

肉牛生产过程中甲烷(CH₄)排放与减排策略

马燕茹 郑垒琳 余星仪 欧阳晓芳 和晓明

云南农业职业技术学院 畜牧兽医学院

DOI:10.12238/as.v8i7.3174

[摘要] 全球气候变化日益严峻,甲烷(CH₄)作为第二大人造温室气体,其温室效应是二氧化碳的25倍,成为畜牧业特别是肉牛产业可持续发展的重要挑战。反刍动物肠道发酵是CH₄的主要来源,其中瘤胃中产甲烷菌利用氢气和二氧化碳生成CH₄,不仅加剧温室效应,还导致饲料能量损失。牛CH₄排放受多种因素影响,包括瘤胃pH、动物健康、营养利用效率、遗传背景和养殖规模等。为实现减排目标,研究提出多种策略,其中,育种和饲养技术具有长期累积效应,添加剂和营养干预则能快速见效。应综合运用多元技术路径,兼顾动物健康、经济效益和环境保护,实现肉牛产业绿色低碳转型。

[关键词] 肉牛; 甲烷; 减排

中图分类号: TQ241.4 **文献标识码:** A

Methane (CH₄) emissions and reduction Strategies in the Beef Cattle Production process

Yanru Ma Lelin Zheng Xingyi Yu Xiaofang Ouyang Xiaoming He

College of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Yunnan Vocational College of Agriculture

[Abstract] Global climate change is becoming increasingly severe. Methane (CH₄), as the second largest anthropogenic greenhouse gas, has a greenhouse effect 25 times that of carbon dioxide, posing a significant challenge to the sustainable development of the livestock industry, especially the beef cattle industry. Intestinal fermentation in ruminants is the main source of CH₄. Among them, methanogens in the rumen produce CH₄ by using hydrogen and carbon dioxide, which not only aggravates the greenhouse effect but also leads to energy loss in feed. The emission of CH₄ in cattle is influenced by multiple factors, including rumen pH, animal health, nutrient utilization efficiency, genetic background and breeding scale, etc. To achieve the emission reduction targets, various strategies have been proposed in the research. Among them, breeding and feeding techniques have long-term cumulative effects, while additives and nutritional interventions can produce quick results. A comprehensive application of multiple technical approaches should be made, taking into account animal health, economic benefits and environmental protection, to achieve a green and low-carbon transformation of the beef cattle industry.

[Key words] Beef cattle; Methane; Emission reduction

全球气温升高和极端天气事件增加是近几十年来气候变化的核心挑战,自19世纪末,全球平均气温已上升约1.1℃,其中2011-2020年是过去12.5万年最热的十年。高温、冰盖消融引发的海平面上升、生物多样性崩溃导致的生态功能丧失,均在压缩人类文明的生存空间。畜牧业是全球人为温室气体排放的重灾区,反刍动物每年产生约8000万吨CH₄^[1]。农业畜牧产业与食品行业所排放的温室气体占总温室气体排放量的21%-37%,其中反刍动物每年排放的甲烷气体量占人类总体生活中产生甲烷排放量的28%^[2]。在全球气候危机持续加剧的背景下,养牛业因其对温室气体排放的显著贡献,尤其是CH₄的高强度释放日益成为环境政策与可持续农业研究的焦点。CH₄的全球变暖潜能值是CO₂

的25倍,是仅次于CO₂的第二大人造温室气体。反刍动物与单胃动物的区别在于它们能够将纤维植物转化为高质量的动物蛋白,如牛奶和肉类。如果提高反刍动物的动物性能,不仅可以减少资源生产更多的食物,还可以减少负面的环境影响。

1 牛甲烷的产生

牛独特的反刍饮食法导致牛CH₄的高产,反刍动物的胃肠道内维持着丰富而复杂的共生原核和真核微生物,使动物能够将植物多糖和非蛋白氮转化为短链脂肪酸和微生物蛋白,从而获取能量和氨基酸。牛与大约200种其他反刍动物同属一类,包括绵羊、山羊、水牛、鹿、麋鹿、长颈鹿和骆驼。反刍动物的特点是拥有特殊的消化系统,能够分解和消化人类等非反刍动物

无法消化的食物。饲料在反刍动物消化道中被微生物发酵,会产生 CH_4 并排出体外^[3]。 CH_4 的产生与瘤胃中的产甲烷菌有关,瘤胃里含有大量的微生物,细菌、产甲烷菌、真菌、原虫等,在分解可消化物的过程中产生大量的气体。微生物发酵的主要产物包括动物吸收的短链脂肪酸以及二氧化碳和氢气,这些物质会被产甲烷菌转化为 CH_4 废气。微生物发酵是一系列复杂的步骤,首先在微生物酶的作用下,膳食多糖分解成易于消化的糖。此外,经过一系列多步骤的过程后,这些可水解的糖在无氧条件下经过发酵产生挥发性脂肪酸,通常是乙酸盐、丙酸盐和丁酸盐。在整个过程中,会产生元素氢,它起还原剂的作用,通常被称为代谢氢,是副产物。产氢细菌将代谢氢转化为分子 H_2 ,然后产甲烷菌将其转化为 CH_4 。当通过营养、饲养管理、繁殖或遗传学提高动物生产力时,每单位肉或奶的 CH_4 产量就会降低。减少肠道 CH_4 排放可能比减少二氧化碳排放更能迅速地减缓气候变化,减少牛的 CH_4 排放为减少温室气体排放和气候变化提供了机会。生产中温室气体排放,需要牧场系统生产管理各方面的改善^[4]。

2 牛甲烷排放量增加的关键因素

2.1 瘤胃环境

在常规发酵过程中,产甲烷古菌在瘤胃中利用 CO_2 和 H_2 、甲酸或甲醇、或乙酸盐和 H_2 生成 CH_4 。pH值在6.22至6.42范围内的奶牛,甲烷总排放量平均增加46.18%,瘤胃pH值的下降只能用于确定理想的pH值范围,该范围有利于开发减少 CH_4 排放的方法,例如在不损害动物健康的前提下,采用饲养管理技术并补充益生元和益生菌^[5]。

2.2 疾病影响

消除牛病毒性腹泻可减少普通牛群的温室气体排放量。亚临床性乳腺炎可导致肠道和粪便甲烷排放量显著增加。预防临床性乳腺炎是减少温室气体排放、促进奶牛产业可持续发展的有效途径。蹄部病可使温室气体排放量增加,按蹄部损伤类型可评估温室气体排放。酮症在奶牛泌乳初期就会出现,奶牛群中发生酮症可能会增加温室气体排放。改善牛群的健康和生殖状况有助于延长产犊间隔等生育性状,并减少 CH_4 排放。

2.3 营养利用

如果营养物质没有得到充分利用,可能会影响排放强度。血清中 β -羟基丁酸水平较低与母羊 CH_4 排放减少之间存在相关性,此外,在美利奴兰品种中,哺乳期间锌水平升高与 CH_4 排放量减少有关。 CH_4 排放量低的牛相比甲烷排放量高的牛血液中 β -羟基丁酸浓度和总酮体水平较高。

2.4 品种差异

肠道 CH_4 产量的遗传率为0.21。对低甲烷排放奶牛进行基因选育是降低乳制品行业甲烷排放的一种潜在方法。与已得到广泛研究的管理和饲喂策略不同,遗传学的优势在于选育效果具有累积性和永久性。在选育低甲烷排放品系时,甲烷排放量会下降。一些关于 CH_4 产量和强度的遗传相关性已经发表,并且已经纳入荷兰国家等国的育种目标选择指数。部分牛种(如日本黑牛)因基因调控导致瘤胃丁酸代谢增强,血液中 β -羟基丁酸浓度升

高,间接促进 CH_4 排放。通过基因编辑筛选低 CH_4 排放品种,可降低单位产奶量的排放强度。

2.5 规模化养殖

高密度养殖导致粪便集中堆积,在厌氧环境下进一步释放 CH_4 。例如,德国某牛棚因通风不良致 CH_4 浓度过高引发爆炸。传统露天储存或低效沼气池无法有效回收 CH_4 ,需推广覆盖式沼气工程,将粪便 CH_4 转化为能源,如发电或车用燃料。

3 减排策略

3.1 膳食结构

将奶牛日粮的粗蛋白浓度控制在15~18%(干物质基础),可显著提高饲料转化效率,降低 CH_4 排放强度。增加纤维含量可延长瘤胃发酵时间,但可能增加 CH_4 生成;而适度降低淀粉比例能稳定瘤胃pH值,减少氢气的 CH_4 转化路径,使 CH_4 排放降低。通过增加日粮中可发酵淀粉的比例、降低粗纤维含量,可以在一定程度上抑制瘤胃产 CH_4 作用^[6]。

3.2 脂质补充

添加植物油、保护性脂肪,可通过改变瘤胃微生物代谢路径,抑制产甲烷菌活性。不饱和脂肪酸可减少氢气的可利用性,使 CH_4 排放降低。在日粮中添加脂肪是公认的抑制瘤胃产 CH_4 的方法。脂肪作为能量来源可以改变瘤胃微生物的发酵模式,降低 CH_4 排放。在高粗饲料日粮中添加植物油可显著减少 CH_4 能量损失,同时增加瘤胃丙酸的产生。脂肪直接抑制产甲烷菌生长、减少瘤胃原虫数量、在不饱和脂肪氢化过程中消耗氢气,以及在瘤胃形成覆盖膜减少微生物对底物的分解等。不同来源和类型的脂肪添加剂在抑制 CH_4 方面效果略有差异。一般而言,植物油(如玉米油、豆油等)添加能够降低 CH_4 排放并提高瘤胃丙酸比例。脂质添加作为 CH_4 减排手段效果持久,可单独使用或与其他措施配合,实现显著的 CH_4 减排^[2,6]。

3.3 动物区系调控

瘤胃原生动物与产甲烷菌存在共生关系,通过化学或物理方法选择性去除原生动物,可减少 CH_4 生成。原生动物清除后 CH_4 排放量可下降,引入非产甲烷菌(如小袋鼠粪便中的乙酸生成菌),替代产甲烷菌的生态位,可将 H_2 转化为乙酸而非 CH_4 。瘤胃原虫在消化纤维中扮演角色,但它们也为产甲烷菌提供了栖息环境和代谢产物,从而促进 CH_4 生成。完全消除瘤胃原虫往往需要反复添加抑虫剂(如椰子油中链脂肪酸、皂苷提取物等)来维持效果,而且瘤胃原虫的消失可能影响纤维发酵和蛋白降解,对反刍动物营养产生潜在影响。尽管如此,减少瘤胃原虫数量通常不会对动物生产性能造成严重负面影响,并且能降低 CH_4 排放。

3.4 抗甲烷疫苗

美国ArkeaBio公司研发的疫苗通过刺激牛免疫系统产生抗体,抑制瘤胃产甲烷菌活性。早期试验中,接种疫苗的牛 CH_4 排放减少,且无副作用。针对产甲烷菌的关键酶设计疫苗,阻断 CH_4 合成路径。研制抗 CH_4 排放的疫苗是一种新颖的生物学途径,试图从源头上减少反刍动物肠道 CH_4 产生。由于瘤胃内产甲烷菌种类多且与宿主关系复杂,要开发出广谱高效的抗甲烷疫苗面临

诸多技术挑战,如抗体是否能充分作用于瘤胃微生物、免疫效果能否长期维持等。抗甲烷疫苗代表了一种具有潜力的长期减排策略,如果攻克技术难点,有望成为未来低碳畜牧业的重要工具之一。

3.5 植物化合物

添加含溴仿类似物的红藻,通过抑制产甲烷菌的甲基辅酶M还原酶,使 CH_4 排放减少,但需持续投喂。单宁通过结合蛋白质降低瘤胃氨浓度,皂苷破坏产甲烷菌细胞膜,两者协同作用可使 CH_4 减排。许多植物次生代谢产物具有调节瘤胃发酵、抑制产 CH_4 的作用,其中以单宁类和皂苷类化合物最为典型。植物单宁和皂苷作为天然的瘤胃调控剂,在 CH_4 减排方面展现了潜力^[2,6]。

3.6 有机酸

作为氢受体,富马酸可促进丙酸生成,减少氢气向 CH_4 的转化。添加富马酸可使甲烷排放量降低,同时提升饲料能量利用率。向日粮中添加有机酸是降低瘤胃 CH_4 排放的营养策略。在体外瘤胃发酵试验中,富马酸盐的添加能将 CH_4 产生量显著降低。此外,苹果酸、延胡索酸等有机酸也具有类似作用。有机酸添加的一个优势是它们通常不会像某些抑制剂那样对微生物产生毒性,反而可能被微生物利用转化为有益的挥发性脂肪酸。但需要考虑成本和投喂量,有机酸价格较高,大剂量添加在实际生产中经济性较差。

3.7 改良育种

通过基因组选择或基因编辑,筛选 CH_4 排放量低的个体。结合宿主遗传与瘤胃微生物组特征,选育微生物组成更优的牛种,实现 CH_4 减排与生产性能双提升。奶牛个体间的 CH_4 排放存在显著差异,这部分归因于宿主的遗传因素以及其瘤胃微生物区系的差异。遗传学研究表明,反刍动物 CH_4 产量具有一定的遗传力,可通过选择育种逐代加以改良。基因组选择技术的应用使得在大群体中加速鉴定低 CH_4 遗传型成为可能,一些国家已将降低 CH_4 排放的育种目标引入国家级育种计划。需要考虑的是, CH_4 排放与其他生产性状可能存在相关关系(如产奶量、生长速率等),育种方案需综合平衡环保目标与生产效率。

3.8 甲烷抑制剂

使用专门的甲烷抑制剂是当前备受关注的快速减排手段。红藻提取物与溴仿类似物可直接抑制产甲烷菌,但存在剂量依赖性和生态毒性争议。典型代表是3-硝基氧基丙醇添加剂,可特异性抑制瘤胃产甲烷菌的关键酶,从而大幅减少 CH_4 生成。这些添加剂往往在低剂量下即可产生明显效果,但需经过严格评估和监管审批才能应用于生产。一旦安全性和成本等问题得到解决,它们将成为养殖业达成温室气体减排目标的有力工具^[3,4]。

3.9 粪便消化器

阿根廷科学家设计的“牛屁背包”可收集瘤胃甲烷,纯化后

用作汽车燃料,减排同时实现能源化利用。将牛粪置于沼气池中发酵产 CH_4 ,转化为生物能源,减少粪便直接排放的 CH_4 。通过改进粪污处理工艺,可以大幅减少 CH_4 排放,并实现能源回收利用。目前,规模化奶牛场和养牛场日益采用沼气工程,将粪污转化为清洁能源,这既实现了“变废为宝”,又减少了 CH_4 对大气的逸散,一举两得。粪污经固液分离、干燥堆肥等措施处理,可有效减少甲烷排放。粪污 CH_4 减排还包括诸如粪液覆盖储存、粪肥及时还田等方法。这些措施均旨在减少粪便在厌氧环境下滞留发酵的机会,从而抑制 CH_4 的产生。

综上所述,不断增长的全球人口和降低环境污染是反刍动物面临的两大挑战。牛 CH_4 排放作为畜牧业温室气体的重要来源,不仅影响全球气候变化进程,也关系到肉牛产业的可持续发展。在当前“双碳”目标背景下,通过膳食优化、脂质添加、微生物调控、疫苗研发、基因育种、甲烷抑制剂投喂以及粪污资源化处理等多维手段,可有效减少 CH_4 排放,提升饲料能效,降低环境负担。实现 CH_4 减排不仅是畜牧业应对气候变化的必由之路,更是提升畜产品品质、动物福利和农业可持续竞争力的重要抓手。

【项目基金】

牦牛屠宰场环境和屠宰器械微生物对肉表面微生物的影响分析2025J1512; 云南农业职业技术学院博士科研专项项目(BSZX202501); 云南省教育厅华西牛繁育与推广工程研究中心建设项目。

【参考文献】

- [1] Lassen J., Løvendahl P. Heritability Estimates for Enteric Methane Emissions from Holstein Cattle Measured Using Non-invasive Methods[J]. Journal of Dairy Science, 2016, 99: 1959–1967.
- [2] 关诗宇. 三种肉牛温室气体排放量与瘤胃微生物及其代谢功能的比较研究[D]. 吉林农业大学, 2024.
- [3] 刘明, 张恩平, 宋宇轩. 牛舍有害气体排放规律及减排措施研究进展[J]. 家畜生态学报, 2019, 4–0(5): 76–81.
- [4] 赵静雯, 吴慧光. 奶牛生产中甲烷(CH_4)减排的研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2015, 42(11): 3105–3110.
- [5] Antanaitis R, Anskienė L, Rapaliūtė E, et al. Relationship between Reticulorumen Parameters Measured in Real Time and Methane Emission and Heat Stress Risk in Dairy Cows[J]. Animals, 2022, 12: 3257.
- [6] 贾鹏. 荷斯坦泌乳牛的甲烷排放特征及减排调控的机制研究[D]. 兰州大学, 2023.

作者简介:

马燕茹(1985--), 女, 回族, 云南昆明人, 高校讲师, 畜牧兽医方向。