

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.001

引用格式:杜晓迪,王志杰,祁乐,等.反刍家畜胃肠道甲烷排放研究进展[J].草地学报,2026,34(6):1963—1975

DU Xiao-di, WANG Zhi-jie, QI Le, et al. Research Progress on Enteric Methane Emissions from Ruminant Livestock [J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6):1963—1975

反刍家畜胃肠道甲烷排放研究进展

杜晓迪¹, 王志杰¹, 祁乐^{1,2,3*}, 李锦菲¹, 陈小月¹, 李德峰¹, 金晓天¹, 于梦柯¹

(1. 内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古呼和浩特 010021; 2. 蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010021; 3. 内蒙古自治区草地生态学重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010021)

摘要:甲烷(CH₄)是第二大温室气体,反刍家畜胃肠道排放贡献了全球人为CH₄排放源的40%,阻碍了国家应对全球气候变暖和“双碳”目标的实现。本文系统归纳发现,CH₄排放量在不同地区、家畜种类以及饲养阶段之间均存在显著差异。温暖湿润地区CH₄排放数值跨度大于寒冷干燥地区;大体型动物排放普遍较高,如水牛繁殖母畜排放高达110.6 kg·头⁻¹·年⁻¹,而绵羊和山羊则较低(约12~13 kg·头⁻¹·年⁻¹);不同饲养阶段和方式下排放因子范围在6.5~110.6 kg·头⁻¹·年⁻¹。反刍家畜胃肠道CH₄排放测定方法包括:六氟化硫示踪法、呼吸室/面罩法、GreenFeed、体外发酵法、激光技术及模型预测等。减排措施主要包括调整饲料配比、添加剂、调控瘤胃菌群、免疫法、品种改良、优化管理、靶向抑制产甲烷关键酶、调控氢代谢分流及基因编辑重塑瘤胃。未来研究应着重于建立反刍动物全生产周期的甲烷排放精准核算体系,细化不同地区甲烷排放因子,减排可主要从改善饲料组成、结合牧场管理和遗传选育入手,以推动反刍家畜生产可持续发展。

关键词:瘤胃;家畜;反刍动物;温室气体;肠道甲烷

中图分类号:X713

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-1963-13

Research Progress on Enteric Methane Emissions from Ruminant Livestock

DU Xiao-di¹, WANG Zhi-jie¹, QI Le^{1,2,3*}, LI Jin-fei¹, CHEN Xiao-yue¹, LI De-feng¹,
JIN Xiao-tian¹, YU Meng-ke¹

(1. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Ecology and Resource Use of the Mongolian Plateau, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Grassland Ecology, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China)

Abstract: Methane (CH₄) is recognized as the second-largest contributor to greenhouse gas emissions. The enteric fermentation from ruminant livestock accounts for approximately 40% of the total anthropogenic CH₄ emissions. This poses a major obstacle to national efforts in combating global warming and achieving the “dual carbon goals”. In this study, we systematically synthesized the existing knowledge on enteric methane emissions from ruminant livestock and their measurement methods. The results indicated that there were significant variations in CH₄ emission factors across regions, livestock species and feeding stages. There was a larger span of emissions in warmer and humid regions than in colder and drier regions. Larger-bodied animals generally produced higher emissions. For example, female breeding buffaloes emitted up to 110.6 kg·head⁻¹·a⁻¹, whereas emissions from sheep and goats were considerably lower (approximately 12~13 kg·head⁻¹·a⁻¹). Overall, the emission factors ranged widely from 6.5 to 110.6 kg·head⁻¹·a⁻¹ depending on production stages and feeding systems. Key measurement techniques for enteric methane included the sulfur hexafluoride (SF₆) tracer technique, respiration chamber/headbox systems, the GreenFeed system, in vitro fermentation, laser-based methods, and predictive modeling. Promising mitigation strategies encompassed dietary composition adjustments,

收稿日期:2025-07-28;修回日期:2026-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(32260289;U22A20559);内蒙古重点研发与成果转化计划项目(2025YFDZ0062);内蒙古“揭榜挂帅”项目(2024JBGS0007)资助

作者简介:杜晓迪(2000-),女,汉族,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要从事家畜温室气体排放研究,E-mail: dxd0620@163.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: qile@imu.edu.cn

feed additives, rumen microbiota manipulation, vaccine-based methods, genetic improvement, and optimized management practices, as well as emerging approaches such as targeted inhibition of key methanogenic enzymes, modulation of hydrogen metabolic shunting, and remodeling the rumen microbiome through gene editing. Future studies should prioritize establishing accurate methodologies for accounting enteric CH_4 emissions throughout the entire production cycle. In addition, more studies are needed to refine region-specific emission factors. For greenhouse gas mitigation, efforts should focus on improving dietary formulations, integrating farm management, and implementing genetic selection programs to promote the sustainable development of ruminant livestock production.

Key words: Rumen; Livestock; Ruminants; Greenhouse gases; Intestinal methane

温室气体排放所导致的全球变暖已成为全世界关注的焦点问题。甲烷(CH_4)是其中一种强效温室气体,在大气中的存留时间约为9年,自前工业化时代以来,人为甲烷排放导致大气中甲烷的浓度增加了一倍以上,且近年来增长迅速^[1]。在人为甲烷排放来源中,化石燃料使用、农业活动和废物处理合计占比约60%^[1]。 CH_4 的增温效应比 CO_2 高近28倍,加之全球对牛奶和牛羊肉等畜产品消费需求的持续上升,预计畜牧业相关温室气体排放将呈现快速增长趋势^[2]。据预测,2050年全球牛肉、羊肉和牛奶的消费量将比2010年分别增长约57.1%,72.4%和80.6%^[3]。

畜牧业家畜温室气体排放主要来源于家畜胃肠道 CH_4 排放,减少胃肠道 CH_4 排放对反刍动物生产的可持续发展至关重要。各国呼吁节能减排,减缓温室效应,在此形势下,开展家畜肠道 CH_4 的排放测定、因子确定及减排措施研究,对于推动低碳畜牧业发展至关重要。本文拟对近年来反刍家畜 CH_4 排放特征、测定方法及减排措施进行总结和归纳,并对今后可能的研究方向提出建议。

1 反刍动物瘤胃产甲烷特征

反刍动物瘤胃发酵产生的 CH_4 作为温室气体排放的主要来源,不仅加剧全球变暖,还与膳食能量损失紧密相关,致使饲料效率降低。因此,为确保未来可持续动物生产,减少反刍动物 CH_4 排放刻不容缓。鉴于 CH_4 排放对环境的负面影响,过去几十年间 CH_4 减排措施已逐步涌现^[4]。瘤胃及其微生物有助于利用哺乳动物酶无法获得的底物,为宿主反刍动物产生可吸收的底物。摄入和反刍期间以及瘤胃中的物理分解使饲料更容易获得微生物定植。形成的单糖被微生物用来产生挥发性脂肪酸(Volatile fatty acids, VFA),主要是乙酸盐(用于脂肪酸合成)、丙酸盐(用于葡萄糖合成)和丁酸盐,它们主要

用作反刍动物体内的能量来源。反刍动物在网胃和瘤胃之间有一个过滤系统,以延长缓慢发酵中性洗涤纤维的瘤胃保留时间,使微生物有效地发酵和分解植物纤维。碳水化合物是细菌的主要能量来源^[5],反刍动物瘤胃环境中,微生物的发酵过程会生成大量作为 CH_4 合成原料的物质,包括氢气、二氧化碳、甲酸盐以及乙酸盐等。其中,氢气和 CO_2 是主要底物, $\text{CO}_2\text{-H}_2$ 是瘤胃中 CH_4 生产的主要途径,约占 CH_4 生产的82%。因此,微生物发酵过程、氢气产生和瘤胃中产甲烷古菌形成的 CH_4 之间存在密切联系^[6-8]。瘤胃中 CH_4 的产生根据发酵反应所利用的底物不同,有还原二氧化碳、乙酸和甲基营养3种途径^[9-10]。 CO_2 通过甲酰基、亚甲基和甲基中间体被作为主电子供体的 H_2 依次还原为 CH_4 ,并且1 mol CO_2 和4 mol H_2 可以产生1 mol CH_4 和2 mol H_2O 。反刍甲烷短杆菌(*Methanobrevi bacterium ruminantium*)和运动甲烷微菌(*Methanococcus mobile*)被认为是瘤胃中的主要产 CH_4 菌。尽管乙酸盐在瘤胃中高度可用,但由于乙酸盐利用产 CH_4 荚膜的生长速率低、瘤胃流出速率高,以及乙酸盐对 H_2 的亲合力低,因此乙酸碎屑对 CH_4 的产生不太重要。甲酸盐被许多氢营养瘤胃产甲烷菌用作 CH_4 生产的替代底物。然而,它仅占瘤胃 CH_4 总产量的16%~18%。甲醇和甲胺中的甲基可用作瘤胃产 CH_4 的另一类底物,但只有3%~5%的 CH_4 通过该途径产生。在瘤胃 CH_4 产生的3种途径中,可以发现抑制 $\text{CO}_2\text{-H}_2$ 还原过程是最重要的^[11]。在反刍动物瘤胃发酵的起始期和旺盛期以 $\text{CO}_2\text{-H}_2$ 还原途径为主,但是在发酵后期,与脂肪酸和醇类等相关联的还原途径会生成大部分的 CH_4 ^[12]。瘤胃微生物主要分为细菌、原生动物和厌氧真菌^[13]。瘤胃微生物使宿主能够通过微生物介导的发酵有效地消化纤维饲料,日粮碳水化合物可以被瘤胃微生物广泛发酵,产生许多最终产物:主要包括挥VFA, CO_2 和 H_2 ^[14]。放牧家畜 CH_4 生成过程中的任何一个环节发生变化,都会影

响 CH_4 产生和排出^[15]。包括家畜自身的品种、性别、体重、妊娠期与非妊娠期、年龄等生理因素;家畜瘤胃内环境、牧草的种类与营养物质含量、日粮精粗比、饲养方式等外部因素^[16-18],不同放牧率和放牧季节也会通过改变牧草产量,营养品质,环境温度及湿度来间接影响家畜瘤胃 CH_4 排放量。有关研究显示,在饲料中添加添加剂,营养素,或热带假丝酵母、植物乳酸杆菌、地衣芽孢杆菌这类益生菌,可以在一定程度上对瘤胃发酵性能进行提升,对瘤胃发酵类型进行改善,还可以提高饲料的能量利用率,从而降低家畜的 CH_4 排放量^[19-20]。

2 CH_4 排放测定方法

反刍动物 CH_4 排放测定方法包括直接测定法和间接测定法两大类。直接测定法包括:六氟化硫示踪法、呼吸室法、呼吸面罩法、聚乙烯隧道技术、激光技术、自动头罩系统(Automated head-chamber, AHC)测定以及 GreenFeed 系统测定法;间接测定法有体外发酵法、无人机遥感技术、IPCC 法和模型预测法^[21]。此外还有便携式蓄积室法,通风罩技术和嗅探器法等。

2.1 直接测定法

2.1.1 呼吸室法 作为一种成熟且稳定的测量手段,呼吸室法能够在相对短的周期内,精准测定反刍家畜瘤胃内排放的气体成分。可以测量在一定时间里呼吸室内 CH_4 气体的浓度变化^[22]。呼吸室主要有封闭式和开放式,其中开放式集气室在实际生产实践中应用广泛,其原理为:吸入的空气通过在室内循环,使室内空气的 CH_4 混合均匀,同时以进气相同速率排出空气,并对吸入和排出气体进行采样分析。 CH_4 排放量为气流量和排出气体与吸入气体之间浓度差的乘积^[23]。该结构可确保外部环境因素(温度、气体条件)保持恒定,实现多只实验动物呼出气体在同一时间、同一地点的同步完整采集。

2.1.2 六氟化硫示踪法 六氟化硫(SF_6)示踪技术近年来成为全球估算瘤胃 CH_4 排放的首选方法^[24]。该技术首先用于反刍动物营养研究,依赖于使用渗透管释放少量 SF_6 作为已知速率的示踪剂,一旦它被注入瘤胃,释放的 SF_6 与瘤胃发酵气体混合,可作为瘤胃产生 CH_4 的示踪剂。安装在头带上

并连接到真空容器上的毛细管用于从动物身上收集瘤胃发酵气体的代表样品。在相关研究描述的方法中,使用渗透管中 SF_6 的已知日释放速率(Q_{SF_6} , $\text{mol} \cdot \text{d}^{-1}$),以及收集的气体样品中 CH_4 和 SF_6 的混合比率(有时指定为浓度)来估计 CH_4 的日排放速率(Q_{CH_4} , $\text{mol} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{head}^{-1}$), CH_4 和 SF_6 的浓度必须以相同的单位表示,例如 $\text{pmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (ppt)。

$$Q_{\text{CH}_4} = Q_{\text{SF}_6} \frac{[\text{CH}_4]}{[\text{SF}_6]}$$

其中,通过将每个渗透管置于 39°C 的“温度浴”中来确定,并且渗透管“常规称重,直到确定准确的损失率”。

$$R_{\text{CH}_4} = \frac{R_{\text{SF}_6}}{6.518} \times \frac{[\text{CH}_4]}{[\text{SF}_6]} \times 10^3$$

R_{CH_4} 为反刍动物 CH_4 排放速率, $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$; R_{SF_6} 为 SF_6 从渗透管中测量的释放速率, $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$; 6.518 为 SF_6 的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $[\text{CH}_4]$ 为样品气中 CH_4 的浓度, 10^{-6} (摩尔分数); $[\text{SF}_6]$ 为样品气中 SF_6 的浓度, 10^{-12} (摩尔分数)。

2.1.3 呼吸面罩法 面罩是一个由橡胶材料制成的圆柱筒,高度为 22 cm,上下直径为 17 cm。筒体有两个对称的反向气体截止阀,以确保绵羊能够自由呼吸,将气体顺利地呼出到气囊中。气流装置通过一根柔性无泄漏管将安全气囊连接到面罩上。当使用呼吸面罩收集气体时,绵羊的口鼻被面罩覆盖,通过监测面罩内外呼吸的气体的 CH_4 的浓度和一段时间内气体流速与时间的乘积,即流动气体通过的数量来测量反刍动物的 CH_4 排放量^[25]。

2.1.4 聚乙烯隧道技术 聚乙烯隧道是一种大型可充气或帐篷式隧道,配有端墙和大直径端口,用于测量反刍家畜(绵羊)的胃肠道 CH_4 排放,动物在隧道内,通过连续监测进出空气的浓度来测定胃肠道 CH_4 排放。其核心是通过大型聚乙烯隧道模拟近自然放牧环境,利用小型风洞和气相色谱仪监测进出口 CH_4 浓度差,结合空气流量计算排放量,同时通过自动系统记录动物进食、反刍等行为以分析排放机制^[26]。

2.1.5 激光技术 激光技术原理是利用激光对 CH_4 特征吸收光谱的特异性作用,通过分析激光穿过气体后的强度衰减直接测定 CH_4 浓度,可用于畜禽牧场多组有害气体同步监测及自然放牧动物动态排放评估。测定反刍家畜胃肠道 CH_4 的激光设备包括可调谐二极管激光光谱技术装置(Tunable

diode laser absorption spectroscopy device, TDLAS)、激光甲烷检测器(Laser methane detector, LMD)及高灵敏度激光气体检测CH₄分析仪。其中,TDLAS设备通过调节激光波长至CH₄特征吸收光谱,依据光强衰减直接测算CH₄浓度;LMD则通过激光束扫描动物呼出气体或环境CH₄羽流,实时分析光谱获取浓度数据,已用于自然放牧山羊的CH₄排放评估,能动态捕捉排放变化;高灵敏度激光分析仪采用双波长红外技术并补偿气压,测量范围0%~10%、分辨率1 ppm,常作为畜禽能量代谢系统的选配设备,适用于精准量化肠道发酵CH₄^[27]。

2.1.6 AHC系统测定法 AHC系统属于头呼吸室带料斗的气体排放监测设备,其测定方式为:当动物头部靠近传感器时,通过耳标识别系统识别,系统会投放少量“诱饵”饲料吸引动物将头部靠近传感器,以测量相较于环境空气更高浓度的CH₄和CO₂,以及动物呼吸产生的气体流量和气流速率,且头部需至少定位3 min,动物离开后系统自动停止气体循环以结束实验,通常单次实验持续4~7天^[28]。

2.1.7 GreenFeed系统 GreenFeed系统是一种静态短期测量设备,通过射频识别技术识别动物,利用红外传感器监测头部位置,结合非色散红外传感器测量排气中CH₄和CO₂浓度,搭配抽气扇测量气流,以此估算个体的每日CH₄排放量;期间,动物可自由活动,自愿进入采样罩获取饲料奖励以维持头部位置,每次测量约3~7 min,需多次测量,以从有限的短期测量数据推算出完整的每日排放模式。一个单元可服务多头动物,制造商建议放牧时15~20头·单元⁻¹、舍饲时20~25头·单元⁻¹,数据可通过移动通信实时获取,且需每周校准传感器^[29]。

2.2 间接测定法

间接测定法来测定反刍家畜温室气体排放量相对前两种方法实验材料和操作要求都更低,但是不同地区不同饲养阶段家畜准确性不一定能可靠保证。

2.2.1 体外发酵法 实验材料为装有瘤胃插管的牛或羊,用于获取瘤胃液。向实验家畜提供含有饲料的混合饮食,如切碎的苜蓿干草(*Medicago sativa*),羊草(*Leymus chinensis*)或隐子草(*Cleistogenes serotina*),在喂食后一定时间内收集新鲜瘤胃液,使用插入瘘管的100 mL注射器,并从瘤胃内的多个部位收集瘤胃液。将瘤胃液保存在预热至

39℃的玻璃瓶中,然后在39℃的培养箱中运送到实验室。瘤胃液通过4层布过滤以去除颗粒。在过滤过程中,流体处于恒定的CO₂流动中。将代表性瘤胃液样品转移到塑料小瓶中,然后用4.5 mL含有福尔马林(400 mL·L⁻¹)的生理盐水(9 mL·L⁻¹)和亚甲蓝(4 mL·L⁻¹)^[30]。将所有底物样品(苜蓿干草或牧草的混合物)在高温下烘干24 h,然后在旋风磨机下研磨并通过一个1 mm的筛子。将干燥的底物放入培养瓶中,加入缓冲溶液,pH值为6.8左右,并加入25 mL瘤胃液,留下足够的顶空体积。并将瓶子放置在保持在39℃的水浴中,在开始发酵之前,用CO₂冲洗发酵瓶的顶部空间^[31]。对于气体收集,模块的排气管通过内径为22 mm,长度为22 cm的延长管连接到空气收集袋和一个三通旋塞阀。气体收集袋的容量一般为400 mL,使用3层不透气箔和少量水管工硅胶被放置在每个气体收集袋的两个角落上,作为隔膜,使针头能够进入每个气体收集袋^[32]。

2.2.2 IPCC法 IPCC测量CH₄排放的方法参考了《2006年IPCC国家温室气体估算指南》。根据内蒙古地区的养殖情况,估算奶牛和肉牛肠道CH₄排放采用IPCC推荐方法2,即根据牲畜总能量摄入计算肠道CH₄排放因子。计算公式如下:

$$EF = GE \times \frac{Y_m}{100} \times \frac{365}{55.65}$$

式中:EF为排放因子,kg·头⁻¹·年⁻¹即每个动物每年排放的CH₄重量;GE为摄入总能,(10⁶ J·d⁻¹);Y_m为CH₄转化因子,%;55.65为(10⁶ J·kg⁻¹)CH₄的能量含量。

绵羊、山羊和非反刍动物(马、骡、驴)及非家禽单胃家畜(猪)等非关键排放源采用方法1。源自家畜肠道发酵CH₄排放量计算公式如下:

$$CH_{4\text{肠道}} = \sum \frac{EF(T) \times N(T)}{10^6}$$

式中:CH₄肠道为肠道发酵CH₄排放量,Gg·年⁻¹,即肠道发酵的甲烷重量(1 Gg=10⁹ g);EF(T)为来自某种限定家畜的排放因子,kg·头⁻¹·年⁻¹;N(T)为家畜类别T的数量;T为家畜的类别^[33]。

2.2.3 无人机遥感技术 无人机遥感技术通过搭载气体传感器,如基于调谐吸收光谱技术的传感器,来检测空气中的CH₄浓度。它利用光谱吸收原理,分析特定波长的光在通过含有CH₄的空气时的吸收情况,从而确定CH₄的浓度。无人机通过在养殖场上空飞行,采集不同位置的CH₄浓度数据,并结

合风速、风向等气象参数,通过一定的模型和计算方法来估算整个养殖场的 CH_4 排放量^[34]。

2.2.4 便携式蓄积室法 为了减少反刍动物的 CH_4 排放,需要了解与这些排放相关的因素,以及使用低成本、准确的技术测量自然环境中动物的能力。其中一种技术是使用便携式堆积室(Portable accumulation chambers, PAC),这是一种现场采样方法,可以在50 min内测量绵羊的气体排放。便携式累积室能够对气体排放进行短期现场测量,包括 CH_4 、 CO_2 和小型反刍动物的 O_2 消耗。PAC测量作为一种快速低成本的方法来估计绵羊 CH_4 排放的育种值具有相当大的价值。是一种可以同时测量气体浓度和通量的现场采样方法^[35]。该方法包括将绵羊放在一个简单且可运输的密封容器中40 min~1 h,并使用连接在单向阀上的监测装置定期测量累积的气体浓度^[36]。

2.2.5 嗅探器法 嗅探器法是一种通过在奶牛饲槽附近安装气体采样口,直接测量呼气中 CH_4 和 CO_2 浓度的点采样方法。该方法通过非分散红外传感器持续采集 CH_4 和 CO_2 浓度,并计算平均 CH_4 浓度或 CH_4/CO_2 比值。虽然设备简单、易于在农场部署,但其测量结果易受奶牛口鼻位置、气流扰动及饲槽结构的影响,导致个体间变异较大。嗅探法测定的 CH_4 和 CO_2 浓度与各自的气体通量相关性较差,气体浓度与其他生物参数如干物质摄入量或体重之间的关系较弱^[37]。

2.2.6 通风罩技术 测量牛瘤胃和呼吸所产生的气体排放的一个特别有效的设备是开路通风罩系统。这种类型的系统比全动物呼吸室具有成本优势,并且在考虑 CH_4 排放^[6]时,比六氟化硫测量技术具有精度优势^[38]。 CH_4 罩(Methane hood, MH)系统是一种定量牛的 CH_4 排放的新方法。MH系统测量从罩下排出的 CH_4 浓度,设计为部分封闭饲料仓上方的体积。MH系统可用于估计在一个群体饲养环境中的单个肉牛的 CH_4 产量^[39]。这些方法各有优缺点,具体内容见表1。

3 甲烷排放量和排放因子

3.1 国内外不同地区反刍动物肠道甲烷排放量

奶牛、绵羊、山羊、红鹿和牦牛的 CH_4 排放量因地区不同而不同(表2)。不同地区的发达国家(如英国、德国、新西兰等)和发展中国家(如中国不同地

区、巴西等)在绵羊、奶牛等动物肠道发酵 CH_4 排放量上存在显著差异。对于绵羊这一反刍家畜来说,新西兰部分地区的绵羊肠道发酵 CH_4 排放量异常高,能达到 $9.22\sim 13.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,远超其他国家(如英国、澳大利亚),可能是由于不同国家养殖模式、饲料结构、动物品种等因素,使得排放量有明显差异。但新西兰绵羊肠道发酵 CH_4 排放量有巨大差异,数值从 $0.49\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 到 $13.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,产生原因包括:首先研究对象品种存在差异,前者是经选育的高低 CH_4/DMI 品系绵羊,后者是普通绵羊;其次,实验条件不同,包括牧场环境、牧草质量和季节等,这些因素影响绵羊饮食和代谢;另外,测量方法也有区别,两个试验分别采用六氟化硫示踪技术和呼吸室测量法,其原理和精度不同,综合导致了排放量差距较大^[42-43]。中国不同区域的动物肠道发酵 CH_4 排放量差异也较为显著,如青藏高原高寒牧区和内蒙古呼伦贝尔市,绵羊排放量分别为 $0.32\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $1.29\sim 1.84\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。张家口市沽源县以及呼伦贝尔市的绵羊排放量也较高,分别可以达到 $1.29\sim 1.84\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $1.29\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,这可能与测定时间有关。而同种动物在不同地区也存在排放差异,以绵羊为例,在英国、新西兰、中国等不同国家和地区,其 CH_4 排放量不同,这表明即使是同一种动物,由于地域和气候差异、饲料结构、动物品种选育等差异, CH_4 排放可能也会有较大不同。

3.2 国内反刍家畜肠道甲烷排放因子的确定

排放因子是一个经过科学测算的平均值,它反映的是在特定条件下(如某种家畜、某个地区、某种饲养方式)甲烷排放的典型水平或普遍规律,甲烷排放因子可以间接反映甲烷排放量的高低。无论何种饲养方式,牛(奶牛、非奶牛、水牛)肠道 CH_4 排放因子始终显著高于羊(绵羊、山羊),尤其是放牧饲养方式下,其 CH_4 排放因子最高,奶牛和非奶牛肠道 CH_4 排放因子分别达到了 $99.3\text{ kg}\cdot\text{头}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$ 和 $85.3\text{ kg}\cdot\text{头}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$ (表3)。除此之外,不同牲畜种类肠道 CH_4 排放因子存在显著差异,处于繁殖母畜和其他成年阶段的水牛肠道 CH_4 排放因子最高,分别达到了 $110.6\text{ kg}\cdot\text{头}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$ 和 $72.3\text{ kg}\cdot\text{头}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$,其次是肉牛和奶牛。而相较之下绵羊和山羊的肠道 CH_4 排放因子较低,繁殖母畜阶段分别只有 $12.0\text{ kg}\cdot\text{头}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$ 和 $13.1\text{ kg}\cdot\text{头}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$ 。还可以看出饲养阶段对肠道 CH_4 排放存在显著影响,正处于繁殖

表 1 甲烷测定方法比较

Table 1 Comparison of methane determination methods

方法 Method	优点 Advantage	缺点 Defect	参考文献 Reference
呼吸室法 Respiration chamber	方式较为成熟和稳定,测定时间短	操作复杂、气体回收量不稳定、误差较大	[2,40]
六氟化硫示踪法 Sulfur Hexafluoride (SF ₆) tracer technique	对环境和人类生产生活影响较小	对环境风速有一定的要求 (有学者认为该方法在有风环境中不适用)	[24,41]
呼吸面罩法 Respiratory mask technique	操作简单,易实现,成本低	误差较大	[25]
聚乙烯隧道技术 Polyethylene tunnel technique	能够模拟自然放牧条件,同时测量多种参数并记录动物行为	环境控制困难,难以精确调控隧道内的温度和湿度;难以评估不同处理之间的甲烷排放差异;测量结果可能偏低	[26]
激光技术 Laser-based technique	精度高、灵敏度高、不干扰动物自然行为活动,能实时监测温室气体的变化量,对舍饲和放牧条件下反刍动物温室气体排放监测都适用	易受天气影响,应用成本较高,需要专业的设备和人员进行操作和维护,且在复杂环境下的稳定性和可靠性可能受到一定挑战	[27]
AHC 仪器测定法 Automated Head-Chamber (AHC) system	具有自动动物识别功能和较高的灵敏度	易受动物适应性影响,数据处理复杂及运营成本较高	[28]
Greenfeed 系统 Greenfeed system	可用于估算个体奶牛每日甲烷总排放量、对动物干扰小、可服务多头动物	测量准确性欠佳,受测量次数和时间限制,且易受饮食和环境影响	[29]
体外发酵法 <i>In Vitro</i> fermentation	不受试验动物的限制,应用广泛	实验条件要求严格(严格厌氧)	[32]
IPCC 法 IPCC Method	操作方便、成本低	精度低	[33]
无人机遥感技术 Drone-based remote sensing	快速、大范围检测、其检测过程不依赖于固定的检测点位	检测精度受到环境因素(如风速、温度等)的影响,且需要专业的设备和人员进行操作和数据处理,无人机的续航能力和载重限制影响检测的持续时间和范围	[34]
便携式蓄积室法 Portable accumulation chamber (PAC) technique	成本低、速度快	受到环境因素(如试验地点、动物年龄、饮食)的影响	[37-38]
嗅探法 Sniffer method	—	CH ₄ 和CO ₂ 浓度与各自的气体通量相关性较差,气体浓度与其他生物参数如干物质摄入量或体重之间的关系较弱	[37]
通风罩技术 Ventilated hood technique	成本低,精度高	时间长	[38]

母畜阶段的牲畜肠道CH₄排放量都高于其他饲养阶段,例如奶牛繁殖母畜阶段的排放因子为109.9 kg·头⁻¹·年⁻¹,其他成年阶段为58.6 kg·头⁻¹·年⁻¹,而当年生阶段的肠道排放因子仅为21.9 kg·头⁻¹·年⁻¹。除此之外,其他成年阶段的肠道CH₄排放因子显著高于当年生阶段,但普遍低于繁殖母畜阶段,这说明幼年牲畜的肠道CH₄排放量较低。当年生阶段的反刍家畜处于快速生长阶段,其瘤胃微生物区系不如成年动物复杂和稳定,除此之外,在幼畜的饲料消化过程中,相对较少的碳水化合物被发酵为甲烷前体物(如乙酸),而更多地被用于合成其他代谢产物(如丙酸),因此,它们的瘤胃发酵效率相对较高,产生的CH₄排放量可能较低^[6]。其他成年阶段的反刍家畜的代谢需求相对稳定,主要用于维持自身生命活动,没有繁殖活动带来的额外能量消耗。因此,其肠道产生的CH₄排放量可能介于当年生和繁殖母畜之间。而繁殖母畜阶段的反刍家畜在繁殖活动中采食量和能量代谢强度明显提高,产生的CH₄就会显著增多。

4 调控措施

目前国内外关于减少家畜瘤胃CH₄排放的相关研究并不是很多,探索降低家畜瘤胃CH₄排放是目前的研究热点。相关学者已经提出以下几个方法。

4.1 改变饲料组成

吴爽等^[59]研究发现不同粗饲料组合类型对家畜瘤胃CH₄的排放有不同的影响,其中羊草与玉米秸秆的组合使用可降低奶牛瘤胃CH₄的产量,提高日粮氮的利用^[59]。董利锋等^[60]实验结果发现将日粮中的中性洗涤纤维与非纤维碳水化合物水平从0.60增加至0.90时,CH₄及其排放强度显著增加。研究中观测到,乙酸的相对比例增加6.0%,与之形成反差的是,丙酸的相对比例显著下降了28.1%,两者的比值随之增加了26.6%,这一发酵类型的转变最终使CH₄产量提升了13.3%。尽管如此,这类饲料营养调控措施的应用效果重复性不佳,体外与体内实验的结论时常难以统一。另外,针对品质良

表 2 国内外不同地区反刍动物肠道甲烷排放量

Table 2 Enteric methane emissions from ruminants in different regions worldwide 单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$

	地区 Region	奶牛	羊驼	绵羊	红鹿	牦牛	测定方法
		Dairy cow	Alpaca	Sheep	Red deer	Yak	Method
发达国家 Developed countries	英国(雷丁大学农业研究中心) University of Reading, Agricultural Research Centre, UK	0.61~0.81 ^[29]	—	0.17~0.42 ^[44]	—	—	奶牛:呼吸室法、六氟化硫示踪法和 GreenFeed 系统 ^[29] 。 绵羊:通风罩技术 ^[44]
	英国西南部(北怀克农场) North Wyke Farm, South West England, UK	—	—	0.33 ^[26]	—	—	通风罩技术 ^[26]
	德国霍恩海姆大学和英国阿达斯 University of Hohenheim, Germany and Rothamsted Research, UK	—	—	0.11~0.29 ^[45]	—	—	呼吸室法和体外发酵法 ^[45]
	欧洲荒地(挪威、瑞典、冰岛、英国等国家) European heathlands (including Norway, Sweden, Iceland, UK, etc.)	—	—	0.23~0.33 ^[46]	0.22~0.35 ^[46]	—	呼吸室法和体外发酵法 ^[46]
	澳大利亚 Australia	—	—	0.27~0.28 ^[47]	—	—	呼吸室法 ^[47]
发展中国家 Developing countries	新西兰(奥朗伊农场) Aorangi Farm, New Zealand	—	—	0.49 ^[42]	—	—	六氟化硫示踪法 ^[42]
	新西兰 New Zealand	—	—	9.22~13.61 ^[43]	—	—	呼吸室法 ^[43]
	秘鲁(普诺地区) Puno Region, Peru	—	0.57 ^[48]	0.77 ^[48]	—	—	六氟化硫示踪法 ^[48]
	巴西(米纳斯吉拉斯州伊加拉佩市) Igarapé, Minas Gerais, Brazil	—	—	0.34~0.65 ^[49]	—	—	呼吸室法 ^[49]
	中国(青藏高原) Qinghai-Tibet Plateau, China	—	—	0.35~0.58 ^[4]	—	—	六氟化硫示踪法 ^[4]
	中国(中国农业科学院) Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS), China	—	—	1.49 ^[50]	—	—	呼吸室法 ^[50]
	中国(青藏高原) Qinghai-Tibet Plateau, China	—	—	—	—	0.29~0.49 ^[51]	六氟化硫示踪法 ^[51]
	中国(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所、新疆畜牧科学院饲料研究所) Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS; and Feed Research Institute, Xinjiang Academy of Animal Science, China	—	—	0.76~0.94 ^[52]	—	—	六氟化硫示踪法 ^[52]
	中国(河北省张家口市涿源县) Guyuan County, Zhangjiakou City, Hebei Province, China	—	—	1.29~1.84 ^[53]	—	—	IPCC 法 ^[53]
	中国(内蒙古自治区呼伦贝尔) Hulunbuir, Inner Mongolia Autonomous Region, China	—	—	1.29 ^[54]	—	—	呼吸面罩法 ^[54]
	中国(青藏高原高寒牧区) Alpine pastoral area of the Qinghai-Tibet Plateau, China	—	—	0.32 ^[55]	—	—	呼吸室法 ^[55]
	中国(甘肃省) Gansu Province, China	—	—	0.37~0.55 ^[56]	—	—	呼吸室法 ^[56]

表 3 国内反刍家畜肠道甲烷排放因子

Table 3 Enteric methane emission factors of domestic ruminant livestock 单位: $\text{kg}\cdot\text{头}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$

	饲养方式 Feeding system		不分饲养方式 Overall				饲养阶段 Production stage				
	奶牛 Dairy cow	非奶牛 Non-dairy cow	水牛 Buffalo	绵羊 Sheep	山羊 Goat	骆驼 Camel	奶牛 Dairy cow	肉牛 Beef cow	水牛 Buffalo	绵羊 Sheep	山羊 Goat
规模化饲养 Intensive farming	88.1 ^[57]	52.9 ^[57]	70.5 ^[57]	8.2 ^[57]	8.9 ^[57]	—	当年生 Weaner	21.9 ^[58]	32.3 ^[58]	22.5 ^[58]	6.5 ^[58]
农户散养 Smallholder farming	89.3 ^[57]	67.9 ^[57]	87.7 ^[57]	8.7 ^[57]	9.4 ^[57]	46 ^[57]	其他成年 Other adults	58.6 ^[58]	69.2 ^[58]	72.3 ^[58]	—
放牧饲养 Grazing system	99.3 ^[57]	85.3 ^[57]	—	7.5 ^[57]	6.7 ^[57]	—	繁殖母畜 Breeding females	109.9 ^[58]	80.8 ^[58]	110.6 ^[58]	12.0 ^[58]

好的牧草,筛选与其具有协同作用、能提升发酵效率的功能性瘤胃微生物菌株,既能优化瘤胃挥发性脂肪酸的生成模式,又能提升营养物质的消化率与能量利用效率,最终体现为干物质采食量与奶产量的同步增加^[61]。

4.2 添加剂的使用

根据金恩望等^[62]的研究,为探究植物精油对瘤胃体外发酵及 CH_4 生成的影响,实验在饲料中分别添加不同浓度的茶树油、肉桂油和丁香油,并采用体外发酵产气法进行分析。结果显示,当 3 种精油

达到最高添加剂量(茶树油和丁香油为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 肉桂油为 $1500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时,不仅能够有效抑制 CH_4 生成,还能降低氨态氮浓度,展现出较强的瘤胃发酵调控能力。不过,该处理同时导致乙酸和丙酸浓度有所下降。这些植物精油中的脂类成分抑制 CH_4 产生的机制,主要涉及促使不饱和脂肪酸发生氢化反应,或是直接抑制产 CH_4 菌的生长代谢。另有研究指出,在反刍动物的饲料中,每添加1%的油脂或脂肪酸,可使单位干物质采食量对应的 CH_4 排放量减少4%~5%^[63]。国外研究发现,在原料中添加洛伐他汀可能是通过减少产 CH_4 古菌数量来减轻瘤胃 CH_4 排放的一种策略^[64]。金合欢树皮单宁等单宁类植物添加剂对缓解 CH_4 排放的长期功效也已被证明^[65]。

有相关研究表明,饲用酶制剂能够提高动物的生产性能、营养物质(如蛋白质等)的消化率,降低瘤胃发酵过程和粪便管理过程中的 CH_4 和氧化亚氮排放量,从而减轻对环境的污染^[66]。3-硝基氧丙醇(3-Nitrooxypropanol, 3-NOP)是一种靶向性甲烷抑制剂,其作用机理在于它能特异性抑制产甲烷古菌体内的关键酶—甲基辅酶M还原酶;该酶是催化甲烷生成最后一步且不可绕过的核心酶,3-NOP通过竞争性结合其活性中心,阻断甲烷的合成途径,从而直接抑制甲烷的产生。与此同时,被抑制的氢代谢途径转而促进丙酸的生成,导致瘤胃发酵模式改变(乙酸/丙酸比例下降)。在泌乳奶牛上的应用表明,每日投喂500 mg和2500 mg 3-NOP可分别使甲烷排放量降低6.6%和9.8%,但高剂量会因抑制纤维消化而减少能量利用,因此优化投喂方式至关重要^[67]。

4.3 调控瘤胃菌群结构

最近的研究强调,反刍动物效率与胃肠道菌群的之间存在联系^[68]。孙凯佳等人^[69]的实验研究为调控瘤胃菌群结构进而影响反刍动物瘤胃 CH_4 的排放提供了3种方法:一是驱除原虫,然而,现有研究对比发现,去除原虫对降低 CH_4 排放量的效果存在差异,其作用机制与实际应用效果仍有待深入探究。其次是抗生素的使用,以莫能菌素、细菌素等为代表,研究证实饲料中添加莫能菌素可减少反刍动物 CH_4 排放,但该物质对 CH_4 生成的抑制效能会随时间推移逐渐衰减。再者是通过改变菌群结构来调控 CH_4 排放,相关试验分别考察了产乙酸菌、甲基营养菌、嗜二氧化碳菌对反刍动物瘤胃 CH_4 排放

的影响。昝昊辰等^[70]的研究进一步表明,无论是利用抗生素等手段直接抑制产 CH_4 菌的数量与活性,还是通过驱除原虫间接减少产 CH_4 菌数量,均可有效抑制产 CH_4 菌活性。由于瘤胃产 CH_4 菌属于古细菌,主要负责瘤胃有机物降解的最终环节,因此,抑制其活动能够有效调控瘤胃内 CH_4 的生成过程。

4.4 免疫法

即研发抗产 CH_4 菌疫苗。国外现有研究疫苗主要靶标是存在于绵羊和牛瘤胃中的12~15种古细菌,该技术的原理是通过疫苗接种,刺激动物分泌针对古菌的抗体至唾液,并随吞咽进入瘤胃以发挥作用。但是也存在问题,在进行免疫时,疫苗成分易在宿主体内被降解失活,且进入瘤胃的抗体存续时间短暂,所以大部分学者认为,免疫法的减排效果具有明显的时效性^[69]。因此,未来在这些现有基础上可以做更深入全面的研究。

4.5 品种改良

选育低 CH_4 排放品种也是调控瘤胃 CH_4 排放的有效措施^[71]。荷兰有研究通过在挤奶机器人的饲料槽中安装设备,测量了14 000头奶牛口中呼出的 CH_4 排放量。通过将这一数据与奶牛的DNA图谱联系起来能够证明,奶牛的 CH_4 产生具有遗传性,通过选择和交配 CH_4 排放量最低的奶牛和公牛,遗传选育低产 CH_4 性状反刍动物,优化种群结构,从而获得低 CH_4 排放的后代,达到减排的目的^[72]。

4.6 优化管理制度

在自给农业系统中,提高繁殖率有助于缩减畜群规模,从而提升个体与群体的生产效率及饲料利用率,最终降低单位畜产品的肠道 CH_4 与温室气体排放。同时,通过提升日增重来缩短养殖周期,能有效降低牛羊肉的单位产品 CH_4 排放。此外,保障动物健康、降低发病与死亡率,可直接提升畜群生产力并降低各养殖系统的 CH_4 排放强度。运用现代繁殖技术提高受胎率与繁殖效率、减少胚胎损失,在保障动物福利的同时,亦有助于实现 CH_4 减排^[73]。此外,根据草地生物量和结构状况,适时优化放牧管理模式,平衡草地结构和相应的动植物之间关系对于减缓 CH_4 排放至关重要^[74]。Savian等人^[75]通过优化传统的轮牧方式发现,与优化前相比,优化后的轮牧方式显著增加了放牧羊的 CH_4 日

排放量,同时有机物摄入量增加,导致单位有机物摄入量的 CH_4 排放显著减少,同时动物生产性能的提高,致使单位日增重的 CH_4 排放量减少了170%。总体而言,每公顷的 CH_4 日排放量比优化前减少了39%。显然,合理的轮换放牧管理模式对于减缓 CH_4 排放潜力巨大。

4.7 调控氢代谢分流

甲烷是由产甲烷古菌利用氢气还原 CO_2 生成的。因此,减少甲烷排放的核心策略之一,就是为瘤胃中产生的氢气寻找并促进其他“氢汇”,将氢气流从产甲烷途径“分流”到其他不产生甲烷的代谢途径中去。主要的替代氢汇包括促进丙酸生成(如通过高淀粉日粮)^[76]、增强同型产乙酸作用(利用氢和二氧化碳生成乙酸)^[76],以及提供硝酸盐等替代电子受体^[77-78]。这些措施能消耗氢气,从而抑制产甲烷过程。研究表明,例如高淀粉日粮可促进丙酸生成路径并抑制产甲烷菌,导致瘤胃内溶解氢浓度累积,并促进其他氢营养型细菌增殖;而反刍动物后肠道(盲肠)的低甲烷排放特征也与其中活跃的同型产乙酸菌密切相关;硝酸盐在瘤胃中被逐步还原为亚硝酸盐,并最终还原为氨,这个过程会大量消耗氢气,是效果最显著的甲烷减排策略之一。

4.8 基因编辑重塑瘤胃

利用基因编辑技术改造瘤胃微生物,是当前减少反刍动物甲烷排放的一个重要研究方向。该策略的核心目标是通过直接干预产甲烷古菌的功能,精准调控瘤胃代谢。具体而言,一是借助成簇规律间隔短回文重复序列及其相关蛋白系统(Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats-CRISPR associated protein, CRISPR-Cas)对产甲烷古菌进行基因编辑,例如通过敲除甲烷合成关键酶(如甲基辅酶M还原酶)的基因,或利用CRISPR干扰(CRISPR interference, CRISPRi)系统可逆地抑制其基因表达,实现“功能剔除”;二是通过合成生物学手段,设计工程微生物来干预瘤胃代谢路径。尽管该技术目前面临递送效率、生态安全与监管等多重挑战,尚处于发展早期,但它无疑为实现精准、长效的甲烷减排开辟了一条极具前景的全新路径^[79]。

5 结论与展望

减少反刍动物瘤胃甲烷排放对于缓解全球温

室效应、提高家畜饲养效率具有重要意义。本文从反刍动物瘤胃产甲烷机理、甲烷排放测定方法、不同地区及不同家畜生长阶段甲烷排放量的特征以及减排调控措施等方面对国内外相关研究进展进行了综述。研究结果表明,反刍动物肠道发酵是甲烷排放的主要来源之一,不同饲养阶段的家畜甲烷排放因子存在显著差异,处于繁殖母畜和其他成年阶段的水牛肠道甲烷排放因子最高,分别达到了 $110.6 \text{ kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$ 和 $72.3 \text{ kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$,其次是肉牛和奶牛。而相较之下绵羊和山羊的肠道甲烷排放因子较低,繁殖母畜阶段分别只有 $12.0 \text{ kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$ 和 $13.1 \text{ kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$ 。不同地区家畜甲烷排放同样存在显著差异,温暖湿润地区家畜 CH_4 排放跨度较大,范围在 $0.34 \sim 13.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间,寒冷干燥地区家畜 CH_4 排放范围在 $0.37 \sim 1.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间。无论何种饲养方式,牛(奶牛、非奶牛、水牛)肠道发酵甲烷排放因子始终显著高于羊(绵羊、山羊),尤其是放牧饲养方式下,其甲烷排放因子最高,奶牛和非奶牛肠道发酵甲烷排放因子分别达到了 $99.3 \text{ kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$ 和 $85.3 \text{ kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$ 。通过改变饲粮组成、添加特定添加剂、调控瘤胃菌群结构以及免疫法等措施,可以在一定程度上减少甲烷排放。

然而,目前的研究仍存在许多不足之处。例如,反刍动物甲烷日排放量、不同生理阶段、不同地区甲烷排放等监测数据缺乏,排放因子数据库尚未完善,导致排放底数不清。再者,草地生态系统家畜甲烷排放大大削弱了草地生态系统的碳汇功能,而放牧系统反刍动物胃肠道甲烷排放由于技术不完善导致监测数据缺乏,影响了草原—畜牧生态系统整体碳收支的精准核算。另外,部分添加剂对甲烷的抑制效果存在时效性,且我国在该领域的研究相对较少。调控微生物区系的技术也面临诸多挑战,如外源活菌在瘤胃内的长期定植问题以及菌种的分离与批量生产条件等。此外,免疫法调控家畜甲烷排放的研究还不够深入,疫苗的时效性和稳定性等问题仍需解决。未来的研究方向应聚焦于以下几个方面:首先,整合不同生理阶段反刍家畜胃肠道甲烷排放、日粮营养、采食消化与生长/生产性能等多维数据,创建全生长/生产周期反刍家畜甲烷排放总量的核算技术体系,进而建立中国养殖场和放牧反刍家畜甲烷排放跨区域组网监测平台。其次,进一步探索利用添加剂调控家畜瘤胃甲烷排

放的机制,开发新型、高效且稳定的添加剂。深入研究调控微生物区系的技术,解决外源活菌在瘤胃内的定植问题,提高其降低甲烷排放的效果。此外,加强对免疫法的研究,开发更稳定、长效的抗产甲烷菌疫苗。同时,结合家畜胃肠道甲烷排放的草-畜生态系统碳收支研究,探索不同饲粮配比、牧场管理和遗传选育等综合减排措施,以实现畜牧业的可持续发展。总之,反刍家畜胃肠道甲烷排放的研究对于应对全球气候变化、提高畜牧业生产效率具有重要意义。通过多学科的交叉合作和持续的科研投入,有望在减排技术上取得突破,为实现低碳畜牧业发展提供科学依据和技术支持。

参考文献

- [1] REAY D S, SMITH P, CHRISTENSEN T R, et al. Methane and global environmental change[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2018, 43: 165-192
- [2] 张秀敏, 王荣, 马志远, 等. 反刍家畜胃肠道甲烷排放与减排策略[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 732-742
ZHANG X M, WANG R, MA Z Y, et al. Enteric methane emissions and mitigation strategies in ruminants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 732-742
- [3] BAI Z H, MA W Q, MA L, et al. China's livestock transition: driving forces, impacts, and consequences [J]. *Science Advances*, 2018, 4(7): eaar8534
- [4] 郭鹏辉. 高寒牧区藏绵羊消化代谢与肠道甲烷排放特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2020: 5-7
GUO P H. The characteristics of digestion, metabolism and enteric methane emission of Tibetan sheep in the alpine pastoral area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020: 5-7
- [5] 朱雯. 粗料来源对奶牛乳蛋白前体物生成与生产性能的影响与机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 59-63
ZHU W. Effects of forage sources on milk protein precursors and lactation performance in dairy cows and approach to the mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 59-63
- [6] JOHNSON K A, JOHNSON D E. Methane emissions from cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(8): 2483-2492
- [7] GERBER P J, HENDERSON B, MAKAR H P S. Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production: a review of technical options for non-CO₂ emissions[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013: 15
- [8] MIN B R, SOLAIMAN S, WALDRIP H M, et al. Dietary mitigation of enteric methane emissions from ruminants: A review of plant tannin mitigation options[J]. *Animal Nutrition*, 2020, 6(3): 231-246
- [9] 方晓瑜, 李家宝, 芮俊鹏, 等. 产甲烷生化代谢途径研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(1): 1-9
FANG X Y, LI J B, RUI J P, et al. Research progress on biochemical metabolic pathway of methane production [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2015(1): 1-9
- [10] 王保玉, 刘建民, 韩作颖, 等. 产甲烷菌的分类及研究进展[J]. *基因组学与应用生物学*, 2014(2): 418-425
WANG B Y, LIU J M, HAN Z Y, et al. Classification and research progress of methanogenic bacteria[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2014(2): 418-425
- [11] ZHAO Y C, ZHAO G Y. Decreasing ruminal methane production through enhancing the sulfate reduction pathway [J]. *Animal Nutrition*, 2022, 9: 320-326
- [12] 张美美, 姜雨轩, 于满满, 等. 反刍动物甲烷的排放及其减排调控技术[C]//中国畜牧业协会. 第十二届中国牛业发展大会论文集. 哈尔滨: 东北农业大学动物科学技术学院, 2017: 325-329
ZHANG M M, JIANG Y X, YU M M, et al. Methane emission from ruminants and its emission reduction control technology[C]// China Animal Agriculture Association. Proceedings of the 12th China Cattle Industry Development Conference. College of Animal Science and Technology, Northeast Agricultural University, 2017: 325-329
- [13] 陈威, 陈炳龙, 杨东林, 等. 核桃青皮提取物对亚急性瘤胃酸中毒绵羊瘤胃发酵的影响[J]. *动物营养学报*, 2022, 34(6): 3824-3834
CHEN W, CHEN B L, YANG D L, et al. Effect of walnut green peel extract on rumen fermentation in sheep with subacute rumen acid poisoning[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(6): 3824-3834
- [14] DENMAN S E, TOMKINS N W, MCSWEENEY C S. Quantitation and diversity analysis of ruminal methanogenic populations in response to the antimethanogenic compound bromochloromethane [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, 62(3): 313-322
- [15] 郭佩. 典型草原放牧滩羊的消化代谢和肠道甲烷排放[D]. 兰州: 兰州大学, 2021: 32
GUO P. Digestion, metabolism and enteric methane emission of tan sheep grazing in typical steppe [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021: 32
- [16] HASSANAT F, GERVAIS R, JULIEN C, et al. Replacing alfalfa silage with corn silage in dairy cow diets: effects on enteric methane production, ruminal fermentation, digestion, N balance, and milk production [J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(7): 4553-4567
- [17] MARTIN C, MORGAVI D P, DOREAU M. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale[J]. *Animal*, 2010, 4(3): 351-365
- [18] SAUVANT D, NOZIERE P. Quantification of the main digestive processes in ruminants: the equations involved in the renewed energy and protein feed evaluation systems [J]. *Animal*, 2016, 10(5): 755-770
- [19] 肖怡. 三种益生菌对肉羊甲烷排放、物质代谢和瘤胃发酵的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2016: 3, 60
XIAO Y. Effects of three probiotics on methane emission,

- nutrient metabolism and rumen fermentation in mutton sheep [D]. Alaer: Tarim University, 2016;3,60
- [20] 刘艳玲. 复合益生菌制剂对奶牛泌乳性能和山羊肠道防御机能的影响[D]. 扬州:扬州大学,2020;10
- LIU Y L. Effects of compound probiotics on lactation performance of cows and intestinal defense function of goats [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020;10
- [21] 孙雨坤,赵玉民,闫晓刚,等. 反刍动物甲烷代谢测定方法及其调控技术的研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2016(8):41-44
- SUN Y K, ZHAO Y M, YAN X G, et al. Research progress of the determination method of methane metabolism in ruminants and the regulation technology of methane emission[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2016(8):41-44
- [22] 王成杰,汪诗平,周禾. 放牧家畜甲烷气体排放量测定方法研究进展[J]. 草业学报, 2006(1):113-116
- WANG C J, WANG S P, ZHOU H. Review on advancements in measurement methods of methane emissions from grazing animals[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2006(1):113-116
- [23] 贾鹏,屠焰,李发弟,等. 反刍动物甲烷排放量测定方法的研究进展[J]. 动物营养学报, 2020(6):2483-2490
- JIA P, TU Y, LI F D, et al. Research advance in measurement methods of methane emission from ruminants[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020(6):2483-2490
- [24] 胡家乐,梅洋,付彤,等. 不同采气方法对六氟化硫示踪法测定肉牛甲烷排放量的影响[J]. 家畜生态学报, 2019,40(3):54-58
- HU J L, MEI Y, FU T, et al. Effect of different gas extraction methods on determination of methane emission results by six sulfur fluoride tracer method [J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2019,40(3):54-58
- [25] 翟夏杰. 内蒙古荒漠草原放牧季绵羊呼吸及羊圈 CH_4 排放研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2014;8
- ZHAI X J. Research on CH_4 emission from sheep respiration and sheepfolds during the grazing season in desert grassland of Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014;8
- [26] LOCKYER D R, CHAMPION R A. Methane production by sheep in relation to temporal changes in grazing behaviour[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001,86(3):237-246
- [27] 叶岩,祝天宇,吴泽全,等. 反刍动物甲烷排量监测技术应用研究进展[J]. 农业机械学报, 2022(S1):277-292
- YE Y, ZHU T Y, WU Z Q, et al. Research progress on application of methane emission monitoring technology in ruminants [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022(S1):277-292
- [28] MA W H, JI X T, DING L Y, et al. Automatic monitoring methods for greenhouse and hazardous gases emitted from ruminant production systems: a review[J]. Sensors, 2024,24(13):4423-4424
- [29] HAMMOND K J, HUMPHRIES D J, CROMPTON L A, et al. Methane emissions from cattle: estimates from short-term measurements using a GreenFeed system compared with measurements obtained using respiration chambers or sulphur hexafluoride tracer [J]. Animal Feed Science and Technology, 2015,203:41-52
- [30] 申军士,刘壮,陈亚迎,等. 乳酸链球菌素对瘤胃体外发酵、甲烷生成及功能菌群数量的影响[J]. 微生物学报, 2016(8):1348-1357
- SHEN J S, LIU Z, CHEN Y Y, et al. Effects of nisin on *in vitro* fermentation, methanogenesis and functional microbial populations of the rumen[J]. Acta Microbiologia Sinica, 2016(8):1348-1357
- [31] 原现军. 西藏地区农作物秸秆与牧草混合青贮研究[D]. 南京:南京农业大学,2012;22
- YUAN X J. Study on the mixed silage of crops straw and grass in Tibet [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012;22
- [32] 郝建祥. 体外发酵法评定反刍动物饲料营养价值的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011:20-21
- HAO J X. Study on nutritional evaluation of feed for ruminants by *in vitro* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011:20-21
- [33] 娜仁花,张东方,王月,等. 内蒙古地区家畜温室气体排放量估算研究[J]. 家畜生态学报, 2015,36(3):72-77
- NA R H, ZHANG D F, WANG Y, et al. Estimation of greenhouse gas emissions by livestock in Inner Mongolia[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2015,36(3):72-77
- [34] 李弘振,赵凯旋,赫永康. 基于遥感的奶牛养殖场甲烷检测系统研发[J]. 华南农业大学学报, 2024(5):772-781
- LI H Z, ZHAO K X, HE Y K. Development of methane detection system for dairy farms based on remote sensing[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024(5):772-781
- [35] GOOPY J P, WOODGATE R, DONALDSON A, et al. Validation of a short-term methane measurement using portable static chambers to estimate daily methane production in sheep [J]. Animal Feed Science and Technology, 2011,166/167:219-226
- [36] JONKER A, HICKEY S M, ROWE S J, et al. Genetic parameters of methane emissions determined using portable accumulation chambers in lambs and ewes grazing pasture and genetic correlations with emissions determined in respiration chambers[J]. Journal of Animal Science, 2018,96(8):3031-3042
- [37] HUHTANEN P, CABEZAS-GARCIA E H, UTSUMI S, et al. Comparison of methods to determine methane emissions from dairy cows in farm conditions [J]. Journal of Dairy Science, 2015,98(5):3394-3409
- [38] PLACE S E, PAN Y E, ZHAO Y J, et al. Construction and operation of a ventilated hood system for measuring greenhouse gas and volatile organic compound emissions from cattle [J]. Animals, 2011,1(4):433-446
- [39] TROY S M, DUTHIE C A, ROSS D W, et al. A comparison of methane emissions from beef cattle measured using methane hoods with those measured using respiration chambers [J]. Animal Feed Science and Technology, 2016,211:227-240
- [40] 班志彬,梁浩,杨华明. 大型动物“开放回流式呼吸测热装置”的研制及应用试验[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2014(2):185-187

- BAN Z B, LIANG H, YANG H M. Development and application experiment of an open reflux respiratory calorimetry device for large animals[J]. Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2014(2):185-187
- [41] 赵一广, 刁其玉, 邓凯东, 等. 反刍动物甲烷排放的测定及调控技术研究进展[J]. 动物营养学报, 2011(5):726-734
- ZHAO Y G, DIAO Q Y, DENG K D, et al. Measurements and modulation of methane emission from ruminants[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2011(5):726-734
- [42] JUDD M J, KELLIER F M, ULYATT M J, et al. Net methane emissions from grazing sheep[J]. Global Change Biology, 1999, 5(6):647-657
- [43] JONKER A, MACLEAN S, WOYIMO WOJU C, et al. Excreta emissions in progeny of low and high enteric methane yield selection line sheep fed pasture of different qualities[J]. Animal Feed Science and Technology, 2019, 257:114289
- [44] LOCKYER D R, JARVIS S C. The measurement of methane losses from grazing animals[J]. Environmental Pollution, 1995, 90(3):383-390
- [45] BLÜMMEL M, GIVENS D I, MOSS A R. Comparison of methane produced by straw fed sheep in open-circuit respiration with methane predicted by fermentation characteristics measured by an *in vitro* gas procedure[J]. Animal Feed Science and Technology, 2005, 123/124:379-390
- [46] PÉREZ-BARBERÍA F J, MAYES R W, GIRÁLDEZ J, et al. Ericaceous species reduce methane emissions in sheep and red deer: respiration chamber measurements and predictions at the scale of European heathlands[J]. Science of the Total Environment, 2020, 714:136738
- [47] BICKELL S L, REVELL D K, TOOVEY A F, et al. Feed intake of sheep when allowed *ad libitum* access to feed in methane respiration chambers[J]. Journal of Animal Science, 2014, 92(5):2259-2264
- [48] GÓMEZ-OQUENDO G, SALAZAR-CUBILLAS K, GÓMEZ-BRAVO C A. Quantifying methane emissions during dry season and estimating emission factors in alpacas grazing Andean grasslands[J]. Small Ruminant Research, 2024, 237:107307
- [49] DE MATOS TEIXEIRA A, GONÇALVES L C, VELASCO F O, et al. Respirometria e emissão de metano por ovinos alimentados com capim-elefante cortado com diferentes idades[J]. Bioscience Journal, 2015, 31(3):841-849
- [50] 周艳, 许贵善, 董利锋, 等. 不同饲养模式下饲粮非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维对生长期杜寒杂交母羊生长性能、营养物质表观消化率和甲烷产量的影响[J]. 动物营养学报, 2018(4):1367-1376
- ZHOU Y, XU G S, DONG L F, et al. Effects of different dietary non-fiber Carbohydrate (NFC)/Neutral detergent Fiber (NDF) on growth performance, nutrient apparent digestibility and methane emissions of growing dorper and thin-tailed han crossbred ewes[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018(4):1367-1376
- [51] DING X Z, LONG R J, KREUZER M, et al. Methane emissions from yak (*Bos grunniens*) steers grazing or kept indoors and fed diets with varying forage: concentrate ratio during the cold season on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Animal Feed Science and Technology, 2010, 162(3/4):91-98
- [52] LIU C, ZHU Z P, GUO T J, et al. Changes in methane emission, rumen fermentation, and methanogenic community in response to silage and dry cornstalk diets[J]. Journal of Basic Microbiology, 2014, 54(6):521-530
- [53] 王晓亚. 典型草原草畜系统甲烷排放的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013:36-37
- WANG X Y. Study on emission of methane in grassland-sheep ecosystem in typical steppe [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013:36-37
- [54] 吴崇源, 毛楠, 郭川, 等. 季节性休牧对草甸草原放牧系统甲烷通量的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(11):3251-3257
- WU C Y, MAO N, GUO C, et al. Effects of seasonal-resting on methane fluxes in the grazing system in meadow steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(11):3251-3257
- [55] 徐田伟, 胡林勇, 葛世栋, 等. 青藏高原高寒牧区冷季补饲藏系绵羊温室气体排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10):2071-2076
- XU T W, HU L Y, GE S D, et al. Greenhouse gas emissions from Tibetan sheep with supplementary feeding in alpine pasture in Qinghai-Tibet Plateau during cold seasons[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(10):2071-2076
- [56] 史海山, 丁学智, 龙瑞军, 等. 舍饲绵羊甲烷和二氧化碳的日排放动态[J]. 生态学报, 2008, 28(2):877-882
- SHI H S, DING X Z, LONG R J, et al. Diurnal dynamics of methane and carbon dioxide released from indoor-fed sheep[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2):877-882
- [57] 田淑新. 内蒙古农业源温室气体排放清单估算研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017:11
- TIAN S X. Estimation of greenhouse gases' s inventory of agriculture in Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2017:11
- [58] 国家气候变化战略研究和国际合作中心. 国家温室气体排放因子库[EB/OL]. <https://data.ncsc.org.cn/factoryes/index>, 2024/2025-03-21
- National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation. National greenhouse gas emission factor database [EB/OL]. <https://data.ncsc.org.cn/factoryes/index>, 2024/2025-03-21
- [59] 吴爽, 张永根, 夏科, 等. 不同粗饲料组合类型对奶牛瘤胃甲烷产量及氮代谢的影响[J]. 中国饲料, 2014(3):29-33
- WU S, ZHANG Y G, XIA K, et al. Effects of different forages combination on rumen methane emission and nitrogen excretion of dairy cows[J]. China Feed, 2014(3):29-33
- [60] 董利锋, 杨修竹, 高彦华, 等. 日粮不同NDF/NFC水平对周岁后荷斯坦奶牛生产性能、营养物质消化率、瘤胃发酵特征和甲烷排放的影响[J]. 草业学报, 2021(2):156-165
- DONG L F, YANG X Z, GAO Y H, et al. Effects of dietary NDF:NFC ratio on growth performance, nutritive digestibility,

- ruminal fermentation characteristics and methane emissions of holstein heifers [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021 (2): 156-165
- [61] 周艳,邓凯东,董利锋,等. 反刍家畜肠道甲烷的产生与减排技术措施[J]. *家畜生态学报*, 2018(4):6-10
- ZHOU Y, DENG K D, DONG L F, et al. Intestinal tract methane production and emission reduction measures in ruminants [J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2018(4):6-10
- [62] 金恩望,王加启,卜登攀,等. 利用体外产气法研究植物精油对瘤胃体外发酵和甲烷生成的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2013(3):120-127
- JIN E W, WANG J Q, BU D P, et al. Effects of essential oil on rumen fermentation and methanogenesis *in vitro* gas production[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013(3):120-127
- [63] DOHME F, MACHMÜLLER A, WASSERFALLEN A, et al. Comparative efficiency of various fats rich in medium-chain fattyacids to suppress ruminal methanogenesis as measured with RUSITEC[J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2000, 80 (3):473-484
- [64] ÁBREGO-GACÍA A, POGGI-VARALDO H M, ROBLES-GONZÁLEZ V, et al. Lovastatin as a supplement to mitigate rumen methanogenesis: an overview[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2021, 12(1):123
- [65] DENNINGER T M, SCHWARM A, BIRKINSHAW A, et al. Immediate effect of *Acacia mearnsii* tannins on methane emissions and milk fatty acid profiles of dairy cows[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 261:114388
- [66] 刘卓凡,许贵善,李博为,等. 酶制剂调控反刍动物碳氮减量的研究进展[J]. *饲料工业*, 2023(4):17-21
- LIU Z F, XU G S, LI B W, et al. Research progress on regulation of carbon and nitrogen reduction in ruminants by enzyme preparations[J]. *Feed Industry*, 2023(4):17-21
- [67] REYNOLDS C K, HUMPHRIES D J, KIRTON P, et al. Effects of 3-nitrooxypropanol on methane emission, digestion, and energy and nitrogen balance of lactating dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2014, 97(6):3777-3789
- [68] 冯鑫,栾嘉明,张敏,等. 反刍动物胃肠道菌群与机体氧化应激调节的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(4):2063-2071
- FENG X, LUAN J M, ZHANG M, et al. Research progress of gastrointestinal microbiota and regulation of oxidative stress in ruminants[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35 (4):2063-2071
- [69] 孙凯佳,朱建营,梅洋,等. 降低反刍动物胃肠道甲烷排放的措施[J]. *动物营养学报*, 2015(10):2994-3005
- SUN K J, ZHU J Y, MEI Y, et al. Measures of reducing methane emission in ruminants gut [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015(10):2994-3005
- [70] 祖昊辰,许静,丛玉艳. 通过添加耗氢化合物调节瘤胃微生物实现甲烷减排[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(11):4967-4972
- ZU H C, XU J, CONG Y Y. Reducing rumen methane emission through regulating rumen microorganisms by adding hydrogen-consuming compounds [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(11):4967-4972
- [71] 王坤,南雪梅,熊本海,等. 反刍动物瘤胃甲烷生成相关研究进展[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(11):5013-5022
- WANG K, NAN X M, XIONG B H, et al. Research advances on rumen methanogenesis in ruminants[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(11):5013-5022
- [72] 瓦赫宁根大学. Methane emissions from cows and sheep can be reduced by 25% using breeding programmes[EB/OL]. <https://www.wur.nl/en/research-results/research-institutes/livestock-research/show-wlr/methane-emissions-from-cows-and-sheep-can-be-reduced-by-25-using-breeding-programmes.htm>, 2025-04-08/2025-06-31
- [73] 刁其玉,贾鹏. 反刍动物甲烷减排措施研究进展[J]. *广东畜牧兽医科技*, 2023, 48(4):1-6
- DIAO Q Y, JIA P. Research progress on strategies of reducing methane emission from ruminants [J]. *Guangdong Journal of Animal and Veterinary Science*, 2023, 48(4):1-6
- [74] 石福于,景小平,黄小丹,等. 天然放牧系统反刍动物甲烷排放研究进展[J]. *中国科学:生命科学*, 2023(7):916-930
- SHI F Y, JING X P, HUANG X D, et al. Research advances on enteric methane emission from ruminants innatural grazing system [J]. *SCIENCE CHINA Life Sciences*, 2023 (7): 916-930
- [75] SAVIAN J V, SCHONS R M T, MARCHI D E, et al. *Rotatinuous stocking*: A grazing management innovation that has high potential to mitigate methane emissions by sheep[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186:602-608
- [76] LI Q S, WANG R, MA Z Y, et al. Dietary selection of metabolically distinct microorganisms drives hydrogen metabolism in ruminants[J]. *The ISME Journal*, 2022, 16(11):2535-2546
- [77] LENG R A. Interactions between microbial consortia in biofilms: a paradigm shift in rumen microbial ecology and enteric methane mitigation [J]. *Animal Production Science*, 2014, 54 (5):519-543
- [78] VAN ZIJDERVELD S M, GERRITS W J J, APAJALAHTI J A, et al. Nitrate and sulfate: effective alternative hydrogen sinks for mitigation of ruminal methane production in sheep[J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(12):5856-5866
- [79] ZHAO Y C, TAN J, FANG L Y, et al. Leveraging gene editing to combat methane emissions in ruminant agriculture [J]. *Trends in Biotechnology*, 2025, 43(11):2771-2785

(责任编辑 刘婷婷)