

畜禽粪便管理系统中甲烷的产排特征及减排对策*

陈瑞蕊^{1,2} 王—明^{1,2} 胡君利^{1,2} 林先贵^{1,2†}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院南京土壤研究所, 香港浸会大学土壤与环境联合开放实验室, 南京 210008)

摘要 畜禽粪便厌氧发酵过程中产生的甲烷(CH₄)是大气 CH₄的重要人为源,其排放量会随着畜禽养殖规模的不断扩大而持续增加。为了更好地实现畜禽粪便的资源化利用,同时减少粪源 CH₄排放,迫切需要立足于畜禽粪便管理系统,研究不同粪便管理模式下的 CH₄产排特征,在此基础上有效地实现减排。鉴于此,本文介绍了粪便管理系统的组成;阐明了粪便管理系统中 CH₄的产生和影响排放的因素,常见管理系统中 CH₄排放量的计算方法;阐述了国内外关于畜禽粪便管理系统 CH₄排放的研究进展;并基于我国畜禽粪便管理现状提出了针对养殖规模优化粪便管理模式,针对管理模式提升管理技术的甲烷减排对策。

关键词 甲烷(CH₄); 畜禽粪便; 管理系统; 堆肥; 沼气

中图分类号 X511 **文献标识码** A

进入工业时代以来,人类活动大大加速了温室气体向大气的释放,甲烷(CH₄)浓度已从工业时代前的 700 ppb 上升至目前的 1 700 ppb。根据估算,甲烷的全球增温潜势约为 CO₂的 25 倍(以 100 年计),对全球变暖的综合贡献率达 15%,目前被认为是仅次于 CO₂的第二大温室气体^[1]。由于大气中 CH₄浓度的持续增长会对全球气候产生深远的影响,如何减少向大气中排放 CH₄日益受到世界各国的研究者乃至政府的积极关注^[2]。

研究发现,畜禽养殖业中动物粪便厌氧发酵过程产生的 CH₄是大气 CH₄的重要人为源,排放量会随着畜禽养殖规模的不断扩大而持续增加^[3],这一排放源占 CH₄人为排放源的比例也正不断攀升,已从 1990 年的 4.8% 上升至 2008 年的 7.9%^[4]。自 1978 年以来,我国的畜禽养殖业取得了持续快速发展,主要畜禽产品产量每年以 10% 左右的速度稳步增长^[5],但同时也带来了日益严重的排泄物污染问题。然而,我国关于畜禽粪便源的 CH₄排放研究还相当缺乏,作为国家温室气体排放清单不可或缺的一部分和重要的减排对象,研究畜禽粪便储存和应用过程中 CH₄的排放规律并正确估算其排放量,对于制订合理高效

的粪源减排措施具有十分重要的意义。

1 畜禽粪便管理系统

我国畜禽废弃物排放量呈持续增加态势,从 1999 年的 19 亿 t 增至 2002 年的 27.5 亿 t,目前全国 80% 的规模化养殖场产生的畜禽粪污未经任何处理就长期堆置或直接向环境排放,畜禽粪便产生的污染已成为我国农村地区面源污染的主要来源^[6]。为了更好地实现对大量畜禽粪便资源的合理利用,迫切需要构建科学的粪便管理体系,对粪便资源进行有效管理。

一般认为,从人工或机械方式清运粪便开始,进入粪便管理系统,包括对粪便的收集、运输、贮存、处理和利用等多个方面,其中根据粪便处理形式的不同划分为数十种粪便管理模式,常见的有 10 多种,具体如表 1 所述。可以看出,粪便的管理模式主要可分为固体管理和液体管理模式两种,两者的分界线大致在水分含量 80%^[8-9]。固体管理模式包括直接散施、固体堆放、好氧管理/氧化塘和堆肥等,由于含水量较低、通气条件较好,在管理过程中有机质多以好氧发酵为主,因而 CH₄的生成和排放相对较少;液体管理模式包括液体粪浆存储/堆沤、

* 中国科学院战略性先导科技专项—应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05020802, XDA05020800)、国家自然科学基金面上项目(41071168)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-409)联合资助

† 通讯作者, E-mail: xglin@issas.ac.cn

作者简介: 陈瑞蕊(1978—), 女, 江苏南京人, 博士, 主要从事土壤微生物生态及温室气体减排方面的研究。E-mail: rchen@issas.ac.cn

收稿日期: 2011-10-24; 收到修改稿日期: 2012-03-09

表 1 粪便管理系统中不同管理模式的定义及管理过程中 CH₄ 的排放Table 1 Definitions of management models in the manure management system and the CH₄ emission

管理模式 Manure management	定义 Definition	存储时间 Storage time	适用范围 Application scope	管理过程中 CH ₄ 的排放量 CH ₄ emissions
直接散施 Spread	粪便清出圈养设施后,不经处理直接施用于农田或草场	很短,一般少于 1 周,甚至少于 1 d	养殖户散养、农户的零星养殖等	由于存放时间很短,CH ₄ 排放很低
液体粪浆存储/ 储粪池/储粪池 Slurry storage/ Pit storage/Lagoon	粪便以固-液混合的粪浆形式储存在化粪池或储粪池中,为了便于处理有时会加入水	较长,一般数月至 1 a	中小规模养殖场、养殖小区等	由于处于厌氧状态,存储时间很长,CH ₄ 排放很高,且无盖的 CH ₄ 排放量高于有盖的
厌氧塘 Uncovered anaerobic tank	一种用来稳定和储存粪便的液体储存模式,无盖	较长,30 ~ 200 d	集约化养殖场、大规模养殖场	由于处于厌氧状态,存储时间很长,且无盖,CH ₄ 排放很高,可占整个养殖场排放量的 85%
厌氧发酵管理/ 沼气生产 Anaerobic digester/ Biogas production	收集液体或粪浆形式的粪便(有稻草或无稻草),在大型容器或有盖储粪池中进行无氧发酵,可生产沼气用作能源	较短,1 至数月	养殖专业户、中小规模养殖场、养殖小区等	由于厌氧发酵生成的 CH ₄ 可被利用成为燃料,CH ₄ 的排放很少
固体堆放 Solid storage	有辅垫或无辅垫的粪便不经处理,自由堆积或堆放在室外	较长,一般达数月	中小规模养殖场、养殖小区等	由于存放时间长,缺少通风,存在较高的 CH ₄ 排放
好氧管理/氧化塘 Aerobic treatment/ Oxidation pond	以液体或固-液混合形式收集的粪肥,在人工修建的池塘内,进行强制通风或自然通风,实现好氧微生物对有机物进行降解的过程	较长,一般达数月	中小规模养殖场、养殖小区等	在没有阳光或强制通风不足的情况下,这一模式通常变为缺氧环境,因而存在较高的 CH ₄ 排放
静态垛 式堆肥 Compost- Static pile	自然通风 条形堆中进行堆肥,自然通风,很少翻动 强制通风 堆肥中强制通风,但不进行搅拌 静态垛式	较长,一般达数月	集约化养殖场、大规模养殖场等,用于对粪便进行集中处理	存放时间较长,通风不足,存在较高 CH ₄ 排放
翻堆式条垛堆肥 Windrow compost subjected to turning	条形堆中进行堆肥,利用机械进行定期翻动进行搅拌和通风	较短,1 至数月	集约化养殖场、大规模养殖场等,用于对粪便进行集中处理	通风较好,CH ₄ 排放不高
槽式 堆肥 反应器 堆肥模式 Compost- In vessel	一般在密封的槽道中进行强制通风和连续搅拌,进行高温好氧发酵 一般在密封的反应仓中进行强制通风和连续搅拌,进行高温好氧发酵 在转筒式反应器中强制通风和连续搅拌,进行高温好氧发酵	较短,1 至数月 较短,数天至 1 月 较短,1 至数天	集约化养殖场、大规模养殖场等,用于对粪便进行集中处理	通风较好,CH ₄ 排放不高

注:根据文献[9-10] Note: Adapted from References[9-10]

厌氧塘、厌氧发酵管理等,由于含水量高,基本以厌氧发酵为主,因而在管理过程中的 CH₄ 产生潜力很大,往往导致很高的 CH₄ 排放。

粪便管理模式是整个管理系统中最重要的组成部分,既决定着资源化的经济效益,也决定了管理系统的环境效益。管理模式的选择既要考虑养

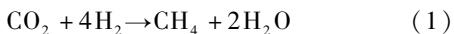
殖场规模、粪便产量与性质、占地位置与环境条件等上游因素,也要考虑设施建设和运行成本、生产产品的使用途径和销售渠道等下游因素。除此以外,高效的粪便管理系统还有赖于管理系统的良好运转,包括对各种基础数据的记录、各项管理措施的执行以及管理技术的不断改良等。

2 畜禽粪便管理系统中 CH₄的产生与排放

传统的家庭畜禽养殖,粪便可作为有机肥及时还田,一般不会产生严重的 CH₄排放(表 1);然而,随着养殖规模的增大,粪便管理模式会由固体/半固体方式向液态方式转变,对粪便贮存的需要也就越来越明显^[11]。但是,大量积压的畜禽粪便,尤其是液体粪便,在其自然分解的过程中会产生大量的 CH₄并释放进入大气,而不同的粪便管理模式导致的 CH₄排放量存在显著差别(表 1),因此需要借助畜禽粪便管理系统的平台,研究不同粪便管理模式 CH₄的排放规律,并在此基础上科学估算管理系统 CH₄的排放总量。

2.1 畜禽粪便管理系统 CH₄的产生与影响排放的因素

畜禽粪便由丰富的有机质和水分组成,在通风良好的条件下,有机质进行好氧分解,最终生成 CO₂释放至大气中;但是缺氧条件下,粪便中的有机质进行厌氧分解,生成 CH₄、CO₂和其他更稳定的有机产物。厌氧分解过程主要包括:在一系列厌氧和兼性厌氧微生物的协同作用下,粪便中的蛋白质、纤维素、脂肪等有机物首先水解成小分子有机物;然后分解生成乙酸、甲酸、CO₂和氢等甲烷前体物质^[12];在厌氧的环境中,产甲烷菌转化甲烷前体物质生成 CH₄,主要有两条途径:一是在专性化能自养的产甲烷菌的作用下,以 H₂为氢供体还原 CO₂生成 CH₄(方程式(1)),二是在甲基营养型产甲烷菌的作用下,对乙酸进行脱甲基反应生成 CH₄(方程式(2))



畜禽粪便的有机质分解进程和 CH₄产生潜势(B₀)主要决定于粪便自身的特性,如粪便有机碳的含量和组成、可降解性、C/N比、其他营养元素含量等,而这些性质很大程度上又取决于畜禽种类、饲料类型、饲养时间等。

不同粪便管理模式 CH₄的排放不仅取决于 CH₄

的产生,同时还受 CH₄氧化^[13]以及 CH₄向大气传输速率等方面的影响。总体而言,粪便特性、气候条件,及粪便管理模式是影响畜禽粪便管理系统 CH₄排放的主要因素。

首先,粪便中可利用的有机物质含量越低,在存储过程中排放的 CH₄越少^[14]。例如在相同的环境条件和相同的贮存时间下,经消化后的粪浆与未经任何处理的粪浆相比,CH₄的排放量可减少 30%~66%^[15]。Peterson 等^[16]的试验表明,静置堆放的固体猪粪粪堆内部存在明显的厌氧环境,温度波动剧烈,因而 CH₄排放导致的碳损失占很大比例;相比之下,牛粪粪堆内部 CH₄排放量相对较小。

气温是影响 CH₄排放最重要的气候因素,在一定温度范围内,粪便导致的 CH₄排放与温度呈显著的正相关^[17-18],即温度越高排放量越大。Amon 等^[19]发现不同季节储粪槽中 CH₄的排放量有数量级的差异,夏季平均温度为 19.5℃时 CH₄的排放量是冬季平均温度 9.3℃时的近 100 倍。还有研究发现,蓄粪池 CH₄的排放量有明显的日变化和季节性变化,推测主要原因是受到气温的影响^[20]。此外,风速和降雨等也是影响 CH₄排放的气候因素^[21-22]。

由于粪便管理模式决定着水分含量和氧气含量这两个最重要的因素,显著影响着 CH₄转化因子(Methane conversion factors, MCFs),因此管理模式很大程度上决定了管理过程中的 CH₄排放量。厌氧塘、粪浆存储等液体存储模式,由于在存储过程中主要进行厌氧发酵,导致大量的甲烷排放,其排放因子是固体存储模式的数倍甚至数十倍^[8];在固体存储模式中,粪便静置堆放由于缺乏氧气,其排放量显著高于堆肥等管理模式^[23]。而牧场、散养农场等可将粪便直接分散于田间,由于贮存时间极短产生的 CH₄排放量较低,通常远远低于畜禽粪便贮存过程(包括固体存储和液体存储)^[24]。

2.2 畜禽粪便管理系统中 CH₄排放量的计算及国内外研究进展

2.2.1 畜禽粪便管理系统中 CH₄排放量的计算 制定温室气体排放清单需要汇总粪便管理系统以及更大尺度上的 CH₄排放量。目前国际上普遍采用的粪便管理系统 CH₄排放量的计算方法,是基于 IPCC 提供的计算体系。通过选择不同的影响 CH₄排放的主要因素,IPCC 提供了三个层次^[9]的方法。方法一(Tier 1)是简化的方法,仅根据畜禽种类和气候区(气温)选择默认值作为排放因子,估算排放量,不考虑粪便管理模式对 CH₄排放的影响。

方法二(Tier 2)与方法一的主要区别在于将粪便管理模式加入计算体系,需要根据粪便管理模式特征参数选择排放因子,计算排放量。方法三(Tier 3)采用基于测量的方法量化排放因子,或使用模型的方法确定排放量。

目前国际上最常用的是方法二,这里简单介绍一下。首先需计算出某畜禽种类(type)、某气候区(climate)及某种粪便管理模式(management)下的 CH_4 排放因子 $EF_{(t,c,m)}$,接着计算出某畜禽种类、某气候区在不同粪便管理模式下的 CH_4 排放因子平均值 $EF_{(t,c)}$,再计算出 CH_4 年排放量,最后根据不同气候区和不同粪便类型,加和得出总排放量。计算公式如下:

$$EF_{(t,c,m)} = (VS \times 365) \times (B_0 \times MCF) \quad (3)$$

$$EF_{(t,c)} = \sum_m EF_{(t,c,m)} \times R_{(m)} \quad (4)$$

$$EM_{(t,c)} = EF_{(t,c)} \times N \quad (5)$$

$$EM = \sum_{t,c} EM_{(t,c)} \quad (6)$$

其中, $EF_{(t,c,m)}$ 为该气候区某畜禽种类在某粪便管理模式下的 CH_4 排放因子; VS (Volatile solids)为该畜禽种类的日挥发固体排泄物,即粪便中含有的有机物质; B_0 为该畜禽粪便的 CH_4 产生潜势,即最大的 CH_4 生成能力; MCF 为 CH_4 转化因子,即该气候区该粪便管理模式下的 CH_4 产生潜势的实现能力; $R_{(m)}$ 为该气候区该畜禽种类粪便管理系统中该管理模式所占的比例; N (Number)为该气候区该种畜禽的数量。

对于某个国家或地区而言,计算方法的选择主要取决于 CH_4 的排放强度,排放越严重的宜采用更复杂的计算方法,同时考虑基础数据的可获取性^[25]。我国粪便产生量巨大,处理形式多样,排放因子的选择和排放量的计算中必须考虑粪便管理模式。但由于对粪便管理模式下的 CH_4 转化因子以及不同种类粪便 CH_4 排放潜势的研究很缺乏,可考虑不采用方法二中的 $B_0 \times MCF$ 来计算排放因子的方法,而考虑根据实际测定的数据,直接得到不同粪便管理模式下的 CH_4 排放因子,再根据各管理模式所占的比例 $R_{(m)}$,计算排放量。此外,在计算排放因子时,可以考虑用单位畜禽排泄量(粪便量)来代替单位畜禽数量,以简化计算过程。

2.2.2 国外关于畜禽粪便管理系统中 CH_4 排放的研究进展 畜禽粪便管理系统温室气体排放规律的研究、测定方法的标准化、排放量的评估、排放清单的编制以及减排措施的制定等方面,欧美发达

国家走在了世界前列。

加拿大早在2000年就开始对畜禽粪便管理系统中的 CH_4 排放进行长期的监测^[26]。2003年加拿大公布了一系列以农产品生产商 Alberta 生产实践为依据的分析报告,其中详细阐明了牛、猪、禽类的粪便管理系统及相应的 CH_4 排放量,并讨论了粪便管理系统的减排潜力^[27]。目前,加拿大正在商讨和筹备更完善的畜禽粪便管理系统温室气体排放的监测与评价体系,拟扩大基础数据的测定和积累工作,包括饲料摄入量、饲料成分、可利用性养分等指标,畜禽数量、产量和生长状态;排泄物中的C、N含量和其他营养组分;粪便管理模式特征参数;管理过程中重要的环境参数动态等。对这些参数的积累和研究对于掌握畜禽粪便管理系统 CH_4 的排放规律、精确计算畜禽粪便的排放量、编制温室气体排放清单等均具有重要意义,是一项具有前瞻性的系统工作^[28]。

美国长期以来致力于温室气体的监测和评估,曾公布过一系列关于畜禽粪便排放源分类和排放量计算的指南、报告等文件,加利福尼亚州、俄亥俄州等许多州均有独立的温室气体监测和评估体系。美国国家环境保护局(EPA)在2009年颁布了一项强制性的温室气体报告条例^[29],条例规定凡温室气体(主要指 CH_4 和 N_2O)年排放量超过25 000 t CO_2 当量的养殖场,必须收集温室气体排放量及相关数据。该条例中提及了无盖厌氧塘、粪浆管理模式、储粪坑、固体粪便存储、堆肥等11种粪便管理模式,要求提供 CH_4 排放量数据,并要求报告畜禽类型、年平均养殖量、粪便管理类型及比例、挥发性排泄物含量、粪便的 CH_4 产生潜势和 CH_4 转化因子等指标,用于计算排放量。该条例还单独列出了厌氧发酵体系即沼气生产中 CH_4 产生、应用、泄漏等的报告规则,完善了粪便管理系统关于 CH_4 排放的规定。

荷兰为了实现减排,创建了一套适用于国家层面,并且符合国际标准的温室气体监控体系,这套体系给出了约40种排放源的信息,包括畜禽粪便管理系统中 CH_4 的排放。该体系^[30]列举了不同粪便管理模式中的 CH_4 排放因子,并对IPCC的公式做了少量的调整,汇总了荷兰的来自粪便管理系统的 CH_4 排放。

除了发达国家,一些发展中国家和地区也很重视粪便管理系统中 CH_4 排放的评估和研究工作,一些研究进展和研究结论对我国此项工作的开展很

有借鉴意义。

Swamy 和 Bhattacharya^[31]对印度 1997 年全年粪便管理系统中的 CH₄排放量进行了统计,采用 IPCC 方法二的计算体系,基于全国 391 个气象站将畜禽养殖分成低温、中温和高温三个气候区,分别统计畜禽养殖数量;根据饲料摄入量、灰分含量等计算 VS;沿用 IPCC-1996 年公布的不同粪便甲烷生产潜势 B₀以及不同粪便管理模式的甲烷转化因子等参数计算排放量。统计数据表明印度畜禽粪便造成的 CH₄排放北部地区最高,占全国 33% 南部地区最低占 18%;并且发现 CH₄排放量与畜禽养殖的营养状况直接相关。墨西哥的研究人员^[32]根据大批实际样本的测定结果,分析获得了墨西哥不同粪便管理模式 CH₄的排放因子,这套数据纳入了更多关于粪便管理模式特征的参数,结果发现,得出的排放因子数据与 IPCC 给出的缺省数据有相当的差别,有的低于 IPCC1997^[33]和 IPCC2000^[34]的缺省值达到一个数量级。他们的研究方法和结果对其他类似生产力水平国家具有指导意义。

2.2.3 我国关于畜禽粪便管理系统中 CH₄排放的研究现状 与欧美发达国家相比,我国开展的专门针对粪便管理系统及其温室气体排放量方面的研究十分有限,国家层面的统计数据还很缺乏。比较权威的是 2004 年我国政府向联合国提交的《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》,其中公布了 1994 年我国动物粪便产生的甲烷排放数据,排放量为 86.7 万 t,占农业源 CH₄排放总量的 5.0%,占全国 CH₄排放的 2.5%^[35]。2011 年,林余等^[36]利用 IPCC2006 的方法二与全国各县级行政单位的畜牧统计数据,系统估算出 2004 年中国粪便管理系统 CH₄的排放量为 116 万 t,不确定性范围为 ±14.58%;排放量较大的地区集中黄河下游和华北平原,西南地区排放量也较大,动物粪便管理系统 CH₄排放时间变化呈现出夏季最大,春季和秋季次之,冬季最小的特点。胡向东和王济民^[37]采用相同的估算方法,得到中国粪便管理系统在 2000 年至 2007 年期间年平均甲烷排放量为 168 万 t,总体呈下降趋势,而且排放量呈现区域集中的特点,2007 年居前两位的是四川省和河南省。

其实,我国关于畜禽粪便的 CH₄排放的文献并不缺乏,但多数的研究都集中在某一种粪便管理模

式,或某一养殖场内对 CH₄排放通量的测定,旨在说明一种或几种因素如温度、饲料、通风状况等对排放通量的影响^[38]。这些都是位于监测点尺度的研究,属于小尺度研究,而在区域或国家层面的中、大尺度上的研究十分缺乏。主要的原因,我国畜禽粪便的管理存在点多面广、形式复杂的特点,缺少背景研究资料的积累,尤其是各类粪便采用的管理模式及处理比例至今仍无法比较准确地统计。不同畜禽粪便管理系统 CH₄排放因子的数据也很缺乏,这就造成了我国在进行排放量估算时,基本没有本地数据可供使用,只能采用 IPCC 的缺省值,因此往往导致错误的估算量,并制约了我国国家层面 CH₄排放清单的编制工作。

目前我们课题组正在开展的专项项目,正是立足于粪便管理系统,研究我国不同气候区、不同种类畜禽粪便、不同粪便管理模式中的温室气体排放特征,旨在获得符合国情的 CH₄排放因子,同时探讨我国畜禽粪便系统的 CH₄排放因子与 IPCC 缺省值间的差别,以期建立更符合中国国情的排放清单。

3 我国畜禽粪便管理系统的优化与甲烷减排对策

鉴于我国目前畜禽废弃物的管理现状,迫切需要在国内推进粪便管理系统的理念,系统研究我国畜禽粪便管理系统中 CH₄等温室气体的排放规律,并从粪便管理的角度实现 CH₄的合理和有效地减排。

3.1 畜禽粪便资源管理模式的优化与减排

从上述畜禽粪便管理系统 CH₄排放的计算体系,可以看出,影响 CH₄排放的主要因素有:粪便产生量/畜禽养殖量、粪便类型、气候条件和粪便管理模式。由于前三者受到经济社会发展以及地域的决定,用于减排的潜力十分有限;然而,不同粪便管理模式对于 CH₄排放的影响非常显著,对 CH₄转化因子的影响程度甚至高于粪便类型和气候因素(表 2)。因此,实现粪便管理系统的减排应首先立足于粪便管理模式的优化,促进其向低排放、高效益的管理模式转变。这里简单介绍两种优良的粪便管理模式。

表2 粪便管理模式的 CH₄转化因子(MCFs)

Table 2 Methane conversion factors (MCFs) in different models of the manure management system

区域 Zone	年均温 Average annual temperature	粪便管理模式 Manure management models					
		商品猪 Market swine			奶牛 Dairy cow		
		粪池 Lagoon	固体存放 Solid storage	发酵 Digester	粪池 Lagoon	固体存放 Solid storage	发酵 Digester
寒带 Cool	10 ~ 14 °C	70%	2%	10%	70%	2%	10%
温带 Temperate	15 ~ 25 °C	78%	4%	10%	78%	4%	10%
热带 Warm	16 ~ 28 °C	80%	5%	10%	80%	5%	10%

注:根据文献[9]Note:Adapted from References[9]

(1) 堆肥——优良的粪便固体管理模式

堆肥是指在人工控制一定的水分、C/N 和通风条件下,通过微生物的作用,将废弃有机物转变为肥料的过程^[39]。它是一种好氧发酵处理畜禽粪便的固体管理模式。与自然堆放的管理模式相比,好氧堆肥能显著降低 CH₄ 的产生,管理过程中的累积排放量不足自然堆放的十分之一^[23,40-41],这主要是因为堆肥过程能减少厌氧发酵产生的甲烷,同时由于通氧条件的改善能促进 CH₄ 的氧化,减少 CH₄ 的排放。

(2) 沼气生产——优良的能源利用模式

利用畜禽粪便进行厌氧发酵,生产沼气是另一种优良的粪便管理模式。这一管理模式既能显著降低、甚至是基本消除 CH₄ 的排放,同时可提供清洁的替代能源,实现畜禽废弃物的资源化利用。最近 20 年来,作为一项可再生的清洁能源,沼气的生产与利用在欧美等发达国家得到了迅猛发展^[42-43]。2002 年至 2007 年,德国新建了超过 3 500 家的沼气工程,集成了从原材料制备、厌氧发酵到生物气发电等各项技术,基本实现了沼气生产及利用的全程自动化控制,累积发电量超 1 000 MW^[44]。沼气工程建设也是中国可再生能源建设的重点领域^[45]。有研究报道,在中国一个每天能处理 4 头猪粪便的农户用沼气池,每年可减排温室气体 2.0 ~ 4.1 t CO₂ 当量;一个年存栏量 6 000 头的猪场,将现有粪便管理模式的厌氧/氧化塘改造为大型沼气工程,将减少 500 ~ 7 000 t CO₂ 当量的温室气体排放^[46]。

我国畜禽养殖业点多面广,粪便的管理形式复杂,应针对不同的养殖规模选择适宜的粪便管理模式。对于农家散养或小规模养殖户,应积极发展生态养殖,产生的粪便及时清理,就地还田或短暂储存。对于中等规模的畜禽养殖场或养殖小区,由于粪便产生量大但相对零散,可考虑采用就地“好

氧堆肥工艺”生产有机肥,然后就近还田农用;或者建设小规模“农场沼气池”,实现粪便处理和能量供应的本地化。对于大规模的畜禽养殖场,由于会产生巨量的粪便,应考虑建设配套的处理设施,积极发展“高温好氧堆肥”模式或“反应器堆肥”模式,生产商品有机堆肥,或者建设大中型“厌氧消化工程”生产生物沼气,并在此基础上实现原料供应-生产-销售的全商业化运营,追求经济和环境的双重效益。

近年来,随着我国“节能减排”政策不断推进,生物技术和机械设备的不断改善,我国正沿着建立高效低碳的畜禽粪便管理系统这一方向前进。2010 年国家环境保护部出台了《畜禽养殖污染防治技术政策》^[47],其中针对粪便管理模式的一系列措施均能显著减少温室气体尤其是 CH₄ 的排放。2007 年以后,全国各省份还实行了能源生态补贴制度,鼓励包括沼气池建设和生产有机肥在内的粪便管理模式,并对农民增施有机肥给予补贴^[48]。

3.2 畜禽粪便资源管理技术的优化与减排

除了选择合理的粪便管理模式,针对特定管理模式改善管理技术,也可以进一步减少管理过程中的 CH₄ 排放。

以堆肥这一管理模式为例,可针对微生物作用过程设计减排技术。一方面,可通过改变活性微生物的种类,调节有机质的分解和转化的进程。或向堆料中接种特殊的微生物菌群有利于堆肥的快速启动,加快堆肥的腐熟进程,缩短堆肥时间^[49-50],以减少 CH₄ 的排放。另一方面,可通过改变温度、供氧等环境因子影响不同种类微生物的活性,促进好氧分解,抑制厌氧发酵。堆肥过程中的通风供氧状况越好,CH₄ 的排放越少^[51]。据此可改变堆肥工艺,如采用目前较成熟的条垛式和槽式堆肥工艺,定期机械或人工进行翻堆;也可以通过增加秸秆等吸水

性强的原料以降低堆料的水分含量;或采用机械强制通风,减少由微生物厌氧发酵产生的 CH_4 排放。也可采用更快捷的堆肥工艺,如较先进的发酵仓和机械滚筒式堆肥工艺,使粪便在部分或全部封闭的容器内实现有机质的快速分解和腐殖化,经过快腐的粪便再进行后熟处理时,其 CH_4 排放可大大降低。

通常条件下,粪便就地堆放会产生大量的 CH_4 排放,即便是针对这一 CH_4 高排放的管理模式,一些管理技术的应用也会带来相当明显的减排效果。改变粪便的有机物质组成会影响 CH_4 的排放,如采用垫料粪便或在固体牛粪中掺入 50% (v/v) 的稻草然后堆放,由于粪便 C/N 值增大、易干燥、通气性能改善等原因, CH_4 排放量减少可达 45%^[53]。陆日东等^[54]的研究发现牛粪简单堆放的过程中,不同堆放高度对 CH_4 排放的影响很大,而在堆放过程中如每天增加牛粪会显著增加 CH_4 的排放。在粪便堆放/储存过程中加盖或添加覆盖物是减少 CH_4 排放的一种简单和有效的方式^[55],在粪浆储存模式中能够减少 38% 的 CH_4 排放^[56]。粪便酸化措置也能减少粪便贮存过程中 CH_4 的排放^[57]。

上述这些管理技术看似原理简单,但正确的应用往往会收到很好的减排效果,为实现粪便管理系统减排提供了途径,更多管理技术的收集和应用还有赖于长期生产实践中的总结和发掘。优良的粪便管理模式辅助优化的粪便管理技术,畜禽粪便系统将可能成为农业、畜牧业中最具潜力的减排对象。

参 考 文 献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change: Synthesis report. 2007 [2011. 11018]. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html
- [2] Gedney G N, Cox P M, Huntingford C. Climate feedback from wetland methane emissions. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, L20503: 1—4
- [3] Verburg P, Denier van der Gon H A C. Spatial and temporal dynamics of methane emissions from agricultural sources in China. *Global Change Biology*, 2001, 7: 31—47
- [4] United States Environmental Protection Agency (EPA). Sources and emissions of methane. 2010 [2011. 11018]. <http://www.epa.gov/methane/sources.html>
- [5] 中华人民共和国环境保护部.《畜禽养殖业污染防治技术政策(征求意见稿)》编制说明. 2009 [2011. 11018]. http://www.zhb.gov.cn/info/bgw/bbgth/200909/t20090918_161115.htm. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Preparation instructions to livestock industry pollution control technology policy (In Chinese). 2009 [2011. 11018]. http://www.zhb.gov.cn/info/bgw/bbgth/200909/t20090918_161115.htm
- [6] 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. *地理研究*, 2006, 25 (2): 311—319. Gao D, Chen T B, Liu B, et al. Releases of Pollutants from Poultry manure in China and recommended Strategies for the pollution prevention (In Chinese). *Geo Graphical Research*, 2006, 25 (2): 311—319
- [7] 贾华清. 畜禽粪便的资源化利用技术与管理系统的建立. *安徽农学通报*, 2007, 13 (5): 46—48. Jia H Q. Resource utilization of manure and the building of manure management systems (In Chinese). *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2007, 13 (5): 46—48
- [8] Adler J A. International anthropogenic methane emissions: Estimates for 1990. Report to Congress, EPA Report 230R93010, Chapter 9. 1994. 1—332. <http://www.epa.gov/nscep/index.html>
- [9] Dong H M, Mangino J, McAllister T A, et al. Emissions from livestock and manure management. In: 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Japan: Institute for Global Environmental Strategies. 10.1—10.81
- [10] Limitada A S. Approved baseline methodology AM0006. GHG emission reductions from manure management systems. <http://cdm.unfccc.int/methodologies/approved>
- [11] Pohl S. 猪场的粪便管理系统. *国外畜牧学—猪与禽*, 2003, 23 (5): 41—45. Pohl S. Manure management systems for swine operations (In Chinese). *Animal Science Abroad—Pigs and Poultry*, 2003, 23 (5): 41—45
- [12] Conrad R. Quantification of methanogenic pathways using stable carbon isotopic signatures: A review and a proposal. *Organic Geochemistry*, 2005, 36: 739—752
- [13] 沈李东,胡宝兰,郑平. 甲烷厌氧氧化微生物的研究进展. *土壤学报*, 2011, 48 (3): 619—629. Shen L D, Hu B L, Zheng P. Progress in study on microorganisms responsible for anaerobic oxidation of methane (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (3): 619—629
- [14] Amon B, Kryvoruchko V, Amon T, et al. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112: 153—162
- [15] 马瑞娟,董红敏. 畜禽液体粪便贮存过程中气体排放影响因素的研究现状. *中国农业科技导报*, 2010, 12 (3): 56—61. Ma R J, Dong H M. Research status about main factors affecting gas emissions in liquid manure storage (In Chinese). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2010, 12 (3): 56—61
- [16] Petersen S O, Lind A M, Sommer S G. Nitrogen and organic matter losses during storage of cattle and pig manure. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 1998, 130: 69—79
- [17] Clemens J, Trimbom M, Weiland P, et al. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112: 171—177
- [18] Massé D I, Massé L, Claveau S, et al. Methane emissions from manure storages. *American Society of Agricultural Engineers*,

- 2008, 51: 1 775—1 781
- [19] Amon B, Kryvoruchko V, Amon T. Influence of different methods of covering slurry stores on greenhouse gas and ammonia emissions. *International Congress Series*, 2006, 1293: 315—318
- [20] 高新星, 赵立欣. 规模化猪场甲烷排放通量测量与分析. *农业工程学报*, 2006, 22(增1): 248—252. Gao X X, Zhao L X. Measurement and analysis of methane flux emitted from animal manure lagoon of livestock farm (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(Suppl 1): 248—252
- [21] Sharp R R, Harper L A. Methane emissions from an anaerobic swine lagoon. *Atmosphere Environment*, 1999, 33: 3 627—3 633
- [22] Leytem A B, Dungan R S, Bjorneberg D L, et al. Emissions of ammonia, methane, carbon dioxide, and nitrous oxide from dairy cattle housing and manure management systems. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40: 1 383—1 394
- [23] Amon B, Amon T, Boxberger J, et al. Emissions of NH_3 , N_2O and CH_4 from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 60: 103—113
- [24] Steed Jr J, Hashimoto A G. Methane emissions from typical manure management systems. *Bioresource Technology*, 1994, 50: 123—130
- [25] Kebreab E, Clark K, Wagner-Riddle C, et al. Methane and nitrous oxide emissions from Canadian animal agriculture: A review. *Canadian Journal of Animal Science*, 2006, 86: 135—158
- [26] SGR soil resource group. Ministry management practices and their effect on GHG emissions in the Ontario agricultural sector; PS-99-010 for Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 503 Imperial Road, North Guelph, Ontario, 2000. 1—137. http://agrienvarchive.ca/bioenergy/download/omafra_doc_ghg.pdf
- [27] Langmead C. Manure management and greenhouse gas mitigation techniques: A comparative analysis discussion paper C3—013. 2003 [2011. 11018]. http://www.climatechangecentral.com/files/attachments/DiscussionPapers/Manure_Management_GHG_mit.pdf
- [28] Wagner-Riddle C, Kebreab E, France J, et al. Supporting measurements required for evaluation of greenhouse gas emission models for enteric fermentation and stored animal. Manure discussion paper for the 2nd Meeting of the Animal Production and Manure Management Network. 2008 [2011. 11018]. 1—17. http://agrienvarchive.ca/bioenergy/download/wagner_riddle-DiscussionPaper.pdf
- [29] Environmental Protection Agency, United States (US-EPA). Manure management systems. Final rule: Mandatory Reporting of Greenhouse Gases. 40 CFR 98, subpart JJ 1 EPA-430-F-09-026R. 2009 [2011. 11018]. <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P10054D7.TXT>
- [30] The National Institute for Public Health and the Environment, Netherlands (NL-RIVM). CH_4 from manure management. Translation of I&E Monitoring Protocol 11-029. 2011. 1-13. <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/680355004.pdf>
- [31] Swamy M, Bhattacharya S. Budgeting anthropogenic greenhouse gas emission from Indian livestock using country-specific emission coefficients. *Current Science*, 2006, 91: 1 340—1 353
- [32] Gonzalez-Avalos E, Ruiz-Suarez L G. Methane conversion factors from cattle manure in Mexico. *Atmosphere*, 2007, 20: 83—92
- [33] Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. UNFCCC COP3, Kyoto. Intergovernmental Panel on Climate Change/Organization for Economic Cooperation and Development, London, UK. 1997
- [34] Intergovernmental Panel on Climate Change/Organization for Economic Cooperation and Development. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. London, UK. 2000
- [35] 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报. 北京: 中国计划出版社, 2004. Initial national communication on climate change of People's Republic of China (In Chinese). Beijing: China Planning Press, 2004
- [36] 林余, 张稳, 黄耀. 中国动物源 CH_4 排放空间分布和时间变化研究. *环境科学*, 2011, 32(8): 2 212—2 220. Lin Y, Zhang W, Huang Y. Estimating spatiotemporal dynamics of methane emissions from livestock in China (In Chinese). *Environmental Science*, 2011, 32(8): 2 212—2 220
- [37] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 247—252. Hu X D, Wang J M. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(10): 247—252
- [38] 董红敏, 朱志平, 陶秀萍, 等. 育肥猪舍甲烷排放浓度和排放通量的测试与分析. *农业工程学报*, 2006, 22(1): 123—128. Dong H M, Zhu Z P, Tao X P, et al. Measurement and analysis of methane concentration and flux emitted from finishing pig house (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(1): 123—128
- [39] 曾光明, 黄国和, 袁兴中. 堆肥环境生物与控制. 北京: 科学出版社, 2006: 1—10. Zeng G M, Huang G H, Yuan X Z. *Microorganisms and control of compost* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2006: 1—10
- [40] Sommer S G, Petersen S O, Møller H B. Algorithms for calculating methane and nitrous oxide emissions from manure management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69: 143—154
- [41] Chen R, Lin X, Wang Y, et al. Mitigating methane emissions from irrigated paddy fields by application of aerobically composted livestock manures in eastern China. *Soil Use and Management*, 2011, 27: 103—109
- [42] Weiland P. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2003, 109: 263—274
- [43] Ward A, Hobbs P J, Holliman P J, et al. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource and Technology*, 2008, 99: 7 928—7 940
- [44] Demirel B, Scherer P. Bio-methanization of energy crops through mono-digestion for continuous production of renewable biogas. *Renewable Energy*, 2009, 34: 2 940—2 945
- [45] 张培栋, 李新荣, 杨艳丽, 等. 中国大中型沼气工程温空气

- 体减排效益分析. 农业工程学报, 2008, 24(9): 239—243. Zhang P D, Li X R, Yang Y L, et al. Greenhouse gas mitigation benefits of large and middle-scale biogas project in China (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 239—243
- [46] 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. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269—273. Dong H M, Li Y E, Tao X P, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 269—273
- [47] 中华人民共和国环境保护部. 畜禽养殖污染防治技术政策. 2010: 9—39. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Policy of livestock pollution control technology (In Chinese). 2010: 9—39
- [48] 汪丽婷, 马友华, 储茵, 等. 畜禽粪便废弃物处理与低碳技术应用. 农业环境与发展, 2010(5): 57—60. Wang L T, Ma Y H, Chu Y, et al. Treatment of manure waste and application of low carbon technology (In Chinese). Agro-Environment and Development, 2010(5): 57—60
- [49] Singh A, Sharma S. Effect of microbial inocula on mixed solid waste composting, vermicomposting and plant response. Compost Science and Utilization, 2003, 11: 190—199
- [50] 徐智, 张陇利, 张发宝, 等. 接种内外源微生物菌剂对堆肥效果的影响. 中国环境科学, 2009, 29(8): 856—860. Xu Z, Zhang L L, Zhang F B, et al. Effects of indigenous and exogenous microbial inocula on composting in a bioreactor (In Chinese). China Environmental Science, 2009, 29(8): 856—860
- [51] 谢军飞, 李玉娥. 不同堆肥处理猪粪温室气体排放与影响因素初步研究. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 56—59. Xie J F, Li Y E. Release of greenhouse gases from composting treatments on piggery excreta (In Chinese). Journal Agro-Environmental Science, 2003, 22(1): 56—59
- [52] Lou X F, Nair J. The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions-A review. Bioresource and Technology, 2009, 100: 3 792—3 798
- [53] Yamulki S. Effect of straw addition on nitrous oxide and methane emissions from stored farmyard manures. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 112: 140—145
- [54] 陆日东, 李玉娥, 石锋, 等. 不同堆放方式对牛粪温室气体排放的影响. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1 235—1 241. Lu R D, Li Y E, Shi F, et al. Effect of compost on the greenhouse gases emission from dairy manure (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(3): 1 235—1 241
- [55] Søren O P, Amon B, Gattinger A. Methane oxidation in slurry storage surface crusts. Journal of Environmental Quality, 2005, 34: 455—461
- [56] Sommer S G, Søren O P, Henning T S. Greenhouse gases emission from stored livestock slurry. Journal of Environmental Quality, 2000, 29: 744—751
- [57] Berg W, Brunsch R, Pazsiczki I. Greenhouse gas emissions from covered slurry compared with uncovered during storage. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 112: 129—134

METHANE EMISSION AND MITIGATION STRATEGIES IN ANIMAL MANURE MANAGEMENT SYSTEM

Chen Ruirui^{1,2} Wang Yiming^{1,2} Hu Junli^{1,2} Lin Xiangui^{1,2†}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Joint Open Laboratory of Soil and the Environment, Institute of Soil Science and Hong Kong Baptist University, Nanjing 210008, China)

Abstract Methane, produced from decomposition of livestock manure under anaerobic conditions, contributes significantly to anthropogenic CH₄ emission to the atmosphere. The expansion of the scale of livestock breeding will lead to a continuing increase in CH₄ emission. To achieve utilization of manure as resource and mitigation of CH₄ emission, it is urgent to introduce the concept of “animal manure management system”, and investigate characteristics of the production and emission of CH₄ in the system and its mitigation strategies. Therefore, the current review began with an introduction to structure of the manure management system, elaborated CH₄ production in the system and factors affecting CH₄ emissions. It also discussed emission-calculating methods, and summarized advancements in the study on CH₄ emissions from manure management system at home and abroad. At the end, optimized manure management models compatible to the current scale of livestock breeding in China and strategies based on improvement of management technology for mitigation of CH₄ emissions were suggested.

Key words Methane (CH₄); Animal manure; Management models; Compost; Biogas