DOI:10.13758/j.cnki.tr.2006.06.009

田间土壤氨挥发的原位测定——风洞法①

黄彬香[1]，苏 芳[1*]，丁新泉[1]，胡小康[1]，高志岭[1]，陈新平[1]，张福锁[1]，Kogge Martin[2]，Römheld Volker[2]

(1 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094； 2 Hohenheim 大学植物营养研究所, 德国斯图加特 70593)

摘 要： 详细介绍了农田土壤氨挥发风洞法测定系统的原理、构造和特点，并通过回收率试验和田间试验进行了验证。所选用的德国风洞主要包括采样箱、采样系统和控制系统 3 部分，系统内部的气压、温度、湿度、风速等微气象条件接近自然环境条件，测量结果有较好的代表性。回收实验结果表明，回收率为 90%，说明风洞的密闭性和浓度分布的均匀程度较好，适合于土壤氨挥发的多处理、多重复的田间原位测定，尤其适用于多因子对比实验。风洞法测定不受天气的影响，对实验区面积要求不高，重复性及可靠性较好，不仅可以测定农田土壤的氨挥发，还可以测定有机肥贮存和施用以及各种肥料形态的氨挥发状况。

关键词： 氨挥发；风洞法；田间原位测定

中图分类号： S143.1；S151.9

增加 N 肥投入是发展农业生产的主要途径之一，但是 N 肥施入土壤后，大部分 N 肥通过各种途径损失于环境之中，其中氨挥发是 N 肥气态损失的重要途径[1-2]。据估算，全球每年施用的化学肥料和有机肥分别为 N 7800 万 t 和 N 3300 万 t 左右，氨挥发损失分别占其施用量的 14% 和 23% 左右[3]。在发展中国家，由于较多的使用尿素、硫酸铵和碳酸氢铵，化学 N 肥施用后的氨挥发大概为施用量的 18% 左右，有机肥施用后的氨挥发大概为施用量的 26% 左右[3]。我国 N 肥用量约占全球 N 肥用量的 1/3，但 N 肥利用率仅为 30% 左右[4]。过量的氨沉降能够造成森林或水生生态系统的酸化、富营养化及降低物种多样性等一系列环境问题[5]。

为了正确评价氨挥发的影响，定量分析农田土壤氨挥发通量成为必然，因此不同的测定方法得到相应的发展。但是影响氨挥发的因素众多，田间氨挥发受测量地点、测量方法、微气象条件（温度、湿度、光照和风速等）、土壤特性（土壤质地、pH 值、$CaCO_3$、铵盐总量、CEC 和有机质等）和农业管理措施（肥料类型、施肥量、施肥方式、施肥时间和种植模式等）等因素的影响[4,6]，这就增加了氨挥发测量的不确定性及复杂性，采用不同的测定方法对氨挥发测定结果会有很大的影响[4]。限于技术和资金条件，国内氨挥发研究主要使用静态闭路箱法、半开放法、间歇通气法及质量平衡法，而相关文献中对其他一些新发展的方法尚鲜有详细的介绍。本文详细介绍 Kogge 等人在对 Braschkat 设计的风洞[7]基础上进行改进设计的一种能够完全实现自动采样的风洞系统（简称德国风洞测定系统），并通过回收率试验和田间试验进行验证。

1 农田土壤氨挥发风洞法测定系统

Bouwmeester等[8]在研究稻田土壤氨挥发损失时首次提出，采用实际田间风速的平均值作为流过风洞的风速能够较准确地估计氨挥发。风洞法占用实验地面积较小，可以调节风洞内风速与外界保持一致，风洞内外温湿度、光照等因子也比较一致，这大大改善了实验区的微气象条件。Lockyer及 Braschkat 等人[7,9-10] 的风洞研究结果表明风洞内外最大温差在 1℃左右，相对湿度基本一致，而且风速一致性较好；Loubet 等人[11] 对 Lockyer 设计的风洞研究发现风洞内 1.5 m 以后基本不受外界风的影响，边界层高度稳定在 10 cm 左右，边界层下面的气体特征基本类似于外界条件。可见，风洞法在很大程度上保证了室内与室外气体特性的相似性。此外风洞内气体浓度分布的均匀程度，直接影响采

①基金项目: 国家自然科学基金重大项目（30390084）和国家自然科学基金面上项目（40405024）资助。

* 通讯作者 （sufang@cau.edu.cn)

作者简介：黄彬香（1978—），男，福建长汀人，硕士研究生，主要从事微气象、痕量气体地气交换方面的教学与研究工作。E-mail: bxhuang@cau.edu.cn

样的准确性，是一个关键因素（通常用回收率来表示）。常见的几类风洞的回收率分别为：Lockyer 设计的风洞回收率 77%～87%[12-13]；Moal 等人设计的风洞的回收率为 70%～80%[12-13]；Braschkat 等人设计的风洞回收率为 97% ～ 103%[14]。从回收率结果可以看出这 3 类风洞的气体浓度分布都比较均匀，尤其是 Braschkat 等人设计的风洞。而且风洞法所测得土壤氨挥发结果与 IHF 法及其他质量平衡法非常一致[9-10,14-15]。风洞法箱内微气象条件、土壤条件与生物状况基本类似于外界条件，测量结果较有代表性，比较适合于小尺度范围的多处理、多重复测量，尤其适用于多因子对比实验，在欧洲得到了广泛的应用[12,15-19]。但由于风洞法测定系统设备昂贵，因此目前国内应用该方法的研究非常少。

较其他箱法而言，风洞法具有较好的代表性，测定结果较接近真值，但是风洞法也有其不足之处。比如，风洞法不能模拟静风条件和降水条件，当风速低于 0.3 m/s 时，误差较大；风洞内晚上易出现水分凝结而吸收氨导致误差[14]；虽然风洞内外风速能够保持高度一致，但是由于风洞边界的影响，会高估氨挥发速率[11]；风洞的大小对测定结果也有一定的影响，小风洞由于风速梯度较大，因此测量结果比大风洞大[17]；风速分布不均匀及浓度分布不均匀也会带来一定的误差[13]；此外风洞法设备较为昂贵。

2　德国风洞测定系统

2.1　系统结构

该系统是由 Kogge 等人在对 Braschkat 设计的风洞基础上进行改进设计的一种能够完全实现自动采样的风洞系统（简称德国风洞测定系统），主要包括采样箱、采样系统和控制系统 3 部分，如图 1 所示。

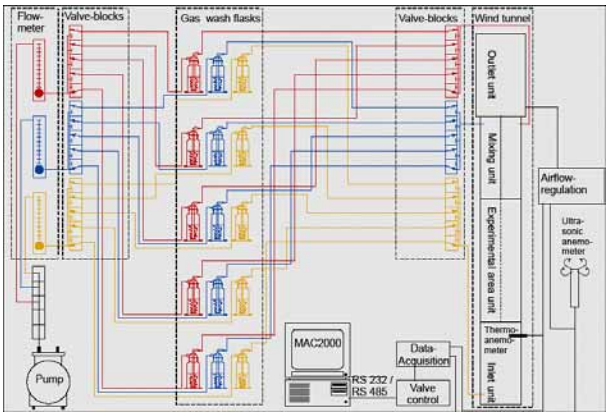


图 1　德国风洞测定系统结构

Fig. 1　Scheme of German wind-tunnel system

2.1.1　采样箱的结构

采样箱是风洞系统的主体结构即田间测定装置，也是我们通常所说的风洞，其覆盖面积 4.5 m × 0.7 m，高 0.7 m。田间测定装置一共 3 套，即可以设 3 个重复，每套装置又分为 4 部分（图 2）。

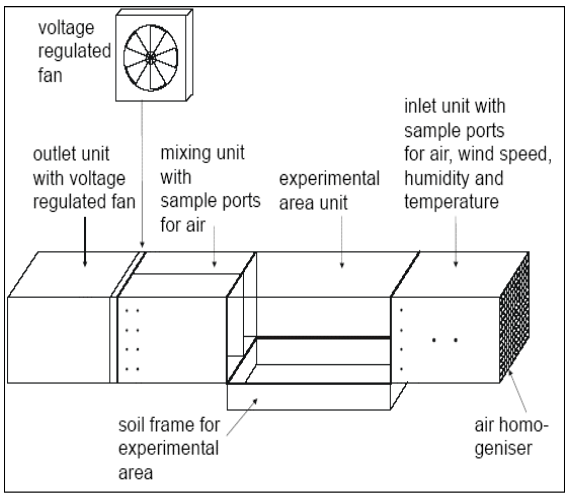


图 2　德国风洞测定系统采样箱结构

Fig. 2　Measurement chamber of German wind tunnel system

第 1 部分是进气口。入口处叠放直径为 3 cm、长 20 cm 的 PVC 管（蜂窝型的扯直器），可将进入风洞的气流中的大涡旋分割为小涡旋，降低了实验区气流的紊流度；同时将气流引直，可以大大改善气流的扭转现象，使进入实验区的气流流动方向与风洞的轴线方向保持平行，保证了风洞的进气口处气流平稳，分布均匀，紊流度小。这种设计类似于 Braschkat 设计的风洞[7,14]。进气口还装有热球式风速仪，用来测定风洞内流速。在进气箱的两侧各有 2 个采样孔，4 个采样孔用三通汇合到一条直径为 2 mm 的 Teflon 管，通向室内进行收集。进气口收集的气体样品为环境背景值。

第 2 部分是实验区。其覆盖面积为 1.5 m × 0.7 m，实验区由透明有机玻璃制成，并带有可开启的盖子，中间可加一块有机玻璃分隔成两个小实验区。底部为土壤区，防止实验区的漏气和灌水时水的侧漏。实验区长度为 1.5 m，充分保证了稳定边界层的形成及在一定程度上避免了外界气流的影响。

第 3 部分是混合区。覆盖面积 1.0 m × 0.7 m，流经实验区的气流经过该箱后会被充分混匀后收集，在该箱的靠近出气口两侧各有 4 个采样孔，分别在不同高度，使采气更具代表性，在一定程度上

减小由于浓度分布不均匀造成的误差。每侧的 4 个采样孔对应各自的实验区，分别通过三通汇合到一条直径为 2 mm 的 Teflon 管，通向室内进行收集，得到出气口的 2 个样品。

第 4 部分是出气口。出气口装有轴流可调速风扇，用于调节风洞内的风速，使之工作在固定风速或与外界风速相一致。

2.1.2 采样系统 气体样品收集装置按气体流程大致可分为 3 部分，第 1 部分是气体流向控制阀，第 2 部分就是收集氨的装有稀硫酸（0.025 mol/L）的收集瓶，第 3 部分就是为收集气体提供动力的采样泵。其工作原理是在采样泵的作用下，流经采样箱的气体样品经 Teflon 管道并在气体流向控制阀的作用下被特定的气体收集瓶所吸收，以供以后的样品测定，然后经过流量计，流量计可调节流量大小，最后通过气泵排出。从进气口和出气口所收集的气体样品被收集瓶中 0.025 mol/L H_2SO_4 溶液吸收，收集的硫酸溶液通过比色方法测定。最后用出气口与进气口的差值作为某一时间段、单位土壤面积的氨挥发量。

2.1.3 控制系统 控制系统是整个农田土壤氨挥发通量自动测定系统的中枢系统，安装在室内。它主要包括两部分：①通过超声风速仪获取风洞外自然环境风速，并与风洞内部的风速进行比较，且根据比较的结果向可调速风扇控制系统发送控制信号，保证风洞内风速与外界一致。也可设为恒定风速。②获取气温、相对湿度、地温等微气象资料，用以解释氨挥发的气象影响因子。另外，它还通过采样控制系统，控制样品自动采样的时间间隔或者人工进行采样。

2.2 系统特点

2.2.1 自动采集 该型风洞采用独特的采样设计及控制设计，能够连续自动采集土壤氨排放，而且风洞可以工作在稳定的固定风速及与外界风速保持一致的两种模式下。

2.2.2 微气象条件 该型风洞内的微气象条件与外界基本一致，风速调节装置能够充分保证风洞内的风速与外界一致（图 3）。

2.2.3 回收率 风洞的回收率是衡量风洞密闭性和浓度分布均匀程度的重要指标，直接关系到风洞应用的可行性。对该型风洞通常采用的回收率检测方法是在风洞的实验区将足量的氢氧化钠溶液缓

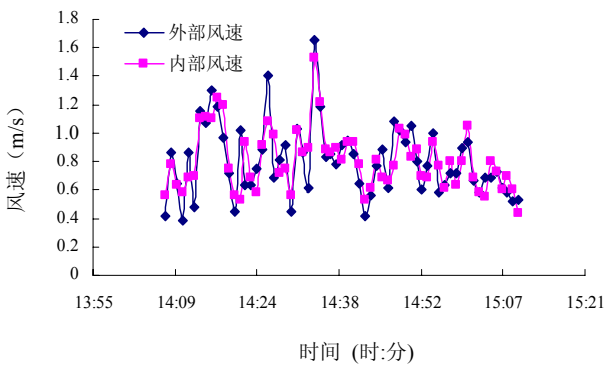


图 3 风洞内外风速比较

Fig. 3 Comparison of wind speeds inside and outside of German wind tunnel

缓加入盛有碳酸氢铵溶液的培养皿中，使气态氨缓慢释放，释放出的氨通过风洞吸收，并用比色方法测定回收的氨，计算碳酸氢铵田间释放的回收率。碳酸氢铵按 N 100 kg/hm^2 计算，氢氧化钠足量。氨挥发回收试验共进行了 5 天，其中 5 天内氨挥发损失占施肥总量的 90% 左右（图 4），可见该型风洞的密闭性和浓度分布的均匀程度较好。

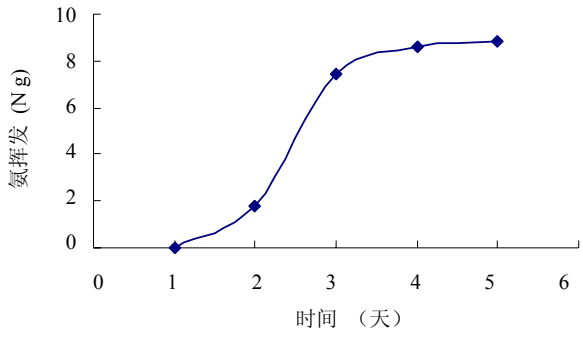


图 4 风洞回收率

Fig. 4 NH_3 emission from recovery experiment

3 结论与讨论

土壤氨挥发通量测定方法较多，而且各有特点，通常使用的比较理想的方法有微气象法中的 IHF 法、风洞法和平衡浓度法。针对不同的研究目的，应该选择相应的测定方法，而合适的测定方法选择需要综合考虑各方面的因子。Misselbrook 等人[15]对 IHF 法、风洞法和平衡浓度法 3 种方法适应的研究范围、成本、技术及测量结果的可靠性等因子进行了比较分析，并给出了参考（表 1）。

表 1　常见土壤氨挥发测定方法比较

Table 1　Comparison of various field techniques used commonly for measuring ammonia emission

	IHF 法	风洞法	平衡浓度法
研究方面	绝对测量	比较测量	比较测量
重复性	*	***	***
下垫面面积要求	***	*	*
花费	*	***	*
人力	*	**	***
分析成本	*	**	***
应用难易程度	*	**	**
结果变异	**	**	**
技术可靠性	***	**	*

注：*代表低，**代表中, ***代表高。

可见，当进行中尺度的土壤氨挥发绝对量测量时，IHF 法是优先的选择，尤其是与被动通量采样器结合使用时；而平衡浓度法由于操作的可靠性较差，需要在今后做进一步的改善；标准参比法在小尺度应用时具有其开放的独特性，但是需要进一步的实验验证。在小田块范围的土壤氨挥发测定方面，尤其是在进行多因子比较分析时，风洞法具有独特的优势，是使用最为广泛的方法[14-15]。风洞的密闭性和浓度分布的均匀程度较好，适合于土壤氨挥发的多处理、多重复的田间原位测定，尤其适用于多因子对比实验。风洞法测定不受天气的影响，对实验区面积要求不高，重复性及可靠性较好，不仅可以测定农田土壤的氨挥发，还可以测定有机肥贮存和施用以及各种肥料形态的氨挥发状况。

参考文献：

[1] Buijsman E. Ammonia emission calculation: Fiction and reality // Asman WAH, Diederen HSMA. Ammonia and Acidification: Proceedings of a Symposium of the European Association for the Science of Air Pollution (EURASAP). Bilthoven, The Netherlands: European Association for the Science of Air Pollution, 1987: 13−27

[2] Zhu ZL, Cai GX, Simpson JR. Processes of nitrogen loss from fertilizers applied to flooded rice fields on a calcareous soil in north-central China. Fertilizer Research, 1989, 18: 101−115

[3] Bouwman AF, Boumans LJM, Batjes NH. Estimation of global ammonia volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16: 215−224

[4] 蔡贵信. 氨挥发 // 朱兆良, 文启孝主编. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科技出版社, 1992: 171−185

[5] Ferm M. Atmospheric ammonia and ammonium transport in Europe and critical loads−A review. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 51: 5−17

[6] Sommer SG, Olesen JE, Christensen BT. Effects of temperature, wind speed and air humidity on ammonia volatilization from surface applied cattle slurry. Journal of Agricultural Science, 1991, 117: 91−100

[7] Braschkat J, Mannheim T, Horlacher D, Marschner H. Measurement of ammonia emissions after liquid manure application: I. Construction of a wind-tunnel system for measurements under field conditions. Z.Pflanz Bodenkunde,1993, 156:393−396

[8] Bouwmeester RJ, Velk PLG. Wind-tunnel simulation and assessment of ammonia volatilization from ponded water. Agronomy Journal, 1981, 73: 546−552

[9] Lockyer DR. A system for the measurement in the field of losses of ammonia through volatilization. J. Sci. Food Agric., 1984, 35: 837−848

[10] Ryden JC, Lockyer DR. Evaluation of a system of wind-tunnels for field studies of ammonia loss from grassland through volatilization. J. Sci. Food Agric., 1985, 36: 781−788

[11] Loubet B, Cellier P, Flura D, Genermont S. An evaluation of the wind-tunnel technique for estimating ammonia volatilization from land: Part 2. Influence of the tunnel on transfer processes. J. Agric. Engng Res., 1999, 72: 83−92

[12] Weerden TJ, Moal JF, Martinez J, Pain BF, Guiziou F. Evaluation of the wind-tunnel method for measurement of ammonia volatilization from land. J. Agric. Engng Res., 1996, 64: 11−14

[13] Loubet B, Cellier P, Flura D, Génermont, S. An evaluation of the wind-tunnel technique for estimating ammonia volatilization from land: Part 1. Analysis and improvement of accuracy. J. Agric. Engng Res., 1999, 72:71−81

[14] Manheim T, Braschkat J, Marschner H. Measurement of ammonia emission after liquid manure application: Ⅱ. Comparison of the wind tunnel and the IHF method under

field conditions. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 1995, 158: 215−219

[15] Misselbrook TH, Nicholson FA, Chambers BJ, Johnson RA. Measuring ammonia emissions from land applied manure: An intercomparison of commonly used samplers and techniques. Environmental Pollution, 2005, 135: 389−397

[16] Sommer SG, Olesen JE, Christensen BT. Effects of temperature, wind speed and air humidity on ammonia volatilization from surface applied cattle slurry. J. Agric. Sci., 1991, 117: 91−100

[17] Smith RJ, Watts PJ. Determination of odour emission rates from cattle feedlots: Part 2. Evaluation of two wind-tunnels of different size. J. Agric. Engng Res., 1994, 58: 231−240

[18] Weerden TJ, Jarvis SC. Ammonia emission factors for N fertilizers applied to two contrasting grassland soils. Environmental Pollution, 1997, 95: 205−211

[19] Misselbrook TH, Laws JA, Pain BF. Surface application and shallow injection of cattle slurry on grassland: Nitrogen losses, herbage yields and nitrogen recoveries. Grass and Forage Science, 1996, 51: 270−277

[20] 苏芳, 黄彬香. 农田土壤氨挥发通量测定方法进展. 科学研究月刊, 2006 17: 129−134

German Wind-Tunnel System for Measuring Ammonia Volatilization from Agricultural Soil

HUANG Bin-xiang[1], SU Fang[1], DING Xin-quan[1], HU Xiao-kang[1], GAO Zhi-ling[1], CHEN Xin-ping[1] ZHANG Fu-suo[1], KOGGE Martin[2], RÖMHELD Volker[2]

(1 *College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing* 100094, *China*; 2 *Institute of Plant Nutrition, Hohenheim University, Stuttgart* 70593, *Germany*)

Abstract: Principle, structure and characteristic of German wind-tunnel system consisting of measurement chambers, sampling unit and control unit to measure ammonia volatilization from agricultural soil were introduced in detail in this paper, and a recycling experiment was also conducted to validate it. Result showed that air pressure, temperature, humidity, wind speed inside chambers were similar to outside environment, and average ammonia recovery was over 90%, which suggested it had a qualified hermitic and homogeneous concentration-distribution environment and suitable for measuring ammonia volatilization measurements under conditions of multitreatments and repetitions in original fields, particularly for multi-factors comparison experiments. With no or less influence from weather condition, low requirement to experimental plot area, good repetition and high reliability, German wind-tunnel system can measure ammonia volatilization not only from agricultural soils, but also from storage and application of organic fertilizers as well as from various fertilizer forms.

Key words: Ammonia volatilization, Wind-tunnel, In situ measurement technique