

奶牛场氨排放特征的光谱检测

何莹^{1,2,3}, 张玉钧^{1,3}, 尤坤^{1,3}, 王立明^{1,3},
高彦伟^{1,3}, 徐金凤^{1,3}, 高志岭⁴, 马文奇⁴

1. 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031
2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026
3. 安徽省环境光学监测技术重点实验室, 安徽合肥 230031
4. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000

摘要 为实现奶牛场氨气减排, 改善生态环境, 需要在线监测氨挥发浓度并准确揭示氨排放特征。采用开放式可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术设计了开放式氨气在线监测系统, 结合反演式气体扩散技术开展相关研究, 于2013年秋季和冬季在保定市某奶牛厂进行了氨排放浓度在线监测和排放特征分析工作。监测结果表明, 秋季氨气浓度峰值为 $6.11 \times 10^{-6} \%$, 冬季氨气浓度峰值为 $6.56 \times 10^{-6} \%$, 氨浓度具有日变化趋势, 基本呈白天浓度低, 夜晚浓度高的特点。由反演气体扩散模型得到秋冬季氨排放特征, 氨排放峰值均出现在中午, 秋季氨排放速率为 $1.48 \sim 130.6 \text{ kg/head/hr}$, 冬季氨排放速率为 $0.0045 \sim 43.32 \text{ kg/head/hr}$, 秋季的排放速率高于冬季, 说明奶牛场尺度下的氨排放存在一定的季节性差异。该方法可以有效获得大范围、高灵敏、免采样、快速气体排放特征结果, 为奶牛场的氨排放监测和科学养殖提供技术支持。

关键词 激光吸收光谱; 反演式气体扩散技术; 氨排放; 奶牛场

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)03-0783-05

引言

近年来我国集约化养殖业发展迅速, 虽然产生了很大的社会和经济效益, 然而规模化养殖场排出的氨浓度明显高于世界上其他发达国家。氨气排放不仅影响养殖业的生产, 也间接影响了区域空气质量和大气能见度^[1-2]。因此, 掌握养殖场环境大气中的氨浓度及氨排放特征对环境、生态保护及科学养殖有重要意义。

研究表明, 我国的氨排放主要产生于畜牧业和农业, 其中动物排放贡献很大, 动物养殖点、污水池、粪尿管理场所等均是氨气的主要排放源^[3]。我国在奶牛厂氨气监测方面的研究仍较薄弱, 常规的氨浓度测量方法如滤膜法、扩散管采样法等都需要气体采样, 无法进行氨气的实时在线监测, 测量准确性降低。目前, 国际上发展了多种光学方法用于氨气浓度在线监测, 其中可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)^[4-5]以其高灵敏、高分辨、快速测量等特点得到广泛应用。

我国氨排放测量主要是化学法、微气象学方法等, 但是

前者存在测量周期长、试验费用高、工作量大的问题, 后者存在对气象要求较高, 测定的排放因子可能偏大等问题。将TDLAS技术和微气象学方法中的反演气体扩散技术相结合则具有实时, 快速, 高灵敏, 免采样等优点。Flesch等已利用以上技术开展牧场氨气排放监测研究等工作^[6], 但国内很少开展奶牛场氨挥发监测的相关工作。我们利用开放式TDLAS技术于河北保定市某奶牛场进行了氨浓度的连续在线监测, 并结合反演气体扩散模型测定奶牛场氨排放速率, 完成了数据分析和方法验证, 重点研究了奶牛养殖过程中的氨气日排放和季节特征。

1 工作原理

1.1 激光吸收光谱检测原理

根据 Lambert-Beer 吸收定律, 激光器发出初始光强为 I_0 , 频率为 ν 的单色激光, 通过长度为 l 的吸收介质后, 在接收端测得的强度为

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp(-\sigma(\nu)cl) \quad (1)$$

其中: l 为测量光程, $\sigma(\nu)$ 为气体吸收截面, c 为气体浓度^[7]。

收稿日期: 2014-10-11, 修订日期: 2015-02-08

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAJ24B02), 国家自然科学基金面上项目(31272247, 41275163)资助

作者简介: 何莹, 女, 1983年生, 中国科学院环境光学与技术重点实验室助理研究员 e-mail: heyings@aiofm.ac.cn

由于氨气的近红外分子吸收满足 $|\sigma(\nu)cl| \ll 1$, 因此经过光强归一化后, 气体吸收后的信号强度与初始光强无关, 仅与气体浓度和测量光程成正比。

利用标准吸收信号和测量信号进行线性最小二乘拟合, 则待测浓度表示为

$$c_L = ac_s l_2 / l_1 \quad (2)$$

其中 c_L 和 c_s 分别为待测浓度和标准浓度, l_1 和 l_2 分别为测量光程和标准吸收光程, a 为最小二乘拟合系数。

1.2 反演气体扩散技术原理

反演气体扩散模型 (inverse dispersion technique) 基于莫宁-奥布霍夫相似理论, 其工作原理如图 1 所示^[8-9]。将风速、风向、地面粗糙度、地面摩擦风速等微气象信息及排放源与测定点的空间几何关系导入模型, 得到测定点气体浓度和排放强度的比值 $(c/Q)_{sim}$, 并计算出测定点气体排放强度 Q

$$c = c_L - c_b \quad (3)$$

$$(c/Q)_{sim} = \frac{1}{P} \sum_{j=1}^P \left(\frac{1}{N} \sum \left| \frac{2}{\omega_0} \right| \right) \quad (4)$$

$$Q = \frac{c}{(c/Q)_{sim}} \quad (5)$$

其中 c_b 为背景浓度, N 为该模型重复计算次数, P 为计算沿开放测量光路上的平均浓度点数, ω_0 为测定点垂直风速。

2 实验系统设计

基于 TDLAS 原理设计了开放式氨气在线监测系统, 根据 HITRAN 数据库选择氨气近红外 1 531.7 nm 的单根吸收线实现氨气检测。使用 NEL 公司的 DFB 激光器作为光源, 通过 LIGHTWAVE 公司的激光器电流控制器和温控器控制激光器稳定输出在 1 531.7 nm, 波长扫描电路产生 200 Hz 锯齿信号叠加在电流控制器上^[10], 使激光波长周期扫描通

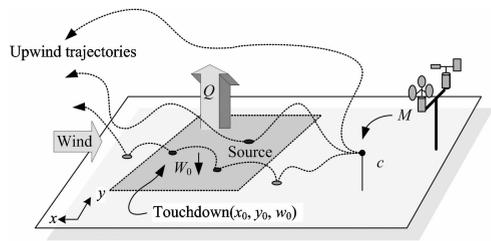


Fig. 1 Illustration of the inverse dispersion technique model
M: 浓度测定点; c: 在排放源下风向 M 处的测定点气体浓度; Q: 测定点气体排放强度; ω_0 : 测定点垂直风速

过氨气吸收线。输出的激光分为两路, 2% 的激光通过 10 cm 密封 5% 浓度的氨气校准池探测, 得到氨气标准吸收信号; 98% 的激光进入开放式监测通路, 由望远镜系统及实心角反射器实现激光的收发合置并探测信号, 两路探测信号输入信号处理模块进行放大滤波, 探测信号均为叠加氨气吸收的锯齿信号, 以其峰峰值代表信号的强度; 信号处理后送入数据采集处理系统, 系统的单路信号采样速率为 400 MHz, 采样精度 16 位, 通过对标准吸收信号和实时探测气体吸收信号进行最小二乘拟合实现氨浓度反演。将各光电元件集成在主机中, 系统结构图如图 2 所示。

利用主机连接实验室 24.3 m 的多次反射池形成稳定的检测光路, 首先测量氨气校准池得到标准吸收信号如图 3(a) 所示, 再向池中充入一组浓度分别为 $20.03 \times 10^{-6} \%$, $10.05 \times 10^{-6} \%$, $5.01 \times 10^{-6} \%$, $2.00 \times 10^{-6} \%$, $1.02 \times 10^{-6} \%$ 的氨气样气, 得到测量吸收信号如图 3(b) 所示, 并计算浓度结果如表 1 所示, 其中反演得到的浓度和样气浓度的最大相对误差为 2.94%。在开放光路检测时的测量光程约为 100 m, 因此检测灵敏度高于使用多次反射池时的情况, 由此验证了系统测量的准确性。

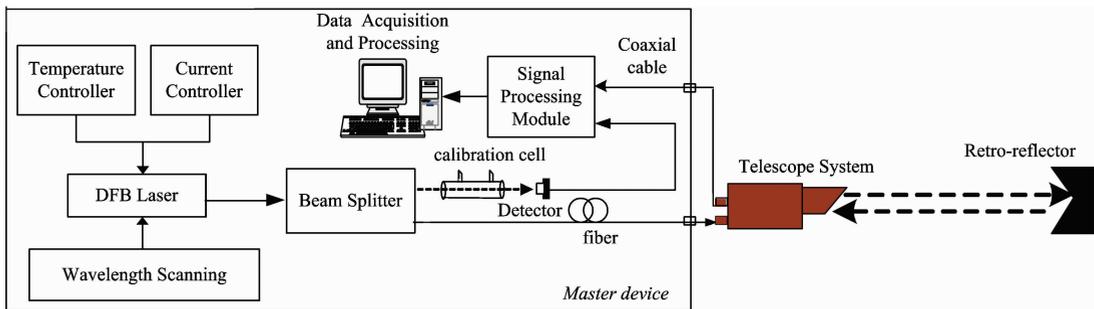


Fig. 2 System construction

Table 1 Concentration results and error analysis

standard concentration/ $\times 10^{-6} \%$	inversion concentration/ $\times 10^{-6} \%$	relative error/%
1.02	1.05	2.94
2.00	2.04	2.00
5.01	5.07	1.20
10.05	10.12	0.70
20.03	20.09	0.30

3 外场实验及分析

3.1 实验地点

利用氨气在线监测系统在河北保定市某奶牛养殖基地进行了连续外场观测实验, 本厂区面积为 $31\,547\text{ m}^2$ 。观测实验在秋季和冬季进行, 每次的观测时间持续两周左右。主机放置于可控温的测定箱内, 主机到望远镜系统之间的激光和探

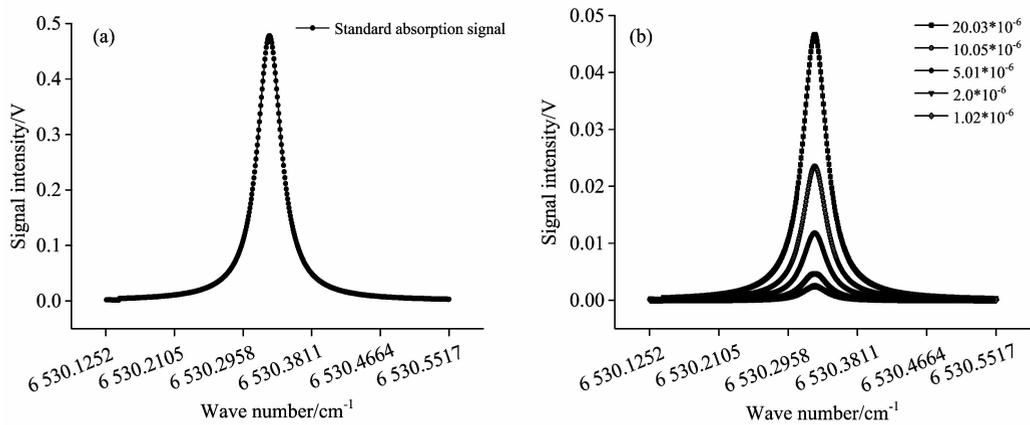


Fig. 3 (a) ammonia standard absorption signal; (b) ammonia absorption signal of different concentration

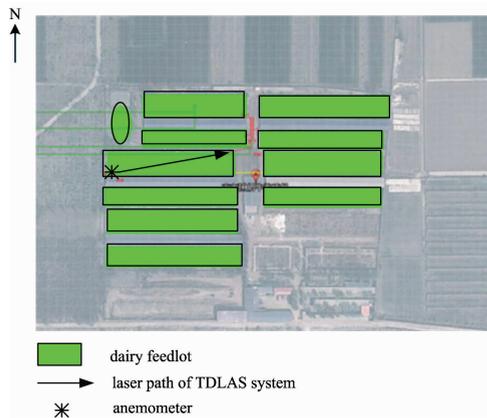


Fig. 4 Instrument setting

测信号通过 50 m 的光缆和电缆连接。望远镜系统和角反射器均固定于调整支架上, 离地面高度约为 2 m, 两者之间的光程约 100 m, 实验安装点如图 4 所示。

3.2 氨浓度监测结果及分析

氨气在线监测系统设置的氨气检测频率为 1 Hz, 远高于化学方法, 并通过软件计算 15 min 的氨浓度平均值。在奶牛养殖基地的上风向位置测定了环境氨气的背景浓度体积比约为 $0.011 \times 10^{-6} \%$ 。

在 2013 年 10 月和 12 月分别在实验点进行了两次观测, 由于大风、大雨、大雾或断电等情况导致部分数据缺失, 此外剔除强度过弱的信号, 即探测信号经过放大滤波处理后, 其峰值低于数据采集范围 5% 的信号, 同时剔除与标准吸收信号的线性相关性低于 90% 的数据, 由此得到监测结果如图 5 所示。监测期间秋季氨气浓度峰值为 $6.11 \times 10^{-6} \%$, 冬季氨气浓度峰值为 $6.56 \times 10^{-6} \%$ 。

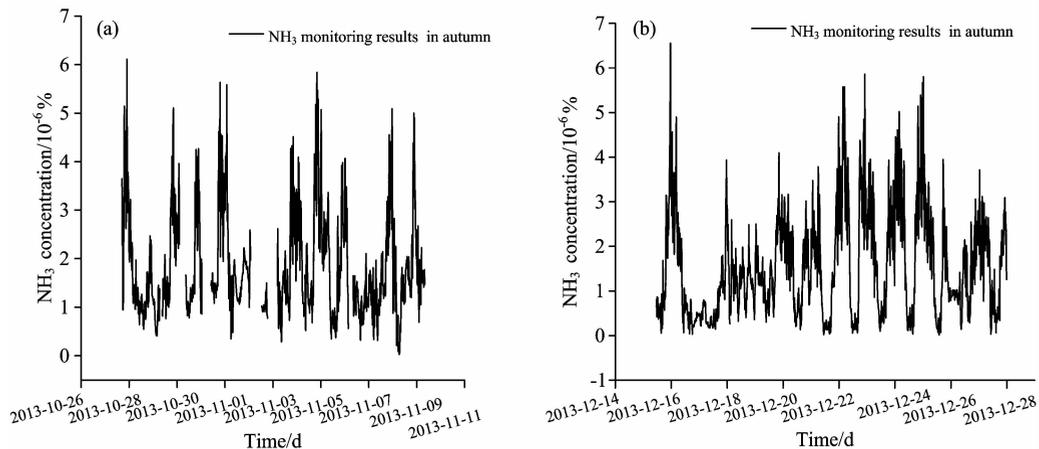


Fig. 5 Continuously monitoring results of NH₃ concentration in autumn and winter

在奶牛厂尺度下有明确的氨气排放源, 此外风速、风向以及大气层稳定性等气象条件也是影响氨浓度变化的重要因素。分析一天的小时均值监测数据: 氨浓度在秋、冬季均有周期性日变化趋势, 基本呈夜间升高, 白天降低的特点, 在中午前后降到最小值, 如图 6 所示。白天氨平均浓度明显低于夜间, 其主要原因可能是由于本系统针对近地面的氨气进

行测量, 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, 边界层相对比较活跃, 因此近地面的氨扩散速度较快; 而夜间边界层比较稳定, 氨气在近地面积累会造成其浓度升高。

3.3 氨排放特征及分析

反演式气体扩散模型对排放源的面积和形状敏感性很

低,但在风速低、大气极度稳定或极度不稳定、地面存在明显障碍物等条件下测量的准确度较低。利用同场地安装的三维超声风速仪测量得到风速、风向和湍流等信息,并计算 15 min 的风信息。选择地面摩擦风速 $u^* > 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 大气稳定度 $|L| > 10 \text{ m}$, 地面粗糙度 $z_0 > 0.1$ 的数据,以及氨浓度监测结果输入本模型,在保证模型准确性的前提下得到氨排放速率结果,并剔除夜间低风速下的部分无效数据,如图 7 所示。

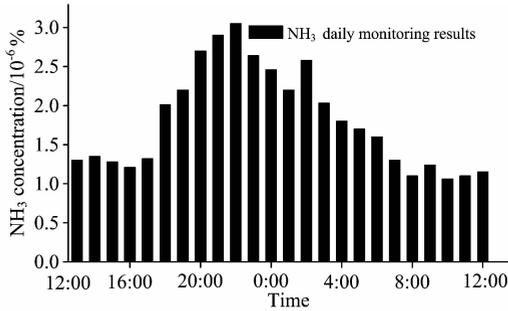


Fig. 6 Daily change curve of NH₃ concentration

分析一天的氨排放速率情况:养殖场的氨排放高峰基本都出现在中午 12:00 前后,持续时间一般为 2~3 h。本实验中所观测的氨排放源主要包括奶牛污水池和粪尿堆积场地排放,因此随中午环境温度升高,氨排放有所加快。

秋季氨排放速率范围为 1.48~130.6 kg/head/hr, 冬季氨排放速率为 0.004 5~43.32 kg/head/hr, 结果初步表明奶牛场氨排放具有一定的季节性差异。其中秋季排放速率高于冬季,一个主要原因是冬季低温导致的牛圈中粪尿排放氨通量降低而造成。

4 结 论

(1) 基于 TDLAS 技术设计了开放式氨气在线监测系统,在河北保定市某奶牛厂进行了秋、冬季氨气浓度连续监测,氨浓度结果基本呈白天浓度低,夜间浓度高的日变化趋势。系统性能稳定可靠,具有高灵敏、免采样、快速连续监测的

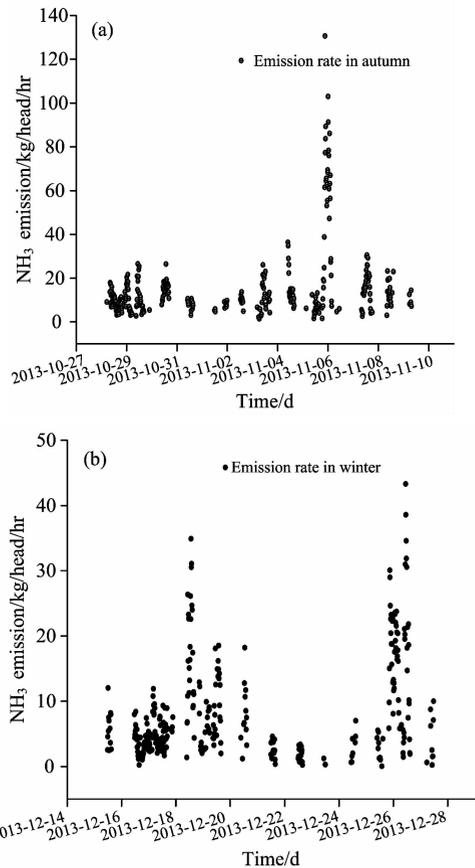


Fig. 7 NH₃ emission rules in autumn and winter

特点。

(2) 结合反演气体扩散模型计算得到氨排放速率:秋季氨排放速率范围为 1.48~130.6 kg/head/hr, 冬季氨排放速率范围为 0.004 5~3.32 kg/head/hr, 正午前后出现氨排放的峰值,且秋季的排放速率高于冬季。

(3) 本实验初步观测得到该奶牛厂的秋冬季氨排放规律,下一步可以对奶牛的饲料用量、喂养方式开展研究,分析更具体的氨排放规律,为科学养殖和降低氨排放提供技术支持。

References

- [1] HOU Yong, GAO Zhi-ling, MA Wen-qi, et al. (侯勇, 高志岭, 马文奇, 等). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2012, 32(4): 1028.
- [2] Michopoulos P, Baloutsos G, Economou A, et al. Science of the Total Environment, 2004, 323: 211.
- [3] Leytem A B, Dungan R S, Bjorneberg D L, et al. J. Environ. Qual., 2011, 40(5): 1383.
- [4] Wang Liming, Zhang Yujun, Li Hongbin, et al. Chin. Opt. Lett., 2012, 10(4): 1671.
- [5] Geng Hui, Liu Jianguo, He Yabai, et al. Applied Optics, 2014, 53(28): 6399.
- [6] Flesch T K, Harper L A, Powell J M, et al. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009, 52(1): 253.
- [7] You Kun, Zhang Yujun, Wang Liming, et al. Advanced Materials Research, 2013, 760-762: 84.
- [8] Harper L A, Flesch T K, Wilson J D. Poultry Science, 2010, 89: 1802.
- [9] Gao Z, Desjardins R L, Flesch T K. Atmospheric Environ., 2010, 44(26): 3128.
- [10] XU Xiu-min, ZHANG Yu-jun, HE Ying, et al. (徐秀敏, 张玉钧, 何莹, 等). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2014, 41(1): 81.

Study on Ammonia Emission Rules in a Dairy Feedlot Based on Laser Spectroscopy Detection Method

HE Ying^{1,2,3}, ZHANG Yu-jun^{1,3}, YOU Kun^{1,3}, WANG Li-ming^{1,3}, GAO Yan-wei^{1,3}, XU Jin-feng^{1,3}, GAO Zhi-ling¹, MA Wen-qi⁴

1. Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3. Key Laboratory of Optical Monitoring Technology for Environment, Anhui Province, Hefei 230031, China

4. College of Resources and Environmental Science, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China

Abstract It needs on-line monitoring of ammonia concentration on dairy feedlot to disclose ammonia emissions characteristics accurately for reducing ammonia emissions and improving the ecological environment. The on-line monitoring system for ammonia concentration has been designed based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) technology combining with long open-path technology, then the study has been carried out with inverse dispersion technique and the system. The ammonia concentration in-situ has been detected and ammonia emission rules have been analyzed on a dairy feedlot in Baoding in autumn and winter of 2013. The monitoring indicated that the peak of ammonia concentration was 6.11×10^{-6} in autumn, and that was 6.56×10^{-6} in winter. The concentration results show that the variation of ammonia concentration had an obvious diurnal periodicity, and the general characteristic of diurnal variation was that the concentration was low in the daytime and was high at night. The ammonia emissions characteristic was obtained with inverse dispersion model that the peak of ammonia emissions velocity appeared at noon. The emission velocity was from 1.48 kg/head/hr to 130.6 kg/head/hr in autumn, and it was from 0.0045 kg/head/hr to 43.32 kg/head/hr in winter which was lower than that in autumn. The results demonstrated ammonia emissions had certain seasonal differences in dairy feedlot scale. In conclusion, the ammonia concentration was detected with optical technology, and the ammonia emissions results were acquired by inverse dispersion model analysis with large range, high sensitivity, quick response without gas sampling. Thus, it's an effective method for ammonia emissions monitoring in dairy feedlot that provides technical support for scientific breeding.

Keywords Laser absorption spectroscopy; Inverse dispersion technique; Ammonia emission; Dairy feedlot

(Received Oct. 11, 2014; accepted Feb. 8, 2015)