

成年奶牛温室气体排放分析

鞠鑫鑫¹, 郭建斌², 杨守军³, 孙 辉², 董仁杰^{2*}

(1. 山东中农三月环保科技股份有限公司, 山东 烟台 264006; 2. 国家级生物质能科学与技术国际联合研究中心 农业农村部可再生能源清洁化利用技术重点实验室 中国农业大学工学院农业农村碳中和研究中心, 北京 100083; 3. 中国农业大学烟台研究院, 山东 烟台 264670)

摘要: 为厘清我国奶牛养殖行业温室气体排放现状, 指导奶牛养殖温室气体减排路径规划, 分析了一头成年奶牛全产业链的温室气体排放情况。结果显示: 以敞口厌氧塘粪污处理为基线, 沼气工程可实现粪污管理过程温室气体减排 90% 以上, 结合沼液密闭贮存, 减排可达 98%, 其中甲烷减排贡献占 98.3%; 奶牛粪便处理后利用过程, 通过能源替代、化肥替代和土壤固碳可创造减排固碳效益, 年最大减排固碳能力达 3.611 tCO₂e·头⁻¹; 从奶牛养殖全链条考虑, 不同奶牛粪便管理利用情境下, 沼气工程处理粪污且结合三沼利用模式下, 温室气体减排效益最显著, 奶牛年净排放量仅为 3.742 tCO₂e·头⁻¹a⁻¹, 与敞口厌氧塘粪污处理利用模式相比减排 65%, 与堆肥结合粪肥还田模式相比减排 30%。优先选用沼气工程作为奶牛粪便管理方案, 同时加强沼气和沼液沼渣的回收利用, 是实现奶牛养殖业温室气体尤其是甲烷减排的有效途径。

关键词: 奶牛; 温室气体; 甲烷; 粪便管理; 减排

中图分类号: S216.4; X713 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2022)03-0009-09

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022030009

Greenhouse Gas Emissions of a Mature Dairy Cattle / JU Xinxin¹, GUO Jianbin², YANG Shoujun³, SUN Hui², DONG Renjie^{2*} / (1. Shandong Zhongnong Sanyue Environmental Technology Co Ltd, Yantai 264006, China; 2. National Center for International Research of BioEnergy Science and Technology (iBEST), MoA Key Lab of Clean Production and Utilization of Renewable Energy (CPURE), Carbon-Neutral Agriculture Research Center of CAU College of Engineering (CNA), Beijing 100083, China; 3. Yantai Institute of China Agricultural University, Yantai 264670, China)

Abstract: In order to clarify dairy farming greenhouse gases (GHGs) emissions in China and to guide GHGs emission reduction, one dairy cow annual GHGs emissions has been evaluated in this study, and the following results are gained: In manure management, the GHGs emission could be reduced by more than 90% through anaerobic digestion (AD) compared with uncovered anaerobic lagoon, and the reduction could reach as high as 98% through combined AD and gas tight storage of liquid digestate; Amongst the methane elimination contributes 98.3%. The maximum negative emission capacity resulted from manure utilization could reach 3.611 tCO₂e·a⁻¹ through substitution of fossil energy and mineral fertilizer, and soil carbon sequestration. Considering the whole chain of dairy farming, under different scenarios of manure treatment and utilization, the combination of AD, biogas and digestate utilization could achieve the lowest greenhouse gas emissions as 3.742 tCO₂e·head⁻¹a⁻¹, which is 65% lower than that of manure uncovered anaerobic lagoon and 30% lower than that of manure composting. Finally, AD is preferred for cow manure management. Full use of biogas and digestate is an effective way to reduce GHGs especially methane emission on dairy farms.

Key words: dairy cattle; greenhouse gases; methane; manure management; emission reduction

联合国粮农组织报告显示, 全球农业活动温室气体排放中, 畜牧生产(肠道发酵和粪便管理利用)

相关排放占比达 67%^[1]; 我国 2014 年畜牧生产占农业活动温室气体排放的 42%^[2]。全球畜牧生产

收稿日期: 2022-03-01 修回日期: 2022-04-08

项目来源: 烟台开发区创新创业领军团队项目(TD2016003); 烟台市校地融合发展项目(2019XDRHXM25)。

作者简介: 鞠鑫鑫(1989-), 女, 汉族, 山东威海人, 工程师, 研究方向为农业源温室气体排放, E-mail: jxx0617@126.com

通信作者: 董仁杰, E-mail: rjdong@cau.edu.cn

产生的甲烷量占人类活动排放甲烷总量的 32%^[3], 其中 2017 年仅奶牛养殖产生的温室气体(甲烷为主)即达到约 5.99 亿吨二氧化碳当量(CO₂e)^[4], 约占全球畜牧生产甲烷排放的 17.6%。

在“碳达峰、碳中和”目标纳入我国生态文明建设整体布局的时代背景下,分析奶牛养殖业温室气体排放及减排具有明显的现实意义。2008 年,我国国家发改委应对气候变化司依据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)提出的《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南》(下文简称《IPCC 指南 2006》)^[5]结合我国奶牛养殖情况分别提供了全国奶牛肠道发酵甲烷加权排放因子和粪便管理的甲烷及氧化亚氮加权排放因子,郑永辉^[6]等在此基础上核算了全国奶牛肠道发酵和粪便管理的综合排放因子为 2.6 tCO₂e·头⁻¹a⁻¹,但是随着温室气体排放核算方法学的完善以及我国奶牛养殖规模和工艺技术的改进,上述因子已不能准确反应我国奶牛养殖业的温室气体排放现状;近年来,很多学者基于生命周期视角,开展了奶牛养殖环境经济效益评价研究,例如王效琴^[7]等应用生命周期评价法,分析了西安郊区典型规模化奶牛场的奶牛养殖系统温室气体排放特点和排放量;白玫^[8]等评估了北京规模化奶牛养殖企业温室气体排放情况;黄显雷^[9]等研究了基于生命周期视角的种养一体化奶牛场环境经济效益评估,但是这些研究主要集中于牛奶产品碳足迹或养殖场整体经济效益及环境效益,很少聚焦于奶牛产业温室气体排放本身。同时现有文献中也普遍存在核算方法更新不及时,相关参数或排放因子陈旧等问题。

以《IPCC 指南 2006》^[5]和《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》(下文简称《IPCC 指南 2019 修订版》)^[10]为基础,结合 IPCC 第五次报告^[11]以及我国相关统计数据,参考国内外最新研究成果,对不同粪污处理情境下一头成年奶牛年温室气体排放情况进行了核算,以期厘清我国奶牛养殖业现有温室气体排放水平、为规划奶牛养殖业减排路径提供指导,助力我国农业农村碳达峰、碳中和进程。

1 材料与方法

1.1 核算边界及排放源

核算边界包括:饲料生产加工系统(饲料种植基地、运输及饲料加工)、奶牛养殖生产系统(牛舍、

挤奶厅)和粪污管理利用系统。主要温室气体排放源包括:奶牛饲料消费带来的排放(饲料种植和运输过程排放);肠道发酵 CH₄ 排放;养殖场化石能源排放;养殖场外购电力排放;粪便管理过程 CH₄ 及 N₂O 排放;粪污处理与循环利用中能源替代、化肥替代产生的减排以及有机质还田产生的土壤碳汇。

1.2 计算方法及数据来源

《IPCC 指南 2006》^[5]规定了温室气体排放量核算方法:排放 = AD × EF。其中 AD 为活动数据;EF 为排放因子。活动数据优先选用国家统计局或相关部门公布数据^[12-14],其次选用调研数据,再次选用文献数据,最后选用 IPCC 缺省数据。饲料种植排放因子来自国内近年的文献和学位论文;肠道甲烷和粪便管理排放因子来自《IPCC 指南 2006》^[5]和《IPCC 指南 2019 修订版》^[10];饲料运输和养殖场化石能源排放因子分别按照《陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[15]、《中国食品、烟草及酒、饮料和精制茶企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[16]计算;养殖场外购电力排放因子选用全国电网平均排放因子^[17]。

2 结果与分析

2.1 奶牛饲料消费带来的排放

2.1.1 奶牛干物质采食量需求

根据《IPCC 指南 2019 修订版》^[10],成年奶牛干物质采食量为:

$$DMI = 0.0185 \times BW + 0.305 \times (0.4324 \times M + 16.216 \times F) \quad (1)$$

式中:DMI 为干物质采食量,kg·头⁻¹d⁻¹;BW 为奶牛体重,按六大区产奶牛单体重值的简单均值^[12]取 621 kg·头⁻¹;M、F 分别为鲜奶产量和乳脂量,kg·头⁻¹d⁻¹。

我国成年奶牛产奶水平为 7800 kg·头⁻¹a⁻¹^[18],鲜奶乳脂率 3.4%^[19],折脂肪校正奶产量约 21 kg·头⁻¹d⁻¹;则我国成年奶牛干物质采食量需求为 6.53 t·头⁻¹a⁻¹。

2.1.2 饲料成分及配比

按成年奶牛饲料中,不同成分干物质占比分别为:青贮玉米 40%、玉米 29.5%、麸皮 15.1%、豆粕 12.9%、营养盐(食盐、碳酸钙、磷酸氢钙等) 1.5%、预混料(维生素、微量元素等) 1%^[20-21],核算奶牛饲料消费带来的温室气体间接排放量。

2.1.3 饲料种植过程产生的排放

饲料种植的温室气体排放环节主要包括化肥生产、氮肥施用田间排放、灌溉和农机能耗及残余作物排放。按成年奶牛干物质采食量 $6.53 \text{ t} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 结合奶牛饲料成分配比,核算一头成年奶牛所需饲料种植过程温室气体排放量为 $2.742 \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{a}^{-1}$ (见表1)。

2.1.4 饲料运输的排放

我国一头成年奶牛所需的饲料原料运输质量为 $14.88 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ (见表1)。假定平均运输距离为 50 km ^[9, 23], 运输车辆类型为大货车(载重 $\geq 20 \text{ t}$, 百公里油耗 35 L)^[15], 则一头成年奶牛养殖过程饲料运输产生的温室气体排放量约 $0.034 \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{a}^{-1}$ (见表2)。

表1 一头成年奶牛饲料消费量及其带来的饲料种植过程温室气体排放

饲料成分	干物质采食量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	原料中干物质含量 ^[22] %	饲料原料运输重量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	饲料种植排放因子 ^[23] ($\text{tCO}_2\text{e} \cdot \text{t}^{-1}$ 干物质)	种植过程温室气体排放量 ($\text{tCO}_2\text{e} \cdot \text{a}^{-1}$)
青贮玉米	2.612	25.00	10.448	0.217	0.567
玉米	1.926	87.33	2.205	0.737	1.419
麸皮	0.986	88.54	1.114	0.275	0.271
豆粕	0.842	88.73	0.949	0.576	0.485
其他 ^a	0.164	100.00	0.164	0	0
合计	6.530	—	14.88	—	2.742

注: a 为饲料中的其他成分为营养盐和预混料, 温室气体排放计为0。

表2 一头成年奶牛饲料消费带来的交通运输温室气体排放量

温室气体类别	排放因子 ^[15]	油耗或运输距离 ^a	温室气体排放量 kg	GWP ₋₁₀₀ ^[11]	排放二氧化碳当量 ($\text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{a}^{-1}$)
柴油燃烧 CO_2	$3.096 \text{ kgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1\text{b}}$	10.94 kg	33.87	1	33.870
运输过程 CH_4	$175 \text{ mgCH}_4 \cdot \text{km}^{-1}$	37.20 km	6.51×10^{-3}	28	0.182
运输过程 N_2O	$6 \text{ mgN}_2\text{O} \cdot \text{km}^{-1}$	37.20 km	0.223×10^{-3}	265	0.059
合计	—	—	—	—	34.111

注: a 为按照运输时货车载重 20 t , 运输距离 50 km , 折算 14.88 t 货物对应的运输油耗及运输距离, 柴油密度取 $0.84 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$; b 为柴油排放因子折算时, 低位发热值按照《中国能源统计年鉴 2013》^[14] 取值。

2.2 奶牛肠道发酵 CH_4 排放

基于国家或者区域层面统计数据的奶牛肠道甲烷排放因子^[10]:

$$EF_{\text{肠道}} = \text{DMI} \times \frac{\text{MY}}{1000} \times 365 \quad (2)$$

式中: $EF_{\text{肠道}}$ 为奶牛肠道甲烷排放因子, $\text{kgCH}_4 \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$; DMI 为奶牛干物质采食量, $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; MY 为甲烷产生系数, $\text{g CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{DMI}$, 取值 $19 \sim 21.4$ ^[10] 此处取 21 。按照产奶量 $7800 \text{ kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[18]、

干物质采食量 $6.53 \text{ t} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 核算我国成年奶牛肠道甲烷排放量为 $137.13 \text{ kgCH}_4 \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 即排放 $3.84 \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.3 奶牛养殖场能源消费温室气体排放

奶牛养殖场的资源、能源消费包括水、电和化石燃料等, 其中温室气体排放主要来自能源消费(外购电力和化石燃料燃烧)。根据《全国农产品成本资料收益汇编 2019》^[13] 及 $2018 \sim 2019$ 年度我国能源市场价位情况, 核算我国一头成年奶牛能源消费

表3 一头成年奶牛能源消费相关温室气体排放量

能源类别	费用 ($\text{元} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) ^[13]	单价	能源消费量	排放因子	排放量 ($\text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{a}^{-1}$)
电	349.53	$0.48 \text{ 元} \cdot \text{kWh}^{-1}$ ^[24]	728.188 kWh	$0.6101 \text{ kgCO}_2\text{e} \cdot \text{kWh}^{-1}$ ^[17]	444.267
煤炭 ^a	49.33	$650 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$	75.892 kg(1.747 GJ)	$89.001 \text{ kgCO}_2\text{e} \cdot \text{GJ}^{-1}$ ^[16]	155.485
其他燃料 ^b	60.84	$7 \text{ 元} \cdot \text{L}^{-1}$	8.691 L(7.3 kg)	$3.096 \text{ kgCO}_2\text{e} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[16]	22.601
合计	459.70	—	—	—	622.353

注: a 为煤炭按 $5500 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ 动力煤, $2018 \sim 2019$ 年市场价介于 $600 \sim 700 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 取中间值; b 为其他燃料按照柴油估算, 2018 年至 2019 年我国柴油市场价格在 $6 \sim 8 \text{ 元} \cdot \text{L}^{-1}$ 波动, 取中间值。

相关温室气体排放量约 0.622 tCO₂e·a⁻¹ (见表 3)。

2.4 粪便管理系统温室气体排放

2.4.1 奶牛排污情况

粪便管理过程 CH₄ 和 N₂O 的排放量与粪污中挥发性固体(VS)含量、氮含量及粪便管理方式密切相关。成年奶牛的产污系数取我国不同区域产奶牛产污系数的简单均值,即一头产奶牛每天产生粪便、尿液和全氮量分别为 30.3 kg、14.8 L 和 250.04 g^[12]。鲜粪含固率、总固体中 VS 占比及总有机碳含量按表 4 取值。

表 4 奶牛粪便性质统计

序号	鲜粪含固率 %	总固体中 VS 占比/%	总有机碳 (g·kg ⁻¹ TS)	参考文献
1	18.70	—	—	[25]
2	14~17	80.42	440.10	[26]
3	—	74.77	351.44	[27]
4	22.33	68.35	—	[28]
5	23.42	71.22	495.0	[29]
文章取值	20.0	73.7	428.8	—

2.4.2 奶牛粪便管理系统的 CH₄ 排放

根据《IPCC 指南 2019 修订版》^[10] 粪便管理系

表 5 不同粪便管理方式下一头成年奶牛年粪污甲烷排放情况

参数	敞口厌氧塘	固体堆贮	堆肥 ^b		沼气工程	
			强制通风	静态堆肥	沼液敞口贮存	沼液密闭贮存
VS/(kg·头 ⁻¹ d ⁻¹)	4.466	4.466	4.466	4.466	4.466	4.466
B ₀ /(m ³ CH ₄ ·kg ⁻¹ VS) ^[10]	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
甲烷密度/(kg·m ⁻³) ^[5]	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
最大产甲烷潜力/(kgCH ₄ ·头 ⁻¹ a ⁻¹)	262.12	262.12	262.12	262.12	262.12	262.12
MCF ^[10] /%	75 ^a	4	1	2	4.38	1
AWMS ^c /%	100	100	100	100	100	100
EF _{CH₄} /(kgCH ₄ ·头 ⁻¹ a ⁻¹)	196.589	10.485	2.621	5.242	11.481	2.621
温室气体排放量/(kgCO ₂ e·头 ⁻¹ a ⁻¹)	5504.48	293.57	73.39	146.79	321.46	73.39

注: a 为 IPCC 缺省值, 温带湿润区 73%, 干燥区 76%, 此处取中间值; b 为此处为粪污中 VS100% 用于堆肥时甲烷排放的理论值, 实际工程中需根据进入堆肥系统和液体处理系统的 VS 占比情况进行加权计算, N₂O 排放核算时相同; c 为分析单一粪便管理模式下的温室气体排放情况时, 不同粪便管理系统的 AWMS 取 100% 分别计算。

2.4.3 奶牛粪便管理系统的 N₂O 排放

粪便管理系统的 N₂O 排放因子计算公式^[10] 如下:

$$EF_{N_2O-D} = Nex \times (\sum_S AWMS_S \times EF_{3,S}) \times \frac{44}{28} \quad (4)$$

$$EF_{N_2O-G} = Nex \times (\sum_S AWMS_S \times Frac_{G,S} \times EF_{4,S}) \times \frac{44}{28} \quad (5)$$

统甲烷排放因子计算公式为:

$$EF_{CH_4} = VS \times 365 \times B_0 \times 0.67 \times \sum_S (MCF_S \times AWMS_S) \quad (3)$$

式中: EF_{CH₄} 为粪便管理系统的甲烷排放因子, kgCH₄·头⁻¹a⁻¹; VS 为奶牛产生的粪污中挥发性干物质量, kg·头⁻¹d⁻¹; 365 是计算 VS 产量的系数, 即一年排污的天数; B₀ 为奶牛粪便产甲烷潜力, m³CH₄·kg⁻¹VS; 0.67 为甲烷密度, kg·m⁻³; S 为粪便管理系统类别; MCF_S 为粪便管理系统 S 的甲烷转化因子; AWMS_S 为粪便管理系统 S 处理奶牛粪便的比例。

根据奶牛排污情况, 忽略粪污收运过程的损失以及尿液中 VS 的含量, 核算我国成年奶牛 VS 产量为 4.466 kg·头⁻¹d⁻¹。结合《IPCC 指南 2019 修订版》^[10] 提供的 B₀ 和 MCF 缺省值, 可得我国一头成年奶牛粪便管理过程甲烷排放情况如表 5。敞口厌氧塘模式下, CH₄ 排放量最高, 约 5.504 tCO₂e·头⁻¹a⁻¹; 堆肥和沼气工程粪污处理模式与敞口厌氧塘模式相比可实现甲烷减排 90% 以上, 其中集约化强制通风堆肥模式及沼液密闭贮存的沼气工程粪污处理模式下奶牛粪便管理甲烷排放量最低, 仅为 0.073 tCO₂e·头⁻¹a⁻¹。

$$EF_{N_2O-L} = Nex \times (\sum_S AWMS_S \times Frac_{L,S} \times EF_{5,S}) \times \frac{44}{28} \quad (6)$$

式中: EF_{N₂O-D} 为 N₂O 直接排放因子, kgN₂O·头⁻¹a⁻¹; EF_{N₂O-G} 为挥发引起的 N₂O 间接排放因子, kgN₂O·头⁻¹a⁻¹; EF_{N₂O-L} 为淋溶和径流引起的 N₂O 间接排放因子, kgN₂O·头⁻¹a⁻¹; AWMS_S 为粪便

管理系统 S 处理的奶牛粪便所占比例; N_{ex} 为 1 头奶牛每年 N 量排泄, $\text{kgN} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 根据我国奶牛排污情况取值 91.26; $EF_{3,S}$ 为粪便管理系统 S 中, 奶牛排泄 N 的 N_2O 直接转化因子, $\text{kgN}_2\text{O-N} \cdot \text{kg}^{-1}$ 排泄 N; $Frac_{G,S}$ 为粪便管理系统 S 中挥发 N 占比; $EF_{4,S}$ 为粪便管理系统 S 中挥发 N 的 N_2O 转化因子, $\text{kgN}_2\text{O-N} \cdot \text{kg}^{-1}$ 挥发 N; $Frac_{L,S}$ 为粪便管理系统 S 中淋溶和径流 N 占比; $EF_{5,S}$ 为粪便淋溶和径流 N 的 N_2O 转化因子, $\text{kgN}_2\text{O-N} \cdot \text{kg}^{-1}$ 淋溶和径流 N; 44/28 是将 $\text{N}_2\text{O-N}$ 排放量转换为 N_2O 排放的系数。

公式(4)~(6)中参数取《IPCC 指南 2019 修订版》^[10]中的缺省值。固体堆贮模式下奶牛粪便 N_2O

排放量最高,约为 $0.502 \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$; 沼气工程粪污处理模式下 N_2O 排放量最低,仅为 $0.04 \sim 0.06 \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ (见表 6)。

2.4.4 粪便管理系统温室气体总排放

综合考虑 CH_4 和 N_2O 排放情况,核算不同粪便管理模式下一头成年奶牛年产粪污的温室气体排放情况如表 7。敞口厌氧塘粪污管理模式下,温室气体排放量最高达到 $5.637 \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$; 沼液密闭贮存模式下的沼气工程粪污处理温室气体排放最低,仅为 $0.115 \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,与敞口厌氧塘模式相比,实现温室气体减排 98% 左右,其中甲烷减排贡献占 98.3%,氧化亚氮减排贡献占 1.7%。

表 6 不同粪便管理方式下一头成年奶牛年产粪污 N_2O 排放情况

排放类别	敞口厌氧塘	固体堆贮	堆肥		沼气工程		
			强制通风	静态堆肥	沼液敞口贮存	沼液密闭贮存	
$N_{ex}/(\text{kgN} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	91.26	91.26	91.26	91.26	91.26	91.26	
AWMS/%	100	100	100	100	100	100	
N_2O 直接排放	$EF_3^{[10]}/(\text{kgN}_2\text{O-N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N 排泄量})$	0	0.005	0.005	0.0006	0.0006	
	$EF_{\text{N}_2\text{O-D}}/(\text{kgN}_2\text{O} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	0	0.717	0.717	0.086	0.086	
	排放二氧化碳当量/ $(\text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	0	380.03	190.03	190.02	22.80	22.80
间接排放-挥发	$Frac_G^{[10]}$	0.35	0.5	0.45	0.1	0.05	
	$EF_4^{[10]}/(\text{kgN}_2\text{O-N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{挥发 N})$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
	$EF_{\text{N}_2\text{O-G}}/(\text{kgN}_2\text{O} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	0.502	0.430	0.717	0.645	0.143	0.072
	排放二氧化碳当量/ $(\text{kgN}_2\text{O} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	133.01	114.01	190.02	171.01	38.00	19.00
间接排放-淋溶和径流	$Frac_L^{[10]}$	0	0.06	0.04	0	0	
	$EF_5^{[10]}/(\text{kgN}_2\text{O-N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{淋溶和径流 N})$	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	
	$EF_{\text{N}_2\text{O-L}}/(\text{kgN}_2\text{O} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	0	0.0315	0.0946	0.0631	0	0
	排放二氧化碳当量/ $(\text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	0	8.36	25.08	16.72	0	0
合计排放/ $(\text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	133.01	502.40	405.11	377.75	60.81	41.80	

表 7 不同粪便管理模式下一头成年奶牛年产粪污温室气体排放情况

排放源	敞口厌氧塘	固体堆贮	堆肥 ^a		沼气工程	
			堆肥 + 沼气工程 ^b	堆肥 + 敞口厌氧塘	沼液敞口贮存	沼液密闭贮存
甲烷排放/ kgCO_2e	5504.48	293.57	110.60	888.05	321.46	73.39
N_2O 排放/ kgCO_2e	133.01	502.40	353.47	364.30	60.81	41.80
温室气体排放量/ tCO_2e	5.637	0.796	0.464	1.252	0.382	0.115

注: a 为此处根据实际情况,按照粪便中固体的 85% 进入堆肥系统(集约化强制通风堆肥),15% 进入液体处理系统(沼气工程或敞口厌氧塘)进行核算; b 为此处按照沼气工程沼液贮存方式为敞口贮存情况进行核算。

2.5 化肥、能源替代产生的减排与土壤固碳

2.5.1 粪肥、沼液沼渣还田替代化肥

奶牛粪便中含有丰富的有机质、氮、磷、钾等元素,粪污处理后还田,可替代化肥,减少化肥生产过

程的温室气体排放^[30]。表 8 和表 9 显示我国一头成年奶牛年产粪污中的养分含量折算化肥有效成分约 0.185 t ,替代化肥减排潜力可达 $0.604 \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

奶牛粪便处理后还田替代化肥的减排潜力中

95%左右来自氮肥替代。考虑不同粪便管理模式下 N_2O 直接转化因子 (EF_3)、挥发 N 占比 ($Frac_G$) 和淋溶及径流 N 占比 ($Frac_L$) 核算不同粪便管理模式下奶牛粪肥或沼液沼渣还田替代化肥生产的减排效益

如表 10。由于沼气工程处理过程氮损失远低于堆肥过程,沼液沼渣还田利用替代化肥生产减排效益最高可达 $0.575 \text{ tCO}_2\text{e} \cdot \text{头}^{-1} \text{a}^{-1}$,是堆肥后有机肥还田替代化肥生产减排效益的 2 倍以上。

表 8 一头成年奶牛年产粪污中的养分含量及化肥替代潜力

粪污类别	年排放量/t	养分含量(鲜基) /% ^[30]			化肥替代潜力/($\text{t} \cdot \text{头}^{-1} \text{a}^{-1}$)		
		N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
粪便	11.060	0.383	0.218	0.277	0.0424	0.0241	0.0306
尿液	5.402	0.501	0.039	1.087	0.0271	0.0021	0.0587
合计	16.462	—	—	—	0.0695	0.0262	0.0893

表 9 一头成年奶牛年产粪污利用替代化肥生产减排潜力

化肥类别	化肥替代量	化肥生产排放因子 ^[31]	温室气体减排潜力
	($\text{t}_{-N P_2O_5 K_2O} \cdot \text{头}^{-1} \text{a}^{-1}$)	($\text{tCO}_2\text{e} \cdot \text{t}_{-N P_2O_5 K_2O}$)	($\text{tCO}_2\text{e} \cdot \text{头}^{-1} \text{a}^{-1}$)
N	0.0695	8.21	0.571
P_2O_5	0.0262	0.64	0.0168
K_2O	0.0893	0.18	0.0161
合计	0.185	—	0.604

表 10 不同粪便管理模式下成年奶牛年产粪肥或沼液沼渣还田替代化肥的减排效益

粪肥利用模式	粪便管理过程 N 损失率 ($EF_3 + Frac_G + Frac_L$)	化肥替代负减排量 ($\text{tCO}_2\text{e} \cdot \text{头}^{-1} \text{a}^{-1}$)
敞口氧化塘贮存后还田	0.35	0.404
固体堆肥后还田	0.33	0.415
强制通风堆肥后有机肥还田	0.565	0.281
静态堆肥后有机肥还田	0.495	0.321
沼气工程处理后沼液沼渣还田(沼液敞口贮存)	0.1006	0.546
沼气工程处理后沼液沼渣还田(沼液密闭贮存)	0.0506	0.575

2.5.2 沼气替代化石能源

一头成年奶牛年产粪污的最大产甲烷量为 262 kg(见表 5)。按照沼气工程甲烷泄漏 4.38% 估算(沼液敞口贮存的沼气工程)^[10],每年可回收甲烷约 251 kg。

(1) 沼气燃烧供热: 甲烷的净发热值为 $50.4 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[5], 沼气锅炉的供热效率取 90%^[32-33], 则 251 kg 甲烷(625 m^3 沼气)完全燃烧可提供热量 11.39 GJ, 热力排放因子按 $0.11 \text{ tCO}_2 \cdot \text{GJ}^{-1}$ ^[17] 计算, 沼气燃烧供热可实现减排 $1.253 \text{ tCO}_2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2) 沼气热电联产: 按沼气的耗率 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{kWh}^{-1}$ 左右^[34-35]、发电及供热效率比为 1:1^[36-37] 核算, 625 m^3 沼气全部进行热电联产, 可发电 1250 kWh, 同时获得余热 4.5 MJ, 按照电力排放因子 0.6101

$\text{kgCO}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}$ 、热力排放因子 $0.11 \text{ tCO}_2 \cdot \text{GJ}^{-1}$ ^[17] 计算, 可得一头成年奶牛年产粪污通过沼气工程甲烷回收利用热电联产实现替代外购电力减排 0.763 tCO_2 , 同时替代外购热力减排 0.495 tCO_2 , 合计实现减排 $1.258 \text{ tCO}_2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.5.3 粪肥、沼液沼渣还田土壤固碳

粪肥、沼液沼渣等有机肥农用, 可以提高农田土壤有机质含量, 均有利于土壤固碳^[38-41], 部分有机碳转化为土壤的有机组分——腐殖质^[42]。粪肥、沼液沼渣还田的土壤固碳效益体现在 3 个方面: 1) 粪肥或沼液沼渣中的有机碳矿化生成 CO_2 替代了化肥施用农田原有土壤有机质的矿化, 降低了土壤潜在矿化碳库, 有利于土壤有机碳的稳定和累积^[43-44]; 2) 粪肥、沼液沼渣还田后难降解组分形成

腐殖质等稳定结构留存在土壤中,形成土壤碳汇^[38]; 3) 粪肥、沼液沼渣还田后提高土壤肥力,增加植物根系发育,形成土壤固碳^[39]。

按工信部《2020 年国家鼓励发展的重大环保技术装备目录》^[45]的要求,好氧装置的有机物降解率需大于 50%,厌氧发酵装置有机物降解率应为 50%~75%。按粪便管理过程有机质降解率均达到 50% 核算奶牛粪便处理后还田土壤固碳量,可得牛粪有机肥或沼液沼渣还田可以实现土壤固碳 0.4742 tC·头⁻¹a⁻¹,相当于减排温室气体 1.739 tCO₂e·头⁻¹a⁻¹。

需要注意的是,土壤有机碳的动态平衡作为土壤碳循环的基本过程,奶牛粪便处理还田固碳效应还有待进一步深入研究。

3 主要结论

综合考虑奶牛养殖过程与温室气体排放及减排固碳相关的所有活动,统计一头成年奶牛年温室气体排放量如表 11,且得到如下结论:

(1) 不同粪污管理模式之间的温室气体排放差异巨大,以敞口厌氧塘粪便管理情景为基线核算一头成年奶牛年产粪便在处理过程中的减排量,“固

体堆贮”、“堆肥 + 沼气工程”、“堆肥 + 敞口厌氧塘”、“沼液敞口贮存的沼气工程”以及“沼液密闭贮存的沼气工程”5 种处理模式的减排量分别达到 4.841、5.173、4.385、5.255 和 5.522 tCO₂e·头⁻¹a⁻¹; 沼气工程相关模式下可实现粪污管理系统温室气体减排 90% 以上,其中沼液密闭贮存的沼气工程可实现减排 98%,其中甲烷减排贡献占 98.3%,氧化亚氮减排贡献占 1.7%。

(2) 奶牛粪便处理产物利用时,通过化肥替代、能源替代和土壤固碳等途径可以进一步创造减排固碳效益,目前生产水平下,最大减排固碳能力达到 3.611 tCO₂e·头⁻¹a⁻¹,其中 48% 来自农田土壤固碳,40% 来自可再生能源替代,12% 来自化肥替代。

(3) 从饲料到粪便管理利用的全链条考虑奶牛养殖过程与温室气体排放及减排固碳相关的所有活动,沼气工程粪污处理结合三沼利用模式下,温室气体减排效益显著,沼液密闭贮存模式下,一头成年奶牛年温室气体排放量仅为 3.74 tCO₂e·a⁻¹,与最高排放水平的敞口厌氧塘粪污处理后还田利用模式相比减排 65%; 与堆肥结合粪肥还田模式相比减排 30% 以上。

表 11 一头成年奶牛年温室气体排放量统计

排放源	排放量/(tCO ₂ e·a ⁻¹)					
饲料种植	2.742					
饲料运输	0.034					
肠道发酵	3.840					
能源消耗	0.622					
粪便管理	敞口厌氧塘	固体堆贮后还田	堆肥 + 沼气工程 ^a	堆肥 + 敞口厌氧塘 ^a	沼液敞口贮存的沼气工程	沼液密闭贮存的沼气工程
	0.115	5.637	0.796	0.464	1.252	0.382
合计排放	12.875	8.034	7.702	8.490	7.620	7.353
化肥替代	-0.404	-0.415	-0.321	-0.299	-0.546	-0.575
能源替代 ^b	0.000	0.000	-0.209	0.000	-1.253	-1.297
土壤固碳 ^c	-1.739	-1.739	-1.739	-1.739	-1.739	-1.739
净排放	10.732	5.880	5.454	6.452	4.082	3.742

注: a 为按粪便中固体的 85% 进入堆肥系统(集约化强制通风堆肥),15% 进入液体处理系统核算,沼气工程沼液贮存方式默认为敞口贮存; b 为能源替代减排量按照沼气回收后燃烧供热核算,沼液密闭贮存的沼气工程甲烷泄漏为 1%; c 为奶牛粪便经敞口厌氧塘贮存或堆贮后还田,土壤固碳水平按有机肥或沼液沼渣还田固碳水平核算。

(4) 优先选用沼气工程作为奶牛粪便管理方案,同时加强沼气和沼液沼渣的回收利用,是实现奶牛养殖业温室气体是实现奶牛养殖业温室气体尤其

是甲烷减排的有效途径。但是,奶牛粪肥、沼液沼渣还田土壤固碳的核算方法有待进一步完善,农田土壤中有机碳及各活性碳组分的变化与土壤类型、耕

作方式、灌溉方式、作物类别等多种因素的交互作用以及奶牛粪便处理后还田对农田土壤 N_2O 排放的影响等也有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 联合国粮食及农业组织. 粮食及农业状况——气候变化、农业和粮食安全(中文版) [R]. 2016.
- [2] 中华人民共和国生态环境部应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[R]. 2018.
- [3] CCAC&UNEP. Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions [R]. 2021.
- [4] FAO. FAO Statistical Databases [EB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. 2021-12-03/2022-04-08.
- [5] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. 2006.
- [6] 郑永辉, 鞠鑫鑫, 孙辉, 等. 奶牛场温室气体排放与减排措施[J]. 中国乳业, 2021(11): 34-39.
- [7] 王效琴, 梁东丽, 王旭东, 等. 运用生命周期评价方法评估奶牛养殖系统温室气体排放量[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 179-184.
- [8] 白玫, 马文林, 吴建繁, 等. 北京规模化奶牛养殖企业温室气体排放量评估[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(05): 78-85.
- [9] 黄显雷, 师博扬, 张英楠, 等. 基于生命周期视角的种养一体化奶牛场环境经济效益评估[J]. 中国环境科学, 2021, 41(08): 3944-3955.
- [10] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. 2019.
- [11] IPCC. IPCC WGI Fifth Assessment Report [R]. 2013.
- [12] 第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 污染源普查产排污系数手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 3-14.
- [13] 国家发展改革委价格司. 全国农产品成本收益资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019: 322.
- [14] 文兼武. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行) [EB/OL]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/W020190905506438255108.pdf>. 2015-07-06/2022-04-08.
- [16] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国食品、烟草及酒、饮料和精制茶企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行) [EB/OL]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/W020190905506437510365.pdf>. 2015-07-06/2022-04-08.
- [17] 中华人民共和国生态环境部. 关于做好2019年度碳排放报告与核查及发电行业重点排放单位名单报送相关工作的通知 [EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202001/t20200107_757969.html. 2019-12-07/2022-04-08.
- [18] 中国奶业发展中心. 中国奶业白皮书[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- [19] 李胜利, 冯艳秋, 董晓霞, 等. 中国农垦乳业联盟产品标准生鲜乳: T/SFLA0012019 [S]. 北京: 中国农垦经贸流通协会, 2019.
- [20] 卞常红, 卞常淳. 不同饲料精粗比对围产期奶牛生产性能及经济效益的影响[J]. 饲料研究, 2021(21): 18-21.
- [21] 石鹏飞, 郑媛媛, 杨东玉, 等. 种养一体规模化农场温室气体排放量分析[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(03): 207-214.
- [22] 冯仰廉, 方有生, 莫放, 等. 奶牛饲养标准: NY/T 34-2004 [S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2004.
- [23] 刘松. 关中地区奶牛饲料作物环境影响生命周期评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [24] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于政协十三届全国委员会第二次会议第2585号(经济发展类153号)提案答复的函 [EB/OL]. <https://zfxxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=16493>. 2019-08-23/2022-04-08.
- [25] 包维卿, 刘继军, 安捷, 等. 中国畜禽粪便资源量评估相关参数取值商榷[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 314-322.
- [26] 李文哲, 王忠江, 王丽丽, 等. 牛粪水解酸化过程中挥发性固体去除率的影响因素研究[J]. 农业工程技术(新能源产业), 2007(06): 7-10.
- [27] 陈芬, 李伟, 刘奋武, 等. 3种畜禽粪便产气特性差异分析[J]. 环境工程学报, 2015, 9(09): 4540-4546.
- [28] 黄光群, 方晨, 马双双, 等. 奶牛粪微好氧耦合功能膜贮存稳定性与气体减排研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(07): 335-341.
- [29] 段池清, 王嘉珺, 赵雪艳, 等. 堆放奶牛粪便7周甲烷排放通量的研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(11): 39-42+47.
- [30] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国畜禽粪尿中养分资

- 源数量及利用潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(05): 1131-1148.
- [31] 张丹. 中国粮食作物碳足迹及减排对策分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [32] 刘春兰. 沼气锅炉余热回收技术的改造[J]. 中国仪器仪表, 2013(01): 66-68.
- [33] 李文涛, 刘建禹, 李文哲. 小型户用沼气锅炉的设计计算[C]. 中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 2011: 1947-1953.
- [34] 李利, 刘蔚, 张廷军, 等. 生物质沼气热电联产工程应用分析[J]. 中国沼气, 2018, 36(06): 85-88.
- [35] 刘泽庆, 王星, 张瑞娜, 等. 生物燃气热电联产系统能量利用效率分析[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(01): 36-38+42.
- [36] 戴若彬, 陈小光, 姬广凯, 等. 猪场废水处理中的沼气热电联产工程案例[J]. 环境工程学报, 2015, 9(06): 2755-2760.
- [37] 董泰丽, 陈莉. 畜禽粪便资源化循环利用关键技术与模式探讨——以山东民和为例[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(17): 216-220.
- [38] 牛慧婷, 冯炜弘, 尹燕, 等. 沼渣与化肥配施对甘蓝品质产量及土壤质量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(02): 49-53.
- [39] 徐香茹, 骆坤, 周宝库, 等. 长期施肥条件下黑土有机碳、氮组分的分配与富集特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(07): 1961-1968.
- [40] 郑学博, 樊剑波, 周静. 沼液还田对旱地红壤有机质及团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(16): 3201-3210.
- [41] 肖洋, 田里, 路运才, 等. 沼液和沼渣及化肥配施对土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(11): 78-81.
- [42] 夏立忠, 杨林章. 有机废弃物土壤生物降解[J]. 江苏农业科学, 2002(02): 72-74.
- [43] 曲晓晶, 吴景贵, 李建明, 等. 外源有机碳对黑土有机碳及颗粒有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(05): 278-286.
- [44] 田翔, 何天容, 尹德良, 等. 土壤溶解性有机质结构和组成对秸秆、牛粪及其堆肥产品输入的响应特征[J]. 农业资源与环境学报, DOI: 10.13254/j.jare.2021.0068.
- [45] 中华人民共和国工业和信息化部. 国家鼓励发展的重大环保技术装备目录(2020版) [EB/OL]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2020/art_e3740bb44c544e989ba260b8ab13b868.html. 2020-12-28/2022-04-08.