

## 长江下游农业生态区 CO<sub>2</sub> 通量的观测试验\*

卞林根<sup>1)</sup> 高志球<sup>1)</sup> 陆龙骅<sup>1)</sup> 汪 瑛<sup>2)</sup> 谌志刚<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

<sup>2)</sup>(广东省气象局,广州 510080)

### 摘 要

利用2001年6月10日~7月20日在安徽省全椒县稻田和2002年6月10日~7月20日在肥西县农作物混作区观测的近地层 CO<sub>2</sub> 和能量通量资料,对农作物混作区和稻田 CO<sub>2</sub> 通量特征进行了比较。结果表明:平均情况下,观测期内稻田白天(夜间)吸收(放出) CO<sub>2</sub> 为 55.16 g·m<sup>-2</sup>(14.19 g·m<sup>-2</sup>);农作物混作区白天(夜间)吸收(放出) CO<sub>2</sub> 为 22.67 g·m<sup>-2</sup>(12.40 g·m<sup>-2</sup>);稻田白天吸收的 CO<sub>2</sub> 通量随水稻生长而逐渐增加,夜间放出的 CO<sub>2</sub> 在拔节期最高;农作物混作区 CO<sub>2</sub> 通量在整个观测期并没有显著改变;稻田和农作物混作区均为大气 CO<sub>2</sub> 的汇。对 CO<sub>2</sub> 通量与光合有效辐射的关系分析表明:白天稻田吸收的 CO<sub>2</sub> 通量与到达地面的光合有效辐射存在着显著的负相关关系。文中结果为数值模拟稻田与近地层大气 CO<sub>2</sub> 交换提供了重要依据。

关键词:长江下游 农业生态系统 农作物混作区 涡动相关

### 引 言

随着我国经济的高速发展,CO<sub>2</sub> 总排放量呈加速增长趋势。进一步认识我国主要生态系统 CO<sub>2</sub> 通量,不仅是我国政府制定增加陆地(包括海岸)生态系统碳固定和减少碳排放政策的迫切需要,也十分有利于我国履行气候变化的联合国框架协定(UNFCCC)和参与国际环境外交谈判<sup>[1]</sup>。与全球碳循环密切相关的陆地生态系统主要有森林、草地、农田、湿地和内陆水体五大类生态系统,农田是陆地生态系统碳循环的重要组成部分<sup>[2]</sup>。农业生态区 CO<sub>2</sub> 通量和能量交换直接影响着区域性气候变化,因而多年来一直受到世界科学家的普遍关注。根据1996年在日本本州岛西南岸的冈山进行了国际稻田试验(IREX96)的观测资料,Miyata等<sup>[3]</sup>研究了灌溉与 CO<sub>2</sub> 通量的关系,发现满水稻田白天(夜间)吸收(放出)的 CO<sub>2</sub> 与排泄稻田不同,并认为这是由排泄稻田土壤放出 CO<sub>2</sub> 所致。Katul等<sup>[4]</sup>利用欧拉二阶闭合模式估算了水稻冠层内 CO<sub>2</sub> 源汇分布,并将模拟的冠层表面 CO<sub>2</sub> 通量与由涡动相关法直接测量值进行了比较,发现它们非常接近。利用上述资料,Campbell等<sup>[5]</sup>研究了灌溉稻田 CO<sub>2</sub> 通量的日、季变化,发现 CO<sub>2</sub> 通量与环境参数(例如:光合作用激活辐射,净辐射和空气温度等)有关。陆面生物圈模式能够模拟出 CO<sub>2</sub> 通

\* 国家自然科学基金项目(40575007)和中国气象局2003年气候变化专项共同资助。

2005-04-07收到,2005-06-15收到修改稿。

量,实地观测资料的缺乏常常阻碍我们深入地分析模拟结果<sup>[6~7]</sup>。为跟踪国际生态环境的监测与研究动态,2000年在长江三角洲常熟地区进行了稻田通量观测试验,并开展了初步研究<sup>[8~9]</sup>。为了更好地研究不同区域农田生态系统近地层 CO<sub>2</sub> 通量及其变化规律,于2001年6月10日~7月20日在长江下游的安徽省全椒县,选择了具有代表性的水稻种植区,采用国际标准的先进仪器设备,进行了 CO<sub>2</sub> 和相关能量交换的综合观测试验。2002年同期利用同样的探测仪器在安徽省肥西县气象站观测场进行了 CO<sub>2</sub> 和相关的能量交换的观测试验。本文利用这两次试验资料,研究我国长江下游典型农业生态区近地面层 CO<sub>2</sub> 通量及变化规律,为进一步定量研究区域碳循环,及其对气候变化的影响提供科学基础。

## 1 观测方法

2001年6月10日~7月20日期间,稻田通量观测站设在长江下游的安徽省全椒县西郊,距县城约3 km(32°05' N,118°16' E)。稻田观测场下垫面平坦,观测塔距最近障碍物的距离超过100 m。观测期间盛行东南风,足痕(footprint)分析表明:测量得到的 CO<sub>2</sub> 通量,其中90%来自上风方向600 m的水平均匀的稻田。开始观测时水稻处于分蘖期,稻田内有灌溉水,水稻平均高度为0.20 m。观测结束时水稻已抽穗,水稻冠层平均高度为0.85 m。观测期灌溉水最少为0.03 m,最多时为0.08 m。2002年6月10日~7月20日通量观测站设在安徽省肥西县气象站(31°41' N,117°08' E)观测场内,下垫面平坦有均匀稀疏矮草,观测期间草高为0.06~0.1 m,上风方向为典型的农作物混合区,最近的建筑物在塔的北面,距塔大约70 m。

两次通量观测试验采用同样仪器设备,在气象塔4 m高处安装了三维超声风温仪、快速响应红外 CO<sub>2</sub> 和水汽传感器,数据由高速数据采集器采集,湍流量采样频率为10 Hz,每20 min自动生成一个数据文件。慢响应的温度、湿度、风及气压组成的三层(0.5,2和10 m)近地层梯度观测传感器安装在10 m气象塔上,2 m辐射架安装了向上和向下长波、短波、光合有效辐射传感器,土壤中安装了温度廓线观测系统,由DT-600采集器采集数据,慢速响应传感器的观测要素采样频率为1 min,每10 min自动生成一个数据文件,存储在PC卡中。经过对原始资料处理,得到各个湍流要素的脉动数据,然后计算每30 min的通量。涡动相关法计算 CO<sub>2</sub> 通量的表达式分别为:

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

式(1)中,定义向上为正方向, $w'$ 和 $c'$ 分别为垂直风速和 CO<sub>2</sub> 脉动, $\rho$ 为空气密度(由同步实测气压和温度求取)。

## 2 结果分析

图1分别给出2002年农作物混作区和2001年稻田30 min平均 CO<sub>2</sub> 浓度的时间序列,资料中剔除了降水时段的测量数据。由图1可见,无论是草地,还是稻田下垫面,CO<sub>2</sub> 浓度有明显的日变化,晴天和阴天浓度值的差异较大。观测期间近地层 CO<sub>2</sub> 平均浓度分

别为  $356 \times 10^{-6}$  和  $367 \times 10^{-6}$ , 其结果低于 Lu 等<sup>[8]</sup>1999 年夏季在长江三角洲常熟地区稻田测量的  $\text{CO}_2$  平均浓度  $396 \times 10^{-6}$ , 导致该差异的原因很复杂, 它与两个观测区自然特性 (比如: 附近工业经济发展状况, 裸土的比例, 稻田叶面积指数大小等) 和农户行为等有关。晴天稻田近地层  $\text{CO}_2$  浓度日较差明显大于阴天, 瞬时最大浓度达到  $603 \times 10^{-6}$ , 最小浓度低于  $300 \times 10^{-6}$ 。图 1 中, 我们还给出了 4 m 高度处空气温度分布, 可以看出,  $\text{CO}_2$  浓度的高值与对应的空气温度关系密切, 尤其是稻田表面。这一点印证了 Campbell 等<sup>[5]</sup>的研究结果: 空气温度影响灌溉稻田的  $\text{CO}_2$  浓度和通量。农作物混作区由于存在裸露的土壤, 它们释放  $\text{CO}_2$ , 从而影响着  $\text{CO}_2$  测量结果, 因此  $\text{CO}_2$  浓度分布与空气温度关系不够明显。

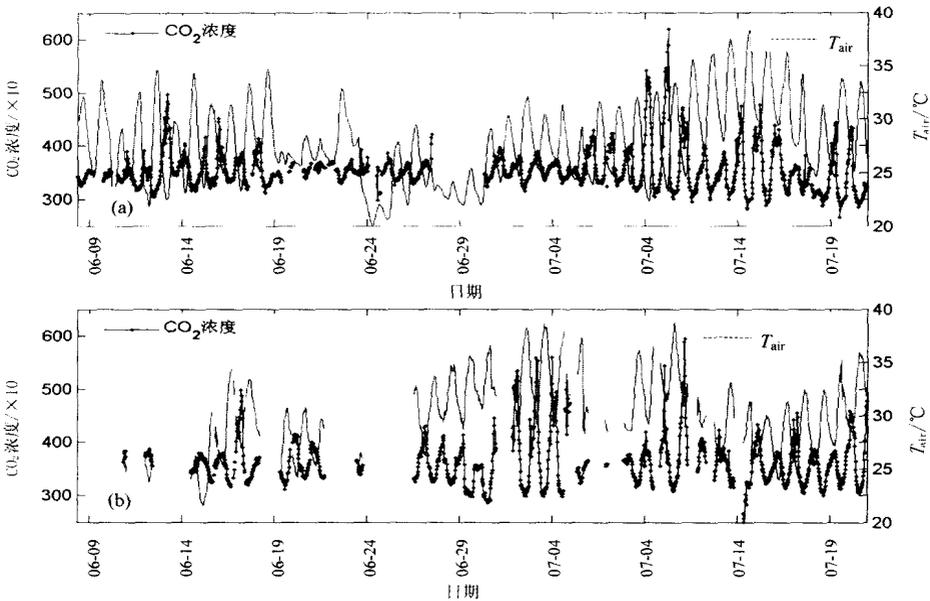


图 1 长江流域下游  $\text{CO}_2$  平均浓度及 4 m 高度处空气温度 40 天的时间序列  
(a) 2002 年农作物混作区 (安徽省肥西县), (b) 2001 年稻田 (安徽省全椒县)

图 2 为农作物混作区和稻田小时平均  $\text{CO}_2$  浓度的日变化。由图可见,  $\text{CO}_2$  浓度日变化特征十分显著, 稻田和农作物混作区日出后  $\text{CO}_2$  浓度均很快下降, 日落后  $\text{CO}_2$  浓度迅速上升, 显然  $\text{CO}_2$  浓度日变化特征与植物的光合作用有关。

随着水稻的生长, 稻田的叶面积指数逐渐增大, 因此水稻在不同生长期与大气交换的  $\text{CO}_2$  通量不同。为较详细地认识其变化特征, 将水稻的生长期划分成 3 个阶段, 即: 6 月 10 ~ 25 日为分蘖期, 6 月 26 日 ~ 7 月 11 日为拔节期, 7 月 12 ~ 20 日为抽穗期。图 3 给出了水稻不同生长期平均的  $\text{CO}_2$  通量的日变化。由图 3b 可见, 水稻在分蘖、拔节和抽穗期间, 近地面  $\text{CO}_2$  通量日变化的规律基本相同, 但通量日振幅不同。抽穗期  $\text{CO}_2$  通量的日较差明显大于拔节期和分蘖期, 白天光合作用使得水稻吸收的  $\text{CO}_2$  远大于夜晚水稻呼吸放出的  $\text{CO}_2$ ;  $\text{CO}_2$  通量在日出和日落前后改变正负号。图 3a 中给出了 2002 年对应时段的农作物混作区近地层  $\text{CO}_2$  通量, 可见它们也有日变化, 但白天稻田吸收的  $\text{CO}_2$  通量比稻田小得多, 夜间通量与稻田相差不大。表 1 给出农作物混作区和稻田在水稻不同生长期

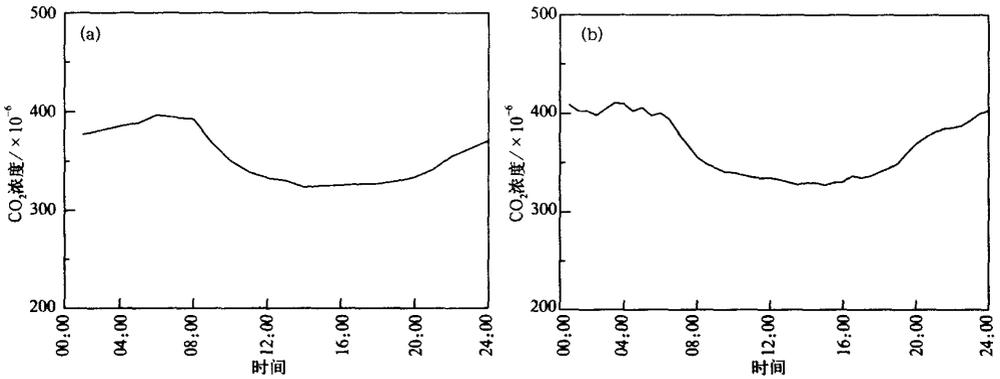


图 2 长江下游 2002 年农作物混作区(a)和 2001 年稻田(b)平均 CO<sub>2</sub> 浓度日变化

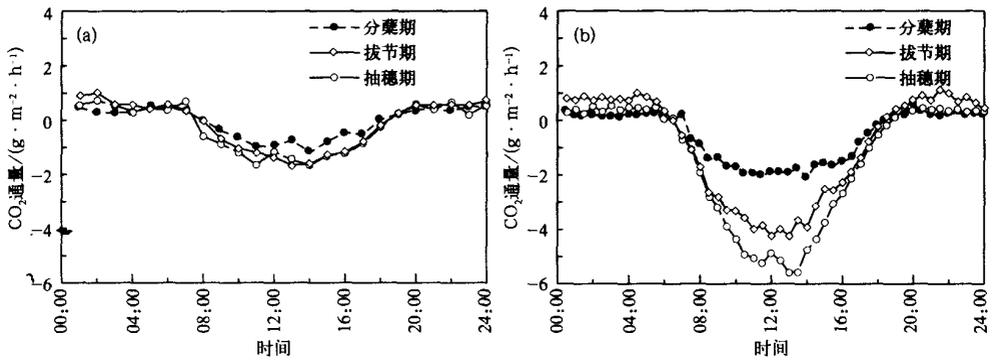


图 3 长江下游 2002 年农作物混作区(a)和 2001 年稻田(b)水稻不同生长期 CO<sub>2</sub> 通量的平均日变化

吸收和放出的平均 CO<sub>2</sub> 通量。水稻分蘖期吸收的平均 CO<sub>2</sub> 通量最小,为 1.42 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,拔节期增加到 2.45 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,抽穗期最大,达到 2.89 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,可见随着水稻的生长,净吸收 CO<sub>2</sub> 越来越多。水稻夜间放出的 CO<sub>2</sub> 随生长期的变化有所不同,分蘖期为 0.27g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,拔节期为 0.82 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,抽穗期为 0.49 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,以拔节期放出的 CO<sub>2</sub> 通量最大。

表 1 农作物混作区和稻田在水稻不同生长期吸收和放出的平均 CO<sub>2</sub> 通量 g·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>

	分蘖期	拔节期	抽穗期
稻田吸收	1.42	2.45	2.89
稻田放出	0.27	0.82	0.49
稻田净吸收	1.15	1.63	2.40
农作物吸收	0.73	1.02	1.15
农作物放出	0.48	0.57	0.51
农作物净吸收	0.25	0.45	0.64

为了更直观地看到两种不同下垫面 CO<sub>2</sub> 收支随时间的变化,图 4 给出了 CO<sub>2</sub> 通量的时间序列。尽管随着水稻的生长,整个观测期稻田白天吸收的 CO<sub>2</sub> 逐步增加<sup>[10]</sup>,但夜间放出的 CO<sub>2</sub> 在拔节期最高,这与环境气温有关。农作物混作区,整个观测期白天吸收的 CO<sub>2</sub> 和夜间放出的 CO<sub>2</sub> 没有明显的改变。观测期内稻田白天(夜间)吸收(放出) CO<sub>2</sub> 通

量平均为  $55.16 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  ( $14.19 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )。无论是白天吸收还是夜间放出,  $\text{CO}_2$  通量均大于日本稻田试验结果<sup>[3]</sup>。其结果可能由不同的叶面指数所引起。农作物混作区白天(夜间)吸收(放出)  $\text{CO}_2$  通量平均为  $22.67 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  ( $12.40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )。

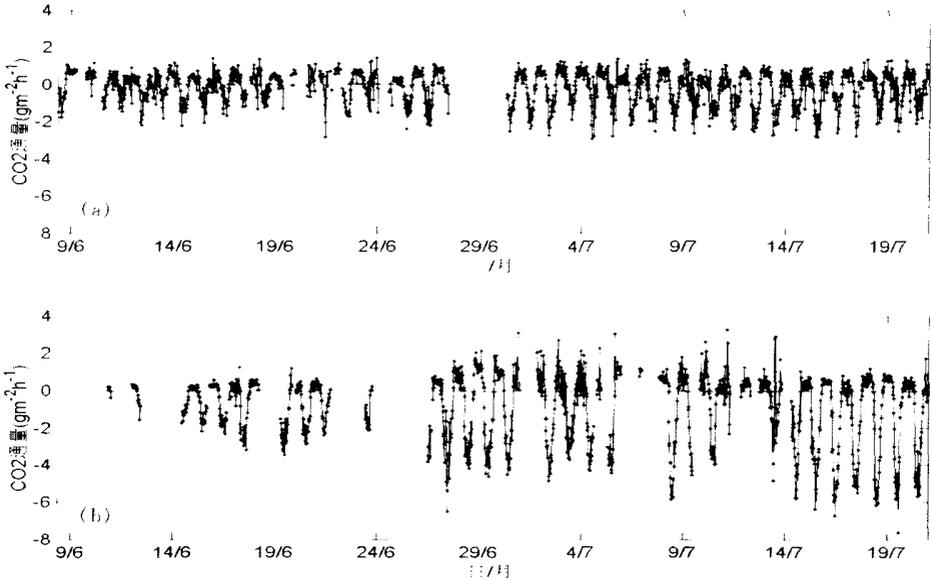


图4 长江下游2002年农作物混作区(a)和2001年稻田(b)  $\text{CO}_2$  通量时间序列

植物通过光合作用吸收  $\text{CO}_2$ , 其中起主要作用的包含在短波辐射中的光合有效辐射 ( $F_{\text{PAR}}$ ), 波长为  $0.38 \sim 0.71 \mu\text{m}$ , 为了验证  $\text{CO}_2$  观测资料的可靠性, 统计分析了  $\text{CO}_2$  通量 ( $Q_c$ ) 与  $F_{\text{PAR}}$  的关系。图5给出了水稻不同生长期  $\text{CO}_2$  通量与光合有效辐射的相关关系。由图可见, 白天水稻吸收的  $\text{CO}_2$  通量与到达地面的光合有效辐射存在着显著的负相关关系, 分蘖期、拔节期和抽穗期  $\text{CO}_2$  与  $F_{\text{PAR}}$  的相关系数都通过了置信度为 0.001 假设检验, 其中抽穗期  $\text{CO}_2$  通量对  $F_{\text{PAR}}$  的响应最敏感, 相关系数达到 -0.96, 表明本次观测试

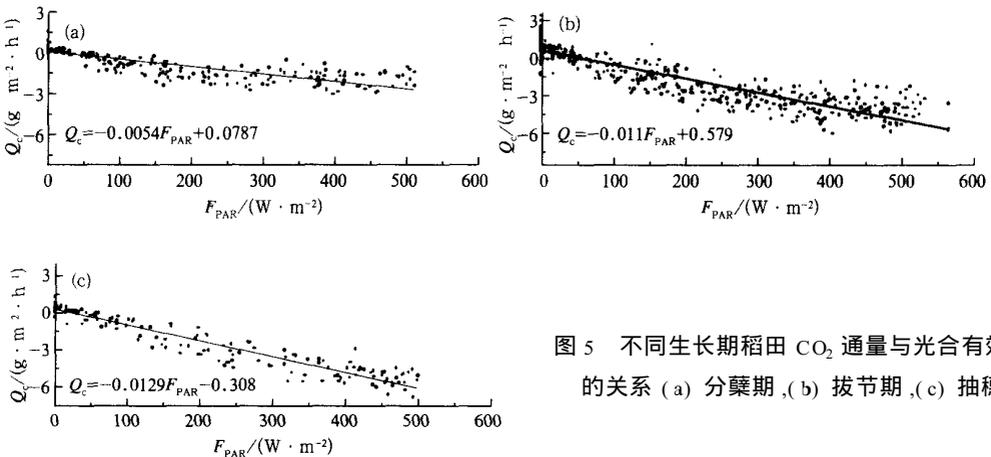


图5 不同生长期稻田  $\text{CO}_2$  通量与光合有效辐射的关系 (a) 分蘖期, (b) 拔节期, (c) 抽穗期

验所得资料具有较高的可信度,因此,可以通过光合有效辐射来评估 CO<sub>2</sub> 通量。

### 3 结语与讨论

下垫面与大气之间的物质交换主要通过湍流运动进行。涡动相关法已成为测量陆地生态系统中 CO<sub>2</sub> 交换的首选方法<sup>[11]</sup>,因此,本文观测试验资料测量精度高。对农作物混作区和稻田 CO<sub>2</sub> 通量分析表明,水稻在 3 个生长期中 CO<sub>2</sub> 通量表现出明显的日变化,中午时段光合作用最旺盛,稻田吸收的 CO<sub>2</sub> 通量达到最大值;夜间向大气释放 CO<sub>2</sub>,不同生长期的日变化的特征有所区别。观测初期水稻处于分蘖期,水稻的叶面积指数较小,光合作用的强度不大,且稻田中水体充盈,水体会阻碍土壤向大气放出 CO<sub>2</sub>,因而 CO<sub>2</sub> 通量最小。拔节期的植被密度和叶面积指数逐渐增大,光合作用和 CO<sub>2</sub> 通量也随之增大;抽穗期稻田冠层的叶面积指数最大,吸收的 CO<sub>2</sub> 也最多。3 个生长期稻田夜间向大气放出的 CO<sub>2</sub> 较白天吸收小 1 个量级,吸收约为放出的 6 倍。草地吸收与放出的 CO<sub>2</sub> 通量均小于稻田。

目前在典型农作物混作区进行的不同生长期近地层 CO<sub>2</sub> 和湍流通量特征及变化规律观测研究尚不多,在定量计算中还存在许多需要解决的问题,如冠层上平流作用对 CO<sub>2</sub> 观测的影响,中性层结条件下湍流通量计算精度等,有待于更长的观测资料来分析研究。

致谢:在野外观测试验期间安徽省气象局、全椒县气象局和肥西县气象局给予了大力支持和帮助,研究中得到周秀骥院士的指导,谨在此表示衷心感谢!

### 参 考 文 献

- 1 周秀骥,吴国雄. 中国气象事业发展战略研究. 重大科学技术问题卷. 北京:气象出版社,2004. 101.
- 2 宋长春. 湿地生态系统碳循环研究进展. 地理科学, 2003, 23(5): 622 ~ 628.
- 3 Miyata A, Leuning R, Thomas O, et al. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102: 287 ~ 303.
- 4 Katul G G, Leuning R, Kim J. Estimating CO<sub>2</sub> source/sink distributions within a rice canopy using higher-order closure models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 98: 103 ~ 125.
- 5 Campbell C S, Heilman J L, McInnes K J, et al. Diel and seasonal variation in CO<sub>2</sub> flux of irrigated rice. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 15 ~ 27.
- 6 Gao Z, Chae N, Kim J, et al. Modeling of surface energy partitioning, surface temperature and soil wetness in the Tibetan prairie using the Simple Biosphere Model 2 (SiB2). *J Geophys Res*, 2004, 109: D06102, doi:10.1029/2003JD004089.
- 7 高志球,卞林根,陆龙骅,等. 利用 SiB2 模拟水稻不同生长期稻田表面的能量和 CO<sub>2</sub> 通量. 应用气象学报, 2004, 15(2): 129 ~ 140.
- 8 Lu Longhua, Cheng Yanjie, Bian Lingen, et al. A study the turbulence fluxes transfer of CO<sub>2</sub>, sensible heat and latent heat for the surface layer over the typical rice field, Yangtze Delta. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(6): 978 ~ 987.
- 9 周秀骥. 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究. 北京:气象出版社,2004. 166 ~ 169.
- 10 Gao Z Q, Bian L G, Zhou X J. Measurements of turbulent transfer in the near surface layer over a rice paddy in China.

*J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D13): 4387, doi: 10.1029/2002JD002779.

- 11 Leuning R, King K M. Comparison of eddy covariance measurements of CO<sub>2</sub> fluxes by open and closed-path CO<sub>2</sub> analyzers. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, **59**: 297 ~ 311.

## MEASUREMENTS OF CO<sub>2</sub> FLUXES OVER TWO DIFFERENT UNDERLYING SURFACES IN AN AGRICULTURAL ECOSYSTEM OVER LOWER BASINS OF THE YANGTZE

Bian Lingen<sup>1)</sup> Gao Zhiqiu<sup>1)</sup> Lu Longhua<sup>1)</sup> Wang Ying<sup>2)</sup> Chen Zhigang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Guangdong Provincial Meteorological Bureau, Guangzhou 510080)

### Abstract

In order to better understand the regional climate change, it is necessary to quantify the CO<sub>2</sub> flux over agricultural ecosystem. CO<sub>2</sub> fluxes are collected directly by using eddy covariance over a rice paddy in the summer of 2001 and over an inhomogeneous crop surface in the summer of 2002 respectively. On average, daytime absorption and nighttime release of CO<sub>2</sub> flux by the rice paddy are  $55.16 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  and  $14.19 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , and by the inhomogeneous crop surface are  $22.67 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  and  $12.40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . Rice paddy and the inhomogeneous crop surface are sinks of atmospheric CO<sub>2</sub>. China is a great agricultural country, increasing the area of rice paddy will help CO<sub>2</sub> deposition, and will slow down increase of atmospheric CO<sub>2</sub> and greenhouse effect. In addition, the relationship between daytime absorption of CO<sub>2</sub> flux and Photosynthetically-active radiation is investigated for the rice paddy, and resulting a negative correlation. Hopefully the results obtained in present work will provide an important basis for numerical modeling of CO<sub>2</sub> flux between atmosphere and land.

**Key words:** Lower basins of the Yangtze The agricultural ecosystem Inhomogeneous crop surface Eddy covariance