

蒲施桦, 李厅厅, 王 浩, 等. 畜禽养殖污染气体监测技术综述[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2439–2448.

PU Shi-hua, LI Ting-ting, WANG Hao, et al. Monitoring technology of air pollution generated by animal feeding operations: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2439–2448.

畜禽养殖污染气体监测技术综述

蒲施桦^{1,3}, 李厅厅², 王 浩^{1,3}, 简 悦^{1,3}, 刘作华^{1,3*}, 龙定彪^{1,3*}, 阮蓉丹²

(1. 重庆市畜牧科学院, 重庆 402460; 2. 西南大学动物科学学院, 重庆 402460; 3. 农业农村部西南设施养殖工程科学观测实验站, 重庆 402460)

摘 要: 为提升我国规模化畜禽空气污染物监测技术水平, 就国内外在采样、检测、通风三个重要监测环节中所采用的方法、技术、设备进行系统的总结对比, 为我国自动化、精准化养殖空气污染物检测技术及设备的研发, 标准化的规模化畜禽养殖场空气质量监测系统的建立提供参考依据。

关键词: 畜禽养殖; 污染气体; 气体采集; 检测设备; 监测方法; 通风率

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)11-2439-10 doi:10.11654/jaes.2019-0623

Monitoring technology of air pollution generated by animal feeding operations: A review

PU Shi-hua^{1,3}, LI Ting-ting², WANG Hao^{1,3}, JIAN Yue^{1,3}, LIU Zuo-hua^{1,3*}, LONG Ding-biao^{1,3*}, RUAN Rong-dan²

(1. Chongqing Academy of Animal Sciences, Chongqing 402460, China; 2. College of Animal Sciences, Southwest University, Chongqing 402460, China; 3. Scientific Observation and Experiment Station of Livestock Equipment Engineering in Southwest, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chongqing 402460, China)

Abstract: Concentrated animal feeding operations (CAFOs) have contributed to agricultural income and rural economy development in China but have also become major contributors to air pollution that can not be neglected. Therefore, air pollution monitoring in CAFOs plays a significant role in preventing and controlling air pollution in China. However, compared with those of foreign countries, China's air pollution detectors and relevant technologies in animal husbandry are still in the initial stage of development. To improve China's monitoring technology of air pollution in animal husbandry, in this paper we systematically summarized and compared the methods, technologies, and equipments adopted in three important monitoring processes: sampling, measurement, and ventilation. This review provides some essential references for promoting the research and development in the automation and precision of detecting techniques and equipment, to facilitate establishing standardized CAFOs in China.

Keywords: animal feeding operations; air pollution; gas collection; measurement devices; monitoring method; ventilation rate

随着人们生活质量的提高, 对肉蛋奶制品数量和
质量的需求也在不断增加, 这也促使我国畜牧养殖向
规模化、集约化、标准化发展。原农业部2018年工作
要点指出, 我国生猪饲养量和猪肉产量占世界总量的

50%, 截至2017年底, 我国大中规模生猪养殖出栏率
为全国生猪总出栏率的78.4%; 大中规模家禽养殖出
栏数为全国总家禽出栏量的63%^[1], 畜禽规模化养殖
率在58%左右, 规模化养殖已成为畜牧生产的中坚

收稿日期: 2019-06-03 录用日期: 2019-08-13

作者简介: 蒲施桦(1986—), 女, 重庆永川人, 硕士, 副研究员, 从事畜禽养殖环境监测及调控技术研究。E-mail: opertion5@163.com

*通信作者: 刘作华 E-mail: liuzuo-hua66@163.com; 龙定彪 E-mail: longjuan880@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800100); 重庆市财政专项资金项目(19502); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-35)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2018YFD0800100); Chongqing Special Financial Funds Project(19502); The Earmarked Fund for Modern Agro-industry Technology Research System(CARS-35)

力量。在规模畜禽养殖为农业增收、农村经济壮大开辟新途径的同时,也伴随产生了大量环境污染物。其中,规模化畜禽养殖排放的空气污染物成为了现今不容忽视的环境问题之一^[2-4],受到了越来越多的关注。2016年《中国空气质量管理评估报告》的统计数据显示,我国畜牧业的氨排放量占全国氨排放总量的80%以上^[5],而美国和欧洲的畜牧业氨排放量分别占人类氨排放总量的55%和75%^[6-7]。养殖业的空气污染物被认为是生态系统的破坏者之一^[8]。因此,开展畜禽养殖场空气污染物监测,为畜禽养殖污染防控技术及决策提供准确有效的检测数据,对促进我国现代畜牧业升级转型,实现环境友好型的畜禽养殖业至关重要。

美国、欧洲等发达国家和地区的畜禽养殖场空气污染物监测研究起步较早,20世纪50年代初美国首次开展了针对畜禽养殖场氨气浓度的监测工作^[9],随后加拿大、丹麦等国家陆续开展了大量畜禽养殖场空气质量检测工作,并形成了相对成熟的监测方法和操作规范^[10-11]。近年来,我国加大了对畜禽养殖场的环境污染防治力度,并相继出台了《畜禽养殖业污染防治技术规范》《畜禽养殖业污染物排放标准》等系列的畜禽养殖污染监督标准和法规^[12-13]。但由于我国的相关研究起步较晚,现有的畜禽养殖污染检测技术尚处于跟跑阶段^[14]。作为畜禽养殖场污染物防控的技术手段和基础,研发智能化养殖场空气污染物检测技术及设备,建立标准化的规模化养殖场空气质量监测系统是当前面临的一项迫切任务。本文就国内外在畜禽养殖空气污染物监测的采样、检测、通风三个重要环节的方法、技术、设备进行系统的对比总结,为我国规模化畜禽养殖场空气质量监测提供参考依据。

1 养殖场气体的现场采集技术及设备

现场气体采集方式根据采样设备的覆盖空间大小,可分为封闭式、点位式和开路式三种。封闭式是在封闭空间进行气体样品的收集,而点位式和开路式,分别针对三维空间内一特定点和两点式光路中的气体进行采集(图1)。

1.1 封闭式

封闭式采集法是将一个密封性的外壳或桶,覆盖在监测点位的上方而形成一个密闭采样室,可消除外界环境对样品的影响。这种密封采集室的底部一般是敞开的,并配备一个或多个空气出入口,用于气体检测和装置内部空气环境的清洗。最早的采集室是由瑞士Lindvall研发用于气味测定,被称为“Lindvall箱”,后来被Svensson等^[15]用于畜禽场或土壤中氨气、二氧化碳的采集。目前研究中出现过的采样室大多为箱体(表1)。

1.2 点位式

点位式采样是在养殖场内的一个或多个点位置进行气体采集,相比密封式,该方法可以采集养殖舍内不同高度、进出风口以及场区上风向、下风向的气体。根据采样设备的不同,点位式可分为主动式和被动式。被动式采样通常采用传感器设备,气体通过扩散方式进入到设备中,同时完成气体浓度的检测工作,如被动式气体探测管,就是通过待测气体扩散至管内进行的采集和测定。主动式采样则是利用一个或者多个气泵对监测位置的气体样品进行采集。其中,原位式主动采样的气泵和检测设备在同一位置,如华瑞公司生产的气体检测管(图2),就是采用抽气泵将气体吸入到检测管中进行检测,其操作简单,且

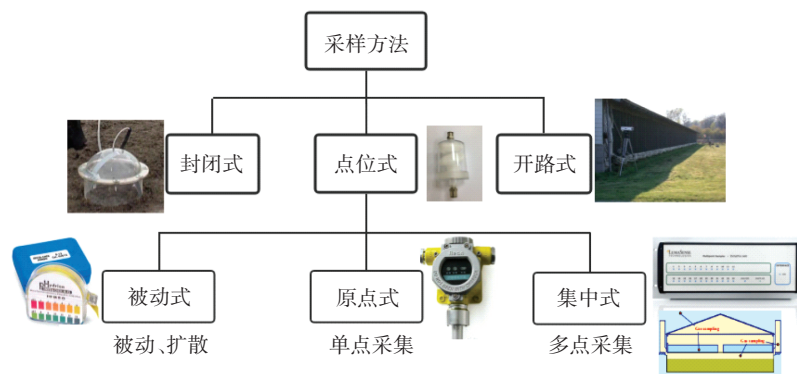


图1 气体采集方法

Figure 1 Gas collection methods

表1 采样室的规格及用途
Table 1 Specification and usage of sampling chamber

序列 Number	名称 Name	形状 Shape	尺寸 Size	使用地点 Using site	参考文献 Reference
1	Lindvall box	长方体	1.50 m×1.00 m×0.40 m	畜禽舍	[16-18]
2	Dynamic chamber	长方体	0.40 m×0.30 m×0.18 m	肉鸡舍	[19]
3	Wind tunnel	—	2个,单个0.5 m ³	水泥地	[20]
4	Hood	长方体	无盖,0.9 m ³	奶牛场	[21]
5	Chamber	长方体	1.22 m×0.76 m×0.41 m	肉鸡场废弃物	[22]
6	Emission hood	—	7 m ³	运动场粪污	[23]
7	Flux chamber	圆柱体	直径30 cm	奶牛场	[24]
8	Dynamic chamber	长方体	0.4 m×0.4 m×0.6 m	粪污处理	[25]

测定及时。集中式主动采样是一种相对复杂的多点位式采集系统(图3),由气管、气泵及自动控制设备组成,监测点的气体由自动系统控制通过气管输送至检测设备,能实现多点位、长距离的气体采集和监测,但系统中输送气管需要进行隔热或加热处理,以防止气体传输过程中温度差异造成的管内局部冷凝^[26]。

1.3 开路式

开路式通过由光源发射器、接收器/传感器组成的光学探测装置进行气体采集检测。由光源发射器向远距离方向发射紫外或红外光束,从而形成一条开放

式光路径,将气体传输至光源接收器/传感器进行浓度检测。由于光学探测设备性能差异,光源发射器和接受器之间的开放路径长度在100~750 m不等^[27],美国PID公司的LaserWarn1000/2000量子激光开路式气体检测设备可以监控500 m的氨气和二氧化碳浓度,Se-crest等^[28]采用紫外光差分吸收技术对养殖场以北0.8 km处的NH₃浓度进行测定,用以评估密苏里州集约化养殖场的NH₃排放对下风向居民的影响。

2 污染气体浓度现场检测技术及设备

早期养殖场气体检测主要是采用湿化学法和嗅觉法等传统方法^[29],随着气体传感器和分析技术的提升,许多高精度的气体技术被引入到畜禽空气质量测量中。目前,关于畜禽养殖领域的气体检测方法主要分为嗅觉法、化学法和光学法三大类,根据设备检测原理的不同又分为11种(图4)。其中,气体检测管、电化学传感器、光学气体分析仪被广泛用于养殖场现场气体检测。

2.1 气体检测管

气体检测管基于目标气体吸附固体表面显色反应而设计,不同气体会根据反应产物的不同显示出不



图2 华瑞 LP-1200 气体采样泵

Figure 2 Gas sampling pump RAE LP-1200

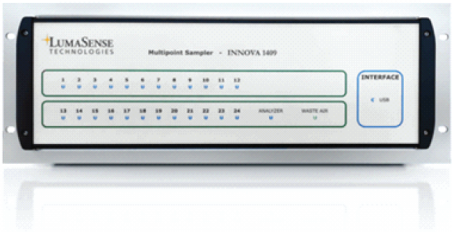


图3 INNOVA1409 多点式采样仪

Figure 3 Multipoint sampler INNOVA1409

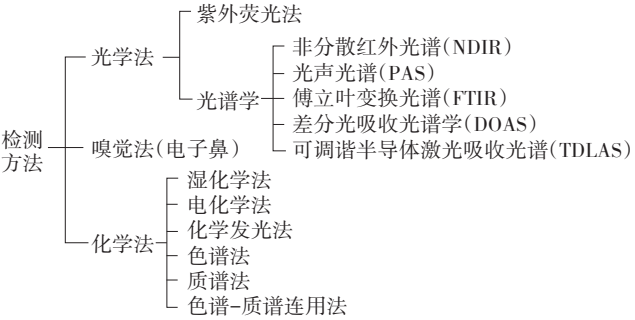


图4 气体浓度检测方法的分类

Figure 4 Classification of gas concentration detection methods

同颜色,其检测气体种类可达300种。气体检测管根据气体采集类型,分为主动型气管和被动型气管。由于其操作简单、功能单一,早期被用于畜禽养殖场内 NH_3 和 H_2S 的检测。Meyer等^[30]首次采用气体检测管测量了200个产仔猪舍的 NH_3 浓度;Worley等^[31]也采用气体探测管对猪舍内的 NH_3 和 H_2S 进行检测。气体检测管的成本相对较低,美国RAE、德国德尔格等气体检测管的价格大约在50~70元,配套的气管泵在1000~1500元。不同类型、不同厂家的检测管的检测精度和范围会存在差异性。Skewes等^[32]发现被动型气管(Gastec Passive Dosimeter Tube No.3)与主动型气管(Gastec Low Range Ammonia Detector Tube No.3)在对畜禽舍内的 NH_3 浓度进行测定时,被动型气管的检测限更低,精准度更高;Kroodasma等^[33]对比了德国德尔格与日本光明理化两家公司的气体检测管,发现在测定低浓度 NH_3 时,德尔格气管的精准率在10%左右,误差率在15%左右,而日本光明理化的气管的精准率和误差率均在2%以下。可见,气体检测管无法满足畜禽舍内低浓度气体的检测要求,且精准度和误差率也不稳定,但因其使用方便、性价比高,目前依然被广泛应用。

2.2 电化学传感法

接触式传感法是基于气体的电化学性质,通过目标气体与传感器接触发生化学反应,以传感器的电流变化或电阻变化来判断气体的成分和浓度。常用的接触式传感器有半导体传感器、电化学传感器和电子鼻。早在20世纪60年代,半导体传感器就因其灵敏度高、稳定性好、制作简单而被广泛用于农业领域的气体检测,Li等^[34]采用半导体传感器对畜禽舍内 NH_3 和 H_2S 进行测定;半导体材料决定了传感器的灵敏度,常用的材料有 WO_3 、 Fe_2O_3 、 Sn_2O_3 等。Ahsan等^[35]对 WO_3 半导体膜进行改进,显著提高了传感器的灵敏度,能检测小于 $10\text{ }\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NH_3 ;Kawashinma等^[36]对 NH_3 传感器的半导体材料 Sn_2O_3 进行加热处理,发现其可现场检测小于 $10\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NH_3 浓度变化。虽然半导体传感器的应用简单、成本低,但其检测气体单一,难以适应复杂气体环境的检测要求,而电化学传感器具有良好的气体选择性,能在复杂气体环境下测定多种气体成分。常见的电化学传感器有德国德尔格生产的X-am 7000、美国华瑞生产的MultiRAE 2等,这些都被用于畜禽舍内的 NH_3 、 CH_4 、 H_2S 等气体的检测,其检测精度至少达到 $1\text{ }\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 。电化学传感器在长时间使用过程中容易出现漂移,需要定期进行气体

标定校准;其电极与气体接触时间过长,会出现永久性中毒,影响设备的额定使用寿命,寿命一般在12~18个月。

2.3 光学气体分析仪

光学法分析基于气体对光吸收的特质,通过获取气体的光谱信息进行气体浓度测定。由于其灵敏度高、响应时间短、能实现自动化连续检测,而被逐渐用于畜禽场空气污染浓度变化及排放规律的相关研究。如Dekock等^[37]采用Binosa4b型非分散红外光谱(NDIR)分析仪对3栋育肥猪舍 NH_3 浓度进行周期性监测,所建立的 NH_3 排放模型的最大误差小于10%;Hensen等^[38]采用美国TDLAS检测仪研究了奶牛养殖场 N_2O 和 CH_4 的排放规律, N_2O 和 CH_4 分辨率分别为 $20\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 。相比于气体检测管、电化学法检测对象的局限性,光谱原理的检测设备能进行多气体的实时定量,其选择性强,能有效避免多气体检测的干扰性。具有代表性的检测设备是丹麦LUMASENSE公司的INNOVA红外光声谱气体检测仪,它能测定 NH_3 、 N_2O 、 CH_4 、 CO_2 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 五种气体,测定精度能达到 10^{-9} 级。该仪器在检测分析过程中,能有效补偿测量温度,消除水汽和气体的干扰,确保数据的稳定性、可靠性、准确性。Childers等^[39-40]采用INNOVA测定猪舍内的 NH_3 、 CH_4 、 CO 等有害气体浓度,检测限小于 $3\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$,且各种气体的平均误差小于3%。

就市场上应用比较广泛的气体测定设备进行归纳发现(表2),这些设备在检测范围、测定精度、运行成本等方面都各具优点和缺点。然而,到目前为止,尚不能确定哪种检测技术或设备的数据更接近“真实”畜禽养殖污染气体浓度。主要是因为养殖场气体检测技术标准尚未建立,从而导致无法对现有的测定设备进行比较和评估。

3 通风量的检测

通风状况是影响畜禽舍空气污染物浓度及排放的主要因素之一。因此,通风量作为气体浓度监测的一项重要指标,被用来计算养殖场有害气体浓度排放率^[41](公式1)。由于养殖场通风模式及通风设备的多样性,造成畜禽舍通风量测定的误差较大,这成为畜禽环境监测领域的一个技术难题。

$$E=Q(C_2-C_1) \quad (1)$$

式中: E 为排放速率, $\text{mg}\cdot\text{min}^{-1}$; Q 为通风量, $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$; C_1 、 C_2 分别为空气交换空间进出口空气污染物浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

表2 有害气体浓度现场检测设备比较

Table 2 The comparison of on-site harmful gas detection equipments

检测原理 Detection principle	设备名称、型号、厂商 Equipment name, model, manufacturer	检测内容及范围 Test content and scope	精确度及响应时间 Accuracy and response time	特点 Advantages	成本预算 Cost
光谱学	红外光声谱气体检测仪, INNOVA 1512型, Luma Sense	NO ₂ 、NH ₃ 、CO ₂ 、CH ₄ 、C ₂ H ₅ ON	±1 nL·L ⁻¹ ; 1种气体 27 s, 5种气体 60 s	抗干扰、可靠、稳定、精确度高	99万~110万元
	便携式环境空气分析仪, MIRAN SaphiRe, Thermo	CO ₂ 、CO、甲醛和其他有机挥发物质	±1 nL·L ⁻¹ ; 18 s	快速连续监测	40万~50万元
	NDIR 分析仪, NGA2000, Rosemount	NH ₃ 、CO ₂	±1 μL·L ⁻¹ ; T90<2 s到60 s可调	测定简便且不破坏被测物质	130万元
	空气质量自动监测系统, BO3 System 300, Opsis	NH ₃ 、SO ₂ 、NO、O ₃	1~10 s	多点连续监测, 无需采样系统	125万元
	开路气体探测器, Gas Finder 2-UAV, Boreal Laser	NH ₃ 、CO ₂ 、CH ₄ 、H ₂ S	±20 nL·L ⁻¹ ; 1 s	最大测量路径可达1 km, 响应速度快	5万~10万元
电化学	电子鼻及各种气体传感器	NH ₃ 、CO ₂ 、CH ₄ 等	±1 μL·L ⁻¹ ~±1 nL·L ⁻¹ ; 30 s~2 min	可灵活组合	800~2万元
线性比色	各种气体检测管, RAE, Honeywell	NH ₃ 、CO ₂ 、CH ₄ 等	从 μL·L ⁻¹ 到%	单一测量, 需对气体采样测量, 一次使用	50~70元

通风量的测量主要有直接和间接两种方式。直接测量即通过测定风机排风口的风速、风机的表面积、风机运行时间等参数计算得到通风量。间接测量即基于测量其他变量来计算, 如示踪剂气体法^[42]。

3.1 直接测量法

直接测量法只能用于机械通风的密闭畜禽舍, 其通风量一般通过测定风机排风口的风速和风机表面积来计算, 或通过测量舍内舍外的静压差、风机的运行时间来计算。风机运行时间可以通过风帆开关、风机转速法以及风扇振动传感器的监测来获取^[43]。风速和静压可以通过传感器测定^[44]。常规的风速传感器只能用于直径小于80 cm的风机的测定, 为测定大直径风机的风速, 美国设计出一种适用于直径140 cm及以下的风机现场通风测定系统(FANS)^[45]。由于需要在畜禽舍内每个风机的排放口安装相应的检测设备, 这对于规模化养殖场来说, 不仅工作量大, 而且成本高。因此, 该方法在规模化养殖场的通风测定中适用性不强。

通风量在测算过程中, 由于单点位的风速测量难以代表整个风机的实际通风量, 因此造成计算结果误差大, 或是忽略了风机传送带松动、粉尘阻碍停止运转等情况, 导致测算结果与实际值有20%~25%的偏差^[46]。为了提高测算的精准度, 不少学者会根据试验现场环境对通风量计算公式进行修正(表3)。Ni等^[47]通过对猪舍风机运行时间和室内静压的监测, 建立了风机通风量与静压的线性模型; 王文林等^[48]在规模化猪场夏季NH₃日排放特征的研究中, 由于考虑到气象

条件对通风率的影响, 于是将温度、气压参数加入测算公式进行修正。Chai等^[49]对风机风扇进行了工业标准测试, 建立了风机通风量与静压差的三阶多项式模型。Calvet等^[50]对一个商业肉鸡场不同规格的风机通风量进行监测, 最终舍内总通风量通过各个风机通风量与运行时间进行求和得到。

3.2 间接测量法

对于开放式和半开半闭式的畜禽养殖场, 通风量的测量常采用间接测量法。间接测量包括示踪法、二氧化碳平衡法和其他方法(热量平衡法、湿度平衡法以及热压、风压测量法), 其具体计算公式见表4。实际中运用较多的方法是示踪法和二氧化碳平衡法, 而其他方法由于参数难以确定, 且误差较大等原因一般只作为理论计算。

3.2.1 示踪法

示踪法是根据质量守恒原理, 在通风建筑物或者通风空间中释放一定量的示踪剂, 通过检测示踪气体的浓度变化来间接计算通风量^[51-52]。示踪法测定效果取决于示踪气体是否能与空气均匀混合, 所以示踪气体的选择极其重要。只有具备安全性(不易燃烧、无毒、无刺激性)、惰性(不与测算空间气体发生反应)、唯一性和易测量性才是理性示踪气体^[53]。目前, 试验常用的示踪气体有六氟化硫(SF₆)、一氧化碳(CO)、氦气(He)、氢气(H₂)等^[54-55]。1998年, Demmers等^[56]首次在英国采用一氧化碳示踪剂对自然通风的牛场的通风量进行了监测, 认为测量的精确度与风速成反比。Samer等^[57]采用水平衡法、二氧化碳平衡法、热平衡法和放射性示踪气

体法对一个自然通风的奶牛舍中的气体交换率进行测定,其中放射性示踪测定的结果更为可靠。

3.2.2 二氧化碳平衡法

二氧化碳平衡法即在知道动物产热量与新陈代谢关系的前提下,由不同动物在不同饲养情况下的呼吸熵得出二氧化碳的产生量,再通过舍内舍外的二氧化碳浓度计算出实际通风量^[58-59]。二氧化碳平衡法的有效性取决于动物代谢率数据的可靠性^[60],而方法中的呼吸熵和产热量主要是通过参考推荐得出,这使得通风量的计算值与实际值存在一定的偏差。Blanes等^[61]对比二氧化碳平衡法、湿度平衡法和热量平衡法三种方法计算的猪舍通风量数据,结果显示二氧化碳平衡法较实测通风量低8%,湿度、热量平衡法较实测通风量均低9%。Samer等^[62]采用二氧化碳平衡法、示踪法和湿度法对自然通风的奶牛场冬季和夏季的通风量进行测定,结果表明二氧化碳平衡法在冬

季的效果更好。

4 畜禽养殖场气体监测误差

养殖场气体监测过程中的采集、布点、通风量估算、人为操作等环节,都会对检测结果造成误差。为了确保监测结果的代表性、完整性、准确性、可比性、重复性,需要对养殖场空气监测过程的气体采集、仪器检测等过程实施质量管控措施。对现有畜禽养殖气体研究中的监测和质控措施进行总结归纳发现(表5)^[64-66],大部分误差来源于校准、采样、检测三个环节。

4.1 校准误差

校准是采用标准气体对测量装置或基准面,如响应、漂移、线性、稳定性和精度等性能系数的校正。产生校准误差的因素主要有三个:一是校准气体,Albert等^[67]对同一厂家同批次的55.3、33.2 μL·L⁻¹和9.33 μL·L⁻¹标准NH₃进行测试,发现测试结果存在10%~

表3 直接法测通风量的相关方程式

Table 3 Correlation equations for direct measurement of ventilation volume

序号 Number	公式 Equation	参数说明 Description	参考文献 Reference
1	$Q=(a \cdot p \cdot b) t$	Q 为风机的通风量, $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$; a 为线性模型的斜率; p 为静压, Pa; b 为线性模型的截距; t 为每分钟内该风机运行时间与监测系统中所有风机运行时间之和的比例, $\% \cdot \text{min}^{-1}$	[47]
2	$V_i=60V_n \cdot S \cdot t \cdot \frac{PT_0}{P_0 T}$	V_i 为每小时通风量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; V_n 为排风口每秒平均排风速率, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; S 为排风口表面积, m^2 ; t 为排风口每小时累计排风时长, $\text{min} \cdot \text{h}^{-1}$; T 为采样点每小时平均温度, K; T_0 为标准状况下气体的温度, 273 K; P 为采样点每小时的平均气压, kPa; P_0 为标准状况下气体的压力, 101.3 kPa	[48]
3	$Q=3.802 \times 10^{-5}(\Delta P_s)^3+2.504 \times 10^{-3}(\Delta P_s)^2+0.1208 \Delta P_s+13.76$	Q 为实验室测试的通风量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; ΔP_s 为静压差, Pa	[49]
4	$V=\sum_{i=1}^n a_i \times Q_{pi}$	V 为舍内总通风量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; a_i 为每小时内, 第 i 个风机运行时间点占总时间(1 h)的比例, $\%$; Q_{pi} 为每台风机预测的通风率, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	[50]

表4 间接法测通风量的相关方程式

Table 4 Correlation equations for measuring ventilation volume by indirect method

序号 Number	方法 Method	公式 Equation	参数说明 Description	参考文献 Reference
1	示踪法	$m=V \frac{dC}{dt}+Q \cdot C$ $\int_0^T Q dt=\int_0^T \frac{m}{C} dt+V(\ln C_0-\ln C_T)$	Q 为通风量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; m 为示踪气体释放速率, $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$; V 为通风空间体积, m^3 ; dC/dt 为浓度随时间变化值; C 为瞬时测量的示踪气体浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; T 为测试时间段, h; C_0 和 C_T 分别为起始时和 T 时的示踪气体浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	[52]
2	二氧化碳平衡法	$THP=16.18O_2+5.02CO_2$ $RQ=\frac{CO_2}{O_2}$ $CO_2=\frac{THP}{16.18/RQ+5.02}$ $V=\frac{CO_2 \times 10^6}{[CO_2]_e-[CO_2]_i}$	THP 为动物总产热, $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$; O_2 为耗氧量, $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; CO_2 为二氧化碳产生速率, $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; V 为通风率, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; $[CO_2]_e$ 和 $[CO_2]_i$ 分别为排、进风口的 CO_2 浓度, $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$; RQ 为呼吸熵	[58-59]
3	热量平衡法	$S_0=ACv\Delta t+Qc\Delta t$	S_0 为动物总显热, MJ; A 为畜禽舍建筑物的表面积, m^2 ; Cv 为建筑物的对流导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; Δt 为舍内外温度差, $^{\circ}\text{C}$; Q 为通风量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; c 为空气绝热系数, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	[63]
4	湿度平衡法	$Q=\frac{L}{\Delta H \times 680}$	Q 为通风量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; L 为潜热产量, W; ΔH 为室内外空气含水量差值, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	

20%的误差,选择具有资质的供气商并进行标气自检是较为有效的质控措施;二是校准频率,过高的校准频率不仅昂贵,而且造成正常测量时间的损失,而过少的校准将会增加检测结果的不确定性,通过自动校准设备和软件可减少这一误差产生;三是干扰气体,校准气体通常不含有干扰物质,这与实际测量空气存在一定差异,而这种差异会在设备被标气校准后引起测量数据的误差,这在实际中不可避免,除非已知干扰成分的浓度,才可消除这种误差。

4.2 采样误差

采样误差主要来源于采样方法和采样设备。养殖场气体浓度日变化和季节变化明显,是气体采样的一个重要误差源。Lefcourt^[68]提出增加采集点位、提高采集频率并扩大测试样本量可避免这种误差性。而大部分采样设备的采样速率、工作时间以及采样气管都无法满足这种采集要求,而且长时间、高频率的采集,会引起采样气管堵塞、系统负压泄露。因此只能通过设备性能升级和人为正常维护,从而提高这种采集需求的实施性。

4.3 检测误差

养殖场气体浓度低、瞬间变化不明显,使得气体测定的响应频率低于检测设备的响应时间,从而产生“实时”浓度测定误差,加之养殖场温湿度差异、粉尘、颗粒物等干扰因素较多,进而增加了测定数据的误差性。而现今研究所用气体检测设备性能,如响应时间、测定精度及其对气体干扰物质消除和补充等,都不是针对养殖场环境及气体而研发的。因此,需要监

测工作开始前,评估检测设备的现场测定性能,选取满足监测需求的设备,提高养殖气体监测数据的有效性和准确性。

5 展望

5.1 养殖场气体采样的代表性、全面性、连续性仍是一项技术难题

养殖场区域结构复杂,气体污染源多且分散,而现有的采样技术只适用于短时间的点位、路径,对于场区气体长期性、空间性变化的多点式采集,尚无相关的采样技术方法和设备,加之养殖环境中粉尘、饲料粉尘等干扰物质多,从而造成养殖场气体采集成为难点问题。

5.2 广谱实用型畜禽气体污染物快速检测装备有待研发

我国现阶段采用的畜禽污染气体监测仪器和传感器均为国外进口,尤其是一些灵敏度高、响应时间短的设备,因为价格昂贵,大部分设备只集中在科研院校研究使用,缺乏一款具有自主产权、适用于我国畜禽养殖环境的广谱实用型畜禽气体污染物快速检测装备,以为我国养殖优势产区商业型养殖场实地应用、养殖场环境信息长期稳定获取提供技术手段。

5.3 规模化畜禽污染气体监测技术标准亟待开展

国内外对于畜禽气体污染物监测技术标准尚不完善,导致一些畜禽养殖场空气污染物监测数据不具备可比性和代表性。因此,需要联合科研院校、仪器企业、环境监管部门及标准管理部门,制定畜禽污染气体采样、检测、校准、数据处理等相关的技术标准,构建一套完整、有效的畜禽养殖场污染气体监测技术方案,为摸清主要气体污染物排放、迁移及转化特征和规律提供技术支撑。

参考文献:

[1] 赵远崇, 苟德宝. 规模化畜禽养殖的现状及其对生态环境的影响[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2018, 34(4):238-240.
ZHAO Yuan-chong, GOU De-bao. The present situation of large-scale livestock and poultry breeding and its influence on ecological environment[J]. Chinese Abstracts on Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2018, 34(4):238-240.
[2] 汪开英, 代小蓉. 畜禽场空气污染对人畜健康的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2008, 44(10):32-35.
WANG Kai-ying, DAI Xiao-rong. Effects of air pollution on human and animal health in livestock farms[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2008, 44(10):32-35.
[3] 蒲施桦, 龙定彪, 黄开佩, 等. 育肥猪舍内空气污染物排放规律研究

表5 畜禽舍内气体浓度监测误差及控制措施

Table 5 Problems and control measures in monitoring gas concentration in livestock houses

影响因素 Influence factors	控制措施 Solution
季节变化	开展季节性的长期监测
空间变化	多点采样
采样管线的冷凝	保证样品传输管道温度高于露点温度
采样系统泄漏	进行防漏测试消除泄漏
采样系统内粉尘	在采样头及采样管入口增加过滤器
校准气体	选择有资质的标准气体供应商,并自检
设备灵敏度及精度低	进行定期维护
响应频率低	分析仪器的适当选择、校准及维护
其他气体干扰	分析仪器的选择和校准
测量过程的操作	人员专业技能培训
温度	使用精确的传感器并定期进行校准
大气压	使用精确的传感器并定期进行校准
数据取舍	增加数据的有效性

- [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018, 51(11):41-47.
- PU Shi-hua, LONG Ding-biao, HUANG Kai-pei, et al. Study on the emission laws of air pollutants in fattening pig houses[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2018, 51(11):41-47.
- [4] 蒲施桦, 解雅东, 谢跃伟, 等. 臭氧消毒机对猪舍内空气净化效果研究[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(6):55-58.
- PU Shi-hua, XIE Ya-dong, XIE Yue-wei, et al. Effect of ozone disinfecting technology on purifying air in livestock farming[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2017, 38(6):55-58.
- [5] Paulot F, Jacob D J, Pinder R W, et al. Ammonia emissions in the United States, European Union, and China derived by high-resolution inversion of ammonium wet deposition data: Interpretation with a new agricultural emissions inventory (MASAGE-NH₃)[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 119(7):4343-4364.
- [6] Anderson N, Strader R, Davidson C. Airborne reduced nitrogen: Ammonia emissions from agriculture and other sources[J]. *Environment International*, 2003, 29(2):277-286.
- [7] Webb J, Menzi H, Pain B F, et al. Managing ammonia emissions from livestock production in Europe[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 135(3):399-406.
- [8] Heber A J, Ni J Q, Lim T T, et al. Quality assured measurements of animal building emissions: Gas concentrations[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, 56(10):1472-1483.
- [9] Ni J Q, Heber A J. An on-site computer system for comprehensive agricultural air quality research[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 71(1):38-49.
- [10] Heber A J, Ni J Q, Haymore B L, et al. Air quality and emission measurement methodology at swine finishing buildings[J]. *Transactions of the ASAE*, 2001, 44(44):1765-1778.
- [11] Mosquera J, Monteny G J, Erisman J W. Overview and assessment of techniques to measure ammonia emissions from animal houses: The case of the Netherlands[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 135(3):381-388.
- [12] 中国畜牧业协会. 畜禽养殖业污染防治技术规范: 2008 中国养猪业年度报告及 2009 年发展预测[C]. 北京: 中国畜牧业协会, 2008.
- China Animal Agriculture Association. Technical specification for pollution prevention and control in livestock and poultry breeding industry: Annual report of China's pig industry 2008 and development forecast for 2009[C]. Beijing: China Animal Agriculture Association, 2008.
- [13] 畜禽养殖业污染物排放标准[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2003(5):33-34.
- Emission standards for pollutants from livestock and poultry farming [J]. *Jiangxi Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2003(5):33-34.
- [14] 介邓飞, 泮进明, 应义斌. 规模化畜禽养殖污染气体现场检测方法 与仪器研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1):236-246.
- JIE Deng-fei, PAN Jin-ming, YING Yi-bin. Advances in methods and instruments for determining concentration of gaseous air pollutants in large-scaled livestock farms[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(1):236-246.
- [15] Svensson L, Ferm M. Mass transfer coefficient and equilibrium concentration as key factors in a new approach to estimate ammonia emission from livestock manure[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1993, 56(1):1-11.
- [16] Ivanova-Peneva S G, Aarnink A J A, Verstegen M W A. Ammonia and mineral losses on dutch organic farms with pregnant sows[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(2):221-235.
- [17] Mendes L B, Pieters J G, Snoek D, et al. Reduction of ammonia emissions from dairy cattle cubicle houses via improved management- or design-based strategies: A modeling approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574:520-531.
- [18] Samer M. Towards the implementation of the green building concept in agricultural buildings: A literature review[J]. *Agricultural Engineering International: The CIGR e-journal*, 2013, 15(2):25-46.
- [19] Wiedemann S G, Phillips F A, Naylor T A, et al. Nitrous oxide, ammonia and methane from Australian meat chicken houses measured under commercial operating conditions and with mitigation strategies applied[J]. *Animal Production Science*, 2016, 56(9):1404.
- [20] Spiehs M J, Miller D N, Woodbury B L, et al. Effect of feeding wet distillers grains with solubles to beef cattle on air and manure quality[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2012, 28(3):423-430.
- [21] Powell J, Wattiaux M, Broderick G. Short communication: Evaluation of milk urea nitrogen as a management tool to reduce ammonia emissions from dairy farms[J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(9):4690-4694.
- [22] Miles D M, Brooks J P, McLaughlin M R, et al. Broiler litter ammonia emissions near sidewalls, feeders, and waterers[J]. *Poultry Science*, 2013, 92(7):1693-1698.
- [23] Chadwick D R. Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from cattle manure heaps: Effect of compaction and covering[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(4):787-799.
- [24] Blanes-Vidal V, Topper P A, Wheeler E F. Validation of ammonia emissions from dairy cow manure estimated with a non-steady-state, recirculation flux chamber with whole-building emissions[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(2):633-640.
- [25] Loyo L, Guizou F, Beline F, et al. Gaseous emissions (NH₃, N₂O, CH₄ and CO₂) from the aerobic treatment of piggery slurry: Comparison with a conventional storage system[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 97(4):472-480.
- [26] Ogink N W M, Kroodsmas W. Reduction of ammonia emission from a cow cubicle house by flushing with water or a formalin solution[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1996, 63(3):197-204.
- [27] Mount G H, Rumburg B, Havig J, et al. Measurement of atmospheric ammonia at a dairy using differential optical absorption spectroscopy in the mid-ultraviolet[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(11):1799-1810.
- [28] Secret C D. Field measurement of air pollutants near swine confined-animal feeding operations using UV DOAS and FTIR[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2001, 4199:98-104.
- [29] Lee K M, Yu S, Choi Y H, et al. Environmental assessment of sewage

- effluent disinfection system: Electron beam, ultraviolet, and ozone using life cycle assessment[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 17(5):565-579.
- [30] Meyer V, Bundy D. Farrowing building air quality survey[C]. Mich: International Summer Meeting ASAE, 1991.
- [31] Worley J W, Das K C. Swine manure solids separation and composting using alum[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2000, 16(5): 555-561.
- [32] Skewes P A, Harmon J D. Ammonia quick test and ammonia dosimeter tubes for determining ammonia levels in broiler facilities[J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 1995, 4(2): 148-153.
- [33] Kroodsmas W, HuisintVeld J W H, Scholtens R. Ammonia emission and its reduction from cubicle houses by flushing[J]. *Livestock Prod*, 1993, 35:293-302.
- [34] Li L, Gao L. Remote monitoring system of henhouse harmful gases[C]// Taiyuan: International Conference on Computer Application and System Modeling, 2010.
- [35] Ahsan M. Thermally evaporated tungsten oxide (WO_3) thin films for gas sensing applications[D]. Australia: Queensland University of Technology, 2012:19-21.
- [36] Kawashima S, Yonemura S. Measuring ammonia concentration over a grassland near livestock facilities using a semiconductor ammonia sensor[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(22):3831-3839.
- [37] Dekock J, Vranken E, Gallmann E, et al. Optimisation and validation of the intermittent measurement method to determine ammonia emissions from livestock buildings[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 104(3):396-403.
- [38] Hensen A, Groot T T, van den Bulk W C M, et al. Dairy farm CH_4 and N_2O emissions, from one square metre to the full farm scale.[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 112(2):146-152.
- [39] Childers J W, Thompson E L, Harris D B, et al. Multi-pollutant concentration measurements around a concentrated swine production facility using open-path FTIR spectrometry[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(11):1923-1936.
- [40] Childers J W, Thompson E L, Harris D B, et al. Application of standardized quality control procedures to open-path fourier transform infrared data collected at a concentrated swine production facility[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(9):1859-1866.
- [41] Liu S, Ni J Q, Radcliffe J S, et al. Mitigation of ammonia emissions from pig production using reduced dietary crude protein with amino acid supplementation[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 233: 200-208.
- [42] Hoff S J, Bundy D S, Nelson M A, et al. Real-time airflow rate measurements from mechanically ventilated animal buildings[J]. *Air Repair*, 2009, 59(6):683-694.
- [43] Berckmans D, Vandenbroeck P, Goedseels V. Sensor for continuous measurement of the ventilation rate in livestock buildings[J]. *Indoor Air*, 2010, 1(3):323-336.
- [44] Yan C, Ji-Qin N, Diehl C A, et al. Large scale application of vibration sensors for fan monitoring at commercial layer hen houses[J]. *Sensors*, 2010, 10(12):11590-11604.
- [45] Gates R S, Casey K D, Xin H, et al. Fan assessment numeration system (fans) design and calibration specifications[J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 47(5):1709-1715.
- [46] Liang Y, Xin H, Li H, et al. Effects of measurement intervals on estimation of ammonia emissions from layer houses[J]. *Transactions of the ASABE*, 2006, 49(1):183-186.
- [47] Ni J Q, Diehl C A, Liu S. An innovative ventilation monitoring system at a pig experimental building[C]//Ni J Q, Lim T T, Wang C Y. Animal environment and welfare-proceeding of international symposium, Chongqing, 2015:58-65.
- [48] 王文林, 刘 筱, 韩宇捷, 等. 规模化猪场机械通风水冲粪式栏舍夏季氨日排放特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17):214-221.
- WANG Wen-lin, LIU Xiao, HAN Yu-jie, et al. Daily emission characteristics of ammonia from typical industrial pig farm with manure cleaning by rising water in summer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(17):214-221.
- [49] Chai L, Ni J Q, Diehl C A, et al. Ventilation rates in large commercial layer hen houses with two-year continuous monitoring[J]. *British Poultry Science*, 2012, 53(1):19-31.
- [50] Calvet S, Cambra-López M, Blanes-Vidal V, et al. Ventilation rates in mechanically-ventilated commercial poultry buildings in Southern Europe: Measurement system development and uncertainty analysis [J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(4):423-432.
- [51] Clark J A, Wathes C M, Phillips V R, et al. Assessment of techniques for measuring the ventilation rate, using an experimental building section[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 76(1): 71-81.
- [52] 朱志平. 基于示踪法测定猪舍自然通风量与有害气体排放量研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2007:3-6.
- ZHU Zhi-ping. Study on the determination of natural ventilation and harmful gas emission in piggery by tracer method[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007:3-6.
- [53] Strom J S, Dahl P, Wang C, et al. Emission of ammonia and other contaminant gases from naturally ventilated dairy cattle buildings[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 92(3):355-364.
- [54] N Salhani, E Stengel. A comparative study of the gas exchange potential between three wetland species using sulfur hexafluoride as a tracer [J]. *Ecological Engineering: The Journal of Ecotechnology*, 2001, 18(1):15-22.
- [55] Wood D, Cowherd S, Van Heyst B. A summary of ammonia emission factors and quality criteria for commercial poultry production in North America[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 115:236-245.
- [56] Demmers T G M, Burgess L R, Short J L, et al. First experiences with methods to measure ammonia emissions from naturally ventilated cattle buildings in the U. K.[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(3): 285-293.
- [57] Samer M, Berg W, Fiedler M, et al. A comparative study among H_2O -balance, heat balance, CO_2 -balance and radioactive tracer gas technique for airflow rates measurement in naturally ventilated dairy barns [C]. Valencia, Spain: The Ninth International Livestock Environment, 2012.

- [58] Li H, Xin H, Liang Y, et al. Comparison of direct vs. indirect ventilation rate determinations in layer barns using manure belts[J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(1):367-372.
- [59] Mostafa E, Diekmann B, Buescher W, et al. Analysis of the dust emissions from a naturally ventilated turkey house using tracer gas method [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(6):1-15.
- [60] Losada J M, Groenestein K, Ogink N, et al. Evaluation of the CO₂ mass balance method to calculate ventilation rates from mechanically ventilated livestock buildings[C]. Mich: The IX International Livestock Environment, 2012.
- [61] Blanes V, Pedersen S. Ventilation flow in pig houses measured and calculated by carbon dioxide, moisture and heat balance equations[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 92(4):483-493.
- [62] Samer M, Ammon C, Loebstin C, et al. Moisture balance and tracer gas technique for ventilation rates measurement and greenhouse gases and ammonia emissions quantification in naturally ventilated buildings[J]. *Building and Environment*, 2012, 50(5):10-20.
- [63] Goldhawk C, Crowe T, Janzen E, et al. Trailer microclimate during commercial transportation of feeder cattle and relationship to indicators of cattle welfare[J]. *Journal of Animal Science*, 2014, 92(11):5155-5165.
- [64] Hernandez F, Megias M D, Orengo J, et al. Effect of dietary protein level on retention of nutrients, growth performance, litter composition and NH₃ emission using a multi-phase feeding programme in broilers [J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2013, 11(3):736-746.
- [65] 刘 杨, 董红敏, 陶秀萍, 等. 大气环境对育肥猪舍内颗粒物浓度的影响[J]. *中国农业气象*, 2016, 37(2):143-148.
- LIU Yang, DONG Hong-min, TAO Xiu-ping, et al. Effects of atmospheric environment on the particulate matters in the fattening pig barns[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(2):143-148.
- [66] 杨军泽. 浅谈环境空气监测现场采样的流程及其质量控制[J]. *建筑工程技术与设计*, 2016(2):864-865.
- YANG Jun-ze. Discussion on the process and quality control of environmental air monitoring field sampling[J]. *Architectural Engineering Technology and Design*, 2016(2):864-865.
- [67] Albert J H, Lim T T, Ni J Q, et al. Quality assured measurements of animal building emissions: Gas concentrations[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, 56(12):1642-1648.
- [68] Lefcourt A M. Some potential problems for measuring ammonia emissions from farm structures[J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(5):1585-1591.