

利用 Bowen 比仪测定大面积农田土壤氨挥发的方法研究

李贵桐 李保国

(中国农业大学资源与环境学院)

陈德立

(澳大利亚墨尔本大学土地和食品学院)

摘要 本文介绍Bowen比仪测定大面积农田土壤氨挥发的基本原理、仪器安装的细节和方法的可靠程度,以及利用该方法进行的5次田间试验的测定结果。对仪器记录数据的分析表明,该方法的系统误差在10%以下,可以用于农田尺度下土壤氨挥发过程的测定。另外,在我国北方地区典型生产条件下,冬小麦/夏玉米体系每次施N后,土壤的氨挥发损失(N)在 $18.9 \sim 63.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,占施入肥料N的 $9.9\% \sim 37.0\%$ 。

关键词 氨挥发; Bowen比仪

中图分类号 S152

Method for Measurement of Ammonia Volatilization from Large Area Field by Bowen Ratio System

Li Guitong Li Baoguo

(College of Natural Resources and Environment Sciences, CAU)

Chen Deli

(Institute of Land and Food Resources, University of Melbourne, Australia)

Abstract In this paper, the principle of using Bowen ratio system to measure ammonia volatilization from large area field, the details of installation of Bowen ratio system, and the credibility degree of the method were discussed. The 5 measurements showed that the systematic error of this method is less than 10%. This indicated that the Bowen ratio system can be used for measuring ammonia volatilization under field scale. Using this method, we found that the ammonia volatilization (N), under the typical productive conditions in North China Plain, ranged from 18.9 to 63.5 kg N per hectare, 9.9% ~ 37.0% of applied N.

Key words ammonia volatilization; Bowen ratio system

在近地面大气中氨(NH₃)是主要的碱性气体,是中和气生酸(H₂SO₄, HNO₃, HCl等)的主要物质,其在大气中的化学转化和沉降对于N的循环和N在生物圈内的再分配具有重要意义。大气中的NH₃主要来源于生物量燃烧(biomass burning)和自然生态系统(草原和森林)及集约经营的农业生产系统的排放。在农业生产系统中,家畜排泄物和施氮肥农田土壤的NH₃挥发占N损失的绝大部分。

目前,测定农田土壤氨挥发的方法主要有2类:1类是箱采气法^[1, 2],可细分为密闭室法和开放室法;第2类是微气象学法^[3, 4],又可分为涡流相关法、梯度扩散法和质量平衡法3种。2类方法各具优缺点(表1),而微气象学法正逐渐成为发展方向,特别是涡流相关法。鉴于涡流

收稿日期: 2001-04-05

中澳合作项目 ACIAR, LWR1/96/164

李贵桐,北京圆明园西路2号中国农业大学(西校区),100094



相关法和梯度扩散法需要的仪器昂贵,过去国内采用微气象学法时,多采用简化的质量平衡法^[5, 6],而利用Bowen 比仪测定氨挥发属于梯度扩散法中的能量平衡法,该方法除了具有上述微气象学法的优点外,还具有不需要稳定性校正和同时测定蒸散以便于解释氨挥发方式等 2 个优点^[3]。从原理上看,梯度扩散法是从挥发过程的角度,通过对各气象因素的测定来计算氨挥发的,而质量平衡法是从挥发结果的角度来测定氨挥发的。

本文主要报道利用Bowen 比仪测定大面积农田土壤氨挥发的基本原理、仪器安装的注意事项及测定误差的分析,有关利用该方法测定农田土壤氨挥发过程的具体结果另行报道。

表 1 田间原位测定氨挥发方法的比较

方法名称	优点	缺点
密闭室法	器材简单,易操作,移动性好;在田间可多点同时测量,可进行空间分布测量;灵敏度较高。	室内气压、温度、湿度、风速与真实环境相差较大;作物影响操作;个点测量变异性极大;劳动量大。
开放室法	室内、外环境条件相差较小。	灵敏度较低;室内微环境人为影响很大,强行排风降低气压,增加挥发。
微气象学法	不扰动,整体地大面积测量田间真实条件下的排放。	浓度梯度小,要求仪器灵敏度高;需要大范围均一且空气扰动很小的空间;气象条件要求较高;仪器昂贵。

1 Bowen 比仪测定氨挥发的基本原理

利用Bowen 比仪测定土壤、植物与大气间的 NH_3 交换,是基于气体运动的梯度扩散原理进行的。该方法首先假设,在一个风速和 NH_3 浓度都均一的大面积农田上空,存在一个 NH_3 剖面,在该剖面上, NH_3 的浓度梯度不随时间变化。此时,垂直通量密度 F 就可以用该方向上 NH_3 的浓度(C)梯度表示如下:

$$F = - K_{\text{NH}_3} \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (1)$$

这里, K_{NH_3} 指 NH_3 气体的湍流扩散系数, Z 指距挥发源的垂直高度,负号(-)表示气体扩散方向与气体浓度梯度方向相反(下同)。在通常情况下,近地面大气层中所有气体和显热(H)在垂直运动过程中的 K 值均可认为是相同的^[3]。因此,对于 H 而言:

$$H = - C_p \rho K \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (2)$$

式中: H 是垂直方向显热传递通量, C_p 是空气比热容量, ρ 是空气密度, T 是空气温度(,下同)。由于显热(H)和 NH_3 气体运动的 K 的数值相同,将(2)式中 K 解出并代入(1)式,整理得到:

$$F = - \frac{H}{C_p \rho} \frac{\partial C}{\partial T} \quad (3)$$

Bowen 比(β)是显热传递与潜热传递(L)之比:

$$\beta = \frac{H}{L} = \frac{C_p}{E} \frac{\rho(T_1 - T_2)}{\epsilon(e_1 - e_2)} \quad (4)$$

这里,如果取一般情况, $C_p = 1 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,空气与水分子量之比 $\epsilon = 0.622$, 15 水的汽化热 $E = 2.46 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,大气压 $P = 1.013 \text{ hPa}$, 则:

$$\beta = \frac{H}{L} = 0.66 \times \frac{T_1 - T_2}{e_1 - e_2} \quad (5)$$

剖面上 2 个高度处的气温差 ($T_1 - T_2$) 和水汽压差 ($e_1 - e_2$) 通过 Bowen 比仪可以精确测定,故 β 可知。同时,应用农田能量平衡方程:

$$R_n + H + L + G + S = 0 \quad (6)$$

得到农田潜热计算式:

$$L = R_n - G - H - S \quad (7)$$

(6)、(7) 式中, R_n 是太阳净辐射, G 是由土壤表面向下层传导的热通量, S 是土壤热储量。联合 (5) 式左半部分和 (7) 式,可以得到 H 的计算方法:

$$H = \frac{\beta(R_n - G - S)}{(1 + \beta)} \quad (8)$$

Bowen 比仪上的净辐射仪、土壤热通量板和土壤水分探头可对地表净辐射 (R_n) 和地表储能变化 (G) 进行测量,土壤热储量 (S) 可以由计算得到。综合方程 (3)、(8),并用两高度处 NH_3 浓度的差值、空气温度差代替相应的梯度值,简化方程得到:

$$F = \frac{\beta(R_n - G - S)(C_1 - C_2)}{(1 + \beta)\rho C_p(T_1 - T_2)} \quad (9)$$

这里, C_1 是第一高度处的 NH_3 浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), C_2 是第二高度处的 NH_3 浓度, ρ 是空气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), C_p 是含水空气的比热 ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), T_1 是第一高度处空气温度 ($^\circ\text{C}$), T_2 是第二高度处空气温度 ($^\circ\text{C}$)。由 (9) 式,任意时刻的 NH_3 挥发通量即可计算得到。

因此,利用 Bowen 比仪测定 NH_3 的挥发,就是根据气体的浓度梯度扩散原理,利用显热传递和气体扩散的扩散系数 K 相同这一原理,将气体扩散与能量传递联系在一起,通过 Bowen 比仪所测量的气象参数将 K 具体化,从而计算出 NH_3 的挥发通量。

2 Bowen 比仪的田间安装和测量

试验所用 Bowen 比仪是美国 Campbell 公司生产的 CSI 系列产品。该仪器的组件分为 3 类,一是探头组件,包括水汽压探头和空气温度探头各 2 个、土壤水分探头 1 个、太阳净辐射探头 1 个、土壤温度和土壤热通量板探头各 2 个、风速和风向探头各 1 个,这些探头使 Bowen 比仪可同时测定田间情况下近地面空气层 2 个高度处的水汽压和空气温度、土壤水分含量、太阳净辐射、土壤热通量、风速、风向等指标,检测频率可达每秒 1 次或数秒 1 次。二是电源组件,随机配有 M SX 20R 型太阳能电池板,可产生 12 V 直流电,向探头和数据采集器连续供电。另外,自备的 12 V 蓄电池,用于夜间供电和储存太阳能电池板产生的电能。三是数据自动采集系统, Campbell 公司的 CR 23X 型微数据采集器,采集频率可达到每秒 1 次,氨挥发测定中设定 20 min 记录 1 次即可,即 20 min 内的平均值。该采集器还同时用于对整个系统的初始设置和实时监测与控制,并设有与微机相连的数据传输接口,用于数据的传输。系统同时配有 PC 208W 数据处理软件,用于接受数据采集器所储存的数据和对测量结果的实时分析和绘图描述。

用于 NH_3 浓度测定的仪器有: 真空泵(可用功率较大的吸尘器或鱼缸用加氧泵代替)及 220 V 电源, 气体流速计, 气体流量计, 自制氨吸收管等。

安装Bowen 比仪的注意事项: Bowen 比仪安装时, 除了按仪器说明书上所述的操作步骤操作外, 还应注意以下细节: 1) 上、下臂间距至少为 1.0 m, 以保证 2 高度处空气温差和湿度差的测定。同时, 下臂与作物冠层之间的距离也应大于 0.5 m, 以避免作物的影响。2) 水分探头埋于土壤表面以下 2.5 cm 处, 以监测表层土壤含水量的变化。3) 2 组土壤温度探头埋设的水平间距至少为 1.0 m, 每组中的 2 个探头分上、下 2 层埋设, 上面一支距地表 2 cm, 下面一支距地表 6 cm。4) 2 个土壤热通量板埋设的水平间距至少为 1.0 m, 2 个热通量板距土壤表面的距离为 8 cm。5) 太阳净辐射仪水平安装在作物冠层上方 0.5 m 处, 注意每天早晨及时除去接受罩上的露水, 以免影响太阳净辐射的测定^[3]。

空气氨浓度的测定: 1) 上、下氨采集器的高度应与Bowen 比仪测定空气温度和湿度的上、下臂高度一致, 用硬质胶皮管与真空泵连接。2) 每天早晨第 1 次测定时, 须将氨采集器上凝结的露水擦拭干净^[3]。3) 空气流速设为 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 左右, 每 2 h 更换一次氨吸收管。4) 氨吸收管的做法如下: 两端开口的玻璃管内间隔放置玻璃棉和小玻璃珠, 以承载 10 mL 1% 磷酸吸收液^[5]。5) 氨吸收管中的磷酸吸收液用蒸馏水洗出, 定容至 100 mL, 取出一部分, 当天用氨气敏电极测定氨浓度, 根据上、下浓度差决定停测的时间。然后在实验室用靛酚蓝比色法集中测定氨浓度, 换算为空气中的含量($\text{N}, \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。

3 试验布置

试验布置在中国农业大学河北曲周实验站冬小麦/夏玉米试验田。试验地面积 1.0 hm^2 , 南北长 80 m, 东西长 130 m。Bowen 比仪架设在试验田的几何中心处, 氨吸收装置也架设在该处附近。冬小麦季节测定时, 依Bowen 比仪风向指示, 随时移动氨吸收装置, 以保证风掠过距离(fetch)尽量大。

试验地每年 9 月底收获夏玉米, 玉米秸秆粉碎后翻埋进土壤表层(0~20 cm), 10 月 5—10 日施底肥(碳铵 $1250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 过磷酸钙 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 肥料同样翻埋在土壤表层, 随后播种冬小麦。12 月初灌冻水。次年春季, 根据苗情, 在 3—4 月初随灌溉撒施碳铵或尿素。小麦生育期内依据张力计读数进行必要的灌溉。6 月 10 日左右收获冬小麦, 秸秆粉碎覆盖, 不耕翻, 6 月 15 日左右直接播种夏玉米。7 月中下旬随灌溉撒施碳铵或尿素, 或随降雨撒施。生育期内根据土壤含水量情况随时灌溉。9 月 25 日左右, 灌水一次(如降大雨, 则不灌水), 为随后的冬小麦播种准备。所有灌溉均是大水漫灌, 每次约 $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 每次施肥后进行氨挥发的测定, 自 1999 年 7 月—2000 年 10 月, 共进行了 5 次测定。

测定步骤: 1) 每次施肥前 1~2 d 安装Bowen 比仪和氨吸收装置, 调试好仪器, 开始记录气象数据; 2) 测定时, 每天早晨 6:00 开始进行氨气浓度的测定, 每 2 h 更换一次吸收管, 晚 20:00 结束。其他月份测定时, 每天早晨 8:00 开始, 晚 18:00 结束; 3) 每天测定结束后, 清洗氨吸收管, 进行氨浓度的初步测定, 烘干吸收管; 4) 每天检查仪器运行情况, 每 4~5 d 下载一次气象数据, 直至测定结束; 5) 测定全部结束后, 集中测定氨浓度, 利用 PC208W 软件包处理数据, 进行氨挥发通量的计算。

4 试验结果

4.1 仪器灵敏度对测定结果的影响

从测定原理部分可知,仪器测定的2个不同高度处的空气温度差($T_1 - T_2$)和空气湿度差($e_1 - e_2$),是计算Bowen比(β)的关键,2个差值中的任何1个为零,就导致 $\beta = 0$ 或 β 无法计算,进而影响氨挥发通量的计算。因此,仪器对空气温度和湿度测定的灵敏度,直接关系到氨挥发的测定。本试验所用的空气温度探头,灵敏度可达0.003;水汽压探头的灵敏度可达0.01 kPa,这些技术指标足以测量出1 m间距范围的差异。5次试验的结果表明,不能计算 β 的数据点的比例为5%左右或更低,出现在氨挥发高峰时段(每日10:00~14:00)的可能性更小。因此,由于无数据点而影响氨挥发测定的可能性很小。

4.2 空气中氨气浓度2 h平均对计算氨挥发通量的影响

Bowen比仪每20 min记录1次气象学数据,该数据是分钟内的平均值,实际记录频率为每秒1次或数秒1次。但是,农田作物冠层上部空气中的氨气却是每2 h采集1次,因此造成每6次计算使用同样的氨气浓度差。这在理论上无疑会导致系统误差,但这种作法是否影响农田尺度上氨挥发的测定要求呢?我们认为,这种误差对氨挥发测定结果影响最大的方面,是这种取2 h平均值的作法对氨挥发通量方向的影响。在实际计算过程中,的确出现使用相同的浓度差值,氨挥发通量方向相反的情况,且出现的频率还较高。但是,这种现象多出现在早晨8:00~10:00和下午16:00~18:00,此时的氨挥发通量的绝对数量很小,在氨挥发高峰期占当天挥发总量的比例不超过8%。另外,在上述时段,氨气的运动方向也确实存在转换现象^[8]。因此,氨浓度采取2 h平均的作法对测定氨挥发量的影响,在田间尺度上是可以接受的。当然,如果在每日8:00~10:00和16:00~18:00以及12:00~14:00(日内挥发高峰时段)适当缩短氨吸收时间,可以进一步减小这种误差。

通常,空气中氨气的浓度(N)只有 $1 \sim 10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,这样低的浓度对氨采样器的要求很高^[9]。本方法中,氨采样器中的氨浓度,最低可达 $7.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,最高可达 $703.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,足可以检测田间一般情况下的氨浓度(表2)。从这里也可以看出,取2 h间隔的必要:间隔过小可能测不出氨,间隔过大则不利于正确计算。当然,在氨气浓度较大时(如施肥后1~3 d),缩短采样间隔,既可以保证测定出空气中的氨,又可以提高准确性。另外,本方法可以检测到的最小浓度差为 $2.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,最大浓度差为 $407.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,这样的精度可以满足田间条件下氨挥发通量计算的要求。

表2 氨采集器中氨的极值浓度

(N)/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

日期	上采集器			下采集器		
	高度/m	最大值	最小值	高度/m	最大值	最小值
1999-07	3.8	171.9	10.5	2.2	156.9	26.8
-10	1.2	298.6	7.8	0.3	471.4	11.8
2000-04	1.2	204.7	30.5	0.3	177.0	24.3
-07	2.5	682.4	14.8	1.4	703.7	29.4
-10	1.2	418.8	29.1	0.3	652.6	46.8

4.3 田间微气象参数对氮挥发的影响

Bowen 比仪所测定的田间微气象参数,都已经进入到氮挥发通量的计算过程(式 9)之中,这表明该方法中气象参数对氮挥发通量的影响已经达到量化水平。但从应用和直观的角度出发,找出微气象参数与氮挥发通量之间的定性关系,还是具有明显意义的。表 3 给出了氮挥发通量最大日主要微气象参数与氮挥发通量之间的偏相关关系。从表 3 中可以看出,田间条件下的氮挥发过程由于受到多种因素的影响,单一气象参数与氮挥发通量之间的偏相关关系多达不到 95% 显著水平,而且相关的方向都是不稳定的,某一时段某一气象参数和氮挥发通量之间所具有的相关关系,应视为某种特定场合的特例。例如,在 1999 年冬小麦播种时氮挥发通量最大日(1999-10-10),由于土壤含水量较低(表 4),所以土面增温幅度很大,由早晨 8:00 的 13.677 增加到中午 12:00 的 18.092,根据农田能量传递规律,土面增温越快,能量向下传递的数量越少,这对于翻埋进土壤表层 20 cm 范围内碳铵的挥发而言就很不利,故出现表层土壤温度和氮挥发通量间极显著的负相关关系。这与实验室内所进行的不同温度对氮挥发影响的研究是截然不同的,主要区别在于田间条件下存在能量的传递。但是,冬小麦底肥氮挥发最大日(2000-10-22)的情况又有所不同(表 4)。这一天太阳辐射很小,土壤温度一直处于不断下降之中,这不同于晴天时上午增温下午降温的情况;同时,上午的降雨(10 mm)也导致土壤含水量的变化情况不同往常,因而出现土壤温度和含水量与氮挥发通量间的显著正相关关系。

表 3 氮挥发通量最大日各气象参数与氮挥发通量的偏相关系数

日期	净辐射	土壤热通量	土壤温度	风速	土壤湿度	<i>f</i>
1999-07-29	0.529	-0.509	0.367	0.044	0.226	24
-10-10	-0.401	0.914**	-0.997**	0.388	0.532	25
2000-04-09	0.409	0.056	-0.031	0.202	-0.066	25
-07-21	-0.486	0.471	-0.505	0.475	-0.100	25
-10-22	-0.192	-0.061	0.621*	-0.537	0.568*	25

*表示 95% 水平显著; **表示 99% 水平显著。风速测定高度: 1999-07-29 为 3.8 m, 其他时间为 2.5 m。

表 4 氮挥发通量最大日主要气象参数的平均值

日期	气温 <i>t</i> /	土壤温度 <i>t</i> /	土壤含水量 /(kg·kg ⁻¹)	风速 /(m·s ⁻¹)	净辐射 /(W·m ⁻²)
1999-07-29	36.0	30.3	0.30	1.89	427.2
-10-10	19.0	17.8	0.10	1.90	136.2
2000-04-09	18.7	13.5	0.33	6.36	183.8
-07-21	34.8	29.9	0.26	3.78	411.0
-10-22	11.6	13.8	0.23	2.56	23.6

4.4 Bowen 比仪法测定的氮挥发量

对于大面积农田田间条件下氮挥发总量的测定,迄今无报道,相近的报道是用简化质量平衡法测定半径为 25 m 圆形面积内稻田的氮挥发^[4, 5]。本研究给出了实际生产条件下冬小麦/夏玉米体系大面积农田土壤的氮挥发情况(表 5),虽然无法将本结果与其他结果相对比,但所得结果与一般的结论是一致的:表施尿素或碳铵时氮挥发损失高于翻埋;表施尿素或碳铵结合

灌溉时氨挥发损失低于随降雨撒施。每次施肥后2周内氨挥发损失率为9.9%~37.0%。

3 结论

本研究中,利用Bowen比仪测定大面积农田土壤的氨挥发时,无论是Bowen比仪测定的气象参数,还是氨吸收2h的做法,所造成的系统误差均在10%以内,可以应用于田间尺下对氨挥发的测定。另外,自制的氨吸收装置对较低的氨气浓度也能够满足测试要求。田间情况下,氨挥发通量是多种因素综合影响的结果,单一微气象参数与氨挥发通量之间的相关关系,远没有室内研究那样明显。5次田间测定的结果表明,华北地区冬小麦/夏玉米体系下,每次施肥后2周内氨挥发损失率为9.9%~37.0%。

表5 用Bowen比仪测定氨挥发5次测定的结果

日期	NH ₃ 挥发量 (N)/(kg·hm ⁻²)	占施入N的比例 w/%
1999-07	42.9	24.5
-10	18.9	9.9
2000-04	35.1	24.0
-07	63.5	37.0
-10	25.2	12.5

参 考 文 献

- 1 Kissel D E, Brewer H L, Arkin G F. Design and test of a field sampler for ammonia volatilization. *Soil Sci Soc Am J*, 1977, 41: 1133~1138
- 2 朱兆良, 蔡贵信, 徐银华, 等. 水稻下氮肥的氨挥发及其在N素损失中重要性的研究. *土壤学报*, 1985, 22: 320~328
- 3 Denmead O T. Micrometeorological method for measuring gaseous losses of nitrogen in the field. In: Freney J R, Simpson J R, eds. *Gaseous Loss of Nitrogen from Plant-Soil Systems*. 1983: 133~156
- 4 Zhu Z L, Cai G X, Simpson J R, et al. Processes of nitrogen loss from fertilizers applied to flooded rice fields on a calcareous soil in north-central China. *Fert Res*, 1989, 18: 101~115
- 5 蔡贵信, 朱兆良, 朱宗武, 等. 水稻田中碳铵和尿素的N素损失的研究. *土壤*, 1985, 17: 225~229
- 6 Cai G X, Yang N C, Lu W F, et al. Gaseous loss of nitrogen from fertilizers applied to a paddy soil in Southeastern China. *Pedosphere*, 1992, (2): 345~354
- 7 Hutchinson G L, Mosier A R, Andre C E. Ammonia and amine emissions from a large cattle feedlot. *J Environ Qual*, 1982, 11: 288~293
- 8 Harper L A, Sharpe R R, Langdale G W, et al. Nitrogen cycling in a wheat crop: soil, plant, and aerial nitrogen transport. *Agron J*, 1987, 79: 965~973
- 9 Ayers G P, Gras J L. Ammonia gas concentration over the Southern Ocean. *Nature*, 1980, 284: 539, 540