

亚热带稻田生态系统 CO₂ 通量的季节变化特征

朱咏莉^{1,2}, 童成立¹, 吴金水^{1*}, 王克林¹, 王勤学³, 任秀娥¹

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 2. 江苏大学农业工程研究院, 镇江 212013; 3. 日本国立环境研究所, 筑波 305-8506)

摘要: 为估算和评价稻田生态系统碳源/汇强度及其对大气 CO₂ 浓度变化的贡献, 研究了稻田生态系统与大气间 CO₂ 交换通量的季节变化特征及其影响因素. 采用涡度相关技术对我国亚热带稻田生态系统 CO₂ 交换通量进行了连续监测, 在数据剔除、校正和差补的基础上, 对瞬时 CO₂ 通量值进行计算求得日 CO₂ 通量值和年 CO₂ 通量值, 并对 CO₂ 通量季节变化及其与主要气象因子的关系进行了探讨. 结果表明, 稻田生态系统光合吸收 CO₂ 通量(GPP)、呼吸排放 CO₂ 通量(R_{eco})和净吸收 CO₂ 通量(NEE)的季节变化均呈 6~9 月较高, 1~5 月和 10~12 月较低的对称分布. 其中 5~9 月水稻生长时期的 NEE 总量占年总量的 80% 以上, 对年 NEE 总量起决定性作用. 光合有效辐射(PAR)和日平均气温(T_a)是 GPP 与 NEE 季节变化的最主要影响因子, 二者与 GPP 和 NEE 分别存在显著的二元线性关系. 年净吸收 CO₂ 总量为 2 475.6 g/(m²·a), 这表明我国亚热带稻田生态系统是大气 CO₂ 的汇.

关键词: CO₂ 通量; 涡度相关法; 稻田生态系统

中图分类号: X511; X17 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)02-0283-06

Seasonal Characteristics of CO₂ Fluxes from the Paddy Ecosystem in Subtropical Region

ZHU Yong-li^{1,2}, TONG Cheng-li¹, WU Jin-shui¹, WANG Ke-lin¹, WANG Qin-xue³, REN Xiu-e¹

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Institute of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305-8506, Japan)

Abstract: CO₂ fluxes from paddy ecosystem in subtropical hilly region were measured continuously using eddy covariance technique. Based on data rejecting, correcting and filling, the daily and annual CO₂ fluxes were calculated from the instantaneous values, respectively. The objectives were to investigate the variation of CO₂ fluxes on seasonal temporal scale, analyze the relationship between CO₂ fluxes and environmental factors, and to quantify the annual net ecosystem exchange (NEE) from the paddy ecosystem. Results show the values of GPP, R_{eco} and NEE are higher from Jun. to Sep. and lower in the other months. The NEE from May to Sep. accounted for above 80% of the annual value and is crucial to the whole annual value. Photosynthetically active radiation (PAR) and mean daily air temperature (T_a) were two main influential factors for controlling the seasonal trend of GPP and NEE and could be described by binary linear functions, respectively. The annual NEE in paddy ecosystem was 2 475.6 g/(m²·a). This is showed that paddy ecosystem was a carbon sink for the atmosphere in subtropical region.

Key words: CO₂ flux; eddy covariance technique; paddy ecosystem

目前关于 CO₂ 的源和汇评价已经成为国际上的焦点问题^[1~3]. 农业生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 深入了解典型农田系统 CO₂ 通量的交换特性及其变化规律也成为当前全球变化研究的重要内容^[4~6].

水稻是我国主要的农作物之一. 2004 年我国水稻播种面积为 28.33×10^6 hm², 占全球水稻播种面积的 18.75%, 仅次于印度(28%), 但水稻产量居世界各国首位, 占全球水稻产量的 29.32%, 比印度高出 8 个百分点^[7]. 因此, 对稻田生态系统 CO₂ 通量在不同时间尺度的变化特征及定量化研究可以为评价全球稻田生态系统对大气 CO₂ 的源/汇贡献提供十分

有价值的技术支持. 但目前国内对稻田生态系统 CO₂ 吸收/排放规律及其影响因素的研究还较为匮乏, 并且观测方法大多集中于传统的箱式法, 难以实现对水稻群体与大气间 CO₂ 净交换通量的长期的田间定位观测. 近几年, 涡度相关技术的进步使得长期和连续的通量观测成为可能, 为研究生态系统尺度 CO₂ 通量的变化规律及其对环境变化的响应提

收稿日期: 2006-02-22; 修订日期: 2006-06-28

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-426); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412503); 国家自然科学基金重点项目(40235057); 亚洲太平洋地区环境创新战略项目(APEIS)

作者简介: 朱咏莉(1976~), 女, 博士, 主要研究方向为农业环境调控和养分循环, E-mail: zhuyongli76@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jswu@isa.ac.cn

供了可靠的途径^[8~10],并且在稻田生态系统 CO₂ 通量方面也开始得到应用^[6,11].

本研究以我国亚热带区域典型稻田生态系统为研究对象,采用涡度相关法对稻田生态系统 CO₂ 通量进行了连续的动态观测,分析了稻田-大气间 CO₂ 通量交换的季节变化特征,并对 CO₂ 通量季节变化与主要环境因子的关系进行了探讨.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

表 1 田间种植与管理状况(2003 年)

Table 1 Key inputs and management during rice growing seasons in 2003						
品种	播种期 /月-日	移栽期 /月-日	收获期 /月-日	密度 /穴·m ⁻²	施肥管理 ¹⁾	水分管理
早稻(89 早 229)	03-30	04-29	07-13	37.5	04-28: 复合肥 187 kg/hm ²	07-02 后落干
					05-03: 尿素 225 kg/hm ²	
					06-09: 尿素、氯化钾各 90 kg/hm ²	
晚稻(余赤)	06-12	07-15	10-09	21.7	07-15: 复合肥 150 kg/hm ²	08-02 排水
					07-21: 尿素 150 kg/hm ² , 氯化钾 110 kg/hm ²	08-06 复水
					08-29: 尿素 60 kg/hm ² , 氯化钾 75 kg/hm ²	10-02 后落干

1) 复合肥(N:P₂O₅:K₂O = 15:15:15); 尿素(N:45%); KCl (K₂O:60%)

1.2 观测方法

从 2003-01 ~ 2003-12, 进行连续 1 a 的水、热与 CO₂ 通量的定位观测. 采用全自动涡度相关系统直接测定潜热通量、显热通量和冠层 CO₂ 通量. 传感器安装在距地面约 2 m 高度. 采用三维超声波风速温度计(CKJ-540, KAIJO)测定三维风速、风向、摩擦风速和温度. 采用热电堆型辐射计(CM21, Kipp & Zonen)、光量子计(CLI-190SB-B, Campbell Scientific, Inc.)和净辐射计(CPR-CNR1-H, Kipp & Zonen)测定总辐射、光合有效辐射、短波和长波辐射以及净辐射. 采用风向风速计(CPR-020C&CPR-010C, MET ONE)测定风向、风速; 静电容量压力计(CVS-PTB210)测定气压; 阻抗性测温计(CVS-HMP45D, 强制通风型, VAISALA)和高分子静电容量型湿度计(CPR-034A, CVS-HMP45D, 强制通风型, VAISALA)测定气温和湿度. 红外辐射温度计(CML-505, Minolta)测定冠层温度, 翻转型雨量桶(COT-43T, Ota)测定降雨量.

用非分散型红外分析计(C-CS7500, Campbell Scientific, Inc.)测定 CO₂ 浓度和水汽含量脉动值, 连续测量取样周期为 10 Hz, 每 30 min 输出 1 组平均值. 根据平均垂直风速脉动和 CO₂ 密度脉动计算 CO₂ 通量^[12].

试验地点选择在中国科学院亚热带农业生态研究所桃源农业生态试验站(28°55'N, 111°27'E), 代表区域为红壤丘陵区, 属中亚热带向北亚热带过渡的季风湿润气候区. 多年平均气温 16.5℃, 年降雨量 1 447.9 mm, 年蒸发量 1 157 mm, 日照时数 1 531.4 h, 年总辐射 4 226 MJ/m². 土壤为第四纪红土发育而成的水稻土, 采用当地典型的稻-稻-休闲种植制度. 早、晚稻品种, 播种、移栽和收获时间以及田间管理等见表 1. 在水稻生长期, 田间通常处于淹水状态, 保持水层 5 cm 左右, 收获前 1 周排水落干.

采用专用数据采集器(CR23X, Campbell Scientific, Inc.)记录数据, 并通过 PC 和无线电话(Siemens)进行数据下载.

1.3 数据处理方法

为了真实反映生态系统与大气间的交换过程, 首先对观测数据进行严格的筛选. 从时间序列中剔除大于 3 倍方差(±3σ)的数据^[13,14]. 由于在夜间大气层结比较稳定、湍流较弱时, 从土壤和叶片扩散的 CO₂ 不能达到仪器测定高度, 仪器测定的精确度降低导致夜间 CO₂ 通量值偏低. 摩擦风速(U^*)是反映湍流强弱的指标. 根据 U^* 与夜间通量间的关系可以确定 1 个临界 U^* ^[13,15]. 为了避免夜间其它因素(水稻生长状况、土壤湿度等)对系统呼吸的影响, 本研究选择了 0.1 m/s 作为 U^* 的临界值^[16], 即认为 $U^* > 0.1$ m/s 时的通量观测数据是合理的, 而在此临界值以下所观测的 CO₂ 通量将被舍去.

2003 年由于降雨、仪器维护等原因造成的数据缺失以及剔除的不合理数据分别占 4.6% 和 24.8%. 因此, 总有效数据占 70.6%. 为了获得完整时间序列的通量数据, 采用不同的方法对以上缺失数据进行差补. 对于短时间内(3 h 内)数据的缺失, 直接采用线性内插法进行; 对于较长时间(> 3 h)数据的缺失, 以 10 d 以上(依作物生育期不同)为窗口

的相邻数据变化规律进行差补,并根据白天和夜间采用 2 种不同的方法.白天根据 Michaelis-Menten 方程(又称直角双曲线方程)进行差补^[13],夜间利用 CO₂ 通量与 5 cm 土壤温度的指数关系进行差补.

Michaelis-Menten 方程用于模拟冠层 CO₂ 通量随光子通量密度的响应过程,可以表示为^[15]:

$$F = \frac{\text{PPFD} \cdot P_{\max}}{K_m + \text{PPFD}} - R_d \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{P_{\max}}{K_m} \tag{2}$$

式中, F 为白天净生态系统交换通量 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], α 初始表观光量子效率, PPFD 光子通量密度 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], $P_{\max}$ 为光饱和时的光合速率,也称最大光合速率, K_m 为拟合常数, R_d 为生态系统呼吸速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$].

夜间观测通量/生态系统呼吸 ($U^* > 0.1 \text{ m/s}$) R_{eco} 与相应 5 cm 土层温度 ($^{\circ}\text{C}$) 的关系式为:

$$R_{\text{eco}} = R_{25} e^{B(T_5 - 25)} \tag{3}$$

式中, R_{25} 是参考温度 25°C 下的呼吸通量, B 是拟合系数.这一拟合方程同时被用于生态系统白天呼吸通量的计算.

总初级生产力(GPP)、净初级生产力(NPP)和生态系统呼吸(R_{eco})与净生态系统交换(NEE)或 CO₂ 通量观测值 F (正值表示净排放 CO₂, 负值表示净吸收 CO₂) 间的关系可以用下式表示^[13,17]:

$$\text{GPP} = R_{\text{eco}} - \text{NEE} = R_A + R_s - \text{NEE} \tag{4}$$

$$\text{GPP} = R_A + \text{NPP} \tag{5}$$

2 结果与讨论

2.1 气象因子的变化

下垫面太阳辐射状况主要随太阳高度角变化而变化,同时也受天气的影响.光合有效辐射的年内变化呈现为 6~9 月较高,1~5 月和 10~12 月较低的对称分布(图 1,表 2).1 月和 12 月光合有效辐射最低,分别为 $61 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 和 $65 \text{ MJ}/\text{m}^2$;7 月光合有效辐射最高,达到了 $278 \text{ MJ}/\text{m}^2$.尤其是 5~10 月的光合有效辐射量占到了年光合有效辐射量($1\,819 \text{ MJ}/\text{m}^2$) 的 70%,为早晚稻的生长提供了充足的光照条件.日平均气温变化在 $-0.8^{\circ}\text{C} \sim 32.4^{\circ}\text{C}$ 之间,最高日平均温度出现在 08-02,为 34.2°C ;年平均气温为 17.0°C ,较多年平均值 16.5°C 略高.月平均气温以 1 月最低 (4.5°C),7 月最高 (28.3°C).2003 年日最高降雨出现在 07-10,降雨量为 $58.5 \text{ mm}/\text{d}$.年降水总量达到了

$1\,050 \text{ mm}$,略低于多年平均结果($1\,447 \text{ mm}$).其中,4~7 月的降水总量占到了年降水总量的 80% 左右.尤其是早稻生长期的降水十分频繁,总量达到了 610 mm ,明显高于晚稻生长期 (148 mm),这可能会对早稻的生长造成不利影响.

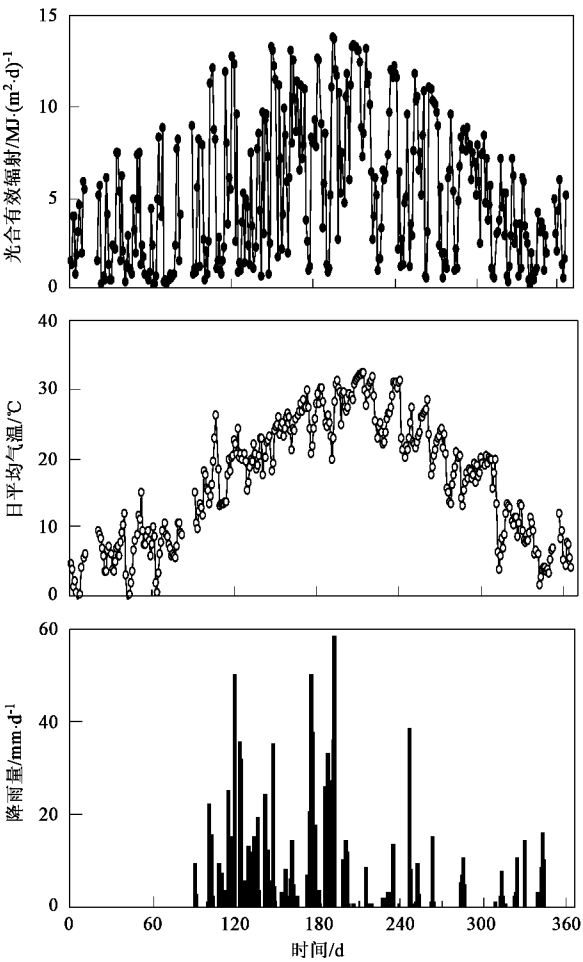


图 1 气象因子(光合有效辐射、日平均气温和日降雨量)的季节变化动态(2003 年)

Fig.1 Seasonal dynamics of averaged air temperature, photosynthetically active radiation and precipitation in 2003

2.2 稻田生态系统 CO₂ 通量的季节变化特征及影响因素

通过对 2003 年稻田生态系统与大气间 CO₂ 交换进行连续监测及对缺失数据进行差补,得到了较为完整的稻田冠层 CO₂ 通量数据.从总体趋势来看,CO₂ 通量的季节变化呈现“中间高,两边低”的对称型分布(图 2).即在水稻生长季表现明显的光合生产力(GPP)、生态系统呼吸(R_{eco})和对 CO₂ 的净吸收(NEE).

根据 CO₂ 通量随 1 a 中时间序列(d)的变化,可

以将 CO_2 通量的年变化分为 3 个阶段,1~4 月的春闲期、水稻生长期和 10~12 月的冬闲期.在春闲期,由于受前 1a 晚稻收获后大量杂草生长的影响,稻田系统仍显示出一定的光合吸收 CO_2 的能力,同时也表现出一定的 CO_2 排放,且整体上光合吸收 CO_2 量略高于 CO_2 释放量,因此该时期稻田表现出弱的 CO_2 吸收,即 NEE 为负值.随着气温的升高(图 1),以及田间杂草等植物的生长, GPP、 R_{eco} 均呈缓慢的增加趋势,日净吸收 CO_2 量也逐渐增加.但到 120 d 左右时,由于受强降雨(第 119 d 日降雨量 50.0 mm)的影响,气温降低了 5~6℃, GPP 和 R_{eco} 值略有下降,

并持续了约 10 d 左右.这一阶段正处于早稻移栽后的返青期,同化力较弱,系统呼吸(以土壤呼吸为主)也较弱,二者基本相当,因此 CO_2 净交换通量变化在 0 值附近.130 d 后气温又开始回升,水稻生长逐渐旺盛, CO_2 通量各分量在数值上均表现出十分明显的增加趋势.其中,以 GPP 和 NEE 的增加最为明显,从 134 d 到 154 d 近 20 d 时间内, GPP 从 10.7 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 增加到 37.7 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,增加了约 2.6 倍,平均每天增加速率为 1.4 g/m^2 .与此相对应, NEE 值(绝对值)从 3.5 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 升高到 25.5 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,增加速率约为 1 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$.

表 2 月平均气温、光合有效辐射总量和降水量

Table 2 Monthly values of averaged air temperature, photosynthetically active radiation and precipitation													
月份	1 ¹⁾	2	3 ¹⁾	4	5	6	7	8	9	10	11	12 ¹⁾	总计
平均气温/℃	4.5	7.0	7.3	16.2	20.7	25.6	28.3	27.8	23.3	17.6	11.7	6.4	—
光合有效辐射/MJ•m ⁻²	61	84	77	135	168	221	278	245	196	174	115	65	1 819
降水量/mm	0	0	10	176	243	176	229	34	77	27	43	38	1 050

1) 有少部分数据缺失

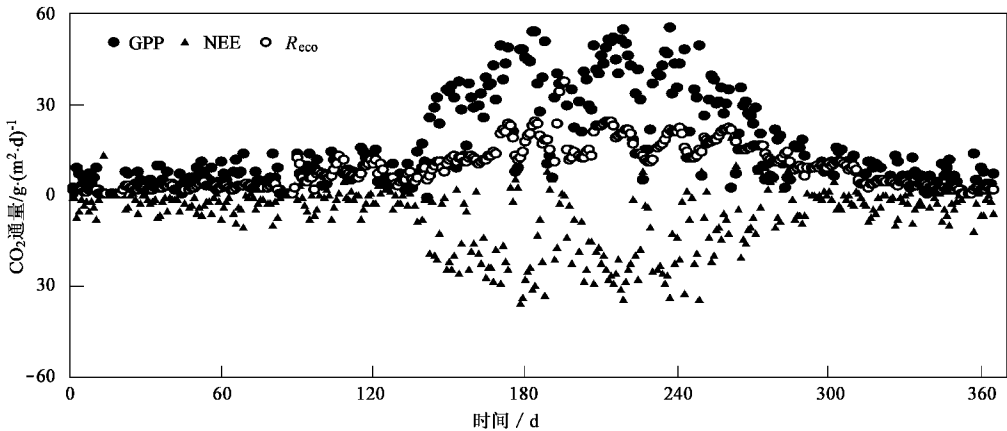


图 2 稻田生态系统 CO_2 通量的季节变化动态(2003 年)

Fig.2 Seasonal dynamics of gross primary production (GPP), total ecosystem respiration (R_{eco}) and net ecosystem CO_2 exchange (NEE) for rice ecosystem in 2003

水稻光合同化速率的显著提高一方面与该时期光合有效辐射大幅度增加有关,另一方面也受水稻生长状况(如叶面积指数 LAI 的增加)的影响.随着早稻生长进入高峰期,到 180 d 前后, NEE 达到了生长季的最高点[35.5 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$],而 GPP 高峰值的出现则较 NEE 滞后了 5 d 左右,为 53.8 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$.二者峰值出现时间上的不一致主要与呼吸通量的高低有关.当 GPP 为最高时, R_{eco} 也较高,因此净吸收通量 NEE 并非是最高点,相反, NEE 的极值出现在 GPP 较高,而 R_{eco} 相对较低的情况下.从 185~205 d,

GPP 呈现出明显的低谷状变化,一方面是早稻生长成熟期代谢活动逐渐衰弱,另一方面与晚稻正处于返青期,生长代谢相对较弱有关.受早稻收获和晚稻插秧等的影响, NEE 也表现出较为明显的波动,但由于收获至插秧的时间间隔很短(只有 2 d),稻田系统并未表现出明显的碳排放现象.在此期间, R_{eco} 值的变化幅度也较大,这一方面与温度的变化有关,同时也受早稻成熟期排水、收割以及晚稻插秧前灌水等人为活动强烈干扰的影响.与早稻生长期明显不同的是,晚稻生长初期就表现出较强的光合吸收 CO_2

的能力, 如移栽后 1 周的日平均 GPP 为 27.9 g/(m²·d), 比早稻同一时期的 GPP[8.9 g/(m²·d)] 高近 2 倍. 这一差异很可能与该时期温度较高, 晚稻生长较快有关. 晚稻移栽后 1 周内的日平均温度为 27.9℃, 较早稻同一时期日平均温度 (21.5℃) 高 6.4℃. 晚稻生长季的 GPP 最高值达到了 55.3 g/(m²·d), 略高于早稻生长季的最高值; 系统净吸收 CO₂ 通量 (NEE 绝对值) 峰值为 34.5 g/(m²·d), 却较早稻 NEE 绝对值峰值低约 3%. 从 240 d 至晚稻收获 (281 d), GPP 一直呈下降趋势, NEE (绝对值) 也呈下降趋势, 表明水稻的光合同化力在逐渐减弱. 该时期 R_{eco} 值出现的波动主要受温度变化的影响. 晚稻收获后稻田总体上仍表现出较弱的 CO₂ 吸收. 这主要是因为水稻的收获为杂草的生长提供了空间, 在加上水温条件较为适宜, 杂草生长较为旺盛. 但由于未对杂草等绿色植物作生物量的统计, 因此对该时期 NEE 的变化缺乏了最直接的数据支持.

分别对 CO₂ 通量进行逐月统计 (表 3), GPP 日

平均值以 8 月最高, 为 38.8 g/(m²·d), 月同化吸收 CO₂ 量达到了约 1 203 g/m²; 1 月份最低, 平均值为 4.0 g/(m²·d), 仅为 8 月平均值的 10% 左右. 净吸收 CO₂ 通量 (NEE 绝对值) 最高日平均值也出现在 8 月, 为 20.6 g/(m²·d), 月净固定 CO₂ 量接近 640 g/m². R_{eco} 的最高日平均值和月总量则出现在 7 月, 总量为 609.1 g/m². GPP、 R_{eco} 和 NEE 的年平均值分别为 16.5 g/(m²·d)、9.3 g/(m²·d) 和 -7.1 g/(m²·d), 总量分别为 5 861.3 g/m²、3 385.8 g/m² 和 -2 475.6 g/m². 即稻田生态系统从大气中年净吸收 CO₂ 量可达到近 2.5 kg/m².

从各月 CO₂ 通量总量占年总量的比例来看, CO₂ 年交换量主要分布在早稻和晚稻生长较为旺盛的 5~9 月, 其 GPP 和 R_{eco} 总量占年总量分别达到了 75.2% 和 69.8%, NEE 则占到了 80% 以上. 这说明, 早晚稻生长期稻田生态系统与大气间 CO₂ 净交换总量的多少对年总量起着决定作用.

表 3 稻田生态系统 CO₂ 通量逐月平均值和总量统计结果 (2003 年)

Table 3 Monthly values of gross primary production (GPP), total ecosystem respiration (R_{eco}) and net ecosystem CO₂ exchange (NEE) for rice ecosystem in 2003

月份	GPP			R_{eco}			NEE ¹⁾		
	平均 /g•(m ² •d) ⁻¹	总量 /g•m ⁻²	占年总 量/%	平均 /g•(m ² •d) ⁻¹	总量 /g•m ⁻²	占年总 量/%	平均 /g•(m ² •d) ⁻¹	总量 /g•m ⁻²	占年总 量/%
1	4.0	101.7	1.7	1.8	55.8	1.6	-1.8	-45.8	1.9
2	5.7	160.1	2.7	2.9	80.1	2.4	-2.9	-80.0	3.2
3	6.8	167.1	2.9	2.8	86.7	2.6	-3.1	-80.4	3.2
4	9.3	278.2	4.7	7.7	232.1	6.9	-1.5	-46.1	1.9
5	12.9	399.7	6.8	7.7	239.2	7.1	-5.2	-160.6	6.5
6	31.6	947.4	16.2	14.7	441.2	13.0	-16.9	-506.2	20.4
7	34.9	1 081.6	18.5	19.6	609.1	18.0	-15.2	-472.5	19.1
8	38.8	1 202.8	20.5	18.2	565.0	16.7	-20.6	-637.8	25.8
9	25.8	773.8	13.2	17.0	509.7	15.1	-8.8	-264.1	10.7
10	11.1	345.4	5.9	10.7	333.0	9.8	-0.4	-12.4	0.5
11	8.3	249.3	4.3	5.5	164.1	4.8	-2.8	-85.1	3.4
12	5.0	154.2	2.6	2.2	69.6	2.1	-3.0	-84.6	3.4
年计	16.5	5 861.3	100.0	9.3	3 385.8	100.0	-7.1	-2 475.6	100.0

1) NEE 为负值表示净吸收 CO₂

2.3 稻田生态系统 CO₂ 通量年变化的影响因素

光合有效辐射和气温分别是稻田生态系统 GPP 和 NEE 年变化的主要影响因素, 其相关性均达到了极显著水平, 可以分别用下列方程式表示:

GPP = 0.92PAR + 0.84T_a - 6.54

($r^2 = 0.752, p < 0.001$)

(6)

NEE = -0.84PAR - 0.16T_a + 4.24

($r^2 = 0.534, p < 0.001$)

(7)

式中, GPP 为稻田系统光合吸收 CO₂ 总量 [g/(m²·d)]; NEE 为稻田-大气系统净交换 CO₂ 量, 正值表示排放, 负值表示吸收; PAR 为日光合有效辐射总量 [MJ/(m²·d)]; T_a 为日平均气温 (℃).

PAR 和 T_a 与 GPP 的偏相关系数分别为 0.45 和 0.50, 说明 T_a 能解释 GPP 变异的 50%, 因此是 GPP

变化最主要的影响因素. PAR、 T_a 与 NEE 的偏相关系数分别为 -0.63 和 -0.14 , 表明 PAR 是 NEE 变化的最主要影响因素, 能解释其变异的 63% . T_a 和 PAR 因素对 GPP 和 NEE 变化的综合影响程度分别达到了 $77\% \sim 95\%$, 表明当地的气候条件(T_a 和 PAR)是决定稻田生态系统光合吸收 CO_2 量以及稻田-大气间 CO_2 净交换的关键因素. 而其它因素, 如空气湿度、降雨、水稻生长期的长短和覆盖度以及人为的干扰(如田间灌排水)等对 GPP 和 NEE 的综合影响程度仅为 $5\% \sim 23\%$.

3 结论

(1) 稻田生态系统 GPP、 R_{eco} 和 NEE(绝对值)的季节变化均呈 6~9 月较高, 1~5 月和 10~12 月较低的对称分布. GPP、 R_{eco} 和 NEE(绝对值)最高值出现并不完全同步, 分别为 $37.8 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $55.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $35.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. 从 CO_2 通量的月分布来看, 5~9 月水稻生长时期的 NEE 总量占年总量的 80% 以上, 对年 NEE 总量起决定性作用.

(2) 我国亚热带稻田生态系统是大气 CO_2 的汇, 年 GPP、 R_{eco} 和 NEE 分别为 $5861.3 \text{ g}/\text{m}^2$ 、 $3385.8 \text{ g}/\text{m}^2$ 和 $-2475.6 \text{ g}/\text{m}^2$. PAR 和 T_a 是 GPP 与 NEE 季节变化的最主要影响因子, 分别可用二元线性方程来描述二者与 GPP 和 NEE 的关系.

参考文献:

- [1] Black T A, Den H G, Neumann H H, *et al.* Annual cycles of water vapor and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest [J]. *Glob. Change Biol.*, 1996, **2**: 219~229.
- [2] Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. CO_2 and water vapor fluxes for 2 years above Euroflux forest site [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2001, **108**: 183~197.
- [3] Lee X. On micrometeorological observation of surface-air exchange over tall vegetation [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 1998, **91**: 39~49.
- [4] Katul G G, Leuning R, Kim J. Estimating CO_2 source/sink distributions within a rice canopy using higher order closure models [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, **98**(1): 103~125.
- [5] Harazono Y, Kim J, Miyata A, *et al.* Measurement of energy budget components during the International Rice Experiment (IREX) in Japan [J]. *Hydrological Processes*, 1998, **12** (6): 2081~2092.
- [6] Miyata A, Leuning R, Denmead O T, *et al.* Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2000, **102**: 287~303.
- [7] FAO. <http://faostat.fao.org/faostat/>, 2005.
- [8] Falge E, Baldocchi D, Tenhunen J, *et al.* Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2002a, **113**: 53~74.
- [9] Falge E, Tenhunen J, Baldocchi D, *et al.* Phase and amplitude of ecosystem carbon release and uptake potentials as derived from FLUXNET measurements [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2002b, **113**: 75~95.
- [10] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 等. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2004, **34**(增刊 II): 15~29.
- [11] Campbell C S, Heilman J L, McInnes K J, *et al.* Diel and seasonal variation in CO_2 flux of irrigated rice [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2001, **108**: 15~27.
- [12] 王勤学, 渡边正孝, 欧阳竹, 等. 不同类型生态系统水热碳通量的监测与研究 [J]. *地理学报*, 2004, **59**(1): 13~24.
- [13] Falge E, Baldocchi D, Olson R, *et al.* Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2001, **107**: 43~69.
- [14] 关德新, 吴家兵, 王安志. 长白山阔叶红松林生长季热量平衡变化特征 [J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(10): 1828~1832.
- [15] Anthoni P M, Freibauer A, Kolle Olaf, *et al.* Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2004, **121**: 55~67.
- [16] 朱咏莉. 亚热带稻田生态系统 CO_2 通量研究 [D]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2005.
- [17] Pilegaard K, Hummelshøj P, Jensen N O, *et al.* Two years of continuous CO_2 eddy-flux measurements over a Danish beech forest [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 2001, **107**: 29~41.