



天然放牧系统反刍动物甲烷排放研究进展

石福于¹, 景小平¹, 黄小丹², 马志远¹, 龙瑞军^{1*}

1. 兰州大学生态学院, 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000;

2. 兰州大学公共卫生学院, 兰州 730000

* 联系人, E-mail: longrj@lzu.edu.cn

收稿日期: 2023-04-12; 接受日期: 2023-06-05; 网络版发表日期: 2023-06-12

国家重点研发计划(批准号: 2021YFD1200904)资助

摘要 近年来, 世界各地极端气候事件(极端降水、极端干旱、高温热浪、极端低温等)频发, 主要是由于人类活动产生的温室气体大量排放导致的全球变暖所致. 因此, 实现碳中和、提高气候韧性、减缓气候变化已成为世界各国的共同目标. 甲烷(CH_4)是大气中仅次于二氧化碳(CO_2)的第二大温室气体, 但其增温潜势较后者更强. 反刍动物肠道发酵可产生大量 CH_4 , 不仅影响生态环境, 还会导致饲料能量的损失. 天然放牧型畜牧业作为甲烷排放的重要来源之一, 因其对气候变化的影响近年来备受关注. 本文主要介绍了天然放牧型畜牧业系统中反刍动物的甲烷排放及其减排策略和管理措施, 并介绍了几种应用于放牧反刍动物甲烷排放的核算方法和监测技术, 以期为中长期减少放牧家畜生产系统碳足迹战略以及实现我国“双碳”目标提供技术参考.

关键词 温室气体, 甲烷, 天然放牧系统, 减排措施, 测量方法

人类活动造成的温室气体(greenhouse gas, GHG)排放量持续增加导致全球气候迅速变化, 干旱、洪水和热浪等极端天气事件频现, 对全球生态系统及人类生产、生活影响深远^[1]. 据报道, 2011~2020年的气温较1850~1900年上升了1.09℃^[2,3]. 联合国粮食和农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)发表的《牲畜厚厚的阴影》中着重强调了畜牧生产是造成环境污染的重要因素^[4]. 其中, 反刍动物甲烷排放(CH_4)因其较高的增温潜势被认为是造成环境污染最重要的温室气体排放源之一, 其排放量约占全球人为活动 CH_4 排放总量的30%~32%, 增温潜势是二氧化碳的28倍^[5]. 近年来, 由于全世界(主要来

自发展中国家)对动物产品的消费需求增加, 未来 CH_4 排放量预计将进一步增加^[6]. 在这种情况下, 寻求高饲料转化效率和低 CH_4 排放的反刍动物对于维持畜牧业生产系统可持续性或弹性至关重要^[7].

天然放牧型畜牧业所占牧场面积可占全球陆地总面积的一半以上, 是温室气体排放的来源之一. 由于天然牧草数量和营养较大的季节性波动, 放牧反刍动物常常被认为是低生产效率和生产单位动物产品高甲烷排放量的代表^[5,8]. 然而, 这种观点存在很大的争议. 质疑者们认为, 在天然放牧型畜牧业系统中, 碳循环是一个复杂的过程, 包括投入、产出、动态的时间和空间变化, 以及对生态系统的服务功能等, 仅通过 CH_4 排放

引用格式: 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. 中国科学: 生命科学, 2023, 53: 916–930

Shi F Y, Jing X P, Huang X D, et al. Research advances on enteric methane emission from ruminants in natural grazing system (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2023, 53: 916–930, doi: 10.1360/SSV-2022-0282

这一特征评估对环境的影响存在很大的不确定性^[9]. 此外, 这种粗放型畜牧业系统多分布于欠发达地区, 测定技术和设备的滞后性使得反刍动物甲烷排放数据缺乏, 采用发达国家集约化/工厂化生产系统所使用的评价体系可能存在较大的误差, 且可能严重高估了欠发达地区家畜的CH₄排放量^[10]. 因此, 寻求全面系统的天然放牧型畜牧业甲烷排放的评估方法, 充分了解其CH₄排放对环境变化的影响, 对于指导地方和全球范围内粗放型畜牧业制定CH₄缓解战略具有重要意义, 尤其对于欠发达区域经济社会发展及联合国可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)的实现具有重要支撑作用.

1 天然放牧系统甲烷排放研究进展

1.1 天然放牧系统畜牧业及甲烷排放

畜牧业生产是温室气体的主要来源之一, 因此, 很多观点主张减少动物食品的生产和消费^[11~13]. 然而, 全球对动物产品的消费和生产目标往往并未与国家或地方政策相结合. 尤其对于一些以天然放牧型畜牧业为代表的欠发达国家或地区, 提供高密度的动物蛋白和微量营养素对于维持贫困人群生计至关重要^[14,15]. 不可否认, 动物生产会对环境产生一些负面效应, 如温室气体排放, 但也不能忽视其对保护环境、保障民生以及促进经济等的益处. Mehrabi等人^[16]研究表明, 畜牧业与SDGs之间的相互作用具有复杂性, 畜牧业至少影响58%的宏观可持续发展目标(共17个)和16%的具体可持续发展目标(共169个), 其中8%(15个)的具体可持续发展目标涉及人类健康和环境变化, 3%(6个)涉及减贫、不平等和农村基础设施建设. 显然, 当前许多全球性的评估并没有充分和全面地权衡畜牧业生产与人类健康和环境变化之间的关系^[17,18].

世界上约2亿~5亿人依赖天然放牧型畜牧业为生^[19], 养育着3.6亿头牛、6亿只绵羊和山羊以及骆驼、美洲驼、驯鹿等反刍动物, 其分布区域遍布非洲、亚洲、南美洲以及北极圈附近等^[20]. 据报道, 由于多采食低质量饲料的原因, 天然放牧型畜牧业的反刍动物甲烷排放量较高, 其总甲烷排放量约占全球反刍动物甲烷排放量的47%, 其对全球气候变化的影响不可忽视^[5,8]. 然而, 由于这些以小农和牧区为主的欠发达地区用于评估反刍家畜CH₄排放数据有限, 天然

放牧型反刍动物甲烷排放的评估方法多采用发达国家的评估系统, 如IPCC Tier 1和Tier 2评估方法. 不可否认这些方法有其自身优势, 但也存在多种不确定性^[9], 比如忽略了不同反刍动物的遗传多样性和适应性生理和行为, 这些动物以适应其栖息地环境的本地品种为主^[21]. Goopy等人^[22]研究发现, 非洲肯尼亚地区雄性青春期和成年瘤牛(*Bos indicus*; 30.1和35.9 kg/年)与雌性青春期和成年瘤牛(23.0和28.3 kg/年)的甲烷排放量均低于IPCC Tier 1估测值(雄性: 49 kg/年; 雌性: 41 kg/年). Ding等人^[23]报道3岁放牧牦牛甲烷排放29 kg/年, 均低于利用IPCC Tier 1(40 kg/年)和Tier 2(35 kg/年)所预测的数据. 本团队最近通过meta分析发现, 以放牧为主的本地牛品种甲烷排放量显著低于集约化养殖的培育牛品种(未发表数据). 上述有限证据表明, 采用当前所建立的CH₄排放预测模型评估的天然放牧型动物CH₄排放量可能高估了其实际排放量, 这不利于评估天然放牧型畜牧业与环境变化之间的关系.

1.2 天然放牧系统畜牧业与气候变化

近年来, 针对畜牧业生产对环境的影响以及如何减少畜牧业碳足迹展开了激烈讨论. 一些组织和政策制定者开始呼吁全球大量减少或者彻底停止摄入动物性产品, 因为他们认为动物产品对环境和人体健康有害^[24,25]. 然而, 反对者们认为天然放牧型畜牧业及其他低投入的畜牧业系统(包括粗放利用牧场、低投入、畜群可以在一定程度上自由活动的生产方式)对环境、生物多样性和水资源具有积极的作用^[9]. 与具有巨大的碳足迹和水足迹的工业化和集约化畜牧业生产相比, 天然放牧型畜牧业主要依靠原生的天然草地维持畜牧业生产, 几乎不需要化石燃料能源的辅助, 这些足迹几乎为零^[26]. 天然放牧型畜牧业能在环境多变的条件下, 不断优化和权衡生产效率和可持续性之间的动态平衡. 因此, 采用可持续理念管理以游牧或放牧为主的实践对于缓解全球气候变化至关重要^[27].

面对全球紧迫的气候变化挑战, 制定合理的应对政策迫在眉睫. 对于天然放牧系统畜牧业而言, 一方面不同动物产生CH₄的速率存在不确定性, 这与集约化养殖系统中动物处于环境温度适宜、饲料营养供给充足等条件下所测数据不同. 当饲料质量下降时, 反刍动物的CH₄排放量会增加, 但动物的CH₄排放量也受采食量、遗传、环境等多种因素的影响^[28~31]. 另一方面,

该畜牧业系统对环境、生物多样性以及水土资源保持等方面也发挥非常重要, 如类似于野生食草动物的迁徙和种子传播的流动模式对生物多样性^[32]、植物传粉和昆虫种群繁衍^[33]和树木再生^[34]均会产生积极影响, 并与生态系统及气候变化形成了良好的协同作用。同时, 放牧系统中家畜的活动有助于保持或增加土壤碳储量^[34,35]。天然草地的碳封存潜力取决于放牧模式^[36,37]和气候变化对初级生产力的影响^[38]。相反, 集约化系统所造成的污染排放却对环境造成消极影响。显然, 与高投入的大型集约化养殖系统相比, 低投入的放牧系统有其自身的独特功能, 因此不能采用相同的节能减排策略来应对全球气候变化。

1.3 天然放牧型畜牧业甲烷排放核算方法

(1) IPCC系数法。IPCC系数法是一种基于温室气体排放途径、算法及参数等评估其排放总量的详实、可行的方法, 具有应用性强、参考价值高的特点^[39]。国内外运用此方法进行反刍动物甲烷排放的评估工作已有诸多报道。Million等人^[40]利用IPCC Tier 2的方法对埃塞俄比亚本地和杂交奶牛的CH₄排放量进行了分析, 其肠道甲烷排放因子分别为26.53和30.70 kg/(头·年)。Ominski等人^[41]同样利用IPCC Tier 2法对加拿大安大略省两种不同经济用途的牛种进行CH₄排放量的核算研究, 得出放牧小母牛和泌乳奶牛的甲烷排放因子分别为23和118 kg/(头·年)。Xue等人^[42]利用IPCC Tier 1或Tier 2的方法预测了我国反刍动物的甲烷排放量, 发现1988~2009年我国奶牛、肉牛、水牛和牦牛的CH₄排放总量从4514 Gg/年逐渐增加到5777 Gg/年。

(2) 生命周期评价法(life cycle assessment, LCA)。LCA是量化评估某一产品从原材料的获取、生产及使用后处置这一系列过程对环境所产生影响的一种方法。该方法涉及范围广、综合性高, 但评估周期较长, 需投入大量人力物力和财力, 且对于所获取的数据精准度要求较高。采用生命周期评价法可以对畜牧业温室气体排放量进行全面测算。畜牧业温室气体排放的大致过程分为6部分: 饲料种植、运输与加工、家畜肠道发酵、饲养与管理、粪便管理系统以及畜产品加工^[43]。国外研究中该方法的应用较为广泛。对于天然放牧型畜牧业系统来说, 牧场管理人员更加热衷于利用LCA法自生命周期开始便制定家畜减排的管理策略。但由于放牧家畜CH₄排放数据有限, 很难进行有效

的评估。据报道, 1945~2018年发表的牲畜相关的文献中, 仅有12.7%的数据涉及非洲, 而非洲大陆却生活着全球20%的牛、27%的绵羊和32%的山羊^[44,45]。Clark和Tilman^[46]的荟萃分析中包含164个LCA研究, 其中大部分数据来自欧洲、北美洲、澳大利亚和新西兰, 而对于非洲食物产品的LCA研究仅占0.4%。Ruviano等人^[47]利用LCA法评估了巴西南部不同放牧管理系统(天然草地、改良天然草地、天然草地+黑麦草、改良天然草地+高粱、栽培黑麦草+高粱、天然草地+蛋白质矿化盐、天然草+富含蛋白质的矿化盐)的碳足迹, 结果显示, 肉牛温室气体强度为18.3~39.3 kg CO₂e/kg BW, 其中天然草地、天然草地+蛋白质矿化盐和天然草+富含蛋白质的矿化盐的管理模式下, 肉牛肠道CH₄排放量高于其他改良或栽培草地。Alemu等人^[48]同样利用该方法评估了加拿大不同放牧管理模式(轻度连续放牧和重度连续放牧)的碳足迹, 结果显示, 肉牛温室气体强度为14.5~16.0 kg CO₂e/kg BW, 其中轻度连续放牧草地总温室气体和肉牛肠道CH₄排放量均显著高于重度连续放牧。我国采用LCA法分析温室气体排放量也已开展了诸多研究^[49~51], 但仅限于集约化养殖系统, 对于我国以天然放牧型畜牧业为主的温室气体系统评价未见报道。

2 放牧系统的甲烷减排进展

全球范围内反刍动物生产系统纷繁多样^[17,52~54]。草地牧草种类和管理方式不同, 反刍动物采食量与择食不同, 最终反映为CH₄排放的差异^[52,55]。此外, 放牧条件、试验环境(如持续时间、采样周期、试验单位)、畜群结构、品种、健康状况、补饲和繁殖效率等方面的差异亦会影响家畜采食量、生产性能以及CH₄排放强度。反刍动物CH₄排放量变化范围较大, 牛的CH₄排放量为107~421 g(39~154 kg/年), 羊为10.9~41.7 g(3.9~15.2 kg/年)^[56]。这些动物个体CH₄排放量的差异和一些放牧系统的低效率生产, 暗示了通过改善放牧管理对缓解动物CH₄排放具有较大的潜力和空间。

2.1 载畜量

载畜量(stocking rate)是牧民进行放牧管理常用的准则, 以确定不同生态系统的最大放牧压力。根据牧草

生长率的不同, 载畜量的大小可能会影响草地牧草高度和生物量, 进而影响动物采食量和 CH_4 产量^[56]. McCaughey等人^[57]研究表明, 以苜蓿与禾草为主的草地连续放牧管理系统中, 肉牛的 CH_4 排放量在低载畜量时段(1.1头/ha; 306.7 L/d)显著高于高载畜量(2.2头/ha; 242.2 L/d); 但当以单位体重换算时, 二者的 CH_4 排放量并无显著差异(0.64 vs. 0.77 L kg⁻¹/(BW·d). Pinares-Patiño等人^[58]通过连续2年的放牧试验同样发现, 以采食混合豆科牧草为主的荷斯坦-弗里西亚小母牛, 载畜量(1.1和2.2头/ha)的大小对动物的 CH_4 排放量无显著影响. 上述试验均是在牧草充足(人工草地)的条件下进行的, 这可能意味着无论载畜量如何, 动物可能会选择性采食相似质量的牧草, 从而使得 CH_4 排放量并未受到影响. 然而, 对于天然草地而言, 载畜量对于平衡草地生态系统中 CH_4 的排放和吸收非常重要. Tang等人^[59]建议, 中国草地生态系统的放牧强度应低于每年2个羊单位/ha, 以保持土壤对大气中 CH_4 的吸收能力, 从而抵消肠道发酵和粪便中 CH_4 的排放强度. 因此, 根据不同草地状况因地制宜地制定放牧优化管理策略, 对于维持草地生态系统碳平衡至关重要.

2.2 放牧管理模式

轮换放牧(rotational stocking)通常被认为是对放牧管理的一种改进, 以控制和优化牧草产量和质量^[52,60], 是降低草地生态系统的 CH_4 排放的潜在放牧模式之一. 与连续放牧相比, 轮牧于百喜草(*Paspalum notatum*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*)草地的奶牛 CH_4 年排放量减少了约22%^[61]. Savian等人^[62]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(“Rotatinuous” stocking; 放牧前后牧草高度为18和11 cm)方式显著增加了放牧羊的 CH_4 日排放量(24.8 vs. 22.2 g/d), 同时有机物摄入量(organic matter intake, OMI)增加(0.801 vs. 0.653 kg/d), 导致单位OMI的 CH_4 排放显著减少(31.4 vs. 35.8 g/kg OMI); 同时动物生产性能的提高, 致使单位日增重(average daily gain, ADG)的 CH_4 排放量减少了170%(217 vs. 586 g/kg ADG). 总体而言, 每公顷的 CH_4 日排放量比优化前减少了39%(645 vs. 1056 g/d), 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. 然而, 轮换放牧模式并非都会减缓动物 CH_4 的排放, 亦与放牧强度和草地状况有关. Savian等人^[63]研究发现, 绵羊以中度或低

放牧强度连续放牧于意大利黑麦草(*Lolium multiflorum*)草场时, 其单位面积 CH_4 排放量与轮牧方式(0.76 vs. 0.78 kg/(ha·d))相比无显著差异, 但连续放牧显著降低了单位日增重的 CH_4 排放量(171 vs. 263 kg/(ADG·d)), 表明在生物量和营养成分较高的草地中, 适度连续放牧条件下动物会有更多的机会选择优质的植物部分, 并可增加动物采食量和平均日增重^[64]. 该研究强调了连续放牧减少 CH_4 排放的有效性更多地与影响动物生产性能有关, 而非方法本身. 综上所述, 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.

2.3 施肥

草地施氮肥影响牧草生物量和质量, 并通过提高动物生产性能间接降低温室气体排放强度^[65]. Amaral等人^[66]研究表明, 随着珍珠粟(*Penisetum americanum* (L.) Leeke)草地的氮施肥量从50 kg N/ha增加到400 kg N/ha, 牧草粗蛋白含量由234.5 g/kg DM增加至294.3 g/kg DM, 放牧于该草地的特塞尔公羊 CH_4 日排放量由15.47 g/d降低至10.93 g/d, 而单位草地面积动物体重显著增加, 从而使得单位面积草地中动物单位日增重的 CH_4 排放量降低. Warner等人^[67]发现了类似的结果, 即随着氮施肥量从65 kg N/ha增加至150 kg N/ha, 奶牛 CH_4 排放量由354.7 g/d降至340.3 g/d, 降低约4%. 上述结果表明, 草地施氮肥可以直接降低单位动物的 CH_4 排放量, 并为以更少的草地面积生产相同数量动物产品和单位面积更低的 CH_4 排放提供了机会.

2.4 补饲

放牧动物的定量补饲策略(补饲精料)增加了动物的营养摄入量 and 生产性能, 并可以缓解 CH_4 的排放量^[28,68]. van Wyngaard等人^[69]研究表明, 放牧于黑麦草草地的娟姗奶牛补饲8 kg/d谷物精料时, 其 CH_4 排放量相较于未补饲组降低14%, 但补饲4 kg精料组的 CH_4 排放量仅比未补饲组低3%. Jiao等人^[70]通过放牧奶牛补饲试验得到了相似的结果, 即与补饲2 kg/d谷物精料相比, 补饲8 kg/d的 CH_4 排放量降低9.5%. 然而, 补饲精料并不总是有效地降低 CH_4 排放量. 研究发现, 完全放牧于黑麦草(NDF含量为422~503 g/kg DM)草地的奶牛与放牧+补饲1或5~6 kg/d精料(NDF含量为201~

356 g/kg DM)的奶牛CH₄排放量无显著差异^[71~73]。此外, 有研究表明, 温带优质黑麦草牧场(NDF含量为348~388 g/kg DM)放牧的奶牛补饲9~16 kg的全混合日粮(total mixed ration, TMR; NDF含量为35.5~425 g/kg DM), 其CH₄排放量显著低于完全放牧组^[74,75]。上述研究表明, 通过放牧+补饲精料的策略来降低CH₄的排放量是可能的, 但似乎与牧草质量密切相关。

3 放牧反刍动物甲烷测定方法

3.1 体外模拟瘤胃发酵法

体外模拟瘤胃发酵技术是一种模式真实瘤胃发酵不可或缺的简化技术^[76], 其原理是在有利于瘤胃微生物生存的体外环境中对饲料进行厌氧发酵(图1), 该技术除了用于评定反刍动物饲料营养价值外^[77], 还可用于模拟瘤胃内能量载体物质和含氮物质释放的同步性^[78]、瘤胃内发酵动态代谢过程^[79,80]、抗营养因子作用机制^[81]以及识别和量化发酵过程中产生的气体并对气体生产潜力进行排序^[82,83]。

体外模拟瘤胃发酵技术具有操作简单、成本低、实用可靠、样本量需求少和出结果速度快等优点; 同时, 该技术可作为评估放牧反刍动物CH₄排放特征, 以初步比较不同反刍动物的CH₄排放潜力, 即作为育种或减排的前期甄别试验。通过野外现场模拟瘤胃发酵的方法对比研究放牧牦牛与放牧本地黄牛CH₄排放特征, 发现前者的CH₄排放更低, 并通过解析其机制阐述了利用高原反刍动物肠道微生物实现温室气体减排生物学途径的重要意义^[84,85]。结合六氟化硫示踪技术(sulfur hexafluoride tracer technique, SF₆)和呼吸代谢室技术对该结果进行验证, 其CH₄排放趋势具有一致性^[23,85]。藏羊与低海拔绵羊CH₄排放对比评估试验同样发现了相似的规律^[86]。然而, 该技术的缺点一方面

是其不能在一个容器内模拟真实且复杂的瘤胃环境, 如体内饲料的降解程度随采食量的变化并非恒定, 致使体外和体内评估的CH₄产量存在较大差异; 另一方面是当发酵产生的挥发性短链脂肪酸和气体随着发酵时间的延长不断的积累, 一定程度上影响发酵液的pH值, 致使发酵液环境无法达到稳态^[87]。

3.2 六氟化硫示踪技术

六氟化硫示踪技术自Zimmerman^[88]首次提出并由Johnson等人^[89]首次使用, 后期Deighton等人^[90]对该方法再次进行了改进, 因其可用于自由放牧和舍饲饲养的反刍动物而备受关注(图2)。SF₆示踪技术是通过测定放置在瘤胃中的渗透管释放的示踪气体浓度和瘤胃CH₄释放浓度, 计算两者比例, 利用已知的SF₆示踪气体浓度和环境气体中SF₆和CH₄浓度进行计算和校正。测定过程中, 为了确保气体示踪剂准确估算CH₄, 环境中气体(SF₆和CH₄)浓度与瘤胃气体(CH₄和SF₆示踪气体)的释放浓度间的差异必须尽可能大。具体操作流程见网络版附件1。

SF₆示踪技术可同时测量多个动物且成本低, 尤其对于放牧动物而言更是首选。然而, 该技术的缺点: (i) SF₆和CH₄通过嘴和鼻孔释放速率假设是相同的, 但这种假设备受质疑, 因为甲烷的实际释放速率通常是动态变化的, 动物在采食后CH₄释放速率会达到峰值^[91]; (ii) 通过对比呼吸测热室和SF₆技术表明, SF₆渗透管在瘤胃中长时间的滞留可能导致甲烷排放被高估, 因此, 每次试验结束后渗透管回收率和SF₆释放速率的评估对结果的准确性至关重要^[92]; (iii) 在舍饲的小环境中由于风速较低, CH₄和SF₆在畜舍中的浓度混合可能不均匀, 因此, 圈舍内环境空气采样位置会显著影响CH₄排放的结果; 而在野外风速较大时, 亦可能影响家畜排放气体的准确性。因此, 适宜的环境对样品采集的准确性非常重要^[93]; (iv) SF₆是一种持续性温室气

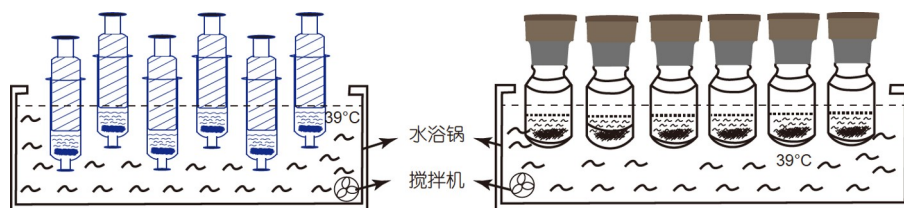


图1 体外发酵装置示意图

Figure 1 Equipment for *in vitro* fermentation

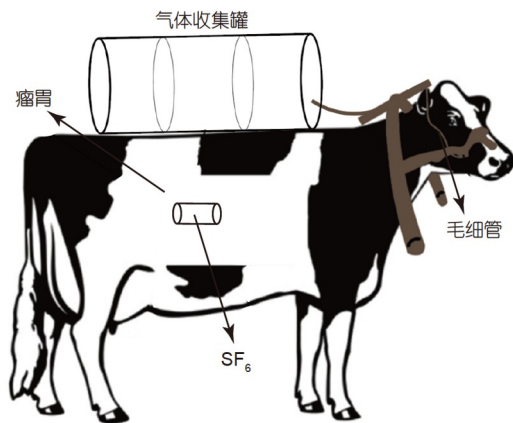


图 2 六氟化硫(SF₆)示踪技术示意图
Figure 2 Diagram of the SF₆ tracer technique

体, 其温室效应极强, 是CO₂的23500倍^[94].

据统计, 自1995~2018年, 已有160项研究使用SF₆技术对反刍动物CH₄排放进行了估测, 且多为放牧动物, 所涉及范围包括对SF₆技术的验证、动物季节性CH₄排放、不同载畜量对CH₄排放的影响等^[95]. McGinn等人^[96]比较了SF₆技术与呼吸代谢室技术在不同日粮条件下的精密度和准确性, 结果显示, SF₆技术相对于呼吸代谢室技术平均低估了4%的CH₄排放量, 但无统计学差异. 室内饲喂模拟放牧的高粗料日粮与放牧条件所测CH₄排放结果相近, 证明SF₆技术在放牧系统中是最可靠的估测方法. Pinares-Patiño等人^[58]比较了不同载畜量对荷斯坦小母牛CH₄排放的影响, 高载畜量(2.2头/ha)与低载畜量(1.1头/ha)组动物的甲烷排放量分别为242和223 g/d, 二者无显著差异. Alvara-

do-Bolovich等人^[97]比较了放牧于栽培草地和天然草地中瑞士棕牛的季节性CH₄排放特征, 发现天然草地放牧动物的CH₄排放量较栽培草地低 (235 vs. 298 g/d), 天然草地旱季CH₄排放量显著高于雨季(257 vs. 213 g/d), 而栽培草地却呈现相反趋势(274 vs. 322 g/d).

3.3 呼吸代谢室法

呼吸代谢室法(respiration chamber)是一种完善、可靠且可实时准确测量瘤胃和后肠发酵CH₄排放量和气体交换量(O₂消耗和CO₂产生)的方法, 可对动物产热进行量化, 被视为反刍动物CH₄排放量评估的“黄金标准(gold standard)”^[98]. 其原理是将动物置于封闭的呼吸室内, 通过测定一定时间内动物胃肠道发酵所产生的CH₄浓度变化来计算甲烷排放量, 具体技术流程见网络版附件1. 每次试验前后需进行系统校准和回收率测试, 以确保CH₄的回收率尽可能接近100%. 基于该技术所得数据多被用于开发预测模型和方程, 估计反刍动物国家温室气体排放清单^[99]. 自20世纪以来, 该技术一直被用于测量反刍动物的呼吸交换和甲烷能损失^[100,101], 并出版了许多关于描述如何构建、校准和使用的技术流程和手册^[102-104].

该测定技术可以反应CH₄的日排放和实时排放特征, 这为深入探究肠道CH₄的形成机制提供了依据, 并能评价饲料营养利用效率^[105], 能够准确测量来自瘤胃和后肠发酵的CH₄排放, 这是许多其他方法无法测量的; 以及可将瘤胃发酵参数、瘤胃微生物组成与功能以及CH₄生成量相结合, 揭示CH₄产生的微生物机制^[106]. 该技术缺点是: (i) 呼吸代谢室所涉及较高精

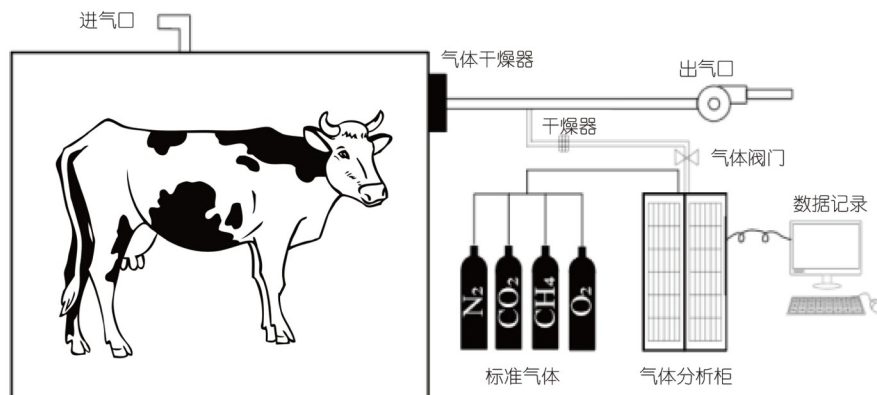


图 3 开路式呼吸代谢室示意图
Figure 3 Diagram of the open circuit respiration chamber

度的分析设备,建设和维护成本高,且需要投入很高的人力和时间成本;(ii)对于某段时间或某个特定试验来说,动物数量受到一定限制;(iii)动物通常是在狭小的空间喂养的,测量时间很短(从几个小时到不超过3天),这种条件下测定结果可能无法准确地反映同一动物在多变环境条件下(例如温度波动、风寒、零星或大量降雨以及植被分布不均)的 CH_4 气体和采食量,尤其对于放牧动物^[107]。此外,由于缺乏对瘤胃稳态条件的了解、食糜进入瘤胃的影响以及水的消耗模式对微生物发酵过程的影响,这些测量方法的有效性亦受到影响^[99]。

尽管该技术常被用于舍饲动物 CH_4 排放的评估,但也可用于模拟放牧动物(zero-grazing)甲烷排放量的评估。Zhao等人^[108]通过模拟绵羊放牧试验发现,当室内条件下饲喂与放牧条件下所摄入牧草相似营养的黑麦草时,利用呼吸代谢室法测定并建立了干物质采食量和总能采食量(gross energy intake, GEI)与 CH_4 排放之间的线性和多元预测模型的 R^2 为0.93。Tomkins等人^[109]通过模拟放牧试验,利用呼吸代谢室法测得肉牛(*Bos indicus*和*Bos taurus*×*African Sanga*)的 CH_4 排放量为30.1 g/kg DMI,并与微气象技术(micrometeorological techniques)所测放牧肉牛数据(29.7 g/kg DMI)进行比较,发现二者并无显著性差异。石福于^[85]利用呼吸代谢室法测定了放牧牦牛在模拟季节性不同采食水平下的 CH_4 排放特征,发现牦牛 CH_4 排放与DMI呈显著正相关关系,且夏季 CH_4 排放量显著高于冷季。

3.4 GreenFeed法

GreenFeed系统(C-Lock Inc, Rapid City, SD, USA)是直接测量反刍动物 CH_4 排放量的新技术,由Zimmerman和Zimmerman^[110]设计完成。该系统是一种自动头室系统与便携式喂食站相结合来测量反刍动物 CH_4 排放和气体交换的系统(图4)^[111]。当动物接近喂食站诱料时,该系统将同时对气体浓度、气流、饲料摄入量进行测量,并通过射频识别耳标自动识别动物^[80]。该系统通过动物的鼻子和嘴将空气吸入测量气流的管道,然后将一小部分样品吸入至气体分析系统中,使用非色散红外(non-dispersive infrared, NDIR)气体传感器测定 CH_4 浓度^[112]。每个动物的气体浓度通常每天测量数次,每次在3~7分钟内,利用每只动物在几天内收集的数据计算日平均 CH_4 排放量^[113]。一套GreenFeed系统

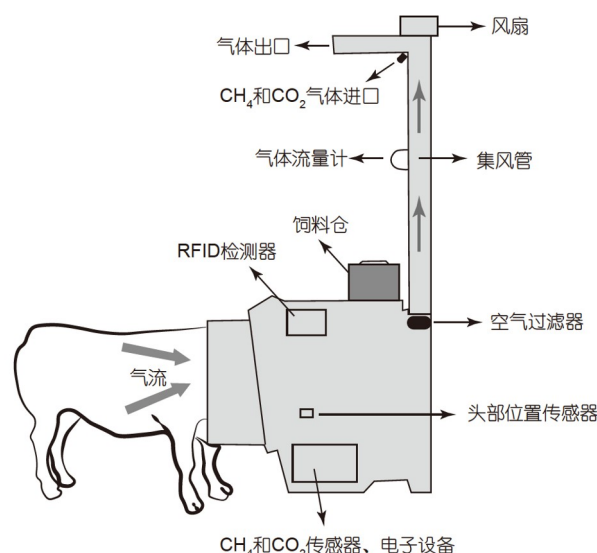


图4 GreenFeed技术示意图

Figure 4 Diagram of the GreenFeed system

被设计用来测量多达20只动物^[114]。

GreenFeed的优点:(i)便携程度高且完全自动化;(ii)测定时间短,测定动物数量多且不影响反刍动物的行为;(iii)可在室内和放牧条件下估算单个动物的 CH_4 排放量,测量期间如果可以合理控制每个动物测量的时间和次数,所得数据精确度更高,动物舍饲条件下更易操作^[115]。该方法的缺点:(i)由于该方法需要利用诱饵饲料诱导动物进行采食,不同个体对饲料的采食可能存在差异,从而影响动物个体间 CH_4 排放数据的差异^[114];(ii)对于放牧动物来说,动物自愿进入GreenFeed系统的时间差和频率以及不同处理组的动物测定数量可能影响系统对 CH_4 排放数据的准确评估^[113];(iii)该系统的精确度会受到风向和风速的影响,主要针对放牧动物^[112];(iv)动物的 CH_4 排放量与采食量密切相关,且存在明显的日节律变化^[115]。因此,确保在24小时的喂养周期内具有足够的测量次数,对于获得准确的日平均 CH_4 排放量至关重要。

据统计,在已发表的利用呼吸代谢室、 SF_6 和GreenFeed技术测定的反刍动物 CH_4 排放研究中,GreenFeed技术已占到7%(28篇/共397篇),且所涉研究内容广泛^[95]。Huhtanen等人^[112]通过比较GreenFeed和呼吸代谢室方法测定奶牛 CH_4 排放量,发现两种方法呈显著相关($R^2=0.92$)。Waghorn等人^[116]利用GreenFeed技术评估了载畜量对放牧荷斯坦奶牛 CH_4 排放的影响,

发现低载畜量(28头/11公顷)和高载畜量(40头/11公顷)的CH₄排放量分别为21.8和22.7 g/kg DMI. Todd等人^[117]利用GreenFeed技术测定了美国南方大平原上季节性放牧肉牛的CH₄排放量, 7月、10月和2月CH₄排放量分别为340, 230和190 g/d. 我国目前利用该技术测定反刍动物CH₄排放的研究较少, 仅在舍饲奶牛中有部分应用^[118,119]

3.5 微气象技术

近年来, 微气象技术因其非侵入性的优点(无需改变动物行为)被广泛应用于评估反刍动物和牲畜粪便的CH₄排放量, 并提供了近乎连续的排放数据. 目前用于测定反刍动物CH₄排放的微气象技术主要包括: (i) 经典技术, 如通量梯度(flux gradient)^[120]、涡旋协方差(eddy covariance)^[121]、弛豫涡旋积累法(relaxed eddy accumulation)^[122]和边界层预算(boundary layer budgeting)等技术^[123]; (ii) 最新技术, 如拉格朗日逆分析技术(inverse dispersion analysis)等^[124]. 这些技术利用气象和工程原理, 通过测量大气中气体的通量, 并将这些通量与动物排放联系起来确定动物的CH₄排放量. 这些技术的优势是可以研究自然放牧状态下的动物, 且可以对大量动物进行测量, 也因此被认为在未来精确监测反刍动物CH₄排放量方面具有巨大潜力. 该技术的缺点是: (i) 易受风速稳定性或点发射源等因素的影响; (ii) 测定的排放因子可能偏高, 结果差异较大; (iii) 很难将CH₄的排放量与放牧动物的采食量联系起来; (iv) 工作量大, 费用较高. 尽管这一技术有其自身缺点, 但仍是未来测定放牧反刍动物甲烷排放重点研究和开发的新技术.

4 我国天然放牧型畜牧业存在问题及展望

4.1 存在的问题

我国是世界第二大草地资源国家, 草地类型多样, 拥有天然草地约432万hm², 仅次于澳大利亚, 约占国土总面积的40%^[125], 加之环境因素和地形复杂多样, 不仅构成了纷繁多样的动物生存环境, 亦孕育了数量庞大且丰富多样的反刍动物种质资源, 如牦牛、水牛、独龙牛、藏羊、蒙古羊的地方性品种等. 同时, 我国多样的民族文化致使反刍动物饲养管理方式多样, 如长距离游牧、季节性游牧、连续放牧、轮牧、

舍饲等, 必定使得不同地方品种CH₄排放存在较大差异. 然而, 尽管我国地方放牧反刍动物物种和品种多样, 但关于各自CH₄排放的科学研究非常少, 对于一些主要放牧品种未能建立完善的CH₄排放清单, 势必对我国放牧动物CH₄排放的整体评估存在较大误差, 高估现象或许整体存在. 考虑到CH₄强大的温室效应, 放牧动物CH₄排放清单的不确定性将极大的影响我国实现国家战略“双碳”目标.

目前, 关于CH₄排放的测定方法各有优缺点, 体外模拟瘤胃发酵技术仅能作为一种对不同饲料条件下CH₄生成潜力的预评估; 呼吸代谢室用于测定反刍动物CH₄排放量并以此来确定排放因子, 但仅限于舍饲或zero-grazing动物; SF₆和GreenFeed技术虽可应用于放牧动物, 但无法准确测定牧草采食量; 新型发展的一些短期技术, 如嗅探技术、红外光谱检测技术(激光甲烷检测器、傅里叶变换红外光谱检测和便携式自动开路气体量化系统等)和微气象技术等为检测群体动物CH₄排放提供了潜在的机会, 但准确性仍需验证. 考虑到我国大多数地方性放牧反刍动物多以季节性放牧为主, 其甲烷排放量也会随着时间、季节和牧草质量等变化而不断变化, 实现精准动态监测畜牧业温室气体的排放量较为困难, 且目前可选的测量方法较少, 对方法的开发不足, 这极大的限制了我国对天然放牧型畜牧业温室气体排放的评估. 因此, 亟需探索快速、准确和经济的适合我国反刍动物CH₄排放的量化方法, 为我国探寻有效温室气体甲烷减排和提高畜牧养殖业经济效益和低碳发展提供重要支撑.

4.2 展望

我国草地多为天然草地, 植物物种丰富且富含一些次生代谢物(如酚类、单宁等), 这对于降低放牧反刍动物CH₄排放具有重要作用, 而在实际评估过程中少有考虑草地的复杂性. 因此, 评估放牧反刍动物CH₄排放的过程中应考虑草地-动物之间的系统关系. 此外, 大多数地方品种经过对栖息地长期的适应性进化, 已形成了低CH₄排放的特性. 因此, 对CH₄排放的评估应考虑地方品种的遗传多样性和对栖息地环境的适应性特征.

反刍动物品种的多样性不仅有利于维系生态系统的稳定, 且益于动物改良和育种. 不同于发达国家多以集约化培育品种为主, 我国放牧品种多样性和异质性

大, 以发达国家集约化培育品种的CH₄排放评估方法作为我国放牧品种的CH₄排放评估存在不确定性和高估风险。因此, 应挖掘我国地方品种低CH₄排放之优势, 这对于平衡我国培育品种CH₄排放意义重大。

以游牧或放牧为主的天然放牧型草牧业系统形成了地球上最大的碳汇。与工业化、控制化和集约化的畜牧业生产相比, 天然放牧型草牧业几乎不需要化石燃料能源的投入, 是一种自然友好型的家畜生产系统。因此, 对于天然放牧型草地畜牧业对气候变化的影响应考虑其对于生态系统服务、景观保护和碳封存等更广泛范围的环保优势及生态效应。此外, 欧盟委员会(European Commission)承诺2027年开始在欧盟范围内全面禁止笼养动物, 势必形成相应的动物产品贸易壁垒。在当代越来越注重生态和动物福利保护的大背景下, 系统评估天然放牧型草地畜牧业CH₄排放, 发挥我国西部放牧动物高福利之优势, 坚持绿色低碳和安全发展模式, 以此契机生产高质量动物产品, 应成为今后非集约化草地畜牧业发展之重大机遇。结合草原自

然属性、文化属性、社会属性等多功能特征, 提高我国对健康草原和可持续草牧业利益贡献和知识创新方面的认识, 促使草原和牧民在应对气候危机、生物多样性危机管理、发展可持续粮食系统以及帮助实现SDGs中发挥重要作用, 这对于我国实现放牧动物“提质增效”和践行以绿色为基调的“两山理论”具有重要意义。

为实现上述目标, 对于放牧型草地畜牧业CH₄排放的精准动态监控至关重要。鉴于我国目前对于反刍动物CH₄排放检测技术研发的相对滞后性, 应充分利用国际CH₄排放测定技术之优势, 通过改进、优化或整合相关测定方法, 将舍饲或放牧动物测定方法用于适合放牧或模拟放牧的动物, 并建立相关的矫正或验证模型, 实现评估方法单用途向多用途的转变。此外, 结合我国实际饲养水平和情况, 应加大研发国内反刍动物CH₄等温室气体的监测技术, 为我国探寻有效温室气体甲烷减排和绿色低碳生产提供技术支撑, 助力实现“双碳”目标。

参考文献

- Mizrahi I, Wallace R J, Moraïs S. The rumen microbiome: balancing food security and environmental impacts. *Nat Rev Microbiol*, 2021, 19: 553–566
- Jackson R B, Sauniois M, Bousquet P, et al. Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environ Res Lett*, 2020, 15: 071002
- Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate change 2021: the physical science basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021
- Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T D, et al. Livestock's long shadow: environmental issues and options. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2006
- Gerber P J, Steinfeld H, Henderson B, et al. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The future of food and agriculture: trends and challenges. FAO, 2017
- Tedeschi L O, Muir J P, Riley D G, et al. The role of ruminant animals in sustainable livestock intensification programs. *Int J Sustain Dev World Ecol*, 2015, 22: 452–465
- Stehfest E, Bouwman L, van Vuuren D P, et al. Climate benefits of changing diet. *Clim Change*, 2009, 95: 83–102
- Houzer E, Scoones I. Are livestock always bad for the planet? Rethinking the protein transition and climate change debate. Brighton: PASTRES, 2021
- Marquardt S, Ndung'u P, Onyango A A, et al. Protocol for a Tier 2 approach to generate region-specific enteric methane emission factors (EF) for cattle kept in smallholder systems. ILRI Manual. No. 39. Nairobi: International Livestock Research Institute (ILRI), 2020
- Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 2011, 478: 337–342
- Poore J, Nemecek T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 2018, 360: 987–992
- Springmann M, Godfray H C J, Rayner M, et al. Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 4146–4151

- 14 Frelat R, Lopez-Ridaura S, Giller K E, et al. Drivers of household food availability in sub-Saharan Africa based on big data from small farms. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 458–463
- 15 Cordain L, Eaton S B, Miller J B, et al. The paradoxical nature of hunter-gatherer diets: meat-based, yet non-atherogenic. *Eur J Clin Nutr*, 2002, 56: S42–S52
- 16 Mehrabi Z, Gill M, Wijk M, et al. Livestock policy for sustainable development. *Nat Food*, 2020, 1: 160–165
- 17 Herrero M, Thornton P K. Livestock and global change: emerging issues for sustainable food systems. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 20878–20881
- 18 Rivera-Ferre M G, López-i-Gelats F, Howden M, et al. Re-framing the climate change debate in the livestock sector: mitigation and adaptation options. *WIREs Clim Change*, 2016, 7: 869–892
- 19 ILRI, IUCN, FAO, et al. Rangelands Atlas. Nairobi: ILRI, 2021
- 20 Davies J, Hagelberg N. Sustainable pastoralism and the post 2015 agenda: opportunities and barriers to pastoralism for global food production and environmental stewardship. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2015
- 21 García-Dory F, Houzer E, Scoones I. Livestock and climate justice: challenging mainstream policy narratives. *IDS Bull*, 2022, doi: 10.19088/1968-2021.128
- 22 Goopy J P, Onyango A A, Dickhoefer U, et al. A new approach for improving emission factors for enteric methane emissions of cattle in smallholder systems of East Africa—results for Nyando, Western Kenya. *Agric Syst*, 2018, 161: 72–80
- 23 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. *Anim Feed Sci Tech*, 2010, 162: 91–98
- 24 Wellesley L, Happer C, Froggatt A. Changing climate, changing diets: pathways to lower meat consumption. London: Chatham House, 2015
- 25 Willett W, Rockström J, Loken B, et al. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet*, 2019, 393: 447–492
- 26 McGahey D, Davies J, Hagelberg N, et al. Pastoralism and the green economy—a natural nexus. Gland: International Union for Conservation of Nature, 2014
- 27 Long R J, Ykhanbai H. Significance and outlook of International Year of Rangelands and Pastoralists of the United Nations in 2026 (in Chinese). *Grassland Turf*, 2022, 42: 137–144 [龙瑞军, Ykhanbai H. 2026联合国国际草原与牧民年的意义及展望. *草原与草坪*, 2022, 42: 137–144]
- 28 Hristov A N, Oh J, Firkins J L, et al. SPECIAL TOPICS—mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options1. *J Anim Sci*, 2013, 91: 5045–5069
- 29 Gill M, Smith P, Wilkinson J M. Mitigating climate change: the role of domestic livestock. *Animal*, 2010, 4: 323–333
- 30 Montes F, Meinen R, Dell C, et al. SPECIAL TOPICS—mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: II. A review of manure management mitigation options1. *J Anim Sci*, 2013, 91: 5070–5094
- 31 Beauchemin K A, Ungerfeld E M, Eckard R J, et al. Review: fifty years of research on rumen methanogenesis: lessons learned and future challenges for mitigation. *Animal*, 2020, 14: s2–s16
- 32 Manzano-Baena P, Salguero-Herrera C. Mobile pastoralism in the mediterranean: Arguments and evidence for policy reform and to combat climate change. 2018. Available from URL: http://medconsortium.org/wp-content/uploads/2017/12/MobilePastoralismMotherDocument_Dember2017_ForWeb.pdf
- 33 García-Fernández A, Manzano P, Seoane J, et al. Herbivore corridors sustain genetic footprint in plant populations: a case for Spanish drove roads. *PeerJ*, 2019, 7: e7311
- 34 Carmona C P, Azcárate F M, Oteros-Rozas E, et al. Assessing the effects of seasonal grazing on holm oak regeneration: Implications for the conservation of Mediterranean dehesas. *Biol Conserv*, 2013, 159: 240–247
- 35 Garnett T, Godde C, Muller A, et al. Grazed and confused? Ruminating on cattle, grazing systems, methane, nitrous oxide, the soil carbon sequestration question-and what it all means for greenhouse gas emissions. Oxford: Food Climate Research Network (FCRN), 2017
- 36 Herrero M, Henderson B, Havlík P, et al. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nat Clim Change*, 2016, 6: 452–461
- 37 Zhou G, Zhou X, He Y, et al. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis. *Glob Change Biol*, 2017, 23: 1167–1179
- 38 Boone R B, Conant R T, Sircely J, et al. Climate change impacts on selected global rangeland ecosystem services. *Glob Change Biol*, 2018, 24:

- 1382–1393
- 39 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, volume 4—agriculture, forestry and other land use. Kanagawa: IGES, 2006
- 40 Million T, Kefale G, Ulfina G. Estimation of enteric methane emission factor in cattle species in Ethiopia using IPCC Tier 2 methodology. *Ann Environ Sci Toxicol*, 2022, 6: 013–018
- 41 Ominski K H, Boadi D A, Wittenberg K M, et al. Estimates of enteric methane emissions from cattle in Canada using the IPCC Tier-2 methodology. *Can J Anim Sci*, 2007, 87: 459–467
- 42 Xue B, Wang L Z, Yan T. Methane emission inventories for enteric fermentation and manure management of yak, buffalo and dairy and beef cattle in China from 1988 to 2009. *Agr Ecosyst Environ*, 2014, 195: 202–210
- 43 Yao C S, Qian S S, Mao Y H, et al. Decomposition of impacting factors of animal husbandry carbon emissions change and its spatial differences in China (in Chinese). *Transact CSAE*, 2017, 33: 10–19 [姚成胜, 钱双双, 毛跃华, 等. 中国畜牧业碳排放量变化的影响因素分解及空间分异. *农业工程学报*, 2017, 33: 10–19]
- 44 Gilbert M, Nicolas G, Cinardi G, et al. Global distribution data for cattle, buffaloes, horses, sheep, goats, pigs, chickens and ducks in 2010. *Sci Data*, 2018, 5: 180227
- 45 Paul B K, Butterbach-Bahl K, Notenbaert A, et al. Sustainable livestock development in low- and middle-income countries: shedding light on evidence-based solutions. *Environ Res Lett*, 2020, 16: 011001
- 46 Clark M, Tilman D. Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environ Res Lett*, 2017, 12: 064016
- 47 Ruviano C F, de Léis C M, Lampert V N, et al. Carbon footprint in different beef production systems on a southern Brazilian farm: a case study. *J Clean Prod*, 2015, 96: 435–443
- 48 Alemu A W, Janzen H, Little S, et al. Assessment of grazing management on farm greenhouse gas intensity of beef production systems in the Canadian Prairies using life cycle assessment. *Agr Syst*, 2017, 158: 1–13
- 49 Meng X H, Cheng G Q, Zhang J B, et al. Analyze on the spatiotemporal characteristics of GHG estimation of livestock's by life cycle assessment in China (in Chinese). *China Environ Sci*, 2014, 34: 2167–2176 [孟祥海, 程国强, 张俊飏, 等. 中国畜牧业全生命周期温室气体排放时空特征分析. *中国环境科学*, 2014, 34: 2167–2176]
- 50 Liu C Q, Huang Y J, Wang X Y. Life cycle greenhouse gas emissions of refined oil from corn straw (in Chinese). *J Zhejiang Univ (Eng Sci)*, 2016, 50: 1871–1878 [刘长奇, 黄亚继, 王昕晔, 等. 玉米秸秆精制油的生命周期温室气体排放研究. *浙江大学学报(工学版)*, 2016, 50: 1871–1878]
- 51 Wang L L, Xin X P, Liu X C, et al. Greenhouse gas emission of Hulunbuir family pasture sheep based on full life cycle analysis (in Chinese). *Chin J of Appl Environ Biol*, 2021, 27: 1591–1600 [王路路, 辛晓平, 刘欣超, 等. 基于全生命周期分析的呼伦贝尔家庭牧场肉羊温室气体排放. *应用与环境生物学报*, 2021, 27: 1591–1600]
- 52 Latawiec A E, Strassburg B B N, Valentim J F, et al. Intensification of cattle ranching production systems: socioeconomic and environmental synergies and risks in Brazil. *Animal*, 2014, 8: 1255–1263
- 53 McManus C, Barcellos J O J, Formenton B K, et al. Dynamics of cattle production in Brazil. *PLoS ONE*, 2016, 11: e0147138
- 54 Long R J. Functions of ecosystem in the Tibetan grassland (in Chinese). *Technol Rev*, 2007, 25: 26–28 [龙瑞军. 青藏高原草地生态系统之服务功能. *科技导报*, 2007, 25: 26–28]
- 55 Lobato J F P, Freitas A K, Devincenzi T, et al. Brazilian beef produced on pastures: Sustainable and healthy. *Meat Sci*, 2014, 98: 336–345
- 56 Zubieta Á S, Savian J V, de Souza Filho W, et al. Does grazing management provide opportunities to mitigate methane emissions by ruminants in pastoral ecosystems? *Sci Total Environ*, 2021, 754: 142029
- 57 McCaughey W P, Wittenberg K, Corrigan D. Methane production by steers on pasture. *Can J Anim Sci*, 1997, 77: 519–524
- 58 Pinares-Patiño C S, D'Hour P, Jouany J P, et al. Effects of stocking rate on methane and carbon dioxide emissions from grazing cattle. *Agr Ecosyst Environ*, 2007, 121: 30–46
- 59 Tang S, Ma L, Wei X, et al. Methane emissions in grazing systems in grassland regions of China: a synthesis. *Sci Total Environ*, 2019, 654: 662–670
- 60 DeRamus H A. Grazing management of ruminant animals in sustainable agriculture. *Outlook Agric*, 2004, 33: 93–100
- 61 DeRamus H A, Clement T C, Giampola D D, et al. Methane emissions of beef cattle on forages. *J Environ Qual*, 2003, 32: 269–277

- 62 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 Clean Prod*, 2018, 186: 602–608
- 63 Savian J V, Neto A B, de David D B, et al. Grazing intensity and stocking methods on animal production and methane emission by grazing sheep: Implications for integrated crop-livestock system. *Agr Ecosyst Environ*, 2014, 190: 112–119
- 64 Briske D D, Derner J D, Brown J R, et al. Rotational grazing on rangelands: reconciliation of perception and experimental evidence. *Rangel Ecol Manag*, 2008, 61: 3–17
- 65 Hauggaard-Nielsen H, Lachouani P, Knudsen M T, et al. Productivity and carbon footprint of perennial grass-forage legume intercropping strategies with high or low nitrogen fertilizer input. *Sci Total Environ*, 2016, 541: 1339–1347
- 66 Amaral G A, David D B, Gere J I, et al. Methane emissions from sheep grazing pearl millet (*Penisetum americanum* (L.) Leeke) swards fertilized with increasing nitrogen levels. *Small Ruminant Res*, 2016, 141: 118–123
- 67 Warner D, Hatew B, Podesta S C, et al. Effects of nitrogen fertilisation rate and maturity of grass silage on methane emission by lactating dairy cows. *Animal*, 2016, 10: 34–43
- 68 Peyraud J L, Delagarde R. Managing variations in dairy cow nutrient supply under grazing. *Animal*, 2013, 7: 57–67
- 69 van Wyngaard J D V, Meeske R, Erasmus L J. Effect of concentrate feeding level on methane emissions, production performance and rumen fermentation of Jersey cows grazing ryegrass pasture during spring. *Anim Feed Sci Tech*, 2018, 241: 121–132
- 70 Jiao H P, Dale A J, Carson A F, et al. Effect of concentrate feed level on methane emissions from grazing dairy cows. *J Dairy Sci*, 2014, 97: 7043–7053
- 71 Lovett D K, Stack L J, Lovell S, et al. Manipulating enteric methane emissions and animal performance of late-lactation dairy cows through concentrate supplementation at pasture. *J Dairy Sci*, 2015, 88: 2836–2842
- 72 O'Neill B F, Deighton M H, O'Loughlin B M, et al. The effects of supplementing grazing dairy cows with partial mixed ration on enteric methane emissions and milk production during mid to late lactation. *J Dairy Sci*, 2012, 95: 6582–6590
- 73 Muñoz C, Hube S, Morales J M, et al. Effects of concentrate supplementation on enteric methane emissions and milk production of grazing dairy cows. *Livestock Sci*, 2015, 175: 37–46
- 74 Dall-Orsoletta A C, Almeida J G R, Carvalho P C F, et al. Ryegrass pasture combined with partial total mixed ration reduces enteric methane emissions and maintains the performance of dairy cows during mid to late lactation. *J Dairy Sci*, 2016, 99: 4374–4383
- 75 O'Neill B F, Deighton M H, O'Loughlin B M, et al. Effects of a perennial ryegrass diet or total mixed ration diet offered to spring-calving Holstein-Friesian dairy cows on methane emissions, dry matter intake, and milk production. *J Dairy Sci*, 2011, 94: 1941–1951
- 76 Menke K H, Raab L, Salewski A, et al. The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feedingstuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor *in vitro*. *J Agric Sci*, 1979, 93: 217–222
- 77 Mehrez A Z, Ørskov E R. A study of artificial fibre bag technique for determining the digestibility of feeds in the rumen. *J Agric Sci*, 1977, 88: 645–650
- 78 Sun H X, Zhang M, Wang J Q. Effect of mixed rations with different protein sources on rumen fermentation and microbial protein yield of lactating dairy cows (in Chinese). *Heilongjiang Anim Sci Vet Med*, 2006, 12: 28–30 [孙宏选, 张民, 王加启. 不同蛋白质来源的日粮对泌乳奶牛瘤胃发酵及微生物蛋白质合成量的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2006, 12: 28–30]
- 79 Blümmel M, Ørskov E R. Comparison of *in vitro* gas production and nylon bag degradability of roughages in predicting feed intake in cattle. *Anim Feed Sci Tech*, 1993, 40: 109–119
- 80 Yang H J, Feng Y L. Effects of cellulose to starch ratio in substrate on *in vitro* volatile fatty acids yield with equal-nitrogen purified substrate (in Chinese). *Chin J Anim Sci*, 2003, 39: 9–11 [杨红建, 冯仰廉. 不同纤维素与淀粉比率等氮纯化日粮瘤胃发酵挥发性脂肪酸产生量. 中国畜牧杂志, 2003, 39: 9–11]
- 81 Lu D X. An Introduction to Systems-Nutrition of Animals (in Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2004 [卢德勋. 系统动物营养学导论. 北京: 中国农业出版社, 2004]
- 82 Zhao G Y, Feng Y L, Liang X W. Effect of saponified rapeseed oil on gas production *in vitro* (in Chinese). *Chin J Anim Sci*, 1999, 1: 10–11 [赵广永, 冯仰廉, 梁学武. 皂化菜籽油对人工瘤胃发酵产气量的影响. 中国畜牧杂志, 1999, 1: 10–11]
- 83 Jayanegara A, Togtokhbayar N, Makkar H P S, et al. Tannins determined by various methods as predictors of methane production reduction potential of plants by an *in vitro* rumen fermentation system. *Anim Feed Sci Tech*, 2009, 150: 230–237
- 84 Zhang Z, Xu D, Wang L, et al. Convergent evolution of rumen microbiomes in high-altitude mammals. *Curr Biol*, 2016, 26: 1873–1879

- 85 Shi F Y. Rumen microbiological mechanisms of efficient energy and nitrogen utilization in yak (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University. 2022 [石福于. 牦牛高效能氮利用的瘤胃微生物学机制. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学. 2022]
- 86 Wang W, M. Ungerfeld E, Degen A A, et al. Ratios of rumen inoculum from Tibetan and Small-tailed Han sheep influenced *in vitro* fermentation and digestibility. [Anim Feed Sci Tech](#), 2020, 267: 114562
- 87 Klumpp S, Hwa T. Bacterial growth: global effects on gene expression, growth feedback and proteome partition. [Curr Opin Biotechnol](#), 2014, 28: 96–102
- 88 Zimmerman P R. System for measuring metabolic gas emissions from animals. U.S. Patent 5265618. 1993-11-30
- 89 Johnson K, Huyler M, Westberg H, et al. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a sulfur hexafluoride tracer technique. [Environ Sci Technol](#), 1994, 28: 359–362
- 90 Deighton M H, Williams S R O, Hannah M C, et al. A modified sulphur hexafluoride tracer technique enables accurate determination of enteric methane emissions from ruminants. [Anim Feed Sci Tech](#), 2014, 197: 47–63
- 91 Valencia Salazar S S, Piñeiro Vázquez A T, Molina Botero I C, et al. Potential of *Samanea saman* pod meal for enteric methane mitigation in crossbred heifers fed low-quality tropical grass. [Agric For Meteorol](#), 2018, 258: 108–116
- 92 Swainson N M, Brookes I M, Hoskin S O, et al. Post-experiment correction for release rate in permeation tubes improves the accuracy of the sulphur hexafluoride (SF₆) tracer technique in deer. [Anim Feed Sci Tech](#), 2011, 166-167: 192–197
- 93 Kaharabata S K, Schuepp P H, Desjardins R L. Estimating methane emissions from dairy cattle housed in a barn and feedlot using an atmospheric tracer. [Environ Sci Technol](#), 2000, 34: 3296–3302
- 94 Zhang X X, Zhou J J, Tang J, et al. Experimental study of partial discharge properties for CF₃I/N₂ mixtures (in Chinese). [High Volt Technol](#), 2013, 39: 287–293 [张晓星, 周君杰, 唐炬, 等. CF₃I/N₂混合气体局部放电特性实验研究. [高电压技术](#), 2013, 39: 287–293]
- 95 Della Rosa M M, Jonker A, Waghorn G C. A review of technical variations and protocols used to measure methane emissions from ruminants using respiration chambers, SF₆ tracer technique and GreenFeed, to facilitate global integration of published data. [Anim Feed Sci Tech](#), 2021, 279: 115018
- 96 McGinn S M, Beauchemin K A, Iwaasa A D, et al. Assessment of the sulfur hexafluoride (SF₆) tracer technique for measuring enteric methane emissions from cattle. [J Environ Qual](#), 2006, 35: 1686–1691
- 97 Alvarado-Bolovich V, Medrano J, Haro J, et al. Enteric methane emissions from lactating dairy cows grazing cultivated and native pastures in the high Andes of Peru. [Livestock Sci](#), 2021, 243: 104385
- 98 Huhtanen P, Cabezas-Garcia E H, Utsumi S, et al. Comparison of methods to determine methane emissions from dairy cows in farm conditions. [J Dairy Sci](#), 2015, 98: 3394–3409
- 99 Hill J, McSweeney C, Wright A D G, et al. Measuring methane production from ruminants. [Trends Biotechnol](#), 2016, 34: 26–35
- 100 Armsby H P. The principles of animal nutrition, with special reference to the nutrition of farm animals. [Nature](#), 1903, 68: 30
- 101 Kellner O J, Goodwin W. The Scientific Feeding of Animals. London: Gerald Duckworth and Co., Ltd., 1913
- 102 Flatt W P. Methods of calorimetry (B), Indirect. In: Cuthbertson D P, ed. The International Encyclopedia of Food and Nutrition, vol. 17: Nutrition of Animals of Agricultural Importance, Part 2. New York: Pergamon Press, 1969. 491–520
- 103 Blaxter K L. Methods of measuring the energy metabolism of animals and interpretation of results obtained. [Fed Proc](#), 1971, 30: 1436–1443
- 104 Global Research Alliance. Technical Manual on Respiration Chamber Design. In: Pinares-Patiño C S, Waghorn G, eds. Wellington: Ministry of Agriculture and Forestry. 2012
- 105 Ku-Vera J C, Valencia-Salazar S S, Piñeiro-Vázquez A T, et al. Determination of methane yield in cattle fed tropical grasses as measured in open-circuit respiration chambers. [Agric For Meteorol](#), 2018, 258: 3–7
- 106 Shi W, Moon C D, Leahy S C, et al. Methane yield phenotypes linked to differential gene expression in the sheep rumen microbiome. [Genome Res](#), 2014, 24: 1517–1525
- 107 Storm I M L D, Hellwing A L F, Nielsen N I, et al. Methods for measuring and estimating methane emission from ruminants. [Animals](#), 2012, 2: 160–183
- 108 Zhao Y G, O'Connell N E, Yan T. Prediction of enteric methane emissions from sheep offered fresh perennial ryegrass (*Lolium perenne*) using data measured in indirect open-circuit respiration chambers1. [J Anim Sci](#), 2016, 94: 2425–2435
- 109 Tomkins N W, McGinn S M, Turner D A, et al. Comparison of open-circuit respiration chambers with a micrometeorological method for determining methane emissions from beef cattle grazing a tropical pasture. [Anim Feed Sci Tech](#), 2011, 166-167: 240–247

- 110 Zimmerman P R, Zimmerman R S. Method and system for monitoring and reducing ruminant methane production: U.S. Patent 8307785. 2012-11-13
- 111 Cottle D J, Velazco J, Hegarty R S, et al. Estimating daily methane production in individual cattle with irregular feed intake patterns from short-term methane emission measurements. *Animal*, 2015, 9: 1949–1957
- 112 Huhtanen P, Ramin M, Hristov A N. Enteric methane emission can be reliably measured by the GreenFeed monitoring unit. *Livestock Sci*, 2019, 222: 31–40
- 113 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. *Anim Feed Sci Tech*, 2015, 203: 41–52
- 114 Hammond K J, Crompton L A, Bannink A, et al. Review of current *in vivo* measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants. *Anim Feed Sci Tech*, 2016, 219: 13–30
- 115 Branco A F, Giallongo F, Frederick T, et al. Effect of technical cashew nut shell liquid on rumen methane emission and lactation performance of dairy cows. *J Dairy Sci*, 2015, 98: 4030–4040
- 116 Waghorn G C, Jonker A, Macdonald K A. Measuring methane from grazing dairy cows using GreenFeed. *Anim Prod Sci*, 2016, 56: 252–257
- 117 Todd R W, Moffet C, Neel J P S, et al. Enteric methane emissions of beef cows grazing tallgrass prairie pasture on the southern great plains. *Trans ASABE*, 2019, 62: 1455–1465
- 118 Jia P, Tu Y, Liu Z, et al. Diets supplementation with *Bacillus subtilis* and *Macleaya cordata* extract improve production performance and the metabolism of energy and nitrogen, while reduce enteric methane emissions in dairy cows. *Anim Feed Sci Tech*, 2022, 294: 115481
- 119 Dong L, Zhao L, Li B, et al. Dietary supplementation with xylooligosaccharides and exogenous enzyme improved milk production, energy utilization efficiency and reduced enteric methane emissions of Jersey cows. Preprints, 2022, doi: 10.21203/rs.3.rs-2288605/v1
- 120 Todd R W, Cole N A, Harper L A, et al. Flux-gradient estimates of ammonia emissions from beef cattle feedyard pens. In: International Symposium on Air Quality and Waste Management for Agriculture. Broomfield. 2007. Saint Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007. 81
- 121 Prajapati P, Santos E A. Measurements of methane emissions from a beef cattle feedlot using the eddy covariance technique. *Agric For Meteorol*, 2017, 232: 349–358
- 122 Businger J A, Oncley S P. Flux measurement with conditional sampling. *J Atmos Ocean Technol*, 1990, 7: 349–352
- 123 D. L. Bjorneberg, A. B. Leytem, D. T. Westermann, et al. Measurement of atmospheric ammonia, methane, and nitrous oxide at a concentrated dairy production facility in Southern Idaho using open-path FTIR spectrometry. *Trans ASABE*, 2009, 52: 1749–1756
- 124 Hensen A, Loubet B, Mosquera J, et al. Estimation of NH_3 emissions from a naturally ventilated livestock farm using local-scale atmospheric dispersion modelling. *Biogeosciences*, 2009, 6: 2847–2860
- 125 Fu G C, Yang Y, Song Z H. Preliminary discussion on current situation of meadows and main reasons of degradation of China (in Chinese). *Inner Mongol Environ Sci*, 2009, 21: 32–35 [付国臣, 杨韞, 宋振宏. 我国草地现状及其退化的主要原因. 内蒙古环境科学, 2009, 21: 32–35]

Research advances on enteric methane emission from ruminants in natural grazing system

SHI FuYu¹, JING XiaoPing¹, HUANG XiaoDan², MA ZhiYuan¹ & LONG RuiJun¹

1 State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2 School of Public Health Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

In recent years, extreme weather events including extreme precipitation, extreme drought, heat wave, and extreme low temperature have occurred frequently around the world. This is mainly due to global warming caused by greenhouse gases produced by human activities. Therefore, it is the shared goal of all countries to achieve carbon neutrality, increased climate resilience, and mitigated climate changes. Methane (CH₄) is the second most important greenhouse gas after carbon dioxide (CO₂), but its warming potential is stronger. Methane from enteric fermentation in ruminants not only affects the environment, but also represents the loss of feed energy. As one of the important sources of CH₄ emission, extensive livestock systems have attracted much attention in recent years because of their impact on climate changes. This article mainly introduces the CH₄ emission of ruminants in the extensive livestock systems, and the mitigation strategies and management practices. It also introduces several accounting methods and monitoring technologies for CH₄ emission of ruminants, aiming to provide technical guidance for the medium- and long-term strategy of reducing the carbon footprint of livestock production systems and achieving the “double carbon” goal.

greenhouse gas, methane, extensive livestock systems, mitigation strategies, measurement methods

doi: [10.1360/SSV-2022-0282](https://doi.org/10.1360/SSV-2022-0282)