

青藏高原高寒牧区冷季补饲藏系绵羊温室气体排放特征

徐田伟^{1,3}, 胡林勇^{1,2**}, 葛世栋^{1,3}, 邹小艳^{1,2}, 赵娜^{1,2}, 徐世晓^{1,2*}

(1.中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; 2.中国科学院高原生物适应与进化重点实验室, 西宁 810001; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了揭示藏系绵羊温室气体排放特征,在青藏高原高寒牧区采用密封式呼吸箱-气相色谱结合的方法,于2013年冷季对3只身体健康、均重(50.13±1.28)kg的藏系绵羊温室气体(CH₄、CO₂、N₂O)日排放特征进行了研究。试验期间,动物日粮的精料为蒸煮饲料,粗料为青干草饼。结果表明,藏系绵羊的CH₄排放日动态具有明显规律性,排放峰值在8:00和17:00(P<0.01),排放峰值的出现时间与饲喂时间基本吻合,最小值出现在次日7:00;CO₂的日排放曲线相对平稳,N₂O的日变化没有明显规律且排放量极低。在冷季补饲模式下,藏系绵羊的CH₄、CO₂和N₂O日排放量分别为(16.17±1.27)、(549.18±20.63)g·head⁻¹和(0.73±0.32)mg·head⁻¹。

关键词:藏系绵羊; 温室气体; 甲烷; 二氧化碳; 氧化亚氮; 日排放特征

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)10-2071-06 doi:10.11654/jaes.2014.10.027

Greenhouse Gas Emissions from Tibetan Sheep with Supplementary Feeding in Alpine Pasture in Qinghai-Tibet Plateau During Cold Seasons

XU Tian-wei^{1,3}, HU Lin-yong^{1,2**}, GE Shi-dong^{1,3}, ZOU Xiao-yan^{1,2}, ZHAO Na^{1,2}, XU Shi-xiao^{1,2*}

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Greenhouse gas emissions from raising ruminants contribute to the global greenhouse gas production. This study presented results on greenhouse gas (including CH₄, CO₂, and N₂O) emissions from Tibetan sheep with supplementary feeding in Qinghai-Tibet Plateau. A combination of respiration chamber and GC methods was used to examine the diurnal patterns of greenhouse gas emissions in 3 Tibetan sheep [Average body weight (BW)=(50.13±1.28)kg] during cold season in 2013. The animals were fed with steamed concentrate diets and dry grass biscuits. The chamber was applied right prior to the measurements. Methane emission curve was characterized with apparent diurnal pattern, with emission peaks occurred at 8:00 am and 17:00 pm and the lowest emission rate appeared at 7:00 am. The rates of CO₂ emissions remained relatively stable through a day. However, N₂O emissions were quite low. The daily emissions of CH₄, CO₂ and N₂O from Tibetan sheep were (16.17±1.27), (549.18±20.63)g·head⁻¹ and (0.73±0.32)mg·head⁻¹, respectively.

Keywords: Tibetan sheep; greenhouse gases; methane; carbon dioxide; nitrous oxide; diurnal emission pattern

大气中CO₂、N₂O、CH₄等温室气体浓度的升高导致温室效应日趋严重,气候变暖及环境变化已成为国

际社会关注的焦点。2009年《World Watch》刊文指出,牲畜及其副产品至少排放325.64亿t CO₂当量的温室气体,占全球排放总量的51%^[1],远高于联合国粮农组织(FAO)在2006年的估计值(18%)。温室气体中,CO₂的温室效应贡献率达60%^[2],CH₄排放量虽然不及CO₂,但在100年时间尺度上,CH₄增温潜势是CO₂的25倍^[3],温室效应贡献率达18%,成为第二大温室气体。农业源CH₄主要来自反刍动物、湿地和稻田,反刍动物CH₄排放占15%~25%^[4],全球反刍动物每年排放CH₄约8000万t,占人为排放CH₄总量的

收稿日期: 2014-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030105); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070200); 中国科学院西部行动项目(KZCX2-XB3-05); 国家科技支撑项目(2011BAC09B06, 2012BAD13B01, 2014BAC05B00)

作者简介: 徐田伟(1988—),男,黑龙江方正人,博士研究生,从事反刍动物碳排放研究。E-mail: 98.tianwei@163.com

* 通信作者: 徐世晓 E-mail: sxu@nwipb.cas.cn

** 作者胡林勇与徐田伟对文章同等贡献

28%^[5]。可见,反刍动物对全球温室气体排放及气候变化有重要影响。在瘤胃生成 CH_4 时 2%~15% 的饲料能量以甲烷能的形式损失^[6]。因此,减少反刍动物 CH_4 排放,可以改善大气环境,提高饲料转化率,提高反刍动物养殖效益。

监测反刍动物 CH_4 排放的方法有呼吸测热室法^[7]、 SF_6 示踪法^[8-9]、呼吸箱法^[10]、体外产气法^[11]、反演式气体扩散技术^[4]等,研究人员针对不同地区、养殖环境和饲养方式对反刍动物的 CH_4 排放进行了大量研究^[12-13]。目前,藏系绵羊温室气体排放的监测研究相对较少,本研究使用密封式呼吸箱-气相色谱结合的方法,对冷季补饲藏系绵羊的温室气体排放进行估测,主要研究内容有:①揭示 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 日排放特征;②估算藏系绵羊 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 的日排放量;③探讨温室气体排放量与藏系绵羊干物质采食量(DMI)和代谢体重增量的关系。以期期为完善高原畜牧源温室气体排放清单提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验地点

藏系绵羊的补饲和温室气体采集在青海省贵南县过马营镇绵羊育肥合作社进行,野外试验于 2013-11-07 到 2013-12-03 进行,气体样品和饲料组分的检测在中国科学院西北高原生物所实验室内进行。

1.2 试验装置

本研究采用的密封式呼吸箱是依据史海山等、Islam 等^[14-15]研究方案改进而来。通过密封式呼吸箱采集藏系绵羊的温室气体样品,利用气相色谱(GC-7890A)进行分析,通过计算得到温室气体排放速率。呼吸箱为立方体结构,由代谢笼、密封壳和底板三部分构成。代谢笼由角铁和钢丝网制成,长 2.2 m、宽 1.5 m、高 1.7 m,固定于底板上;密封壳由聚乙烯材料制成,长 2.4 m、宽 1.8 m、高 1.8 m,体积为 7.776 m³。密封壳与底板契合,底板装有水封槽,代谢笼顶部固定 4 个风扇,侧壁固定有温湿度计,密封壳上安装有采气管。由一个导链系统负责密封壳升降,以促进密封式呼吸箱达到密封和通风效果。装置如图 1 所示。

1.3 试验设计与动物饲养

筛选身体健康、均重(50.13±1.28)kg 的藏系绵羊 3 只。预饲 20 d,以掌握动物的自由采食量,每日分别在 8:00 和 17:00 补饲精料,补饲后饲喂青干草饼,每日进食的精粗比约 3:2。精料为蒸煮饲料,主要组成为玉米(40%)、青稞(35%)和豆饼(20%),蒸煮后加入



图 1 试验装置

Figure 1 Experimental device for greenhouse gas emission study

1.5% 的食盐;青干草饼是种植牧草收割后制成的块状饲料。精料和青干草饼的营养组分如表 1 所示。动物的平均干物质采食量为 1.14 kg。在预饲的第 17~20 d,将藏系绵羊引入代谢笼进行适应,随后进入正试期。

1.4 温室气体采集

预饲期结束,开始采集气体样品。采样工作于 8:00 开始,为藏系绵羊带上粪袋(收集动物粪便),引入代谢笼中;接通风扇,以混匀箱内气体;向水封槽注满水,调节导链使密封壳降落与水封槽契合;呼吸箱构成一个密封系统;用接有三通阀的采气针管采集密封箱内气体样品,连续采气两管,记录采气时间和针管编号以及箱内温度、湿度,经过 30 min,重复上述方法采气两管;至此完成一次气体采集,调节导链使密

表 1 测量期间饲料的养分指标(%)

Table 1 Chemical composition of sheep diets during experimental period(%)

指标	蒸煮饲料含量	青干草饼含量
干物质 DM	59	91.2
粗蛋白 CP	11.6	5.7
酸性洗涤纤维 ADF	2.84	36.5
中性洗涤纤维 NDF	10.92	58.5
粗脂肪 EE	3	1.93
粗灰分 CA	2.4	4.8

封壳升起,进行通风。采气工作每小时一次,每天24次。次日8:00,更换动物粪袋,采用相同方法,继续采集气体样品,连续采样7 d。采样期间,按时给试验动物投放饲料,自由饮水。

1.5 气体样品检测

气体样品需在48 h内分析完毕。采用安捷伦气相色谱仪 Agilent 7890A GC System(Agilent, Hewlett Packard, USA)进行浓度检测,色谱仪内装离子火焰检测器(FID)和电子捕获检测器(ECD),FID检测器用于检测CO₂和CH₄体积浓度,工作温度250℃,载气为高纯氮气,ECD检测器用于检测N₂O体积浓度,工作温度为300℃,载气为高纯氮气。

1.6 计算排放通量

本研究监测藏系绵羊温室气体排放速率的方法,是一种有间断的监测,计算结果为藏系绵羊0.5 h的排放量,以该值的2倍估算1 h的排放量。通过累加各时段的温室气体排放速率得到藏系绵羊的温室气体日排放量。

排放速率的计算公式如下:

$$F_N = 2 \times (C_N - C_{N-1}) \times (V - V_0) / 1000n \times M / 22.41 \times J_T \times J_P$$

式中: F_N (g·head⁻¹·h⁻¹)为单只藏系绵羊在第 N 小时的温室气体(CH₄、CO₂、N₂O)排放速率; C_N (mL·m⁻³)为呼吸箱密封30 min时的箱内气体体积浓度; C_{N-1} (mL·m⁻³)为密封壳刚刚契合时的箱内气体体积浓度; V (m³)为呼吸箱体积,为7.766 m³; V_0 (m³)为动物体积; n 为实验动物的只数; M (L·mol⁻¹)为温室气体(CO₂、N₂O、CH₄)物质的量,22.41(L·mol⁻¹)为气体摩尔体积; J_T 为温度校正; J_P 为压强校正。

藏系绵羊采食单位质量的干物质(DM)的温室气体排放量由温室气体日排放量除以饲料干物质日采食量(DMI)来表示,代谢体重增加1 kg时的温室气体排放通量由温室气体排放量除以代谢体重增量表示。

1.7 数据处理

所得数据均采用平均值±标准误的形式表示;采用Microsoft Excel 2007进行数据整理和图形绘制;运用SPSS 19.0进行分析,各时段内排放速率差异的比较采用最小显著差法(LSD)

2 结果与分析

2.1 CH₄日排放特征

藏系绵羊的CH₄日排放曲线如图2所示。各时段排放速率在(0.52±0.019)~(0.96±0.026)g·head⁻¹·h⁻¹间变化,CH₄排放呈现一定规律性,有排放峰值和最小值,峰值出现于8:00和17:00($P < 0.01$),速率分别为(0.96±0.026)、(0.93±0.025)g·head⁻¹·h⁻¹,排放峰值出现与饲喂时间基本吻合。早8:00添料,随后1 h内CH₄排放速率达到峰值,继而排放速率降低,伴随17:00补充精料,CH₄排放速率又达到下一个峰值,随后逐渐下降,在21:00至次日3:00间,CH₄排放速率差异不显著($P > 0.05$),排放速率维持在0.63 g·head⁻¹·h⁻¹左右,凌晨7:00排放速率降至最小值(0.52±0.019)g·head⁻¹·h⁻¹。随着8:00添料,进入下一个CH₄排放日动态。试验期间,藏系绵羊CH₄排放速率为0.69±0.024 g·head⁻¹·h⁻¹,CH₄日排放量为(16.17±1.27)g·head⁻¹。

2.2 CO₂日排放特征

藏系绵羊CO₂日排放特征如图3所示。各时段排放速率处在(21.49±1.27)~(26.48±2.52)g·head⁻¹·h⁻¹之间;CO₂排放速率变化相对平稳,在9:00、14:00、18:00、21:00、22:00时,CO₂排放速率差异显著($P < 0.05$),其他时段不显著($P > 0.05$)。CO₂排放主要来自动物呼吸,排放速率在个别时段内出现小波动,可能是由于动物在代谢笼中安静休息时呼吸平缓使得CO₂交换量减少,或由于动物受到外界影响而呼吸加速促使CO₂

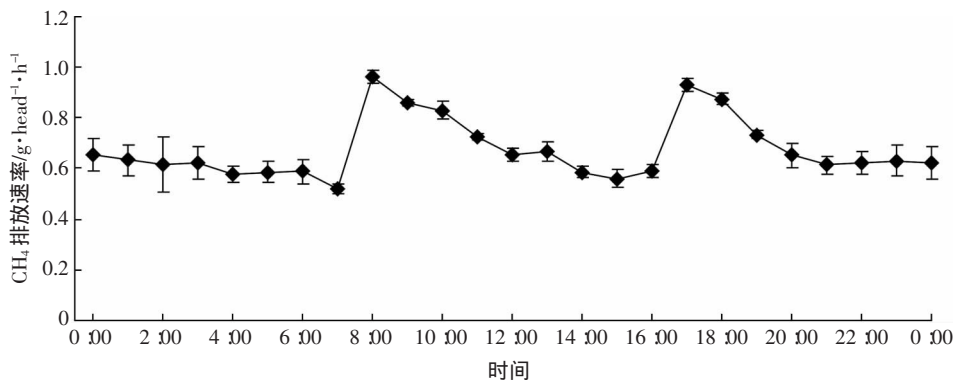
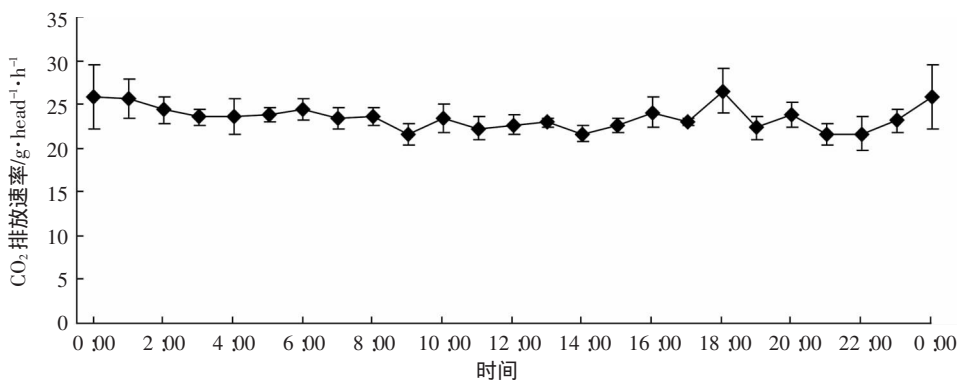


图2 试验期间藏系绵羊CH₄排放动态曲线

Figure 2 Diurnal patterns of methane(CH₄) emissions from Tibetan sheep during experimental period

图3 试验期间藏系绵羊 CO₂ 排放动态曲线Figure 3 Diurnal patterns of carbon dioxide(CO₂) emissions from Tibetan sheep during experimental period

排放速率增加(试验过程中有这种情况发生)。试验期间,藏系绵羊 CO₂ 排放速率为 $(22.85 \pm 0.86) \text{g} \cdot \text{head}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, CO₂ 日排放量为 $(549.17 \pm 20.63) \text{g} \cdot \text{head}^{-1}$ 。

2.3 N₂O 日排放特征

藏系绵羊 N₂O 排放特征如图 4 所示。各时段 N₂O 排放速率在 $(-5.71 \pm 2.55) \times 10^{-2} \sim (8.92 \pm 3.57) \times 10^{-2} \text{mg} \cdot \text{head}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间。在 17:00、21:00、23:00、2:00 和 4:00 时 N₂O 排放速率为负值,其余时段时 N₂O 排放速率为正值,此时表现为羊粪排放 N₂O。由于硝化作用需要在通风散气的条件下进行,排放速率出现负值的原因可能是,实验条件寒冷,粪袋中的粪便可能与尿液混合,有时会出现结冰(收集粪便时,羊粪出现尿粪混合结冰现象),这些都影响粪便中含氮物质的硝化过程,影响了 N₂O 的生成。试验期间,藏系绵羊 N₂O

排放速率为 $(0.029 \pm 0.013) \text{mg} \cdot \text{head}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, N₂O 日排放量为 $(0.73 \pm 0.32) \text{mg} \cdot \text{head}^{-1}$ 。

2.4 温室气体排放与采食量和代谢体重间关系

CH₄、CO₂ 和 N₂O 的日排放量与藏系绵羊的干物质采食量(DMI)、活重(BW)、代谢体重以及代谢体重增量的关系如表 2 所示。藏系绵羊每采食 1 kg 饲料干物质(DM)时,CH₄ 排放量为 12.96 g,CO₂ 排放量为 440.05 g,N₂O 排放量为 0.58 mg;单只绵羊增加 1 kg 的代谢体重时,CH₄ 排放量为 107.85 g,CO₂ 排放量为 3 663.15 g,N₂O 排放量为 4.87 mg。测得的 CH₄ 是瘤胃 CH₄ 和粪便 CH₄ 的排放之和,其中大约 90% 的 CH₄ 是由瘤胃产生,粪便产生的 CH₄ 仅占 10% 左右^[6]。本研究得到的 N₂O 排放量极低,可能原因是藏系绵羊排泄的粪便在寒冷的条件下很快与尿液混合结冰,干

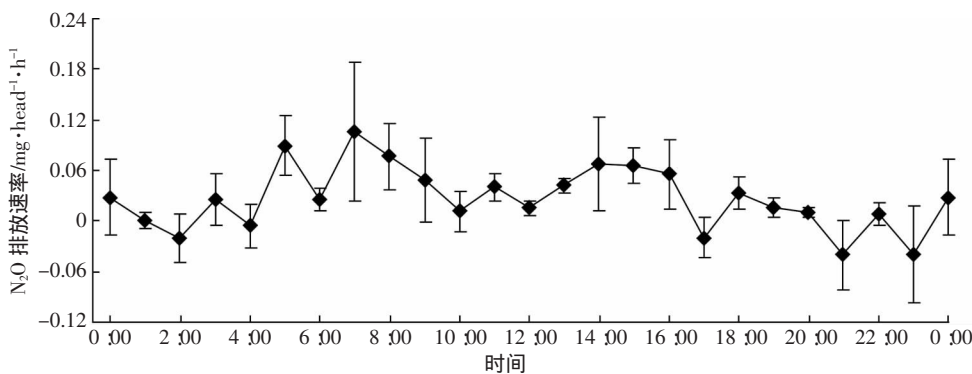
图4 试验期间藏系绵羊 N₂O 排放动态曲线Figure 4 Diurnal patterns of nitrous dioxide(N₂O) emissions from Tibetan sheep during experimental period

表 2 温室气体排放与采食量及代谢体重间的关系

Table 2 Correlation between greenhouse gas emissions and dry matter intake and metabolism body weight

温室 气体	干物质采食量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Dry matter intake	活重/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ Body weight	代谢体重/ $\text{g} \cdot \text{W}^{-0.75} \cdot \text{kg}^{-1}$ Metabolism body weight	代谢体重增量/ $\text{g} \cdot \text{W}^{-0.75} \cdot \text{kg}^{-1}$ Gain metabolism body weight Gain
CH ₄ /g	12.96	0.32	0.86	107.85
CO ₂ /g	440.05	10.98	20.20	3 663.15
N ₂ O/mg	0.58	0.01	0.39	48.69

扰了 N_2O 形成过程中的硝化过程,监测的时间短(24 h结束时更换粪袋,收集当天粪便)也可能是造成排放量偏低的原因。

3 讨论

在全球气候变化背景下,对反刍动物生产中温室气体排放进行量化研究,有助于核算全球温室气体排放清单和筛选温室气体减排技术。本研究采用密封式呼吸箱-气相色谱结合的方法,气体采样时,密封壳与水封槽契合可形成密闭系统,代谢笼顶部固定4个风扇,保证了呼吸箱内气体可以充分混匀;采用GC-7890A型气相色谱仪,装有离子火焰检测器(FID)和电子捕获检测器(ECD),可同时检测出样品中的 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 的体积浓度。预饲期内,藏系绵羊在呼吸箱内进行了长期适应,测得的温室气体排放数值可以初步揭示藏系绵羊温室气体排放特征。

CH_4 排放是饲料化合物在瘤胃内的发酵产物,与饲料营养的摄入水平呈正相关^[17], CH_4 排放速率伴随着采食的规律呈现出一定规律性^[12]。 CH_4 排放峰值出现在8:00和17:00,与上料时间基本相符。此现象与史海山等^[14]的研究结果相似,Gao等^[12]在研究奶牛场 CH_4 排放特征时也发现相似现象, Van Haarlem等^[18]在研究肉牛养殖场 CH_4 排放时也发现排放峰值与上料时间趋同的现象,主要原因是饲料底物在瘤胃内发酵后产生 CH_4 前体物质,在产 CH_4 菌作用下生成 CH_4 ^[19]。藏系绵羊进食后,瘤胃内发酵底物迅速增多,提高了 CH_4 的生成速率。21:00至凌晨3:00, CH_4 排放速率相对平稳,排放量较小,至7:00时 CH_4 排放速率降至最小值,是由于动物体内尚未消化的饲料化合物逐渐减少,瘤胃中的发酵底物减少,导致 CH_4 生成量降低;当给动物添料(8:00)后,瘤胃发酵底物瞬时积累,产生的 CH_4 增多,排放速率升高,进入下一个日变化。本研究中 CH_4 排放是瘤胃 CH_4 和粪便 CH_4 的共同排放结果,粪便中的 CH_4 排放量很低,Wang等^[20]对放牧条件下3.5岁成年羊粪便的 CH_4 排放量进行了144 h的监测研究,发现单只羊每天粪便的 CH_4 排放量仅为(15.07±4.90)mg,表明大部分 CH_4 是由于瘤胃发酵产生。本研究中单只藏系绵羊 CH_4 日排放量为16.17 g, Lassey等^[21]利用 SF_6 示踪法测得(35±5)kg的绵羊 CH_4 日排放量为20.5 g,造成差别的原因有以下两个:使用的饲料类型不同,本实验的基础日粮是蒸煮的饲料,纤维和脂肪的含量低,粗蛋白含量高,可以降低 CH_4 生成;不同测量方法下 CH_4 的排放数值也存在差

异^[22]。

CO_2 来自动物的呼吸代谢作用,包括自身呼吸、动物胃肠道微生物发酵,主要受温度影响^[23]。本研究中, CO_2 排放曲线相对平稳,没有出现明显波动,平均每小时排放22.85 g·head⁻¹。史海山等^[14]测得(25±5)kg甘肃细毛羊的 CO_2 日排放量为147 g,低于本研究的549.17 g,可能原因是史海山等所得排放数值是根据物质二相平衡方程由 CH_4 排放量推算出来,本研究 CO_2 排放数据是直接根据气体浓度计算得到。马燕芬等^[24]利用Sable呼吸测量系统研究体重20~30 kg的关中奶山羊 CH_4 和 CO_2 排放特征时,测得 CO_2 日排放量为391~406 g,与本研究所得结果相似。

N_2O 是动物粪便中含氮物质经过硝化和反硝化作用生成的^[25],硝化作用把氨态氮转为硝态氮,是产生 N_2O 的必要条件,需要通风和氧分充足的条件;反硝化过程把亚硝酸盐和硝酸盐转化为 N_2O 和 N_2 ,需厌氧环境。 N_2O 排放量受到粪便有机物中氮含量、处理方法、温度、通风和水分含量影响^[26]。本研究中,用于检测 N_2O 的电子捕获检测器(ECD)检出限为 10^{-14} g·mL⁻¹,可以检测出粪便中 N_2O 的真实浓度。 N_2O 排放速率极低的可能原因是采气期间粪袋中的粪尿混合,冷季温度极低,使粪尿混合物结冰,阻碍了 N_2O 合成中的硝化过程。由于粪便中 N_2O 的排放周期较长^[27],绵羊粪便 N_2O 排放的测量时间较短也可能是低排放的一个原因。有关粪便中 N_2O 排放,将进一步深入研究。

本研究对藏系绵羊温室气体排放的测量结果具有一定可靠性,可以为完善高原畜牧业温室气体排放清单提供数据支持,接下来还将研究不同饲料类型对藏系绵羊温室气体排放的影响,以筛选出甲烷排放低的饲料,减少温室气体排放,提高藏系绵羊育肥效率。

4 结论

(1) CH_4 排放峰值出现时间与添料时间基本同步, CO_2 排放速率曲线变化平稳, N_2O 排放速率无明显规律性,排放速率极低。

(2)冷季补饲模式下,藏系绵羊的 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 日排放量分别为(16.17±1.27)、(549.18±20.63)g·head⁻¹和0.73±0.32 mg·head⁻¹。

参考文献:

[1] Goodland R, Anhang J. Livestock and climate change: What if the key actors in climate change are... cows, pigs, and chickens?[J]. *World Watch*,

- 2009, 10(1) :10-19.
- [2] Li L, Xie Q. Separation and utilization of greenhouse gas CO₂[J]. *Low Temperature and Specialty Gases*, 2005, 23(4) :1-6.
- [3] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. *Science*, 1990, 248(4960) :1217-1219.
- [4] 袁慧军, 高志岭, 马文奇, 等. 应用反演式气体扩散技术测定奶牛场甲烷的排放特征[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(4) :746-752.
YUAN Hui-jun, GAO Zhi-ling, MA Wen-qi, et al. Determination of methane emission from a dairy feedlot using an inverse dispersion technique[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4) :746-752.
- [5] 李胜利, 金鑫, 范学珊, 等. 反刍动物生产与碳减排措施[J]. *动物营养学报*, 2010, 22(1) :2-9.
LI Sheng-li, JIN Xin, FAN Xue-shan, et al. Ruminant production and carbon emission reduction measures[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(1) :2-9.
- [6] Johnson K A, Johnson D E. Methane emissions from cattle[J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(8) :2483-2492.
- [7] 赵一广. 肉用绵羊甲烷排放的测定与估测模型的建立[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
ZHAO Yi-guang. Measurement and prediction models of methane emissions from sheep[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [8] Pinares-Patino C S, Clark H. Reliability of the sulfur hexafluoride tracer technique for methane emission measurement from individual animals: An overview[J]. *Animal Production Science*, 2008, 48(2) :223-229.
- [9] Pinares-Patino C S, Machmuller A, Molano G, et al. The SF₆ tracer technique for measurements of methane emission from cattle—effect of tracer permeation rate[J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2008, 88(2) :309-320.
- [10] Pinares-Patino C S, Holmes C, Lasey K, et al. Measurement of methane emission from sheep by the sulphur hexafluoride tracer technique and by the calorimetric chamber: Failure and success[J]. *Animal*, 2008, 2(1) :141-148.
- [11] 李华伟. 放牧条件下内蒙古白绒山羊甲烷排放量的测定[D]. 内蒙古农业大学, 2008.
LI Hua-wei. Measurement of methane emission from grazing Inner Mongolia Cashmere goats[D]. Inner Mongolia Agricultural University, 2008.
- [12] Gao Z, Yuan H, Ma W, et al. Methane emissions from a dairy feedlot during the fall and winter seasons in Northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(5) :1183-1189.
- [13] Barrancos J, Briz S, Nolasco D, et al. A new method for estimating greenhouse gases and ammonia emissions from livestock buildings[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 74 :10-17.
- [14] 史海山, 丁学智, 龙瑞军, 等. 舍饲绵羊甲烷和二氧化碳的日排放动态[J]. *生态学报*, 2008, 28(2) :877-882.
SHI Hai-shan, DING Xue-zhi, LONG Rui-jun, et al. Diurnal dynamics of methane and carbon dioxide released from indoor-fed sheep[J]. *Acta Ecology Sinica*, 2008, 28(2) :877-882.
- [15] 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.
- [16] 冯志华. 蒺藜皂苷对奶牛瘤胃发酵、甲烷产量、抗氧化功能及免疫功能的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
FENG Zhi-hua. Effects of gross saponin of *Tribulus terrestris* on rumen fermentation, methane production, antioxidant capacity and immune function in dairy cows[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2013.
- [17] 韩兴泰, 谢敖云, 胡令浩. 牦牛甲烷气的产量[J]. *动物营养学报*, 1996, 8(2) :62.
HAN Xing-tai, XIE Ao-yun, HU Ling-hao. Methane released from yak[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 1996, 8(2) :62.
- [18] Van Haarlem R, Desjaedins R, Gao Z, et al. Methane and ammonia emissions from a beef feedlot in western Canada for a twelve-day period in the fall[J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2008, 88(4) :641-649.
- [19] 苏醒, 董国忠. 反刍动物甲烷生成机制及调控[J]. *中国草食动物*, 2010(2) :66-69.
SU Xing, DONG Guo-zhong. Mechanism and regulation of methane production in ruminants[J]. *China Herbivores*, 2010(2) :66-69.
- [20] Wang X Y, Huang D, Zhang Y J, et al. Dynamic changes of CH₄ and CO₂ emission from grazing sheep urine and dung patches in typical steppe[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79 :576-581.
- [21] Lasey Y K, Walker C, McMillan A, et al. On the performance of SF₆ permeation tubes used in determining methane emission from grazing livestock[J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2001, 3(4) :367-376.
- [22] Grainger C, Clarke T, McGinn S, et al. Methane emissions from dairy cows measured using the sulfur hexafluoride tracer and chamber techniques[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90(6) :2755-2766.
- [23] 覃春富, 张佩华, 张继红, 等. 畜牧业温室气体排放机制及其减排研究进展[J]. *中国畜牧兽医*, 2011, 38(11) :209-214.
QIN Chun-fu, ZHANG Pei-hua, ZHANG Ji-hong, et al. Research on mechanism of greenhouse gases emission from livestock and its reducing countermeasures[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2011, 38(11) :209-214.
- [24] 马燕芬, 杨淑青, 薛瑞婷, 等. 饲料 NFC/NDF 对奶山羊甲烷和二氧化碳排放量的影响[J]. *动物营养学报*, 2013, 25(5) :996-1003.
MA Yan-fen, YANG Shu-qing, XUE Rui-ting, et al. Effects of dietary ratio of non-fiber carbohydrates to neutral detergent fiber on emissions of methane and carbon dioxide in dairy goats[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2013, 25(5) :996-1003.
- [25] Li C S. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1-3) :259-276.
- [26] Oenema O, Wrage N, Velthof G L, et al. Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 72(1) :51-65.
- [27] 葛世栋, 徐田伟, 李冰, 等. 高寒草甸粪斑的温室气体排放[J]. *草业科学*, 2014, 31(1) :40-48.
GE Shi-dong, XU Tian-wei, LI Bing, et al. Effects of yak dung on greenhouse gas emission during growing season in the alpine meadow[J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(1) :40-48.