

应用反演式气体扩散技术测定奶牛场甲烷的排放特征

袁慧军¹, 高志岭^{1*}, 马文奇¹, 刘学军², R.L. Desjardins³, 刘树庆¹

(1.河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 2.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100093; 3.Agriculture and Agri-Food Canada Research Braunch, Ottawa Canada K1A 0C6)

摘要:为了准确揭示奶牛场的甲烷排放特征,在我国首次采用国际上最新的反演式气体扩散技术与开放式激光仪相结合的研究方法,分别于2009年冬季和2010年春季测定了保定市某奶牛养殖基地甲烷的排放特征,测定期间养殖基地的动物总量平均为1200头。结果表明,奶牛养殖场尺度的甲烷排放,在冬季和春季均呈现出规律性的日排放特征,即养殖场甲烷日排放高峰出现在05:00、11:30和16:30,排放高峰的出现时间与上料时间基本吻合;冬季和春季试验期间该养殖场的反刍和粪尿甲烷总排放量分别为0.31 t·d⁻¹和0.36 t·d⁻¹,养殖基地内整个牛群平均每头牛的反刍和粪尿甲烷日排放总量分别为0.26 kg·d⁻¹和0.30 kg·d⁻¹,春季的甲烷日排放量比冬季约高16.7%,初步揭示了奶牛场尺度甲烷排放的季节性差异。

关键词:奶牛场;甲烷;反演式气体扩散模型;开放式激光仪;日排放特征

中图分类号:X830.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)04-0746-07

Determination of Methane Emissions from a Dairy Feedlot Using an Inverse Dispersion Technique

YUAN Hui-jun¹, GAO Zhi-ling^{1*}, MA Wen-qi¹, LIU Xue-jun², R.L. Desjardins³, LIU Shu-qing¹

(1.College of Resources and Environmental Science, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2.College of Resources and Environmental Science, China Agriculture University, Beijing 100093, China; 3.Agriculture and Agri-Food Canada Research Braunch, Ottawa K1A 0C6, Canada)

Abstract: Methane emission from dairy feedlot in China is one important source of global methane budget due to the large global warming potential (a factor of 25 in comparison with CO₂). To indicate methane emission patterns on dairy feedlot in North China, a combination of an inverse dispersion technique and open-path laser was used to quantify patterns of methane emissions on a dairy feedlot (Baoding, Hebei) during winter and spring seasons. During these two measurement seasons, the total animal herd was 1200 heads in average. Results showed that both in winter and spring seasons, methane emissions from the selected dairy feedlot were characterized with a apparent diurnal pattern, that was, the emission peaks occurred at 05:00, 11:30 and 16:30, respectively, which was generally in agreement with the schedule of feeding activities; it also indicated that total daily emission rate of methane including enteric formation and manure storage within feedlot during winter and spring seasons were 0.31 t·d⁻¹ and 0.36 t·d⁻¹, and on the per capita base including total animal herd, methane emission rates were 0.26 t·d⁻¹ and 0.30 kg·d⁻¹, where methane emission rate during spring season was about 16.7 greater than winter season, thus a relatively large seasonal difference on methane emission rates was identified.

Keywords: dairy feedlot; methane; inverse dispersion technique; open-path laser; diurnal pattern

气候变化是当今国际社会普遍关注的全球性问题,也是人类面临的最为严峻的全球环境问题。大气

中痕量气体甲烷(CH₄)的温室效应是二氧化碳(CO₂)的25倍^[1],是公认的仅次于二氧化碳的温室气体。IPCC第四次评估报告^[2]表明,农业是温室气体的主要排放源,其中大气甲烷的主要农业排放源包括湿地、稻田和反刍动物(奶牛和肉牛、水牛、绵羊和山羊,骆驼等),反刍动物的排放量占总排放量的15%~25%^[3]。据联合国粮农组织统计^[4],2004年全球反刍动物的甲烷排放总量为85.63 Mt,我国反刍动物的排放总量为8.85 Mt,占世界排放总量的10.3%,其中奶牛养殖业

收稿日期:2010-10-02

基金项目:农业部公益性行业计划(200803030);中德合作项目(BMBF KFZ:0330847A);中国科技部国际科技合作项目“中国农业废弃物的循环与利用”(2009DFA32710);国家自然科学基金“集约化奶牛养殖场甲烷CH₄和氧化亚氮N₂O的排放特征研究”(41075105)

作者简介:袁慧军(1986—),女,河北石家庄无极县人,硕士研究生,主要从事环境质量评价。E-mail:yuanhuijun1986@126.com

***通讯作者:**高志岭 E-mail:zhilinggao@hotmail.com

的甲烷排放量为 0.49 Mt。

我国就奶牛养殖过程中甲烷的排放进行了相当长时间的研究^[5-11],但这些研究主要集中在研究日粮组成调控和补充各种添加剂等手段对调控奶牛甲烷排放的有效性上。由于测定时期比较短,目前的研究对我国奶牛的甲烷排放特征揭示还不够明确,甲烷排放特征与奶牛管理措施间的关系分析还不够深入,这都严重延缓了我国制定奶牛业的甲烷排放减排措施的进程。因此,准确测定奶牛场尺度的甲烷日排放规律和季节排放规律,透彻理解养殖过程中这些管理措施与甲烷排放之间的关系,对于建立适合我国国情的排放因子、筛选有效减排措施以及验证 IPCC 关于我国奶牛养殖业甲烷排放因子的适用性等都具有重要的理论和指导意义。本文采用国际上常用的反演式气体扩散技术^[12-15],通过奶牛场甲烷排放的实地测定,探讨了奶牛养殖过程中的甲烷日排放和季节特征。

1 材料和方法

1.1 试验位点

本研究所选用的试验地点为保定市某奶牛养殖基地(北纬 38°56'43",东经 115°28'14")。实地观测分别在冬季和春季进行,其观测时间分别为 2009-12-01 至 2010-01-01 和 2010-03-17 至 2010-04-11,每个测定季节的观测时间持续 3~4 周。该试验地点附近没有其他奶牛场或者其他可以产生甲烷的地点,不会对本试验产生干扰。在测定期间,养殖场奶牛头数为 1 200 头

左右,且两个测定季节的奶牛结构比例变化不大。养殖小区中绝大部分区域为牛圈,其余分布有挤奶厅、青贮坑、小路、污水池等。整个试验地点的结构布局用 GPS 定位,牛场设施的空间布局如图 1 所示。

该奶牛养殖小区每日采奶两次,时间分别在 04:30 和 16:30,每次采奶时间大约持续 2 h。每日上料 3 次,分别在 04:00、11:00、16:00。奶牛日粮的粗饲料主要为青贮玉米,精饲料为从各商家购置的精料补充料,饲料成分如表 1 所示。试验期间牛奶产量大约为 13 kg·head⁻¹·d⁻¹。

表 1 测定期间精饲料的养分指标

Table 1 Composition of concentrate diet during measurement period

指标	含量	指标	含量
蛋白质	21%	铜	20 mg·kg ⁻¹
粗灰分	14%	铁	10 mg·kg ⁻¹
粗纤维	10%	锰	60 mg·kg ⁻¹
钙	1%~1.3%	锌	60 mg·kg ⁻¹
总磷	0.35%~0.8%	水分	13%
食盐	0.8%~1.3%	赖氨酸	5%

1.2 甲烷浓度的测定

冬季和春季测定期间,采用开路式激光仪(Gas-Finder MC, Boreal Laser Inc. Edmonton, Canada)连续自动监测甲烷的浓度。该仪器主要由 4 部分组成,分别是中央处理器、激光发射器/信号接收器、反射仪和计算机工作站(仪器的设置和数据的存储)。其工作原理采用“单线光谱”原理(适宜波长为 1 653 nm),从而

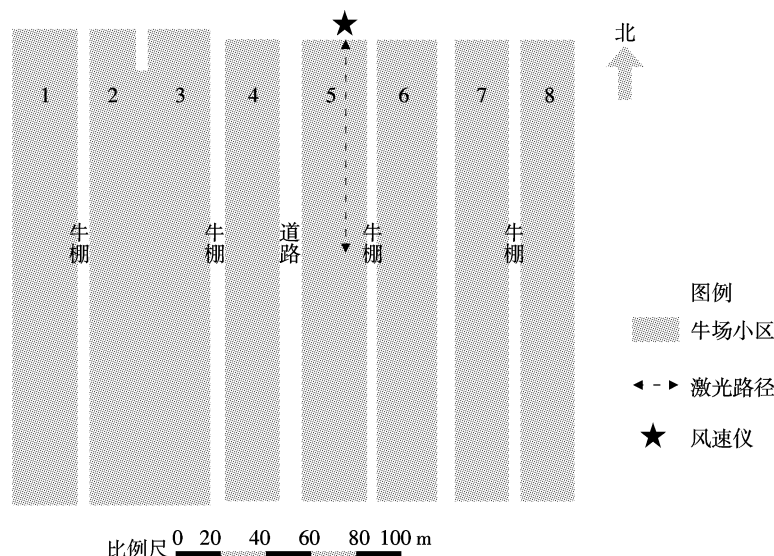


图 1 奶牛场结构布局和测定仪器安放示意图

Figure 1 Illustration of the layout of the experimental dairy feedlot and the instrument setup

避免了其他气体的交叉干扰。进行测定时,由中央控制器产生的近红外光经纤维传送到传感器,由传感器发射的激光在大气中穿行一定距离后被反射仪反射回到传感器,传感器将接收到的光信号转化为电信号,并通过与控制器内的参数对比,经过内置的微处理器计算得到大气甲烷浓度。两次测定期间激光发射器和反射仪的测定高度均为 2.4 m,两者之间的距离为 120 m,表示测定的甲烷浓度为该路径范围的平均浓度。甲烷浓度的测定频率为 1 Hz。将收集的浓度数据利用 Matlab 软件进行处理,计算 15 min 的浓度平均值。

1.3 风速、风向和湍流的测定

风速、风向和湍流等信息采用三维超声风速仪测定(Gill Instrument Ltd. Lymington, UK)。风速仪的安装高度为 10 m,测定频率为 10 Hz,测定的数据采用 EdiSol 软件进行实时收集并存储在田间计算机上,收集的原始数据采用 EdiRe 软件计算 15 min 的风信息,计算的项目包括平均风速(U)、风向(β)、地面粗糙度(z_0)、大气稳定度(L)、湍流($\sigma_{u,v,w}/u_*$)和地面摩擦风速(u_*)。

1.4 甲烷排放量计算

奶牛养殖小区尺度的甲烷排放计算采用反演式气体扩散模型(Inverse Dispersion Technique)(www.thunderbeachscientific.com),其工作原理如图 2 所示。该模型是基于莫宁-奥布霍夫相似理论的机理型气体扩散模型^[16-17]。该技术的成功应用建立在两个假设基础之上:假设地面质地均匀;风速廓线可以用莫宁-奥布霍夫相似理论(Monin-Obukhov Similarity Theory)

进行重建。计算时,通过将风速(U)、风向(β)、地面粗糙度(z_0)、地面摩擦风速(u_*)、大气稳定度(L)、大气涡旋度($\sigma_{u,v,w}$)等基本微气象信息及排放源与测定位点的空间几何关系等信息导入,该模型即可计算出测定位点气体浓度和排放源源强的比值 $[(C_L - C_b)/Q]_{sim}$ 。计算公式如下:

$$[(C_L - C_b)/Q]_{sim} = \frac{1}{P} \sum_{j=1}^P \left(\frac{1}{N} \sum \left| \frac{2}{w_0} \right| \right) \quad (1)$$

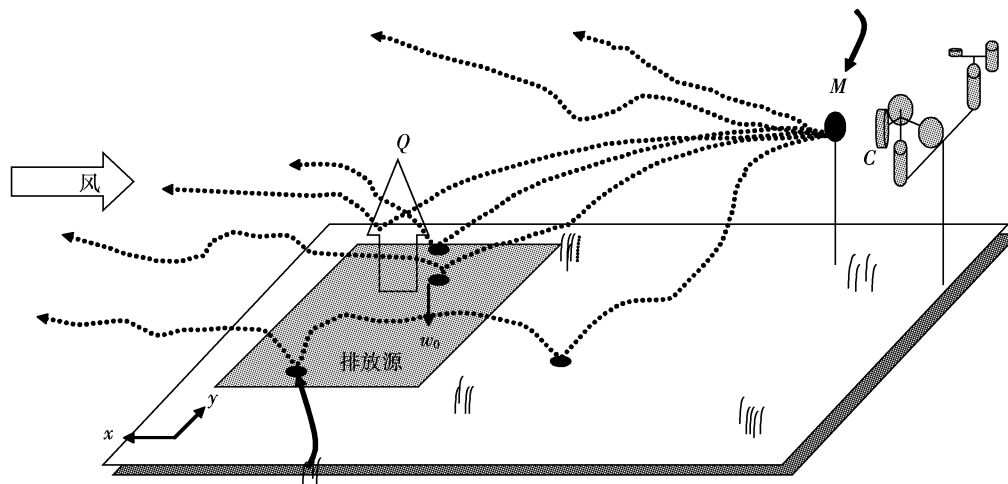
式中: $C_L(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$ 表示测定位点的甲烷浓度; $C_b(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$ 表示背景浓度值; $Q(\text{m}^3)$ 表示测定位点的甲烷排放强度; N 表示该随机模型重复计算的次数(试验期间 $N=50\,000$); P 表示计算沿激光路径的平均浓度的点数($P=50$); w_0 表示排放源内触位点上垂直方向的风速。

根据实际观测的气体浓度($C_L - C_b$)和采用反演式气体扩散模型计算所得的比值,可计算出排放源的源强(Q)。具体的计算如以下公式所示:

$$Q = \frac{C_L - C_b}{[(C_L - C_b)/Q]_{sim}} \quad (2)$$

1.5 日排放量的计算

试验期间,由于停电、大雾、降水和低风速等原因,存在部分数据缺失的情况,其中低风速是导致数据缺失的主要原因(主要发生在夜间)。如果直接使用所有数据的平均值代表日排放量,则可能会放大白天甲烷排放量对日排放量的贡献。针对这种情况,本研究采用通过计算整个观测期间每一个小时的平均甲烷排放量的方法来获得典型的奶牛养殖基地甲烷的日排放特征^[18]。



Q —排放量(m^3); w_0 —粒子触地时的垂直风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); C —在排放源下风向位点 M 测定的气体浓度($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); M —浓度测定位点

图 2 利用 bLS 模型测定示踪气体排放强度 Q 的模型图

Figure 2 Illustration of the bLS technique for estimating tracer emission rate Q

1.6 数据质量控制

反演式气体扩散模型的优点是对排放源面积和形状敏感性很低,但该模型在风速较低、大气极度稳定或极度不稳定、地面植被较高或地面存在明显干扰气体扩散的障碍物等条件下准确度较低。这是由于在 $u_* < 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $|L| < 10 \text{ m}$ 或 $z_0 > 0.15 \text{ m}$ 时,莫宁-奥布霍夫相似理论准确性较低。另外,开路式激光仪在光信号强度低于 1 000 或与内置参比相关性低于 0.95 时,所得到的浓度数据存在一定误差。为了控制数据质量,在计算甲烷排放强度之前,首先根据 Flesch 等总结的数据剔除标准(表 2),对浓度数据和风以及湍流数据进行筛选^[19-20],符合要求的数据则进行甲烷排放量的计算。

表 2 计算甲烷排放时数据的筛选标准

Table 2 Criteria used to filter data for the calculation of CH_4 emissions

项目	指标
地面摩擦风速 $u_*(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	> 0.15
大气稳定度 $L(\text{m})$	$> 10 $
地面粗糙度 $z_0(\text{m})$	> 0.1
参比系数 R^2	> 0.95
光值	$> 1\ 000$

2 结果与分析

2.1 奶牛养殖基地甲烷的背景浓度

在冬季和春季测定工作前期,我们使用开路式激光仪在奶牛养殖基地的上风向位置测定了大气甲烷的背景浓度,结果表明该养殖基地周围甲烷的背景浓度约为 $1.286 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 稍高于 IPCC 第三次报告中所指出全球甲烷背景浓度 $1.246 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[21]。这可能是由于本试验所选定的牛场处于保定市郊区,有研究表明城市本身就是一个甲烷的排放源^[22],高于全球背景浓度的甲烷可能来自于城市各排放源。

冬季和春季观测期间试验养殖基地 2.4 m 高度的甲烷浓度如图 3 所示,其浓度变化范围为 $1.429 \sim 4.286 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 明显高于当地甲烷背景值浓度 $0.143 \sim 3.000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 且高于背景值部分的浓度也远大于仪器的分辨率(约 $0.014\ 3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。这都为成功观测该奶牛养殖场的甲烷排放规律奠定了重要的基础。从图 3 还可以发现白天甲烷的平均浓度明显低于夜间,这主要是由于在白天养殖场的风速无论在水平方向还是垂直方向均比夜间高,其直接结果是导致奶牛在白天反刍过程中排放的甲烷的扩散速率明显高于夜间,即夜间的甲烷浓度应高于白天。

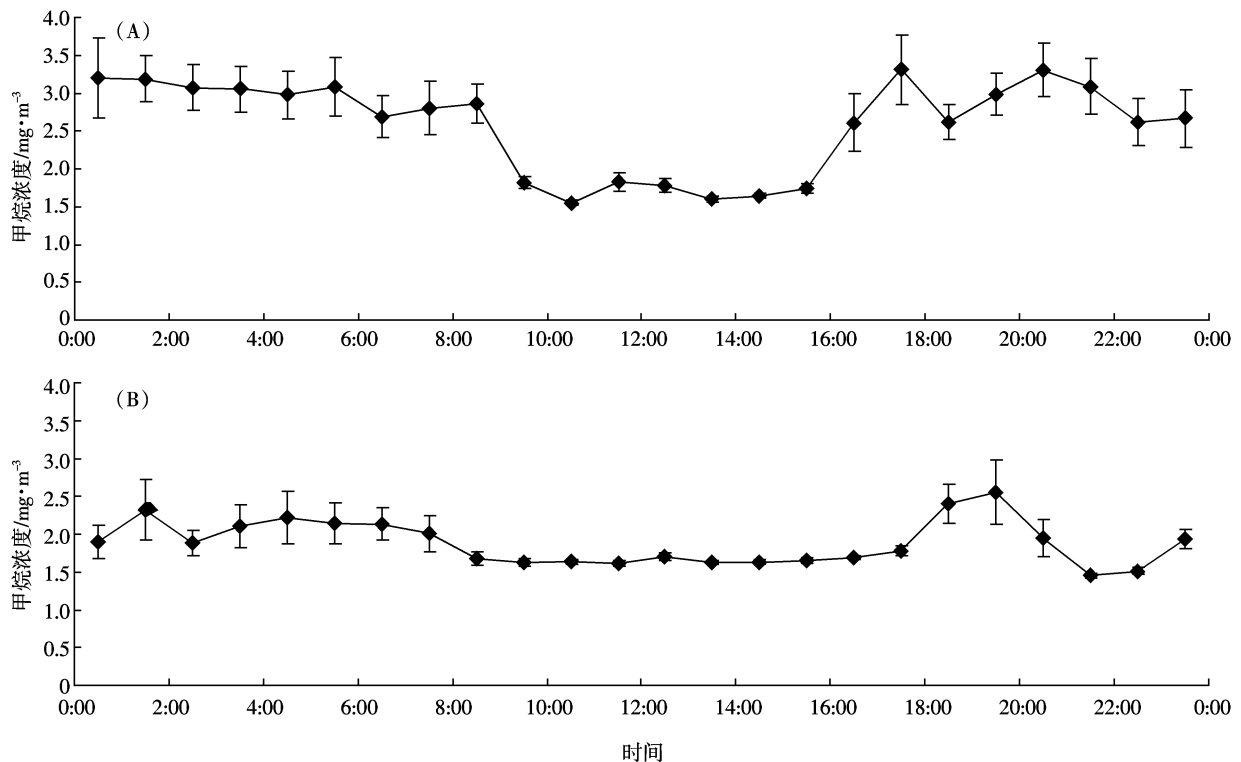


图 3 测定期间奶牛场地表 2.4 m 处甲烷浓度分布曲线(A 冬季,B 春季)

Figure 3 Methane concentrations at 2.4 m level during winter (A) and spring (B) measurement periods

2.2 养殖场甲烷日排放规律

反刍动物奶牛的瘤胃中产生甲烷是饲料在厌氧条件下降解的必然产物,且摄入食物总能与甲烷排放损失能量成正比关系。根据奶牛日粮上料的周期性和奶牛瘤胃内饲料的反刍规律,可以预测反刍过程中甲烷的排放必然存在一定日排放规律。

奶牛养殖场甲烷日排放特征如图 4 所示。无论在冬季还是春季,奶牛养殖基地的甲烷排放均呈现明显的时间变化规律,甲烷排放高峰分别出现在 05:00、11:30、16:30,排放高峰持续时间约 2 h,排放高峰期的甲烷排放速率为非高峰期的 2~3 倍。图中所示的日排放高峰与奶牛基地的日上料时间吻合。另外, Kinsmen 等^[23]采用饲舍质量平衡的方法也得到类似的结果,但其日排放高峰分别出现在 08:00 和 18:00 左右。另外,在肉牛养殖场上, van Haarlem 等也观测到了典型的日排放特征,其排放高峰时间出现在 10:00 和 18:00 左右^[20]。这些研究都表明排放高峰的出现与上料时间基本吻合。但也有研究显示养殖场的甲烷可能不存在较明显的日排放规律^[24],在该研究中所观测的甲烷排放源包括奶牛反刍排放、污水池和粪尿堆积场地排放,可能是众多的排放源混杂在一起,从而掩

盖了反刍排放的特征。

2.3 养殖场甲烷排放的季节性差异

本研究还详细比较了冬季和春季奶牛养殖基地的甲烷排放通量,根据测定期间所得单位小时甲烷排放量(图 4)获得的养殖基地日排放通量用以表示不同季节的甲烷日排放通量。观测数据表明,冬季和春季试验期间试验点的甲烷总排放量分别为 $0.31 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.36 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$, 平均每头奶牛的甲烷日排放量分别为 $0.26 \text{ kg} \cdot \text{head}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.30 \text{ kg} \cdot \text{head}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 其中春季的甲烷日排放量比冬季约高 16.7%,初步呈现出奶牛场尺度甲烷排放的季节性差异(图 5)。研究表明^[25],奶牛个体甲烷产生量与食物摄入种类(日粮组成、精粗比)、摄入量以及牛龄(犊牛、青年牛和成年奶牛等)关系最紧密,然而通过对奶牛基地的冬季和春季的平均饲料用量和产奶量调查,发现冬季和春季奶牛的进食量和产奶量均不存在明显的差异。因此,推断冬季牛场尺度甲烷排放通量较低可能是由于低温导致的牛圈中的粪尿排放甲烷通量降低而引起(图 5)。鉴于此,未来有必要对牛圈中粪尿的甲烷排放开展详细研究,以进一步定量粪尿甲烷排放对整个养殖基地甲烷排放的贡献。

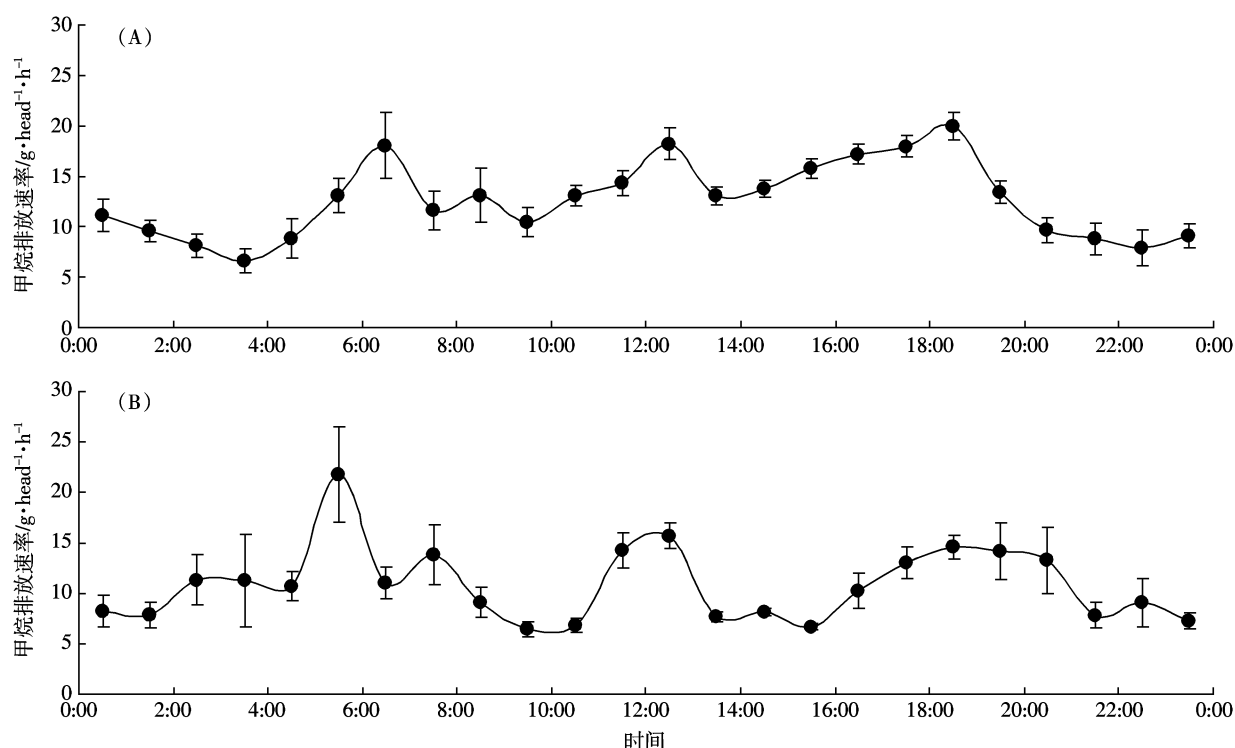


图 4 试验点奶牛场甲烷日排放特征曲线(A 冬季,B 春季)

Figure 4 Diurnal patterns of methane emissions over the experimental feedlot during winter (A) and spring (B) seasons

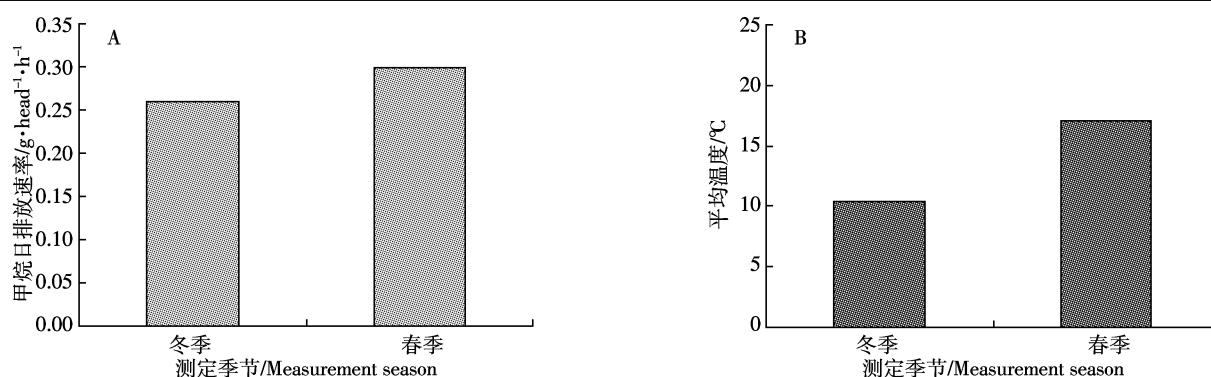


图5 冬季和春季观测期间甲烷排放速率(A)和相应的平均温度(B)

Figure 5 Methane emission rates (A) and average ambient temperature(B) during winter and spring measurement seasons

3 讨论

鉴于奶牛养殖业甲烷排放的重要性,国外针对奶牛养殖过程中甲烷的排放开展了详细的研究。由于奶牛反刍过程中的甲烷排放是最主要的环节,研究重点主要集中在不同牛龄的甲烷反刍排放速率上。研究表明,犊牛的反刍甲烷排放速率为 $32.5\sim 39.9 \text{ kg}\cdot\text{head}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[26],青年牛的排放速率为 $42\sim 46 \text{ kg}\cdot\text{head}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[27],成年奶牛的甲烷反刍排放速率为 $118\sim 146 \text{ kg}\cdot\text{head}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[28-30]。在本研究中,我们用冬季和春季排放速率的平均值来估算该养殖基地奶牛的甲烷排放因子,其数值为 $102.8 \text{ kg}\cdot\text{head}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。由此可见,该奶牛养殖基地的甲烷排放因子明显低于国际上成年奶牛的甲烷排放因子的测定结果,介于青年牛和成年奶牛之间。其原因主要是由于在本研究所选用的牛场中,整个牛群结构包括泌乳牛、干牛、青年牛和犊牛等,其中成年奶牛的比例约占 60%,其余则为体重较轻的青年牛和甲烷排放量很低的犊牛。本文所引用的关于成年奶牛的甲烷排放因子研究全部是采用成年奶牛作为研究对象,本研究和其他研究的差异可能与牛群结构的差异有关。

4 结论

(1)本研究首次在我国采用开路式激光仪和反演式气体扩散模型相结合的方法,在牛场尺度观测甲烷排放的日排放特征和季节性差异。

(2)在养殖场上空,甲烷的浓度范围为 $1.429\sim 4.286 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,该条件完全满足应用开路式激光仪和反演式气体扩散模型计算甲烷排放通量的基本条件。

(3)本研究奶牛场尺度甲烷排放存在明显的日排

放高峰,且这些排放高峰的出现时间与奶牛日粮上料时间基本吻合。

(4)奶牛场的甲烷排放存在明显的季节性差异,在冬季和春季,养殖基地整个牛群的平均每头牛的反刍与粪尿甲烷日排放总量分别为 $0.26 \text{ kg}\cdot\text{head}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.30 \text{ kg}\cdot\text{head}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,且春季的甲烷的排放通量比冬季大约高 16.7%。

参考文献:

- [1] 贺永惠,王清华,李杰.降低反刍动物甲烷排放的研究进展[J].黄牛杂志,2001,27(5):47-49.
HE Yong-hui, WANG Qing-hua, Li Jie. Advance in strategies of decrease methane emission in ruminant[J]. *Journal of Yellow Cattle Science*, 2001, 27(5):47-49.
- [2] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change. Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007:63-67.
- [3] 刘红,张运涛,方德罗,等.反刍动物甲烷排放及其对全球变暖的影响[J].山东环境,1997(1):36-37.
LIU Hong, ZHANG Yun-tao, FANG De-luo, et al. Methane emissions in ruminant and their effects on global warning[J]. *Shandong Environment*, 1997(1):36-37.
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Livestock's long shadow: Environmental issues and options. chapter 3. Livestock's role in climate change and air pollution[M]. Rome: 2007:95-98.
- [5] 刘艳琴,朱惠中,李建国,等.脂肪酸钙对中国荷斯坦牛营养物质全消化道消化率影响的研究[J].饲料研究,2001(3):3-5.
LIU Yan-qin, ZHU Hui-zhong, LI Jian-guo, et al. Effects research on fatty acid calcium to total tract digestibility of nutrients in Chinese Holstein[J]. *Feed Research*, 2001(3):3-5.
- [6] 芦春莲,曹洪战,李建国,等.奶牛日粮加锌对营养物质表观消化率的影响研究[J].中国奶牛,2002(2):14-16.
LU Chun-lian, CAO Hong-zhan, LI Jian-guo, et al. Effects of supplemental zinc on nutrient digestibility in lactating cows[J]. *China Dairy*

- Cattle*, 2002(2):14-16.
- [7] 欧宇, 李胜利. 莫能霉素在反刍动物中的应用[J]. 中国畜牧兽医, 2003, 30(2):18-20.
- OU Yu, LI Sheng-li. The application of monensin in ruminant[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2003, 30(2):18-20.
- [8] 赵玉华, 王加启. 利用实时定量 PCR 对瘤胃甲酸甲烷杆菌定量方法的建立与应用[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1):161-169.
- ZHAO Yu-hua, WANG Jia-qi. Development and application of a real-time PCR approach for quantification of methanobacterium formicium in ruminant[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(1):161-169.
- [9] 曹玉凤, 李建国. 奶牛日粮纤维的营养作用及在生产中的应用[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2006(2):92-94.
- CAO Yu-feng, LI Jian-guo. The nutrient role of dietary fiber in dairy cattle and the application in production[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary*, 2006(2):92-94.
- [10] 乔国华, 单安山. 直接饲喂微生物培养物对奶牛瘤胃发酵产甲烷及生产性能的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2006, 33(5):11-14.
- QIAO Guo-hua, SHAN An-shan. The effect of different direct-fed microbial culture on methane production in vitro and production performance in dairy cattle[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2006, 33(5):11-14.
- [11] 乔国华, 单安山. 益生菌对奶牛生产性能及瘤胃发酵影响的研究[J]. 中国奶牛, 2007(3):10-14.
- QIAO Guo-hua, SHAN An-shan. Study of the effect of probiotics on performance and rumen fermentation in dairy cattle[J]. *China Dairy Cattle*, 2007(3):10-14.
- [12] Flesch T K, Wilson J D, Harper L A, et al. Estimating gas emission from a farm using an inverse-dispersion technique[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39:4863-4874.
- [13] Gao Z, Desjardins R L, Flesch T K. Assessment of the uncertainty of using an inverse-dispersion technique to measure methane emissions from animals in a barn and in a small pen[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44:3128-3134.
- [14] Laubach J, Kelliher F M. Measuring methane emission rates of a dairy cow herd(II): Results from a backward-Lagrangian stochastic model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129:137-150.
- [15] Flesch T K, Harper L A, Powell J M, et al. Inverse dispersion calculation of ammonia emissions from Wisconsin dairy farms[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2009, 52:253-265.
- [16] Flesch T K, Wilson J D, Yee E. Backward-time lagrangian stochastic dispersion models and their applications to estimate gaseous emissions[J]. *Journal of Applied and Applied Meteorology*, 1995, 34:1320-1332.
- [17] Flesch T K, Wilson J D, Harper L A, et al. Deducing ground-to-air emissions from observed trace gas concentrations: A field trial[J]. *Journal of Applied and Applied Meteorology*, 2004, 43:487-502.
- [18] Gao Z L, Raymond L D, Flesch T K, et al. Assessment of the backward Lagrangian Stochastic dispersion technique for continuous measurements of CH₄ emissions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9):1516-1523.
- [19] Flesch T K, Wilson J D, Harper L A, et al. Determining ammonia emissions from a cattle feedlot with an inverse dispersion technique[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 144:139-155.
- [20] van Haarlem, Desjardins R P, Gao Z L, 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, 88:641-649.
- [21] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change: Working group I: The scientific basis[M]. Chapter 4: Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases, 2001:248.
- [22] Wang Y S, Zhou L, Wang M X, et al. Trends of atmospheric methane in Beijing[J]. *Chemosphere*, 2001(3):65-71.
- [23] Kinsman R, Sauer F D, Jackson H A, et al. Methane and carbon dioxide emissions from dairy cows in full lactation monitored over a six-month period[J]. *Journal of Dairy Science*, 1995, 78:2760-2766.
- [24] Bjorneberg D L, Leytem A B, Westermann D T, et al. Measurement of atmospheric ammonia, methane, and nitrous oxide at a concentrated dairy production facility in southern Idaho using open-path FTIR spectrometry[J]. *Transaction of ASABE*, 2009, 52(5):1749-1756.
- [25] 娜仁花, 董红敏. 营养因素对反刍动物甲烷排放影响的研究现状[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(6):2534-2536.
- NA Ren-hua, DONG Hong-min. Research status of effects of nutritional factors on methane emission of ruminant[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(6):2534-2536.
- [26] Kebreab E, Clark K, Wagner-Riddle C, et al. Methane and nitrous oxide emissions from Canadian animal agriculture: A review[J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2006, 86:135-158.
- [27] Beauchemin K A, McGinn S M. Methane emissions from feedlot cattle fed barley or corn diets[J]. *Journal of Animal Science*, 2005, 83:653-661.
- [28] Schiemann R, Jentsch W, Wittenburg H. Die Verwertung der Futterenergie für die Milchproduktion[J]. *Archives of Animal Nutrition*, 1972, 22(10):697-720.
- [29] Laubach J, M. Kelliher F. Methane emissions from dairy cows: Comparing open-path laser measurements to profile-based techniques [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135:340-345.
- [30] Grainger C, Clarke T, McGinn S M, et al. Methane emissions from dairy cows measured using the sulfur hexafluoride (SF₆) tracer and chamber techniques[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90:2755-2766.