

一种新型自然光气体熏蒸平台:系统结构与控制精度

赵轶鹏, 邵在胜, 宋琪玲, 赖上坤, 周 娟, 王云霞, 秦 超, 杨连新*, 王余龙*

(扬州大学江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点, 江苏 扬州 225009)

摘 要: 研制新建自然光气体熏蒸平台主要用于开展大气环境变化对作物影响的研究。该平台采用分布式拓扑结构, 通过监测系统实时探知温度、湿度、光照、压力以及目标气体浓度的变化, 利用温度、湿度调控系统和布气系统实现对外界环境的动态模拟, 使气室内气象因子与室外基本一致, 并使气体浓度达预定目标要求。平台设置室外对照(Ambient)、室内对照(CK)、高浓度臭氧([O₃])、高浓度二氧化碳([CO₂])和高浓度 O₃ 和 CO₂ ([O₃×CO₂]) 5 个处理, 其中室内对照实时模拟室外环境, [O₃] 处理为 Ambient 的 1.6 倍, [CO₂] 处理比 Ambient 高 200 ppm。2011 年水稻生长季气室运行结果表明, [CO₂] 和 [O₃] 控制精度在 90% 以上的时间占总布气时间的比例分别达 95% 和 80% 以上, 温度、湿度和大气压力控制精度在 90% 以上的时间均占总运行时间的 95% 以上, 平台光照控制精度在 90% 以上的时间占总运行时间的 75% 以上。整个布气期间, CO₂ 和 O₃ 浓度平均控制目标完成比(target achievement ratios, TAR) 分别为 1.01 和 1.00, 温度、湿度、光照和大气压 TAR 分别达 1.01、0.99、0.96 和 1.00。稳态熏蒸测试结果表明, 气室内 O₃、CO₂、温度和湿度的水平分布和垂直分布均匀, 控制稳定。

关键词: 封闭式气室; 气体熏蒸; 动态模拟; 系统结构和控制; 精度

中图分类号: X16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)11-2082-12

System Structure and Control Accuracy of a Solar-illuminated Gas Fumigation Platform

ZHAO Yi-peng, SHAO Zai-sheng, SONG Qi-ling, LAI Shang-kun, ZHOU Juan, WANG Yun-xia, QIN Chao, YANG Lian-xin*, WANG Yu-long*
(Key Laboratory of Crop Genetics & Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: A sunlit fumigation system was developed to study the influence of atmospheric changes on crop growth and development. The system adopted distributed topology and real time monitors to control environmental factors inside chambers such as temperature, humidity, illumination and atmospheric pressure, as well as carbon dioxide concentration [CO₂] and ozone concentration [O₃]. The real time simulation of ambient conditions through temperature control unit, humidity control unit and gas distribution system enabled meteorological factors inside chambers close to the open-air conditions, while trace gases such as [CO₂] and [O₃] concentration reached target levels. The target [CO₂] for the elevated CO₂ plots was controlled to 200 ppm above ambient and the elevated [O₃] was 60% higher than the ambient [O₃] in the control plots. We had tested the performance of the system by identifying the spacial and temporal distribution of meteorological factors and target gas concentration. The control performance of the chamber system in 2011 rice growing season showed that, with 1-min average value across 2011 rice growing seasons, the elevated [O₃] and [CO₂] was within 10% of the target for more than 95% and 80%, respectively. The temperature, humidity and atmospheric pressure were within 10% of the target for more than 95%, whereas the frequency within ±10% of the target illumination intensity was more than 75%. Across the 2011 rice season, the target achievement ratios (TAR) of CO₂, O₃, temperature, relative humidity, illumination intensity, atmospheric pressure were 1.01, 1.00, 1.01, 0.99, 0.96 and 1.00, respectively. The constant fumigation test inside the chamber showed uniform distribution of CO₂, O₃, temperature and humidity inside the chamber in both horizontal and vertical directions.

Keywords: closed-top chamber; gas fumigation; dynamic simulation; system structure and control; accuracy

收稿日期: 2012-05-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31071359, 31171460, 30871486); 江苏省高校自然科学重大基础研究项目(11KJA210003); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(0812201233); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 赵轶鹏(1980—), 男, 吉林省白城市人, 博士研究生, 主要从事全球气候变化生态学研究。E-mail: zhaoyipeng@yeah.net

* 通信作者: 王余龙 E-mail: ylwang@yzu.edu.cn; 杨连新 E-mail: lxyang@yzu.edu.cn

工业革命的出现和人口的快速增长导致我们的大气环境以前所未有的速度发生改变,例如大气二氧化碳(CO_2)和近地层臭氧(O_3)浓度的升高^[1]。大气组分变化及其对重要农作物的影响已经受到国内外科学界的广泛关注^[2-5]。研究大气组分变化对作物的影响需要特定的试验设施。1896年,Schroeder等^[6]研制了首个封闭式气体熏蒸实验系统,用以研究蔬菜对二氧化硫(SO_2)的响应。随后气候室系统不断得到改进和更新,先后历经封闭式气室(Closed-top Chamber)^[7-11]、开顶式气室(Open-top Chamber, OTC)^[12-14]及开放式空气中气体浓度增高系统(Free-air gas concentration enrichment, FACE)^[15-18]等几个主要发展阶段。同密闭式或开顶式气室比较,FACE系统不受隔离设施的影响,试验区域更为接近自然环境,因此被认为是研究未来环境对作物生长和产量实际影响的最理想平台^[19]。但相对气室而言,FACE建设及运行成本远高于气室,对目标气体的控制精度偏低,且限于当前的技术条件,较难实现多个气候因子互作(例如 CO_2 、 O_3 和温度等)的研究,包括最重要的粮食作物水稻^[9],因此,气体熏蒸系统在全球气候变化研究中仍发挥着不可替代的作用。为了使气室熏蒸系统更加真实地模拟未来作物生长的大气和农田环境,我们在借鉴传统气候室优点的基础上于2010年研制新建了自然光气体熏蒸平台,这一新型气体熏蒸系统增大了试验空间,采用自然采光特别是土培方式培育水稻植株(避免盆栽方式对根系生长的限制),并实现了对外界环境的动态模拟,目前主要用于 CO_2 和 O_3 互作研究。本文比较系

统地介绍这一新型自然光气体熏蒸平台系统的结构、控制及运行状况。

1 平台结构与控制

自然光气体熏蒸平台(以下简称平台)位于江苏省扬州市扬州大学试验基地内($32^\circ 23.3' \text{N}$, $119^\circ 25.0' \text{E}$),土壤类型为清泥土,年日照2140 h,年平均气温为 14.8°C ,年平均相对湿度79%,年平均降水量1020 mm,年降水天数125 d,年蒸发量1441 mm。

1.1 平台架构及组成

平台于2010年4月开工建设,6月23日试运行。该平台为双层构架式结构,下层为设备间,长8.5 m,宽8.0 m,高约2.4 m,净使用面积 56 m^2 ,上层为四间独立气室,是由3 mm无色钢化玻璃(理想状态下透光率可达95%左右)围护而成的相对密闭空间。单个气室长、宽均为3.0 m,使用面积约为 6 m^2 ,容积约为 15 m^3 。南北两组气室之间设置两个室外对照(长约2.8 m,宽约0.6 m),见图1。

本平台由温湿度调控系统、气体熏蒸系统、监测控制系统以及保护和报警系统共四个子系统组成。由平台附属气象站观测采集室外温度、湿度、 CO_2 浓度、 O_3 浓度、光照、大气压力、风速和风力等主要气象参数信息,同时,通过温湿度传感器(EE21, E+E elektronik)、光照传感器(HD2021T, Delta)、气压测定仪(CYB-36S, Delta)、 CO_2 分析仪(LI-820, LI-COR)和 O_3 分析仪(49i, Thermo fisher scientific)监测各室主要环境参数与气体浓度,主控系统(S7-200, Siemens)实



图1 自然光气体熏蒸平台全景(A)和下层设备间(B)

Figure 1 The full view(A) and the equipment room(B) of solar-illuminated fumigation platform

时接收采集信息并反馈调节各主要控制因子,使室内外环境差异维持在最小水平。

1.2 温湿度调控系统

1.2.1 制冷和加热单元

采用变频双机组(FN40-S, Hitachi)调节气室内温湿度。变频机组由驱动电路、室外机电源电路、室内机电源电路、室外机风扇电机控制电路、室内外机通信电路、单片微电脑及其外围构成的主控电路等组成。通过压缩机吸气管等处的温度传感器将采样信息传递至微电脑控制器,由微电脑控制变频器的频率。变频机组用电子膨胀阀取代了热力膨胀阀,可通过控制阀门开启度调节制冷剂流量,使压缩机转速与膨胀阀的开度相适应,从而使蒸发器的能力得到最大程度的发挥,使用变频机组可提高温度控制精度,使温度控制误差不大于 0.5℃。

使用不锈钢电热管加热。对加热单元进行模块化整合,可通过无极调控装置任意调节加热量,并根据热量控制需要自由输出。换热器为交叉式蒸发器设计,提高散热效率同时降低了能耗。

1.2.2 加除湿装置

采用电热蒸汽加湿机调节气候室内湿度,此种加湿方式属洁净加湿,室内不会因加湿出现白粉现象。通过制冷系统把循环空气的温度降至所需湿度的露点(霜点)温度以下,使空气中的水蒸气凝结成水珠,附着在蒸发器上,以此降低室内湿度并达到目标值。通过温湿度探头采集湿度信息,由工控机(Programmable logic controller, PLC)反馈调节室内湿度。

1.2.3 气流循环方式

采用空气调节箱的方式,使目标气体在进入气室前即与空气均匀混合,送风管道采用大风口设计方式,以此维持空气在长距离扩散后的均一性。采用侧送侧回的气流组织形式,自一侧向上送风,再从另一侧回风。风口处覆以铝合金百叶,以调节气流循环的方向。此外,为了维持室内空气中非处理气体含量的相对稳定性及保持室内外压力的一致,在空调箱上设有新风及排风管路,可通过调节阀门的开合度,适量补充新风,保证受试作物的正常生长。

1.3 气体熏蒸系统

熏气系统主要由气体供应系统,气体混合及释放系统和气体采集监控系统三部分构成。平台每间气候室都有各自独立的 CO₂ 和 O₃ 气体供应单元,系统会根据各室实际需求,通过控制 CO₂ 电磁阀的开合频率及 O₃ 发生器的工作时间,调节输出流量,向各气室输

入 CO₂ 及 O₃。

1.3.1 CO₂ 熏气系统

CO₂ 供应系统由 80 L 标准 CO₂ 钢瓶、压力调节装置、送气管道及气体混合释放单元组成。CO₂ 浓度控制系统由 PLC、电磁阀及 CO₂ 采样分析单元构成。平台 CO₂ 监控系统由上位机、PLC 和 CO₂ 浓度分析仪组成(图 2)。钢瓶中的 CO₂ 流经减压阀,减压汽化为高纯度 CO₂,通过高强度 PU 耐压输气管,输出至回风口,由循环风带入混气箱,同箱内空气混匀后,再由出风口排出至室内。

室外 CO₂ 浓度由气象站 CO₂ 分析仪测定,同时,各气室均设一台相同型号的 CO₂ 分析仪监测室内 CO₂ 浓度,由外置气泵进样,实时(1 s)分析样气中的 CO₂ 浓度,测得数据采用模拟量(使用 5V 模拟电压输出通道连接 PLC)方式输出至 PLC,由上位机记录 1 min 内的 CO₂ 浓度均值。

1.3.2 O₃ 熏气系统

O₃ 供应系统主要由 O₂ 供应单元、O₃ 发生单元、供气管路以及混气释放单元组成(图 3)。与 CO₂ 不同,由于 O₃ 气体易分解,无法长期贮存,因此采用了即时发生-控制混气-常压输出的方式。液态 O₂ 从钢瓶(80 L)流经减压阀汽化,通过输气管路提供给有气源一体式高浓度臭氧发生器(QD0013A, 广州佳环),利用高频高压放电产生 O₃,生成的 O₃ 再输入混气单元,经高速风机混匀后,排放到气室中。每间气室都有各自独立的 O₃ 供应系统,系统根据各气室实际 O₃ 流量需求,通过调控 O₃ 发生器的工作时间,调节输送至各气候室混气单元中 O₃ 的气体流量。由于气室试验空间相对密闭,以工业用 O₂ 为气源的高浓度 O₃ 发生器可产生最高浓度约为 100 mg·L⁻¹ 的 O₃, 完全满足试验对 O₃ 浓度的要求。

O₃ 熏气监控系统亦为可靠性较高且易于扩充和维护的分布式拓扑结构(图 3)。上位机与各 PLC 连接,PLC 连接各系统单元对应的仪器设备,采集并储存监测到的数据信息并传输到上位机,同时接受上位机发出的指令并转化成电信号,从而监测并控制各仪器设备的工作状态。O₃ 分析仪将计算出 O₃ 浓度显示在前方面板并以 0~5 V 电压模拟量的形式输出数据至 PLC。

1.4 监测控制系统

1.4.1 上位机控制软件

利用 VS2008(Microsoft Visual Studio 2008)开发平台设计制作的上位机控制软件可通过与 PLC 的数

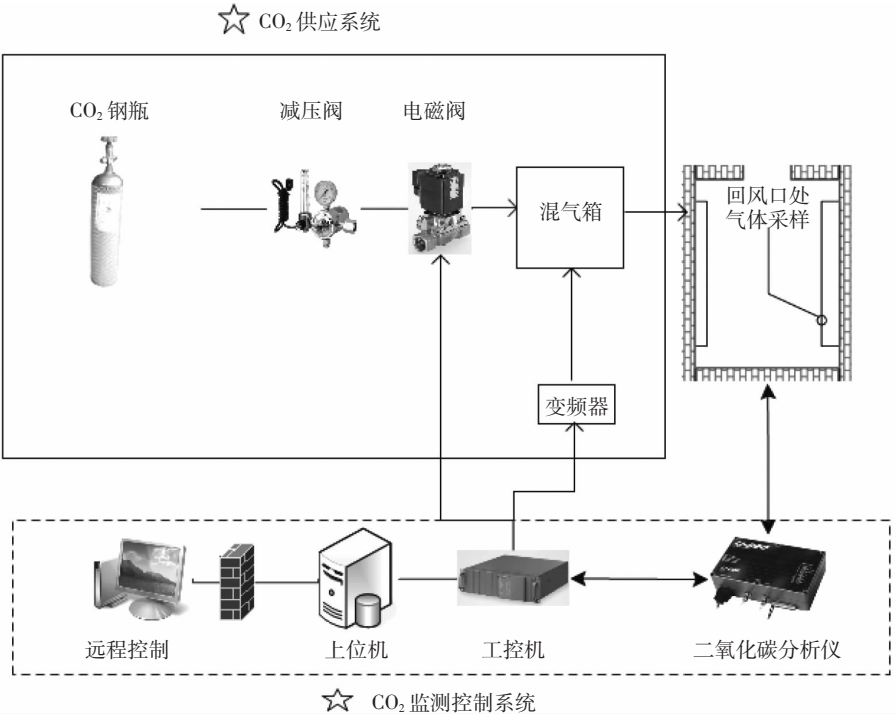


图 2 二氧化碳熏气系统构成
Figure 2 The structure of CO₂-fumigation system

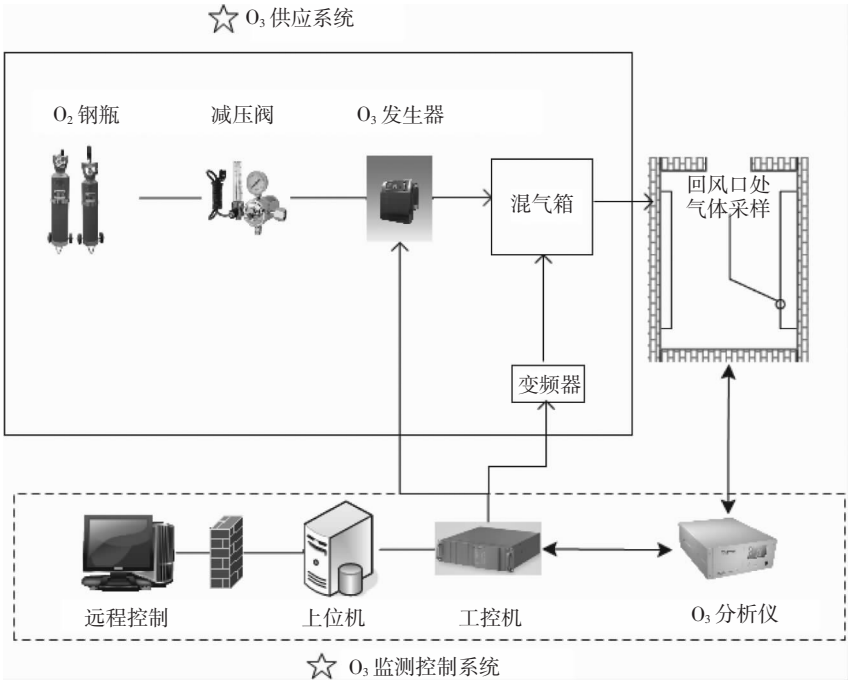


图 3 O₃ 熏气系统
Figure 3 The structure of ozone-fumigation system

据交换,实现终端实时的在线监测。

用户登入后,可实现系统监控、手动和自动控制转换、参数设定、警报设置、数据管理等多种功能。其中,系统监控可直观显示即时采集到的温湿度、气体浓度、光照、压力等参数。控制转换功能可实现对设备

的选择性操作。通过参数设置可调整通讯端口、数据保存间隔时间、环境参数控制目标值、设备定时开关。报警设置可设定报警参数的上下限及警报方式。

1.4.2 通讯方式

办公室上位监控计算机与气室各 PLC 通过半

双工 485 通讯模块连接通讯,采用自由口通讯协议,方便灵活,可控性、扩展性强。通过 C Sharp 自主开发上位机软件嵌套 Microsoft SQL Server 2008 数据库平台来对 PLC 发出控制指令及提取存储数据等一系列操作。

以气象站 CPU226 为主机,主站 CPU226 和其他 CPU226 之间用网络读写指令互相进行通讯。上位机与 CPU226 采用自由口的通讯方式,以 1 次多字节的形式完成所有 PLC 的信息交换,保证通讯的速度。

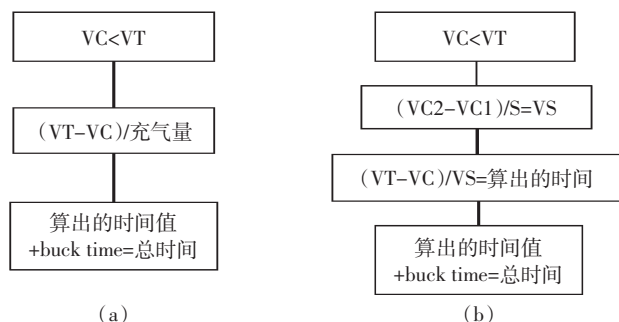
1.4.3 控制及算法

PLC 实时分析处理采集到的运行数据,可直接显示在对应的触控屏上,监视界面显示信息包括:各室及气象站温湿度、气体浓度、光照、压力以及室外风速风向等设备状态信息(加湿状态、制冷状态和加热状态等),可以动态变化曲线或表格的形式显示,此外还可对历史数据进行查询及导出操作。PLC 采集数据的精度是由 AD(adam module)采集模块决定的,借助 PLC 的模拟量滤波功能,使采集到的信号更加稳定。同时,强电柜中安装了大功率浪涌抑制器,可有效避免强电干扰,保证系统稳定运行。

采用 PID(闭环控制)算法控制气体浓度。该算法具有简单、稳定和可靠性高等优点,但 PID 调节过程常有较大的超调量,需要经过一段时间才能衰减到给定值上。基于此,本气室监控系统应用波波夫(Popov)超稳定性定理,采用了模型参考自适应系统算法对环境进行控制,调节系统为一个单调节回路,即在调节对象上用一个调节对象保持参数恒定。这样可以提供寻找自适应律更大的灵活性。同时在 CO_2 及 O_3 控制中增加了自定义算法,使气体控制更精确、更稳定。以 CO_2 为例:当 CO_2 浓度当前值低于设置的浓度下限时,电磁阀开放时间等于所需补充气体释放的时间与充气时间之和(图 4)。为了使当前 CO_2 浓度维持在上下限设定值之间,需通过计算得到 CO_2 的耗散周期,这一时间为维持目标 CO_2 浓度所需的气体补入时间与充气时间之和(图 5)。图 6 所示为设备动作流程,充气时间决定了电磁阀的动作及这一动作持续的时间。

1.5 保护及报警系统

为了保障平台安全平稳的运行,我们增加了安全控制单元,对压缩机高低压、压机热继过载、压机相序、加湿缺水、内风机热继过载、电加热超温、压机低压和外风机热继过载等设置了保护装置,并可实现声音及图像报警,同时,程序会记录相关报警信息并保



VT: 浓度下限 (ppm); VA: 浓度上限 (ppm); VC: 浓度当前值 (ppm); VC1: 测试补充前浓度 (ppm); VC2: 测试 S 秒后浓度 (ppm); S: 测试的时间 (s); VS: 测试算出的每秒可补充量 ($\text{ppm} \cdot \text{s}^{-1}$); 充气量: 每秒可充气体的量 (ppm); buck time: 充气时间 (s), 下同。

图 4 快速补充气体流程:(a)为方法 1;(b)为方法 2

Figure 4 Two methods of make-up of gas(a and b)

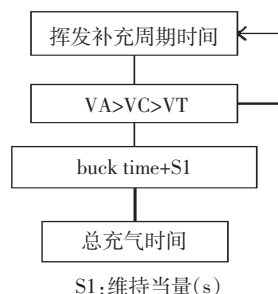


图 5 状态维持自动控制流程

Figure 5 Procedure of automatic control for stable state

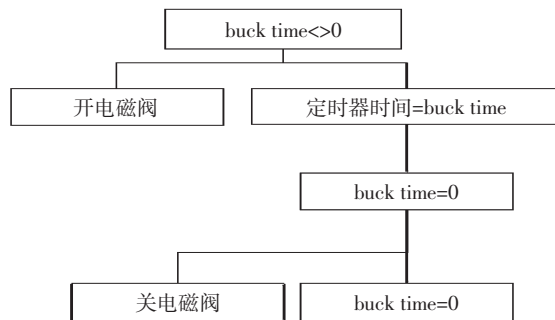


图 6 设备动作流程

Figure 6 The action of automatic control device

存为历史记录,此记录可以.xls 的格式导出。此外,通过 GSM 短信模块实现了远程查询气室运行状态及发送报警短信的功能。

2 结果与讨论

本试验系统在 2010 年试运行的基础上,针对运行过程中发现的问题,逐一进行了改进和完善。本文重点报告 2011 年平台测试和运行结果。

2.1 平台性能测试

2.1.1 稳态熏蒸测试

稳态熏蒸测试首先对气室内同一高度不同水平

位点[CO₂]、[O₃]、温度和湿度进行监测,这四个参数的目标值分别设定为 600 ppm、100 ppb、25 ℃和 50%。在 U 型土培池的三个中心点及回风口分别放置气体分析仪采样口和温湿度传感器,并分别定义为 I、Ⅱ、Ⅲ及Ⅳ测试点(图 7)。由工控机同时采集[CO₂]、[O₃]、温度和湿度等参数,上位机软件记录每分钟均值,结果列于表 1。由表可知,60 cm 或 110 cm 平面各测试点平均[CO₂]、温度和湿度与目标值几乎没有差异,精度均达100%;两平面各点平均[O₃]与目标浓度亦无差异,精度达 92%以上。

稳态熏蒸测试还检验了气室垂直面各主要控制因子分布的一致性。在气室中心点距离土层表面 30、60 cm 和 110 cm 以及回风口处各布设一个采样点,同时采集各点[CO₂]、[O₃]、温度和湿度等参数,并记录1 min 内的均值。表 2 表明,气室内不同垂直高度间平均[CO₂]、温度和湿度均与目标值相同,各测试点参数的控制精度均达 99%以上。尽管各测试点平均[O₃]亦与目标浓度相同,但各测试点[O₃]控制精度均略低于其他参数,特别是 I 和Ⅲ测试点控制精度(87%~89%)。

综上可知,本系统能有效控制气室内同一高度不同水平位点以及不同高度的[CO₂]、[O₃]、温度和湿度,

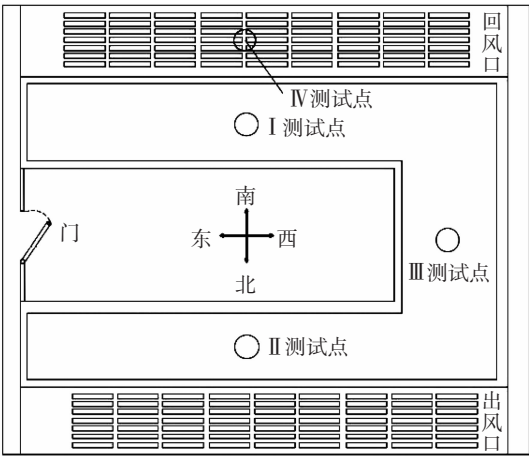


图 7 稳态熏蒸测试测试点分布

Figure 7 The distribution of test points in the constant target test

使各点气体浓度和温、湿度基本一致。

2.1.2 动态目标值熏气测试

动态熏气性能测试主要比较气室内外以及各气室间的[CO₂]、[O₃]、温度和湿度。稳态熏蒸测试结果表明,回风口与其他各点间主要环境因子基本相同(表 1~表 2)。因此,我们将动态熏气测试的采样点分别移至四间气室回风口处。与稳态熏蒸测试不同,动态熏气测试的目标值随气象站实时采集的[CO₂]、[O₃]、温度

表 1 稳态熏蒸测试主控因子水平分布¹

Table 1 The horizontal distribution of main variables in the constant target test¹

高度/cm	控制因子	参数	I ²	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
60	[CO ₂](ppm)	均值±SD	600±3.2a ⁴	600±3.1a	600±3.3a	600±2.9a
		精度 ³ (%)	100	100	100	100
	[O ₃](ppb)	均值±SD	100.5±2.0a	100.3±2.2a	100.5±1.9a	100.2±1.8a
		精度(%)	99.5	96.2	99.5	98.4
	温度(℃)	均值±SD	24.98±0.1ab	24.95±0.1a	24.99±0.1ab	25.0±0.1b
		精度(%)	100	100	100	100
	湿度(%)	均值±SD	50.0±0.4a	50.1±0.4a	49.9±0.4a	50.0±0.4a
		精度(%)	100	100	100	100
	[CO ₂](ppm)	均值±SD	600±2.5a	600±2.3a	600±2.0a	600±2.2a
		精度(%)	100	100	100	100
110	[O ₃](ppb)	均值±SD	100.4±2.0a	100.3±2.7a	100.1±2.3a	100.1±1.8a
		精度(%)	97.3	92.3	94.5	100
	温度(℃)	均值±SD	24.99±0.1a	25.02±0.1a	25.02±0.1a	25.01±0.1a
		精度(%)	100	100	100	100
	湿度(%)	均值±SD	50.0±0.4a	50.0±0.4a	50.0±0.3a	50.0±0.4a
		精度(%)	100	100	100	100

注:1. 2011 年 6 月 6—8 日测试结果,持续测试 6 h,测试期天气分别为晴、多云和阴转多云; 2. I、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ分别表示南、北、西和回风口测试点; 3. 精度是指控制误差设定为目标值的 5%时,在此误差范围内的采样值总数占全部测试数据的百分比; 4. 同行数据不同字母表示处理间差异显著,S.N.K 多重比较,df=179,显著水平为 0.05。

表 2 稳态熏蒸测试主控因子垂直分布

Table 2 The vertical distribution of main variables in the constant target test

控制因子	参数	I	II	III	IV
[CO ₂](ppm)	均值±SD	600±5.9a	600±5.0a	600±5.6a	600±5.3a
	精度(%)	99.8	100	99.8	100
[O ₃](ppb)	均值±SD	100±3.1a	100±2.4a	100±3.4a	100.1±2.2a
	精度(%)	89.3	97.7	87.3	97.7
温度(℃)	均值±SD	25.0±0.2a	25.0±0.2a	25.0±0.2a	25.0±0.2a
	精度(%)	99.6	100	100	99.2
湿度(%)	均值±SD	50.0±0.6a	50.0±0.6a	50.0±0.5a	50.0±0.6a
	精度(%)	100	100	100	100

1. 2011 年 6 月 9—13 日测试结果,当日测试持续时长均为 4 h,除 6 月 10 日为中雨外,其余时间天气状况均为阴;2. I、II、III 及 IV 分别代表回风口、30、60 cm 和 110 cm 处测试点。

和湿度参数值而变,这对平台的控制提出了更高要求。根据试验需要,我们共设置了 5 种处理,具体熏气方案见表 3。其中,气室内 CO₂ 和 O₃ 的处理浓度和时间参考了中国 CO₂-FACE^[20]和 O₃-FACE^[18]的设定值。

熏蒸平台的控制状态,通常用 TAR(target achievement ratio)值和控制精度来表示,TAR=实际测定值/设定目标值,TAR 值越接近 1,说明控制水平越

高;精度=1-|TAR-1|,统计时分别计算了控制精度达到 95%、90%及低于 85%的时间占总时间的比例,采用 1 min 均值来考察平台控制情况。由表 4~表 5 可知,各处理控制区域内四个参数的测试值与室外对照间均存在极显著正相关关系($P_R<0.01$),各处理测试参数与室外对应参数(目标值)间亦无显著差异($P_i>0.05$);四个测试参数各处理TAR 值均达1.00,平台

表 3 2010—2012 年水稻生长季熏气处理方案

Table 3 Fumigation treatments for rice seasons from 2010 to 2012

处理	位置	气体浓度值	气体释放时间
室外对照(Ambient)	室外	大气本底浓度 ¹	—
室内对照(CK)	B 室	大气本底浓度	9:00 至日落 ² 补充室内 O ₃
高浓度 O ₃	A 室	O ₃ 本底浓度×160%	9:00 至日落
高浓度 CO ₂	C 室	CO ₂ 本底浓度+200 ppm	日出至日落
高浓度 CO ₂ ×O ₃	D 室	CO ₂ 本底浓度+200 ppm; O ₃ 本底浓度值×160%	日出至日落 9:00 至日落

1.由气象站采集;2.由气象站光照传感器控制。当光照传感器测得的照度≥0.3 klx 时,定义为日出;照度<0.2 klx 时,定义为日落^[21]。

表 4 动态熏气测试气体浓度控制精度

Table 4 Gas concentration control precision in dynamic fumigation test

年份	处理	CO ₂ /ppm					O ₃ /ppb				
		均值±SE	精度			P_i	均值±SE	精度			P_i
			≥95%	≥90%	<85%			≥95%	≥90%	<85%	
2011	Ambient	399.5±1.0	—	—	—	—	84.4±1.0	—	—	—	—
	CK	399.6±0.9	99.0	100	0	0.71	77.9±1.6	69.1	91.5	2.5	0.66
	O ₃	399.4±1.0	95.7	100	0	0.68	134.4±1.5	73.9	96.2	0.3	0.60
	CO ₂	600.4±1.0	97.2	100	0	0.15	80.1±1.3	64.6	91.0	4.0	0.85
	CO ₂ ×O ₃	601.0±0.8	81.4	99.2	0	0.20	132.9±1.6	77.9	96.2	0.8	0.19
2012	Ambient	430.2±0.3	—	—	—	—	25.3±0.1	—	—	—	—
	CK	430.1±0.2	100	100	0	0.60	25.2±0.1	90.3	99.1	0	0.06
	O ₃	430.7±0.3	100	100	0	0.53	40.3±0.2	94.7	100	0	0.07
	CO ₂	630.4±0.6	100	100	0	0.76	25.3±0.1	91.2	98.7	0.9	0.69
	CO ₂ ×O ₃	630.3±0.5	99.6	100	0	0.92	40.4±0.2	94.7	98.7	0	0.59

1. P_i :配对样本 t 测验概率;2.2011 年 6 月 14—20 日和 2012 年 3 月 15 日进行了动态熏蒸测试,时长达 8 h,2011 年 6 月 14、17 和 18 日为阴雨天气,其余均为多云天气,2012 年 3 月 15 日天气状况为小雨,下同。

表 5 动态熏气测试温湿度控制精度
Table 5 Temperature and relative humidity control precision in dynamic fumigation test

年份	处理	温度/℃					湿度/%				
		均值±SE	精度			P_i	均值±SE	精度			P_i
			≥95%	≥90%	<85%			≥95%	≥90%	<85%	
2011	Ambient	27.5±0.0	—	—	—	—	62.3±3.3	—	—	—	—
	CK	27.6±0.1	99.7	100	0	0.69	62.4±3.4	89.0	100	0	0.11
	O ₃	27.5±0.0	100	100	0	0.96	62.3±3.6	95.6	99.2	0	0.90
	CO ₂	27.6±0.0	100	100	0	0.08	62.3±3.6	95.5	99.7	0	0.94
	CO ₂ ×O ₃	27.6±0.0	100	100	0	0.35	62.3±3.3	92.1	100.0	0	0.63
2012	Ambient	9.8±0.0	—	—	—	—	56.5±3.4	—	—	—	—
	CK	9.8±0.0	100	100	0	0.52	56.5±4.6	98.2	100	0	0.86
	O ₃	9.8±0.0	100	100	0	0.50	56.5±2.6	95.7	100	0	0.46
	CO ₂	9.7±0.0	100	100	0	0.38	56.5±3.3	100	100	0	0.37
	CO ₂ ×O ₃	9.8±0.0	100	100	0	0.87	56.5±4.3	98.5	99.6	0	0.90

[CO₂]和[O₃]控制精度在 90% 以上的时间分别占总放气时间的 100% 和 90%。平台温度控制精度在 95% 以上的时间均达总时间的 100% 左右,湿度控制精度在 90% 以上的时间占测试时间的 99% 以上。两年测试结果表明,系统可实现对[CO₂]、[O₃]、温度和湿度的有效控制,其中 2012 年的控制精度稍高于 2011 年,特别是 O₃ 浓度。与国内外代表性 OTC 比较^[13,25,28],平台对温度控制精度提高明显。

2.2 水稻生育期平台运行状态

完成平台性能测试工作后,于 2011 年的 6 月 20 日移栽水稻秧苗入室,秧苗返青期内仅对温度、湿度进行调控,待秧苗返青后,7 月 1 日开始进行熏气处理。平台投入使用以来,除 7 月 12—13 日因雷暴天气系统全天停止运行以及因仪器校准和设备检修等原因短时间暂停布气外,其余时间系统工作正常,平台主控因子水稻生长季变异见图 8。

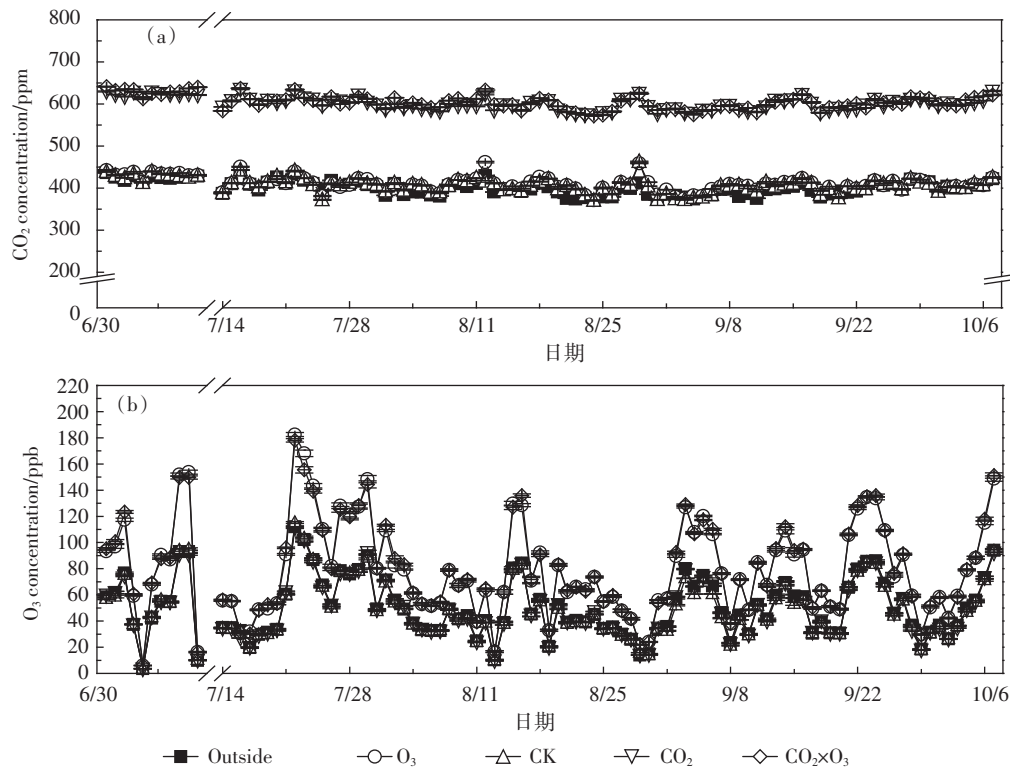
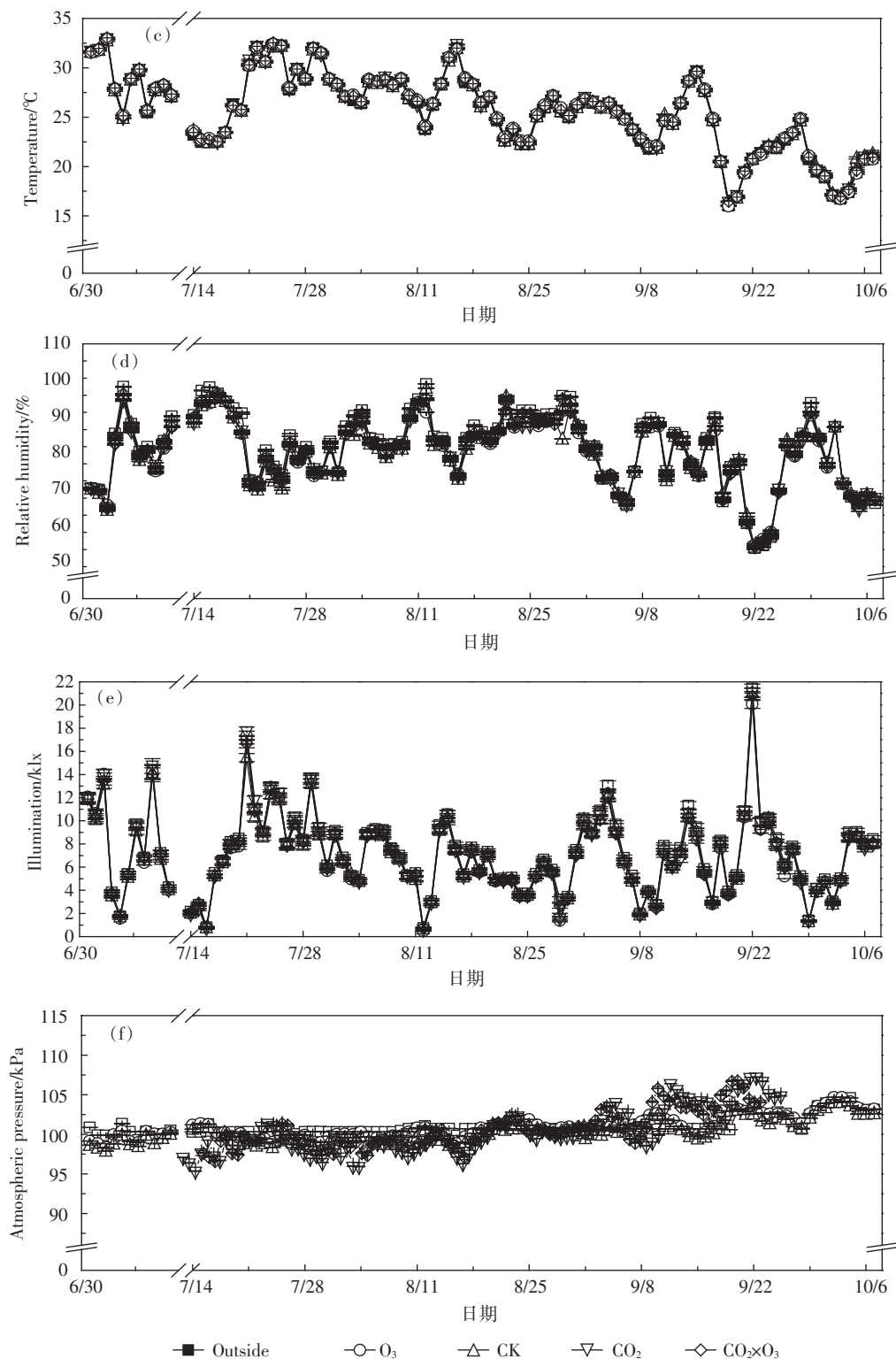


图 8 2011 年平台控制状态
Figure 8 System performance in 2011



[CO₂]和[O₃]为熏气时间段内均值,温度、湿度、光照和压力取当日(24 h)均值;图中的误差线为该系列的标准误差

续图 8 2011 年平台控制状态

Continued figure 8 System performance in 2011

从图 8 及表 6 可见:(1)2011 年水稻生长季各处理平均[CO₂]及[O₃]均与目标值接近,两者 TAR 值变幅在 0.98~1.02 之间,其中,平台[CO₂]控制精度在 90%以

上的时间占总放气时间的比例达 95%以上,而[O₃]控制精度在 90%以上的时间占总放气时间的比例为 80%以上,均高于 FACE 平台(表 7)。(2)平台各处理

表 6 2011 年水稻生育期平台控制精度
Table 6 The accuracy of system performance during rice season in 2011

环境因子	处理	均值±SE	TAR	精度/%		
				≥95%	≥90%	<85%
[CO ₂](ppm)	Ambient	402.9±1.7	—	—	—	—
	CK	407.5±1.8	1.01	82.4	97.4	0.4
	O ₃	409.8±1.8	1.02	77.3	96.0	0.8
	CO ₂	602.5±1.6	1.00	87.9	98.2	0.6
	CO ₂ ×O ₃	605.2±1.7	1.01	80.4	96.7	0.8
[O ₃](ppb)	Ambient	50.8±2.3	—	—	—	—
	CK	49.8±3.7	0.98	57.9	83.2	6.6
	O ₃	81.0±2.3	1.01	56.9	80.4	9.4
	CO ₂	50.2±2.3	0.99	58.2	80.2	8.8
	CO ₂ ×O ₃	81.3±3.7	1.01	57.5	81.0	9.0
温度(℃)	Ambient	24.2±0.4	—	—	—	—
	CK	24.4±0.4	1.01	95.2	99.7	0.0
	O ₃	24.3±0.4	1.01	96.1	99.9	0.0
	CO ₂	24.4±0.4	1.01	98.6	99.8	0.0
	CO ₂ ×O ₃	24.4±0.4	1.01	98.2	100	0.0
湿度(%)	Ambient	77.8±1.1	—	—	—	—
	CK	76.9±1.0	0.99	77.5	95.2	1.2
	O ₃	76.9±1.0	0.99	77.5	98.1	0.2
	CO ₂	76.9±1.0	0.99	78.2	96.5	0.5
	CO ₂ ×O ₃	77.0±1.0	0.99	82.4	97.9	0.3
光照(klx)	Ambient	7.2±0.4	—	—	—	—
	CK	6.9±0.4	0.96	61.3	76.8	14.6
	O ₃	7.0±0.3	0.94	51.1	75.1	13.2
	CO ₂	7.0±0.4	0.95	58.9	78.1	13.2
	CO ₂ ×O ₃	7.0±0.3	0.98	57.6	75.8	15.1
压力(kPa)	Ambient	101±0.1	—	—	—	—
	CK	101±0.1	0.99	100	100	0.0
	O ₃	101±0.1	1.00	100	100	0.0
	CO ₂	101±0.2	1.00	100	100	0.0
	CO ₂ ×O ₃	101±0.1	1.00	100	100	0.0

平均温度、湿度和大气压力等环境因子与室外基本相同;各参数 TAR 值变幅在 0.99~1.01 之间,平台温度、湿度和压力控制精度在 90% 以上的时间占总运行时间的 95% 以上,高于 OTC 的控制水平(表 7)。2011 年水稻生长季各处理平均照度均低于外界平均照度(7.2 klx);各处理 TAR 值在 0.94~0.98 之间,平台光照控制精度在 90% 以上的时间占总运行时间的 75% 以上。王惠永等^[22]设计建造的自然光照人工气候室平均透光率接近 90%;孔令凯等^[23]对塑料温室的观测结果表明其照度的控制精度低于 85% 以下。Kim 等^[24]的研究也得出了相似的结论。综上所述,2011 年水稻生育期内,控制区域内目标气体浓度分布均匀,控制准

确,气象因子的控制精度较高,实现了动态模拟目标。
FACE 平台可在完全开放的农田条件下运行,最接近于自然农田环境,但通常控制精度偏低(表 7)而试验成本较高,与 FACE 系统相比,封闭式气室对目标气体控制的精度较高,控制方式灵活,可进行多因子互作的研究,且成本相对较低,因此目前依然广泛应用于全球变化研究领域。封闭式实验系统存在的主要问题是试验空间大多比较狭小^[7,9],多数采用盆栽^[22]或温床^[11]的方式培养受试植物,很多密闭气室多使用人工光源且常以通入恒定浓度目标气体的方式进行熏蒸。而本试验平台在借鉴传统气候室优点(如精度较高、成本较低)的基础上进行改进,除了有效拓展了试

表 7 国内外代表性气体熏蒸平台控制精度
Table 7 System performance of typical fumigation platforms in the world

地点及所属单位	试验平台	建成年份	采样点数	主控因子精度/%		参考文献
				温度(≥95%)	气体浓度(≥90%)	
法国菲克亚塑料大棚	封闭温室	1989	1	0	—	孔令凯等 ^[23]
密西根州立大学	封闭气室	1982	—	—	50	Sekiya 等 ^[7]
英国西苏塞克斯郡农作物研究中心	SO ₂ -OTC	1985	1	—	62	McLeod 等 ^[25]
英国悉尔索研究所	CO ₂ -CVOTC ¹	1994	1	—	80	Norris 等 ^[13]
云南省环境科学研究所	SO ₂ -OTC	1985	15	50	100	曾广权等 ^[26]
中国环科院生态研究所	SO ₂ -OTC	1986	25	—	80	舒俭民等 ^[27]
中国气象研究院	CO ₂ -OTC	1992	15	29	76	王春乙等 ^[28]
中科院动物研究所	CO ₂ -OTC	2003	15	—	100	陈法军等 ^[29]
中科院生态环境研究中心	O ₃ -OTC	2004	12	92	96	郑启伟等 ^[30]
瑞士巴塞尔植物研究所	CO ₂ -SACC ²	1994	—	—	85	Leadley 等 ^[31]
日本岩手	CO ₂ -FACE	2000	20	—	60	Okada 等 ^[16]
中国无锡	CO ₂ -FACE	2001	16	—	57	刘钢等 ^[20]
中国江都	O ₃ -FACE	2007	16	—	73	Tang 等 ^[18]
美国伊利诺伊	O ₃ -FACE	2002	1	—	82	Morgan 等 ^[17]

1: CVOTC 为 controled-ventilation open-top chamber; 2: SACC 为 screen-aided CO₂ control; [26]~[27]、[28]~[29] 援引文中测试数据估算控制精度, 其他均为试验运行期数据。

验空间,改进了受试作物的栽培方式(土培)外,还通过实时跟踪外界环境使控制区域的微环境更接近自然条件,尽管同 FACE 试验系统相比还有一定差距。

3 结论

测试结果表明,稳态及动态熏蒸测试中主控因子与目标值均极为接近或相同。全生育期 98%的时间里处于正常运行状态,[CO₂]和[O₃]控制精度在 90%以上的时间占总布气时间的比例分别达 97%和 81%,温度、相对湿度、光照强度及大气压力控制精度在 90%以上的时间占总布气时间的比例分别达 99.9%、96.9%、76.5%和 100%。相比而言,测试时的平台性能更佳,这是因为在长期运行的过程中,气象条件、组件运行的稳定性和植物自身吸收及释放等诸多因素对平台控制精度造成了影响。2011 年水稻生育期内平台运行状态稳定,与国内外同类平台比较,控制精度较高,各项指标均能满足试验的要求。这一熏蒸环境接近于自然农田的试验平台,可同时实现对空气中微量气体组分浓度、温度和湿度的控制,因此为进一步探索全球气候变化对农业生产的影响提供了新的研究手段。

参考文献:

[1] Richard A, Terje B, Nathaniel L B, et al. IPCC: Climate change 2007:

The physical science basis[R]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007:996.

[2] Wang Y X, Michael F. Stressed food: The impact of abiotic environmental stresses on crop quality[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 141: 271–286.

[3] Ainsworth E A, Long S P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment(FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂[J]. *New Phytologist*, 2005, 165(2): 351–372.

[4] 王云霞, 杨连新, Remy Manderscheid, 等. C4 作物 FACE(free air CO₂ enrichment)研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(5): 1450–1459.

WANG Yun-xia, YANG Lian-xin, Remy Manderscheid, et al. Progresses of free-air CO₂ enrichment(FACE) researches on C4 crops: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(5): 1450–1459.

[5] Yang L X, Peng S B. Agronomic avenues to maximize the benefits of rising atmospheric CO₂ concentration in the Asian irrigated rice system (review)[M]//Araus J L, Slafer G A. Crop stress management and global climate change (CABI Climate Change Series Vol. 2), CAB International Publishing, Oxon, UK, 2011: 37–46.

[6] Haywood J K. Injury to vegetation by smelter fumes[M]. Government Printing Office, Washington, DC, 1905: 7–23.

[7] Sekiya J, Wilson L G, Filner P. Resistance to injury by sulfur dioxide[J]. *Plant Physiol*, 1982, 70(2): 437–441.

[8] Musselman R C, McCool P M, Oshima R J, et al. Field chambers for assessing crop loss from air pollutants[J]. *J Environ Qual*, 1986, 15(2): 152–157.

[9] Rochette P, Ellert B, Gregorich E G, et al. Description of a dynamic closed chamber for measuring soil respiration and its comparison with

- other techniques[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1997, 77(2): 195-203.
- [10] 陈法军, 戈 峰. 一套用于控制 CO₂ 浓度的人工气候箱: CDCC-1 型密闭式动态 CO₂ 气室[J]. 昆虫知识, 2004, 41(3): 279-281.
- CHEN Fa-jun, GE Feng. A climatic chamber for controlling CO₂ concentration: CDCC-1 chamber[J]. *Entomological Knowledge*, 2004, 41(3): 279-281.
- [11] Ibrahim M, Jaafar H, Harun M, et al. Changes in growth and photosynthetic patterns of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings exposed to short-term CO₂ enrichment in a closed top chamber[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2010, 32(2): 305-313.
- [12] 王春乙, 高素华, 潘亚茹, 等. OTC-1 型开顶式气室的结构和数据采集系统[J]. 气象, 1993, 19(4): 15-19.
- WANG Chun-yi, GAO Su-hua, PAN Ya-ru, et al. System structure and control of OTC-1 open top chamber[J]. *Meteorological Monthly*, 1993, 19(4): 15-19.
- [13] Norris T, Wilkinson D, Lockwood A, et al. Performance of a controlled-ventilation open-top chamber for climate change research[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78(3-4): 239-257.
- [14] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 等. 用旋转布气法开顶式气室研究臭氧对水稻生物量和产量的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 170-175.
- ZHENG Qi-wei, WANG Xiao-ke, FENG Zhao-zhong, et al. Effects of elevated ozone on biomass and yield of rice planted in open-top chamber with revolving ozone distribution[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1): 170-175.
- [15] Hendrey G R, Ellsworth D S, Lewin K F, et al. A free-air enrichment system for exposing tall forest vegetation to elevated atmospheric CO₂ [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(3): 293-309.
- [16] Okada M, Lieffering M, Nakamura H, et al. Free-air CO₂ enrichment (FACE) using pure CO₂ injection: system description[J]. *New Phytologist*, 2001, 150(2): 251-260.
- [17] Morgan P B, Mies T A, Bollero G A, et al. Season-long elevation of ozone concentration to projected 2050 levels under fully open-air conditions substantially decreases the growth and production of soybean [J]. *New Phytologist*, 2006, 170(2): 333-343.
- [18] Tang H Y, Liu G, Han Y, et al. A system for free-air ozone concentration elevation with rice and wheat: Control performance and ozone exposure regime [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45 (35): 6276-6282.
- [19] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, et al. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations[J]. *Science*, 2006, 312(5782): 1918-1921.
- [20] 刘 钢, 韩 勇, 朱建国, 等. 稻麦轮作 FACE 系统平台 I. 系统结构与控制[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1253-1258.
- LIU Gang, HAN Yong, ZHU Jian-guo, et al. Rice-wheat rotational FACE platform I. System structure and control [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1253-1258.
- [21] Environment Directorate. Aquatic biotechnology and food safety [M]. Organisation for Economic Co-operation and Development, France, 1994: 51.
- [22] 王惠永, 王松涛, 孙学斌, 等. 自然光照人工气候室的研究[J]. 农业工程学报, 1990, 6(1): 78-84.
- WANG Hui-yong, WANG Song-tao, SUN Xue-bin, et al. A research project on phytotron with natural lighting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1990, 6(1): 78-84.
- [23] 孔令凯, 安顺清, 王春乙. 法国菲克亚塑料大棚的性能 [J]. 气象, 1991, 17(11): 51-53.
- KONG Ling-kai, AN Shun-qing, WANG Chun-yi. The function of France feikayaviny house[J]. *Meteorological Monthly*, 1991, 17(11): 51-53.
- [24] Kim S H, Reddy V R, Baker J T, et al. Quantification of photosynthetically active radiation inside sunlit growth chambers[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126(1-2): 117-127.
- [25] McLeod A R, Fackrell J E, Alexander K. Open-air fumigation of field crops: Criteria and design for a new experimental system[J]. *Atmospheric Environment*, 1985, 19(10): 1639-1649.
- [26] 曾广权, 夏 冰, 李 玲, 等. ML-1 型开顶式熏气室的构造与性能[J]. 环境科学, 1985, 6(4): 6-10.
- ZENG Guang-quan, XIA Bing, LI Ling, et al. The structure and function of ML-1 open top chamber[J]. *Environmental Sciences*, 1985, 6(4): 6-10.
- [27] 舒俭民, 曹洪法, 刘燕云, 等. 野外开顶式熏气系统 [J]. 中国环境监测, 1986, 2: 11-14.
- SHU Jian-min, CAO Hong-fa, LIU Yan-yun, et al. The open top chamber in field[J]. *Environmental Monitoring in China*, 1986, 2: 11-14.
- [28] 王春乙, 高素华, 刘江歌. OTC-1 型开顶式气室的结构和性能[J]. 环境科学进展, 1994, 2(3): 19-31.
- WANG Chun-yi, GAO Su-hua, LIU Jiang-ge. The structure and performance of OTC-1 open top chamber[J]. *Advances in Environmental Science*, 1994, 2(3): 19-31.
- [29] 陈法军, 戈 峰, 苏建伟, 等. 用于研究大气二氧化碳浓度升高对农田有害生物影响的田间试验装置: 改良的开顶式气室[J]. 生态学杂志, 2005, 24(5): 585-590.
- CHEN Fa-jun, GE Feng, SU Jian-wei, et al. An improved top-open chamber for research on effects of elevated CO₂ on agricultural pests in field[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(5): 585-590.
- [30] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 等. 用旋转布气法开顶式气室研究臭氧对水稻生物量和产量的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 170-175.
- ZHENG Qi-wei, WANG Xiao-ke, FENG Zhao-zhong, et al. Effects of elevated ozone on biomass and yield of rice planted in open-top chamber with revolving ozone distribution[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1): 170-175.
- [31] Leadley P W, Niklaus P, Stocker R, et al. Screen-aided CO₂ control (SACC): A middle ground between FACE and open-top chambers[J]. *Acta Oecologica*, 1997, 18(3): 207-219.