

王尚明, 胡继超, 吴高学, 等. 2011. 亚热带稻田生态系统 CO₂ 通量特征分析[J]. 环境科学学报, 31(1): 217-224

Wang S M, Hu J C, Wu G X, et al. 2011. Characteristic analysis of CO₂ fluxes from a rice paddy ecosystem in a subtropical region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(1): 217-224

亚热带稻田生态系统 CO₂ 通量特征分析

王尚明^{1,*}, 胡继超², 吴高学¹, 张崇华¹, 曾凯¹, 张清霞¹, 胡逢喜¹, 冯敏玉¹

1. 江西省农业气象试验站, 南昌 330200

2. 南京信息工程大学, 南京 210044

收稿日期: 2010-01-06

修回日期: 2010-06-03

录用日期: 2010-07-07

摘要:为评价稻田生态系统大气 CO₂ 的收支状况, 2008 ~ 2009 年江西省农业气象试验站利用涡度相关技术对稻田生态系统的 CO₂ 通量进行了为期一年的连续观测. 对观测的数据进行处理和分析表明: 在生长季, 稻田生态系统 CO₂ 通量总体表现为负值, 为 CO₂ 的汇. 稻田生态系统 CO₂ 通量具有明显的日变化特征, 白天净吸收 CO₂ 的量大于夜间呼吸释放 CO₂ 的量. 水稻拔节到乳熟阶段吸收 CO₂ 的效率以及分蘖至抽穗期 CO₂ 的净固定量均明显高于生长初期和生长后期. 在非生长季的 10 月中旬晚稻收获后至次年 4 月, 除了 3 月稻田生态系统略向大气吸收 CO₂ 外, 其余各月份均向大气释放 CO₂, 非生长季稻田生态系统为大气 CO₂ 的源. 在一个年周期内, 进一步累加生长季稻田净吸收和非生长季净释放的 CO₂ 量可知, 试验区稻田生态系统从大气中净吸收 CO₂ 的量为 14.35 t·hm⁻², 其中早稻吸收 CO₂ 为 8.81 t·hm⁻², 晚稻吸收 CO₂ 为 11.71 t·hm⁻², 非生长季向大气释放 CO₂ 为 6.17 t·hm⁻², 稻田生态系统总体表现为 CO₂ 的汇.

关键词:稻田生态系统; CO₂ 通量; 特征分析

文章编号: 0253-2468(2011)01-217-08

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

Characteristic analysis of CO₂ fluxes from a rice paddy ecosystem in a subtropical region

WANG Shangming^{1,*}, HU Jichao², WU Gaoxue¹, ZHANG Chonghua¹, ZENG Kai¹, ZHANG Qingxia¹, HU Fengxi¹, FENG Minyu¹

1. Agrometeorological Experiment Station of Jiangxi Province, Nanchang 330200

2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Received 6 January 2010;

received in revised form 3 June 2010;

accepted 7 July 2010

Abstract: In order to evaluate carbon source or sink strength, CO₂ fluxes from a paddy ecosystem were continuously measured using the eddy covariance technique over the course of a year. During a cropping paddy season, the summation of CO₂ fluxes from paddy ecosystem was negative and the paddy ecosystem was a carbon dioxide sink. Distinct CO₂ fluxes characteristic of diurnal variation were observed. The net absorptive capacity of CO₂ in the day was much more than CO₂ release in the night. The absorbed efficiency of CO₂ from rice elongating stage to milk stage was higher than other stages. The net carbon dioxide fixation from tillering stage to flowering stage was much more than other stages. During a non-cropping paddy season, i. e., from late October (after the rice harvest) to the following year in April, the paddy ecosystem absorbed a small quantity of CO₂ only in March, while in other months it released CO₂, becoming a carbon source. The paddy ecosystem absorbed 14.35 t·hm⁻² of CO₂ from the atmosphere over a year, including 8.81 t·hm⁻² of CO₂ absorbed by early season rice and 11.71 t·hm⁻² by late season rice. Although the paddy ecosystem released 6.17 t·hm⁻² of CO₂ during a non-cropping paddy season, it was an overall carbon dioxide sink for the atmosphere.

Keywords: paddy ecosystem; CO₂ fluxes; characteristic analysis

1 引言 (Introduction)

大气中 CO₂ 浓度的增加被认为是全球变暖的重

要原因之一 (Zhu *et al.*, 2007), 根据 IEC1634 号报告, CO₂ 对全球气候变暖的贡献率为 60%, 在温室气体中排最前. 我国是最大的水稻生产国家, 水稻播

基金项目: 2006 年江西省气象科技创新基金项目

Supported by the Meteorological Science Foundation of Jiangxi Province in 2006

作者简介: 王尚明 (1968—), 男, 工程师, E-mail: wangshm971007@163.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: WANG Shangming (1968—), male, engineer, E-mail: wangshm971007@163.com; * Corresponding author

种面积占我国粮食作物总面积的 1/4,稻田是我国特别是南方亚热带陆地面积较大的生态系统,是农田生态系统的重要组成部分,在陆地生态系统碳循环中有着重要的作用。一方面,水稻通过光合作用固定大气中的 CO_2 ,另一方面,水稻和土壤的呼吸作用又向大气释放 CO_2 (Zhou *et al.*, 2007)。 CO_2 的源汇评价已经成为国际上研究的焦点问题 (Moureau *et al.*, 2006; Berbiggier *et al.*, 2001), 对稻田生态系统 CO_2 通量在不同时空尺度的交换特征及定量化研究,分析稻田生态系统 CO_2 通量的动态变化特征及源汇状况,对于评价稻田生态系统对温室气体 CO_2 的收支与排放能力具有重要意义。

国内有关稻田生态系统 CO_2 排放的研究相继展开,早期邹建文等 (2004) 利用静态箱法,估算了稻田生态系统-大气 CO_2 净交换,涡度相关技术 (EC) 的使用,使稻田生态系统 CO_2 通量研究取得了一定进展 (Song *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2008)。 涡度相关技术为一种直接 CO_2 界面通量测定方法,属于微气象技术范畴 (Baldochi *et al.*, 1988), 涡度相关是指某种物质的垂直通量,即这种物质的浓度与其垂直速度的协方差。 涡度相关法可测得生态系统长期或短期的环境变量,从而定量理解生态系统中物质和能量的交换过程。 在地势平坦、植被均匀的下垫面,涡度相关系统观测的垂直通量,可以近似地认为等于生态系统碳代谢过程的 CO_2 收支。 涡度相关技术使得连续和长期的通量观测成为可能 (Zhu *et al.*, 2007), 可以在小时、天、季节的时间分辨上研究碳交换与环境因子的关系,这些优势是其它方法难以做到的 (Song *et al.*, 2006)。 本试验在前人研究的基础上,利用涡度相关技术在周期为 1 年的时间尺度内,对稻田生态系统的 CO_2 通量进行了连续的观测,分析稻田生态系统在水稻生育期和非生长季的 CO_2 通量变化规律,以期为全面和客观地评价稻田生态系统 CO_2 通量的源汇状况提供科学依据。

2 材料与方 法 (Materials and methods)

2.1 试验地概况

试验地位于江西省良种场敷林村稻田,地理坐标 $28^{\circ}30'33''\text{N}$, $115^{\circ}58'33''\text{E}$, 直线距离南昌县气象局地面气象观测场约 3km,为南昌农田生态与农业气象试验站水稻农业气象监测点,监测点所在区域为基本农田保护区,地势开阔平坦,区内连片农田

达 100hm^2 之多,为典型的双季水稻种植区,水稻 1 年两熟,冬季为闲田。 试验地所处的南昌县为亚热带季风气候,四季分明,气候温和湿润,日照充足,雨水充沛,年平均气温 17.5°C ,无霜期为 279d,年日照时数 1881.4h,年平均风速 $2.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,年降水量 1609.9mm,年平均相对湿度 77%,气候特点为春季多雨伴低温,春末夏初多洪涝,盛夏干旱又酷热,秋高气爽雨水少,冬寒冷无霜期长。 试验地为砂壤土,小于 0.075mm 的土壤颗粒占 84%,土壤 pH 值为 5.6,有机质含量约为 $24.6\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤全氮和全磷含量分别约为 $1.9\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.68\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,试验地的气候、土壤以及水稻栽培品种、生产水平在稻田生态系统中具有很强的代表性,为典型的亚热带稻田生态系统。

2.2 观测方法

在稻田建涡度相关系统自动观测仪器,开路涡度相关系统的探头安装在 3.0m 的高度,由三维超声风速仪 (CSAT3) 和 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 红外开路分析仪 (LI7500) 组成,原始采样频率为 10Hz,数据传输给数据采集器 (CAWS800),同时进行每隔 30min 的通量计算和存储,并通过 GPRS 无线传输至计算机接收终端。 本研究选取 2008 年 5 月 1 日至 2009 年 4 月 30 日之间连续观测的数据进行分析。 同时,涡度相关观测系统的传感器 HMP45D 对稻田的气温进行自动测量。 雨量采用南昌县气象局地面观测场相同时段的数据。

试验观测期间,2008 年的早稻和晚稻品种,分别为当地普遍栽培的禾盛 10 号及赣晚粳 37 号。 水稻发育期的观测方法为,当观测的总株 (茎) 数中进入发育期的株 (茎) 数达到 50% 时,即水稻进入了该发育期。

2.3 数据处理

为了真实反映生态系统与大气间的交换过程,首先要对观测数据进行严格的筛选,方法是:对每天 0:00 ~ 23:00 为 1 个观测日每隔 0.5h 共 48 个 CO_2 通量观测数据进行分析,参与 30min 通量计算的 10Hz 数据应为 18000 个左右,并对这 48 个 CO_2 通量数据用 EXCEL 作图,对数据的连续性和质量进行判断,从图上发现一些异常或偏离的数据,并对这些异常或偏离的数据进行剔除;然后采用平均昼夜变化法 (MDV) (Liu *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2009) 的数据处理方法对异常数据进行替换,此方法为一种简单的方式来反映昼夜更替或时间变化引起的

生态系统响应,而不依赖于通量和环境变量间的某种已知的函数关系,用 MDV 方法插补缺失或被剔除的异常数据时,异常或缺失数据用邻近 7~10d 的相同时段观测的正常数据平均值来替换,通过数据处理得到一套完整可靠的观测数据。

3 结果 (Results)

3.1 水稻生长季的气象条件

试验观测期间双季水稻的气温和降水气象条件见图 1 和图 2,从图中可以看出,气温的变化呈现出从早稻的抽穗至晚稻的乳熟期气温较高、其它生长阶段气温偏低的对称分布。早稻和晚稻生长期的

平均气温分别为 25.8℃ 和 27.4℃,早稻和晚稻的降雨量分别达 572.7mm 和 188.0mm。早稻移栽后至孕穗前期气温、降水和日照适宜,对早稻的生长有利,孕穗后期至乳熟灌浆期的连续降水,对早稻抽穗扬花、灌浆成熟有不利影响,7 月上旬前期有轻度的高温逼熟天气,早稻成熟后期的 4d 连续降水对高温天气有所缓解。晚稻移栽后至返青期间,气温偏高,无降水,日照适宜。分蘖前期高温干燥,但后期气象条件适宜。分蘖后至拔节期有 8 个雨日,气温偏高,日照适宜。拔节后至孕穗期的 8 月下旬平均气温 28.2℃,降水量比历年同期偏高 13.3mm,日照较少为 31.5h,不利于晚稻孕穗,而 9 月上旬平均气温

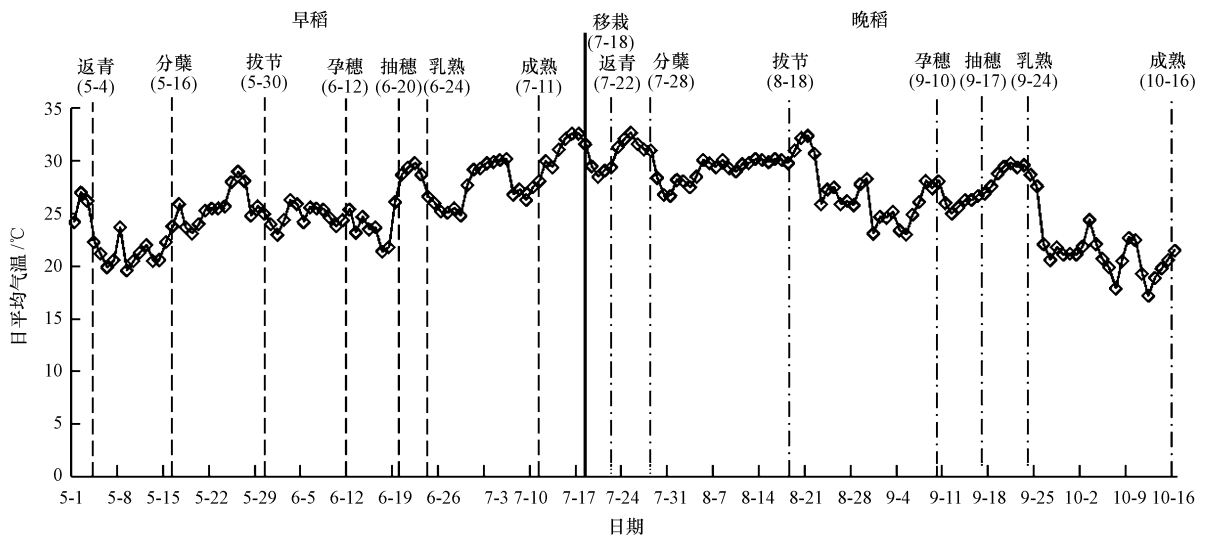


图 1 双季水稻生长期间的日平均气温

Fig. 1 Dynamic of averaged air temperature during growing stages of double cropping-season rice

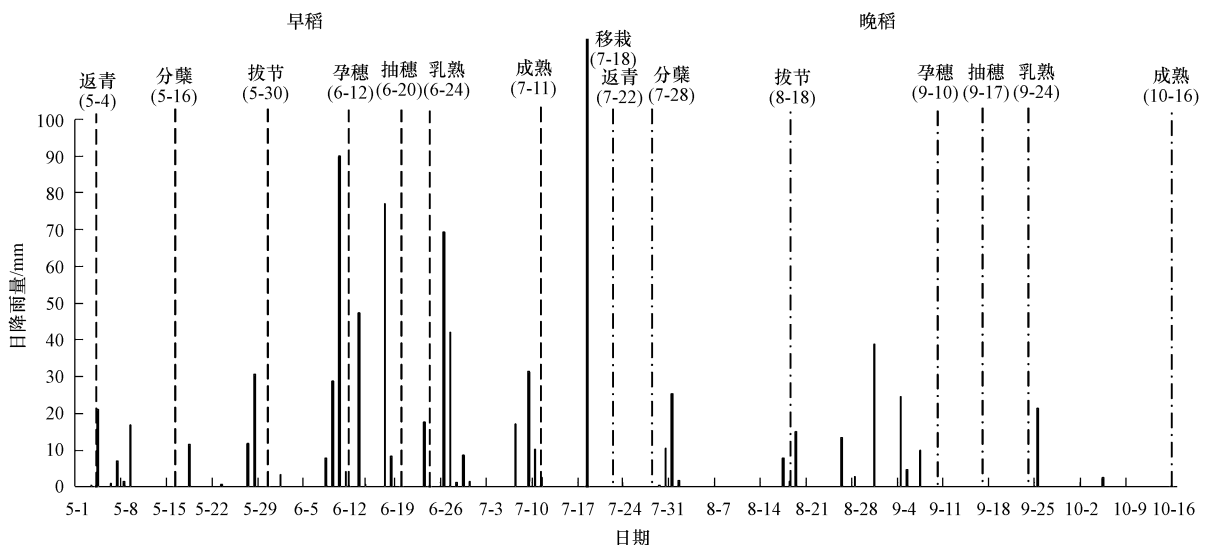


图 2 双季水稻生长期间的日降雨量

Fig. 2 Dynamics of precipitation during the growing stages of double cropping-season rice

26.2℃,日照充足,降雨量 39.2mm,对晚稻孕穗较有利.9月11~18日无降水,日照充足,未遭受寒露风.9月19~23日,连续5d的日最高气温 $\geq 35.0^{\circ}\text{C}$,湿度 $\leq 70\%$,对晚稻抽穗和灌浆有不利影响.9月25日后高温天气缓解,天气晴好,昼夜温差大,10月上、中旬处于灌浆成熟阶段,期间气温适宜,日照充足,有利于晚稻灌浆成熟.

3.2 生长季稻田生态系统 CO_2 通量

3.2.1 双季水稻生育期间稻田生态系统 CO_2 通量总体特征 采用涡度相关系统观测的 CO_2 通量表示观测面以下土壤-植被系统与大气间 CO_2 交换状况,是光合过程与呼吸过程综合作用的结果. CO_2 通量

的数据可以直接反映这种综合作用的方向和强度,当植被的光合强度大于土壤和植被的呼吸强度,表现为植被从大气中净吸收 CO_2 ,通量为负值,反之,土壤与植被系统向大气净排放 CO_2 ,通量为正值.选取2008年早稻移栽后的5月1日至成熟的7月11日,晚稻移栽后的7月18日至成熟的10月16日,分别对早稻和晚稻生育期间稻田生态系统的 CO_2 通量数据进行分析,图3表示水稻在生育期内每隔0.5h稻田生态系统 CO_2 的通量数据,从图中可以看出,早稻和晚稻生育期间稻田生态系统的 CO_2 通量总体明显表现为负值,表明双季水稻生育期间从大气中净吸收 CO_2 ,为 CO_2 的汇.

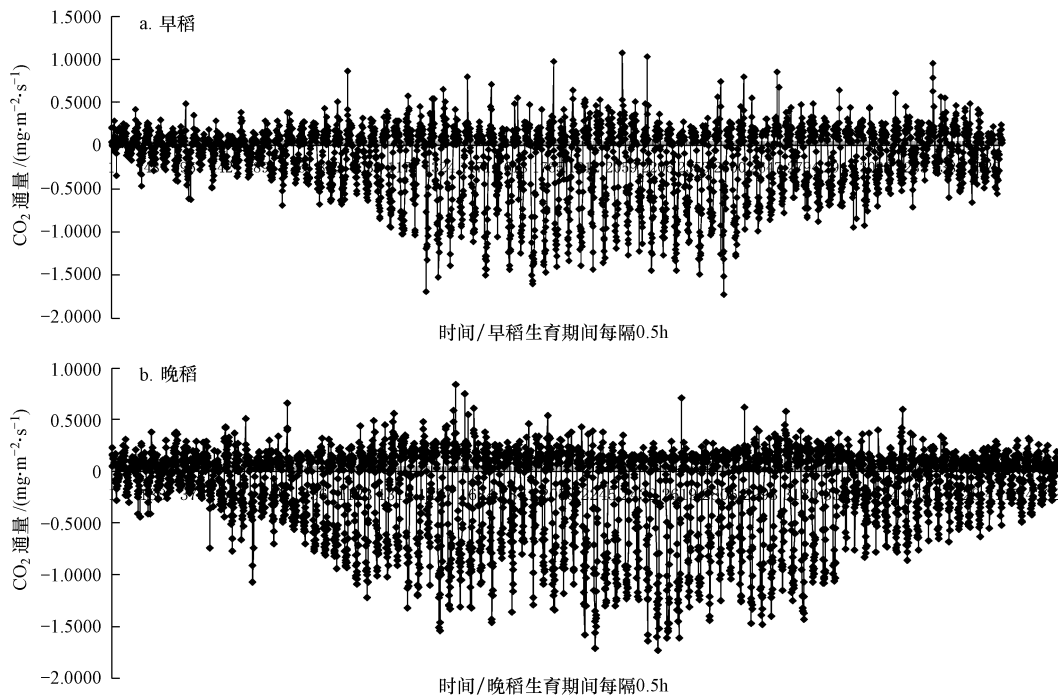


图3 水稻生育期间的 CO_2 通量

Fig. 3 Dynamic CO_2 fluxes during the rice growing period

3.2.2 不同生育期稻田 CO_2 通量状况 进一步对早、晚稻不同生育期每隔0.5h的 CO_2 通量平均(见表1),通过表1看出,早稻和晚稻从分蘖后到乳熟

阶段 CO_2 通量的平均值大于水稻生长的前期及后期,表明水稻在这些阶段吸收 CO_2 的效率较高.

表1 水稻不同生育期每半小时 CO_2 通量平均值

Table 1 Averaged CO_2 fluxes during double-season rice growing stages

| 双季水稻 | CO_2 通量平均值/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) | | | | | | |
|------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 移栽-返青 | 返青后-分蘖 | 分蘖后-拔节 | 拔节后-孕穗 | 孕穗后-抽穗 | 抽穗后-乳熟 | 乳熟后-成熟 |
| 早稻 | 0.0006 | -0.0557 | -0.1904 | -0.2554 | -0.2632 | -0.1193 | -0.0573 |
| 晚稻 | 0.0094 | -0.0040 | -0.1583 | -0.2450 | -0.2260 | -0.2210 | -0.0676 |

从表1还可以看出,除了移栽至返青期 CO_2 通

量为正值外,水稻在其它生育时期的 CO_2 通量均为

负值,这是由于水稻移栽后,生长势弱,水稻光合作用吸收的 CO₂ 抵不上稻田生态系统呼出的 CO₂,但随着水稻不断的生长发育,光合作用比呼吸作用强,稻田生态系统表现为净吸收 CO₂。

3.2.3 不同生育期 CO₂ 通量日变化特征 分别对 2008 年早、晚稻不同生育期的日通量进行平均(图 4)表明,无论早稻和晚稻,在不同生育期的 CO₂ 通量

的日变化特征大体是一致的,即白天 6:00 ~ 18:00 光合作用大于呼吸作用,早上到中午的光合作用逐渐增强,中午 12:00 左右光合作用最大,至下午逐渐减弱,白天稻田生态系统净吸收 CO₂,傍晚 18:00 至次日早上 6:00 稻田生态系统由于呼吸而释放 CO₂,从图上可以看出,白天吸收的 CO₂ 量明显大于夜间的排放量,因此,稻田为大气 CO₂ 的汇。

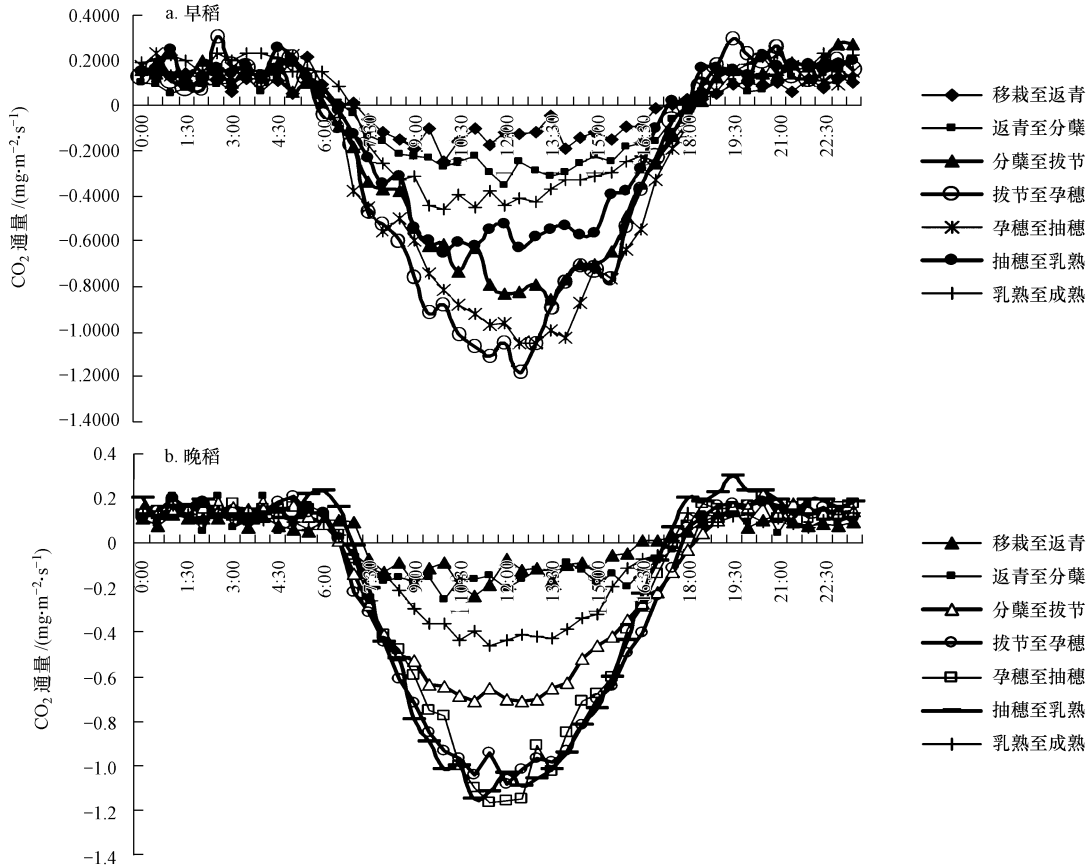


图 4 水稻不同生育期间 CO₂ 通量的平均日变化

Fig. 4 Dynamics of CO₂ fluxes over a day in different stages during the rice growing season

3.2.4 不同生育期 CO₂ 净交换量 涡度相关观测系统观测的垂直湍流通量,可以近似地认为等于生态系统碳代谢过程的 CO₂ 收支,即净生态系统 CO₂ 交换量 (NEE),本研究由于在水稻的生育期间每隔

0.5h 对稻田的 CO₂ 通量进行了连续的监测,根据 CO₂ 通量的定义,即在 1s 的时间内通过 1m² 面积的 CO₂ 净交换量,因此可以对水稻生育期间稻田 CO₂ 净交换量进行计算,见表 2。

表 2 水稻不同生育期稻田 CO₂ 净交换量

Table 2 The NEE of CO₂ during double-season rice growing stages

| 稻田 | CO ₂ 净交换量 / (kg·亩 (666.7 m ²) ⁻¹) | | | | | | | 合计 |
|----|--|--------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|
| | 移栽-返青 | 返青后-分蘖 | 分蘖后-拔节 | 拔节后-孕穗 | 孕穗后-抽穗 | 抽穗后-乳熟 | 乳熟后-成熟 | |
| 早稻 | 0.22 | -38.48 | -153.58 | -191.24 | -120.95 | -27.22 | -56.07 | -587.32 |
| 晚稻 | 2.71 | -1.38 | -191.47 | -324.62 | -91.13 | -89.10 | -85.66 | -780.65 |

注:正值为稻田净排放 CO₂,负值为稻田净固定吸收 CO₂,以下同

从表 2 可以清楚地看到,稻田除了在水稻移栽后至返青前对大气是释放 CO_2 外,其余生长发育阶段均是吸收大气中的 CO_2 ,但在不同的发育阶段稻田吸收 CO_2 的能力有所区别,如分蘖至抽穗期 CO_2 净固定量明显高于生长初期和生长后期,这与邹建文的研究结果是一致的.由于晚稻赣晚粳 37 号比早稻禾盛 10 号的生长势强,故晚稻田比早稻田的 CO_2 净交换量多.

在用涡度法观测稻田生态系统 CO_2 通量状况的

同时,按照农业气象观测规范的烘干法在水稻的分蘖、拔节、抽穗、乳熟和成熟等发育期对水稻地上部生物量进行了测定,将两种观测方法的数据(见表 3)进行比较,从表 3 可以看出,不同发育期涡度观测法观测的稻田 CO_2 净交换量和烘干法测定的水稻地上部生物量有所差异,但合计值的吻合性较好,涡度法与烘干法比较,早稻和晚稻分别相差 -3.5% 和 -9.8% .

表 3 涡度法监测稻田 CO_2 净交换量和烘干法观测水稻生物量比较

| 稻田 | 分蘖后-拔节 | | 拔节后-抽穗 | | 抽穗后-乳熟 | | 乳熟后-成熟 | | 合计 | |
|----|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| | CO_2 净交换量 (涡度法) | 水稻 生物量 (烘干法) | CO_2 净交换量 (涡度法) | 水稻 生物量 (烘干法) | CO_2 净交换量 (涡度法) | 水稻 生物量 (烘干法) | CO_2 净交换量 (涡度法) | 水稻 生物量 (烘干法) | CO_2 净交换量 (涡度法) | 水稻 生物量 (烘干法) |
| 早稻 | -153.58 | 131.87 | -312.19 | 224.21 | -27.22 | 27.67 | -56.07 | 185.47 | -549.06 | 569.22 |
| 晚稻 | -191.47 | 232.87 | -415.75 | 241.94 | -89.10 | 58.03 | -85.66 | 333.95 | -781.98 | 866.80 |

宋涛的研究(Song *et al.*, 2006)认为水稻整个生长季 CO_2 净固定量为 $5.30 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;分析邹建文在 2001 年和 2002 年研究陆地生态系统-大气 CO_2 净交换估算数据,得出水稻移栽后至成熟稻田 CO_2 的净固定分别为 $7.20 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $9.46 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;分析(Campbell *et al.*, 2001)的数据表明,水稻出苗后至成熟稻田生态系统 CO_2 净固定量在 1998 年和 1999 年分别为 $7.27 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $9.35 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,分析表 2 可知,本研究的早稻田和晚稻田移栽后至成熟的 CO_2 净固定量分别为 $8.81 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $11.71 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,这与前人的 NEE 结果接近,差异主要是由于各地的试验水稻品种、气象条件、土壤差异以及栽培水平的不同引起的.

3.3 非生长季稻田 CO_2 通量

本研究的试验稻田在 10 月中下旬收获晚稻以后,不再种植其它作物,进入冬季闲田,至次年 4 月下旬栽种早稻,稻田的非生长季约有 190d,因此,除了研究稻田生态系统在双季水稻生育期间的 CO_2 通量状况,进一步分析稻田生态系统在水稻的非生长季 CO_2 通量,对于全面了解稻田生态系统的碳收支具有重要意义.

3.3.1 非生长季稻田 CO_2 通量特征 选取 2008 年晚稻收获后的 11 月 17 日至 2009 年的 4 月 30 日,对非生长季的稻田生态系统 CO_2 通量数据进行分析,图 5 表示此阶段每隔 0.5 h 连续的 CO_2 通量特

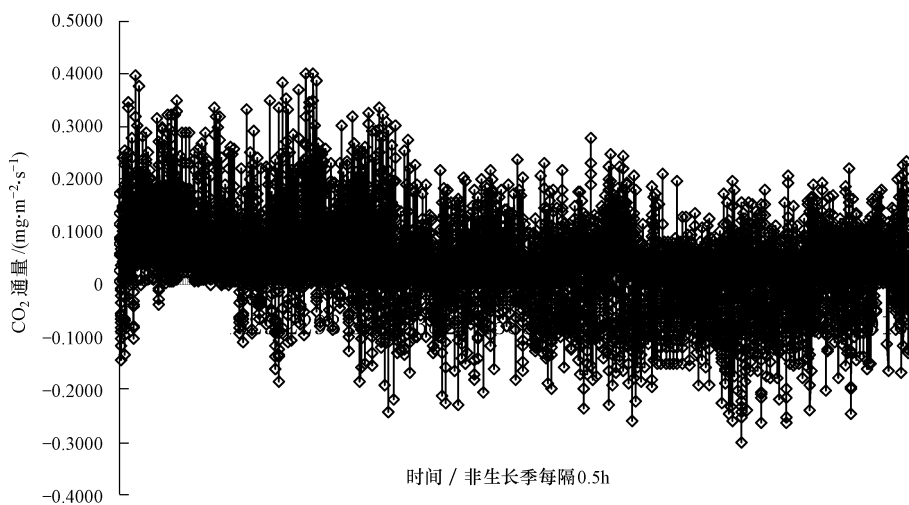


图 5 非生长季稻田 CO_2 通量

Fig. 5 Dynamic CO_2 fluxes during a non-cropping paddy season

征,从图 5 可以看出,非生长季与生长季稻田的 CO₂ 通量状况明显不同,非生长季 CO₂ 通量约围绕 0 值上下波动,即有正值也有负值,通过计算,稻田在非生长季每 0.5h CO₂ 通量的平均值为 0.0365 mg·m⁻²·s⁻¹,因此可以看出非生长季稻田为大气 CO₂ 的源。

3.3.2 非生长季不同月份稻田 CO₂ 通量状况 稻田在非生长季的 CO₂ 通量总体为正值,表现为向大气净释放 CO₂,但不同月份之间的 CO₂ 通量有所区别,10 月晚稻收获后至 11 月中期前 CO₂ 通量明显为正值,此后由于稻田冬季杂草生长,特别是冬春季禾本科杂草如看麦娘的生长,稻田 CO₂ 通量有负值出现,表现为一定的光合作用,在看麦娘生长的旺季 2~4 月,CO₂ 通量负值出现尤为明显。

对非生长季不同月份每隔 0.5h 的 CO₂ 通量值平均、计算稻田 CO₂ 的净交换量及同期的月平均气温(见表 4),可知在非生长季的 10 月至次年的 2 月,稻田向大气释放 CO₂,其中 10~12 月稻田向大气释放 CO₂ 的量比次年的 1~2 月多,3 月份稻田的 CO₂ 通量总体出现负值,表现为略从大气中吸收 CO₂,而 4 月份又表现为向大气释放 CO₂,非生长季稻田向大气排放 CO₂ 为 411.39 kg·亩(666.7m²)⁻¹,即为 6.17 t·hm⁻²。造成非生长季 CO₂ 通量在不同月份差异的原因是,水稻收获后的 10~12 月稻田为闲田,稻田杂草还没有长出来,稻田由于土壤生物的呼吸向外释放 CO₂,而 1 月份杂草开始生长,到 2~3 月份部分稻田杂草如看麦娘逐渐生长旺盛,3 月份长势最旺,稻田由于杂草的光合作用,吸收大气中的 CO₂,稻田向大气释放的 CO₂ 逐渐减少,而到 4 月时,稻田开始翻耕,植被层被大量破坏,稻田向大气释放的 CO₂ 增加,非生长季稻田总体表现为向大气

表 4 非生长季稻田 CO₂ 通量及气温

Table 4 CO₂ fluxes and averaged air temperature during a non-cropping paddy season

| 月份 | CO ₂ 通量平均值/ (mg·m ⁻² ·s ⁻¹) | CO ₂ 净交换量/ (kg·亩(666.7m ²) ⁻¹) | 平均气温 /°C |
|----|--|--|-------------|
| 10 | 0.0939 | 83.71 | 19.9 |
| 11 | 0.0675 | 116.72 | 12.9 |
| 12 | 0.0546 | 97.53 | 7.9 |
| 1 | 0.0240 | 44.01 | 4.9 |
| 2 | 0.0197 | 31.77 | 10.6 |
| 3 | -0.0029 | -4.93 | 11.7 |
| 4 | 0.0247 | 42.58 | 18.4 |
| 合计 | — | 411.39 | — |

排放 CO₂;而不同月份的气温变化又造成稻田土壤呼吸的强弱,从而引起通量的变化。但也有研究(Zhu *et al.*, 2007)认为晚稻收获后由于杂草生长旺盛,总体表现出较弱的 CO₂ 吸收,而下辽河平原稻田(Xie *et al.*, 2004)非生长季 CO₂ 净排放量为 200~10(mg·m⁻²·h⁻¹),与本研究的結果相近。

4 结论(Conclusions)

1)在生长季,稻田生态系统 CO₂ 通量具有明显的日变化特征,稻田生态系统白天净吸收 CO₂ 的量大于夜间呼吸释放 CO₂ 的量,水稻分蘖后至乳熟阶段吸收 CO₂ 的效率以及分蘖后至抽穗期 CO₂ 的净固定量均明显高于生长初期和生长后期。生长季稻田生态系统 CO₂ 通量总体表现为负值,为 CO₂ 的汇。

2)在非生长季,除了 3 月稻田生态系统略向大气吸收 CO₂ 外,其余各月份均向大气释放 CO₂,非生长季稻田生态系统为大气 CO₂ 的源。

3)在一个年周期内,进一步累加生长季稻田净吸收和非生长季净释放的 CO₂ 量可知,试验区稻田生态系统从大气中净吸收 CO₂ 14.35 t·hm⁻²,其中早稻吸收 CO₂ 8.81 t·hm⁻²,晚稻吸收 CO₂ 11.71 t·hm⁻²,非生长季向大气释放 CO₂ 6.17 t·hm⁻²,稻田生态系统总体表现为 CO₂ 的汇,稻田生态系统对于减少 CO₂ 的排放具有积极意义。

4)如何减少 CO₂ 的排放已成为当今国际社会的焦点问题,稻田生态系统为大气 CO₂ 的汇,它吸收大气中的温室气体 CO₂ 制造人类需要的粮食,为人类的生存和环境保护起到了两者兼得的作用,由此可见,稻田生态系统对于人类的可持续发展具有重要意义,应对稻田生态系统进一步加强保护和利用。

参考文献(References):

- Baldocchi D D, Hicks B B, Meyers T P. 1988. Measuring biosphere-atmosphere exchange of biologically related gases with micrometeorological methods[J]. *Ecology*, 69(5):1331-1340
- Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. 2001. CO₂ and water vapor fluxes for 2 years above Euroflux forest site[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(3):183-197
- Campbell C, Heilman J, McInnes K. 2001. Diel and seasonal variation in CO₂ flux of irrigated rice [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(1):15-27
- 刘晨峰,张志强,孙阁,等. 2009. 基于涡度相关法和树干液流法评价人工林生态系统蒸散发及其环境响应[J]. *植物生态学报*, 33(4):706-718
- Liu C F, Zhang Z Q, Sun G, *et al.* 2009. Quantifying evapotranspiration

- and biophysical regulations of a poplar plantation assessed by eddy covariance and sap-flow methods [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33(4):706-718 (in Chinese)
- Moureaux C, Debaq A, Bodson B, *et al.* 2006. Annual net ecosystem carbon exchange by a sugar beet crop [J]. *Agric For Meteorol*, 139: 25-39
- 宋涛,王跃思,宋长春,等. 2006. 三江平原稻田 CO₂ 通量及其环境响应特征 [J]. *中国环境科学*, 26(6):657-661
- Song T, Wang Y S, Song C C, *et al.* 2006. CO₂ fluxes from rice fields of Sanjiang plain and its environmental response factors [J]. *China Environmental Science*, 26(6):657-661 (in Chinese)
- 谢艳兵,梁文举,王跃思,等. 2004. 下辽河平原稻田非生长季碳排放观测研究 [J]. *生态学杂志*, 23(2):11-14
- Xie Y B, Liang W J, Wang Y S, *et al.* 2004. Carbon fluxes from a non-cropping paddy field in the lower reaches of Liaohe plain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 23(2):11-14 (in Chinese)
- 徐自为,刘绍民,徐同仁,等. 2009. 涡动相关仪观测蒸散量的插补方法比较 [J]. *地球科学进展*, 24(4):372-382
- Xu Z W, Liu S M, Xu T R, *et al.* 2009. Comparison of the gap filling methods of evapotranspiration measured by eddy covariance system [J]. *Advanced in Earth Science*, 24(4):372-382 (in Chinese)
- 尹春梅,谢小立,王凯荣. 2008. 稻草覆盖对冬闲田 CO₂ 通量的影响 [J]. *应用生态学报*, 19(1):115-119
- Yin C M, Xie X L, Wang K R. 2008. Effects of mulching on CO₂ flux in wintry fallow paddy field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(1):115-119 (in Chinese)
- 周卫军,朱良枝,郝金菊,等. 2007. 红壤丘陵区晚稻生长期 CO₂ 的排放与固定规律 [J]. *生态与农村环境学报*, 23(1):7-11
- Zhou W J, Zhu L Z, Hao J J, *et al.* 2007. CO₂ emission and fixation in paddy ecosystem during late rice growing season in red soil hilly region [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 23(1):7-11 (in Chinese)
- 朱咏莉,吴金水,陈微微,等. 2007. 稻田生态系统 CO₂ 通量的日变化特征 [J]. *中国农学通报*, 23(9):603-606
- Zhu Y L, Wu J S, Chen W W, *et al.* 2007. Diurnal characteristics of CO₂ fluxes in rice paddy ecosystem in china [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 23(9):603-606 (in Chinese)
- 朱咏莉,吴金水,童成立,等. 2008. 稻田 CO₂ 通量对光强和温度变化的响应特征 [J]. *环境科学*, 29(4):1040-1044
- Zhu Y L, Wu J S, Tong C L, *et al.* 2008. Responses of CO₂ fluxes to light intensity and temperature in rice paddy field [J]. *Environmental Science*, 29(4):1040-1044 (in Chinese)
- 朱咏莉,童成立,吴金水,等. 2007. 亚热带稻田生态系统 CO₂ 通量的季节变化特征 [J]. *环境科学*, 28(2):283-288
- Zhu Y L, Tong C L, Wu J S, *et al.* 2007. Seasonal characteristics of CO₂ fluxes from the paddy ecosystem in subtropical region [J]. *Environmental Science*, 28(2):283-288 (in Chinese)
- 邹建文,黄耀,郑循华,等. 2004. 基于静态暗箱法的陆地生态系统-大气 CO₂ 净交换估算 [J]. *科学通报*, 49(3):258-264