

用于测定陆地生态系统与大气间 CO₂ 交换通量的 多通道全自动通量箱系统

张红星¹, 王效科^{1,*}, 冯宗炜¹, 宋文质¹, 刘文兆², 欧阳志云¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085 2. 中国科学院水土保持研究所, 陕西杨凌 722400)

摘要 陆地生态系统与大气间 CO₂ 交换是全球碳循环的最重要组成部分, 科学地测定其 CO₂ 交换通量一直是陆地生态系统碳循环研究的核心工作之一。提高观测的效率和减少观测对自然的干扰, 是科学精确地估算区域和全球尺度上的陆地生态系统与大气间 CO₂ 交换量的关键。在参考国内外已有的陆地生态系统与大气间 CO₂ 交换通量箱式法观测技术的基础上, 发展了一套多通道全自动通量箱系统用来连续观测陆地生态系统或土壤与大气间的 CO₂ 交换通量。在黄土高原中国科学院院长武农业生态试验站的麦田和苹果园中进行了系统测试, 结果表明, 该系统不但能够实现自动、连续、多点观测, 而且对自然环境的影响比较小, 在田间的实验观测中, 该系统运行稳定, 能够比较客观地得到陆地生态系统与大气间的 CO₂ 交换通量。

关键词 全自动多通量箱系统, CO₂ 交换通量, 农田生态系统

文章编号: 1000-0933 (2007) 04-1273-10 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Multi-channel automated chamber system for continuously monitoring CO₂ exchange between agro-ecosystem or soil and the atmosphere

ZHANG Hong-Xing¹, WANG Xiao-Ke^{1,*}, FENG Zong-Wei¹, SONG Wen-Zhi¹, LIU Wen-Zhao², OUYANG Zhi-Yun¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (4) 1273 ~ 1282.

Abstract CO₂ exchange between the biosphere and the atmosphere is one of the most important components of the global carbon cycle. The CO₂ exchange should be monitored continuously and at multiple geographical points because of great temporal and spatial variations. A Multi-channel automated chamber system was developed for continually monitoring CO₂ exchange between the agro-ecosystem or the soil and the atmosphere. This system consisted of an automated chamber subsystem and a CO₂ concentration analysis and data logging subsystem. Both subsystems were under the control of a programmable logic controller (PLC). The automated chamber subsystem contained 18 chambers and a compressor. The chambers, 50 cm × 50 cm × 50 cm, were constructed of clear PVC fixed to an aluminum alloy frame. The chambers had PVC lids hinged at the sidewall and each lid was closed and opened automatically by the push and pull of a pneumatic

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40321101); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2002CB412503); 中国科学院创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01-17)

收稿日期: 2006-04-19; 修订日期: 2006-12-15

作者简介: 张红星 (1977 ~) 男, 河南淇县人, 博士生, 主要从事植物生理生态学及全球气候变化研究. E-mail: zhanghongxingjun@sina.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxk@cees.ac.cn

Foundation item The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40321101); The National Key Basic Research and Development Plan (973) of China (No. 2002CB412503); The Main Project of Knowledge Innovation CAS (No. KZCX1-SW-01-17)

Received date 2006-04-19; **Accepted date** 2006-12-15

Biography ZHANG Hong-Xing, Ph. D. candidate, mainly engaged in physiological ecology, global change and carbon cycle. E-mail: zhanghongxingjun@sina.com

cylinder mounted on the opposite sidewall. The pneumatic cylinders were controlled by high pressure air from a compressor regulated by the PLC. Fans were fixed on each pneumatic cylinder to mix the air inside the chamber completely when their lids were closed. A buffer pipe ($L = 1.5\text{m}$) with an inner diameter of 0.4 mm was inserted through the lid to keep the air pressure balanced between the inside and the outside of the chamber. During measurement, one of the 18 chambers was closed for measuring and the others were kept open to allow precipitation and leaf litter to reach the enclosure surface, to maintain the soil conditions as natural as possible. Three minutes of closure time was needed for each chamber for measurement at separate locations. Regulated by the PLC, measurements for the 18 chambers were completed in 54 minutes, and another cycle of measurement began after a six-minute interval. The CO_2 concentration analysis and data logging subsystem was composed of a CO_2 analyzer, a multi-channel gas valve and a data logger. The multi-channel gas valve was controlled by the PLC to switch gas between the chambers and the CO_2 analyzer. During the analysis, one chamber was closed and the air inside it was continuously withdrawn by a pump through a multi-channel gas valve into the CO_2 analyzer. After the CO_2 concentration was measured, the air was returned into the chamber through another multi-channel valve to minimize changes of the air within chamber. The results of the CO_2 concentration were recorded by the data logger at intervals of 10 seconds. In addition, environmental variables were simultaneously measured by sensors and these results were recorded by the data logger. The CO_2 exchange was calculated as the slope of change in CO_2 concentration within chamber, adjusted for air temperature and pressure.

The reliability of the multi-channel automated chamber system was tested; the system was used to monitor the CO_2 exchange between a wheat ecosystem and the soil respiration of a wheat field and an apple orchard with the atmosphere. The results showed that the equilibrium of the system could be reached within 60 seconds and the turbulence of the fans had no significant effect on this CO_2 exchange. The changes in air and soil temperature and soil moisture inside the chambers due to enclosure of the chambers were within the degree of acceptability for field study. The net ecosystem CO_2 exchange for the wheat ecosystem was $-2.35\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and the soil respiration was $3.87\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ in the wheat field and $6.61\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ in the apple orchard. In conclusion, the system was reliable for monitoring CO_2 exchange continuously and automatically at multiple points, and had little influence on natural conditions.

Key words : automated multi-channel chamber system ; CO_2 exchange ; agro-ecosystem

陆地生态系统与大气间 CO_2 交换是全球碳循环的最重要组成部分^[1],是判断陆地生态系统是“碳源”或“碳汇”的重要指标。科学地测定其 CO_2 交换通量一直是陆地生态系统碳循环研究的核心工作之一。提高观测的效率和减少观测对自然的干扰,是科学精确地估算区域和全球尺度上的陆地生态系统与大气间 CO_2 交换量的关键。陆地生态系统与大气间 CO_2 的交换通量的测定和估算可以从两个角度进行,一是测定要研究的陆地生态系统的碳库变化,即碳库变化法;二是直接测定要研究的陆地生态系统与大气间的 CO_2 交换通量,即通量测定法。后者可以很好地表征 CO_2 交换通量的短期变化或瞬时量。但后者需要较复杂的技术。不但要有可靠的大气 CO_2 浓度的测定技术,而且需要有适当的方法反映陆地生态系统与大气间 CO_2 的交换通量。大气 CO_2 浓度的测定技术包括碱吸收法^[2,3]、气相色谱法^[4]和红外 CO_2 分析法^[5]。相对来说,红外 CO_2 分析法所需要的响应时间短、仪器的携带也比较方便,测定结果更为精确。测定交换通量的方法一般分为通量箱法和微气象学法。尽管微气象学法对自然干扰小且快速简便,但被观测的陆地生态系统要求有一定的空间一致性和气象条件^[6]。因而,通量箱法也一直被广泛的应用。

为了克服通量箱观测法不能连续观测和人工操作的费时,科学家开始建立和改进自动通量箱,现在也出现了一些商业化的自动箱,如 Licor-8100。全自动通量箱的自动开启系统一般采用电动机驱动或气缸驱动。国外应用较多的有单通道全自动通量箱和多通道全自动通量箱。测定时也多采用红外 CO_2 分析仪和具有气体回路的动态通量箱,可以较多的保证通量箱内气体体积的稳定。

尽管国外已经有较多的全自动通量箱的观测技术报道^[7~12],但国内该项技术的应用还比较少。“八五”期间中国科学院大气物理所曾在常熟和广州利用全自动通量箱测定稻田甲烷的排放工作。2002 年段晓男等在内蒙古河套灌区的小麦田进行了短期的农田生态系统与大气间 CO₂ 交换通量的观测^[13]。为了深刻理解土壤呼吸和农田生态系统与大气间的 CO₂ 交换规律,有必要开发一套高频率、多通道、全自动、对观测对象扰动小的连续观测系统。本研究在参考国内外已有的陆地生态系统与大气间 CO₂ 交换通量箱式法观测技术的基础上,发展了一套多通道全自动多通量箱系统用来连续观测农田生态系统或土壤与大气间的 CO₂ 交换通量。并对系统的可靠性进行检验,对通量箱放置引起的“箱效应”从温度和水分方面进行了测定。

1 多通道全自动通量箱系统结构

多通道全自动通量箱系统由两个子系统组成:CO₂ 浓度分析和记录子系统及全自动通量箱子系统(图 1)。两个子系统都在一台可编程逻辑控制器(PLC, Programmable Logic Controller)控制下工作。

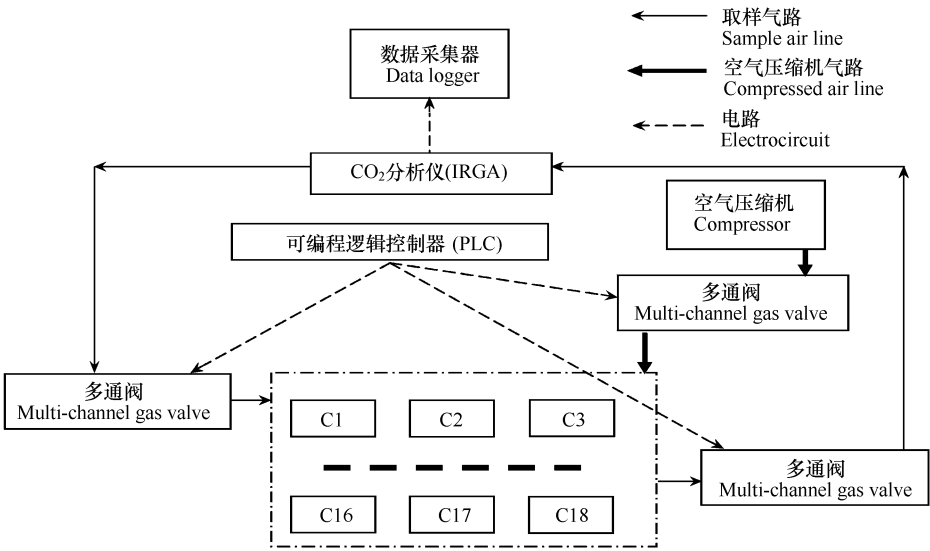


图 1 多通道全自动通量箱系统结构示意图
Fig. 1 Multi-channel automated chamber system

数据采集器 Data Logger (CR10X); CO₂ 分析仪 IRGA (Infrared Gas Analyzer); 可编程逻辑控制器 PLC (Programmable Logic Controller); 空气压缩机 Compressor; 多通阀 Multi-channel gas valve; C1 ~ C18 通量箱编号 C1 ~ C18. The serial numbers of the chambers in the system

1.1 全自动通量箱子系统

该子系统由 18 个全自动通量箱和一台空气压缩机组成。全自动通量箱是长、宽、高均为 50cm 的正方体, 框架是由铝合金制成。箱体四壁采用透明的亚克力板(透光率 98%), 并通过双面密封胶条和铝合金框架粘接起来用螺钉固定。箱盖采用较厚的亚克力板(透光率 98%), 与箱体间用普通合页链接。为了防止箱盖的热胀冷缩变形, 箱盖的外表面固定有高强度 U 型铝合金板。箱体与箱盖间镶有高密度密封条以提高气密性。箱盖中部位置和箱体的一侧中部位置之间固定一个适当长度的气缸。当气缸完全伸展时, 箱盖完全打开, 保持与外界很好的气体交换; 当气缸回缩后, 箱盖完全关闭, 进行通量的测定。气缸往返动作由 PLC 控制的电磁阀控制, 由空气压缩机的压缩空气驱动。在气缸缸体上固定着一个风扇, 用于通量测定时进行箱内气体的混合。通量箱盖关闭时, 风扇开始运转以充分搅拌通量箱中的气体。箱体的一侧靠上位置安装有出气管, 对侧的靠下位置安装进气管, 分别与 CO₂ 分析子系统相连。在通量箱的顶部接一根长 1.5m 的塑料管(4mm × 6mm)以平衡通量箱内外气压差^[14, 15]。

1.2 CO₂ 浓度分析和记录子系统

该子系统由 LI-820 红外 CO₂ 分析仪、缓冲管、干燥器、过滤器、流量计、气泵、多通阀和数据采集器组成。

气泵将通量箱中的空气抽出 ,并经过多通阀、缓冲管、干燥器、过滤器和流量计后 ,进入红外 CO₂ 分析仪 ,测定通量箱中的空气 CO₂ 浓度 ,测定的结果由数据采集器记录 ,分析后的气体经过另外一个多通阀流回通量箱。多通阀有 19 个接口 ,每个接口处连有一个电磁阀 ,由 PLC 控制 ,用于将要测定的通量箱的空气导出和导入。另外 ,测定环境条件因子 (光合有效辐射、气温、大气湿度、土壤温度和土壤湿度等)的传感器连接在数据采集器上 (CR10X)。数据采集器设定为每 10s 记录一次红外 CO₂ 分析仪的读数 ,3min 记录一次环境条件因子的测量值。观测时 ,将各通量箱底部埋入土壤中 5cm ,在 PLC 的控制下 ,每个通量箱依次关闭 3min ,闭合期间由 CO₂ 分析仪测定指定通量箱内的 CO₂ 浓度变化 ,54min 完成 18 个箱在 18 个不同地点的测定 ,6min 的间隔后 ,进入下一个循环的测定。利用下式计算特定箱内生态系统或土壤与大气间的交换通量 :

$$A = \frac{dv}{dt} \frac{V}{S} \frac{P}{RT}$$

(1)

式中 A 是单位面积上单位时间内 CO₂ 释放量 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ; c 是 CO₂ 摩尔浓度 ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) ; t 是时间 (s) ; V 是通量箱体积 (m^3) ; S 是通量箱底面积 (m^2) ; P 是大气压 (KPa) ; R 是气体常数 ($8.3\times10^{-3}\text{m}^3\cdot\text{kPa}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ; T 是通量箱内气体温度 (K) 。方程 (1) 中 dc/dt 是通量箱中浓度变化率 ,即将所测得的一组 CO₂ 浓度及其相应的时间回归所得直线方程的斜率^[6]。

2 多通道全自动通量箱系统的性能测试

2.1 系统的响应过程和稳定性

通量箱与红外 CO₂ 分析仪间的连接气路长度为 17 m ,内径为 4 mm ,总体积约 213 ml。测定时气体的流量控制在 0.8 ~ 1.0L/min ,这样通量箱内的气体到达红外 CO₂ 分析仪的时间为 12 ~ 16s ,即红外 CO₂ 分析仪的读数有最大 16 s 的延迟。通量箱自动开闭的时间一般控制在 3 ~ 10s。通量箱关闭过程中 ,箱盖会将部分空气压入通量箱 ,这样会增大通量箱的气压。但由于通量箱接有与大气连通的 1.5m 长的平衡管 ,可以减少这些原因造成的测量误差。为了减少通量箱关闭和气路的影响 ,取通量箱关闭指令发出后 60 s 以后到通量箱开启指令发出前 20 s 的数据进行通量计算。

为了测试系统的反应时间以及平衡管对测定结果的影响 ,从两方面做了验证。其一 ,测定空白情况下 (在闭合的通量箱内部鼓入一定量的 CO₂) ,通量箱内部的 CO₂ 浓度在闭合期间的变异情况。即在没有测定任何对象 ,箱内既无释放也无固定的情况下 ,测定单位时间内通量箱内部 CO₂ 浓度的变化。把通量箱下口密闭 ,当其闭合时在其中鼓入一定量的 CO₂ ,通量箱内浓度 180s 内变化过程见图 2。起初鼓入的气体没有混合均匀 ,这是开始第一个点浓度值较低的原因。但气体迅速混合均匀 ,浓度在相邻 30s 内的平均变异系数为 0.079% ,这样的变异速度在仪器精度范围内 ,不足以影响通量箱内 CO₂ 浓度的相对变化。据此可以认为 ,箱盖上的平衡管在气体扩散过程中不对相对变化构成明显

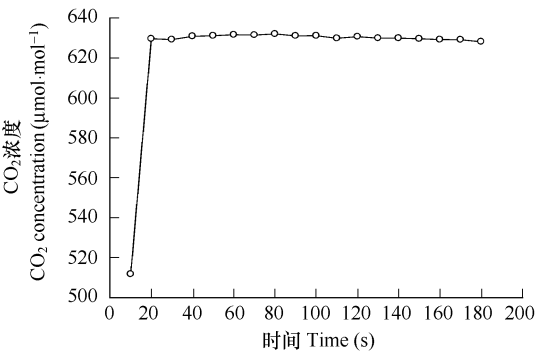


图2 空白情况下 ,通量箱内部 CO₂ 浓度

Fig. 2 CO₂ concentrations in the chambers on condition that there were no CO₂ release and assimilation

影响 ,进而不影响对 CO₂ 交换量的估算。其二 ,对实测情况下的 CO₂ 浓度变化率进行检验。图 3 是连续 3 个相邻通量箱内部依次闭合期间 CO₂ 浓度的变化情况。C3 和 C4 内部罩有小麦 ,C5 罩着小麦田的土壤。从图上可以看出 ,该系统在测定生态系统净交换 (C3、C4)和土壤呼吸 (C5)时通量箱内部的 CO₂ 浓度的变化在达到平衡后呈线性变化。当选取闭合 60s 后到开启前 20s 的数据进行回归时 ,该斜率可以比较真实地反映测定地点的情况。此外 ,对 5 ~ 10 月的数据分析可知 ,该系统在测定小麦田、小麦田土壤和苹果园土壤 CO₂ 排放时 ,通量箱内 CO₂ 浓度变化的斜率是稳定的 ,相关系数平均在 95% 以上。但在日出和日落前 ,测定小麦田生

态系统净收支的个别通量箱,因其内部光合作用固定 CO₂ 和呼吸作用释放 CO₂ 速率接近平衡,导致箱内 CO₂ 浓度变化率比较小,造成直线拟合时相关系数较小(但不小于 85%)。该情况的发生,不会对整体观测构成较大影响。因此,利用该系统测定和记录的通量箱 CO₂ 浓度变化可以反映被测定的农田或土壤与大气间的 CO₂ 交换通量。

2.2 风扇搅拌的影响

在全自动通量箱内,为了使箱内空气搅拌充分,但又不能影响测定结果,将计算机机箱散热用的普通风扇(12V 0.5A,半径 4.5 cm)固定在通量箱中部的汽缸上,以 30°~45°的角度面向地面。风扇的前端有使风向四周扩散的片网,避免风扇直吹地面。采用 A199Lz 形风速计(Vector Instrument,UK)测得风扇出口风速为 6.2~6.8 m/s,风速与其距离风扇出口的距离以指数函数递减(图 4),距出口 30 cm 处的风速为 1.2~1.8 m/s。大量研究表明,介于 0~2.8 m/s 间的风速对地表 CO₂ 释放过程影响不明显^[2]。本研究中通量箱内部风扇距地面及作物冠层的斜向距离大于 30 cm,所以可以认为通量箱内的风速对 CO₂ 释放影响不明显。此外,按风扇半径为 4.5 cm 和出口风速计算,通量箱内的气体在不到 1 s 的时间内被混合均匀。为了评价风扇的搅拌强度对地表与大气间 CO₂ 交换的影响,采用了 3 个风扇进行实验。在通量箱关闭后先由一个风扇搅拌,在第 60 秒两个风扇同时开动,第 120 秒 3 个风扇同时开动。结果表明,CO₂ 浓度变化率并未受到明显影响(图 5)。同样的试验重复了 3 次,得到了相似的结果。

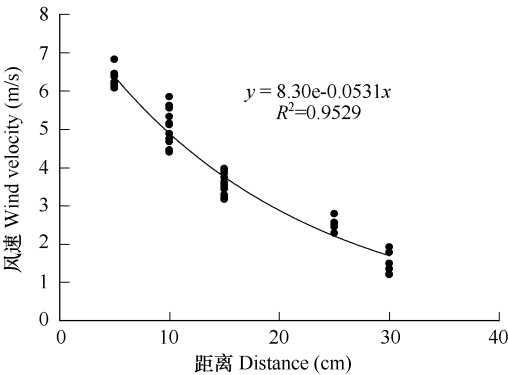


图 4 风扇出口不同距离处的风速

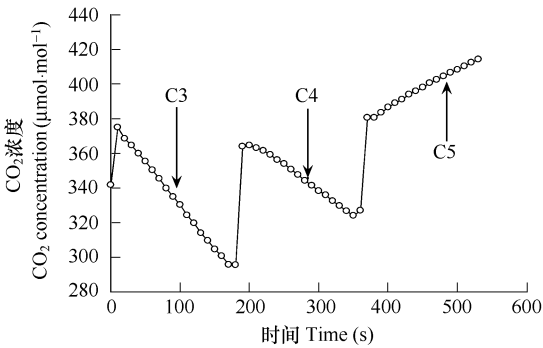


图 3 测定过程中 3 个相邻通量箱内部 CO₂ 浓度变化

Fig.3 Changes in the CO₂ concentrations in three chambers during measurement

C3、C4、C5 即通量箱编号,C3 与 C4 测定小麦田生态系统净交换量,C5 测定土壤呼吸 C3, C4 and C5 are serial numbers of chambers; Wheat was covered in C3 and C4 and soil was in C5

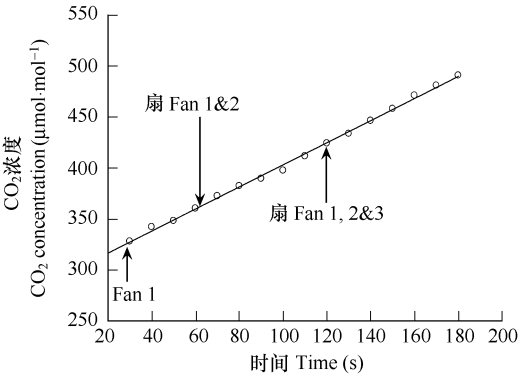


图 5 随风扇数目增加通量箱内部 CO₂ 浓度随时间的变化

Fig.5 Changes in CO₂ concentrations with fans increased

2.3 通量箱内外的环境条件变化

通量箱测定陆地生态系统与大气间 CO₂ 交换通量时,存在的问题之一是通量箱的放置可能会改变被观测地点的环境条件,从而造成观测值和实际值的偏离。为了尽可能的减少对环境条件的影响,本文设计的多通道全自动通量箱系统,在测定时箱盖自动开闭,观测时通量箱关闭的时间只有 3 min,在 1 h 内有 57 min 箱盖是打开的,与外界保持能量和物质的正常交换。尽管如此,还是有必要对多通道全自动通量箱系统对所测地点环境的改变情况进行测定。

对多通道全自动通量箱系统对被测地点环境条件影响的评估主要考虑了如下气象因子:气温、土壤温度和水分。采用普通温度计测定气温,红外温度计(THI-700F)测定土壤表面温度,探针式红外温度计(AD-5604)垂直插入土壤测定 10 cm 处土壤温度,土壤水分观测采用湿度计(HH2 Moisture Meter)。观测主要是在

5 月到 9 月气温比较高的时期,随机选取白天不同时间进行测定。测定的地点为中国科学院长武农业生态试验站。评估时分两种情况:一是评价通量箱关闭时箱内气温的变化,二是评价通量箱的长期放置对通量箱覆盖区域内的气温、土壤温度和土壤湿度的影响。

2.3.1 通量箱关闭时箱内气温的变化

通量箱盖的闭合切断了箱内外通过箱顶进行能量交换的途径,在太阳辐射较强的白天,导致通量箱内部气温的升高。从 8 月 27 日到 9 月 9 日,在每天白天太阳辐射相对最强的时间段(气温介于 26℃ 到 33.5℃ 之间),对通量箱外部气温和闭合 3min 后的内部气温进行测定,并对二者的差异利用 SPSS 软件,进行检验(Independent-Samples *T* test),结果表明,小麦田通量箱闭合 3min 后,内外温度差异达到极显著水平。苹果园内的通量箱闭合 3min 后,内外温度差异不显著(表 1)。在全光照情况下,尽管闭合时间很短,通量箱内部气温还是有较大的升高。类似现象在其他通量箱系统上也有发生^[7]。有关通量箱内部气温的控制机理还有待深入探讨研究。

表 1 通量箱关闭 3min 后,内部气温与外部气温差值(℃)*

Table 1 Temperature difference between the inside and the outside of the chambers after the chambers were closed for 3 minutes					
土地利用类型 Land use type	样本数 <i>N</i>	最大差值 Maximum	最小差值 Minimum	平均值 Mean	显著性 Significance
苹果园 Apple orchard	24	3	0	1.1	$P > 0.05$
小麦田 Wheat field	24	6.5	0.2	3.6	$P < 0.01$

* 温度差值是通量箱内部气温减外部气温的差值; $P > 0.05$,差异不显著; $P < 0.01$,差异显著 Temperature difference is the temperature inside the chambers minus the temperature outside the chambers; $P > 0.05$ indicates that the difference is insignificant; $P < 0.01$ indicates that the difference is significant

2.3.2 通量箱打开状态下,箱内外气温的差异

在通量箱盖打开的情况下,从 8 月到 9 月对通量箱内外气温进行了 11 个晴天的测定,对测得结果进行检验(Independent-Samples *T* test),结果表明,通量箱内外气温差异不显著(表 2)。这也表明,在不测定时通量箱的上盖自动打开,保持开放状态有利于箱内外能量交换,使内外温度差别不明显。

表 2 小麦田、苹果园内的通量箱在开盖情况下内外气温差值(℃)*

Table 2 Air temperature difference (℃) between the inside and the outside of the chambers when they were open					
土地利用类型 Land use type	样本数 <i>N</i>	最大差值 Maximum	最小差值 Minimum	平均值 Mean	显著水平 Significance
苹果园 Apple orchard	28	2.60	0.00	0.71	$P > 0.05$
小麦田 Wheat field	28	4.00	-1.50	1.48	$P > 0.05$

* 是通量箱内部气温减外部气温的差值; $P > 0.05$,差异不显著 Temperature difference is the temperature inside the chambers minus the temperature outside the chambers; $P > 0.05$ indicates that the difference is insignificant

2.3.3 地表温度和土壤 10cm 温度

在开盖情况下,5 月到 9 月期间 10 个晴天的观测结果表明(表 3),无论小麦田还是苹果园,通量箱内外平均地表温度差异和 10cm 土壤温度平均差值都在 1℃ 以内,小麦田内外土壤及地表温度差别较苹果园略大。检验(Independent-Samples *T* test)的结果表明,在放置半年期间,通量箱内部的地表温度和土壤 10cm 温度与其外部环境的地表温度和土壤 10cm 温度差异均不显著($P > 0.05$)。

2.3.4 土壤湿度

在 5 月到 10 月,测定了放置在小麦田和苹果园里的通量箱的内部和外部的表层土壤湿度。测定的深度范围为从地表向下 5cm。这样的测定随机进行了 5 次。利用 SPSS 软件,对测定结果进行分析。检验(Independent-Samples *T* test)的结果表明,通量箱内外土壤表层 5cm 范围内的湿度差异不显著(表 4)。

表 3 通量箱内外土壤温度差值 (℃)*

Table 3 Soil temperature difference between the inside and the outside of the chambers when they were open

土地利用类型 Land use type		样本数 N	最大差值 Maximum	最小差值 Minimum	平均差值 Mean	显著水平 Significance
苹果园 Apple orchard	地表温度 Temperature at the depth of 0cm	365	6.4	-4.8	0.38	$P > 0.05$
	土壤 10cm 温度 Temperature at the depth of 10cm	177	3.9	-3.2	0.14	$P > 0.05$
小麦田 Wheat field	地表温度 Temperature at the depth of 0cm	190	10	-3.6	0.75	$P > 0.05$
	土壤 10cm 温度 Temperature at the depth of 10cm	35	2.8	-3.7	-0.19	$P > 0.05$

* 温度差值是通量箱内部温度减外部温度的差值 (℃) ; $P > 0.05$,差异不显著 Temperature difference is the temperature inside the chambers minus the temperature outside the chambers ; $P > 0.05$ indicates that the difference is insignificant

表 4 通量箱内外表层土壤湿度差值 (m³·m⁻³)*

Table 4 Soil moisture difference between the inside and the outside of the chambers

土地利用类型 Land use type	样本数 N	最大差值 Maximum	最小差值 Minimum	平均差值 Mean	显著性水平 Significance
苹果 Apple orchard	75	0.597	-0.790	-0.129	$P > 0.05$
小麦田 Wheat field	52	0.619	-0.580	0.127	$P > 0.05$

* 土壤湿度差值为通量箱内部的土壤湿度减去外部的土壤湿度所得的差值 ; $P > 0.05$,差异不显著 Moisture difference is the soil moisture inside the chambers minus the soil moisture outside the chambers ; $P > 0.05$ indicated that the difference is insignificant

3 多通道全自动通量箱的测定结果

3.1 麦田生态系统与大气间 CO₂交换通量、麦田土壤呼吸和果园土壤呼吸

4 月 21 日到 4 月 22 日在中国科学院长武农业生态试验站对小麦田和果园进行了研究。4 月 21 日 ,小麦田生态系统与大气间的 CO₂生态系统净收支 (NEE , Net Ecosystem Exchange)如图 6 (a)所示 ,在 0 00 到 6 00 间整体表现为释放 ,从 0 00 到 4 00 变化相对平缓 ,5 00 有所降低 ,6 00 略有升高 ,7 00 左右 ,生态系统由释放 CO₂转化为吸收固定 CO₂。在 9 00 时间段 ,小麦生态系统吸收固定 CO₂的强度达到最大 ,然后降低 ,到 18 00生态系统再次由吸收固定 CO₂转为释放 CO₂ ,表现为由负值逐渐变为正值。19 00 时 ,生态系统释放 CO₂的强度最小。生态系统释放 CO₂水平在晚上 20 00 时间段最大 ,然后逐渐降低。由 4 月 21 日和 22 日两天的连续观测结果来看 ,小麦生态系统净收支的日变化的特点是 ,晚间变化相对平缓 ,7 00 左右 ,晚上 19 00 左右是生态系统吸收固定和释放的转折时间点 ,9 00 到 10 00 生态系统的吸收固定强度最大。连续 2d 的夜晚麦田生态系统的排放强度分别在 3.34 ~ 6.92μmol·m⁻²·s⁻¹间变化。在晴天呈现近似单峰变化。连续 2d 的 CO₂吸收最大强度分别为 -15.9μmol·m⁻²·s⁻¹和 -17.1μmol·m⁻²·s⁻¹。连续观测 2d 的麦田生态系统与大气间的 CO₂交换通量平均值为 -2.35μmol·m⁻²·s⁻¹ ,即该时期的麦田生态系统整体上吸收固定 CO₂的能力强于释放 CO₂的能力。

果园和麦田的土壤呼吸速率的日变化趋势如图 6 (b) ,果园的平均呼吸速率是 6.61μmol·m⁻²·s⁻¹ ,麦田是 3.87μmol·m⁻²·s⁻¹。果园土壤的呼吸强度在 15 00 到 16 00 左右最大 ,约 9.8μmol·m⁻²·s⁻¹到 10μmol·m⁻²·s⁻¹。麦田土壤的呼吸强度分别在 16 00 和 12 00 左右最大 ,约 5.2μmol·m⁻²·s⁻¹到 5.4μmol·m⁻²·s⁻¹。

3.2 环境因子

该系统能够同步监测大气温度、大气湿度、光强、土壤湿度、土壤温度等环境因子 (图 7) 。4 月 21 日是较为典型的晴天 ,大气湿度从 0 00 开始升高 ,到凌晨 4 00 达到最大 ,然后开始降低 ,到 14 00 时 ,空气湿度在一天中最小 ,然后逐渐上升。气温从 0 00 开始降低 ,到凌晨 4 点达到最低 ,然后开始升高 ,16 00 ,气温升至最大 ,然后开始下降。光强从 6 00 开始变化 ,在正午出现很规则的波峰。一天当中 ,土壤湿度呈现微弱的波动 ,苹果园的湿度较麦田的大。土壤 10cm 温度从 0 00 开始降低 ,到 7 00 达到最低 ,然后升高 ,到 16 00 达到最

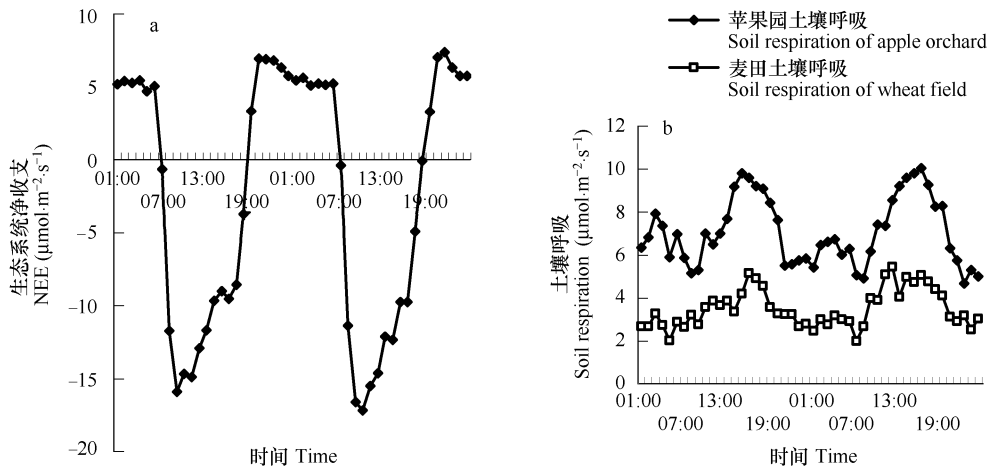


图 6 小麦田生态系统 NEE (a)、苹果园和麦田土壤呼吸 (b) 的日变化

Fig. 6 Diurnal changes of NEE of wheat ecosystem (a) and soil respiration of wheat field and apple orchard (b)

大。土壤 20cm 温度从 0 00 开始降低,到 10 00 达到最低,然后开始上升,到 19 00 达到最大。苹果园和小麦田的地温变化趋势一致,且在同一深度到达最高或最低值的时间一致。对环境因子的同步精准测定对于理解土壤呼吸的环境响应有非常重要的意义。

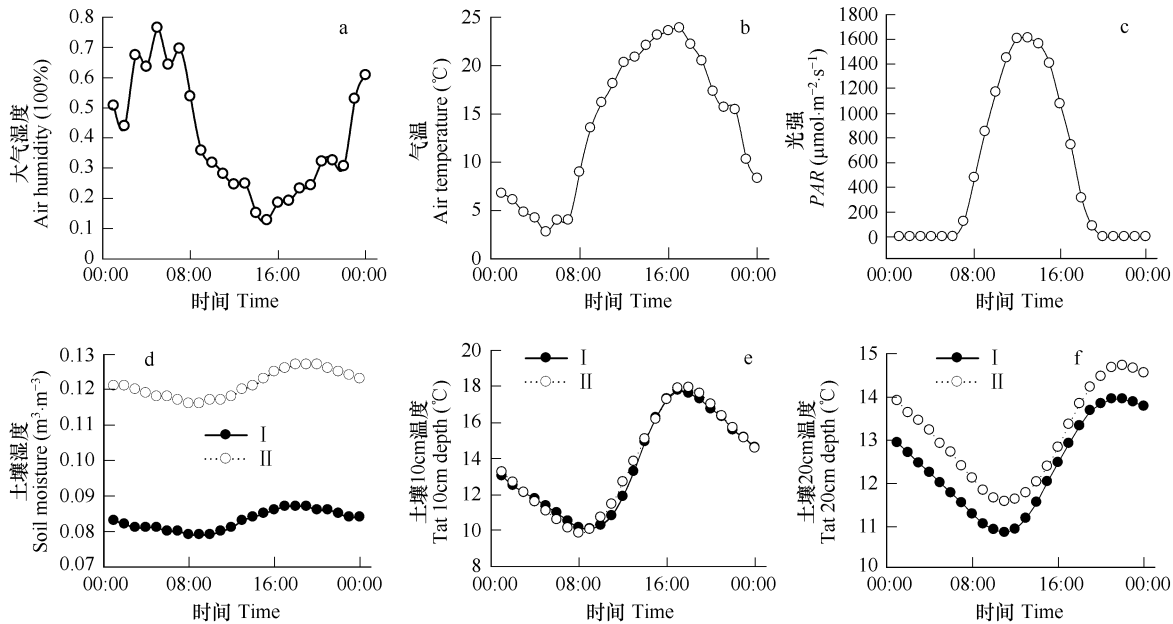


图 7 环境因子日变化

Fig. 7 Diurnal changes of environmental factors

(a)空气湿度的日变化;(b)气温的日变化;(c)光强的日变化;(d)土壤湿度的日变化;(e)10cm 地温的日变化;(f)20cm 地温的日变化,其中,I 代表麦田,II 代表果园 (a)Diurnal course of air humidity;(b)Diurnal course of air temperature;(c)Diurnal course of PAR;(d)Diurnal course of soil moisture;(e)Diurnal course of soil temperature at 10cm depth;(f)Diurnal course of soil temperature at 20cm depth;I represents wheat field,II represents apple orchard

4 结论与讨论

经过在黄土高原长武农业生态试验站为期半年度系统测试及试运行,证明该系统比较稳定,数据也比较可靠。该系统的特点如下:

(1)测定基本准确可靠。该系统采用国际通用的 Li-cor 公司的 LI-820 CO₂分析仪,该分析仪具有压力补偿机制,在保证气路密闭的条件下可以准确测定相对湿度 95% 以下的空气内的 CO₂浓度 (LI-820 CO₂ Gas Analyzer Instruction Manual)。为了控制水分在仪器要求范围内,在干燥管内填充变色硅胶,吸收样品气体中的水分,当硅胶的 80% 变红时即行更换。进行的系统测试结果表明,箱盖上的平衡管以及风扇的搅拌都不对结果构成明显的影响。在苹果园里,在 10 月 28 日,就相似地块,本系统测得土壤呼吸的结果为 2.79 μmol·m⁻²·s⁻¹,比 Li-6400-09 呼吸室测定结果 (2.36 μmol·m⁻²·s⁻¹)略高。造成这样结果的可能原因是 Li-6400-09 土壤呼吸室覆盖地面时,被测定地表因为被阻隔了太阳辐射而温度降低,或者可归因为土壤呼吸的空间变异,本研究中,10 月 28 日白天,果园土壤呼吸的空间变异系数平均为 31.3%。

(2)通量箱的反应速度快,对环境改变相对较小,连续性强。Bubier 的自动监测系统完成一个点的测定要 18min,循环一遍要 3h,连续性不够^[10]。梁乃申教授开发出了一套开放气路全自动循环测定系统,然而由于该系统采用开放气路,每个通量箱,从闭合达到平衡所需要时间长达 20min,引起了箱内温度的较大升高,当外界温度为 30~35℃ 时,通量箱内部温度甚至升高 15℃^[12]。本研究开发的多通道全自动通量箱测定系统中,每个通量箱闭合 3min 就可以完成对一个地点的测定,测定期间通量箱内部温度升高比梁乃申教授开发的系统要小。因为系统反应速度快,测定的连续性也得到了很大的提高。此外,由于通量箱绝大部分时间处于打开状态,雨、雪、凋落物都可以进入通量箱,这样能够更好的反映生态系统的自然状况。本研究的测定结果表明,通量箱内外的气温、土壤温度和湿度在较长时间内没有明显差异。

(3)取样面积大。自制通量箱覆盖面积 (0.25m²)比 Li-6400-09 土壤呼吸室 (0.00716~0.008 m²)大,有效的减小了“边缘效应”^[17]和土壤呼吸空间异质性所造成的观测误差。

(4)通量箱数目多。本系统含有 18 个通量箱,是单箱自动监测系统的发展^[13]。本系统是目前公开发表的文献中包括通量箱数目最多的多通量箱箱系统。Drewitt 的系统包括 6 个通量箱^[8],Bubier 的系统包括 10 个通量箱^[10],梁乃申的系统包括 16 个通量箱^[12]。通量箱数目多其好处在于,其一,测定 NEE 时,较多的重复可以有效避免偶然现象造成的误差。比如,浮云的影响。其二,反映地表 CO₂释放或者土壤呼吸的空间变异并且使代表性更强;其三,可以允许不同水平的较多重复,方便比较研究。

(5)自动化程度高,维护保养简单易行。系统一旦调试成功,在正常供电情况下,可全自动运行,较少需要人力维护。实现了全天候自动监测。维护主要是进行空气压缩机的定期排水、干燥剂更换、通量箱内汽缸定期润滑和定期校正 CO₂分析仪。

(6)比较经济。该系统除 CO₂红外分析仪外,全部采用国内生产的配件,投资较少。运用 PLC 控制代替数据采集器控制通量箱的自动开启闭合^[8],有效的降低了成本。

在经过近 1a 的运行后,也注意到了该系统还可以进行以下改进,进一步提高稳定性和可靠性:

(1)测定 NEE 的通量箱框架不可避免的遮挡了一部分光线进入通量箱,这可能会造成对植物光合作用的变化的较低估计。因此建议采用透光率高的材料直接压制成没有框架的通量箱。

(2)进行原位长期土壤呼吸测定的通量箱的高度应该尽可能的降低,并且采用顶盖不透光而四周透明的半透明箱,这样当通量箱盖打开时,有利于通量箱内外能量的良好交换,闭合期间内部温度不至于升高或降低太快,使内外环境基本一致。

References :

[1] Law B E, Kelliher F M, Baldocchi D D, *et al.* Spatial and temporal variation in respiration in a young ponderosa pine forests during a summer drought. *Agric. For. Meteorol.*, 2001, 110 : 27~43.

[2] Kiritani H, Re-examination of the absorption method of measuring soil respiration under field conditions IV. An improved absorption method using a disc of plastic sponge as absorbent holder. *Jpn. J. Ecol.*, 1971, 21 : 119~127.

[3] Biscoe P V, Scott R K, Monteith J L. Barley and its environment III. Carbon budget of the stand. *J. Appl. Ecol.*, 1975, 12 : 269~291.

[4] Loftholm N S, Brumme R, Beese F. Automated monitoring of nitrous oxide and carbon dioxide flux from forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992,

56 :1147 – 1150.

[5] Bekku Y , Koizumi H. Measurement of soil respiration use closed chamber method with an IRGA technique. *Ecological Research* ,1997 ,10 :369 – 374.

[6] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems : past , present and future. *Global Change Biology* ,2003 ,9 :479 – 492.

[7] Steduto P , Çetink  k      , Albrizio R. Automated closed-system canopy-chamber for continuous field-crop monitoring of CO₂ and H₂O fluxes. *Agric. For. Meteorol.* 2002 ,111 :171 – 186.

[8] Drewitt G B , Black T A , Nesic Z , *et al.* Measuring forest floor CO₂ fluxes in a Douglas-fir forest. *Agric. For. Meteorol.* ,2002 ,110 :299 – 317.

[9] Bubier J , Crill P Mosedale A , *et al.* Peatland responses to varying interannual moisture conditions as measured by automatic CO₂ chambers. *Global. Biogeochem. Cycles.* ,2003 ,17 (2) 1066 doi :10.1029/2002GB001946 ,2003.

[10] Bubier J , Crill P , Mosedale A. Net ecosystem CO₂ exchange measured by autochambers during the snow-covered season at a temperate peatland. *Hydrological. Processes.* ,2002 ,16 3667 – 3682.

[11] Jukka Pumpanen. CO₂ efflux from boreal forest soil before and after clear-cutting and site preparation. University of Helsinki , Finland ,2003.

[12] Naishen L , Gen I and Yasumi F. A multichannel automated chamber system for continuous measurement of forest soil CO₂ efflux. *Tree physiolog* , 2003 ,23 825 – 832.

[13] Duan X ,Wang X ,Feng Z , *et al.* Study of Net Ecosystem Exchange for seedling stage of spring wheat ecosystem in Hetao Irrigation District ,Inner Mongolia. *Acta Scientiae Circumstantiae* 2005 25 (2) :166 – 171.

[14] Hutchinson G L & Mosier A R. Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. *Soil Science Society of America Journal.* 1981 ,45 :311 – 316.

[15] Griffis T J , Black T A , Gaumont-Guay D , *et al.* Seasonal variation and partitioning of ecosystem respiration in a southern boreal aspen forest. *Agric. For. Meteorol.* ,2004 ,125 :207 – 223.

[16] Reicosky D C , Kucharik. C J Canopy gas-exchange in the field : closed chambers. *Remote Sensing Rev.* ,1990 ,5 (1) :163 – 177.

[17] Norman , J M , C J , *et al.* A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes. *J. Geophys. Res.* ,1997 ,102 (28) :771 – 777.

参考文献：

[13] 段晓男 ,王效科 ,冯兆忠 ,等. 内蒙古河套灌区春小麦苗期生态系统 CO₂ 通量变化研究. *环境科学学报* 2005 25 (2) :166 ~ 171.