

反刍动物甲烷排量监测技术应用研究进展

叶岩 祝天宇 吴泽全 蔡晓华
(黑龙江省农业机械工程科学研究院, 哈尔滨 150081)

摘要: 反刍动物通过向大气释放甲烷气体导致全球变暖,甲烷作为全球第二大温室气体,其排放带来的温室效应相当于 CO₂ 的 25 倍。国内外反刍动物甲烷排放核算方法和监测技术正向着全面化、智能化和管控精准化的方向发展。为了监测反刍动物甲烷排放量,为畜禽养殖业甲烷减排核算提供参考,寻找合适的反刍动物甲烷排放核算及监测方法成为当前相关学者研究的热点。本文主要对反刍动物温室气体甲烷排放来源、核算方法、监测技术的应用现状等内容进行阐述。参考国内外相关畜禽养殖业甲烷排放等相关文献,比较了 OECD(经济合作与发展组织)法、IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)系数法、省级温室气体清单编制指南和生命周期评价法(LCA)的优缺点。重点对比分析了呼吸面罩和头箱监测法、红外光谱技术监测法、呼吸代谢室监测法等 7 种方法的反刍动物甲烷排放监测技术应用研究进展,以期为推动国内反刍动物温室气体甲烷监测技术发展和减排工作提供参考与借鉴。

关键词: 反刍动物; 甲烷; 排量监测; 核算方法
中图分类号: X713; S823 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0277-16

Research Progress on Application of Methane Emission Monitoring Technology in Ruminants

YE Yan ZHU Tianyu WU Zequan CAI Xiaohua
(Heilongjiang Academy of Agricultural Machinery Engineering Science, Harbin 150081, China)

Abstract: Ruminants contribute to global warming by releasing methane gas into the atmosphere. Methane, the second largest greenhouse gas in the world, has a greenhouse effect of 25 times of that of CO₂. The accounting methods and monitoring technologies of ruminant methane emissions at home and from the overseas are developing in the direction of comprehensiveness, intelligence and precise management and control. In order to monitor the methane emissions of ruminants and provide a reference for the accounting of methane emission reduction in the livestock and poultry breeding industry, it has become a hot research topic for relevant scholars to find suitable accounting and monitoring methods for methane emissions from ruminants. The sources of ruminant greenhouse gas methane emissions, accounting methods, and the application status of monitoring technologies were mainly reviewed. Referring to relevant domestic and foreign literatures on methane emissions from livestock and poultry breeding, the advantages and disadvantages of the methods of Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) coefficient method, provincial greenhouse gas inventory compilation guidelines and life cycle assessment (LCA) were compared. The research progress of ruminant methane emission monitoring technology application of seven methods, including respiratory mask and breathing head box monitoring method, infrared spectroscopy monitoring method, and respiratory metabolic chamber monitoring method, was compared and analyzed, in order to promote the domestic ruminant greenhouse gas methane monitoring technology. The research result can provide reference for development and emission reduction work.

Key words: ruminants; methane; emission monitoring; accounting method

0 引言

在全球范围内,反刍动物是甲烷(CH_4)排放的重要贡献者^[1]。甲烷是反刍动物瘤胃正常活动的代谢物,却是畜牧业温室气体重要排放源,动物排放甲烷也是饲料营养素消化吸收不完全及利用效率不高的表现^[2]。甲烷(CH_4)是影响全球温室效应的重要温室气体,自工业革命以来全球平均气温上升有30%都要归因于甲烷排放^[3-4]。反刍动物大量排放甲烷是导致全球气候变暖的主要原因之一。我国畜牧业甲烷排放量所占比例高于全球平均水平,畜牧业向大气排放甲烷包括两种途径,主要以动物肠道发酵和粪便管理等途径排放^[5-6]。联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations,FAO)报告显示,畜牧业温室气体排放总量占全球温室气体排放总量的18%,其中来源于畜禽养殖业 CH_4 排放总量占全球总量的37%^[7]。畜禽粪便在贮存与处理过程中也会产生大量的 CH_4 ,其排放量在1994—2005年间增加了6.32%^[8-9]。根据国家信息通报,2014年我国农业生产活动的温室气体排放量占总排放量的6.7%,反刍动物排放甲烷在农业温室气体排放中所占比例有增加的趋势^[10-12]。反刍动物甲烷排放量的增加将加速全球气候变暖^[13-14],国内庞大的畜禽养殖规模会带来严重的环境污染和温室气体排放问题,对周边的生态环境产生巨大压力^[15]。牛是畜牧业反刍动物中排放量最高畜种,牛每年可排放温室气体 $4.675 \times 10^9 \text{ t}$ ^[16]。

目前国内针对反刍动物温室气体甲烷排放的准确监测仍存在困难,国内多数学者主要集中在能源和大气环境等领域甲烷监测技术的研究,而关于畜牧业反刍动物甲烷排放监测技术的研究相对较少,主要原因是监测过程中受监测环境因素干扰较大、不同领域甲烷排放量估算方法存在较大差异和各种监测方法的适用性和准确度存在不足等问题。

为对国内畜牧业反刍动物甲烷排放监测技术有更加全面的认识,从而提升国内温室气体减排效果和提高畜牧业生产效益,本文总结当前畜牧业反刍动物中排放量较高畜种甲烷排放监测技术,并对反刍动物温室气体甲烷的主要来源、甲烷排量核算方法和甲烷排放监测技术在畜牧领域的应用等内容进行阐述,最后对反刍动物甲烷排量监测技术的发展趋势进行展望,以期反刍动物甲烷排放监测技术的应用提供参考依据。

1 反刍动物甲烷排放

1.1 甲烷排放及研究现状

反刍动物甲烷排放主要来源于食草动物肠道发酵并以呼吸、暖气或屁的形式排放到大气中,或通过排出的粪、尿等有机物等形式产生甲烷释放到外界环境中。反刍动物主要包括奶牛、黄牛、水牛、山羊、绵羊、马、驴、骡、骆驼^[12]。《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》中指出畜禽种类不同,其温室气体排放量具有显著差异,如牛和水牛每年可排放温室气体甲烷量最高,小型家禽甲烷释放量最低,如图1(数据来源:中国气候变化初始国家信息通报)所示^[17]。

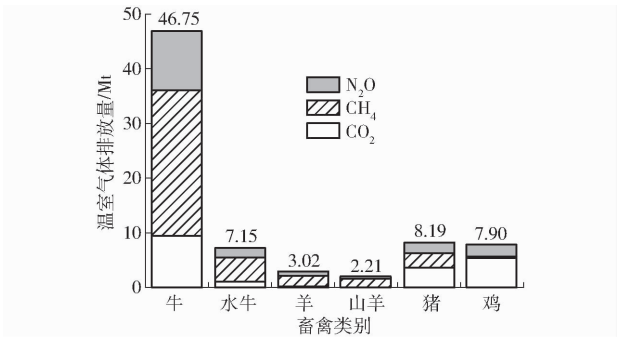


图1 各畜禽温室气体排放

Fig.1 Greenhouse gas emissions of livestock and poultry

1.1.1 反刍动物粪便管理

反刍动物粪便管理过程中甲烷排放是指在畜禽粪便施入到土壤之前动物粪便贮存和处理所产生的 CH_4 ^[18-19]。畜禽粪便堆放管理会造成甲烷的大量排放,其中甲烷释放主体奶牛的粪便在一个月内的自然堆放管理模式下,每千克牛粪挥发性固体在春、夏、秋季的甲烷排放量分别为223.97、4 603.31、351.38 mg ^[20],由此可知其夏季释放量是其它季节的13~20.5倍。粪便管理产生的甲烷排放占排放总量近10%,相当于8亿吨 CO_2 排放量^[21]。同时,反刍动物粪便管理过程中,影响温室气体排放的主要因素包括贮存方式、粪尿有机物含量、环境温度、碳氮比和酸碱度等^[22-23]。由于甲烷的产生主要是在厌氧条件下进行的,反刍动物粪便堆肥管理时,前期产生的甲烷较多,后期的排放较弱^[24]。

作为畜禽养殖系统中主要温室气体排放环节,畜禽粪便的温室气体排放特点及减排措施受到了广泛关注^[25]。国内学者针对反刍动物粪便释放甲烷的研究多集中在添加剂^[26-27]、堆肥形式、贮存模式和处理方式^[28-30]等外部条件。

MOSQUERA等^[31]测试了牧场厚垫料饲养方式下的甲烷排量要高于散栏饲养方式。ZHANG等^[32]针对丹麦境内9个不同类型的牧场气体排放量测量

发现,各牧场甲烷排放的差异主要取决于粪便处理方式和地面类型的不同。JOSÉ 等^[33]发现实体地面和漏缝地面上奶牛甲烷排放未有明显差异,但在 5~35℃ 时,随着环境温度的升高,反刍动物粪便排放的甲烷量显著升高。HANIFZADEH 等^[34]研究了过热蒸汽干燥(SSD)技术作为替代肥料管理方法,结果表明富营养化和全球变暖潜力分别降低了 95% 和 70%。AMON 等^[35]通过研究比较好氧堆肥和厌氧堆放农家肥期间甲烷排放量,结果表明厌氧堆放的农家肥温室气体甲烷排放量比堆肥的高得多。

国内外反刍动物饲养过程中,由于饲养环境、粪便管理和清粪方式方法等诸多因素的区别,不同国家甲烷监测数据差异较大。

1.1.2 反刍动物肠道发酵

反刍动物肠道发酵产生的甲烷是机体能量利用过程中的重要损失,同时动物的肠道微生物发酵是产生 CH₄的最主要途径。反刍动物胃肠道甲烷合成的前体物不同,可以将甲烷合成路径分为二氧化碳还原、甲基营养型和乙酸异化 3 种^[36]。反刍家畜胃肠道甲烷排放主要来自瘤胃和后肠道,并通过呼吸和排气的形式释放到大气,其中瘤胃甲烷占胃肠道甲烷生成总量的 80% 以上^[37]。据联合国粮食及农业组织报道^[21],肠道发酵占畜牧业排放总量的 44%。反刍动物的瘤胃是一个厌氧发酵罐,寄居着大量的瘤胃微生物,瘤胃液中的产甲烷菌主要利用氢、CO₂和乙酸等为底物,以 CO₂-H₂还原途径合成甲烷并通过暖气而排出^[38-39]。反刍动物在新陈代谢过程中有 8% 的能量消耗生成了 CH₄,温室气体排放量高,证明能量消耗越高,其饲料资源的浪费越高和经济利润越低^[40]。

目前国内反刍动物肠道发酵过程中产生甲烷排放量的研究主要集中在瘤胃微生物菌群、日粮调整和添加剂等^[41-42],而反刍动物肠道发酵产生温室气体的监测技术相关研究较少。这主要是因为温室气体甲烷监测技术应用面临动物源甲烷量采集、动物非静止状态和甲烷量采集点非均匀分布等困难。

1.1.3 间接甲烷排放

通过查阅相关文献资料可知,国内外学者针对反刍动物饲养过程中,饲料加工、生产和能源消耗等间接甲烷排放量的研究相对较少,相关研究主要集中在反刍动物饲养过程中,温室气体排放总量和二氧化碳(CO₂)的间接排放。如白玫等^[43]基于 2015 年北京市 8 家碳排放管理水平较高的规模化奶牛养殖企业的生产数据,分析得出奶牛场的能源消耗和

粪便管理的温室气体排放量接近,分别占总排放量的 11.24% 和 11.11%。孙亚男等^[44]从组织层次上详细列出了规模化奶牛场的温室气体排放清单,其中土地利用过程 CH₄排放为 1 059.4 t/a(以 CO₂计),占比为 9.3%。甘雨田^[45]研究发现奶牛养殖过程中,奶牛场环境控制、粪污治理、自动饲喂、挤奶等设备运转会消耗电力、煤炭等能源,从而导致二氧化碳的排放。冯雷雨^[46]研究发现饲养奶牛过程中,单位奶牛的年均电力消耗量为 401.84 kW·h,年均消耗柴油量为 46.88 L,年均消耗汽油量为 5.74 L,年均耗煤量为 0.064 t。根据联合国粮食及农业组织发布的全球畜牧供给链主要排放来源相对贡献份额显示:肠道发酵 CH₄占比为 44.3%;粪便管理占比为 5.2%;饲料-水稻 CH₄排放量占比为 0.5%,如图 2 所示^[21]。

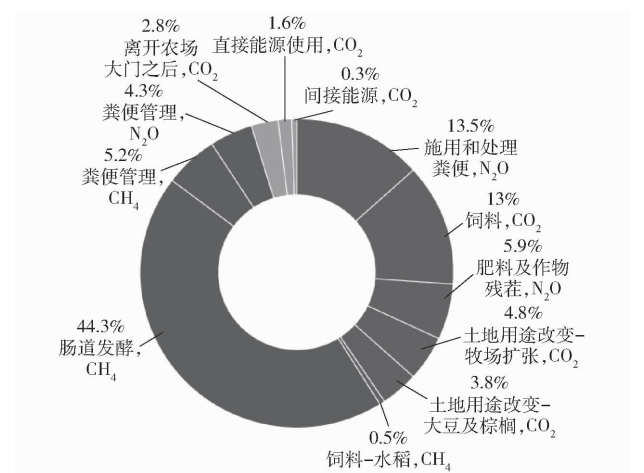


图 2 GLEAM 2.0 全球畜牧供给链主要排放来源相对贡献份额

Fig.2 GLEAM 2.0 relative contribution share of major emission sources in global livestock supply chain

综上,国内外大多数学者研究主要以反刍动物肠道发酵和粪便管理等温室气体产生的机理和减排技术措施等方向开展研究,而从反刍动物间接甲烷排量的核算和监测等相关研究依然缺乏。

1.2 反刍动物甲烷排放特点

反刍动物甲烷排放主体在不同品种、不同生长阶段及不同饲喂措施等条件下,其甲烷排放因子均存在差异^[47]。成年奶牛甲烷排放量随着牛龄的增长而增加,并在 2 000 日龄前后时达到最大值后开始下降^[48]。樊霞等^[49]采用 SF₆示踪法研究发现不同日粮类型对肉牛甲烷排放量影响也不同。周艳^[50]通过试验发现不同体质量阶段和生长期的肉用绵羊排放的甲烷产量不同,随着试验动物体质量的增加,其线性相关逐渐减弱。2000—2010 年世界奶牛和肉牛甲烷排放量占牲畜甲烷总排放量约 75%,其次是绵羊和山羊^[51]。温度对奶牛粪便温室

气体排放速率和排放量影响很大^[52]。反刍动物(奶牛、牛肉、山羊和绵羊)在肥沃草地上放牧的甲烷排放量(223 g/d)高于在贫瘠草地上放牧(179 g/d)^[53]。通过体外产气技术,分析犊牛饲喂甲烷排量较高的饲料混合物,其甲烷排量和能量损失更高,其膳食能量损失占总消化能的 13.83%, 占总代谢能的 16.08%^[54]。不同品种及不同条件下饲养的反刍动物,其甲烷排放量差异性明显。同时诸多因素影响反刍动物 CH₄ 的产生,如摄入水平、饲料类型和质量、能源消耗类型、动物大小、生长速度、生产水平和环境温度等影响因素。因此,甲烷排放量的差异性变化研究,要综合考虑反刍动物各因素的影响和条件的变化。

2 反刍动物甲烷排放核算方法

畜牧业温室气体排放的核算方法主要有 OECD 核算法、IPCC 系数法、生命周期评价法、省级温室气体清单编制指南等^[55-56]。

2.1 OECD 法

OECD 法是经济合作与发展组织于 1991 年公布的反刍动物甲烷排放量估算方法,因该方法温室气体估算范围较小,准确性不高,使得该方法当前使用频率较低。董红敏等^[57]结合中国反刍动物能量供应的特点,利用 OECD 提供的反刍动物甲烷排放量计算方法,初步估算国内反刍动物甲烷排放量,为国内学者估算反刍动物温室气体甲烷排放量奠定了技术基础。

用 OECD 法估算甲烷排放量需要详尽的基础数据,且反刍动物排放机制较为复杂且评估过程易忽略很多影响因素导致测定结果不准确,因此目前大多数研究者常使用 IPCC 法进行核算^[58]。

2.2 IPCC 系数法

IPCC 系数法是目前应用最广泛的一种核算方法。IPCC 法(2006)是指依据联合国气候变化委员会编写的《国家温室气体清单指南》列出的温室气体排放源、算法和参数等计算温室气体排放总量的详细方法^[59]。

近年来,国内外学者针对 IPCC 系数法核算反刍动物温室气体排放情况已开展很多研究。国内相关学者的研究主要集中在畜禽温室气体排放总量、对全球温室气体排放影响及相关模型建立的等方面。徐文倩等^[60]采用 IPCC 中畜禽粪便管理排放因子及测算方法,研究符合我国现阶段畜牧业生产实际的畜禽粪便产甲烷潜力。陈昭辉等^[61]采用 IPCC 公布的奶牛肠道发酵和奶牛粪便存贮的估算方法测量产生的 CH₄ 排放量。胡向东等^[62]运用 IPCC 最新

公布的畜禽温室气体排放系数和计算方法估算全国 2000—2007 年,年平均排放甲烷总量为 1 002.7 万 t,期间国内畜禽甲烷排放量比例处于下降趋势。李阳等^[63]运用 IPCC 清单方法核算了中国各省(直辖市、自治区)农业源非二氧化碳温室气体(GHG)的排放。国外的相关研究主要有 OMINSKI 等^[64]运用 IPCC 系数法估算出加拿大每头肉牛和奶牛 CH₄ 排放量分别为 16.0 t 和 3.6 t。VERGÉ 等^[65]采用 IPCC 系数法对奶牛产生的甲烷排放量进行估算,得出甲烷排放量约为 19.31 kg,且单位质量奶牛的温室气体排放量约为 4.55 mg。KEBREAB 等^[66]基于 IPCC 系数法建立一种预测奶牛甲烷排放准确性和精确度较高的 Cowpoll 模型,试验结果表明该模型能够更准确地模拟奶牛的饮食差异。

2.3 生命周期评价法(LCA)

生命周期评价法是利用相关碳排放系数计算整个畜牧业碳排放过程,包括饲料粮种植、饲料粮运输与加工、牲畜胃肠发酵、畜禽饲养环节耗能、粪便管理系统和畜禽产品加工等畜牧业的碳排放总量^[67]。BRODT 等^[68]利用生命周期评估方法计算与生产相关的所有温室气体排放。ZERVAS 等^[69]运用生命周期评价方法估算欧盟每千克畜禽产品温室气体甲烷排放量,从大到小的排序依次为牛肉、羊肉、猪肉、禽肉、鸡蛋。BHATT 等^[70]认为生命周期评价法(LCA)越来越多地被用作评估绵羊行业环境影响的重要工具,同时牧场管理者更倾向于从生命周期角度制定最佳管理办法。王效琴等^[27]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。王路路等^[71]研究运用全生命周期分析家庭牧场肉羊温室气体排放量和强度。孟祥海等^[72]利用全生命周期方法研究分析中国畜牧业温室气体排放时空特征。刘长奇等^[73]采用混合生命周期法,将生命周期框架与经济投入产出生命周期评价相结合核算测量温室气体排放量。

生命周期评价法(LCA)具有全面和综合性等优势,当前已广泛应用于温室气体监测研究当中。然而,运用该方法也存在一些缺点,如应用该方法获取数据要求较为精准时,需要投入较多的物力财力等资源。

2.4 省级温室气体清单编制指南

省级温室气体清单编制指南是指中国国家发改委为掌握国内各省温室气体排放现状,落实各省域中长期温室气体排放的分解指标文件,可为研究国内各省市温室气体清单的清单边界、温室气体种类、核算方法和工具等提供帮助。目前的清单编制工作采取的是“先整体后局部,先顶层后底层,先国家后

地方”的编制路径^[74]。

我国已发布的《省级温室气体清单编制指南(试行)》就是在 IPCC 系数法的基础上提出的^[75]。郭运功^[76]利用 IPCC 国家温室气体清单指南,构建国内特大城市温室气体清单编制测算工具,并测算上海市 1995—2006 年温室气体排放量。白卫国等^[77]参考《省级温室气体清单编制指南(试行)》对广元市农业排放温室气体甲烷排量进行核算,结果表明畜牧业是温室气体的重要排放源。基于《省级温室气体清单编制指南》^[15,75]列出国内 2005—2015

年中国畜牧业各畜禽温室气体甲烷排放因子,如表 1 所示。各反刍动物甲烷排放量核算方法对比如表 2 所示。国外部分国际机构联合发布全球首个《城市温室气体核算国际标准》(GPC)并建立了城市温室气体清单,为城市温室气体排放核算方法、制定减排目标和应对气候变化等提供指导^[78]。综上,省级温室气体清单编制指南的理论和实践应用上已取得了一定进展,但与开展温室气体起步较早的欧美国家相比,总体发展现状仍处于起步探索及完善阶段。

表 1 各畜禽温室气体排放因子

Tab. 1 Emission factors from different livestock										kg/(头·a)
排放源	奶牛	非奶牛	水牛	绵羊	山羊	猪	家禽	马	驴/骡	骆驼
肠道 CH ₄	92.23	68.70	79.10	8.13	8.33	1.00	0.00	18.00	10.00	46.00
粪便 CH ₄	6.49	2.82	5.11	0.28	0.30	3.46	0.02	1.37	0.75	1.60

表 2 反刍动物甲烷排放量核算方法对比

Tab. 2 Comparison of accounting methods for methane emissions of ruminants		
核算方法	优点	缺点
OECD 法	应用简易、操作简单	核算结果精度较低,适用于甲烷排放量监测精度不高的情况
IPCC 系数法	技术成熟、应用全面	对排放系统自身发生变化时的处理能力较差 ^[58] ,复杂条件下适应性较差
生命周期评价法	精度高、范围广	较高的人力和物力资源投入,运用周期长
省级温室气体清单编制指南	符合国内各省份的实际核算需求	各省编制内容和方法有差异,相关研究仍处于探索和完善阶段

上述甲烷核算方法当中,生命周期评价法是当前核算温室气体甲烷的主流方法,该核算方法具有整体性和系统性等优点。相比于 OECD 法,IPCC 系数法具有准确和全面的优势。IPCC 系数法在自然条件下计算甲烷排放量的准确性要低于生命周期评价法。与国外相比,国内省级温室气体清单编制指南研究仍处于探索和完善阶段。

综上所述,国内反刍动物甲烷排放量核算方法应用范围较广的是 IPCC 法,而生命周期法等融合方法将是未来主流核算方法。因此,研发适合我国畜牧业反刍动物甲烷排放量核算通用技术和方法是未来研究的重点。

3 反刍动物甲烷排放监测技术的应用

国外研究学者针对反刍动物甲烷排放量监测技术开展了广泛研究,相比国内较先进,其技术发展具有监测范围广、技术先进、作业效率高和性能稳定等特点。通过梳理国内外甲烷排放监测技术相关文献,目前方法主要包括牛用呼吸面罩、红外光谱、GreeFeed 系统、呼吸代谢室法、示踪法、气相色谱法、甲烷传感器监测法和牛胃电胶囊等反刍动物甲烷气体排放监测技术^[79-81]。

3.1 呼吸面罩和头箱监测法

呼吸面罩法和头箱法监测反刍动物甲烷排放量

的原理相似。呼吸面罩法通过监测装置将反刍动物的鼻子或嘴部罩住。呼吸头箱法则是将反刍动物整体头部安置在箱内。当前采用呼吸面罩测量甲烷排放量时,反刍动物可自由采食和饮水,而呼吸头箱法则不能,但头箱法相比呼吸面罩测得数据更准确。上述两种方法的缺点是仅能采集口鼻呼出的温室气体,而后肠道排放的甲烷等温室气体无法采集,该方法的应用优点是使用成本低且操作简单。

查阅相关文献资料可知,英国公司泽尔普(ZELP)^[82]设计利用呼吸面罩装置监测甲烷排放量,监测的同时能够利用面罩内部的催化剂与甲烷发生氧化反应,将牛呼出的甲烷转化为二氧化碳和水后释放出去,降低牛打嗝排放的甲烷量,从而减缓畜牧养殖产生的温室气体排放对全球气候变化的危害,该产品预计在 2023 年后上市,如图 3 所示。

2021 年 9 月在第 24 届中国北京国际科技产业博览会上,中国科学院亚热带农业生态研究所研制的一种动物智能穿戴设备“奶牛呼吸面罩”,可实时监测奶牛的血氧饱和度,判断是否发生高原反应,并根据个体需要调节吸氧和监测奶牛生理状况^[83]。奶牛鼻吸式呼吸面罩如图 4 所示。

翟夏杰^[84]利用呼吸面罩法进行了内蒙古荒漠草原放牧季绵羊甲烷排放量的研究。冯仰廉等^[85]

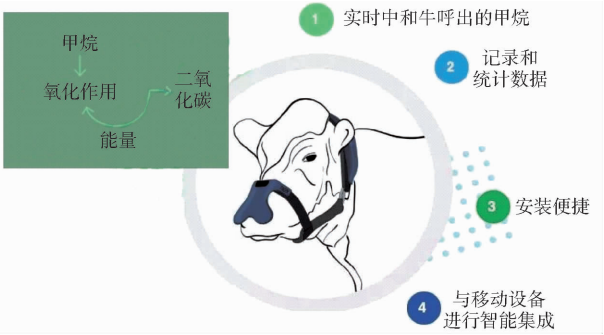


图 3 呼吸面罩示意图

Fig. 3 Schematic of breathing mask



图 4 奶牛鼻吸式呼吸面罩

Fig. 4 Cow nasal breathing mask

利用新闭路循环式面具法测定反刍动物甲烷排放量。周虹等^[86]通过呼吸面罩法与呼吸测热装置测定绵羊温室气体排放量,结果表明测定甲烷排放量时两种方法间差异不显著($P > 0.05$)。郭城^[87]研究和改进了一种呼吸面具,用以测量马、牛、羊、猪等家畜的能量代谢量。

呼吸面罩和头箱监测法因缺少反刍动物后肠道甲烷排放量的监测数据,同时该技术装置固定在反刍动物头部时,影响反刍动物自然行为状态的舒适性,致使测量数据的准确性和真实性有待验证。同时,该方法也不适合群体和放牧条件下甲烷排放量测定。因此,该技术推广使用可能受到限制。

3.2 红外光谱技术监测法

目前,红外光谱技术应用较为广泛,应用于反刍动物温室气体排放监测时具有精度高、灵敏度高等特点。李俊豪等^[88]研制了一种基于开放光路的高稳定性笼式结构光学谐振腔,并结合离轴积分腔输出光谱技术监测大气 CH_4 浓度的传感系统。叶玮琳等^[89]等采用 ICL 研制的甲烷、乙烷双气体同步测量系统和红外大气甲烷乙烷双组分气体的同步移动监测装置,能够覆盖甲烷吸收线 $2\,999.06\text{ cm}^{-1}$,响应时间为 82.5 s 。北京农业智能装备技术研究中心^[90]研制了基于可调谐二极管激光光谱技术,可同时监测多组畜禽牧场甲烷等有害气体排放量。

目前,国外在温室气体排放光学监测技术主要为美国国家标准与技术研究所(NIST)和堪萨斯州立大学(KSU)的研究人员开发的“Agricomb”光频率

梳仪器^[91-93]在空间上同时测量甲烷等主要温室气体排放量,如图 5 所示。该仪器在设定路径上往复监测时,仪器会根据外界环境吸收红外光的精确阴影和数量来识别痕量气体,如图 6 所示。



图 5 “Agricomb”光频率梳仪器

Fig. 5 Instrument diagram of “Agricomb” optical frequency comb

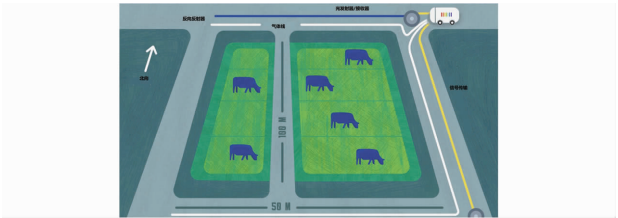


图 6 光频率梳仪器牛场试验简图

Fig. 6 Schematic of cattle field test of optical frequency comb instrument

SYPNIEWSKI 等^[94]通过比较傅里叶变换红外光谱法(FTIR)和非分散红外光谱法(NDIR)对商业饲养条件下奶牛呼吸的甲烷和二氧化碳浓度进行测定。OKPARA 等^[95]利用中红外(MIR)光谱技术预测 CH_4 排放量,并结合其它因素改进了使用 MIR 光谱预测 CH_4 排放量测量方法。VANLIERDE 等^[96]利用 MIR 光谱估算 RC 记录的泌乳奶牛 CH_4 排放方程,验证在牛奶光谱数据库上的应用稳健性和相关性。ROESSLER 等^[97]采用甲烷激光检测(LMD)方法评估草场饲养的 4 只图灵森林雌性山羊在自然放牧行为时呼出的 CH_4 浓度。

综上所述,红外光谱技术的主要特点是不干扰动物自然行为活动,相比呼吸面罩监测法能够满足甲烷监测的特定要求,能够实现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监测应用具有很大潜力。

3.3 呼吸代谢室监测法

呼吸代谢室法的基本原理是将反刍动物置于实验室内,通过测定设定时间内呼吸室内反刍动物瘤胃和肠道发酵等产生的甲烷浓度变化来计算甲烷排放量。

国内利用呼吸代谢室法监测温室气体排放量相关研究较多且已有部分应用^[98-99]。呼吸代谢室是用于测定动物能量代谢的设备,主要有闭路循环式呼吸室、开闭式和开路循环式呼吸测热室 3 种,目前

普遍采用监测稳定的开路式^[100]。张晓明等^[101]在四川农业大学动物营养研究所利用开路循环式呼吸测热室,试验研究不同蛋白质饲料对肉牛氮代谢和甲烷排放的影响。张相伦等^[102]利用吉林省农业科学院自主研制的大型动物开放回流式呼吸测热装置,采用全收粪尿法进行消化代谢试验方法,试验研究饲料粗蛋白质含量对降低草原红牛的甲烷产生量的影响。赵一广等^[103]采用 Sable 开路循环式呼吸测热系统测定肉羊 24 h 瘤胃 CH₄ 的排放量。魏炳栋等^[104]利用开放式呼吸测热装置研究杜寒杂交母羊营养物质代谢及能量需要参数。陈丹丹等^[105]利用开放式循环呼吸测热系统监测体质量在 60 kg 左右的肉羊,测量肉羊甲烷日排出量在 51.95 ~ 62.65 L 之间。香艳等^[106]利用呼吸代谢气体排放装置对不同体质量、月龄和是否饲喂添加剂的舍饲红牛进行呼吸代谢气体变化规律的研究,结果表明呼吸代谢排放的 CH₄、CO₂和消耗的 O₂随时间变化的规律具有较高的一致性。

BLAXTER 等^[107]使用呼吸室法测定牛羊甲烷产生量与消化能力之间的关系。ISLAM 等^[108]采用呼吸代谢室法对体质量为(35 ± 5) kg 的 1 年龄绵羊进行甲烷排放量的估算,测得单位绵羊的 CH₄排放量为 17 g/d。PINARES-PATIO 等^[109]通过测量试验羊群在呼吸室中放置 2 d 的 CH₄排放量,结果表明在调整采食量之后,羊的 CH₄排放特征仍存在遗传变异和特征可重复性。

呼吸代谢室法适于个体及少量反刍动物甲烷排放测定,对舍饲动物测定结果较准确和全面,但此技术缺点是不适用于放牧条件下和大量反刍动物的测定,其测定空间限制反刍动物正常活动,不能真实模拟反刍动物真实的活动环境,难以消除反刍动物个体差异和应激性。此外其建造成本较高并且运行维护需要专业人员,致使该技术在国内外未得到广泛应用。

3.4 示踪法监测甲烷排放量

示踪法技术方法原理是基于将已知释放速率的渗透管投放至反刍动物瘤胃中,反刍动物在呼吸过程中示踪物随甲烷气体一同排出,通过采集并测定二者气体的浓度之比,从而计算出甲烷气体的释放速率,该项技术可测定个体动物和群体动物的甲烷排放量^[110]。

确定示踪法 SF₆的排放速率是测定反刍动物甲烷排放量的关键^[111]。示踪法 SF₆采用“投药-灌药枪法”将测定渗透速率的 SF₆的渗透管送至牛瘤胃中。牛呼吸换气时,SF₆与甲烷等气体同时排出,并根据 SF₆示踪法的测定原理,测算出甲烷浓度。郭

雪峰^[112]采用 SF₆示踪技术对内蒙古白绒山羊甲烷排放量进行监测,试验结果表明 SF₆示踪法使用简便,结果较准确。胡家乐等^[113]研究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。

STEVEN 等^[114]利用六氟化硫示踪技术预估不同年龄阶段的放牧荷斯坦奶牛甲烷排放量。MUÑOZ 等^[115]研究对比六氟化硫(SF₆)和呼吸室技术测量奶牛甲烷排放技术,并确定通过直肠释放的 CH₄比例,认为 SF₆技术对于估算 CH₄排放量准确度相对较高。LASSEY^[116]研究发现 SF₆示踪技术是最适合用于观测牲畜消化道 CH₄排放的方法。DEIGHTON 等^[117]研究发现使用 SF₆监测反刍动物甲烷排放量时,温度的影响会导致检测肠道甲烷排放量偏高。DORICH 等^[118]使用六氟化硫示踪技术(SF₆)和新型便携式自动开路气体定量系统(GQS)测量牧场内分泌乳中期荷斯坦奶牛的肠道 CH₄排放量,试验结果表明,SF₆导致 CH₄排放量变异系数较大是因为谷仓通风有限和环境内气体浓度高。

示踪法是目前应用范围较广且较为常用的动物甲烷测定方法。该方法操作较为简单,对试验动物的影响较小,结果也较为可靠,可用于放牧条件下测定甲烷的排放量,是目前较为流行的方法。

3.4 GreeFeed 系统监控牧场甲烷气体排放量

文献[119 - 120]报道的利用嗅探法和通量法分析和测量反刍动物二氧化碳和甲烷的 GreeFeed 技术系统,具有不影响动物行为的特点^[119 - 120]。HUHTANEN 等^[121]引入了 GreenFeed 排放监测装置,通过测量牛访问监测装置时的气体浓度和流量来测算 CH₄排量。HAMMOND 等^[122]研究发现 GreenFeed 系统甲烷数据采集的准确性取决于获得测量数据的数量和时间,在同等使用条件下,GreenFeed 系统无法检测使用呼吸室(RC)或六氟化硫示踪剂(SF₆)识别个体动物甲烷排放量的差异性。ALEMU 等^[123]通过比较使用呼吸室(RC)和 GreenFeed 系统测得的甲烷和二氧化碳排放量,得出两种测量技术之间的 CH₄产率仅在高 RFI 组存在差异($P = 0.01$)。GreenFeed 系统虽然具有无创伤、非侵入式和可用于大群动物的特点,但在国内相应的技术应用仍为空白^[124]。GreenFeed 系统结构示意图如图 7 所示。

3.6 气相色谱法

气相色谱法(Gas chromatography, GC)指用气体作为流动相,根据气相携带混合物中不同物质在固定相中移动速度的不同而进行检测的一种方法。气相色谱法应用范围广,如现代气相色谱(GC)由 MARTIN 和 JAMES 于 1952 年发明,已成为现代化

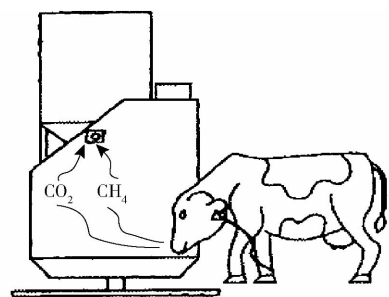


图 7 GreenFeed 系统结构示意图
Fig. 7 Schematic of GreenFeed system structure

学中最重要和应用最广泛的分析技术之一^[125]。气相色谱法具有分析速度快、灵敏度和准确性高等特点,在畜禽场温室气体检测领域得到广泛应用^[126-127]。HAO 等^[128]采用气相色谱法试验影响甲烷等气体排放量的影响因素。WANG 等^[129]采用气相色谱-甲烷分析仪对猪场沼液贮存中甲烷浓度进行了动态检测研究。LOCKYER 等^[130]在英国西南部接近自然放牧条件下,使用气相色谱仪测量 5 岁成年母绵羊进入和离开隧道时,空气中的甲烷排放量为每只动物平均每天 20.3 L。

万婷婷等^[131]利用双柱配置的气相色谱法分析甲烷、非甲烷总烃排放量,实现一次进样完成全部分析。陈秋兰^[132]采用玻璃注射器采样-气体自动进样系统和双柱单检测器气相色谱法对 NMHCs 进行测定,试验结果证明,该方法能够准确测量气体中的甲烷和总烃含量。陈渠等^[133]设计了一种毛细管气相色谱法测定方法,试验结果表明该方法能够直接快速测定猪个体甲烷气体产量。王俊红等^[134]利用顶空-气相色谱检测方法(外标法)测定反刍动物瘤胃液中挥发性脂肪酸含量,并对顶空进样条件进行优化,试验结果表明该方法操作简单、定量准确和重复性良好。

随着气相色谱技术的深入研究及应用领域的日趋广泛,该技术在石油化工、空气监测、生物化学、食品药品添加剂和质量检测等领域均得到推广和应用。但气相色谱技术在不同行业领域中有不同的技术标准和要求,因此未来气相色谱技术应围绕上述各个领域,逐渐向微型化、智能化、快速检测和便携式的方向发展。

3.7 甲烷传感器监测法

甲烷传感器监测法是指待测气体成分与传感器之间发生反应,通过传感器性质的变化测量待测气体成分和浓度的方法^[135]。甲烷传感器作为一种重要的畜牧业环境监测设备,近年来,国内外相关监测反刍动物甲烷气体传感器的技术应用发展较快。

MUOZ-TAMAYO 等^[136]将模型 Silico Model 与 IT 测量实时传感器集成于一体,用以预测大规模环

境中牲畜的甲烷排放量。ZHANG 等^[137]设计制造了一种适用于低浓度甲烷检测的新型石墨烯基光纤甲烷传感器,试验结果表明该传感器具有良好的线性拟合和再现性。ROY 等^[138]研制一种高灵敏度的硅衬底镍合金微加热甲烷传感器,该传感器在更低的温度下也能提供稳定的甲烷排放量监测数据反馈。LONG 等^[139]设计研究一种基于点光源三维光路模型的有效光干涉甲烷传感器,并对于干涉条纹调整方法和温漂补偿方法进行了验证。

赵燕杰等^[140]研究了一种甲烷、温度同时检测的光纤甲烷温度双参数检测系统和装置。杨艳芳等^[141]设计了一款紧凑高灵敏的 CH₄ 气体传感器,该甲烷传感器使用性价比高的 DFB 型近红外激光二极管作为激发光源,装置简单,成本低廉,可以满足大气环境检测等领域的需求。吕亮^[142]采用溶胶-凝胶的方法制备出石墨烯气敏材料,并以此材料制备出高灵敏性能的甲烷传感器。陈成锋等^[143]通过改进光干涉式甲烷测定器,实现了零级条纹的自动定位与数字化处理,降低人为和温度漂移造成的测量误差,提高了甲烷测量精度。刘洋等^[144]采用混合可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)与波长调制光谱(WMS)的检测技术,研制出能够稳定监测甲烷痕量气体检测仪。季文海等^[145]基于光路自动准直的甲烷遥测技术,设计研发电控可变焦透镜,实现了光路自动准直,并对气体泄漏遥测装置进行优化。内蒙古基硕科技有限公司^[146]研发的基于牛胃电胶囊牧场数字化管理系统是集多种传感器于一体的多功能集成装备,该装置从牛瘤胃中获取健康数据,同时监测牛的活动量、体态和牛胃产生的甲烷气体量等数据信息。“牛胃电胶囊”使用示意图如图 8 所示,产品外观如图 9 所示。

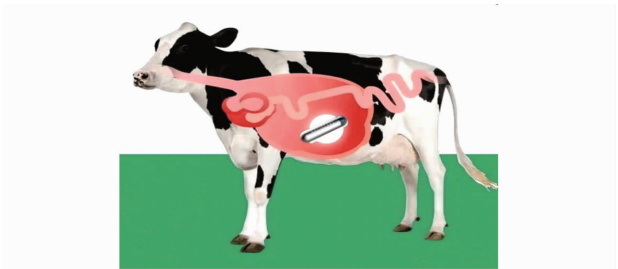


图 8 “牛胃电胶囊”使用示意图
Fig. 8 Schematic of electric capsules in stomach of cow

现有畜牧业反刍动物甲烷传感器研究集中在监测精度、体积大小、标定操作等方面,随着传感器的制备工艺和甲烷监测技术的发展,未来甲烷气体传感器将向着可同时在线监测多种气体的智能化、自动化、微型化和精准化等方向发展。

综上所述,不同的反刍动物甲烷排量监测方法



图9 “牛胃电胶囊”产品外观图

Fig.9 Product appearance of electric capsules in stomach of cow

表 3 反刍动物甲烷排放量监测方法及其应用特点

Tab.3 Domestic methane (CH₄) monitoring methods and their application characteristics

监测方法	优点	缺点
呼吸面罩和头箱监测法	实时监测,佩戴和数据传输简易,技术成熟,使用范围广	不能监测反刍动物后端排气的甲烷释放量,易出现应激反应
激光气体分析仪	精度高,监测范围广,灵敏度高,不干扰动物正常活动	易受天气影响;应用成本较高
呼吸代谢室法	技术较成熟,国际上公认的精确测定方法	不适合群体和放牧条件下测定;试验动物需要经过一段时间的训练才能适应
GreeFeed 系统	无创伤,非侵入式和可用于大群动物	监测精度受反刍动物的采食规律影响较大
示踪法	可以同时进行大批动物的测定,成本低,对动物产生的应激小,适应时间短 ^[147]	适用于风速较小或无风环境中,技术有待进一步完善
气相色谱法	灵敏度高、性能比较稳定、适用性强	连续检测结果的误差范围较大
甲烷传感器监测法	体积小、质量轻、检测精度高、读数直观	容易受到热变化和水汽等影响

技术在未来智慧农业领域仍具有良好的应用前景^[148]。未来该领域发展可总结为以下几方面：

- (1)与国外相比,国内针对反刍动物温室气体甲烷排放监测技术方面开展的研究相对较少,主要集中应用在非农领域的能源化工等行业,而农业相关领域主要集中在种植业和畜牧业,其中畜牧领域的主要研究多集中在调控反刍日粮营养结构、优化改良动物品种、粪便管理和使用添加剂等降低温室气体排放等技术研究,而畜牧业温室气体甲烷排放量的监测技术应用较少。虽然国内甲烷浓度监测技术研究已取得一定的进展,但实际应用推广效果不佳,主要原因在于人们对畜牧产业温室气体排放情况重视程度不够、应用成本较高和监管力度不足等。因此,积极吸收国外先进经验,研发高质量低成本的甲烷监测技术将有助于我国畜牧业的健康发展和温室气体的减排效果。
- (2)国内畜牧养殖饲养量大且多数生产水平较低,饲料组成多种多样且主要以粗饲料饲喂为主。规模化等形式的畜牧养殖甲烷排放量对饲养环境内畜禽健康和大气环境均会产生一定的负面影响。通过总结分析发现国内目前畜牧养殖甲烷监测方式不尽相同,监测数据的准确性有一定的局限性和不确定性,相关监测数据量化标准难以统一。因此,在未

各有特点,表 3 所示为不同类型反刍动物甲烷排放量监测方法的优点和缺点,选用时需要根据具体情况,综合考虑易操作程度、精度要求和经济成本等实际需求。

4 讨论与展望

甲烷排放量监测技术在非农领域等应用较为广泛和成熟,但在农业领域的应用范围仍比较受限,相关技术研究并不完善,但反刍动物甲烷排放量监测

- 来监测畜牧领域甲烷排放量的方式和方法选择,要结合实际饲养水平和情况而定,综合运用国内外甲烷等温室气体的监测技术,提高国内反刍动物甲烷排放量监测的准确性和适用性,进一步采取合理措施控制甲烷等温室气体排放量,从而实现畜牧产业健康可持续发展。
- (3)畜牧业温室气体监测伴随着时间、季节和采样地域等不同因素影响,其试验结果也不断变化,实现精准动态监测畜牧业温室气体的排放量较为困难。国内外不同文献对反刍动物甲烷排放量监测技术的核算方法、温室气体的定义和采集方式也并不一致。因此,未来国内畜牧业温室气体的核算方法、监测技术和国家及升级标准研究亟待进一步开展。
- (4)研发适合国内需求的高质量、性能稳定的温室气体甲烷排放量监测技术及装备,是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水平的有效途径。采用甲烷排放量监测技术有利于从根源上提升国内反刍动物饲喂与管理的整体质量水平,也符合当下畜牧智慧养殖饲养的未来发展方向。充分运用反刍动物甲烷排放量监测技术,对提升我国反刍动物科学配方饲喂、粪便精确管理和温室气体减排效果等具有提高生产效益和增强环境保护的双重效益。

参 考 文 献

[1] KUMARI S, FAGODIYA R K, HILOIDHARI M, et al. Methane production and estimation from livestock husbandry: a mechanistic understanding and emerging mitigation options[J]. Science of the Total Environment, 2020(709): 136–135.

[2] 桑断疾,董红敏,郭同军,等.日粮类型对细毛羊甲烷排放及代谢物碳残留的影响[J].农业工程学报,2013,29(17):176–181.

[3] SANG Duanji, DONG Hongmin, GUO Tongjun, et al. Effects of diet types on methane production and carbon residue of metabolites of Xinjiang fine wool sheep[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(17): 176–181. (in Chinese)

[4] 李丽曼.国际能源署:全球甲烷排放监控力度不足[N].中国能源报,2022-02-28(5).

[5] 董文军,张俊,唐傲,等.黑龙江省2010—2019年水稻生产碳中和概况及低碳稻作技术对策分析[J].黑龙江农业科学, 2021(12):84–90.

[6] DONG Wenjun, ZHANG Jun, TANG Ao, et al. Carbon neutrality profiles of rice production and technological strategies of low-carbon rice cultivation in Heilongjiang Province from 2010 to 2019[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2021(12): 84–90. (in Chinese)

[7] 曹珍,廖新伟.家畜胃肠道甲烷减排技术进展[J].家畜生态学报,2011,32(4):1–8.

[8] CAO Zhen, LIAO Xindi. Advances in technologies for reducing methane in the gastrointestinal tract of livestock[J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2011, 32(4): 1–8. (in Chinese)

[9] 赵静雯,吴慧光.奶牛生产中甲烷(CH₄)减排的研究进展[J].中国畜牧兽医,2015,42(11):3105–3110.

[10] ZHAO Jingwen, WU Huiguang. Research progress on emission-reduction of methane(CH₄) in dairy cow production[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2015, 42(11): 3105–3110. (in Chinese)

[11] STEINFELD H, GERBER P, WASSENAAR T, et al. Livestock's long shadow environmental issues and options[M]. LEAD-FAO, 2006.

[12] OFIPCC W. Climate change 2013: the physical science basis[J]. Contribution of Working, 2013, 43(22):866–871.

[13] 苏伟.中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M].北京:中国经济出版社, 2013.

[14] 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,2019,40(5):76–81.

[15] LIU Ming, ZHANG Enping, SONG Yuxuan. Law and reduction measures of harmful gas emission in cattle farms[J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2019, 40(5): 76–81. (in Chinese)

[16] 孙雨坤,闫晓刚,班志彬,等.硝酸盐对肉牛甲烷产量和生长性能的影响[J].中国农业大学学报,2017,22(7):54–60.

[17] SUN Yukun, YAN Xiaogang, BAN Zhibin, et al. Effect of nitrate on the methane production and productivity of cattle[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(7): 54–60. (in Chinese)

[18] 国家信息通报.中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报[EB/OL]. (2018-12-12). <http://tnc.ccchina.org.cn/Detail.aspx?newsId=73250&Tid=203>.

[19] 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, 30(2):156–165.

[20] DONG Lifeng, YANG Xiuzhu, GAO Yanhua, 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, 30(2): 156–165. (in Chinese)

[21] 王欢,乔娟.中国畜牧业温室气体排放的脱钩与预测分析[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(5):793–802.

[22] WANG Huan, QIAO Juan. Decoupling and predictive analysis of greenhouse gas emission from animal husbandry in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(5): 793–802. (in Chinese)

[23] 郭娇,齐德生,张妮娅,等.中国畜牧业温室气体排放现状及峰值预测[J].农业环境科学学报,2017,36(10):2106–2113.

[24] GUO Jiao, QI Desheng, ZHANG Niya, et al. Chinese greenhouse gas emissions from livestock: trend and predicted peak value[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(10): 2106–2113. (in Chinese)

[25] 汪开英,李鑫,陆建定,等.碳中和目标下畜牧业低碳发展路径[J].农业工程学报,2022,38(1):230–238.

[26] WANG Kaiying, LI Xin, LU Jianding, et al. Low-carbon development strategies of livestock industry to achieve goal of carbon neutrality in China[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(1): 230–238. (in Chinese)

[27] 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报[M].北京:中国计划出版社出版,2004.

[28] 北京市质量技术监督局.温室气体排放核算指南畜牧养殖企业:DB11/T 1422—2017[S]. 2017.

[29] 邱子健,靳红梅,高南,等.江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测[J].农业环境科学学报,2022,41(3):658–669.

[30] QIU Zijian, JI Hongmei, GAO Nan, et al. Temporal characteristics and trend prediction of agricultural carbon emission in Jiangsu Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(3): 658–669. (in Chinese)

[31] 胡彬,赵浩翔,王业健,等.基于动态箱法的北京延庆区牛粪堆放CH₄和N₂O排放量估算[J].农业工程学报,2019,35(3):198–203.

[32] HU Bin, ZHAO Haoxiang, WANG Yejian, et al. Estimation of annual CH₄ and N₂O emissions from solid dairy manure storage in Yanqing of Beijing based on dynamic chamber method[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 198–203. (in Chinese)

[33] Global livestock environmental assessment model (GLEAM) [EB/OL]. [2022-06-22]. <https://www.fao.org/gleam/results/en/>.

[34] CORTUS E L, JACOBSON L D, HETCHLER B P, et al. Methane and nitrous oxide analyzer comparison and emissions from dairy freestall barns with manure flushing and scraping[J]. Atmospheric Environment, 2015, 100:57–65.

[35] WON S, YOON Y, REZA A, et al. Estimation of greenhouse gas emission from hanwoo (Korean native cattle) manure

- management systems[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(8):845.
- [24] 朱海生,左福元,董红敏,等.堆体规模对牛粪堆肥氨气和温室气体排放的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(5):77-84.
ZHU Haisheng, ZUO Fuyuan, DONG Hongmin, et al. Effect of pile scale on emissions of ammonia and greenhouse gas during cattle manure composting[J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2018, 46(5):77-84. (in Chinese)
- [25] HOU YONG, VELTHOF G L, OENEMA O. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions from manure management chains: a meta-analysis and integrated assessment[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(3):1293-1312.
- [26] 公维佳,李文哲,刘建禹.厌氧消化中的产甲烷菌研究进展[J].东北农业大学学报,2006,37(6):838-841.
GONG Weijia, LI Wenzhe, LIU Jianyu. Progress of research on methanogens bacteria in anaerobic digestion[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2006, 37(6):838-841. (in Chinese)
- [27] 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.
WANG Xiaoqin, LIANG Dongli, WANG Xudong, et al. Estimation of greenhouse gas emissions from dairy farming systems based on LCA[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(13):179-184. (in Chinese)
- [28] 赵晨阳,李洪枚,魏源送,等.翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响[J].环境科学,2014,35(2):533-540.
ZHAO Chenyang, LI Hongmei, WEI Yuansong, et al. Effects of turning frequency on emission of greenhouse gas and ammonia during swine manure windrow composting[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):533-540. (in Chinese)
- [29] 朱新梦,董爱怡,王洪媛,等.牛粪堆肥方式对温室气体和氨气排放的影响[J].农业工程学报,2017,33(10):258-264.
ZHU Xinmeng, DONG Wenyi, WANG Hongyuan, et al. Effects of cattle manure composting methods on greenhouse gas and ammonia emissions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(10):258-264. (in Chinese)
- [30] 江滔,FRANK S,李国学.冬季堆肥中翻堆和覆盖对温室气体和氨气排放的影响[J].农业工程学报,2011,27(10):212-217.
JIANG Tao, FRANK S, LI Guoxue. Effect of turning and covering on greenhouse gas and ammonia emissions during the winter composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(10):212-217. (in Chinese)
- [31] MOSQUERA J, HOL J, MONTENY G J. Gaseous emissions from a deep litter farming system for dairy cattle[J]. *International Congress Series*, 2006, 1293(1):291-294.
- [32] ZHANG G, STRM J S, LI B, et al. Emission of ammonia and other contaminant gases from naturally ventilated dairy cattle buildings[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 92(3):355-364.
- [33] JOSÉ P, FANGUEIRO D, MISSELBROOK T H, et al. Ammonia and greenhouse gas emissions from slatted and solid floors in dairy cattle houses: a scale model study[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 109(2):148-157.
- [34] HANIFZADEH M, NABATI Z, LONGKA P, et al. Life cycle assessment of superheated steam drying technology as a novel cow manure management method[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 199:83-89.
- [35] AMON B, AMON T, BOXBERGER J, et al. Emissions of NH_3 , N_2O and CH_4 from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading)[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 60(1-3):103-113.
- [36] 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,2015,27(10):2994-3005.
SUN Kaijia, ZHU Jianying, MEI Yang, et al. Measures of reducing methane emission in ruminants gut[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27(10):2994-3005. (in Chinese)
- [37] 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 Xiumin, WANG Rong, MA Zhiyuan, et al. Enteric methane emissions and mitigation strategies in ruminants[J]. *Enteric Methane Emissions and Mitigation Strategies in Ruminants*, 2020, 39(4):732-742. (in Chinese)
- [38] 信金伟,姬秋梅.牦牛瘤胃和肠道微生物多样性及影响因素研究进展[J].家畜生态学报,2021,42(8):1-7.
XIN Jinwei, JI Qiumei. Research progress of yak rumen and intestinal microbial diversity and influencing factors[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2021, 42(8):1-7. (in Chinese)
- [39] 郭冬生.基于IPCC排放系数估测主要畜禽甲烷温室气体排放量[J].家畜生态学报,2020,41(9):65-68.
Guo Dongsheng. Estimation of methane greenhouse gas emissions from major livestock and poultry based on IPCC emission coefficients[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2020, 41(9):65-68. (in Chinese)
- [40] 张帆,刁其玉.畜牧业温室气体排放及其减排研究进展[J].家畜生态学报,2015,36(11):81-85.
ZHANG Fan, DIAO Qiyu. Research progress on greenhouse gas emissions of animal husbandry and emission reduction measures[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2015, 36(11):81-85. (in Chinese)
- [41] 董在坤,孟宪功,陈小云.硝酸盐对饲喂黑麦草奶牛生产性能、肠道甲烷排放及瘤胃发酵的影响[J].中国饲料,2019(18):72-75.
DONG Zaikun, MENG Xiangong, CHEN Xiaoyun. Effects of nitrate on production performance intestinal methane emission and rumen fermentation of dairy cattle fed with ryegrass[J]. *China Feed*, 2019(18):72-75. (in Chinese)
- [42] 刘旺景.反刍动物瘤胃微生物菌群及其影响因素的研究进展[J].饲料工业,2022,43(3):50-56.
LIU Wangjing. Research progress of ruminant microbial flora and its influencing factors in ruminants[J]. *Feed Industry*, 2022, 43(3):50-56. (in Chinese)
- [43] 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(5):78-85.
BAI Mei, MA Wenlin, WU Jianfan, et al. Evaluation on greenhouse gas emission of scale dairy farms in Beijing[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2017, 38(5):78-85. (in Chinese)
- [44] 孙亚男,刘继军,马宗虎.规模化奶牛场温室气体排放量评估[J].农业工程学报,2010,26(6):296-301.
SUN Ya'nan, LIU Jijun, MA Zonghu. Evaluation of greenhouse gas emissions from scale dairy farm[J]. *Transactions of the*

- CSAE, 2010, 26(6):296–301. (in Chinese)
- [45] 甘雨田. 中国奶牛产业碳排放量估算及影响因素研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019.
GAN Yutian. Research on the estimation and influence factors of carbon emission of dairy cattle industry in China[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [46] 冯雷雨. 牛奶产品温室气体排放与减排研究[D]. 北京:北京建筑大学,2016.
FENG Leiyu. Reserach on greenhouse gas emission and mitigation of milk product[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016. (in Chinese)
- [47] 段林丰, 卢培利, 蒲寅羽, 等. 典型城市群碳排放的脱钩效应及驱动机制研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(11):8.
DUAN Linfeng, LU Peili, PU Yanyu, et al. The decoupling effect and driving mechanism of carbon emissions in typical city groups[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(11):8. (in Chinese)
- [48] GRANDL F, AMELCHANKA S L, FURGER M, et al. Biological implications of longevity in dairy cows:2. changes in methane emissions and efficiency with age[J]. Journal of Dairy Science, 2016, 99(5):3472–3485.
- [49] 樊霞, 董红敏, 韩鲁佳, 等. 肉牛甲烷排放影响因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8):179–183.
FAN Xia, DONG Hongmin, HAN Lujia, et al. Experimental study on the factors affecting methane emission of beef cattle[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8):179–183. (in Chinese)
- [50] 周艳. 肉用绵羊生长期甲烷排放规律研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2018.
ZHOU Yan. Production models of methane emissions from growing sheep[D]. Alar: Tarim University, 2018. (in Chinese)
- [51] FAO. FAOSTAT[M]. Rome:Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2013.
- [52] 贾鹏, 董利锋, 屠焰, 等. 间接法测定反刍动物甲烷排放量的研究进展[J]. 动物营养学报, 2021, 33(9):4839–4847.
JIA Peng, DONG Lifeng, TU Yan, et al. Advancements in indireet methods from measuring methane emission from ruminants [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(9):4839–4847. (in Chinese)
- [53] BROUCEK J. Production of methane emissions from ruminant husbandry: a review[J]. Journal of Environmental Protection, 2014, 5(15):1482–1493.
- [54] PRUSTY S, KUNDU S S, SHARMA V K. Nutrient utilization and methane emissions in murrh buffalo calves fed on diets with different methanogenic potential[J]. Livestock Science, 2017, 202(8):89–95.
- [55] 师帅, 李翠霞, 李媚婷. 畜牧业“碳排放”到“碳足迹”核算方法的研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(6):36–41.
SHI Shuai, LI Cuixia, LI Meiting. Review of research from carbon emissions to carbon footprint in livestock husbandry[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(6):36–41. (in Chinese)
- [56] 张学智, 王继岩, 张藤丽, 等. 中国农业系统甲烷排放量评估及低碳措施[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(3):200–208.
ZHANG Xuezhi, WANG Jiyan, ZHANG Tengli, et al. Assessment of nitrous oxide emissions from Chinese agricultural system and low-carbon measures[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(3):200–208. (in Chinese)
- [57] 董红敏, 林而达, 杨其长. 中国反刍动物甲烷排放量的初步估算及减缓技术[J]. 农村生态环境, 1995(3):4–7.
DONG Hongmin, LIN Erda, YANG Qichang. Methane emitted from ruminants in China and the mitigation technologies[J]. Rural Eco-Environment, 1995(3):4–7. (in Chinese)
- [58] 奚永兰, 叶小梅, 杜静, 等. 畜禽养殖业碳排放核算方法研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(4):1–8.
XI Yonglan, YE Xiaomei, DU Jing, et al. Research progress on carbon emission accounting methods for livestock and poultry breeding industry[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(4):1–8. (in Chinese)
- [59] IPCC 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, volume 4—agriculture, forestry and other land use[M]. Kanagawa:IGES, 2006.
- [60] 徐文倩, 董红敏, 尚斌, 等. 典型畜禽粪便厌氧发酵产甲烷潜力试验与计算[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14):228–234.
XU Wenqian, DONG Hongmin, SHANG Bin, et al. Experiment and calculation on the biochemical methane potential of typical livestock and poultry manure in anaerobic digestion[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(14):228–234. (in Chinese)
- [61] 陈昭辉, 马宗虎, 程琼仪, 等. 利用整体分析法研究华北地区奶牛产业温室气体排放[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22):225–235.
CHEN Zhaohui, MA Zonghu, CHENG Qiongyi, et al. Greenhouse gas emissions from dairy industry in Northern China using holistic assessment approach[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(22):225–235. (in Chinese)
- [62] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10):247–252.
HU Xiangdong, WANG Jimin. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10):247–252. (in Chinese)
- [63] 李阳, 陈敏鹏. 中国省域农业源非 CO₂ 温室气体排放的影响因素分析与峰值预测[J]. 环境科学学报, 2021, 41(12):5174–5189.
LI Yang, CHEN Minpeng. Analysis of influencing factors and peak forecast of non-CO₂ greenhouse gas emissions from provincial agricultural sources in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(12):5174–5189. (in Chinese)
- [64] 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[J]. Canadian Journal of Animal Science, 2007, 87(3):459–467.
- [65] VERGÉ X P C, DYER J A, DESJARDINS R L, et al. Greenhouse gas emissions from the Canadian dairy industry in 2001 [J]. Agricultural Systems, 2007, 94(3):683–693.
- [66] KEBREAB E, JOHNSON K A, ARCHIBEQUE S L, et al. Model for estimating enteric methane emissions from United States dairy and feedlot cattle[J]. Journal of Animal Science, 2008, 86(10):2738–2748.
- [67] 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[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12):

10 – 19.

YAO Chengcheng, QIAN Shuangshuang, MAO Yuehua, et al. Decomposition of impacting factors of animal husbandry carbon emissions change and its spatial differences in China[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(12):10 – 19. (in Chinese)

[68] BRODT S, KENDALL A, MOHAMMADI Y, et al. Life cycle greenhouse gas emissions in California rice production[J]. Field Crops Research, 2014, 169:89 – 98.

[69] ZERVAS G, TSIPLAKOU E. An assessment of GHG emissions from small ruminants in comparison with GHG emissions from large ruminants and monogastric livestock[J]. Atmospheric Environment, 2012, 49(1):13 – 23.

[70] BHATT A, ABBASSI B. Review of environmental performance of sheep farming using life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 293:126192.

[71] 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[J]. 应用与环境生物学报, 2021,27(6):1591 – 1600.

WANG Lulu, XIN Xiaoping, LIU Xinchao, et al. Greenhouse gas emission of hulunbuir family pasture sheep, based on full life-cycle analysis[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2021,27(6):1591 – 1600. (in Chinese)

[72] 孟祥海,程国强,张俊彪,等. 中国畜牧业全生命周期温室气体排放时空特征分析[J]. 中国环境科学,2014,34(8):2167 – 2176.

MENG Xianghai, CHENG Guoqiang, ZHANG Junbiao, et al. Analyze on the spatialtemporal characteristics of GHG estimation of livestock's by life cycle assessment in China[J]. China Environmental Science,2014,34(8):2167 – 2176. (in Chinese)

[73] 刘长奇,黄亚继,王昕晔,等. 玉米秸秆制精制油的生命周期温室气体排放研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(10):1871 – 1878.

LIU Changqi, HUANG Yaji, WANG Xinye, et al. Life cycle greenhouse gas emissions of refined oil from corn straw[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2016,50(10):1871 – 1878. (in Chinese)

[74] 李晓亮,齐海云,安涛,等. 中小城市温室气体清单编制实践研究[J]. 科技管理研究,2016,36(3):230 – 234.

LI Xiaoliang, QI Haiyun, AN Tao, et al. Compilation practice of small and mid-sized cities' greenhouse gas inventory[J]. Science and Technology Management Research,2016,36(3):230 – 234. (in Chinese)

[75] 国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 北京:国家发展和改革委员会, 2011.

[76] 郭运功. 特大城市温室气体排放量测算与排放特征分析[D]. 上海:华东师范大学,2009.

GUO Yungong. The analysis on calculation and characteristics of greenhouse gas emission in mega-cities[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009. (in Chinese)

[77] 白卫国,庄贵阳,朱守先,等. 中国城市温室气体清单核算研究——以广元市为例[J]. 城市问题,2013(8):13 – 18.

BAI Weiguo, ZHUANG Guiyang, ZHU Shouxian, et al. Greenhouse gas accounting for China's cities: taking Guangyuan City for example[J]. Urban Problems,2013(8):13 – 18. (in Chinese)

[78] 卢露. 碳中和背景下完善我国碳排放核算体系的思考[J]. 西南金融,2021(12):15 – 27.

LU Lu. Thoughts on perfecting China's carbon emission accounting system under the background of carbon neutrality[J]. Southwest Finance,2021(12):15 – 27. (in Chinese)

[79] 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(15):41 – 44.

SUN Yukun, ZHAO Yumin, YAN Xiaogang, 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(15):41 – 44. (in Chinese)

[80] 李世易,郭同庆,刘鑫,等. 利用体外发酵法研究蜜蜂肽对瘤胃发酵参数及甲烷气体排放量的影响[J]. 动物营养学报, 2020,32(2):941 – 947.

LI Shiyi, GUO Tongqing, LIU Xin, et al. Effects of apidaecin on rumen fermentation parameters and methane emissions by in vitro fermentation[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition,2020,32(2):941 – 947. (in Chinese)

[81] 胡红波,李昊. “黑科技”打造畜牧健康管理专家[N]. 农民日报,2021 – 08 – 06(5).

[82] Zelp Company[EB/OL]. <https://www.zelp.co/the-technology-2/>.

[83] 张晴丹. 科技援藏让奶牛不惧“高反”[N]. 中国科学报,2021 – 10 – 12(3).

[84] 翟夏杰. 内蒙古荒漠草原放牧季绵羊呼吸及羊圈 CH₄ 排放研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.

ZHAI Xiajie. Research on CH₄ emission from sheep respiration and sheepfolds during the grazing season in desert grassland of Inner Mongolia[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[85] 冯仰廉,MOLLISON G S,SMITH J S 等. 新闭路循环式面具呼吸测热法的研究[J]. 北京农业大学学报,1985(1):71 – 79.

FENG Yanglian, MOLLISON G S, SMITH J S, et al. Research on new closed-circuit circulatory mask breathing calorimetry [J]. Journal of Beijing Agricultural University, 1985(1):71 – 79. (in Chinese)

[86] 周虹,班志彬,孙雨坤,等. 呼吸面罩法与呼吸测热装置测定绵羊温室气体排放量的试验[J]. 黑龙江畜牧兽医,2016(17):128 – 130.

ZHOU Hong, BAN Zhibin, SUN Yukun, et al. Experiment on determination of sheep greenhouse gas emissions by breathing mask method and breath calorimetry device[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine,2016(17):128 – 130. (in Chinese)

[87] 郭城. 家畜能量代谢试验采气装置的研制[J]. 兽医大学学报,1982(3):192 – 198.

GUO Cheng. Development of gas extraction device for livestock energy metabolism test[J]. Journal of Veterinary University, 1982(3):192 – 198. (in Chinese)

[88] 李俊豪,郑凯元,席振海,等. 基于开放光路离轴积分腔的甲烷传感技术与实验[J]. 中国激光,2021,48(16):150 – 158.

LI Junhao, ZHENG Kaiyuan, XI Zhenhai, et al. Open-path off-axis integrated cavity-based methane sensing technique and

- experiment[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 150 – 158. (in Chinese)
- [89] 叶玮琳, 周波, 余红志, 等. 中红外大气甲烷乙烷双组分气体的同步移动监测[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1938 – 1944.
YE Weilin, ZHOU Bo, YU Hongzhi, et al. In-motion monitoring of atmospheric methane and ethane using a mid-infrared dual-gas simultaneous detection sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 1938 – 1944. (in Chinese)
- [90] 佚名. 畜禽生理、生长和生态新型传感方法研究与设备研制[J]. 中国农村科技, 2020(4): 41.
- [91] WUEBBLES D J, HAYHOE K. Atmospheric methane and global change[J]. Earth Science Reviews, 2002, 57(3 – 4): 177 – 210.
- [92] HERMAN D I, WEERASEKARA C, HUTCHERSON L C, et al. Precise multispecies agricultural gas flux determined using broadband open-path dual-comb spectroscopy[J]. Science Advances, 2021, 7(14): 9765.
- [93] RINI M. Combing a herd for methane emissions[J]. Physics, 2020, 13: 92.
- [94] SYPNIEWSKI M, STRABEL T, CIESLAK A, et al. Technical note: interchangeability and comparison of methane measurements in dairy cows with 2 noninvasive infrared systems[J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(10): 9512 – 9517.
- [95] OKPARA M O. Milk fatty acids estimation by mid-infrared spectroscopy as proxy for prediction of methane emission in dairy cows[J]. Russian Agricultural Sciences, 2019, 45(4): 386 – 392.
- [96] VANLIERDE A, SOYEURT H, GENGLER N, et al. Short communication: development of an equation for estimating methane emissions of dairy cows from milk Fourier transform mid-infrared spectra by using reference data obtained exclusively from respiration chambers[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(8): 7618 – 7624.
- [97] ROESSLER R, SCHLECHT E. Application of the laser methane detector for measurements in freely grazing goats: impact on animals' behaviour and methane emissions[J]. Animal, 2020, 15(1): 100070.
- [98] 王贝, 许贵善, 董利锋, 等. 反刍动物甲烷排放测定和营养调控减排方法[J]. 饲料工业, 2018, 39(19): 49 – 55.
WANG Bei, XU Guishan, DONG Lifeng, et al. Research status about methane emission determination from ruminant and techniques of nutritional control and emission reduction[J]. Feed Industry, 2018, 39(19): 49 – 55. (in Chinese)
- [99] 周艳, 许贵善, 董利锋, 等. 不同饲养模式下饲料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, 30(4): 1367 – 1376.
ZHOU Yan, XU Guishan, DONG Lifeng, 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, 30(4): 1367 – 1376. (in Chinese)
- [100] 何晴, 董红敏, 陶秀萍. 反刍动物甲烷排放测试技术[C]//2000 全国畜牧工程学术研讨会, 2000.
HE Qing, DONG Hongmin, TAO Xiuping. Ruminant methane emission testing technology [C] // 2000 National Animal Husbandry Engineering Symposium, 2000. (in Chinese)
- [101] 张晓明, 王之盛, 唐春梅, 等. 不同蛋白质源饲料对肉牛能氮代谢和甲烷排放的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(7): 1830 – 1837.
ZHANG Xiaoming, WANG Zhisheng, TANG Chunmei, et al. Effects of different dietary protein sources on energy and nitrogen metabolism and methane emission of beef cattle[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, 26(7): 1830 – 1837. (in Chinese)
- [102] 张相伦, 刘基伟, 赵红波, 等. 饲料粗蛋白质水平对草原红牛呼吸代谢、养分表观消化率和血清生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(12): 6833 – 6842.
ZHANG Xianglun, LIU Jiwei, ZHAO Hongbo, et al. Effects of dietary crude protein levels on respiration metabolism, nutrient apparent digestibility and serum biochemical indices of steppe red cattle[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(12): 6833 – 6842. (in Chinese)
- [103] 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, 23(5): 726 – 734.
ZHAO Yiguang, DIAO Qiyu, DENG Kaidong, et al. Measurements and modulation of methane emission from ruminants[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2011, 23(5): 726 – 734. (in Chinese)
- [104] 魏炳栋, 刁其玉, 陈群, 等. 饲喂水平对杂交肉羊(母)营养物质代谢及能量需要参数的影响[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(7): 55 – 62.
WEI Bingdong, DIAO Qiyu, CHEN Qun, et al. Effect of different feeding levels on substance and energy metabolism of crossbred ewes[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(7): 55 – 62. (in Chinese)
- [105] 陈丹丹, 屠焰, 马涛, 等. 桑叶黄酮和白藜芦醇对肉羊气体代谢及甲烷排放的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(5): 1221 – 1228.
CHEN Dandan, TU Yan, MA Tao, et al. Effects of mulberry leaf flavonoids and resveratrol on gas metabolism and methane emission in mutton sheep[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, 26(5): 1221 – 1228. (in Chinese)
- [106] 香艳, 赵玉民, 张国梁, 等. 非实时监测法测定肉牛呼吸代谢试验的采气时间点的确定[C]//中国畜牧兽医学会 2013 年学术年会论文集, 2013: 165.
XIANG Yan, ZHAO Yumin, ZHANG Guoliang, et al. Determination of the gas collection time point in the non-real-time monitoring method for the determination of the respiratory metabolism test of beef cattle [C] // Proceedings of the 2013 Academic Annual Conference of the Chinese Society of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2013: 165. (in Chinese)
- [107] BLAXTER K L, CLAPPERTON J L. Prediction of the amount of methane produced by ruminants[J]. Br. J. Nutr., 1965, 19(4): 511 – 522.
- [108] ISLAM M, ABE H, HAYASHI Y, et al. Effects of feeding Italian ryegrass with corn on rumen environment, nutrient digestibility, methane emission, and energy and nitrogen utilization at two intake levels by goats[J]. Small Ruminant Research, 2000, 38(2): 165 – 174.

- [109] PINARES-PATIO C S, HICKEY S M, YOUNG E A, et al. Heritability estimates of methane emissions from sheep[J]. *Animal*, 2013, 7(Supp. 2):316–321.
- [110] 高民, 胡红莲, 杜瑞平. 反刍动物甲烷排放及减排策略[J]. *中国畜牧杂志*, 2013, 49(18):35–41.
GAO Min, HU Honglian, DU Ruiping. Ruminant methane emissions and emission reduction strategies[J]. *China Animal Husbandry*, 2013, 49(18):35–41. (in Chinese)
- [111] 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, 30(2):185–187.
BAN Zhibin, LIANG Hao, YANG Huaming. Development and application test of “open reflux breathing calorimetry device” for large animals[J]. *China Animal Husbandry and Veterinary Abstracts*, 2014, 30(2):185–187. (in Chinese)
- [112] 郭雪峰. 内蒙古白绒山羊甲烷产生量估测模型的建立及其影响因素的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
GUO Xuefeng. Studies on establishing of methane production prediction model and influencing factors on methane production of grazing in Inner Mongolian cashmere goats[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [113] 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 Jiale, MEI Yang, FU Tong, et al. Effect of different gas extraction methods on determination of methane emission results by six sulfur fluoride tracer method[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2019, 40(3):54–58. (in Chinese)
- [114] MORRISON S J, MCBRIDE J, GORDON A W, et al. Methane emissions from grazing holstein-friesian heifers at different ages estimated using the sulfur hexafluoride tracer technique[J]. *Engineering*, 2017, 3(5):753–759.
- [115] MUÑOZ C, YAN T, WILLS D A, et al. Comparison of the sulfur hexafluoride tracer and respiration chamber techniques for estimating methane emissions and correction for rectum methane output from dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(6):3139–3148.
- [116] LASSEY K R. Livestock methane emission: from the individual grazing animal through national inventories to the global methane cycle[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142(2–4):120–132.
- [117] DEIGHTON M H, WILLIAMS S, LASSEY K R, et al. Temperature, but not submersion or orientation, influences the rate of sulphur hexafluoride release from permeation tubes used for estimation of ruminant methane emissions[J]. *Animal Feed Science & Technology*, 2014, 194:71–80.
- [118] DORICH C D, VARNER R K, PEREIRA A, et al. Short communication: use of a portable, automated, open-circuit gas quantification system and the sulfur hexafluoride tracer technique for measuring enteric methane emissions in Holstein cows fed ad libitum or restricted[J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(4):2676–2681.
- [119] ZIMMERMAN P R. Method and system for monitoring and reducing ruminant methane production: ep2291072[P]. 2013.
- [120] MILLER J, SCHNEIDER D, HOLZWART M, et al. Grazing behaviour of cattle in rangeland grazing system with or without access to a green feed emission monitor[C]// Abstracts of Invited Papers and Posters. Canberra: Recent Advance in Animal Nutrition Australia, 2015:63–64.
- [121] HUHTANEN P, RAMIN M, HRISTOV A N. Enteric methane emission can be reliably measured by the GreenFeed monitoring unit[J]. *Livestock Science*, 2019, 222:31–40.
- [122] 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.
- [123] ALEMU A W, VYAS D, MANAFIAZAR G, et al. Enteric methane emissions from low- and high-residual feed intake beef heifers measured using greenfeed and respiration chamber techniques[J]. *Journal of Animal Science*, 2017, 95(8):3727.
- [124] 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, 32(6):2483–2490.
JIA Peng, TU Yan, LI Fadi, et al. Research advance in measurement methods of methane emission from ruminants[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(6):2483–2490. (in Chinese)
- [125] BARTLE K D, MYERS P. History of gas chromatography[J]. *Trac. Trends in Analytical Chemistry*, 2002, 21(9–10):547–557.
- [126] 汪开英, 吴捷刚, 赵晓洋. 畜禽场空气污染物检测技术综述[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(8):1458–1474.
WANG Kaiying, WU Jiegang, ZHAO Xiaoyang. Review of measurement technologies for air pollutants at livestock and poultry farms[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(8):1458–1474. (in Chinese)
- [127] LI J, LUO J, SHI Y, et al. Nitrous oxide emissions from dairy farm effluent applied to a New Zealand pasture soil[J]. *Soil Use & Management*, 2015, 31(2):279–289.
- [128] HAO X, CHANG C, LARNEY F J, et al. Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2):376.
- [129] WANG K, HUANG D, YING H, et al. Effects of acidification during storage on emissions of methane, ammonia, and hydrogen sulfide from digested pig slurry[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 122:23–30.
- [130] 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.
- [131] 万婷婷, 彭涛, 景立新. 气相色谱法检测废气中甲烷、非甲烷总烃的问题研究[J]. *中国环境监测*, 2016, 32(3):120–125.
WAN Tingting, PENG Tao, JING Lixin. Study on the determination of methane and non methane hydrocarbons by gas chromatography[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(3):120–125. (in Chinese)
- [132] 陈秋兰. 玻璃注射器-自动进样气相色谱法测定非甲烷总烃[J]. *中国环境管理干部学院学报*, 2018, 28(4):73–77.
CHEN Qiulan. Determination of non-methane hydrocarbons in gas by gas chromatography with glass syringe sampling, gas-autosampler[J]. *Journal of Environmental Management College of China*, 2018, 28(4):73–77. (in Chinese)

[133] 陈渠,曹庆云,周武艺,等.毛细管气相色谱法测定猪个体日产甲烷气体量方法研究[J].饲料工业,2012,33(13):55-57.
CHEN Qu, CAO Qingyun, ZHOU Wuyi, et al. Method research to determinate daily methane production of a pig by capillary gas chromatography[J]. Feed Industry,2012,33(13):55-57. (in Chinese)

[134] 王俊红,高歌,张圆圆,等.顶空-气相色谱法测定反刍动物瘤胃液中挥发性脂肪酸含量[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2021,47(5):667-672.
WANG Junhong, GAO Ge, ZHANG Yuanyuan, et al. Determination of the volatile fatty acid contents in rumen fluid of ruminants by headspace-gas chromatograph method[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2021,47(5):667-672. (in Chinese)

[135] 张石锐. 畜禽生产环境中主要有害气体监测方法研究[D].上海:上海交通大学,2014.
ZHANG Shirui. Monitoring methods research for harmful gases in livestock production environment[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)

[136] MUOZ-TAMAYO R, AGUDELO J, DEWHURST R J, et al. A parsimonious software sensor for estimating the individual dynamic pattern of methane emissions from cattle[J]. Animal, 2018, 13(6):1180-1187.

[137] ZHANG J Y, DING E J, XU S C, et al. Sensitization of an optical fiber methane sensor with graphene[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 37(SEP.):26-29.

[138] ROY S, SARKAR C K, BHATTACHARYYA P. A highly sensitive methane sensor with nickel alloy microheater on micromachined Si substrate[J]. Solid State Electronics, 2012, 76:84-90.

[139] LONG T, LI E, YANG L, et al. Analysis and design of an effective light interference methane sensor based on three-dimensional optical path model[J]. Hindawi, 2018,2018:1-11.

[140] 赵燕杰,常军,王昌,等.光纤甲烷温度双参数检测系统的研究[J].中国激光,2010,37(12):3070-3074.
ZHAO Yanjie, CHANG Jun, WANG Chang, et al. Research of fiber couple parameters monitoring system of methane and temperature[J]. Chinese Journal of Lasers,2010,37(12):3070-3074. (in Chinese)

[141] 杨艳芳,裴凯龙,尹旭坤,等.双光程光声光谱甲烷传感器[J].光谱学与光谱分析,2018,38(2):616-620.
YANG Yanfang, PEI Kailong, YIN Xukun, et al. Photoacoustic spectroscopy based methane sensor using a double-pass photoacoustic cell[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2018,38(2):616-620. (in Chinese)

[142] 吕亮. 石墨烯/SnO₂ 复合材料对天然气气敏特性的研究[D].哈尔滨:黑龙江大学,2016.
LÜ Liang. Study on the gas-sensing properties of graphene/SnO₂ composites for natural gas[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2016. (in Chinese)

[143] 陈成锋,梁涛涛,田富超,等.光干涉式甲烷测定器的零级条纹自动定位及性能测试[J].煤炭学报,2021,46(2):830-839.
CHEN Chengfeng, LIANG Yuntao, TIAN Fuchao, et al. Zero-order fringe automatic positioning and performance test of optical interference methane detector[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(2):830-839. (in Chinese)

[144] 刘洋,吴佳楠,陈孜孜,等.基于TDLAS-WMS的痕量甲烷气体检测仪[J].光谱学与光谱分析,2016,36(1):279-282.
LIU Yang, WU Jia'nan, CHEN Meimei, et al. The trace methane sensor based on TDLAS-WMS[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2016,36(1):279-282. (in Chinese)

[145] 季文海,宋迪,焦月,等.基于光路自动准直的甲烷遥测技术[J].光学学报,2020,40(18):125-133.
JI Wenhai, SONG Di, JIAO Yue, et al. Methane telemetry based on optical path automatic collimation[J]. Acta Optica Sinica,2020,40(18):125-133. (in Chinese)

[146] 李昊,胡红波.住在牛肚子里的“保健医生”[J].湖南农业,2021(8):53.

[147] 李斌昌.日粮精粗比对不同月龄后备奶牛甲烷排放与生长性能和营养物质消化的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2019.
LI Binchang. Effects of the ratios of concentrates to roughages on methane emission, growth performance and nutrient digestion of replacement heifers at different ages[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[148] 叶兴庆,程郁,张玉梅,等.我国农业活动温室气体减排的情景模拟、主要路径及政策措施[J].农业经济问题,2022(2):4-16.
YE Xingqing, CHENG Yu, ZHANG Yumei, et al. Scenario simulation, main paths and policy measures of greenhouse gas emission reduction of agricultural activities in China[J]. Issues in Agricultural Economy,2022(2):4-16. (in Chinese)