

郭艳亮, 王晓琳, 张晓媛, 等. 田间条件下模拟 CO₂ 浓度升高开顶式气室的改进及其效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1034–1043.

GUO Yan-liang, WANG Xiao-lin, ZHANG Xiao-yuan, et al. Improvement and performance of open-top chambers used for simulating elevated CO₂ under field conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6): 1034–1043.

田间条件下模拟 CO₂ 浓度升高 开顶式气室的改进及其效果

郭艳亮^{1,2}, 王晓琳², 张晓媛², 王丽梅^{1,2*}, 郑纪勇^{1,2}, 李世清^{1,2}

(1.西北农林科技大学/黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为提高传统开顶式气室(Open-top chamber, OTC)在田间条件下原位模拟大气 CO₂ 浓度升高对作物生长影响的适用性和精度,通过尺寸放大(长×宽×高=4.0 m×4.0 m×3.0 m)、形状调整(正四边棱柱状)、新材料应用(塑钢 PC 结构)及内部 CO₂ 浓度优化控制等措施对其进行了改进,并利用改进的 OTC 分别于 2015—2016 年在旱作春玉米农田原位模拟大气 CO₂ 浓度升高的情形,通过对比玉米生育期内 OTC 内外 CO₂ 浓度、温度和空气相对湿度,探讨了其模拟效果。结果表明:可控 CO₂ OTC 内部 CO₂ 浓度能够控制在预期值范围内,2015 年控制误差范围为-17.2~0.2 μmol·mol⁻¹,2016 年为-5.4~0.1 μmol·mol⁻¹,控制效果良好;可控 CO₂ OTC 对室内气温产生了一定的影响,与气室外相比,在白天 2015 年平均增温 0.8 °C,差异显著($P<0.05$),2016 年平均增温 0.4 °C,差异不显著($P>0.05$);可控 CO₂ OTC 内部空气相对湿度与大田相比有所降低,2015 年约降低 2.4%,2016 年降低了 3.1%,差异均不显著($P>0.05$)。研究表明,改进后的开顶式气室性能稳定,模拟精度高,能够较为准确地反映 CO₂ 浓度升高后的旱作春玉米生长,可用于今后的大田模拟试验研究。

关键词:CO₂ 浓度升高;开顶式气室;原位模拟;改进效果;春玉米

中图分类号:S162 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2017)06-1034-10 **doi:**10.11654/jaes.2017-0082

Improvement and performance of open-top chambers used for simulating elevated CO₂ under field conditions

GUO Yan-liang^{1,2}, WANG Xiao-lin², ZHANG Xiao-yuan², WANG Li-mei^{1,2*}, ZHENG Ji-yong^{1,2}, LI Shi-qing^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.College of Environment and Resources, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to improve the applicability and accuracy of Open-Top Chambers (OTCs) in simulating the effects of elevated CO₂ on crop growth and yield under field conditions, the open-top area of the chamber was increased, the shape of the bottom was modified from octagonal to square, a new material was used for the chamber walls, and fans were installed in the chamber to increase air circulation. These improved OTCs were used for simulating elevated CO₂ concentration in spring maize farmland in 2015 and 2016. The chamber measured 4.0 m × 4.0 m × 3.0 m (length × width × height) and was equipped with an automated CO₂ delivery system designed to maintain the CO₂ concentration at 700 μmol·mol⁻¹ in the chamber. During the maize growth period, CO₂ concentration, air temperature, and relative humidity were measured automatically every 10 minutes both inside and outside the OTCs. The CO₂ concentration, air temperature, and relative humidity inside the OTCs were compared to those under natural conditions, and the simulation performance was analyzed. The results demon-

收稿日期:2017-01-15

作者简介:郭艳亮(1990—),女,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要从事农业生态环境与全球变化方面的研究。E-mail:18700809599@163.com

*通信作者:王丽梅 E-mail:sdwanglimei@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31470523);国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1614);西北农林科技大学科研专项(2013BSJJ119)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31470523); The Open Foundation of State Key Laboratory, China (A314021402-1614); The Special Scientific Research Fund of Northwest A&F University (2013BSJJ119)

strated that the CO₂ concentration could be well controlled by the improved OTC system. The deviation from the targeted CO₂ concentration ranged from $-17.2 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ to $0.2 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ in 2015 and from $-5.4 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ to $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ in 2016. The mean air temperature inside the OTCs was $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ higher than that of the natural air during daytime in 2015 ($P<0.05$), and no significant difference in such was observed for 2016. There was no significant difference in relative humidity between inside and outside of the chambers ($P>0.05$). Our results indicated that the improved OTC has stable performance and high accuracy and can be used for future field simulation experiments.

Keywords: elevated CO₂; open-top chamber; simulation in situ; improved effect; spring maize

受人类活动影响,全球气候变暖形势愈来愈严峻。矿石燃料的燃烧、工业废气的排放,使近地层大气成分的含量和组成发生改变,CO₂ 浓度不断升高,造成“温室效应”。进入 20 世纪以来,全球 CO₂ 浓度由 18 世纪的 $280 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 上升到 $379 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,且以每年 $1.5\sim 2.0 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的速率不断增加^[1]。国际间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告中预测,2035 年全球大气中 CO₂ 浓度将超 $500 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,同时会伴随有气温升高、极端气象事件频繁发生^[2],专家预测到 21 世纪末大气中 CO₂ 浓度将达到 $700 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ^[3]。CO₂ 是植物进行光合作用的底物,其在大气中浓度的改变可能会影响植物的光合作用,改变植物的生长发育过程,继而导致植物地上部和地下部生物量发生变化^[4],同时也会影响土壤微生物区系和理化性质^[5]。为研究农作物对气候变化的响应,研究者采取增加 CO₂ 浓度和增温等措施,通过模拟气候变化,观察被监测植物在未来预计较高的 CO₂ 浓度和温度条件下作物生长、品质及产量的变化,来评估未来大气 CO₂ 浓度升高和温度增加的气候条件对农作物可能产生的影响。

由于研究目的以及试验水平、生态系统类型和供试作物种类的差异,国内外学者用来模拟未来气候变化趋势的研究方法不尽相同。但是一个总的原则就是通过利用 CO₂ 浓度控制装置来改变生态系统和植物生长的小气候环境,在模拟小气候环境条件下观测与分析植物生长发育的响应过程及其机理。迄今常用的 CO₂ 浓度控制措施主要有 3 种:可控环境密闭气候室、自由大气 CO₂ 施肥装置(Free-Air CO₂ Enrichment, FACE)和半封闭的开顶式气室(Open Top Chamber, OTC)。

可控环境密闭气候室是在完全封闭的空间内严格控制温湿度、水分、光照以及 CO₂ 浓度等影响植物生长的环境因子进行试验的设备^[6-7],这种方法最初被广泛应用于农作物试验研究^[8-11]。如 Robredo 等^[12]利用可控环境密闭气候室研究了 CO₂ 浓度升高条件下大

麦作物氮代谢受水分胁迫的影响程度;张瑾涛^[13]在密闭环境气候室研究了大气 CO₂ 浓度升高对玉米/大豆间作体系生长的影响及磷营养调控。FACE 是在完全开放的农田环境下利用气体输送管道分配系统建立一个大型试验圈,在作物生长冠层动态释放 CO₂,需要有模拟增温处理的试验则同时设立红外增温系统^[14-17]。Rogers 等^[18]于 1983 年首次提出 FACE 技术,美国 BNL(Brookhaven National Laboratory)于 1989 年首次投入使用,将 FACE 技术用于棉花方面的研究^[17];Schneider 等^[19]为研究黑麦草草地生态系统氮素循环对 CO₂ 浓度升高的响应,利用 FACE 系统平台进行了长达 10 年的定位试验;我国在江苏省首次利用 FACE 技术进行了稻/麦轮作体系的研究^[20]。OTC 是四周封闭、顶部敞开的半封闭气候模拟系统。美国环保局和农业部利用 Heagle 等^[21]设计的 OTC 系统研究了大气中臭氧体积分数变化对作物生长的影响^[22],国内利用该技术进行气候模拟研究的学者有陈法军等^[23]、万运帆等^[24]和许育彬等^[25]。

以上 3 种 CO₂ 浓度控制方法各有优缺点。FACE 系统与外界自然环境条件差异最小,但考虑到 FACE 系统耗材与后期营运成本高昂,而可控环境密闭气候室与外界环境差异较大等不利因素,许多学者采用开顶式气室这种比较经济,且与外界环境条件相对比较一致的模拟系统来进行相关研究。然而由于 OTC 内的植物生长环境与 CO₂ 浓度升高的纯自然条件仍存在一定差异,尤其是易导致气室内温度高于自然大气,再加上有些试验采用盆栽植物作为供试体进行研究,不能很好地代表未来气候变化条件下的自然生长条件,从而在一定程度上影响研究结果。此前一些学者也已经注意到了这些问题,并对 OTC 系统做了部分改进。如陈法军等^[23]用厚度 2.5 mm 的透明玻璃代替塑料薄膜或玻璃钢瓦,对气室壁从材料方面做了改进;万运帆等^[24]在传统 OTC 基础上增加控温系统,精确控制温度;许育彬等^[25]利用风扇进行降温,以减少 OTC(底部面积 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$)的增温效应并促进气室

内气体混匀。但是,传统 OTC 在体积和形状方面改进的研究还相对欠缺。气室体积小,不利于作物生长,尤其是长势较高的玉米,而且形状多为八变形棱柱状,不利于气室内玉米试验种植行距、株距的控制。同时,传统 OTC 虽然在材料方面有所改进,但透明玻璃的透光性能仍小于塑钢 PC 结构。

为提高传统 OTC 在田间条件下原位模拟大气 CO_2 浓度升高对作物生长影响的适用性和精度,本研究对传统 OTC 进行了尺寸、形状、材料以及内部 CO_2 浓度控制等方面的改进。通过实时监测旱作春玉米生育期内 OTC 内外大气温度、湿度以及 CO_2 浓度等的变化情况,分析评价改进后的 OTC 的模拟效果,为田间条件下气候变化模拟措施提供技术参考和实践依据。

1 材料与方法

1.1 OTC 改进设计

为使得 OTC 适应田间模拟要求,本研究在传统气室基础上进行改进,改进后的 OTC 如图 1 所示,主要由气室、 CO_2 控制系统、监测系统三个部分组成。

1.1.1 OTC 气室

OTC 气室由传统气室正八边形棱柱状改为正四边形棱柱状,便于气室内玉米种植行距和株距的精确控制。气室尺寸放大为长 $\times$ 宽 $\times$ 高=4.0 m $\times$ 4.0 m $\times$ 3.0 m,使其更适用于玉米等植株较高的作物试验种植,从而避免了因作物生长空间小而形成的温室效应。气室无底,直接立于田间土壤之上,为防止室内 CO_2 快速逸散,于 2.8 m 高度处收口,收口后顶部面积为 3.0 m $\times$ 3.0 m。考虑到气室内作物生长环境更加接近自然条

件,根据 2015 年监测数据,2016 年将顶部收口改为全部敞开。为尽可能减少气室壁对有效光辐射的吸收,气室材料选用了透光性 $\geq 98\%$ 、防结露、耐刮耐磨的塑钢 PC 结构,属聚碳酸酯耐力板,保证了高透光性而避免影响气室内光照强度,且耐用性强。

1.1.2 CO_2 控制系统

该控制系统主要包括 CO_2 减压流量阀、 CO_2 控制系统强度控制柜、数据采集控制器、供气多孔管、传感器分析仪和环流风机(中国,F-108EX)。经过 CO_2 减压流量阀和 CO_2 控制系统强度控制柜的控制调节,从钢瓶输出的 CO_2 气体经输气管从气室顶部的多孔管向下供气,由于 CO_2 密度比自然空气大,易集中于底部,在保证 CO_2 气体稳定供应的同时,于供气多孔管上方 3.0 cm 处呈三角布局增设 3 个环流风机,将释放到气室中的 CO_2 气体进行迅速混匀,并增加气室内外空气交换速度,以尽可能减少气室内外温差。在玉米生育期内,随玉米株高增加,通过手动调节释放 CO_2 的供气多孔管在气室内的高度,使其保持与玉米冠层高度一致,使得所供 CO_2 气体在玉米生长冠层均匀分布。同时,在每个环流风机边缘安装 CO_2 浓度传感器分析仪感应探头, CO_2 浓度感应探头位置需与供气多孔管同步调节,系统实时监测并调整以保证气室内 CO_2 浓度的均匀性。传感器上方设不锈钢罩防雨、烟尘等。气室内实际 CO_2 浓度通过与供气多孔管置于同一位置处的传感器分析仪进行监测并通过流量阀实时调控。另外,在大田处理小区同一高度处安装 CO_2 传感器分析仪,所测数值代表自然大气 CO_2 浓度,经过数据采集器直接传回电脑终端。

数据采集控制器根据每个气室中的 CO_2 传感器



图 1 OTC 系统结构实体照片

Figure 1 Structure photo of OTC system

返回的CO₂浓度值,对比试验模拟的CO₂浓度值(即预先设定的CO₂浓度阈值),超过设定阈值范围就启动相应调整程序模块进行调控。如果气室内CO₂浓度低于阈值需进行补充气体,数据采集控制器则自动开启对应气室CO₂电磁阀,钢瓶内的CO₂气体通过钢瓶口连接的CO₂减压阀、输气管以及打开的电磁阀,被输送到对应气室内。如果气室内CO₂浓度高于设定阈值,数据采集控制器自动关闭对应气室CO₂电磁阀,停止充气。当气室内CO₂浓度达到设定的阈值范围后,停止调节,系统探头继续处于监听状态,当气室内CO₂浓度超出了设定的阈值范围时,再次启动调整程序模块调节电磁阀进行自动调节。对于补充气体浓度的控制和调整是利用PID+模糊算法进行计算机程序编程,根据传感器反馈回的气室所需要CO₂气体的量,自动控制CO₂气体的补充次数进行调整。调整模块和CO₂气体补充模块配合,全面控制气室内气体的浓度,控制精度高。

1.1.3 温湿度监测系统

该系统主要由温度传感器、湿度传感器和数据采集器三部分构成。温度和湿度探头均置于OTC内外且与CO₂传感器分析仪同一高度处,所测数值为气室内外温度、湿度代表值。经数据采集器将数值传回电脑终端。

1.2 模拟效果检验设计

本试验于2015—2016年在中国科学院院长武农业生态试验站(35°12'N, 107°40'E)旱塬农田生态系统长期定位试验场进行。试验站位于陕西省咸阳市长武县王东村,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水582 mm,年均气温9.7℃,无霜期171 d,地下水位50~80 m,试验地土壤为黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,土体疏松,通透性好,具有良好的“土壤水库”效应。

早作春玉米供试品种为郑单958。依照当地的管理模式进行农田水肥管理,试验设大田(CK)、对照气室(用OTC表示,气室直接立于田间土壤之上,不通CO₂气体,仅用自动监测系统监测气室内的空气温湿度,目的在于剥离OTC可能带来的增温效应)和可控CO₂气室(用OTC+CO₂表示,气室内通CO₂气体,并进行浓度调控)3个处理,每处理均设3个重复,共计9个处理小区。在小区中央均设立空气温度、湿度和大气CO₂浓度监测系统,其中OTC+CO₂处理小区内加装CO₂浓度自动控制系统,控制气室内CO₂浓度保持在700 μmol·mol⁻¹。

气室自动控制系统能够每分钟自动记录一次气室内外空气温湿度和CO₂浓度,本研究中设定每10 min记录一次数据。

1.3 项目测定及方法

温度监测:空气温度探头为国产YX-WSD传感器,土壤温度探头为国产YX-TRWD传感器,精度为0.1℃。

CO₂浓度监测:感应探头采用芬兰Vaisala公司GWM115传感器,量程为0~2000 μmol·mol⁻¹,精度为20 μmol·mol⁻¹,使用前均进行校准。

湿度监测:采用美国HM1500传感器。

大气温度、湿度及CO₂浓度均通过传感器利用OTC监测系统进行自动监测,经过数字信号与电信号的转化最终将监测数据传回电脑端。

该OTC系统于2015年7月开始在田间正常运行,只在白天(6:00—20:00)供气。为更好地模拟未来CO₂浓度升高情景下的作物生长环境,2016年改为玉米生育期全天24 h处于CO₂浓度升高的环境。

1.4 数据处理

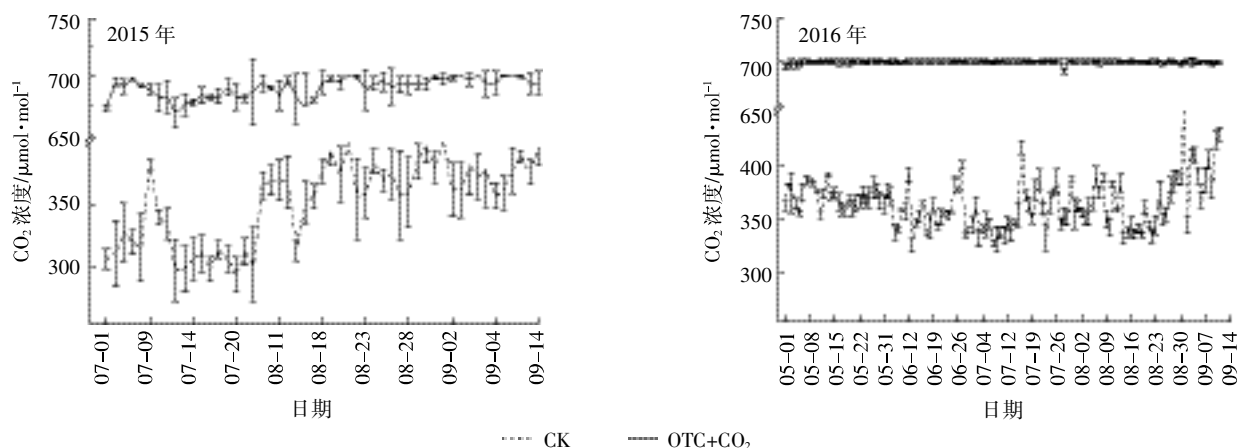
采用Microsoft Excel 2007进行数据整理;采用SPSS 20.0软件进行试验数据统计分析,方差分析使用最小显著差异LSD(Least-significant difference)法($P<0.05$)和 t 检验($P<0.05$)进行分析;采用Origin 8.5和Excel 2007作图。

2 结果与分析

2.1 改进的OTC对CO₂浓度的控制效果

在田间利用改进的OTC系统对气室内CO₂浓度进行了调控,同时对气室内外CO₂浓度实时监测。2015年系统预设CO₂浓度在白天(6:00—20:00)为700 μmol·mol⁻¹,2016年改为全天24 h保持气室内CO₂浓度为700 μmol·mol⁻¹。结果表明,玉米生育期内气室内外CO₂日均浓度差值的波动范围在2015年为284.0~388.5 μmol·mol⁻¹,2016年为279.9~374.0 μmol·mol⁻¹(图2),将差值除以全生育期总天数(2015年监测75 d,2016年监测124 d),得到平均差值分别为337.5 μmol·mol⁻¹和336.0 μmol·mol⁻¹,气室内CO₂浓度控制范围2015年为682.8~700.2 μmol·mol⁻¹,2016年为694.6~700.1 μmol·mol⁻¹。

将春玉米生育期内监测的每天各个时间段的CO₂浓度分别求平均值,得到气室内外CO₂不同时间段均值的动态变化情况(图3)。结果显示,2015年白天不同时间段气室内CO₂浓度相对气室外增加了



图中数据为春玉米生育期内3个平行气室的平均值,误差棒表示标准差。由于系统出现故障或试验站停电而导致部分数据缺失(如2015年07-23至08-08),在图中截去因数据缺失而不连续的部分,出现图中横坐标间距不等。下同

Date in the figure consists of the three parallel chambers numerical average during spring maize growth period. Error bar represents the standard deviation.

Data loss (e.g., from 07-23 to 08-08 in 2015) was due to the system out of order or blackout, consequently the horizontal spacing in the picture was truncated discontinuity

图2 春玉米生长季 OTC 内外 CO₂ 日均浓度

Figure 2 Daily average CO₂ concentration during spring maize growth period

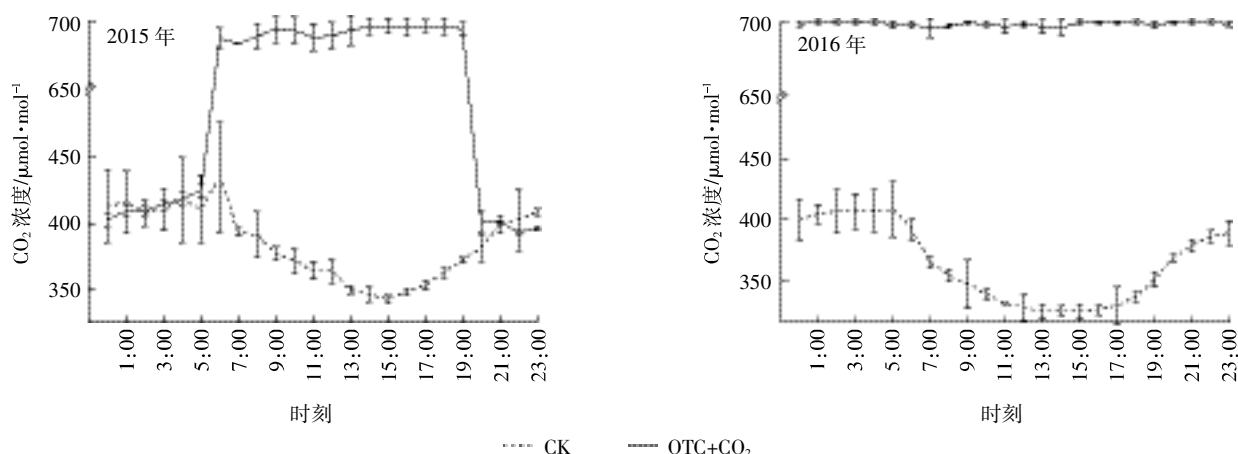


图3 春玉米生长季 OTC 内外不同时段 CO₂ 浓度

Figure 3 Hourly average CO₂ concentration during spring maize growth period

289.5~354.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 平均增幅为 322.9 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。晚上气室内 CO₂ 浓度接近自然环境条件, 气室内外 CO₂ 浓度的差值分析结果表明, 20:00 至次日 6:00 时间段内 CO₂ 浓度平均差值为 0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 气室内外差异不显著 ($P>0.05$)。2016 年气室内全天供 CO₂ 气体, 与气室外相比, CO₂ 增加波动范围为 289.5~375.8 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 平均增幅为 335.3 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。经过两年调试和运行, 改进的 OTC 内部 CO₂ 浓度能够维持在阈值内 (700 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$), 表明改进的 OTC 可以精确地控制 CO₂ 浓度, 运行系统稳定, 可满足模拟试验的需求。

2.2 改进的可控 CO₂ OTC 对大气温度的影响

在春玉米生育期内, OTC 内外日均气温动态变化情况如图 4。2015 年和 2016 年气室内外气温变化趋势相同, 温度由高到低依次均为 OTC>OTC+CO₂>CK, 2015 年可控 CO₂ 气室与大田日均温差为 0.7 $^{\circ}\text{C}$, 对照气室与大田日均温差为 0.9 $^{\circ}\text{C}$, 2016 年日均温差分别为 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 和 0.9 $^{\circ}\text{C}$ 。

将春玉米生育期 (2015 年监测 75 d, 2016 年监测 124 d) 内全天不同时间段 (每小时) 的 CO₂ 浓度进行对比统计分析 (图 5), 结果显示, 气室内温度高于大田环境条件下的大气温度, 3 种处理的气温变化趋势

相同。通过温差分析发现,2015 年可控 CO₂ OTC 比大田气温平均高 0.6 ℃,且在白天(6:00—20:00)平均增温 0.8 ℃,差异显著($P<0.05$),对照 OTC 比大田气温平均高 1.0 ℃,尤其在白天气温差异显著($P<0.05$)。在 2016 年,与大田气温相比,对照 OTC 平均气温升高 0.9 ℃,可控 CO₂ OTC 全天平均气温升高 0.4 ℃,差异不显著($P>0.05$)。2015—2016 年可控 CO₂ OTC 与对照 OTC 直接温度差异均不显著($P>0.05$)。

2.3 改进的可控 CO₂ OTC 对空气相对湿度的影响

以平均全天空气相对湿度值得到 OTC 内外空气相对湿度动态变化情况(图 6)。大田、可控 CO₂ OTC 和对照 OTC 3 种环境条件下的空气相对湿度动态变化趋势一致,高低相近。春玉米生育期内空气相对湿度的统计分析结果表明,2015 年大田、可控 CO₂ OTC 和对照 OTC 的平均空气相对湿度分别为 81.6%、

81.8% 和 81.0%,2016 年分别为 75.8%、76.0% 和 75.5%。对气室内外空气相对湿度分析发现,在春玉米营养生长期(05-01 至 07-15),2015 年和 2016 年空气相对湿度由大到小依次均为 CO₂+OTC>OTC>CK;在玉米生殖生长期(07-16 至 09-14),2015 年为 CK>OTC+CO₂>OTC,2016 年为 CK>OTC>OTC+CO₂,处理间差异均不显著($P>0.05$)。

对气室内外全天不同时间段的空气相对湿度进行对比统计分析,结果表明 3 种环境条件下的空气相对湿度变化均呈现先降低再升高的“凹”字型趋势(图 7),从 0:00 开始空气相对湿度逐渐降低,6:00 后迅速降低,直到 15:00 左右达到最低值,随后开始逐渐升高,晚上 21:00 之后上升速度逐渐变慢。2015 年可控 CO₂ OTC 与大田相比,空气相对湿度平均值约降低 2.4%,对照 OTC 降低了 6.8%,差异均不显著($P>$

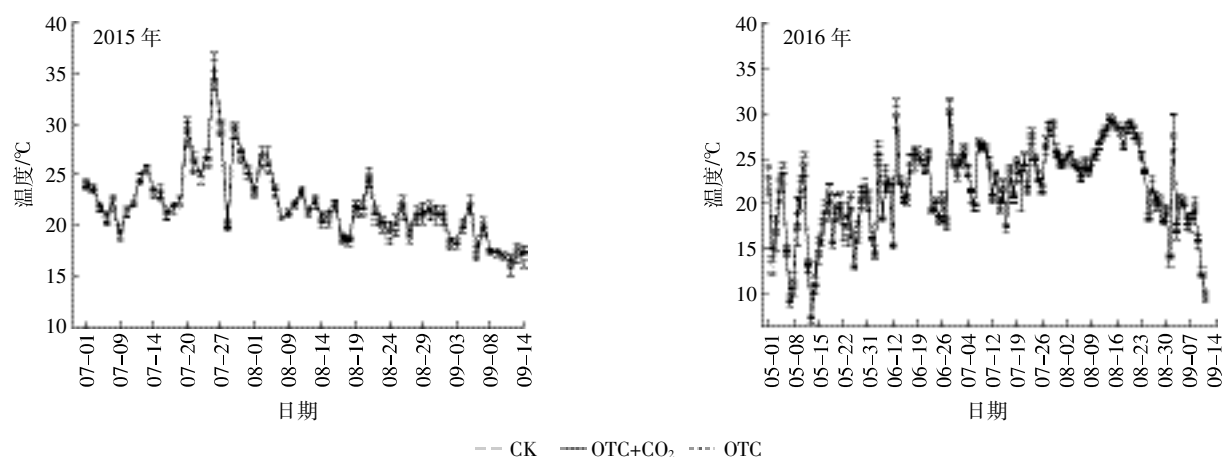


图 4 春玉米生长季 OTC 内外大气日均温度动态变化

Figure 4 Dynamics of daily average air temperature during spring maize growth period

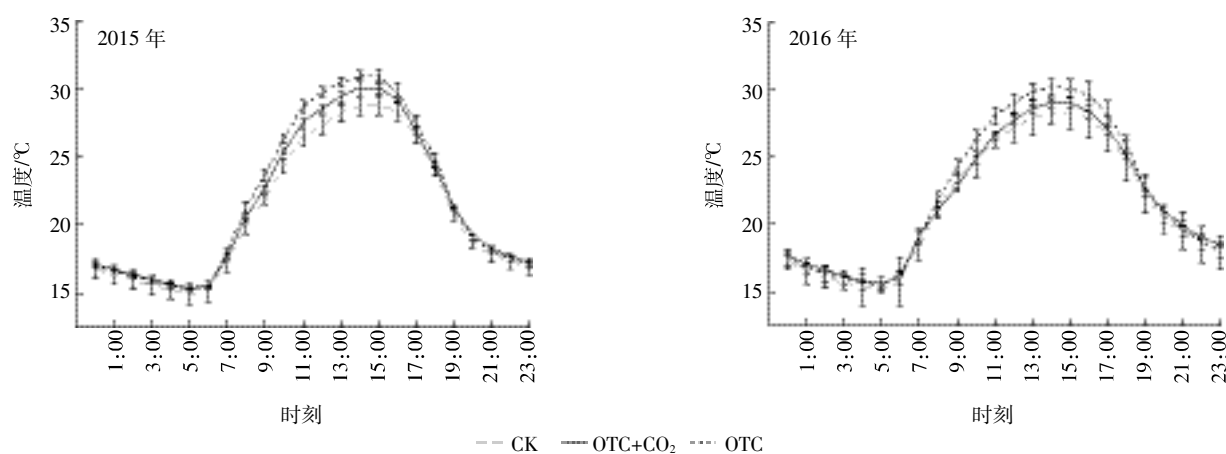


图 5 春玉米生长季 OTC 内外不同时段大气温度动态变化

Figure 5 Dynamics of hourly average air temperature during spring maize growth period

0.05)。2016年可控 CO_2 OTC和OTC较大田空气相对湿度平均值分别降低了3.1%和5.5%,但差异均不显著($P>0.05$)。

3 讨论

改进后的OTC系统对大气 CO_2 浓度的调控效果较好。在不影响试验效果的前提下为降低材料成本,本研究只在需要调控 CO_2 浓度的气室(OTC+ CO_2)内和大田处理(CK)各小区安装 CO_2 浓度监测系统,同时在2015年白天(6:00—20:00)将通气气室内 CO_2 浓度设置为 $700\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。由于植物在没有光的条件下不进行光合作用,晚上(20:00至次日6:00)将通气气室内 CO_2 浓度设置为 $0\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。但是为了更加准确地模拟未来大气 CO_2 浓度升高的情形,2016年改为全天24 h供气。本试验预期 CO_2 控制浓度为 $700\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,实际控制浓度值大多数情况下均低

于 $700\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,但2016年控制范围更接近阈值,控制误差范围为 $-5.4\sim 0.1\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,说明该系统经过两年的调试和运行,系统逐渐趋于稳定且控制精确,偏低的原因可能是 CO_2 浓度感应探头反应滞后所导致的。这与万运帆等^[24]利用调控OTC原位模拟气候变化在早稻上应用的研究结果一致。

为了验证在不通气气室(OTC)内 CO_2 浓度与大田处理(CK)大气 CO_2 浓度是否一致,在2015年,选取天气晴朗的四天(07-02、07-22、08-12和09-02),在早晨9:00—11:00时间段内测定春玉米光合作用的同时,记录OTC内 CO_2 浓度,与该时间段大田处理的 CO_2 浓度值作对比(图8)。结果表明,OTC与大田的 CO_2 浓度变化趋势完全相同且大小接近,差异不显著($P>0.05$)。这也从侧面反映了该OTC内部与外界空气自然流通,受OTC气室壁阻挡作用的影响很小,甚至可以忽略不计。

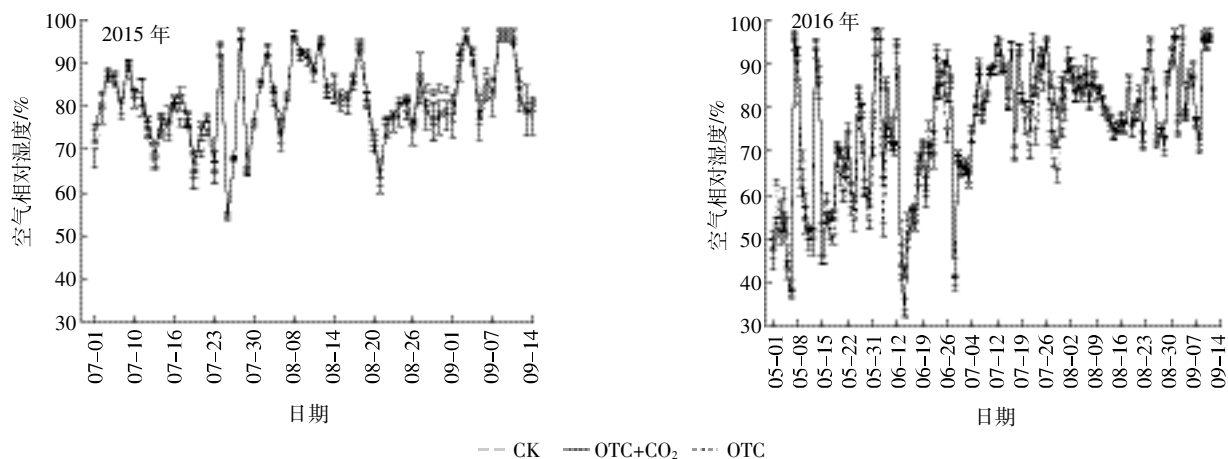


图6 春玉米生长季 OTC 内外日均空气相对湿度动态变化

Figure 6 Dynamics of daily average air relative humidity during spring maize growth period

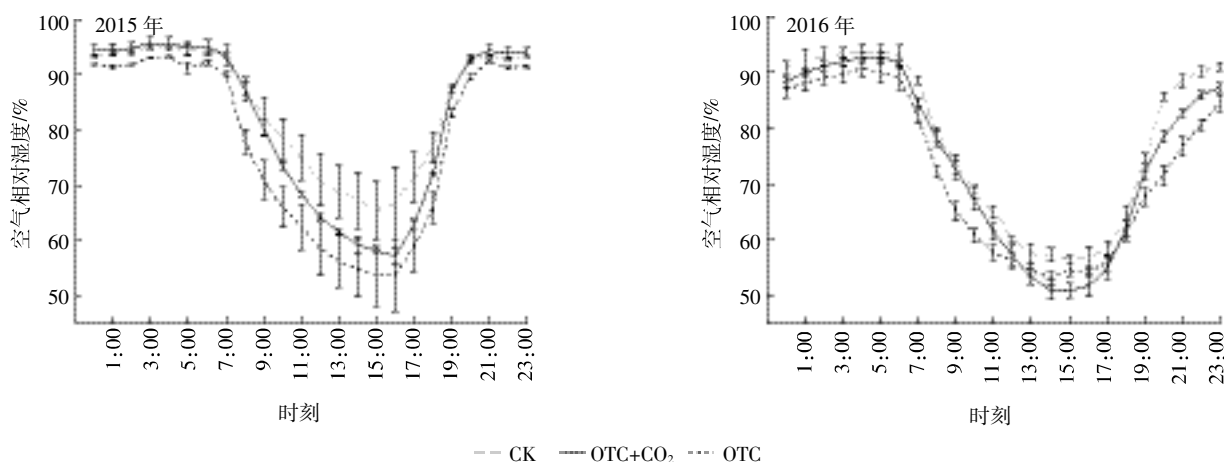
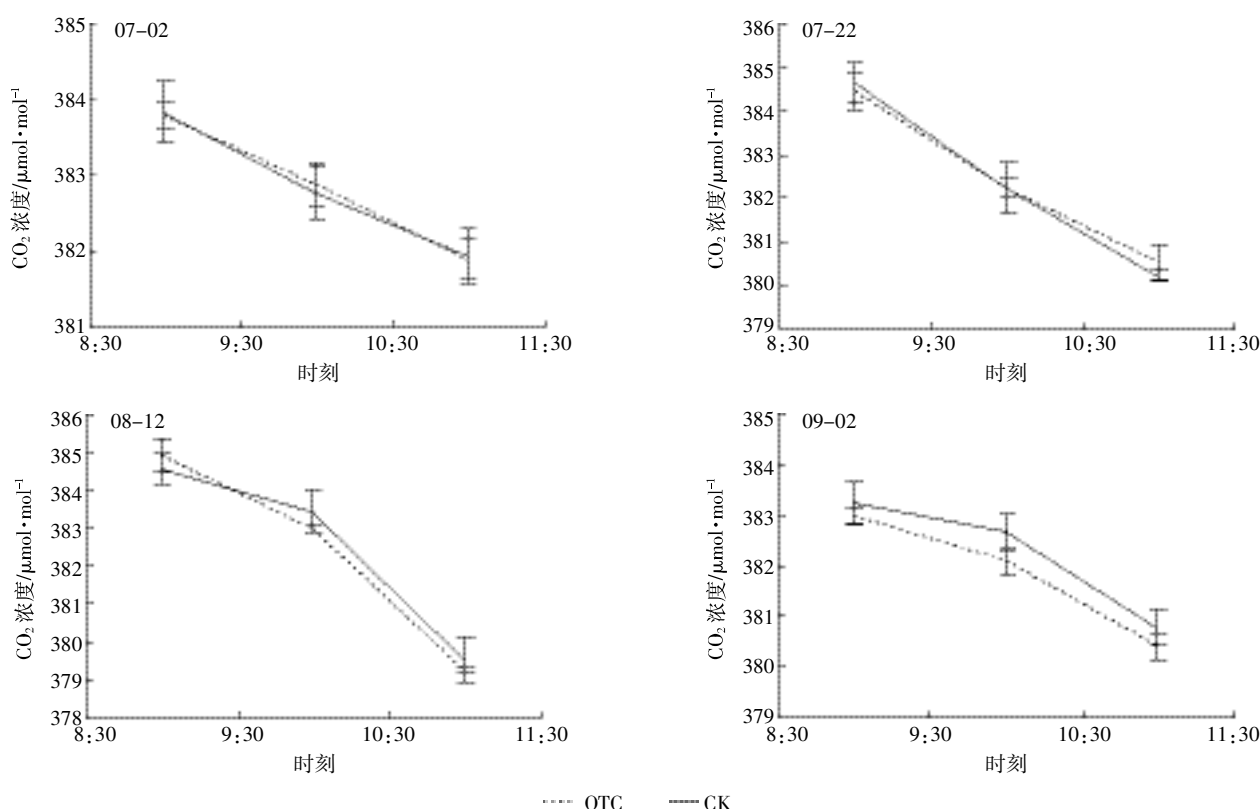


图7 春玉米生长季 OTC 内外不同时段空气相对湿度动态变化

Figure 7 Dynamics of hourly average air relative humidity during spring maize growth period

作为气候变化的主要特征之一,大气温度升高也会对植物生长产生不可忽视的影响,其与 CO₂ 浓度升高之间也会产生一定的交互效应。因此在控制监测 CO₂ 浓度的同时,测定气室内大气温度动态变化尤为必要。早期一些研究发现,气室具有增温效应。Hogsett 等^[26]早在 1985 年设计气室并投入试验研究后发现,气室内外平均温度差为 2.5 ℃。Leadley 等^[27]在 1992 年研究发现开顶式气室内温度通常比外界温度要高出 3 ℃左右。Binnie 等^[28]利用开顶式气室研究有机溶剂在草和大气之间交换的试验中指出,温度是影响 OTC 应用的重要因素之一,其研究结果表明,在白天太阳辐射最强烈时气室内外温差竟达 12 ℃,即使晚上或多云天气室内外温差也有 1~2 ℃,他认为这可能与气室顶部设计有关,影响气室内外热量流通。McLeod 等^[17]报道,当气室内光子通量为 $1600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,OTC 内气温比外界高 4.3 ℃。王春乙^[29]自行设计的 OTC-1 型开顶式气室在供气试验期间室内外日均温度也相差 2.1

℃。鉴于大气 CO₂ 浓度升高的同时伴随温度的升高,本研究为了剥离大气 CO₂ 浓度和温度升高所产生的交互效应,在气室内加装环流风扇以打散搅匀玉米冠层 CO₂ 浓度的同时,加速气室内空气流动。同时,气室壁的材料选用透光度高、抗损耗能力强的聚碳酸酯耐力板,采光性能好(透光度 $\geq 98\%$)。为保证室内空气环境更加接近室外,在 2016 年采取将气室顶部半开口改为全开口,试验证明室内外温度更接近且差异不显著(图 5)。另外,国内外传统 OTC 的气室体积均较小,如 Hogsett 等^[26]设计的气室体积仅有约 11 m³,王春乙等^[29]设计的 OTC-1 型气室体积仅为 16 m³,阮亚男^[30]对其进行改进后的气室体积大约也只有 42 m³,张金恩等^[31]在研究开顶式气室对冬小麦光合特性差异时使用的 OTC 是在 OTC-1 型气室的基础上改进而成,但是其体积仅为 5.3 m³,其研究表明气室内较外界增温 8.9%。本研究设计的 OTC 气室体积为 48.0 m³,同时为便于进行气室内玉米试验种植行距、株距



图中各时间段的数据为 3 个平行气室每天同一时段测定(使用光合仪测定对照 OTC 内 CO₂ 浓度,大田处理利用系统进行监测 CO₂ 浓度)数值的平均值,误差棒表示标准差

Date in the figure consists of the three parallel chambers hourly numerical average during spring maize growth period. CO₂ concentration in OTC was measured by the photosynthetic apparatus, and natural air CO₂ concentration by OTC system. Error bar represents the standard deviation

图 8 对照 OTC 内 CO₂ 浓度与大田 CO₂ 浓度对比

Figure 8 Comparison between the measured CO₂ concentration in OTC and the natural air CO₂ concentration

的控制,将传统 OTC 气室由正八边形棱柱状改为正四边形棱柱状,试验证明四边形气室并不影响对气室内 CO_2 浓度、温度的控制。气室体积增大后,相应的气室顶部敞开面积增大,使得气室内空气环境更加接近外界环境。

空气相对湿度是空气中的实际水汽压与同温度下的饱和水汽压的比值,其变化将会直接影响设施内植物的生长和病虫害的发生^[32]。气室内空气相对湿度受 OTC 影响很小,在春玉米营养生长期(05-01 至 07-15)的空气相对湿度略高于大田,在生殖生长期(07-16 至 09-14)则略低于大田。这可能是因为春玉米在营养生长期生长旺盛,叶面积指数高,蒸腾量大,而生殖生长期玉米叶片开始衰老变黄,蒸腾作用降低,且当地雨季主要集中在 7—8 月,随降雨减少,土壤湿度降低,从而导致气室内外空气相对湿度在玉米生长的不同时期存在差异,但差异均不显著(图 5)。这说明改进后的 OTC 对玉米生长环境改变很小,几乎接近自然条件,能够很好地运行于大田试验以准确模拟未来气候变化情况。

4 结论

(1)改进的可控 CO_2 OTC 系统能较精确调控 CO_2 浓度,控制误差范围小,可投入试验使用。

(2)可控 CO_2 OTC 内温度较大田平均增加 $0.4\text{ }^\circ\text{C}$,空气相对湿度平均降低 3.1%,差异均不显著,该系统能够为作物提供接近自然环境的生长条件,适用于未来大气 CO_2 浓度升高模拟试验研究。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: Physical science basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014, 23–89.
- [3] Prentice I C, Farquhar G D, Fasham M J R, et al. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide[M]//Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001: 183–237.
- [4] 潘红丽,赵秀兰,谢祖彬,等. 大气 CO_2 浓度升高对农田生态系统的影响[J]. 云南环境科学, 2005, 24(4): 6–9.
PAN Hong-li, ZHAO Xiu-lan, XIE Zu-bin, et al. Effect on soil micro-ecosystem from free air CO_2 enrichment[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2005, 24(4): 6–9.
- [5] 尹飞虎,高志建,谢宗铭,等. 大气 CO_2 浓度升高和施氮对棉田土壤理化性质及微生物区系的影响[J]. 地理研究, 2013, 32(2): 214–222.
- YI Fei-hu, GAO Zhi-jian, XIE Zong-ming, et al. Influence of elevated CO_2 and nitrogen supply on cotton field soil properties and microbial flora[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(2): 214–222.
- [6] Horie T, Nakagawa H, Nakano J, et al. Temperature gradient chambers for research on global environment change: A system designed for rice in Kyoto, Japan[J]. *Plant Cell & Environment*, 1995, 18(9): 1064–1069.
- [7] Cheng W G, Yagi K, Sakai H, et al. Effects of elevated atmospheric CO_2 concentrations on CH_4 and N_2O emission from rice soil: An experiment in controlled-environment chambers[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77(3): 351–373.
- [8] Finn G A, Brun W A. Effect of atmospheric CO_2 enrichment on growth, nonstructural carbohydrate content, and root nodule activity in soybean [J]. *Plant Physiology*, 1982, 69(2): 327–331.
- [9] Chaudhuri U N, Kirkham M B, Kanemasu E T. Root growth of winter wheat under elevated carbon dioxide and drought[J]. *Crop Science*, 1990, 30(4): 853–857.
- [10] Lawlor D W, Mitchell R A C. The effects of increasing CO_2 on crop photosynthesis and productivity: A review of field studies[J]. *Plant Cell & Environment*, 1991, 14(8): 807–818.
- [11] Nie G Y, Long S P, Garcia R L, et al. Effects of free-air CO_2 enrichment on the development of the photosynthetic apparatus in wheat, as indicated by changes in leaf proteins[J]. *Plant Cell & Environment*, 2006, 18(8): 855–864.
- [12] Robredo A, Pérez-López U, Miranda-Apodaca J, et al. Elevated CO_2 reduces the drought effect on nitrogen metabolism in barley plants during drought and subsequent recovery[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2011, 71(3): 399–408.
- [13] 张瑾涛. 玉米/大豆间作体系对大气 CO_2 浓度升高的响应及磷营养调控[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
ZHANG Jin-tao. Response of maize/soybean intercropping system to CO_2 concentration enrichment and phosphorus nutrient regulation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013.
- [14] 谢立勇,林而达. 二氧化碳浓度增高对稻、麦品质影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 659–664.
XIE Li-yong, LIN Er-da. Effects of CO_2 enrichment on grain quality of rice and wheat: A research review[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3): 659–664.
- [15] Okada M, Lieffering M, Nakamura H, et al. Free-air CO_2 enrichment (FACE) using pure CO_2 injection: System description[J]. *New Phytol*, 2001, 150(2): 251–260.
- [16] 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]. *Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1253–1258.
- [17] Mcleod A R, Long S P. Free-air carbon dioxide enrichment (FACE) in global change research: A review[J]. *Advances in Ecological Research*, 1999, 28(8): 1–56.
- [18] Rogers H H, Bingham G E, Cure J D, et al. Responses of selected plant species to elevated carbon dioxide in the field[J]. *Journal of Environment Quality*, 1983, 12(4): 569–574.

- [19] Schneider K S, Lüscher A, Richter M, et al. Ten years of free-air CO₂ enrichment altered the mobilization of N from soil in *Lolium perenne* L. swards[J]. *Global Change Biology*, 2014, 10(8):1377–1388.
- [20] Cheng L, Zhu J, Chen G, et al. Atmospheric CO₂ enrichment facilitates cation release from soil[J]. *Ecology Letters*, 2010, 13(3):284–291.
- [21] Heagle A S, Body D E, Heck W W. An open-top field chamber to assess the impact of air pollution on plants[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1973, 2(3):365–368.
- [22] Heck W W, Adams R M, Cure W W, et al. A reassessment of crop loss from ozone[J]. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1983, 17(12):572A–581A.
- [23] 陈法军, 戈峰, 苏建伟. 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]. *生态学报*, 2005, 24(5):585–590.
CHEN Fa-jun, GE Feng, SU Jian-wei. 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.
- [24] 万运帆, 游松财, 李玉娥, 等. 开顶式气室原位模拟温度和CO₂浓度升高在早稻上的应用效果[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(5):123–130.
WAN Yun-fan, YOU Song-cai, LI Yu-e, et al. Applied effect of improved open-top chamber on simulation in situ of elevating air temperature and CO₂ concentration in early rice field[J]. *Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(5):123–130.
- [25] 许育彬, 沈玉芳, 李世清. CO₂浓度升高和施氮对冬小麦花前贮存碳氮转运的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(8):1465–1474.
XU Yu-bin, SHEN Yu-fang, LI Shi-qing. Effect of elevated CO₂ concentration and nitrogen application on translocation of dry matter and nitrogen restored before anthesis in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(8):1465–1474.
- [26] Hogsett W E, Tingey D T, Holman S R, et al. A programmable exposure control system for determination of the effects of pollutant exposure regimes on plant growth[J]. *Atmospheric Environment*, 1985, 19(7):1135–1145.
- [27] Leadley P W, Drake B G. Open top chambers for exposing plant canopies to elevated CO₂ concentration and for measuring net gas exchange[J]. *Plant Ecology*, 1992, 104/105(1):3–15.
- [28] Binnie J, Cape J N, Mackie N, et al. Exchange of organic solvents between the atmosphere and grass: The use of open top chambers[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 285(1/2/3):53–67.
- [29] 王春乙. OTC-1型开顶式气室的结构和性能与国内外同类气室的比较[J]. *环境科学进展*, 1996, 4(1):50–57.
WANG Chun-yi. The structure and function comparison between OTC-1 open top chamber with the similar one in home and overseas[J]. *Advances in Environmental Science*, 1996, 4(1):50–57.
- [30] 阮亚男, 陈振举, 陈玮, 等. OTC-I型开顶式气室优化设计与性能分析[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2006, 25(增刊):220–222.
RUAN Ya-nan, CHEN Zhen-ju, CHEN Wei, et al. Optimal design and characteristics estimation of OTC-I open top chamber[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, 25(Suppl):220–222.
- [31] 张金恩, 肖洪, 郑有飞, 等. 开顶式气室内外冬小麦光合特性差异比较[J]. *生态学报*, 2015, 35(21):6993–7002.
ZHANG Jin-en, XIAO Hong, ZHENG You-fei, et al. Comparative of the photosynthetic characteristics of winter wheat grown inside and outside open-top chambers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(21):6993–7002.
- [32] 王彩霞. 设施内空气湿度调控新技术[J]. *安徽农业科学*, 2003, 31(6):1091.
WANG Cai-xia. New technology of air humidity control in facilities[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2003, 31(6):1091.