

# 农田开放体系中调控臭氧浓度装置平台 (O<sub>3</sub>-FACE) 研究<sup>①</sup>

唐昊冶<sup>1</sup>, 刘钢<sup>1\*</sup>, 韩勇<sup>1</sup>, 朱建国<sup>1</sup>, 小林和彦<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; <sup>2</sup> 东京大学, 东京 113)

**摘要:** 本研究研制建立了亚洲第一个稻麦轮作的 O<sub>3</sub>-FACE 平台系统。平台主要由 O<sub>3</sub> 供应系统、O<sub>3</sub> 释放系统以及平台监控系统 3 大部分组成; FACE 圈 O<sub>3</sub> 目标浓度设定值为高于对照圈 O<sub>3</sub> 浓度 50%; 系统根据风向、风速、FACE 圈内中心点 O<sub>3</sub> 浓度值等因素控制布气。平台运行 3 年以来, 85% 以上布气时间内, 平台控制区域 O<sub>3</sub> 浓度波动在控制目标值的 ±15% 之内; 90% 以上布气时间内, 平台控制区域 O<sub>3</sub> 浓度波动在控制目标值的 ±20% 之内。FACE 圈内 O<sub>3</sub> 浓度分布基本随风向由边向中心逐步降低, 作物生长季内圈内 O<sub>3</sub> 浓度分布与控制中心点的 O<sub>3</sub> 浓度相比, 变幅小于 ±10%。在低风速条件下 (风速 < 0.3 m/s), 80% 布气时间内, 平台控制区域 O<sub>3</sub> 浓度波动在控制目标值的 ±20% 之内。

**关键词:** 臭氧; 开放体系; FACE; 农田生态系统

**中图分类号:** 181

近代人类活动加速了大气组成的改变, 增大了全球气候变化幅度, 对人类生存环境和社会经济的持续发展构成威胁, 引起了科学家的广泛关注和各国政府的高度重视。近几十年来大气中的 NO<sub>x</sub> 及挥发性有机物的迅速提高, 引起白天近地表大气中 O<sub>3</sub> 浓度的迅速增加, 使大气中 O<sub>3</sub> 浓度的瞬时峰值达到 100 ~ 200 nL/L<sup>[1-2]</sup>。20 世纪欧洲、美国等区域 O<sub>3</sub> 浓度升高显著, 目前中国的中东部, O<sub>3</sub> 浓度呈领涨全球的趋势, 估计在 20 年内翻番<sup>[3-4]</sup>。近地表 O<sub>3</sub> 浓度的升高对农业有害无益, 严重影响作物产量。在较高的估计中, 我国长江三角洲地区因 O<sub>3</sub> 损伤导致产量损失可达 30%; 根据较为保守的估计, 到 2020 年, 我国小麦、水稻和玉米等作物将减产 12% 左右, 而大豆减产 25% 左右, 势必危及粮食安全<sup>[5-6]</sup>。

为预测和应对 O<sub>3</sub> 浓度升高对农业生产的影响, 科学界作了长期的努力。20 世纪 80 年代前, 大量的研究在温室、培养箱或开顶式气箱中进行<sup>[7-11]</sup>。由于相应的试验条件如温度、风速、湿度、降雨等因素与自然条件相去甚远, 特别是系统中植物与昆虫、病源的隔离, 从这种模拟环境中所取得的研究结果预测 O<sub>3</sub> 浓度升高对农业生长的影响, 具有较多的不确定性<sup>[12-13]</sup>。鉴于此, 研制开放体系下升高 O<sub>3</sub> 浓度的实验平台系统, 以在尽可能接近自然生态环境的条件下, 研究生态系统对全球变化的响应和适应是非常必要的。

国际上从 20 世纪 80 年代开始开展在开放体系下升高大气中某个特定组分浓度的 FACE 平台 (free air gas concentration enrichment) 研究, 已涉及的生态系统有森林、草地、农田等, 研究的作物有小麦、棉花、玉米、水稻等, 但这些 FACE 平台绝大多数是针对 CO<sub>2</sub> 气体<sup>[14-15]</sup>。与 CO<sub>2</sub> 相比, O<sub>3</sub> 具有浓度波动大、易分解、强氧化性等特点, 因此研制 O<sub>3</sub>-FACE 平台要求较高的技术含量和控制水平, 目前国际上建成的 O<sub>3</sub>-FACE 平台只有美国 Illinois 大学的 SoyFACE 平台<sup>[16-17]</sup>, 国际上尚无在水稻/小麦轮作农田生态系统进行 O<sub>3</sub>-FACE 研究的先例。

本研究建立的开放体系中调控 O<sub>3</sub> 组分浓度的装置平台, 即 O<sub>3</sub>-FACE, 是世界上首次在水稻/小麦轮作农田生态系统上进行 O<sub>3</sub>-FACE 研究的平台。该平台在野外的目标区域没有任何隔离设施, 气体可以自由流通, 区域内通风、光照、温度、湿度等条件十分接近自然生态环境。中国 O<sub>3</sub>-FACE 研究, 将为国家制订粮食安全保障对策、应对全球变化对农业生产的影响提供更为可靠的科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究平台概况

O<sub>3</sub>-FACE 平台位于江苏省江都市小纪镇 (119°42'0"E,

<sup>①</sup>基金项目: 中国科学院科研装备研制项目 (YZ0603)、国家科技部国际科技合作计划项目 (2009DFA31110) 和中国科学院国际合作重点项目 (GJHZ0748) 资助。

\* 通讯作者 (gliu@issas.ac.cn)

作者简介: 唐昊冶 (1981—), 男, 重庆人, 硕士, 研究实习员, 主要从事全球变化的区域响应研究。E-mail: hytang@issas.ac.cn

- 删除的内容: 681
- 带格式的
- 删除的内容: <sp>
- 带格式的: 行距: 固定值 22 磅
- 删除的内容: (
- 带格式的: 字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体
- 删除的内容: )
- 带格式的: 行距: 固定值 15 磅
- 删除的内容:
- 带格式的: 列数: 2
- 带格式的: 行距: 固定值 15.7 磅
- 删除的内容: L
- 带格式的: 加宽量 0.15 磅
- 带格式的: 缩进: 首行缩进: 2 字符, 行距: 固定值 15.7 磅
- 带格式的: 加宽量 0.15 磅
- 删除的内容:
- 删除的内容:
- 带格式的: 缩进: 悬挂缩进: 0.52 字符, 左 0 字符, 首行缩进: -0.52 字符, 段落间距段前: 8 磅, 段后: 7 磅, 行距: 固定值 15.7 磅
- 带格式的: 字体: 非加粗
- 删除的内容:
- 带格式的: 缩进: 首行缩进: 0 磅, 行距: 固定值 15.7 磅
- 带格式的: 紧缩量 0.3 磅
- 带格式的: 行距: 固定值 15.7 磅
- 带格式的: 两端对齐, 右侧: 0 磅, 行距: 固定值 13 磅
- 带格式的: 行距: 固定值 13 磅

32°35'5"N), 土壤类型为清泥土, 年均降水量约 980 mm, 年均蒸发量大于 1 100 mm, 年平均温度约 14.9°C, 年日照时间大于 2 100 h, 年无霜天数大于 220 天, 耕作方式为水稻/冬小麦轮作。FACE 圈为直径 14 m 的正八边形, 有效实验面积为 120 m<sup>2</sup>。FACE 圈相互之间、FACE 圈与对照圈之间的间隔大于 70 m, 以减少释放 O<sub>3</sub> 对其他圈的影响。由于 O<sub>3</sub> 浓度波动很大, 我们没有采用固定升高 O<sub>3</sub> 浓度值而采用升高 O<sub>3</sub> 浓度比例的方法, FACE 圈内目标 O<sub>3</sub> 浓度设定值为高于对照圈

O<sub>3</sub> 浓度 50%。平台于 2007 年 4 月建成投入运行, 运行初期为 3 个 FACE 实验圈和 4 个对照实验圈, 2008 年稻季开始增至 4 个 FACE 实验圈。

1.2 平台系统结构

与 CO<sub>2</sub> 等气体不同, O<sub>3</sub> 气体易分解、不能被贮存, 因此在 O<sub>3</sub>-FACE 平台的设计上, 我们采取即时发生-控制混气-输送-自由释放的方式。整个平台主要由 O<sub>3</sub> 供应系统、O<sub>3</sub> 释放系统以及平台监控系统 3 大部分所组成 (图 1)。

删除的内容: (119°42'0"E,  
带格式的: 缩进: 首行缩进: 0 磅, 行距: 固定值 15.7 磅  
带格式的: 行距: 固定值 15.7 磅  
删除的内容: 它

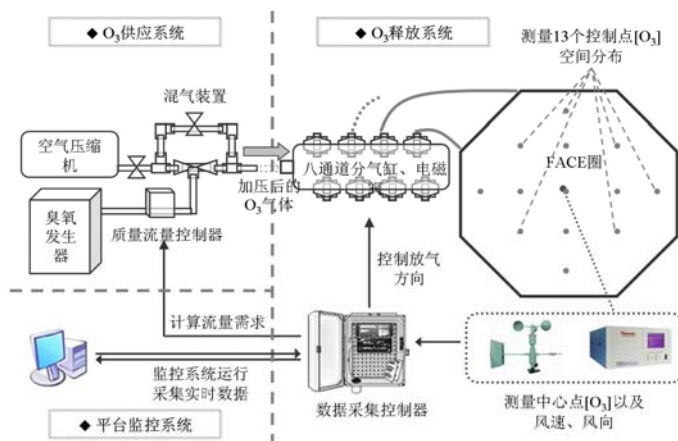


图 1 O<sub>3</sub>-FACE 平台结构  
Fig.1 O<sub>3</sub>-FACE system layout

带格式的

1.2.1 O<sub>3</sub> 供应系统 O<sub>3</sub> 供应系统提供升高目标区域内冠层 O<sub>3</sub> 浓度所需 O<sub>3</sub>, 该系统主要由 O<sub>3</sub> 发生单元、压缩空气单元以及混气单元所组成。在本 O<sub>3</sub>-FACE 平台中, O<sub>3</sub> 发生单元和压缩空气单元为所有 FACE 圈提供 O<sub>3</sub> 气体以及压缩载气, 而每个 FACE 圈都有各自独立的混气单元, 系统自动根据各 FACE 圈实际的 O<sub>3</sub> 流量要求, 通过质量流量控制器调节输送到各 FACE 圈混气单元中 O<sub>3</sub> 气体流量。

生管。O<sub>3</sub>-FACE 平台运行时控制程序将根据 FACE 圈的总 O<sub>3</sub> 流量需求自动控制 O<sub>3</sub> 发生器的工作模式, 以达到既保证 FACE 圈 O<sub>3</sub> 供应量又安全、节能、减耗的目标。

在 O<sub>3</sub> 发生单元中, 贮存在中压钢瓶中的液态纯氧 (99.9%) 经过减压汽化成高纯氧气供给 O<sub>3</sub> 发生器作为制备 O<sub>3</sub> 的气源。O<sub>3</sub> 发生器采用搪瓷发生管产生 O<sub>3</sub> 气体, 该发生器使用高压中频电源, 采用双水冷结构, 并通过 PLC 工控机监测控制系统, 对水温、水流、电参数、气压等多种参数实施自动监测、报警与保护, 保证系统安全正常运行。由于在不同 O<sub>3</sub> 浓度和不同风速条件下 FACE 圈所需要 O<sub>3</sub> 量变化很大, 我们将 O<sub>3</sub> 发生器的工作模式设为 4 种, 分别为待机, 开启第 1 组发生管, 开启第 1、2 组发生管, 开启第 1、2、3 组发

通过 O<sub>3</sub> 发生器产生的 O<sub>3</sub> 体积含量约为 5% 的氧气气体, 需与压缩空气混合加压后才能平稳输送到田间的各个 FACE 圈中。空气压缩机每分钟能提供 6 m<sup>3</sup> 压力为 800 kPa 的压缩空气, 产生的压缩空气通过干冷机和油雾分离器去除其中的水分和油雾。此外, 压缩空气单元中还安装了一个 2 m<sup>3</sup> 的平衡贮气罐, 用于保证压缩空气的气流平稳。

混气单元主要由文氏管和质量流量控制器所组成。文氏管 (Venturi) 的工作原理是, 当其入口压力保持不变时, 降低出口压力到一定程度, 其喉部发生汽蚀。当出口压力低于入口压力 50% 以下时, 汽蚀区会扩大, 并形成负压。这就能使低压的含 O<sub>3</sub> 的氧气混入压缩空气中, 传送到释放系统。并且, 此时通过文氏管的流量, 不再受其出口压力和下游压力的影响,

删除的内容: :  
删除的内容:  
带格式的: 页眉, 两端对齐

只取决于入口压力, 提高入口压力, 就可提高流量。而且下游的压力脉动被文氏管隔离, 从而防止了整个管路的压力振荡。质量流量控制器根据各个 FACE 圈发出的 O<sub>3</sub> 流量要求, 控制输入到相应混气单元的含 O<sub>3</sub> 气体流量。当 FACE 圈发出的 O<sub>3</sub> 流量要求超过一定值时, 为保证合适的混气比, 系统将延时开启第 2 组或第 3 组 O<sub>3</sub> 发生管, 通过增加输出气体的 O<sub>3</sub> 浓度, 来降低流量要求。

1.2.2 O<sub>3</sub> 释放系统 经过加压混合后的含 O<sub>3</sub> 的气体由送气管道输送到田间的 O<sub>3</sub> 释放系统, O<sub>3</sub> 释放系统主要由八边形布气管、风速风向传感器、数据采集控制器和 O<sub>3</sub> 分析仪等组成。

八边形布气管由 8 根长度为 6 m 的 PPR 管, 组成边长 5.8 m、对边 14 m 间距的布气实验圈。布气管的内径是 15 mm, 外径 20 mm, 上面打有一排间隔 40 mm、孔径 0.3 mm、共 146 个布气孔。八边形围成的面积达 160 多 m<sup>2</sup>, 扣除离布气管 1 m 的缓冲区, 有效的实验面积为 120 m<sup>2</sup>。布气管的放置高度在作物冠层上方 30 至 60 cm, 以利于释放的气体随风扩散, 同时有利于低风无风时臭氧浓度的平稳扩散。

O<sub>3</sub> 分析仪采用 Thermo 公司的 49i 型号。仪器每月用标准设备校正一次。测量数据采用 60 s 或 90 s 的移动平均, 每 10 s 更新一次输出。输出采用 0~1 V 的电压模拟输出, 对应 0~500 nL/L 的 O<sub>3</sub> 浓度测量范围。FACE 圈中一台 O<sub>3</sub> 分析仪用于测量其中心点的 O<sub>3</sub> 浓度, 作为控制点; 另一台 O<sub>3</sub> 分析仪轮流测量圈内 13 个点的 O<sub>3</sub> 浓度值, 以得到圈内 O<sub>3</sub> 浓度分布。在对照实验圈中, 有一台 O<sub>3</sub> 分析仪, 测量对照圈中心点 5 个不同高度的 O<sub>3</sub> 浓度, 用于布气目标浓度设置值的选择。

在每个 FACE 圈的中心点 2.5 m 高度上都安装了风速风向传感器, 当 5 秒钟平均风速大于 0.3 m/s 时, 根据风向, 开启上风处 3 根放气管放气; 当 5 秒钟平均风速小于 0.3 m/s 时, FACE 圈的 8 根放气管相互间隔分为 2 组, 交替放气。

为保证系统安全运行, 我们还特别增加了安全控制单元 (SC)。当空气压缩机出现故障或压缩空气管道漏气时, 含 O<sub>3</sub> 的气体不能及时输送到田间而蓄积在管道中造成安全隐患, 因此在 SC 单元中传感器实时测量压缩空气管道压力, 当压力小于 500 kPa 时, 就关闭压缩空气管道, 置 O<sub>3</sub> 发生器工作模式为待机状态。当植物叶片有水珠时, O<sub>3</sub> 会造成叶片的急性损伤。叶片上的水珠可以来自降雨、露水, 也可能来自植物自身, 如水稻会吐水。因此, 单纯的降雨或雨量传感器并不能反映叶片自身是否有水珠。我们选用叶片湿润度传感器, 并放置在冠层下方, 能很好地反映叶片的湿润状态。当叶片湿润度 3 min 移动平均值小于设定值时, 置 O<sub>3</sub> 发生器工作模式为待机状态。安全控制是整个平台系统的设计重点。除了对实验和环境的安全之外, 还必须考虑人员和设备的安全。为此, 控制程序中还设有断电情况的处理, 以及人工控制模式。在远程控制计算机的监控程序中, 设有“启动开关”, 可即时处理突发事件。

带格式的: 列数: 1

1.2.3 平台监控系统 平台监控系统是由主控制计算机和分布在田间的数据采集控制器 (Campbell, CR10X) 所组成。数据采集控制器分别连接各系统单元对应的仪器设备和电磁阀门, 采集并储存田间监测到的数据信息并传送到主控制计算机, 同时接收主控制计算机发出的控制指令并转化为电信号, 从而控制各仪器设备和电磁阀门的工作状态 (图 2)。

删除的内容: L

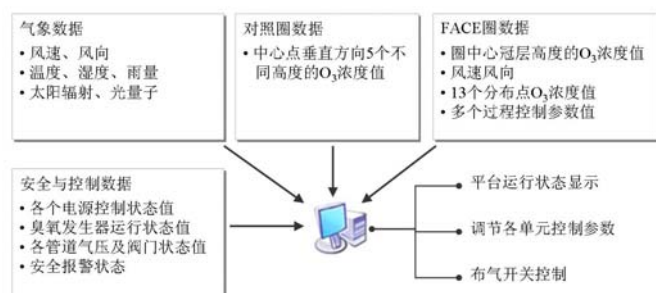


图 2 平台监控系统示意图

Fig. 2 Frame of system communication and monitoring unit

带格式的: 居中  
带格式的

田间各个数据采集控制器间的通讯，是通过铜轴电缆连接的，控制计算机与数据采集控制器（CR10X）的通讯，是通过 Campbell 公司提供的动态链接库建立的。通过动态链接库所提供的函数，可以实现连接数据采集控制器、对数据采集控制器发出控制指令、从数据采集控制器提取存储数据等一系列操作。

主控制计算机实时分析处理从田间采集到的平台运行数据，并显示在主控界面上。显示信息主要有：工作状态（正常、检修、停止放气）、控制点 O<sub>3</sub> 浓度测量值、当前 O<sub>3</sub> 浓度设定值、风速风向、各放气管的开关状态、1 h 之内各 FACE 圈控制精度线性图、FACE 圈内 O<sub>3</sub> 浓度分布（通过对 13 个采样点的数据进行 Kring 内插值）、气象数据等。由于在不同的气象以及田间条件下，例如不同的风速条件、随作物生长而抬高放气管高度等，控制方程的最佳控制参数会有所不同。操作人员可以在监控界面选择数据采集控制器，以及相应需要调整的参数在该数据采集控制器中的变量位置，将新的参数直接传送到该位置，以达到更好

的控制精度要求。

由于平台运行每天将采集 5 MByte 左右的数据，靠人工分析这些数据既耗时又容易出错。我们利用数据库技术以及相应的程序，开发建立的数据备份与处理模块，能自动、快速、准确地处理分析这些数据。该模块用 VB 6.0 + SQL Server 进行开发。每天 0:5，数据备份程序将平台监控模块提取的前一天的所有数据（DAT 文档文件）根据不同类别备份到 SQL 数据库；对各数据表建立关联关系，以便处理分析；并对备份过程中数据文件可能出现的错误进行提示，记录到日志文件中，以便工作人员检查。数据处理部分使用 VB6.0 编写，提供人机界面根据操作人员的要求，运用 SQL 数据库强大的查询分析功能，将所查询分析好的数据利用 VBA 自动生成 Excel 文件，并做出图表。

1.3 平台控制方法

1.3.1 PID 控制方程 比例微积分方程(PID 方程)是过程控制中常用的方法，其框图如下（图 3）。

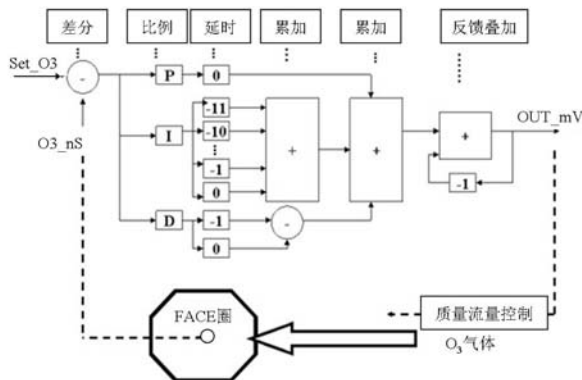


图 3 PID 控制方程框图

Fig. 3 Frame of PID control algorithm

其中，Set<sub>O<sub>3</sub></sub> 为目标浓度设置值，O<sub>3</sub>\_10S 为测量 O<sub>3</sub> 浓度的 10 s 移动平均值。

偏差比例调节分量：Mtr\_P = P × [Set<sub>O<sub>3</sub></sub> - O<sub>3</sub>\_10S]

积分比例调节分量：Mtr\_I = I × [1/6 ∑<sub>1-6</sub> (Set<sub>O<sub>3</sub></sub> - O<sub>3</sub>\_10S)], 即积分时间为 1 min。

微分比例调节分量：Mtr\_D = D × [(Set<sub>O<sub>3</sub></sub><sub>n-1</sub> - O<sub>3</sub>\_10S<sub>n-1</sub>) - (Set<sub>O<sub>3</sub></sub> - O<sub>3</sub>\_10S)], n-1 项是前 10 s 的相应值。

PID 的计算值：PID\_mV = Mtr\_P + Mtr\_I + Mtr\_D 而输出流量要求是在前 10 s 输出值上的调节；

$$OUT\_mV = OUT\_mV\_n-1 + PID\_mV$$

偏差比例调节分量与偏差大小成正比，但有无法克服的静态误差；积分比例调节分量可消除静态误差等缓变的微小偏差，调节量正比于偏差对时间的累计值，积分时间太短，会造成较大的波动幅度，积分时间太长，对干扰不能及时克服；微分比例调节分量用来遏制扰动变化的趋势，进行超前调节，其调节量正比于干扰的变化速度，但对不变或缓变的干扰无作用。P、I、D 为比例参数，根据经验确定。

1.3.2 风速因子 风速是 FACE 圈内目标浓度控制

删除的内容:

带格式的: 加宽量 0.1 磅

带格式的: 字体: 非加粗  
带格式的: 行距: 固定值 16 磅

删除的内容:

- 气象数据
  - 风速、风向
  - 温度、湿度、雨量
  - 太阳辐射、光量子
- 安全与控制数据
  - 各个电源控制状态值
  - 臭氧发生器运行状态值
  - 各管道气压及阀门状态值
  - 安全报警状态

图 2 平台监控系统示意图

Fig. 2 Frame of system communication and monitoring unit

1.3 平台控制方法

1.3.1 PID 控制方程 比例微积分方程 (PID 方程) 是过程控制中常用的方法，其框图如下：

带格式的: 字体: 六号  
带格式的:



的必要条件。在我们的实验区，风速范围比较宽，风速大有利于释放的 O<sub>3</sub> 气体随风扩散，控制精度更好。但是，风速范围宽，其不稳定性因素也就增加。特别在夏季，每天低风无风（风速 < 0.3 m/s）的时间又比较长，常常无风的时间在 50% 以上。由上述计算风速与所需 O<sub>3</sub> 量的关系可见，必须对 PID 方程所计算的流量要求加以风速限定。流量限定方程是风速 5 min 平均值的线性方程。如图 4 所示，PID 方程计算所得的流量要求被限制在由 Y1 和 Y2 所决定的上下限之间。

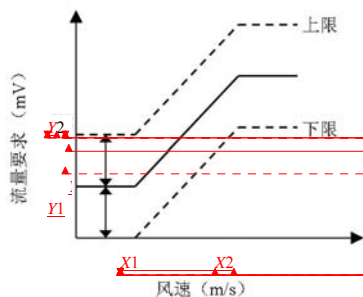


图 4 风速与流量要求上下限关系

Fig. 4 Relationship between wind speed and upper and lower levels for O<sub>3</sub> flow demand

农田环境中 O<sub>3</sub> 浓度每天的变化是非常大的，这使得目标浓度设置值可从 20 ~ 250 nL/L 变化。如果使用大的上限值和宽的计算范围，可以满足高浓度、大风速时的布气要求。但是，对低浓度、低风无风时，会造成过量放气，且形成浪涌现象。为了防止这种情况发生，提高控制精度，我们采用了两组限定方程。当目标浓度设置值 ≤ 80 nL/L 时，Y1 取 300 mV，Y2 取 800 mV，X1 取 0.64 m/s，X2 取 4.12 m/s，这样，流量要求的变化范围为 600 mV，最大的流量要求为 1 100 mV（大约相当于 11 L/min）。当目标浓度设置值 > 80 nL/L 时，Y1 取 450 mV，Y2 取 1 050 mV，X1 取 0.64 m/s，X2 取 3.21 m/s，这样，流量要求的变化范围为 950 mV，最大流量要求为 1 500 mV（大约相当于 15 L/min）。无风条件时（风速传感器的测量下限是 0.3 m/s），所释放的气体是以浓度扩散的形式进行的。为了防止过量释放，系统此时将采用较小的 P、I、D 值。同时将 PID 方程的输出值乘以固定修正系数，以进一步降低流量要求。

**1.3.3 流量修正方程** 由于在不同 O<sub>3</sub> 浓度和不同风速条件下 FACE 圈所需要 O<sub>3</sub> 量变化很大，在平台设计中，当总流量要求达到某一设定值时，O<sub>3</sub> 发

生器就需要开启下一组发生管，增加 O<sub>3</sub> 发生量以满足需求。当 O<sub>3</sub> 发生器工作状态为开启第 1、2 组发生管或者开启第 1、2、3 组发生管时，O<sub>3</sub> 发生器输出的 O<sub>3</sub> 浓度将大大增加，如果按照布气实验圈 PID 方程所计算的流量要求供气混气，会造成布气过量冲积，影响 PID 方程的平稳计算，进而会容易引起浪涌布气。因此使用流量修正方程，对所要求的流量进行修正，对于减小浪涌，平稳布气至关重要。流量修正方程参数的选择取决于当前 O<sub>3</sub> 发生管的开启组数、总的流量要求、O<sub>3</sub> 浓度设定值的高低。例如在开启第 1、2 组发生管的情况下，浓度下限取 80 nL/L，浓度上限取 100 nL/L，修正参数取 0.7，意味着当目标浓度设置值 ≤ 80 nL/L 时，输出的流量信号为输入的流量要求乘以固定系数 0.7；当目标设置浓度值 > 100 nL/L 时，输出的信号是流量要求的 100%；当目标设置浓度在 80 ~ 100 nL/L 之间，则输出的信号是原流量要求乘以方程给出的斜率系数。除了系统自动控制流量修正方程参数的选取外，在较高风速或较高 O<sub>3</sub> 浓度设定值等异常情况下，现场工作人员还可以根据实际情况，在主控制计算机上手动调节流量控制单元 (FC) 程序的流量修正方程参数，适时开启下一组发生管，增加 O<sub>3</sub> 供应，已达到平台精确控制的要求。

## 2 结果与讨论

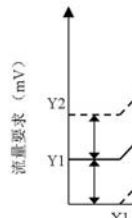
### 2.1 运行情况

O<sub>3</sub>-FACE 系统平台于 2007 年 4 月 14 日建成开始运行。除 2007 年麦季由于调试平台，放气时间推迟以外，麦季放气期为 3 月初至小麦成熟，稻季放气期为移栽后一周至水稻成熟。平台设计放气时间为每天早上 9 点至日落时间，但在下雨、露水等造成叶片湿润时，高浓度的 O<sub>3</sub> 会造成叶片的急性损伤，系统将暂停布气；同时，在 O<sub>3</sub> 浓度设定值 < 20 nL/L、管道压力未达到放气要求、校正 O<sub>3</sub> 分析仪、检修设备等等时也会暂停布气。在研究 O<sub>3</sub> 对农作物损伤时，一般使用 M7 (9:00 ~ 16:00 的 O<sub>3</sub> 平均小时浓度) 这一指标来反映 O<sub>3</sub> 的日平均浓度水平。由于上述提到的原因，在麦季和稻季分别只有 51% 和 43% 的时间正常布气，故 FACE 圈较对照圈 O<sub>3</sub> 浓度的实际增加比例 < 50%，相对应 M7 的增加比例分别为 2007 麦季 39.3%、2007 稻季 25.9%、2008 麦季 27.0%、2008 稻季 20.0%、2009 麦季 25.5%、2009 稻季 22.3%。图 5 所示为 FACE 圈与对照圈 O<sub>3</sub> 浓度 M7 的日变化情况。

带格式的：页眉，两端对齐

删除的内容：...

带格式的：...



删除的内容：

带格式的：行距：1.5 倍行距

删除的内容：Y

删除的内容：Y1

带格式的：字体：六号

带格式的：...

带格式的：...

带格式的：右，缩进：右侧：2.85 磅，首行缩进：0 字符，行距：固定值 10 磅

带格式的：字体：六号

删除的内容：Y2

Y1

带格式的：字体：六号

带格式的：缩进：首行缩进：0 字符，行距：固定值 15 磅

带格式的：...

删除的内容：

带格式的：行距：固定值 12 磅

删除的内容：

删除的内容：

带格式的：段落间距段前：7 磅，段后：7 磅

带格式的：字体：非加粗

删除的内容：L

带格式的：行距：固定值 15.9 磅

带格式的：...

带格式的：行距：固定值 3 磅

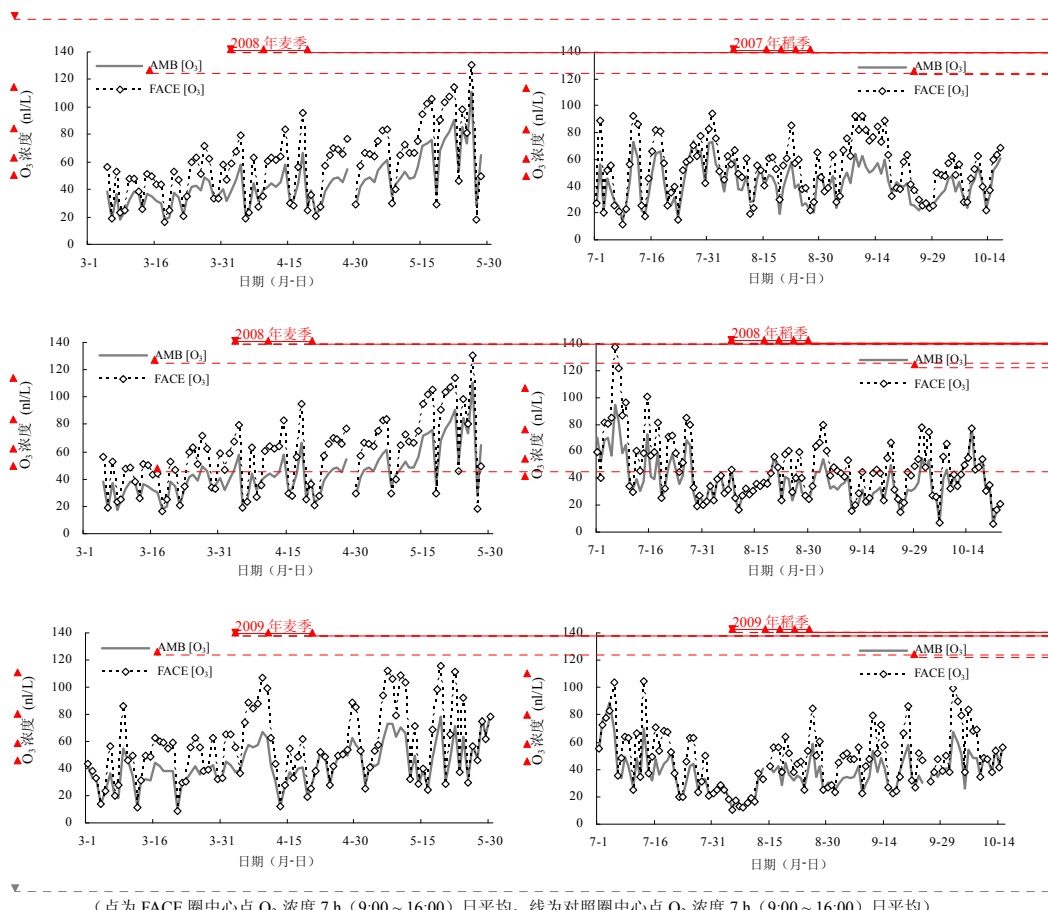


图 5 2007、2008、2009 年平台运行结果  
 Fig. 5 System performance of 2007, 2008 and 2009

2.2 臭氧背景浓度变异以及目标浓度设定值的选取

O<sub>3</sub> 背景浓度具有很大的变异性,从图 6 可以看出,每日之间、每日的不同时段之间, O<sub>3</sub> 浓度差异很大;同时,不同高度的 O<sub>3</sub> 浓度也不相同,一般趋势是随高度下降 O<sub>3</sub> 浓度降低。O<sub>3</sub> 是大气光化学反应的产物,其在与气象数据的比较中,可以发现 O<sub>3</sub> 浓度的变化与光量子成明显的正相关。每天日出后, O<sub>3</sub> 浓度就逐步增加,下午 1、2 点钟达到峰值,随后逐步降低。这样大的变化,对平台的控制带来困难。从目标浓度设置值的选择来说,我们有两个对照圈,早期我们采用的是从中选取浓度值低的,加量 50% 作为目标浓度设置值。但是,在低风、低气压等情况下, O<sub>3</sub> 浓度值会发生异常跃动,两个对照圈的 O<sub>3</sub> 浓度值差异很大。为了平抑这种不合理的跳动,我们最终采用了如下方法:两个对照浓度值加量 50% 后,与前一个控制周期目标

浓度设置值比较,选取中间值作为下一个控制周期目标浓度设置值。

2.3 平台控制精度

平台的控制精度通常用 TAR (target achievement ratio) 来反映, TAR 值的计算如下:

$TAR = \text{FACE 圈 } O_3 \text{ 浓度测定值} / O_3 \text{ 浓度设定值}$   
 对于整个作物生长季中平台的控制精度,可以用 FACE 圈中心控制点 O<sub>3</sub> 浓度的平均 TAR 值来反映。TAR 越接近于 1,表示控制精度越好, TAR > 1,表示在统计时间段内 O<sub>3</sub> 浓度大于设定值, TAR < 1,表示在统计时间段内 O<sub>3</sub> 浓度小于设定值。从表 1 可以看出,在各个作物生长季, TAR 值都接近于 1,控制精度在 85% 以上的时间占总放气时间的 85% 以上;控制精度在 80% 以上的时间占总放气时间的 90% 以上。

带格式的: 列数: 1  
 带格式的: ... [7]  
 删除的内容: <sp>  
 带格式的: ... [8]  
 删除的内容: AMB [O<sub>3</sub>] ... [9]  
 删除的内容: AMB [O<sub>3</sub>] ... [10]  
 带格式的: 字体: 小六  
 带格式的: ... [11]  
 带格式的: 字体: 小六  
 带格式的: ... [12]  
 带格式的: ... [13]  
 带格式的: ... [14]  
 带格式的: 字体: 七号  
 带格式的: ... [15]  
 带格式的: 字体: 七号  
 带格式的: ... [16]  
 带格式的: ... [17]  
 带格式的: ... [18]  
 带格式的: 字体: 小六  
 带格式的: ... [19]  
 带格式的: 字体: 小六  
 带格式的: ... [20]  
 带格式的: ... [21]  
 带格式的: ... [22]  
 删除的内容: AMB [O<sub>3</sub>] ... [23]  
 带格式的: 字体: 小六  
 带格式的: ... [24]  
 带格式的: ... [25]  
 删除的内容: AMB [O<sub>3</sub>] ... [26]  
 带格式的: 字体: 小六  
 带格式的: ... [27]  
 带格式的: ... [28]  
 带格式的: 字体: 七号  
 带格式的: ... [29]  
 带格式的: 字体: 七号  
 带格式的: ... [30]  
 带格式的: 字体: 七号  
 带格式的: ... [31]  
 带格式的: ... [32]  
 带格式的: ... [33]  
 带格式的: 字体: 小六  
 带格式的: ... [34]  
 带格式的: 字体: 小六  
 带格式的: ... [35]  
 删除的内容: AMB [O<sub>3</sub>] ... [36]  
 带格式的: 字体: 小六  
 带格式的: ... [37]  
 带格式的: ... [38]  
 删除的内容: AMB [O<sub>3</sub>] ... [39]  
 带格式的: 字体: 小六  
 带格式的: ... [40]  
 带格式的: ... [41]  
 带格式的: 字体: 七号  
 带格式的: ... [42]  
 带格式的: 字体: 七号  
 带格式的: ... [43]  
 带格式的: ... [44]  
 带格式的: ... [45]  
 带格式的: 字体: 小六  
 带格式的: ... [46]  
 带格式的: 字体: 小六  
 带格式的: ... [47]  
 带格式的: ... [48]

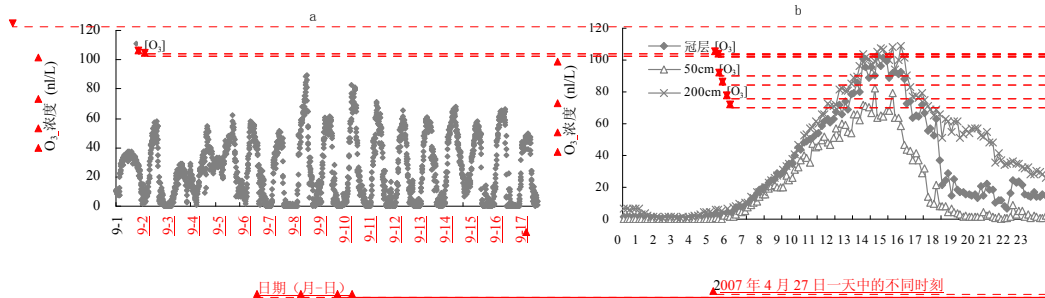


图 6 O<sub>3</sub> 背景浓度值在时间尺度 (a, 2007 年数据) 和不同垂直高度上 (b) 的变异

Fig. 6 The temporal (a) and vertical (b) variation of background ozone concentration.

表 1 2007、2008、2009 年平台控制精度

Table 1 System control precision in 2007, 2008, 2009

时间段	控制精度					TAR
	≥95%	≥90%	≥85%	≥80%	<80%	
2007 年麦季	37.3	71.6	88.7	92.5	7.5	0.98
2007 年稻季	45.1	73.6	90.2	91.6	8.4	0.99
2008 年麦季	46.1	74.9	88.4	94.4	5.6	1.00
2008 年稻季	39.2	70.2	85.3	89.3	10.7	1.01
2009 年麦季	42.5	69.9	86.2	92.1	7.9	1.00
2009 年稻季	45.7	73.6	87.1	91.7	8.3	0.99

### 2.4 FACE圈内臭氧浓度的空间分布

为了确保 FACE 圈内布气的均匀性, 我们测量 FACE 圈内 13 个分布点的 O<sub>3</sub> 浓度, 并通过 Kring 插值得到整个生长季节 FACE 圈内日 7 h 平均 (9:00 ~ 16:00) O<sub>3</sub> 浓度 M7 的分布。从 2007 年稻季和 2008 年麦季的 O<sub>3</sub> 浓度 M7 值分布情况来看 (图 7), FACE 圈内最高 O<sub>3</sub> 浓度、最低 O<sub>3</sub> 浓度以及中心点的 M7 值分别为 61.7、50.9、55.7 nL/L 和 66.6、61.2、62.7 nL/L, 圈内浓度与控制中心点的浓度误差均 <10%, 这表明系统能有效地控制 FACE 圈内均匀放气。同时, 从风向上看, 在稻季风向主要为东北、东、东南风; 在麦季风向主要为南、东南、东风。由于放气方向为上风方向的 3 根管, 从而圈内 O<sub>3</sub> 浓度分布基本上沿风向对称分布, 由边沿向中心逐步降低。

### 2.5 风速对控制精度的影响

在无风情况下, O<sub>3</sub> 气体的释放基本上是以浓度扩散的形式进行的, 这对系统控制提出了很高的要求。在国外 O<sub>3</sub>-FACE 平台中, 当风速 <0.3 m/s 时, 由于控制难度大容易造成 O<sub>3</sub> 在圈内的蓄积和浪涌, 平台是停止布气的。我们在平台运行初期同样遇到这一问题,

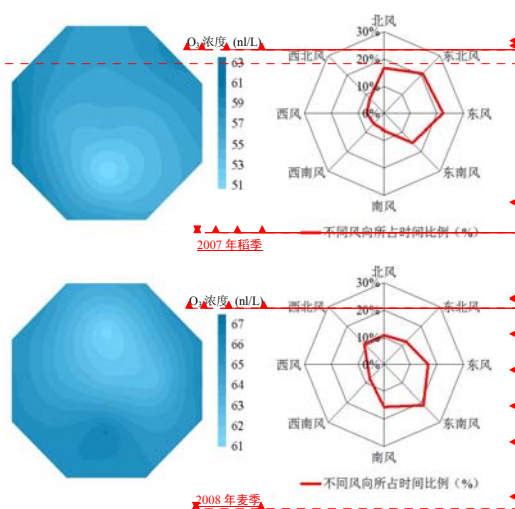


图 7 2007 年稻季和 2008 年麦季 FACE 圈内 O<sub>3</sub> 浓度分布图以及主风向示意图

Fig. 7 O<sub>3</sub> concentration distribution in FACE ring and main wind direction in 2007 rice season and 2008 wheat season

带格式的：页眉，两端对齐  
 删除的内容：... [54]  
 带格式的：... [55]  
 删除的内容：<sp>  
 带格式的：两端对齐  
 删除的内容：AMB  
 删除的内容：FACE [O<sub>3</sub>]  
 带格式的：字体：七号  
 带格式的：... [56]  
 带格式的：... [57]  
 带格式的：... [58]  
 删除的内容：AMB  
 带格式的：字体：七号  
 带格式的：... [59]  
 删除的内容：FACE [O<sub>3</sub>]  
 带格式的：... [60]  
 带格式的：... [61]  
 删除的内容：AMB  
 带格式的：... [62]  
 删除的内容：FACE [O<sub>3</sub>]  
 带格式的：字体：七号  
 带格式的：... [63]  
 带格式的：... [64]  
 删除的内容：AMB  
 带格式的：字体：七号  
 带格式的：... [65]  
 带格式的：... [66]  
 删除的内容：FACE [O<sub>3</sub>]  
 带格式的：... [67]  
 带格式的：... [68]  
 带格式的：... [69]  
 带格式的：字体：小六  
 带格式的：... [70]  
 带格式的：字体：小六  
 带格式的：... [71]  
 带格式的：右  
 带格式的：字体：小六  
 带格式的：... [72]  
 带格式的：字体：小六  
 带格式的：字体：小六  
 带格式的：居中  
 带格式的：... [73]  
 带格式的：... [74]  
 带格式的：... [75]  
 删除的内容：)  
 带格式的：... [76]  
 带格式的：... [77]  
 删除的内容：  
 删除的内容：  
 删除的内容：2.3 平台控制  
 ... [78]  
 删除的内容：(%)  
 带格式的：... [79]  
 带格式的：列数：2  
 带格式的：... [80]  
 带格式的：字体：七号  
 带格式的：... [81]  
 带格式的：... [82]  
 带格式的：... [83]  
 ... [84]



从表 2 可以看出, 相比有风情况下较高的控制精度而言, 在风速  $<0.3$  m/s 情况下, 控制精度显著降低。

为此我们特别针对低风速条件下的平台控制进行了研究, 通过系统在低风速条件下使用较小的 P、I、D 值, 减少流量计算步长, 增加低风速条件下流量要

求的修正参数, 以及抬高放气管使  $O_3$  气体在释放管与作物冠层之间有足够空间扩散等方法, 有效地解决了低风速下控制 FACE 平台放气这一难题。从表 3 可以看出, 经过改进, 在风速  $<0.3$  m/s 的情况下, 控制精度在 80% 以上的时间占此风速条件下放气时间的 80% 以上。

表 2 改进控制方法前不同风速范围下平台控制精度 (2007 年麦季)

Table 2 System control precision under different wind speed ranges before adjustment

风速范围 (m/s)	控制精度					所占时间比例 (%)
	$\geq 95\%$	$\geq 90\%$	$\geq 85\%$	$\geq 80\%$	$< 80\%$	
$\leq 0.3$	21.0	40.9	58.5	71.9	28.1	18.9
$> 0.3, \leq 1.0$	33.4	58.9	76.3	87.4	12.6	15.1
$> 1.0, \leq 2.0$	40.4	69.5	85.2	93.2	6.9	32.1
$> 2.0, \leq 3.0$	45.8	74.3	87.9	94.2	5.8	18.9
$> 3.0, \leq 4.0$	46.7	74.6	89.5	94.3	5.7	9.4
$> 4.0$	50.5	82.1	90.8	95.6	4.4	5.6

表 3 改进控制方法后不同风速范围下平台控制精度 (2007 年稻季)

Table 3 System control precision under different wind speed range after adjustment

风速范围 (m/s)	控制精度					所占时间比例 (%)
	$\geq 95\%$	$\geq 90\%$	$\geq 85\%$	$\geq 80\%$	$< 80\%$	
$\leq 0.3$	33.9	59.1	75.8	85.8	14.2	15.8
$> 0.3, \leq 1.0$	43.3	72.1	87.4	93.6	6.4	14.7
$> 1.0, \leq 2.0$	47.5	76.8	90.3	94.6	5.4	43.7
$> 2.0, \leq 3.0$	49.2	78.2	90.8	95.6	4.4	21.2
$> 3.0, \leq 4.0$	47.8	76.3	90.1	94.8	5.2	4.2
$> 4.0$	42.5	73.7	89.6	95.8	4.2	0.4

### 3 小结

本研究建立了  $O_3$ -FACE 平台, 实现在开放体系中模拟未来  $O_3$  浓度升高的情形, 其关键技术在于:

- (1) 设置安全控制单元, 保障平台运行的安全性。
- (2) 系统通过风速限定方程、流量修正方程等, 实现自动调整控制参数。
- (3) 低风速下布气的有效控制。

通过对平台运行 3 年来的结果分析,  $O_3$ -FACE 系统能够在目标区域内对  $O_3$  浓度的精确控制, 各项指标满足研究工作的需要。下一步工作的主要方向是研究在开放体系下, 同时调控大气中多个组分气体的控制平台, 如同时调控  $O_3$  和  $CO_2$  气体, 为应对全球变化对农业生态系统的影响, 提供更好的研究手段和研究方法。

### 参考文献:

- [1] Ashmore MR, Emberson LD, Karlsson PE, Pleijel H. Introduction for ozone deposition special issue. Atmospheric Environment, 2004, 38: 2 211-2 212
- [2] Ashmore MR. Assessing the future global impacts of ozone on vegetation. Plant, Cell and Environment, 2005, 28: 949-964
- [3] Wang HX, Kiang CS, Tang XY, Zhou XJ, Chameides WL. Surface ozone: A likely threat to crops in Yangtze delta of China. Atmospheric Environment, 2005, 39: 3 843-3 850
- [4] Wang XK, Manning W, Feng ZW, Zhu YG. Ground-level ozone in China: Distribution and effects on crop yields. Environmental Pollution, 2007, 147: 394-400
- [5] Emberson LD, Buker P, Ashmore MR, Mills G, Jackson LS, Agrawal M, Atikuzzaman MD, Cinderby S, Engardt M, Jamir C, Kobayshi K, Oanh NTK, Quadir QF, Wahid A. A comparison of

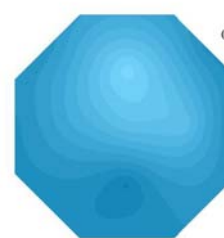
带格式的: 加宽量 0.2 磅

带格式的: 加宽量 0.2 磅

带格式的: 加宽量 0.2 磅

带格式的: 缩进: 首行缩进: 19.5 磅

删除的内容:



... [97]

... [98]

删除的内容: (2007. subsoat)

删除的内容: (%)

删除的内容: 为此我们特别

... [99]

删除的内容: (2007. rino)

... [100]

删除的内容: (%)

带格式表格

带格式的: 列数: 2

带格式的: 列数: 1

带格式的: ... [101]

带格式的: 字体: 11 磅

带格式的: ... [102]

带格式的: 两端对齐, 行距: 固定值 15 磅

带格式的: ... [103]

带格式的: 行距: 固定值 16.55 磅

带格式的: ... [104]

带格式的: 行距: 固定值 16.55 磅

带格式的: 项目符号和编号

删除的内容:



- North American and Asian exposure-response data for ozone effects on crop yields. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 1 945-1 953
- [6] Wang XP, Mauzerall DL. Characterising distributions of surface ozone and its impacts on grain production in China, Japan and South Korea: 1990 and 2020. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 4 383-4 402
- [7] Emberson LD, Ashmore MR, Cambridge HM, Simpson D, Tuovinen JP. Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environmental Pollution*, 2000, 109: 403-413
- [8] Feng ZZ, Kobayashi K, Ainsworth EA. Impact of elevated ozone concentration on growth, physiology, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2008, 14: 2 696-2 708
- [9] Fuhrer J, Skarby L, Ashmore MR. Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environmental Pollution*, 1997, 97: 91-106
- [10] Kobayashi K. Variation in the relationship between ozone exposure and crop yield as derived from simple models of crop growth and ozone impact. *Atmospheric Environment*, 1997, 31: 703-714
- [11] Pleijel H, Danielsson H, Emberson LD, Ashmore MR, Mills G. Ozone risk assessment for agricultural crops in Europe: Further development of stomatal flux and flux-response relationships for European wheat and potato. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 3 022-3 040
- [12] Nussbaum S, Fuhrer J. Difference in ozone uptake in grassland species between open-top chambers and ambient air. *Environmental Pollution*, 2000, 109: 463-471
- [13] Piikki K, Temmerman LD, Hogy P, Pleijel H. The open-top chamber impact on vapour pressure deficit and its consequences for stomatal ozone uptake. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 6 513-6 522
- [14] Long SP, Ainsworth EA, Leakey DB, Nosberger J, Ort DR. Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations. *Science*, 2006, 312: 1 918-1 921
- [15] 刘钢, 韩勇, 朱建国, 冈田益己, 中村浩史, 吉本真由美. 稻麦轮作 FACE 系统平台 I. 系统结构与控制. *应用生态学报*, 2002, 13: 1 253-1 258
- [16] Morgan PB, Bernacchi CJ, Ort DR, Long SP. An in vivo analysis of the effect of season-long open-air elevation of ozone to anticipated 2050 levels on photosynthesis in soybean. *Plant Physiol.*, 2004, 135: 2 348-2 357
- [17] Morgan PB, Mies TA, Bollero GA, Nelson RL, Long SP. Season-long elevation of ozone concentration to projected 2050 levels under fully open-air conditions substantially decreases the growth and production of soybean. *New Phytologist*, 2006, 170(2): 333-343

## Ozone Concentration Enrichment System Under Fully Free-air Condition in Agricultural Field (O<sub>3</sub>-FACE)

TANG Hao-ye<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>, HAN Yong<sup>1</sup>, ZHU Jian-guo<sup>1</sup>, KAOBAYASHI Kazuhiko<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 The University of Tokyo, Tokyo 113, Japan)

**Abstract:** The first Free Air Ozone Concentration Enrichment system (O<sub>3</sub>-FACE) was established in Asia under rice-wheat rotation system. The O<sub>3</sub>-FACE included O<sub>3</sub> gas supply unit, O<sub>3</sub> gas controlled-release unit and system communication and monitoring unit. The target O<sub>3</sub> concentration for the FACE plots was 50% higher than the instantaneous ambient O<sub>3</sub> concentration in the control plots. The O<sub>3</sub> gas release was controlled at each FACE ring with a logic based on wind direction, wind speed and O<sub>3</sub> concentration at the center of the plot. Based on 3 years results, the achieved fluctuation of O<sub>3</sub> concentration was within ±15% of the target value for 85% of the time, and within ±20% of the target value for 90% of the time. The O<sub>3</sub> concentration reduced in the FACE ring from border to center along the main wind direction. The variation of O<sub>3</sub> distribution in FACE ring was lower than ±10% compared with O<sub>3</sub> concentration at the center of the plot. The achieved fluctuation of O<sub>3</sub> concentration was within ±20% of the target value for 80% of the time under low wind speed condition (wind speed < 0.3 m/s).

**Key words:** Ozone (O<sub>3</sub>), Free-air, FACE, Agricultural ecosystem

带格式的：页眉，两端对齐

删除的内容：

删除的内容：

带格式的：两端对齐，行距：固定值 15 磅

带格式的：行距：固定值 15.5 磅

删除的内容：A

删除的内容：g

带格式的：字体：非倾斜

删除的内容：ozone

页 833: [1] 删除的内容	xuxiaoyu	2010-10-05 22:19:00
:		
页 833: [1] 删除的内容	xuxiaoyu	2010-10-05 22:20:00
页 837: [2] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 18:12:00
字体: 倾斜		
页 837: [2] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 18:12:00
字体: 倾斜		
页 837: [3] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 18:16:00
字体: 六号		
页 837: [3] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:23:00
字体: 倾斜		
页 837: [4] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 18:16:00
字体: 五号, 非倾斜		
页 837: [4] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 18:16:00
字体: 五号		
页 837: [4] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 18:16:00
字体: 五号, 非倾斜		
页 837: [5] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 18:18:00
字体: 六号, 倾斜		
页 837: [5] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 18:18:00
字体: 六号		
页 837: [5] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 18:18:00
字体: 六号, 倾斜		
页 837: [5] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 18:18:00
字体: 倾斜		
页 837: [5] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 18:18:00
字体: 倾斜		
页 837: [5] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 18:16:00
字体: 六号		

页 837: [6] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:26:00
字体: 倾斜		
页 837: [6] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:26:00
字体: 倾斜		
页 837: [6] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:26:00
字体: 倾斜		
页 837: [6] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:26:00
字体: 倾斜		
页 837: [6] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:26:00
字体: 倾斜		
页 837: [6] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:26:00
字体: 倾斜		
页 837: [6] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:27:00
字体: 倾斜		
页 838: [7] 带格式的	xuxiaoyu	2010-09-19 7:24:00
行距: 1.5 倍行距		
页 838: [8] 带格式的	xuxiaoyu	2010-09-19 7:21:00
行距: 固定值 3 磅, 制表位: 4 字符, 左对齐		
页 838: [9] 删除的内容	xuxiaoyu	2010-10-05 21:42:00
AMB [O <sub>3</sub> ]		
-----分页符-----		
FACE [O <sub>3</sub> ]		
页 838: [10] 删除的内容	xuxiaoyu	2010-10-05 21:42:00
AMB [O <sub>3</sub> ]		
-----分页符-----		
FACE [O <sub>3</sub> ]		
页 838: [11] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:25:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六		
页 838: [11] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:25:00

字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六

页 838: [12] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 838: [13] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 838: [14] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六		
页 838: [14] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体		
页 838: [14] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六		
页 838: [14] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六		
页 838: [15] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:39:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 10 磅		
页 838: [15] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 838: [16] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:39:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 10 磅		
页 838: [16] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 838: [17] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六, (国际) 宋体		
页 838: [17] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六		
页 838: [17] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六		
页 838: [18] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00



字体: 小六, (国际) 宋体

页 838: [18] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
------------------	----------	---------------------

字体: 小六

页 838: [18] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
------------------	----------	---------------------

字体: 小六

页 838: [19] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
------------------	----------	---------------------

行距: 固定值 12 磅

页 838: [20] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
------------------	----------	---------------------

行距: 固定值 12 磅

页 838: [21] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:46:00
------------------	----------	---------------------

行距: 1.5 倍行距, 制表位: 11 字符, 左对齐 + 32.5 字符, 左对齐

页 838: [22] 带格式的	xuxiaoyu	2010-09-19 7:24:00
------------------	----------	--------------------

行距: 1.5 倍行距

页 838: [23] 删除的内容	xuxiaoyu	2010-10-05 21:42:00
-------------------	----------	---------------------

AMB

[O<sub>3</sub>]

-----分页符-----

FACE [O<sub>3</sub>]

页 838: [24] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
------------------	----------	---------------------

缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅

页 838: [25] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
------------------	----------	---------------------

字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六

页 838: [25] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
------------------	----------	---------------------

字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体

页 838: [25] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
------------------	----------	---------------------

字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六

页 838: [25] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
------------------	----------	---------------------

字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六

页 838: [26] 删除的内容	xuxiaoyu	2010-10-05 21:42:00
-------------------	----------	---------------------

AMB

[O<sub>3</sub>]

-----分页符-----

FACE [O<sub>3</sub>]

页 838: [27] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 838: [28] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六		
页 838: [28] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六		
页 838: [29] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:39:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 10 磅		
页 838: [29] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 838: [30] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:39:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 10 磅		
页 838: [30] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 838: [31] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:39:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 10 磅		
页 838: [31] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 838: [32] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六, (国际) 宋体		
页 838: [32] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六		
页 838: [32] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六		
页 838: [33] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六, (国际) 宋体		
页 838: [33] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六		

页 838: [33] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六		
页 838: [34] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
行距: 固定值 12 磅		
页 838: [35] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
行距: 固定值 12 磅		
页 838: [36] 删除的内容	xuxiaoyu	2010-10-05 21:42:00
AMB <span style="float: right;">[O<sub>3</sub>]</span>		
-----分页符-----		
FACE [O <sub>3</sub> ]		
页 838: [37] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 838: [38] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六		
页 838: [38] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体		
页 838: [38] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六		
页 838: [38] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六		
页 838: [39] 删除的内容	xuxiaoyu	2010-10-05 21:42:00
AMB <span style="float: right;">[O<sub>3</sub>]</span>		
-----分页符-----		
FACE [O <sub>3</sub> ]		
页 838: [40] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 838: [41] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六		
页 838: [41] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:26:00
字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 小六		
页 838: [42] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:39:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 10 磅		

页 838: [42] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 838: [43] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:39:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 10 磅		
页 838: [43] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 838: [44] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六, (国际) 宋体		
页 838: [44] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六		
页 838: [44] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六		
页 838: [45] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六, (国际) 宋体		
页 838: [45] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六		
页 838: [45] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
字体: 小六		
页 838: [46] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
行距: 固定值 12 磅		
页 838: [47] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
行距: 固定值 12 磅		
页 838: [48] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:46:00
缩进: 首行缩进: 0 字符, 段落间距段前: 4 磅, 行距: 固定值 9 磅		
页 838: [49] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:38:00
居中, 行距: 固定值 12 磅		
页 838: [50] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:46:00
段落间距段前: 6 磅, 行距: 固定值 15 磅		



页 838: [51] 带格式的	xuxiaoyu	2010-09-19 7:27:00
字体: 黑体		
页 838: [51] 带格式的	xuxiaoyu	2010-09-19 7:27:00
字体: (国际) 黑体		
页 838: [51] 带格式的	xuxiaoyu	2010-09-19 7:27:00
字体: (国际) 黑体		
页 838: [51] 带格式的	xuxiaoyu	2010-09-19 7:27:00
字体: (国际) 黑体		
页 838: [52] 带格式的	xuxiaoyu	2010-09-19 7:27:00
字体: (默认) 黑体, (中文) 黑体		
页 838: [53] 带格式的	xuxiaoyu	2010-09-19 7:30:00
行距: 固定值 15 磅		
页 833: [54] 删除的内容	xuxiaoyu	2010-10-05 22:19:00
:		
页 833: [54] 删除的内容	xuxiaoyu	2010-10-05 22:20:00
页 839: [55] 带格式的	xuxiaoyu	2010-09-19 7:31:00
行距: 固定值 2 磅		
页 839: [56] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:52:00
行距: 固定值 10 磅		
页 839: [57] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:39:00
字体: (中文) 宋体, 五号		
页 839: [58] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:40:00
缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅		
页 839: [59] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:58:00
缩进: 左侧: 1.4 磅, 行距: 固定值 10 磅		
页 839: [60] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:39:00
字体: (中文) 宋体, 五号		
页 839: [61] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:55:00

缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅

页 839: [62] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:58:00
------------------	----------	---------------------

缩进: 左侧: 1.4 磅, 行距: 固定值 7 磅

页 839: [63] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:39:00
------------------	----------	---------------------

字体: (中文) 宋体, 五号

页 839: [64] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:55:00
------------------	----------	---------------------

缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅

页 839: [65] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:39:00
------------------	----------	---------------------

字体: (中文) 宋体, 五号

页 839: [66] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:58:00
------------------	----------	---------------------

缩进: 左侧: 1.4 磅, 行距: 固定值 7 磅

页 839: [67] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:55:00
------------------	----------	---------------------

缩进: 左侧: 2.85 磅, 行距: 固定值 11 磅

页 839: [68] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
------------------	----------	---------------------

字体: 小六, (国际) 宋体

页 839: [68] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
------------------	----------	---------------------

字体: 小六

页 839: [68] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
------------------	----------	---------------------

字体: 小六

页 839: [69] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
------------------	----------	---------------------

字体: 小六, (国际) 宋体

页 839: [69] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
------------------	----------	---------------------

字体: 小六

页 839: [69] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
------------------	----------	---------------------

字体: 小六

页 839: [70] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
------------------	----------	---------------------

行距: 固定值 12 磅

页 839: [71] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 21:31:00
------------------	----------	---------------------

行距: 固定值 12 磅

页 839: [72] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:32:00
------------------	----------	---------------------

右, 行距: 固定值 11.2 磅

页 839: [73] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:34:00
------------------	----------	---------------------

字体: 宋体, 小六

页 839: [73] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:34:00
------------------	----------	---------------------

字体: 小六

页 839: [73] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:34:00
------------------	----------	---------------------

字体: 小六

页 839: [74] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:44:00
------------------	----------	---------------------

行距: 固定值 20 磅

页 839: [75] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:06:00
------------------	----------	---------------------

字体: Times New Roman

页 839: [75] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:27:00
------------------	----------	---------------------

字体: (默认) Times New Roman, (中文) Arial Unicode MS, (国际) Arial Unicode MS

页 839: [75] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:27:00
------------------	----------	---------------------

字体: (中文) Arial Unicode MS

页 839: [76] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:27:00
------------------	----------	---------------------

字体: (默认) Times New Roman, (中文) Arial Unicode MS, (国际) Arial Unicode MS

页 839: [76] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:27:00
------------------	----------	---------------------

字体: (中文) Arial Unicode MS, (国际) Times New Roman

页 839: [76] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:27:00
------------------	----------	---------------------

字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体

页 839: [76] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:27:00
------------------	----------	---------------------

字体: (中文) Arial Unicode MS, (国际) Arial Unicode MS

页 839: [76] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:06:00
------------------	----------	---------------------

字体: Times New Roman

页 839: [76] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:06:00
------------------	----------	---------------------

字体: Times New Roman

页 839: [76] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:06:00
------------------	----------	---------------------

带格式的

页 839: [76] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:06:00
------------------	----------	---------------------

字体: Times New Roman

页 839: [76] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:06:00
------------------	----------	---------------------

字体: Times New Roman

页 839: [77] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:43:00
------------------	----------	---------------------

居中, 行距: 固定值 14 磅

页 839: [78] 删除的内容	xuxiaoyu	2010-09-19 7:28:00
-------------------	----------	--------------------

### 2.3 平台控制精度

平台的控制精度通常用 TAR (target achievement ratio) 来反映, TAR 值的计算如下:

$$\text{TAR} = \text{FACE 圈 O}_3 \text{ 浓度测定值} / \text{O}_3 \text{ 浓度设定值}$$

对于整个作物生长季中平台的控制精度, 可以用 FACE 圈中心控制点 O<sub>3</sub> 浓度的平均 TAR 值来反映。TAR 越接近于 1, 表示控制精度越好, TAR>1, 表示在统计时间段内 O<sub>3</sub> 浓度大于设定值, TAR<1, 表示在统计时间段内 O<sub>3</sub> 浓度小于设定值。从表 1 可以看出, 在各个作物生长季, TAR 值都接近于 1, 控制精度在 85% 以上的时间占总放气时间的 85% 以上; 控制精度在 80% 以上的时间占总放气时间的 90% 以上。

页 839: [79] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-11 21:44:00
------------------	----------	---------------------

行距: 固定值 18 磅

页 839: [80] 带格式的	xuxiaoyu	2010-09-19 7:37:00
------------------	----------	--------------------

缩进: 首行缩进: 19.5 磅

页 839: [81] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:01:00
------------------	----------	---------------------

行距: 固定值 8 磅

页 839: [82] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:01:00
------------------	----------	---------------------

字体: 七号, (国际) 宋体

页 839: [82] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:01:00
------------------	----------	---------------------

字体: 七号

页 839: [82] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:01:00
------------------	----------	---------------------

字体: 七号



页 839: [83] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:04:00
------------------	----------	---------------------

缩进: 左侧: 2.85 磅, 首行缩进: 2.75 磅, 行距: 固定值 11 磅

页 839: [84] 删除的内容	xuxiaoyu	2010-10-05 21:42:00
-------------------	----------	---------------------

AMB

[O<sub>3</sub>]

分页符

FACE [O<sub>3</sub>]

页 839: [85] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:03:00
------------------	----------	---------------------

字体: 七号

页 839: [85] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:03:00
------------------	----------	---------------------

字体: 七号

页 839: [85] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:03:00
------------------	----------	---------------------

字体: 七号

页 839: [85] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:03:00
------------------	----------	---------------------

字体: 七号

页 839: [86] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:02:00
------------------	----------	---------------------

缩进: 首行缩进: 19.5 磅, 制表位: 8 字符, 左对齐

页 839: [87] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:01:00
------------------	----------	---------------------

行距: 固定值 8 磅

页 839: [88] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:01:00
------------------	----------	---------------------

字体: 七号, (国际) 宋体

页 839: [88] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:01:00
------------------	----------	---------------------

字体: 七号

页 839: [88] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:01:00
------------------	----------	---------------------

字体: 七号

页 839: [89] 带格式的	xuxiaoyu	2010-09-19 7:37:00
------------------	----------	--------------------

缩进: 首行缩进: 19.5 磅

页 839: [90] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:03:00
------------------	----------	---------------------

缩进: 首行缩进: 19.5 磅, 制表位: 8 字符, 左对齐 + 9.5 字符, 左对齐

页 839: [91] 带格式的 xuxiaoyu 2010-10-05 22:04:00  
 缩进: 首行缩进: 19.5 磅, 制表位: 8.5 字符, 左对齐 + 9.5 字符, 左对齐

页 839: [92] 带格式的 xuxiaoyu 2010-09-19 7:37:00  
 缩进: 首行缩进: 19.5 磅

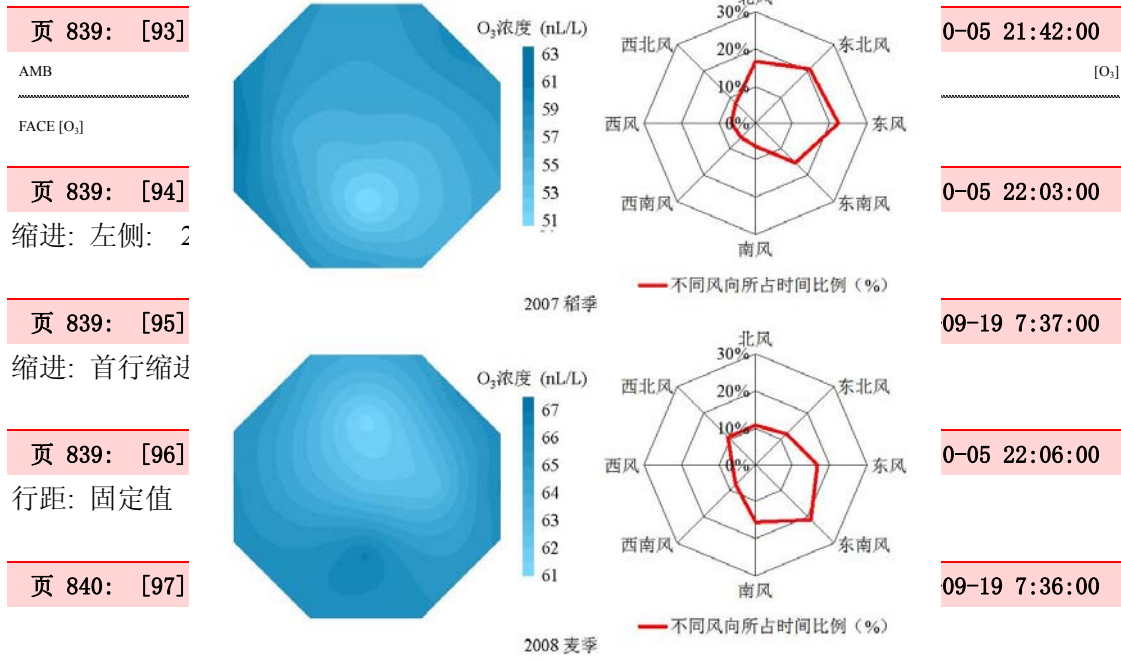


图 7 2007 年稻季和 2008 年麦季 FACE 圈内 O<sub>3</sub> 浓度分布图以及主风向示意图

Fig. 7 O<sub>3</sub> concentration distribution in FACE ring and main wind direction in 2007 rice season and 2008 wheat season

## 2.5 风速对控制精度的影响

在无风情况下, O<sub>3</sub> 气体的释放基本上是以浓度扩散的形式进行的, 这对系统控制提出了很高的要求。在国外 O<sub>3</sub>-FACE 平台中, 当风速 < 0.3 m/s 时, 由于控制难度大容易造成 O<sub>3</sub> 在圈内的蓄积和浪涌, 平台是停止布气的。我们在平台运行初期同样遇到这一问题, 从表 2 可以看出, 相比有风情况下较高的控制精度而言, 在风速 < 0.3 m/s 情况下, 控制精度显著减低。

页 840: [98] 删除的内容 xuxiaoyu 2010-10-05 22:08:00  
 (2007 wheat season)

页 840: [99] 删除的内容 xuxiaoyu 2010-09-19 7:35:00

为此我们特别针对低风速条件下的平台控制进行了研究, 通过系统在低风速条件下使用较小的 P、I、D 值, 减少流量计算步长, 增加低风速条件下流量要求的修正参数, 以及抬高放气管使 O<sub>3</sub> 气体在释放管与作物冠层之间有足够空间扩散等方法, 有效地解决了低风速下控制 FACE 平台放气这一难题。从表 3 可以看出, 经过改进, 在风速 < 0.3 m/s 的情况下, 控制精度在 80% 以上的时间占此风速条件下放气时间的 80% 以上。

页 840: [100] 删除的内容 xuxiaoyu 2010-10-05 22:08:00

(2007 rice season)

页 840: [101] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:13:00
段落间距段前: 0 磅, 段后: 0 磅, 行距: 固定值 12 磅		
页 840: [102] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:11:00
段落间距段前: 6 磅, 行距: 固定值 17 磅, 不调整西文与中文之间的空格		
页 840: [103] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:15:00
两端对齐, 缩进: 左侧: 0 磅, 悬挂缩进: 3.97 字符, 行距: 固定值 15.7 磅		
页 840: [104] 带格式的	xuxiaoyu	2010-10-05 22:15:00
缩进: 首行缩进: 1.57 字符, 行距: 固定值 16.55 磅		