

条件采样法测量大气垂直通量

于海青 丁国安 刘晶淼

(中国气象科学研究院地球环境和全球变化研究中心, 北京 100081)

摘要 长期以来,人们根据陆地生态系统排放(吸收)主要微量成分的基本特征和近地层大气中气体传输的机制,发展了各类测量方法以满足现场观测的需要。条件采样法是近十几年来基于涡动相关法理论上发展起来的一种微气象学方法,它在国外已经得到了较多的应用。文章着重于条件采样法的介绍,同时对其他几种垂直通量测量方法:涡度相关法、箱法、梯度法的科学性和实用性进行介绍,并对各种方法进行了比较。

关键词 垂直通量 观测方法 条件采样法

引言

由于大气中某些痕量成分对地气系统辐射过程的重要作用,其浓度变化的累积结果将会引起地球气候变化。同时,一些大气成分浓度的变化将引起其他大气成分浓度的变化,从而间接影响气候。因此,大气痕量成分的浓度变化对大气贡献的研究变得越来越重要。土壤排放是大气痕量成分的重要来源,研究它的排放通量以及近地层大气垂直通量已成为一项十分重要的研究内容。长期以来,人们根据陆地生态系统排放(吸收)主要痕量成分的基本特征和近地层大气中气体传输的机制,发展了各种通量测量方法。但是,由于陆地生态系统排放和吸收痕量成分的过程极为复杂,不同痕量成分排放和吸收之间相互影响,而且这些痕量气体的通量值很低,给观测带来很大难度。因此,测量大气痕量气体通量的方法非常关键。近十几年来,基于涡动相关理论上发展起来的条件采样法在国外已得到了较多的应用,但国内尚未开展。本文将着重介绍条件采样法,同时对其他通量观测方法:涡度相关法、箱法、梯度法的科学性和实用性进行介绍。

1 条件采样法

条件采样法(conditional sampling)是近十几年

才发展起来的一种微气象学方法,它是通过一个快速响应的垂直速度感应器测量垂直速度脉动,并控制一套阀门系统,通过阀门的开合将采样气体分别送入不同的储气袋,然后通过测量不同储气袋内的气体浓度而得到气体通量的方法。

条件采样法的基本原理是以与垂直风速成比例的速率将上升气流与下沉气流的气样分别采集在两个储气袋中,然后再分别测出两个储气袋中的气体浓度,并用下式计算出待测气体的通量 $F_g(\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$:

$$F_g = \beta \sigma_w (\overline{C^+} - \overline{C^-}) \quad (1)$$

式(1)中, $(\overline{C^+} - \overline{C^-})$ 是待测气体上升与下沉气体的平均浓度之差 $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$, σ_w 是垂直风速的标准差 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。上升气体与下沉气体是由垂直气流临界速度 $w_0(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 所决定的,其值被设定于 0 和 σ_w 之间,当垂直风速 $w > w_0$ 时为上升气体,其浓度为 $\overline{C^+}$,当垂直风速 $w < w_0$ 时为下沉气体,其浓度为 $\overline{C^-}$ 。 β 是因痕量气体而异的经验常数,经过大量的研究发现

$$\beta = \beta_0 \exp(-0.75 w_0 / \sigma_w) \quad (2)$$

式(2)中 $\beta_0 = \beta(w_0 = 0) \cong 0.60$ 。 β 值一般取 0.40 ~ 0.70 之间。当 β 值取 0.56 时,得到的通量值与用能量平衡法和用涡度相关法得到的值是相同的。在计算 N_2O 的通量值时, β 值一般取 0.60^[1]。

一般来说,条件采样法测量装置的工作流程可

用图 1 表示^[2]。

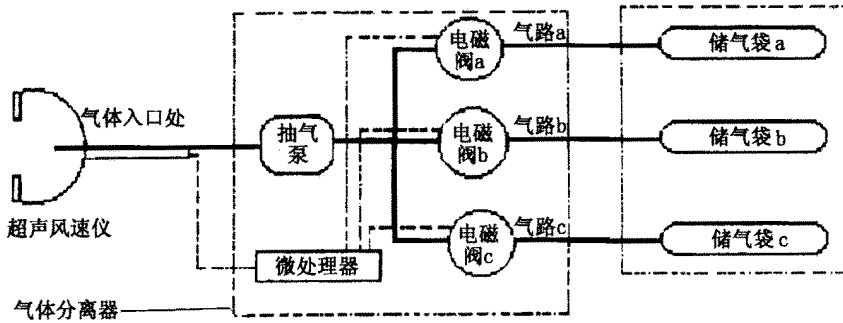


图 1 条件采样法工作流程示意

空气通过一个特氟纶(Teflon)抽气泵从一根直径为 3.2 mm、长度为 0.8 m 的特氟纶管子泵入。从抽气泵中流出的气体再经过相等的路径进入气体分离器中的三个特氟纶电磁阀。每一个阀门的出口再连接一根特氟纶管,每根管子的出口连接有一个储气袋。由超声风速仪采集的垂直风速(采样频率为 10 Hz)控制气体分离器中电磁阀的开关。当垂直风速 $w > w_0$ 时,上升气路(up)电磁阀打开,空气进入上升气路的储气袋。当垂直风速 $w < w_0$ 时,下沉气路(down)电磁阀打开,空气进入下沉气路的储气袋。利用以上两个袋子中的气体浓度差值,根据式(1)就可以计算出气体的垂直通量。

在条件采样法中,超声风速仪是必不可少的设备,它是利用超声波在不同状态的大气中传播速度的差异来测量风向风速的。其感应部分有三组探头,交替发射和接收超声波脉冲,信号经过仪器本身的数据系统处理后,能给出 u, v, w 的瞬时值。采样频率为 10 Hz。该仪器灵敏度高,并有频率响应范围宽和自动化性能好的优点。空气入口位置离超声风速仪要尽可能地近,但不能近到影响测量风速,一般来说取 10 cm。计算机根据超声风速仪的 w 值控制阀门的开合。而无论气样流入哪一路,它的流速都是一样的。如果流速不一致,比如上升气体的流速比下沉气体的流速慢,这样在测量气体样品的浓度时,就会发生无法解释的错误。因此这套系统的特有反馈装置可以使气样在管道中保持相同流速,这也是条件采样法的特点之一。

条件采样法的另一特点便是储气袋可灵活装取并且袋内气压与环境气压是相等的。另外条件采样法的实验设备都选取类似特氟纶、不锈钢等与痕量气体不发生化学反应的物质,这可以保证痕量气

体成分的浓度不受采样装置的影响^[3]。

条件采样法是近几年发展起来的一种方法,随着设计的完善和设备成本的降低,将有可能被广泛应用于痕量气体的通量观测中。

2 其他几种通量测量方法

2.1 涡度相关法

这种方法需要在某个特定高度上,测量垂直风速和气体密度脉动。根据连续方程,空间某一高度处气体的瞬时通量 F_g 可写为:

$$F_g = w\rho_g \quad (3)$$

式(3)中 w 为瞬时垂直风速分量($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), ρ_g 是测点气体密度($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),将 w 和 ρ_g 写成平均量和脉动量之和的形式:

$$F_g = \overline{w\rho_g} + \overline{w'\rho'_g} \quad (4)$$

可见,通过测量垂直风速和被测气体密度的脉动值便可计算出该气体的通量值。但是,在野外的实际测量中,平均垂直风速 \overline{w} 通常小于 $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,很难直接测定,式(4)的 $\overline{w\rho_g}$ 项只能根据热量和水汽通量估算。根据对平均垂直气流的研究,式(4)通常可写成:

$$F_g = \overline{w'\rho'_g} + \frac{\rho_g}{\rho_a} \left[-\frac{H}{\sigma} + \mu\sigma(1 + \mu\sigma) \right] E + \frac{\rho_g}{\rho_a} \frac{H}{c_p T} \quad (5)$$

式(5)中, ρ_g 和 ρ_a 分别为被测痕量气体的密度和空气的密度, E 是水汽通量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), H 是感热通量, μ 是干燥空气等效分子量与水汽分子量之比, σ 是水汽密度与干燥空气密度之比, c_p 是空气的定压比热, T 是空气的绝对温度(K)。式中 H, E, T, σ 以及垂直风速脉动量 w' 和被测气体密度的脉动

量 ρ_g' 等均为可测量值,如果测点是在常通量层内,这一垂直输送通量就是地表的排放通量^[4]。

2.2 箱法

2.2.1 静态箱法

这是一种比较简单的通量测量方法,其箱体是用化学性质稳定的材料制成,容积和底面积都有准确值。箱子底面开口,上面有盖,盖子可灵活开启和关闭。测量时,用箱子将被测地面罩起来,在保持箱内空气与外界没有任何交换的情况下,每隔一段时间对箱内待测气体的浓度测量一次,然后根据被测气体浓度随时间的变化,用下列关系式即可获得被罩表面气体的排放通量:

$$F_g = \rho_g \frac{V}{A} \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_t}{dt} \quad (6)$$

式(6)中 F_g 是被测气体的排放通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), V 是箱内空气体积 (m^3), A 为箱子的底面积 (m^2), C_t 是 t 时刻箱内被测气体的体积混合比浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), t 是时间 (s), ρ_g 是标准状态下被测气体密度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), T_0 和 p_0 分别为标准状态下的空气绝对温度 (K) 和气压 (Pa), p 为采样地点的气压, T 为采样时的绝对温度。

2.2.2 动态箱法

将静态箱相对的两侧开口,并设法制造流量适当的似稳气流平稳地通过被测表面上方。这样,通过测量入口和出口处空气中的气体浓度就可以确定被罩表面的气体排放通量。动态箱法中, F_g 值可由下式确定:

$$F_g = Q \rho_g \frac{C_1 - C_2}{A} \quad (7)$$

式(7)中, Q 为流经箱体气体流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), A 是箱的底面积 (m^2), C_1 和 C_2 分别是入口和出口处待测气体的质量混合比浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), ρ_g 是测点空气密度, F_g 是待测气体排放通量^[5]。

2.3 梯度法

梯度法是根据风速和痕量气体密度的垂直梯度与垂直输送通量的关系来测量痕量气体地表源的排放通量。需要测定至少两个高度的气体浓度变化才可求出垂直通量。它是建立在湍流参数基础之上,通过引入一个湍流扩散系数 k_g ,再类推至分子扩散:

$$F_g = - k_g \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \quad (8)$$

在式(8)中,精确地测量出待测气体的浓度梯度 $\frac{\partial \bar{C}}{\partial z}$ 是非常重要的。而湍流扩散系数 k_g 取决于风速、地面粗糙度、距离地面高度和大气稳定度。在中性大气条件下

$$k_g = k_h = k_v \quad (9)$$

式(9)中的 k_h 和 k_v 分别代表热量和水汽的湍流扩散系数,这样痕量气体的湍流扩散系数可由风廓线方程来确定:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left| \frac{z-d}{z_0} \right| \quad (10)$$

$$k_g = k u_* (z-d) \quad (11)$$

式中, z_0 是表面粗糙度 (m), z 是测点离地面高度 (m), d 是零平面位移 (m), u_* 是摩擦速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), $u(z)$ 是高度 z 处的平均风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。这样,通过测量风速和被测气体浓度的垂直梯度便可获得高度 z 处的气体通量值。

在实际的大气测量中,中性大气条件往往是很难以得到满足。于是当大气不处在中性条件时,上述计算过程需要修正。一般来说,稳定度条件对梯度法测量的气体垂直输送通量的影响可由稳定度函数来修正。根据 Monin-Obukhov 相似原理,实际大气中的动量、热量和水汽交换稳定度函数均为稳定度参数的函数。大气稳定度通常用理查孙数 Ri 来表示^[4],于是

$$F_g = \frac{1}{\phi} \bar{\rho}_g k_g \frac{dC}{dz} \quad (12)$$

其中

$$\left| \begin{array}{ll} \phi = (1 - 5 Ri)^{-1} & \text{对于稳定条件} \\ \phi = (1 - 16 Ri)^{-0.5} & \text{对于不稳定条件} \end{array} \right.$$

3 方法特点

3.1 湍度相关法

湍度相关法是一种很好的通量测量方法,因为它不要求有湍度扩散系数和大气稳定度校正或假定风速的垂直廓线形状等。它适用于大面积的均匀下垫面,要求被测气体的浓度水平梯度可忽略不计以及观测期间大气条件定常等。当垂直扩散率较大,温度、湿度以及被测气体的垂直梯度很小,而相应的垂直速度的变化很快时,用湍度相关法要比其他通过测量要素梯度来确定通量的方法更可靠。

但湍度相关法要求采用对被测痕量气体有快速

响应的传感器,其采样频率必须在 10 ~ 20 Hz。目前的常用技术很难满足这一要求。可调谐二极管激光(TDL)、傅立叶红外光谱等高分辨率和高灵敏技术有可能使涡度相关法在实际中得到应用。

3.2 梯度法

梯度法也是一种平衡方法,只有在大面积均一下垫面上和下垫面的交换率处于平衡状态情况下才能适用,要求在较大区域内被测气体的水平浓度梯度可忽略不计和观测期间大气条件定常。该方法中的气体扩散系数要求通过动量输送系数来确定,因此梯度法比较适用于有一定风速的大气条件,但动量扩散系数和气体扩散系数的关系取决于大气稳定度,大气稳定性对通量测量结果的影响一般通过稳定函数进行校正。

3.3 箱式法

箱式法的优点是简便易行,箱子的覆盖面积通常小于 1 m²,适用于不同作物品种和不同耕作管理的田间小区的观测和过程研究。它的缺点是改变了被测表面上气体的自然湍流状态,这种改变可能明显影响地面与大气之间的气体交换而使测得的排放通量值偏离实际情况。关闭盖子以后,箱内的温度、湿度、光照、辐射状况等均可发生改变,从而在一定程度上影响测量结果的真实性。另外,痕量气体的排放具有巨大的时空不均匀性,而箱式法测量的只是一个点,这种测量结果的代表性也是一个问题。

动态箱法原则上能测量所有表面的实际排放通量,但动态箱法在实际应用中却有许多技术难题而使它的应用不广。一方面,为了保证箱内外空气状况没有明显差异和箱内不出现明显对流,似稳气流的生产需要严格的设计。另一方面在排放通量较低时,箱体的出口和入口处的被测气体浓度差别很小,因而要求有很高的测量精度,这对许多气体都是困难的。

3.4 条件采样法

条件采样法与其他测量方法相比有一定的优点,一方面,它的测量装置位于被测区域的下风方向处,其实验装置及测量活动不会干扰被测区域的自然环境状况。另一方面它是一种开放式的测量方法,减少了密闭系统采样带来的误差,可用于较大尺度宏观均匀的区域,改善了观测结果的代表性。此外,它弥补了涡度相关法要求快速响应传感器,但目前很多痕量

气体的测量又没有相应传感器的不足。

条件采样法不需要测定风速廓线,也不需要确定痕量气体的湍流扩散系数,同时它也不需要进行有关的密度波动的校正。

4 条件采样法的应用

1999 年 6 ~ 11 月和 2000 年 6 ~ 11 月,在中国科学院常熟农业生态站的水稻试验田,利用条件采样装置对水稻的插秧、拔节、抽穗和成熟等主要生育期的低层大气 N₂O 的垂直通量进行了观测。取得了大量数据,经过分析及与国外的测量结果对比,得到表 1 中的结果。

表 1 利用条件采样法得到 N₂O 的垂直通量

	试验场地	垂直通量 / mg · m ⁻² · h ⁻¹
Pattey E ^[6]	草地	0.216
	玉米地	2.708
Beverland I J ^[3]	农田	0.168 ~ 1.000
	常观测	- 1.0 ~ 2.0

从表 1 这些观测结果可以发现,在不同的试验场地所得到的测量结果也不一致,这与观测点的相对位置,传感器所处的高度,地表的粗糙度,上风方向均匀地表的水平尺度,风速等一系列因素相关。

随着对大气痕量成分研究的重视以及观测技术的发展,基于条件采样法的诸多优点,它将很可能被广泛应用于痕量气体的通量观测中。

参考文献

- 1 Businger J A and Oncley S P. Flux measurement with conditional sampling. *J. At mos. Ocean. Tehnol.*, 1990, 7: 349 - 352
- 2 Steven P O, Anthony C D and Thomas W H. Verification of flux measurement using relaxed eddy accumulation. *At mos. Environ.*, 1993, 27 A(15): 2417 - 2426
- 3 Beverland I J, Oneill D H, Scott S L. Design, construction and operation of flux measurement systems using the conditional sampling technique. *At mos. Environ.*, 1996, 30(18): 3209 - 3220
- 4 王庚辰. 陆地生态系统温室气体排放(吸收)测量方法简评. *气候与环境研究*, 1997, 2(3): 251 - 263
- 5 王明星. *大气化学(第二版)*. 北京: 气象出版社, 1999
- 6 Pattey E and Desjardins R L, et al. Impact of density fluctuations on flux measurements of trace gases: Implications for the relaxed eddy accumulation technique. *Bound. - Layer Meteor.*, 1992, 59: 195 - 203