^{1,2}

(1. Institute of Environmental and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Facility Agricultural Energy Conservation and Waste Management, The Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract: Livestock manure is an important source of greenhouse gas emissions. Different manure management methods have a significant impact on greenhouse gas emissions. Scientific analysis changes in greenhouse gas emissions and their influence of manure management will improve manure management methods, promote manure recycling use, and achieve low-carbon animal husbandry in China. This article analyzed the changes in greenhouse gas emissions from livestock manure management sector of China national communications report from 1994 to 2014. The result showed that the proportion of greenhouse gas emissions from this sector in China had gradually increased from agricultural sources, and the proportion reached 17.7% in 2014. Based on the data from the first and the second China pollution source censuses, the result showed that the main manure collection method was solid manure collection and the manure was mainly applied to field after solid storage, liquid storage and anaerobic digester. This study also compared and analyzed the impact of different manure collection processes and changes in manure management methods on greenhouse gases emissions, and proposed a full-chain technology innovation proposal through source reduction-process control-end use way, to promote animal husbandry low-carbon and green development.

Keywords: livestock breeding; solid manure collection; aerobic compost; anaerobic digester; greenhouse gas

收稿日期: 2020-01-23 录用日期: 2020-03-18

作者简介: 朱志平(1978—), 男, 安徽安庆人, 博士, 研究员, 主要从事畜禽废弃物处理与气体减排研究。E-mail: zhuzhiping@caas.cn

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFC0213303); 中国农业科学院科技创新工程项目

Project supported: The National Key R&D Program of China(2018YFC0213303); The Innovation Program of CAAS

随着我国经济的快速发展,畜牧业也发展迅速,尤其是畜禽规模养殖水平增长迅速,以生猪养殖为例,年出栏头数大于50头的规模化比例从1998年的23.3%增加到2017年的75.4%^[1]。但由于小农户种植与规模化养殖脱节,畜禽规模养殖所产生的粪便、污水量持续增加以及不合理的处理利用已成为农业面源污染的主要来源。推进畜禽粪污资源化利用,是贯彻落实党的十九大重要战略部署,是践行“绿水青山就是金山银山”理念的重要举措,也是破解农业农村突出环境问题、实施乡村振兴战略、建设生态文明国家的战略选择^[1]。畜牧业也是农业源温室气体排放的重要来源,Havlik等^[2]的研究表明,全球畜牧业产生的CH₄和N₂O占农业非CO₂温室气体排放量的80%,占全球人为温室气体排放总量的12%;畜禽粪污的不当处置也会造成大量的温室气体排放,其排放量占农业源排放总量的10%左右^[3]。中国政府提交的《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》中也明确提出,应推进农业低碳发展,推动秸秆综合利用、农林废弃物资源化利用和畜禽粪便综合利用。掌握我国畜禽粪便管理过程中的温室气体排放特征,明确畜禽粪便管理过程中的温室气体排放贡献,对控制温室气体排放、减缓和适应全球气候变化具有重要作用。

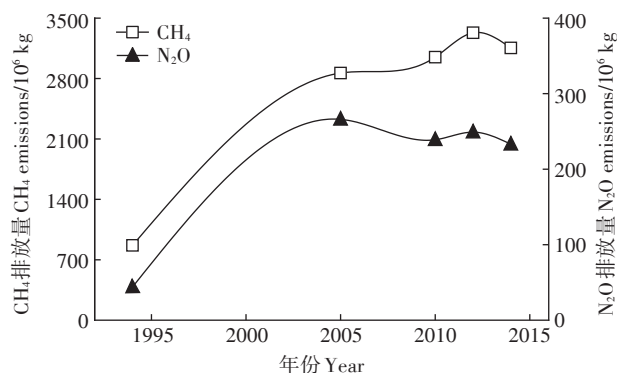
目前,国内外学者已对畜禽粪便管理过程中的温室气体排放进行了大量研究,基本阐明了畜禽养殖管理与温室气体排放之间的关系^[4-9],但现有研究多基于单点研究和文献数据的挖掘分析;并且对养殖方式和粪便管理方式变化影响的分析不够深入,在指导中国测算畜禽粪便管理中的温室气体排放量和采取相应的减排对策方面的研究还存在较大的不确定性。国务院先后于2007、2017年组织开展了第一次、第二次全国污染源普查。畜禽养殖业作为主要排放源之一,两次都被纳入普查范围,通过普查获得了大量畜禽养殖企业生产和管理的数据。为此,本文基于两次污染源普查畜禽养殖业有关普查监测数据,并结合国内外现有的实证研究进展,综合分析了我国家畜禽规模养殖粪便管理方式的变化特征及其对温室气体排放的影响,以期为我国畜禽粪污资源化利用和温室气体协同减排技术创新和应用提供政策建议。

1 中国畜禽粪便管理中的温室气体排放状况

畜禽粪便中含有大量的有机物、氮和水,它们是导致畜禽粪便中的CH₄和N₂O排放的3个基本要素^[6],其中CH₄主要来自畜禽粪便中有机物在贮存和处理

过程中厌氧环境下的产生和排放,而N₂O主要来自粪便中氮在硝化或反硝化过程中的产生和排放^[10],这2种温室气体排在畜禽粪便管理过程中不可避免,但排放量的多少与多种因素有关。为科学测算中国畜牧业温室气体的排放情况,我国分别于1994、2005、2010、2012年和2014年核算编写了5次国家温室气体排放清单并提交联合国气候变化框架公约秘书处,这5次清单均包括了畜禽粪便管理过程中的CH₄和N₂O排放(图1)。从图1可以看出,CH₄排放呈逐步增加的趋势,从1994年的86.7万t增加到2014年的315.5万t,排放量增加了2.64倍;而N₂O排放量则是2005年最高,达到26.6万t,是1994年排放量的6.05倍,但最近3次报告年度(2010、2012年和2014年),N₂O排放量均有一定程度降低,维持在23.0万~25.0万t之间。但畜禽粪便管理温室气体排放占农业源排放比例却呈现了显著增加的趋势,从1994年的5.3%逐渐增加到2014年的17.7%,表明我国畜禽粪便已经成为农业领域重要的温室气体排放源。基于《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)中动物换算关系,将其他畜禽折算成猪单位,将各清单年份粪便管理温室气体排放量除以换算成猪单位的饲养量,计算得到单位动物排放强度,结果表明:1994年单位动物粪便管理CH₄和N₂O排放强度分别为14.4 kg CO₂e和10.8 kg CO₂e,不同年度的粪便管理温室气体排放强度呈现逐年上升的趋势;2014年单位动物粪便管理CH₄和N₂O排放强度分别为57.5 kg CO₂e和62.7 kg CO₂e,是1994年的4.0倍和5.8倍。

畜禽粪便管理过程中的温室气体排放不仅与动物养殖量变化有关,还与养殖方式、清粪工艺以及粪



数据来源:《中国气候变化初始、第二次和第三次国家信息通报》和《中华人民共和国气候变化第一次、第二次两年更新报告》

图1 中国5次畜禽粪便管理温室气体排放清单
Figure 1 Five greenhouse gas inventories for manure management in China

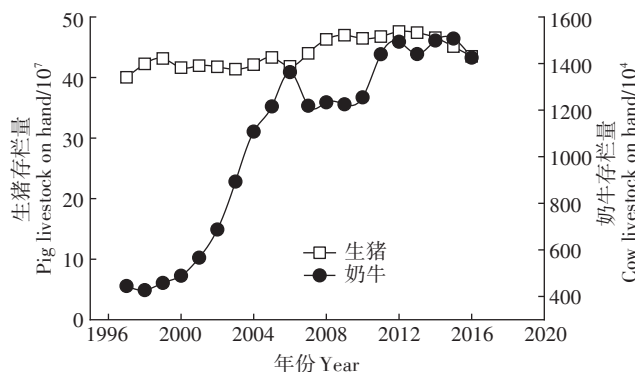
便贮存和处理工艺等密切相关。Aguirre-villegas等^[9]对美国奶牛粪便管理过程中的温室气体进行了系统评估,发现粪便系统和管理实践随农场规模的不同而存在很大差异,规模化奶牛场80%的粪便以液体形式贮存和处理,而规模以下的奶牛户70%都是固体方式贮存和处理,中国目前不同规模的养殖场处理利用方式也存在类似情形。我国一直是生猪养殖大国,年出栏的生猪量占全球总量的50%左右,且近20年来生猪存栏量呈现小幅增加趋势(图2),但规模化比重显著增加,年出栏500头的规模化养殖场比例从1998年的8%增加到2017年的47%^[1]。与生猪养殖量缓慢增加相比,近20年,我国奶牛养殖量呈现了快速增加的趋势,2017年的存栏量是1994年的2.8倍,同时规模化比重也快速增加,存栏100头以上的规模化奶牛场占比从2002年的不足12%增加到2017年的51%。从整体上看,单位动物粪便管理温室气体排放强度逐年增加与规模化水平提高的趋势基本一致,说明我国畜禽粪便管理温室气体排放量增加主要来自畜禽规模化养殖比例的不断提高,畜禽粪便从以固体贮存处理为主逐步转向以液体贮存和处理为主。

2 清粪方式变化及其对温室气体排放的影响

我国畜禽粪便的收集方式主要有干清粪(包括人工干清粪和机械干清粪)、垫草垫料、高床养殖、水冲清粪和水泡粪等,其中前3种清粪方式产生的粪污以固体为主,而后2种清粪方式产生的粪污全部为液体粪污。通过比较2007年和2017年开展的污染源普查所获得的全国主要畜禽的清粪方式占比情况(图3),发现2017年猪规模场干清粪比例显著提高,干清粪

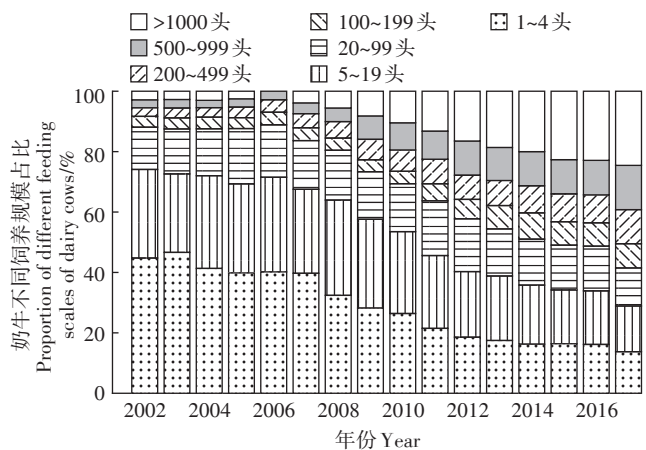
比例增加了25.7%,用水量和污水产生量大的水冲清粪比例显著降低,降幅达到33.8%。2017年调查发现,猪场采用水泡粪的比例达到8.1%,虽然水泡粪自动化程度高、劳动强度低,是欧美等发达国家规模化养殖场主要方式,但由于其在畜舍地下的粪坑贮存时间长,将会导致较高的CH₄排放;在北美和西欧某些区域,尽管奶牛养殖总量在下降,但由于液体粪便管理方式比例的增加,导致粪便管理过程中温室气体排放总量呈现增加的趋势^[11]。近10年来,我国奶牛等畜禽的干清粪占比也得到了一定程度的增加,与2007年相比,2017年奶牛等畜禽干清粪方式提高了2.5%~10.7%,同样可减少畜禽在后续粪便管理过程中的温室气体排放。与欧美国家相比,我国规模养殖场粪便干清粪比例明显更高,Gerber等^[12]的研究显示,美国奶牛场的固体粪便和液体粪便处理占比分别为31%和36%,西欧的比例也分别只有36%和38%,而我国奶牛场干清粪比例超过90%,这从源头上减少了温室气体排放。

畜禽舍清粪方式决定畜禽粪污以何种形式进行后续的贮存和处理,通过干清粪和固体液体分离改变清粪方式,不仅可以减少污水产生量,而且可以提高粪便收集率,减少了进入厌氧环境的有机物总量,从而减少CH₄排放^[4]。有研究表明,人工干清粪的粪便收集率可达到60%^[13],但传统的人工干清粪劳动强度大,工作环境差,随着规模化水平的不断提高,人工干清粪逐渐被机械干清粪、水冲清粪和水泡粪等工艺所替代。水冲粪-固液系统因其故障少、效率高、利于



(a) 中国生猪和奶牛存栏量变化

China pig and dairy cow population variation



(b) 不同规模奶牛占比变化情况

The proportion variation of different sizes dairy cows

数据来源:1994—2013年《中国畜牧业年鉴》,2014—2018年《中国畜牧兽医年鉴》

图2 1994—2017年中国生猪和奶牛养殖量及规模变化情况

Figure 2 Changes in the population and scale of pigs and dairy cows in China from 1994 to 2017

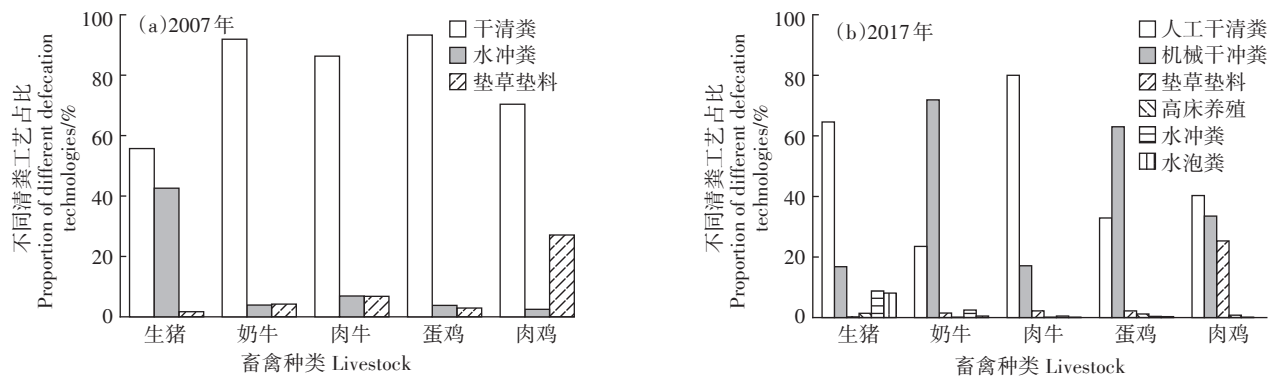


图3 2007年和2017年主要畜禽清粪方式占比情况

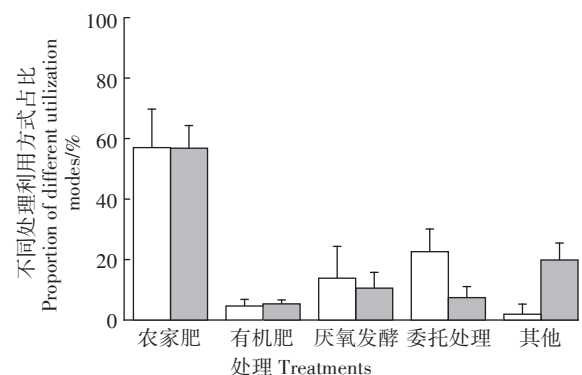
Figure 3 Percentage of livestock and poultry manure collection methods in 2007 and 2017

舍内卫生等优点曾被广泛应用于规模化奶牛场,但此系统产生的粪渣和粪水在贮存过程中会释放出大量的温室气体,加剧全球温室效应。 CH_4 是在厌氧条件下产生的,水泡粪或水冲清粪形成的液态粪便会形成厌氧环境,从而增加 CH_4 的产生量^[14]。同时,水冲清粪和水泡粪的方式,不仅会增加养殖场用水量,而且会增加粪污的产生量,使其更加难以处理和利用。干清粪的方式,不仅能够减少粪污排放量,节约用水,而且采用合理的粪便管理方式还会减少 CH_4 的排放量。在我国畜禽养殖过程中,干清粪、水泡粪、水冲粪3种清粪方式都在应用,近年来为了减少畜禽养殖过程污水,高床养殖和发酵床也在探索和实践,有研究表明,发酵床养殖的温室气体排放较传统养殖舍内温室气体排放少26.3%^[15]。基于干清粪在环保方面的优势,近年国内关于推进畜禽粪污资源化利用的文件规范也基本主推干清粪工艺在养殖业的应用,这不仅可以减少液体粪污产生量,也可有效减少温室气体的排放。

3 粪便处理利用方式变化及其对温室气体排放的影响

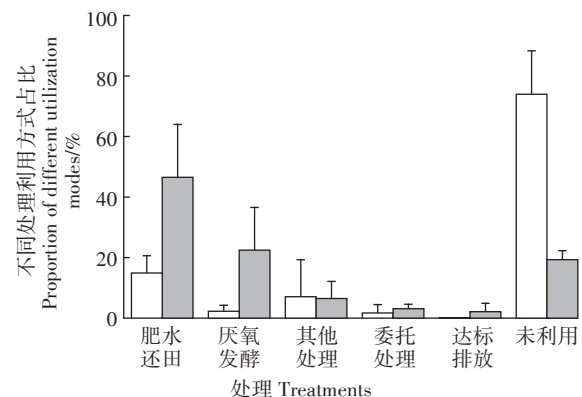
规模化养殖场选择合理的处理利用方式,不仅可以实现畜禽粪污的资源化利用,最大程度地减少环境污染,同时也可以有效减少温室气体排放。基于2007年和2017年2次污染源普查的规模化猪场固体粪便和污水处理利用方式占比数据,本文进行了比较分析(图4),发现在固体粪便处理利用上,近年还是以简单堆沤肥后进行还田利用为主,占比达到一半以上;规模化猪场对固体粪便进行好氧堆肥处理生产商品有机肥的比例也只有5%左右。但近年出现了一些其他利用方式,如发酵床处理^[16-17]、黑水虻养殖^[18]

等。在污水处理利用方面,随着国家环保政策越来越严,污水进行处理与资源化利用的比例显著提高,尤其污水肥水还田和污水厌氧发酵生产沼气的比例得到显著提升,2种利用方式比例之和较2007年增加了50%以上;而污水未利用占比明显降低,从74%下降到19.3%;但目前还有一定比例的畜禽养殖污水没有



(a) 固体粪便处理利用方式占比

Proportion of solid manure treatment method



(b) 液体粪污处理利用方式占比

Proportion of liquid manure treatment method

□ 2007年 ■ 2017年

图4 2007年和2017年生猪规模养殖粪污处理利用方式占比

Figure 4 Percentage of manure treatment and utilization for intensive pig farms in 2007 and 2017

得到有效处理与利用,对水体和大气环境仍存在一定的污染。

针对我国目前畜禽粪便的主要处理利用方式,通过适当的管理也可以同步减少温室气体排放。在固体粪便贮存方面,通过合理的管理可以有效减少贮存过程中温室气体排放,雷鸣等^[19]研究了在猪粪贮存过程中,添加黄土、秸秆、生物炭和膨润土对温室气体排放的影响,结果表明,与不添加任何添加物对照相比,添加10%用量的生物炭和膨润土处理下猪粪的CO₂累积排放量分别降低了15.4%和20.9%,N₂O累积排放量分别降低了19.8%和37.6%。对堆体进行压实和表层覆盖也可有效降低固体粪便贮存过程中的N₂O和NH₃排放^[20-21],但固体贮存过程中增加堆体高度^[22],会增加温室气体排放。在好氧堆肥过程中通过翻堆和强制通风,不仅加快粪肥的发酵速度,同时也可减少CH₄和N₂O的排放,通过辅料添加可有效控制温室气体排放。研究发现,猪粪堆肥过程中的气体排放CH₄损失占初始总碳的4.3%,N₂O损失占初始总氮的0.72%,通过添加生物炭可以同步降低CH₄和N₂O的排放,降低幅度分别达到19.0%和37.5%^[7]。在污水处理方面,好氧达标处理过程中虽然可以减少CH₄排放,但同时好氧过程发生的硝化和反硝化过程,加速了氮的形态转化,研究表明污水好氧处理过程中,污水中19%的氮转化成N₂O排放^[23];但如果畜禽粪污进行厌氧发酵收集沼气并进行资源化利用,则能有效减少温室气体排放^[2,4]。合理设计畜舍结构、应用干清粪工艺、粪便管理采用固液分离,液体部分进行厌氧沼气,固体部分进行好氧堆肥,因地制宜地提高粪肥施用频率、缩短液体粪肥贮存时间等,是减少温室气体排放的最有效手段,可实现畜禽粪污资源化利用和温室气体减排协同。

4 结论与建议

4.1 结论

本文分析了我国国家信息通报中报告的1994—2014年畜禽粪便管理温室气体排放量变化,结果表明:我国畜禽粪便管理温室气体排放量占农业源温室气体排放总量的比例逐步提高,2014年占比达到17.7%;单位动物的粪便管理温室气体排放强度呈现增加的趋势,2014年单位动物粪便管理CH₄和N₂O排放强度分别为57.5 kg CO₂e和62.7 kg CO₂e,是1994年的4.0倍和5.8倍;规模化水平提高和养殖场粪便管理方式改变是导致粪便管理温室气体排放增加的主要原因。

4.2 建议

2017年6月,国务院办公厅印发了《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》,提出了畜禽粪污要以沼气和生物天然气为主要处理方向,以就地就近用于农村能源和农用有机肥为主要使用方向。畜禽粪污进行沼气和有机肥生产,不仅可以实现畜禽粪污的资源化和升值化利用,同时也可以最大程度地降低畜禽粪便管理过程中的温室气体排放。但我国畜禽养殖由于区域、养殖规模、经济发展水平存在较大差异,畜禽粪污处理利用方式还比较粗放,应加强创新技术的研发与应用,通过源头减量-过程控制-末端利用的全链条技术研发与应用,实现低碳养殖和畜牧业绿色发展。首先,加大对畜禽干清粪工艺技术的研发,重点研发粪尿自动分离的新型畜舍、配套的刮粪设施、粪便和尿液输送设施,最大限度地减少污水产生量,从源头减少畜禽粪便在畜舍贮存过程中的温室气体排放;其次,开展厌氧发酵创新工艺研究,提高厌氧发酵产气效率,研发沼气提纯和发电技术等,实现沼气的能源化利用;研发密闭式快速好氧堆肥技术等,减少堆肥过程中的温室气体排放;最后,根据中国不同区域的农田类型,研发轻简化的固体和液体粪肥还田利用设施,实现粪肥方便快捷还田,缩短粪肥贮存时间,进一步降低温室气体排放;为畜禽粪污减量化、能源化和肥料化利用和温室气体协同控制提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 董红敏,左玲玲,魏莎,等.建立畜禽废弃物养分管理制度促进种养结合绿色发展[J].中国科学院院刊,2019,34(2):180-189.
DONG Hong-min, ZUO Ling-ling, WEI Sha, et al. Establish manure nutrient management plan to promote green development of integrated crop-livestock production system[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(2): 180-189.
- [2] Havlík P, Valin H, Herrero M, et al. Climate change mitigation through livestock system transitions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(10): 3709-3714.
- [3] Mara F P O. The significance of livestock as a contributor to global greenhouse gas emissions today and in the near future[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 166/167: 7-15.
- [4] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,等.中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J].农业工程学报,2008,24(10):269-273.
DONG Hong-min, LI Yu-e, TAO Xiu-ping, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(10): 269-273.
- [5] Luo Y M, Li G X, Luo W H. Effect of phosphogypsum and dicyandiamide as additives on NH₃, N₂O and CH₄ emissions during composting

- [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(7):1338-1345.
- [6] Dave C, Sven S R, Thorman D, et al. Manure management: Implications for greenhouse gas emissions[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2011, 166/167:514-531.
- [7] Yang Y J, Mukesh K A, Wei D, et al. Compost supplementation with nitrogen loss and greenhouse gas emissions during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297(122435):1-7.
- [8] Chris P, Matthew R, Jaye H, et al. Does manure management affect the latent greenhouse gas emitting potential of livestock manures?[J]. *Waste Management*, 2015, 46:568-576.
- [9] Aguirre-Villegas H A, Larson R A. Evaluating greenhouse gas emissions from dairy manure management practices using survey data and lifecycle tools[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 143:169-179.
- [10] 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 Yu-bo, XING Xiao-xu, BAI Zhao-hai, et al. Research progress of ammonia volatilization and emission reduction technology in agriculture and animal husbandry system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3):566-580.
- [11] Wightman J L, Woodbury P B. New York dairy manure management greenhouse gas emissions and mitigation costs(1992-2022)[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45:266-275.
- [12] Gerber P, Vellinga T, Opio C, et al. Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems[J]. *Livestock Science*, 2011, 139:100-108.
- [13] 朱志平, 董红敏, 尚 斌, 等. 规模化猪场固体粪便收集系数与成分测定[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(增刊2):179-182.
- ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, SHANG Bin, et al. Measurement of solid manure collection coefficient and composition on a concentrated pig farm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(Suppl 2):179-182.
- [14] 崔利利. 规模化奶牛场水冲粪——固液分离系统温室气体和氨排放特点研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
- CUI Li-li. Study on greenhouse gas and ammonia emission characteristics of water flushing fecal solid-liquid separation system of large: Scale dairy farm[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [15] 郭海宁, 李建辉, 马 晗, 等. 不同养猪模式的温室气体排放研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(12):2457-2462.
- GUO Hai-ning, LI Jian-hui, MA Han, et al. Greenhouse gas emissions in different pig raising modes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12):2457-2462.
- [16] 魏思雨, 李建辉, 刘姝彤, 等. 猪舍不同发酵床垫料温室气体排放研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(10):1991-1996.
- WEI Si-yu, LI Jian-hui, LIU Shu-tong, et al. Greenhouse gas emissions from bio-bed pig raising units with different bedding materials[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(10):1991-1996.
- [17] 陈倩倩, 刘 波, 朱育菁, 等. 微生物发酵床不同深度垫料的细菌群落多样性[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(10):2412-2419.
- CHEN Qian-qian, LIU Bo, ZHU Yu-jing, et al. Bacterial community diversity of litters at different depths in microbial fermentation bed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(10):2412-2419.
- [18] Mazza L, Xiao X P, Rehman K, et al. Management of chicken manure using black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae assisted by companion bacteria[J]. *Waste Management*, 2020, 102:312-318.
- [19] 雷 鸣, 程于真, 苗 娜, 等. 黄土及其他添加物对猪粪贮存过程氨气和温室气体排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, 28(3):1-9.
- LEI Ming, CHENG Yu-zhen, MIAO Na, et al. Effects of mixing loess and other additives with pig manure on ammonia and greenhouse gas emissions during storage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 28(3):1-9.
- [20] Chadwick D R. Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from cattle manure heaps: Effect of compaction and covering[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 39(4):787-799.
- [21] 朱海生, 董红敏, 栾冬梅, 等. 贮存高度和锯末覆盖厚度对猪粪NH₃和温室气体排放量及其增温潜势的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(4):937-943.
- ZHU Hai-sheng, DONG Hong-min, LUAN Dong-mei, et al. The effects of stack height and sawdust covering depth on ammonia and greenhouse gas emissions from manure and global warming potential[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4):937-943.
- [22] 崔利利, 王效琴, 梁东丽, 等. 不同堆高奶牛粪便长期堆积过程中温室气体和氨排放特点[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(2):376-382.
- CUI Li-li, WANG Xiao-qin, LIANG dong-li, et al. Greenhouse gas and ammonia emissions from different piling heights in long-term stacks of dairy manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2):376-382.
- [23] Burton C H, Sneath R W, Farrent J W. Emissions of nitrogen oxide gases during aerobic treatment of animal slurries[J]. *Bioresource Technology*, 1993, 45:233-235.