

# 利用条件采样法在常熟稻田测定 $N_2O$ 大气垂直 通量初步观测结果\*

丁国安 刘晶淼 颜 鹏 王木林 王淑凤 程红兵  
孟昭阳 程彦杰 逯昌贵 于海青 温德永 徐 敬

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

## 摘 要

1999年在常熟农业生态站试验稻田于水稻主要生长季,利用进口的条件采样装置对水稻低层大气  $N_2O$  的垂直通量进行了观测,并在2000年做了补充观测。结果如下:各生长季测定的  $N_2O$  垂直通量值最多出现在  $0 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  之间; $N_2O$  垂直通量平均日变化最大值出现在下午;插秧期和收割后  $N_2O$  垂直通量是各个生长季中最小的;观测到  $N_2O$  负通量现象的出现;在稻田用条件采样技术观测到的低层大气  $N_2O$  垂直通量大于国内用箱式法观测报道的土壤  $N_2O$  排放通量。

关键词:  $N_2O$  条件采样法 低层大气 垂直通量

## 引 言

作为大气中主要的痕量气体之一,  $N_2O$  不仅是一种仅次于  $CO_2$ 、 $CH_4$  的温室气体,而且也是重要的臭氧前体物。有大量的天然源和人为源。我国是一个重要的稻米生产大国,因此研究  $N_2O$  在南方水稻田低层大气中垂直通量有十分重要的意义。

大气圈和生物圈相互作用之间的最大不确定性在于这两个圈之间大气痕量物质的通量。其相互作用包括人类活动极大地干扰了大气圈和生物圈,因此增加了理解低层大气垂直通量的重要性。测定大气痕量气体垂直通量最常用的方法有涡动相关法(Eddy Correlation)、梯度法(Gradient technique)和条件采样法(Conditional Sampling)。在稳定大气,水平均一条件下,涡动相关法能够提供下垫面各种物质通量的直接测量结果,垂直通量  $F_c$  简单表达式可以写为<sup>[1~3]</sup>:

$$F_c = \overline{w'c'} \quad (1)$$

上式中  $c'$  是大气痕量成份传感器的脉动量,要求时间分辨率至少近似  $0.1 \sim 0.2 \text{ s}$ ,一般来说,除了  $CO_2$  可以满足以上要求外,其它大气痕量成份传感器要达到如此高的时间分辨率是十分困难的,  $w'$  是垂直风速脉动值,同样它也要求  $0.1 \text{ s}$  的时间分辨率。因此 Busiger 和 Oncley 在 20 世纪 90 年代前后提出了新的采样方法——条件采样法。国外较

\* 本文受国家自然科学基金会重大项目 49899273 资助。

2002-12-18 收到,2004-02-04 收到再改稿。

多地使用条件采样法测量农田、森林  $CO_2$  垂直通量,采样器高度位于树冠以上数十米<sup>[4]</sup>。也有利用小型飞机安装条件采样装置进行垂直通量观测,其中包括 VOC、气态氨等<sup>[5-6]</sup>。利用条件采样法测定草地、玉米地等农田低层大气  $N_2O$  的通量也有少量报道<sup>[7]</sup>。

条件采样法不仅用于较大面积森林和湿地等痕量气体垂直通量的测量,而且也在较小地块进行田间测量。例如 Katul G.G. 等,分别於美国伊里诺伊州 Bondville 的玉米地以及北卡罗林那州 Beraufort 的短草地,在 5 m 高度处进行  $CO_2$  垂直通量观测<sup>[7]</sup>。E. Pattey 等人於加拿大渥太华绿带农庄大豆地里在 3.2 m 铁塔上进行  $CO_2$  垂直通量观测<sup>[8-9]</sup>。Steven P. Oncley 在美国 San Joaquin 谷空气质量研究计划中於正在生长的棉田 5 m 高处分别用条件采样法和涡动相关法进行  $CO_2$  比对试验<sup>[4]</sup>。但是使用条件采样法测量水稻田  $N_2O$  垂直通量至今尚未见报道。

长江三角洲是我国经济迅猛发展地区,亦是主要的稻作区之一,有关森林、草原和农田土壤  $N_2O$  排放我国已有很多科研成果<sup>[10-12]</sup>,但都是箱式法测量结果。静态箱法有简便易行的特点,在测量农田土壤排放上得到广泛应用。它的明显缺点是改变了被测表面上空气的自然湍流状态,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。另外关闭盖子以后箱内的温度和湿度都可能变化,这也会在一定程度上影响地面和大气的交换。为了克服这些缺点发明了动态箱法。动态箱法原则上能测量所有表面的实际排放通量,但在实际应用中却有许多困难。所以静态箱法仍被广泛应用,并在静态箱法的基础上发展了微量气体排放通量的自动采样分析方法<sup>[13]</sup>。条件采样法是基于涡动相关法的理论上为了实用而产生的一种新的方法。对于不活泼的痕量气体,它把快速响应的痕量气体浓度脉动值的测定,归结到响应于向上和向下垂直风速脉动风速两个气袋浓度差值的测定,解决了某些痕量气体没有快速响应感应器的困难。然而条件采样法的使用也受到很多制约。例如和所有边界层微气象观测一样对下垫面水平均一性有较严格要求,被测痕量气体必须是化学不活泼性气体,测量仪器的分析精度也必须能够区分上下两个气袋的浓度差别要求等。

本文在常熟生态站稻田引进条件采样法,通过这一新的探测手段获取长江三角洲典型稻作区稻田上空大气  $N_2O$  垂直通量,为进一步加深对稻田土壤和大气之间的相互作用的认识,为该地区区域气候变化研究提供科学依据。

## 1 现场试验

### 1.1 测量方法

条件采样法是 Businger 和 Oncley 推荐的建立在涡动相关法基础上一种相对较易操作的测量大气垂直通量的方法。它利用垂直风速传感器有条件地采集空气浓度,这是一种把垂直风速脉动值快速测定传感器和浓度测定慢响应装置相结合的混合技术。假如我们仅要求被正或负垂直风速脉动量的测定来有条件地采取空气样品以及空气样品以定常流速进行采样,规定当  $w' > 0$ ,采样袋采取样品平均浓度为正 ( $C_{up}$ ),当  $w' < 0$ ,采样袋采取样品平均浓度为负 ( $C_{down}$ ),那末在近地层通量可以假设为<sup>[2]</sup>:

$$F_c = \overline{w'c'} = \rho b \sigma_w (C_{up} - C_{down}) \quad (2)$$

其中  $\rho$  为空气密度 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $b$  是一个理论或经验常数。从理论上讲  $b$  取决于  $w$  和  $c$  的联合概率分布, 假如符合高斯分布时,  $b$  为 0.627。对于经验值而言, 通常采用接近 0.6 的值 (Businger 和 Oncley), 本文  $b$  采用 0.6,  $\sigma_w$  为垂直风速脉动值标准差 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $C_{\text{up}}$  为 UP 方向气袋  $\text{N}_2\text{O}$  样品浓度 ( $10^{-9} \cdot \text{v} \cdot \text{v}^{-1}$ ),  $C_{\text{down}}$  为 DOWN 方向气袋  $\text{N}_2\text{O}$  样品浓度 ( $10^{-9} \cdot \text{v} \cdot \text{v}^{-1}$ )。

由以上公式可见  $\sigma_w$  和  $\Delta C$  ( $C_{\text{up}} - C_{\text{down}}$ ) 二个量的大小决定了  $\text{N}_2\text{O}$  通量  $F(x)$  的大小, 而  $\Delta C$  的正负决定了  $\text{N}_2\text{O}$  通量的方向, 可见精确地测量  $\Delta C$  与  $\sigma_w$  是条件采样法的关键。

## 1.2 试验环境

1999 年 6~11 月在位于长江三角洲腹地的常熟地区, 中国科学院南京土壤研究所下属的常熟农业生态站试验田 ( $31^{\circ}33' \text{N}, 120^{\circ}38' \text{E}$ ), 于水稻插秧、拔节、抽穗和成熟等主要生长季, 利用条件采样装置对水稻低层大气  $\text{N}_2\text{O}$  的垂直通量进行了观测。并于 2000 年做了一些补充观测。该试验田土壤为苏南稻作区典型的一太湖沉积乌栅土, 使用典型水稻品种—梗稻 9522。

常熟农业生态站位于常熟市南郊主要稻作区, 除东边有一条市际公路以外, 三面均被相同品种和土质的大片稻田所围绕。生态站共有土地 200 多亩, 一条灌渠把该站分为南北两部分, 南半部即为试验田。试验田东西长 204 m, 南北宽 113 m。测点距东围墙 162 m, 西围墙 42.5 m, 南围墙 33.3 m。围墙总高度 2.5 m, 2 m 以下为实体墙, 上部 0.5 m 呈锯齿形。观测点 NNE 方向 40 多米有一塑料大棚种植无土栽培西红柿、青椒等蔬菜。大棚面积约为  $40 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ , 高约 5~6 m。测点以东 100 m 左右为标准气象观测场, 内置一套自动气象站。试验田内基本都种植一季中稻 (见图 1)。在通量观测的同时还同步进行了气象观测, 包括风向、风速、气温、相对湿度、地温和气压等。

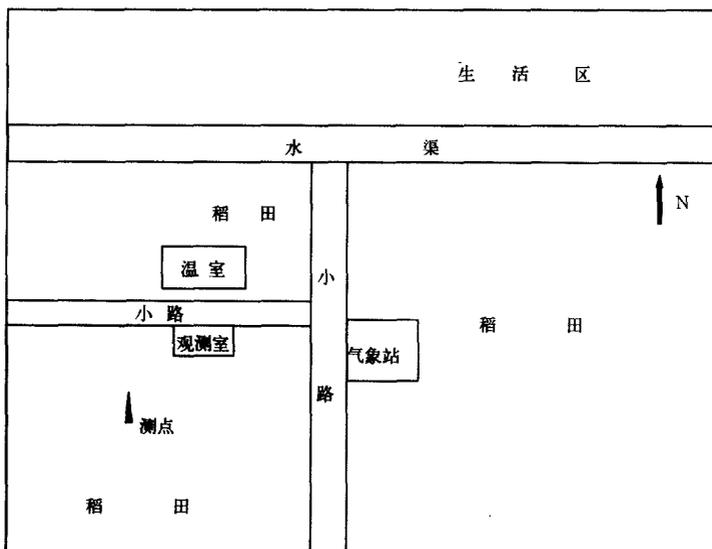


图 1 测点周围环境

### 1.3 仪器设备

试验使用的条件采样装置系美国大气科学研究中心(NCAR)发展的采样技术,由 Applied Technique Inc. 工厂生产(Model SWS-211/3EG),包括超声风温仪、气体分离器、接口、采样袋支架和计算机等(见图2)。其基本工作原理为:当气样由位于超声风温仪采样头中间的气路入口进入气体分离器后,由超声风温仪采集的垂直风速脉动值  $w'$  (采样频率 10 Hz),控制气体分离器中电磁阀的开关。由于垂直瞬时风速为  $w + w'$ ,因此必须在安装时严格保持仪器垂直,并且在计算中做必要的校正,使  $w = 0$ 。当  $w'$  向上时,UP 气路电磁阀打开,空气进入 UP 气袋。当  $w'$  向下时,DOWN 气路电磁阀打开,空气进入 DOWN 气袋。利用以上两个袋子中浓度差值计算垂直通量。为了保证获得的样品能正确地反映  $N_2O$  垂直通量,对采样的控制条件  $w'$  设了阈值。该仪器垂直风速的标准差是由仪器自动计算的前 10 min 内垂直风速标准差。阈值为设置阈值前 10 min 垂直风速标准差乘以一个系数  $a$  ( $a < 1$ ),它是为了满足向上向下气袋有足够的浓度差以满足分析要求。根据不同气象条件来设置阈值。阈值定的过高将把大量样品采集在 VENT 袋子中,其它两个袋子没有足够的空气样品供分析。阈值定的过低则把一些小的湍涡采了进来,影响 UP 和 DOWN 气袋浓度差。合适的阈值应该使 UP、DOWN、VENT 3 个气袋采集的空气样品体积相差不多。即在  $|w'| > \text{阈值}$  时,条件采样器才根据  $w'$  的方向分别采集样品到 DOWN 和 UP 采样袋中,而在  $|w'| < \text{阈值}$  时,即较小湍涡携带的  $N_2O$  气体被采集到 VENT 采样袋中。垂直风速脉动阈值可由观测者自行设置。从气体入口到分离器距离为 2 m 左右,采样时间 30 min。使用对  $N_2O$  采样浓度无干扰的 Tedlar 采样袋,体积为 10 L。条件采样装置的进气口高度在 1999 年试验开始阶段几经调整,不久即保持在 1.3 m,2000 年则一直为 1.5 m。根据 T. W. Horst 等人的研究,为了使所测到的低层大气垂直通量能够反映出地表的通量(footprint),要求在稳定大气条件下上风向水平距离大于采样高度的 100 倍内下垫面相对均一,不稳定大气条件下,这个水平距离可以缩短一些<sup>[14]</sup>。

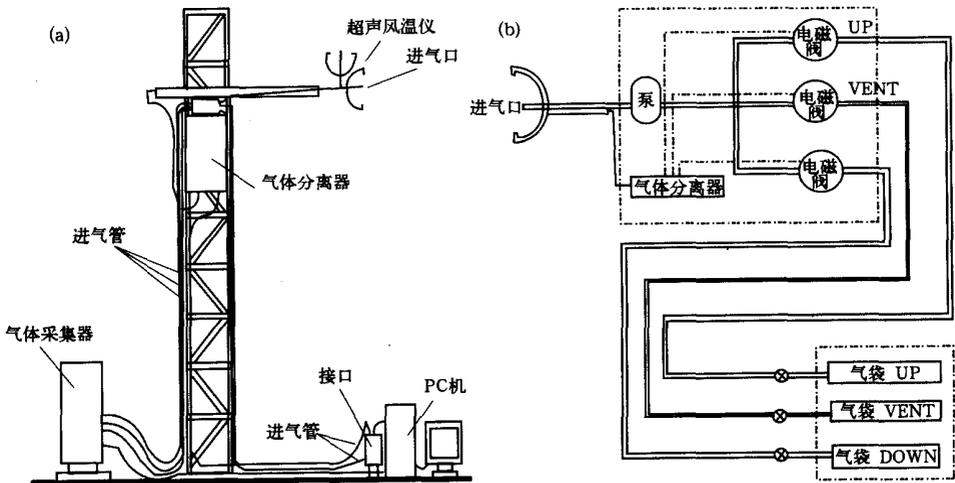


图2 条件采样装置

(a) 示意图, (b) 气路图

本文所做试验较多的是在不稳定或中性天气条件下进行的。常熟测点偏东方向距离围墙160多米,因此该方向是可以满足 footprint 的要求<sup>[9]</sup>。而围墙对测点其它风来向的观测结果有一定影响,特别是 NNE 方向。

在现场设置的实验室内用带有 ECD 的 HP5890 气相色谱仪对样品进行  $N_2O$  浓度分析,仪器重复测量精度小于 0.2%,由于样品分析中增加了同一样品分析次数,实际精度要优于此值,具体操作方式见参考文献[15]。

#### 1.4 试验条件

(1) 条件采样装置的气流参数 气流在条件采样装置中的运动状态是十分重要的,表1列出了不同观测时段从空气样进气口到分离器主泵的长度,以及相应延迟时间,管路中气体流速和每 0.1 s 气体在管路中移动距离。从表中可以看出整个试验期间管道中气体流速大约在 500 ~ 600 ml/m,样品气在管道中每 0.1 s 移动距离约 20 cm。也就是说每个气样在管道中占有约 20 cm 的长度,这对于保持样品气能够少受相反垂直方向气柱的影响还是十分重要的。观测中实际并非每 0.1 s 垂直风速方向就有变化,有时同一方向可以连续几个 0.1 s 还未变化,也就是说在进气管路中将有相同方向几倍的 20 cm 长度样品气柱,这将可以减少管路中垂直方向不同样品气的相互影响。

表 1 条件采样装置气路有关参数

日期	进气管延迟时间(s)	进气管长度(m)	流量(ml/m)	每 0.1 s 气体移动距离(cm)
1999年6月11日	2.240	3.73	500.9	17.5
7月25日	2.012	3.73	557.9	19.5
7月29日	2.069	3.73	542.2	19.0
7月31日	1.139	2.01	562.5	19.7
10月23日	0.972	2.01	659.3	19.7
10月25日	0.944	2.01	678.4	23.1
2000年7月27日	1.074	2.01	596.7	21.3
8月20日	1.103	2.01	580.6	20.7
9月08日	1.073	2.01	597.3	21.3
9月22日	1.113	2.01	575.7	20.5
10月12日	1.180	2.01	541.6	19.3

(2) 感热通量观测结果 将各次条件采样观测时段超声风温仪观测到的垂直风速脉动值和温度垂直脉动值用来计算感热通量( $h_t$ ),其公式如下:

$$h_t = C_p \times \rho \times \overline{W' \cdot T'}$$

其中  $C_p$  为感热系数( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ );  $\rho$  为空气密度( $g \cdot v^{-3}$ );  $W'$  为垂直风速脉动值( $m \cdot s^{-1}$ );  $T'$  为温度垂直脉动值(K)。

图3给出了1999年水稻插秧期前后,成熟期和收获后感热通量平均日变化,由于受样品分析时间的限制,每个条件采样时段是和上一采样时段是不连续的,且间隔时间也不完全相等,所以计算得出的各阶段感热通量平均日变化不能以连线表示。然而,从图中仍可比较清晰地看出各个生长季感热通量日变化趋势:凌晨感热通量呈负值,日出后逐渐增大,到正午前后达到最大值,此后又逐渐减小一直到日没前仍保持正值,日没后又出现负值。感热通量这种近乎正态分布的观测事实说明控制条件采样装置的超声风温仪处于比较正常工作状态。由于观测资料较少,将不同观测日期的感热通量资料求出的平均日变

化,尚不能反映出不同生长季之间的差异。

超声风温仪观测所得的垂直风速脉动值也能够较好地反映大气湍流特征,例如图 4 显示 1999 年 7 月 14 日 04:00 ~ 24:00(北京时)1.3 m 高度各个观测时段(30 min)的垂直风速脉动标准差日变化,日出前 20 cm/s 左右,日出后逐渐增大,近正午其达到最大值(59 cm/s),而后又逐渐减小,午夜降至 30 cm/s。

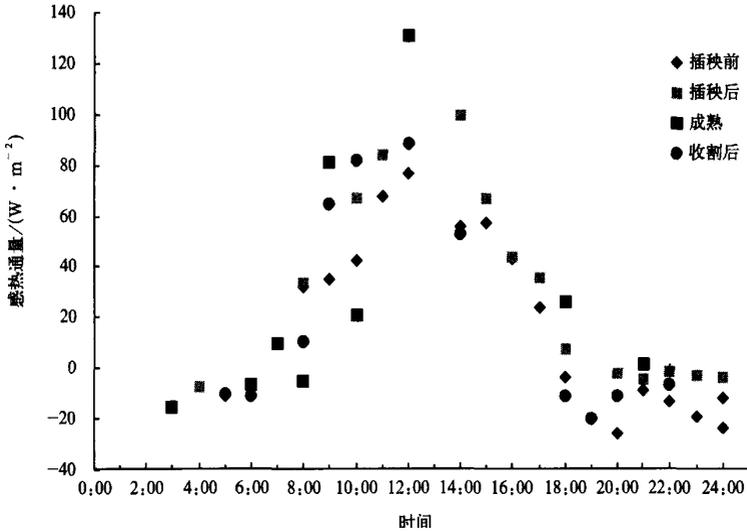


图 3 1999 年水稻不同长生期感热通量平均日变化

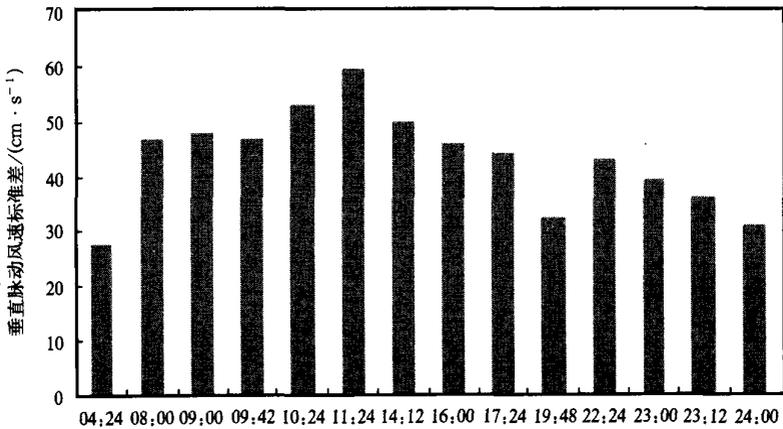


图 4 1999 年 7 月 14 日 04:00 ~ 24:00 垂直风速脉动值标准差日变化

(3) 样品存放时间 分别在 2000 年 10 月 17 日和 21 日做了样品存放试验。将样品袋充满 N<sub>2</sub>O 标气,10 月 17 日初始浓度为 318.2 × 10<sup>-9</sup>,将近 2 h 后测得其浓度为 318.1 × 10<sup>-9</sup>,约 3 h 后其浓度为 318.3 × 10<sup>-9</sup>。10 月 21 日试验结果也十分相近,而且延迟到近 5 h 后测定变化也仅 0.1 × 10<sup>-9</sup>。在试验期间从采样到进行样品分析间隔时间一般都不会超过 2 h,因此存放时间带来的误差是可以忽略的(表 2)。

表 2 样品不同存放时间  $N_2O$  浓度测试结果

样品一(2000年10月17日)		样品二(2000年10月21日)	
分析时间	$N_2O$ 浓度( $\times 10^{-9}$ )	分析时间	$N_2O$ 浓度( $\times 10^{-9}$ )
17:18	318.2	14:47	318.1
18:52	318.1	18:29	317.9
20:15	318.3	19:47	318.2

(4) UP、DOWN 和 VENT 3 个气袋样品浓度 VENT 气袋所采集的是小于阈值的气样(本试验根据稳定度的不同,阈值大致取  $60\% \sim 80\% \sigma_w$ ),它实际上类似一个滤波器把小的湍流收集到此通道。考虑 VENT 气袋中的浓度应位于 UP 和 DOWN 气袋之间。本项试验中 1999 年和 2000 年 VENT 气袋  $N_2O$  浓度介于 DOWN 和 UP 气袋  $N_2O$  浓度值之间的样品组分别占总采样组数的 76% 和 67%。

(5) 气路试验 条件采样装置的入口到气体分离器的长度很短,但从气体分离器到采样袋的距离则有 30 多米,整个气路(包括进气管路、抽气泵、四通阀、电磁阀、出气管路)都可能对试验结果带来影响。2000 年做了条件采样装置管道影响测试,将  $N_2O$  标气接在条件采样装置进气口,启动正常操作程序,标气依照垂直风速方向和大小分别被采入 UP、DOWN 和 VENT 3 个气袋。标气浓度为  $316.0 \times 10^{-9}$ ,测得 3 个气袋的浓度分别为  $316.1 \times 10^{-9}$ 、 $315.9 \times 10^{-9}$  和  $316.2 \times 10^{-9}$ 。由此可见整个装置气路对  $N_2O$  的观测结果基本没有什么影响。

考虑到常熟生态站东东北方向温室和四周围墙可能产生的湍流干扰,部分 VENT 通路气袋  $N_2O$  浓度不在 DOWN 和 UP 通路气袋浓度之间,以及分析精度等因子可能对观测结果带来的影响,有必要对数据进行筛选。资料筛选原则为:(a) 10 m 高处风速大于  $2 \text{ m/s}$ ;(b) NNE 方向测定结果;(c) VENT 通道采样袋浓度不在 UP 和 DOWN 两个通道采样袋浓度之间;(d)  $\Delta C$  小于  $0.5 \times 10^{-9}$ 。凡在上述条件下得到的观测数据不予以分析。根据以上条件筛选后,总共还剩下 77 组样品,占获取的全部样品 21% 以上。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $N_2O$ 垂直通量概况

图 5 分别列出了 1999 年和 2000 年稻田低层大气  $N_2O$  垂直通量出现频数分布图。结果表明:水稻各个生长期所观测到的  $N_2O$  垂直通量不尽相同,但是各个生长期  $N_2O$  垂直通量还是有一个相对集中值,即有一个最多频数出现值。1999 年的拔节期、成熟期和 2000 年拔节期  $N_2O$  垂直通量最多频数出现在  $0 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,2000 年抽穗期和成熟期最多频数出现于  $1.1 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,而 1999 年插秧期  $N_2O$  垂直通量最多频数出现在  $0 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。这似乎表示插秧期  $N_2O$  垂直通量方向由大气指向地面。而随着水稻的逐渐生长  $N_2O$  垂直通量方向逐渐由地面指向大气,而且其通量值也逐渐增大。由于限于资料的局限性,更详细的分析讨论,还有待进一步的实验结果。

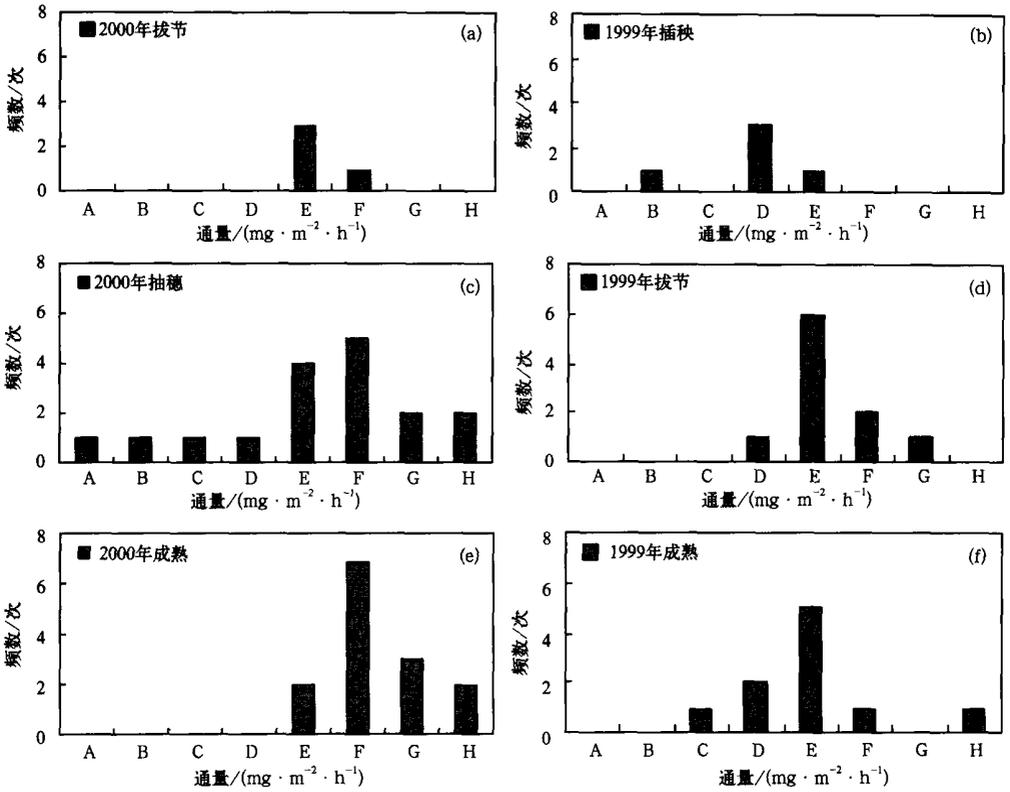


图5 不同年份和不同生长季 N<sub>2</sub>O 垂直通量频数分布图  
 (横坐标 A: -4 ~ -3.1, B: -3 ~ -2.1, C: -2 ~ -1.1, D: -1 ~ 0.1, E: 0 ~ 1.0, F: 1.1 ~ 2.0, G: 2.1 ~ 3.0, H: 3.1 ~ 4.0)

2.2 不同生长季平均日变化和均值

把1999年插秧、拔节和成熟期的观测资料求出小时平均(图6),从图6可以看出尽管各生长季 N<sub>2</sub>O 小时平均垂直通量的日变化不完全相同,但是有一点是共同的,即其最

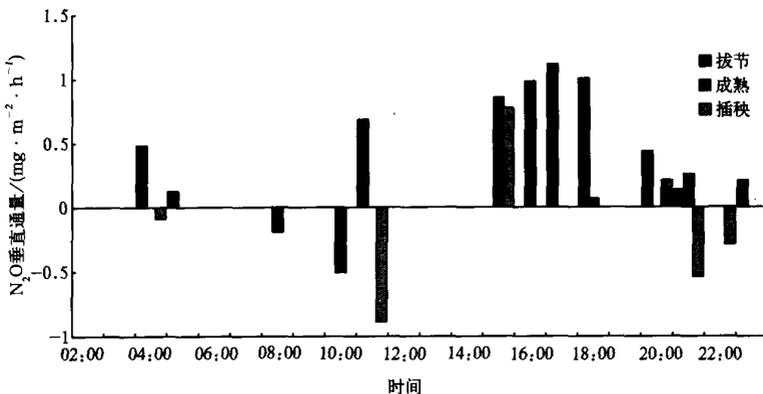


图6 1999年各生长季 N<sub>2</sub>O 垂直通量平均日变化

大值大致出现在 15:00 ~ 17:00。

将 1999 年观测资料与 2000 年补充观测资料合并统计,插秧期和收获后  $N_2O$  垂直通量较小而且出现负通量,其值分别为  $-0.162 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $-0.072 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,拔节期、抽穗期和成熟期平均  $N_2O$  垂直通量分别为  $0.633 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.741 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $0.871 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  (表 3)。

表 3 不同生长季  $N_2O$  平均垂直通量  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

插秧	拔节	抽穗	成熟	收获后	平均
- 0.162	0.633	0.741	0.871	- 0.072	0.558

### 2.3 施肥影响

施肥之后  $N_2O$  通量有明显增加趋势。1999 年 6 月 18 日和 7 月 28 日分别施用了底肥和穗肥。为了尽量减少日变化的影响,采用相近时段观测资料进行比较。6 月 19 日 16:00  $N_2O$  垂直通量为  $1.232 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  比施肥前 6 月 15 日 15:00 的  $0.9128 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  大约增加  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。6 月 19 日 20:00 的  $N_2O$  垂直通量比 6 月 16 日 20:00 和 17 日 20:00 的  $N_2O$  垂直通量大约增加  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。第二次施肥情况大致同于第一次,  $N_2O$  垂直通量增加量大约为  $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

### 2.4 负通量

为了对负通量的出现有进一步的认识,在 2000 年观测试验中曾做了对比观测。分别于条件采样装置进气口(1.5 m)的上下高度 1.2 m 和 2.5 m 处,几乎在同一垂线方向,并且和条件采样装置采样时间近似同步,分别在这两个高度使用独立采样泵和 Tedlar 采样袋采了 30 min 样品。共获取 58 组样品,其中 2.5 m 高度  $N_2O$  浓度大于 1.2 m 高度  $N_2O$  浓度有 11 组样品,这个事实说明多数情况下该测点水稻  $N_2O$  浓度方向是从地面指向低层大气,然而也有相当一部分个例  $N_2O$  浓度方向反而是由低层大气指向地面。这种现象在另一组类似的对比观测中也能看到:1999 年观测试验中,在条件采样同时,在 0.4 m 高度也同步地取空气样,共取得 14 组对照样品,其中也有 4 组 1.5 m 高度  $N_2O$  浓度高于 0.4 m 高度  $N_2O$  浓度。关于负通量的出现时间,观测中并没有发现特别明显的规律。在国外用条件采样装置观测痕量气体垂直通量时,除了  $CO_2$  外其它痕量气体也曾出现负通量记录<sup>[3,46]</sup>。之所以出现负通量可能有两种原因,其一稻田生态系统总的来说是  $N_2O$  的源,但在某些情况下也可能是汇。例如,郑循华在苏南稻田用箱式法观测到  $N_2O$  负通量<sup>[10]</sup>,杨文襄用箱式法也曾观测到东北林区土壤出现过  $N_2O$  负通量<sup>[17]</sup>。其二可能是实验条件设计的不合适引起的。但本实验在连续 4 ~ 5 天偏东风情况下(该方向下垫面比较均一)依然也观测到负通量。因此负通量的出现其原因有待进一步的探讨。

### 2.5 与国内外观测结果比较

由于没有国外有关使用条件采样法在稻田测定  $N_2O$  的观测数据可以对比,表 4 仅列出了国外草地、农田(文献未标出何种种类农田)和玉米田  $N_2O$  垂直通量数据。从表中可以看出本次  $N_2O$  垂直通量观测结果(年平均值)大于国外草地,接近农田观测结果,但比玉米地小。在本项观测试验中附带进行的少部分箱式法资料表明,箱式法观测结果与

国内王明星、郑循华和陈冠雄等人的观测结果比较接近<sup>[10-12,18]</sup>。如果把表 4 和表 5 对照起来看就可以发现这两种观测结果有一定差异。使用条件采样法所得出的观测结果大于用箱式法结果。箱式法和条件采样法反映了两种不同的物理概念,前者反映了土壤与农作物排放通量,而后者则反映了低层大气的垂直输送通量。

诚然,以上仅限于在一个地块上使用条件采样法得出的初步的观测结果,很有必要将条件采样法和箱式法做系统的比对,以期得出更加科学的结论。

表 4 与国外使用条件采样技术  $N_2O$  垂直通量测量比较结果

作者	试验场地	测量结果( $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )
E. Patter <sup>[8]</sup>	草地(试验组数不详)	0.216
E. Patter <sup>[9]</sup>	玉米地(试验组数不详)	2.708
I. J. Beverland <sup>[3]</sup>	农田(共六组数据)	0.168 ~ 1.000
本项观测(条件采样法)	稻田(年平均)	- 0.162 ~ 0.871

表 5 与国内箱式法  $N_2O$  排放通量测量结果比较

作者	试验场地	测量结果( $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )
郑循华、王明星等 <sup>[10]</sup>	稻田(土壤过饱和)	0 ~ 0.260
	稻田(土壤未饱和)	0.280 ~ 0.480
郑循华、王明星等 <sup>[11]</sup>	稻田	- 0.05 ~ 0.6
	陈冠雄等 <sup>[18]</sup>	稻田
Khalil 等人 <sup>[16]</sup>	稻田(北京 1992 年)	0.089
	稻田(北京 1993 年)	0.082
	稻田(广州 1994 年)	0.025
	稻田(广州 1995 年)	0.975
本项观测(箱式法结果)	稻田	- 0.005 ~ 0.209

### 3 结 论

- (1) 各个生长季测定的  $N_2O$  垂直通量值多数出现在  $0 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。
- (2)  $N_2O$  垂直通量平均日变化最大值出现在 15:00 ~ 17:00。
- (3) 插秧期和收割后稻田低层大气  $N_2O$  垂直通量是各个生长季中最小的。
- (4) 观测到  $N_2O$  负通量现象的出现,其出现原因有待进一步研究。
- (5) 在稻田用条件采样技术观测到的  $N_2O$  垂直通量大于国内用箱式法观测的土壤  $N_2O$  排放通量。条件采样法是基于微气象观测中在湍流理论上建立的涡动相关法简化而得出的观测方法,它获得的低层大气中  $N_2O$  垂直通量,有别于基于土壤排放-箱式法得出的观测结果。

由于  $N_2O$  排放通量对于区域及全球气候研究都有重要的意义。因此有必要进行系统对比观测研究。

致谢:周秀骥院士给予本项目现场观测和资料分析很多具体指导,本项目现场试验期间在仪器设备安装时得到了赵京同志的大力协助,何熙雯同志参加了现场观测和实验室分析工作,在资料整理分

析过程中卞林根研究员、陆龙骅研究员和高志球博士提出了很多思路以及中肯的建议,并给予了  
很多具体帮助,在此谨致谢意。

### 参考文献

- 1 Businger J A, Delany A C. Chemical sensor resolution required for measuring surface fluxes by three common micrometeorological techniques. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1990, **10**: 399 ~ 410.
- 2 Businger J A, Oncley S P. Flux measurement with conditional sampling. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990, **7**: 349 ~ 352.
- 3 Beverland I J, Oneill D H, Scott S L, et al. Design, construction and operation of flux measurement systems using the conditional sampling technique. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(18): 3209 ~ 3220.
- 4 Oncley S P, Delany A C, Horst T W. Verification of flux measurement using relaxed eddy accumulation. *Atmospheric Environment*, 1993, **27A**: 1 ~ 10.
- 5 Zhu T, Wang D, Desjardins R L, et al. Aircraft-based volatile organic compounds flux measurements with relaxed eddy accumulation. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**: 1969 ~ 1979.
- 6 Zhu T, Pattey E, Desjardins R L, et al. Relaxed eddy-accumulation technique for measuring ammonia volatilization. *Environ Sci Technol.*, 2000, **34**: 199 ~ 203.
- 7 Katul G G, Finkelstein P L, Clarke J F, et al. An investigation of the conditional sampling method used to estimate fluxes of active, reactive and passive scalars. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, **35**: 1835 ~ 1845.
- 8 Pattey E, Desjardins B L, Rochette P. Accuracy of the relaxed eddy-accumulation technique, evaluated using CO<sub>2</sub> flux measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 1993, **60**: 341 ~ 355.
- 9 Pattey E, Desjardins R L, et al. Impact of density fluctuations on flux measurements of trace gases: implications for the relaxed eddy accumulation technique. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, **59**: 195 ~ 203.
- 10 Zheng Xunhua, Wang Mingxing, et al. N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from rice paddies in Southeast China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1997, **21**(2): 167 ~ 174.
- 11 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N<sub>2</sub>O 产生与排放的影响. *环境科学*, 1997, **18**(5): 1 ~ 5.
- 12 王跃思, 郑循华, 王明星, 等. 静态箱法气相色谱法自动检测农田 N<sub>2</sub>O 排放. *分析测试技术与仪器*, 1997, **3**(1): 10 ~ 15.
- 13 王明星. *大气化学(第二版)*. 北京:气象出版社, 1999. 40 ~ 42.
- 14 Horst T W, Weil J C. How far is far enough? the fetch requirements for micrometeorological measurement of surface fluxes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, **11**: 1018 ~ 1025.
- 15 王木林, 程红兵, 李兴生, 等. 中国部分清洁地区大气中 N<sub>2</sub>O 的浓度. *气象学报*, 1997, **55**(3): 363 ~ 370.
- 16 Khalil M A K, Ras mussen R A, Shearer M J. Emissions of methane, nitrous oxide and other trace gases from rice fields in China. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D19): 25241 ~ 25250.
- 17 杨文襄, 弁玉静, 钟晋贤, 等. 森林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量和东部中国沿海大气中 N<sub>2</sub>O 混合比测定. 见:周秀骥主编. *中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响*. 北京:气象出版社, 1996. 139 ~ 144.
- 18 陈冠雄, 黄斌, 黄国宏, 等. 稻田 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 通量测定及总量估算. 见:王庚辰, 温玉璞主编. *温室气体浓度和排放监测及相关过程*. 北京:中国环境科学出版社, 1996. 343 ~ 350.

PRELIMINARY RESULTS OF  $\text{N}_2\text{O}$  FLUX MEASUREMENT IN  
LOW ATMOSPHERE AT RICE PADDY IN CHANGSHU  
USING CONDITIONAL SAMPLING

Ding Guoan Liu Jingmiao Yan Peng Wang Muling  
Wang Shufeng Cheng Hongbing Meng Zhaoyang Cheng Yanjie  
Lu Changgui Yu Haiqing Wen Deyong Xu Jing

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

**Abstract**

In the period from 1999 to 2000, the  $\text{N}_2\text{O}$  vertical flux in the low atmosphere during the main growing seasons of rice was measured using conditional sampling method over a rice paddy at Changshu Agriculture Ecological Station. The measurements indicate that  $\text{N}_2\text{O}$  vertical flux was mainly between  $0 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , and the maximum daily averaged  $\text{N}_2\text{O}$  vertical flux was observed in the afternoon. The  $\text{N}_2\text{O}$  vertical flux in the transplant rice seedling period and reaping period was minimum among all the growing seasons. In these measurements, the minus  $\text{N}_2\text{O}$  vertical flux was also observed in some cases. The  $\text{N}_2\text{O}$  vertical flux by conditional sampling technique was bigger than that measured by Chamber method reported in some domestic journal papers. The reason of this difference between the two methods needs further study.

**Key words:**  $\text{N}_2\text{O}$  Conditional sampling Low level atmosphere Vertical flux