

透明箱法监测稻田生态系统 CO₂ 通量的研究

朱咏莉^{1,2,3}, 童成立¹, 吴金水^{1,2*}, 周卫军¹

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 3. 江苏大学, 镇江 212013)

摘要: 采用透明箱法对稻田生态系统 CO₂ 通量进行了田间定位观测, 并对透明箱内 CO₂ 浓度的变化规律及拟合方法进行了探讨. 结果表明, 在水稻生长旺盛期的晴天(白天), 箱内 CO₂ 浓度随测定时间呈非线性变化, 因此用常规的线性拟合法(LR)计算的 CO₂ 净吸收通量明显低于指数一级动力学拟合法(ER). 在水稻生长旺盛期的阴天、成熟期以及夜间, 箱内 CO₂ 浓度随测定时间表现为线性变化, LR 法与 ER 法的 CO₂ 净吸收通量计算结果无显著差异. 在水稻生长期, 基于 LR 法的稻田生态系统碳累积吸收量结果明显低于 ER 法, 而后者与常用方法(植物净固定碳量减去土壤异氧呼吸排放碳量)的计算结果比较接近. 证实了当植被同化速率较强时, 采用 ER 法对透明箱内 CO₂ 浓度随时间的变化进行拟合并计算 CO₂ 净吸收通量较为适宜. 同时表明采用透明箱法观测农田生态系统 CO₂ 通量是可行的.

关键词: CO₂ 通量; 透明箱法; 稻田生态系统

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)06-0008-07

Estimation of CO₂ Fluxes from Rice Paddies Based on Transparent Chamber Measurement

ZHU Yong-li^{1,2,3}, TONG Cheng-li¹, WU Jin-shui^{1,2}, ZHOU Wei-jun¹

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Closed chamber provide a valuable tool for measuring CO₂ exchange fluxes. In general, the change rate of CO₂ concentration is assumed to be constant in the short measurement time and a linear regression method is used to estimate the CO₂ fluxes. However, due to the physical and physiological effects, the change rate of CO₂ is not always constant. A linear regression method and an exponential regression method are compared in this study. Results show that during the growing stages except for the ripening, non-linear relationship of CO₂ concentration versus time was estimated in the sunny daytime. Absolute values of CO₂ fluxes calculated by linear regression were lower than that by exponential regression. Whereas, CO₂ concentration changed linearly with time in cloudy days or in nighttime. And no significant difference was found between the results calculated with these two methods. Accumulative CO₂-C fluxes with exponential and linear regressions were compared with the values of net ecosystem exchange of CO₂-C (NEE), which were calculated by net primary production (NPP) minus soil respiration. The values with the exponential regression method were closer to NEE than those with linear regression. Therefore, the linear regression method could result in underestimation of carbon budget of ecosystem. Based on transparent chamber measurement, the exponential regression is more feasible to calculate CO₂ fluxes than the linear regression.

Key words: CO₂ flux; transparent chamber; paddy ecosystem

实地测定 CO₂ 通量是研究陆地生态系统碳循环过程与碳收支状况的基本内容, 目前采用的主要方法有涡度相关法和箱式法. 涡度相关法具有响应速度快, 对植被群落没有扰动并能连续进行监测等优点^[1,2], 但对观察点的均一性要求高(通常需要 > 9 hm² 的均一下垫面), 并且由于设备昂贵和机动性差, 难以对同一区域内各类生态类型进行全面观测^[3-5]. 静态箱法的设备较为简便, 机动性强, 较为适合于小空间尺度(如田块)的观测^[6,7]; 但在操作过程(箱罩封闭)中由于微环境条件(光照、温度、湿度和风速等)的改变对植被的同化强度有明显影

响^[8,9]. 为了降低微环境变化的影响而采用暗箱进行的测定, 仅能直接测定土壤-植被系统的 CO₂ 呼吸量, 不能反映包括植被同化过程在内的生态系统与大气之间的 CO₂ 净交换量(Net ecosystem ex-

收稿日期: 2004-12-25; 修订日期: 2005-03-11

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环境综合监测子课题(APEIS)

作者简介: 朱咏莉(1976~), 女, 河南新乡人, 博士研究生, 主要从事农业环境和养分循环方面的研究, E-mail: zhu Yongli76@sohu.com

* 通讯联系人, E-mail: js_wu@isa.ac.cn

change, NEE). 如何通过静态箱法获得的观测数据反映被测定系统中植被对 CO_2 的真实同化量是采用静态箱法实地测定 CO_2 通量需要解决的问题.

静态箱法在测定陆地生态系统微量气体(例如 CH_4 , N_2O)排放中有大量应用^[10~14], 也有人将其应用于 CO_2 通量测定^[15~18]. 在前人的研究中, 通常是在一定时间内对箱内的 CO_2 浓度变化进行多次测定, 再通过线性拟合推算 CO_2 通量. 透明箱能够观测植被对大气 CO_2 的同化过程. 但在植被同化强度较大的情况下, 箱内的 CO_2 浓度往往出现非线性变化^[6, 16, 18]. 在这种情况下, 采用线性拟合方法将明显低估植被对大气 CO_2 的同化通量.

本研究以稻田生态系统为对象, 采用透明箱法对系统 CO_2 交换进行全生育期动态监测, 根据在不同天气状况(晴、阴)、不同水稻生育阶段以及 1 d 中不同时段测定的箱内 CO_2 浓度的变化进行线性和非线性拟合 2 种方法估算系统的 CO_2 通量, 并与 NEE 的间接计算方法进行对比分析. 其目的是建立更加合理的拟合方法, 从而探索采用透明箱法观测农田生态系统 CO_2 通量的可行性.

1 材料与方法

1.1 观测点设置

观测点位于中国科学院桃源农业生态站(28°55' N, 111°30' E, 海拔 91.6 m). 其年平均温度 16.5 °C, 年降水量 1 447.9 mm, 蒸发量 1 157 mm, 日照时数 1 500 h, 太阳辐射 420 $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$; 丘陵地貌; 土壤为第四纪红土发育的水稻土, 粘壤性质, 地下水位在 110 cm 以下.

晚稻品种为杂交籼优桂-99; 2003-06-16 播种, 2003-07-20 移栽; 密度为 21 穴 $\cdot \text{m}^{-2}$. 移栽前施入基肥, 为尿素 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、复合肥(N 、 P_2O_5 、 K_2O)的比例为 8: 8: 9) 75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和磷肥 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 2003-07-26 追施尿素 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 2003-10-20 收获. 田间管理按当地常规方式进行.

1.2 CO_2 通量测定

透明箱体 65 cm $\times$ 65 cm $\times$ 90 cm, 由化学性质稳定的有机玻璃板制成, 罩在事先打入田间的不锈钢支架(埋入地下约 5 cm)上. 采集箱为活盖箱, 箱基和箱盖之间用可压缩橡胶密封条进行密封. 箱体顶部除有一接口与 CO_2 分析仪连接外, 上部还安装了 2 个由 12 V 电池供电的电风扇(直径为 15 cm). 观测时间内箱盖关闭, 观测完毕后立即打开箱盖. 采用 CI-301 PS 便携式光合作用测定仪(CID Inc. 公司,

美国)测定箱内 CO_2 浓度, 气体流速为 0.5 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$. 每次观测前均用 CO_2 标准气体标定仪器.

观测期于移栽后第 7 d 开始至收获前 1 d 结束. 设置 3 个重复. 每 1 周进行 1 ~ 2 d 的昼夜动态观测, 每 d 观测 12 次(间隔 2 h). 水稻生长前期测定时间为 10 min, 后期则根据情况改为 5 min. 文中仅采用水稻不同生育期观测的部分结果进行分析.

1.3 环境因子及生物量测定

观测 CO_2 浓度变化同时, 测定箱内温度; 并利用小气候自动监测系统(TRM-ZS3)观测点气温、气压、空气湿度、太阳辐射及 0 ~ 40 cm 土层的温度.

从水稻移栽后的第 7 d 开始, 每隔 10 d 随机采集 5 穴水稻植株, 于 105 °C 杀青 15 min, 80 °C 烘干至恒重, 测定水稻地上部和地下部生物量.

1.4 计算方法

CO_2 通量(F , $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$)按(1)式计算:

$$F = \frac{60}{100} \rho H \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T_0 + T_a} \frac{dc_t}{dt} \quad (1)$$

式中, ρ 为标准状态下 CO_2 密度($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), H 为采样箱气室的高度(cm), p 为采样点的气压(10^5 Pa), p_0 为标准状态下的大气压力($1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$), T_0 为绝对温度(K) 273.2, T_a 为采样时箱内平均气温(°C), dc_t/dt 为采样箱内 CO_2 浓度($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)对时间 t (min)的变化率.

通量 F 随 dc_t/dt 而变化, 通常采用线性方程(Linear regression equation, LR)拟合测定时间内(2 ~ 5 min) CO_2 浓度变化获得 dc_t/dt , 即:

$$c_t = c_0 + At \quad (2)$$

c_0 和 c_t 分别表示采样箱内在初始和 CO_2 浓度 t 时刻的 CO_2 浓度; A 为变化速率. 由(2)可得:

$$dc_t/dt = A \quad (3)$$

根据本研究(见下列讨论)及他人^[17]的观测结果, 在植被同化强度大的时间内采样箱内的 CO_2 浓度通常出现非线性变化; 故这里提出采用指数一级动力学方程(Exponential regression equation, ER)拟合 CO_2 浓度变化并且获得 $t=0$ 时刻的 dc_t/dt , 即:

$$c_t = c_0 \cdot e^{at} \quad (4)$$

$$dc_t/dt = c_0 \cdot ae^{at} \quad (5)$$

令 $t=0$,

$$dc_t/dt = c_0 \cdot a \quad (6)$$

上式中 a 表示箱内 CO_2 浓度变化常数.

2 结果与讨论

2.1 采样箱内 CO_2 浓度的变化

在观测期间(08-02~10-08),由于受天气状况、作物生长时期以及1d中观测时段等因素的影响,采

样箱内CO₂浓度随测定时间(5~10 min)的变化出现了线性与非线性2种形式(图1,2)。

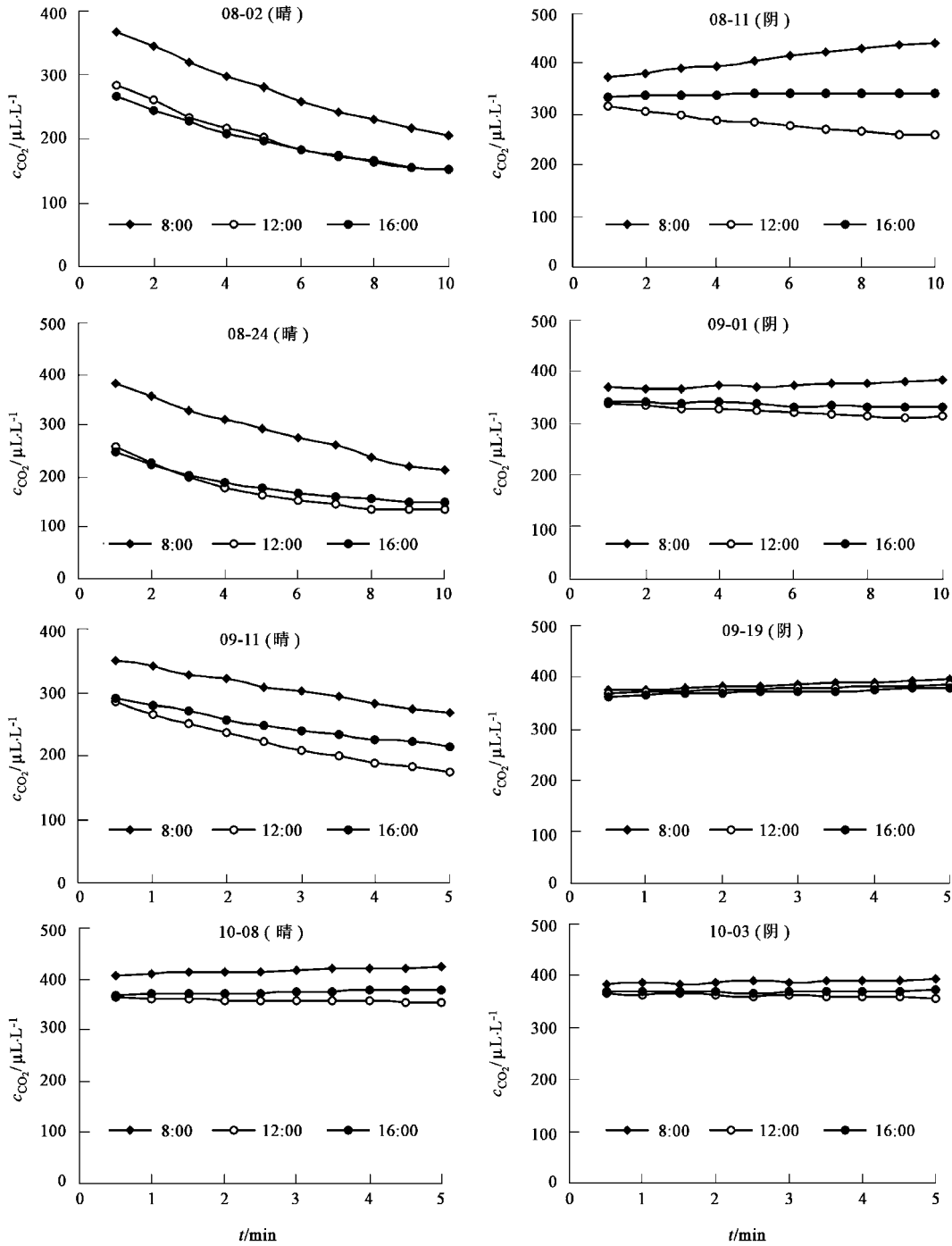


图 1 测定时间内采样箱中 CO₂ 浓度变化(白天)

Fig.1 Change of CO₂ concentration versus time (daytime)

在水稻生长旺盛时期,白天(晴天)采样箱内CO₂浓度随测定时间呈非线性下降(图1,如08-02、08-24和09-11).表现为在罩箱后的较短时间内(2 min)CO₂浓度迅速下降,随后下降幅度逐渐减小.其原因可能是罩箱初期植被的同化速率较高导致

CO₂浓度快速下降,而CO₂浓度的降低又反过来抑制了同化的进行,从而使CO₂浓度下降速度逐渐减小.一天中由于各时刻的光辐射强度不同导致CO₂浓度下降幅度随之不同.以08-24为例,08:00时10 min的观测时间内CO₂浓度平均下降幅度为

19 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$;而 1~2 min CO_2 浓度下降速度为 31 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$;2~3 min 为 28 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$;3~5 min 为 20 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$;然后依次降低,至 9~10 min 下降速度仅为 10 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$.到 12:00 由于作物光合同化速率的增强, CO_2 浓度下降速度明显高于 08:00;1~2 min 内 CO_2 浓度下降速度为 35 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$,然后很快下降,7 min 后基本稳定在 8 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ 左右.16:00 时 CO_2 浓度下降速度则有所减小,但仍然表现出非线性变化趋势.而水稻成熟期(如 10-08)采样箱内 CO_2 浓度变化幅度明显小于生长旺盛期,且随测定时间表现为线性变化趋势.这可能由于该时期水稻光合/呼吸较弱,导致采样箱内 CO_2 浓度变化较小,而 CO_2 浓度的较小变化并未对光合/呼吸速率产生影响的原因.如在 12:00 进行的 5 min 观测时间内, CO_2 浓度下降幅度基本保持在 2 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$.

采样箱内 CO_2 浓度变化明显受天气状况的影响.与同生育阶段的晴天相比,阴天情况下水稻光合速率相对较弱,并在测定时间内基本保持稳定,因此箱内 CO_2 浓度呈线性变化趋势(图 1).如 09-01 T12:00 进行的 10 min 观测时间内,箱内 CO_2 浓度平均下降幅度仅为 3 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$,明显低于同一生育期晴天(08-24)对应时刻 CO_2 浓度的下降幅度[15 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$].稻田生态系统在夜间表现为呼吸排放 CO_2 ,采样箱内 CO_2 浓度随测定时间均呈

线性上升趋势(图 2).但由于受生育期、天气情况以及观测时段差异的影响,稻田系统的呼吸强度不同, CO_2 浓度的增加幅度有所差别;一般水稻生长旺盛期高于成熟期,晴天高于阴天.如 08-24(晴)20:00、00:00 和 04:00 CO_2 浓度的平均增加幅度分别为 10.9 和 10 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$,高于同生育期阴天(09-01)对应时刻 CO_2 浓度的平均增加幅度(分别为 7.6 和 6 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$).到成熟期(如 10-08),水稻代谢活动明显减弱,夜间 CO_2 浓度的平均增加幅度只有 5 $\mu\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$.

综上所述,不同生育期、不同天气状况和不同时段条件下 CO_2 浓度的变化速率各有所差异,在水稻生长旺盛的晴天(白天),即同化强度较高的情况下, CO_2 浓度呈非线性变化.而在其它时间,水稻生长旺盛期的阴天、成熟期以及夜间则表现为线性变化.

2.2 2 种拟合方法计算结果比较

分别采用 LR 和 ER 法对采样箱内 CO_2 浓度随测定时间的变化进行拟合.在此仅以以上各观测日 12:00 时的拟合结果加以说明(表 1).晴天条件下采用 ER 法拟合的决定系数均高于 LR 法,而阴天情况下二者则基本相当.这说明当作物同化速率较强时适宜采用 ER 法计算 CO_2 浓度随时间的变化率及通量,而在作物同化速率较弱的阴天情况下则可采用 LR 法进行计算.

对 2 种方法计算 CO_2 交换通量的结果对比分

表 1 CO_2 浓度随测定时间的拟合方程¹⁾

Table 1 Simulated equations between CO_2 concentration and measurement time

日期	天气状况	线性方程(LR) $c_t = c_0 + At$			指数方程(ER) $c_t = c_0' \exp(at)$		
		c_0	A	r^2	c_0'	a	r^2
08-02	晴	319.5	-17.3	0.971**	322.0	-0.063	0.983**
08-11	阴	326.2	-7.3	0.998**	326.6	-0.024	0.999**
08-24	晴	271.5	-24.5	0.989**	279.8	-0.120	0.999**
09-01	阴	319.6	-22.0	0.997**	325.1	-0.085	0.999**
09-11	晴	289.6	-26.2	0.978**	298.1	-0.120	0.994**
09-19	阴	220.5	3.6	0.973**	370.6	0.010	0.972**
10-03	阴	369.7	-2.4	0.905*	369.7	-0.007	0.906*
10-08	晴	365.7	-1.6	0.830*	365.7	-0.005	0.831*

1)12:00 时的观测拟合结果;*、** 分别表示显著和极显著水平; c_t 为 CO_2 浓度; t 为时间(min)

析表明:在夜间,ER 与 LR 计算结果较为一致;而在水稻生长旺盛的晴天(白天),LR 结果(绝对值)一般低于 ER,但各生育期以及不同天气情况下偏低程度不同(图 3).在水稻生长初期(如 08-02),08:00~16:00 时段内 LR 较 ER 偏低 3.8%~22.3%,平均为 17.6%;生长旺盛期(如 08-24 和 09-11),LR 较 ER 的偏低程度明显增加(16.1%~28.4%),平均为 22.7%;但成熟期二者无显著差异.另外,阴天

情况下 ER 和 LR 间也无显著差异.

总之,在水稻生长旺盛时,植被同化强度较高, CO_2 浓度随测定时间呈非线性变化.采用常规的 LR 拟合法则会导致净吸收通量计算结果明显偏低(3.8%~28.4%).而在其它情况(夜间、水稻生长旺盛期的阴天和成熟期)2 种方法间无显著差异,可采用较为简单的 LR 法进行计算.

2.3 CO_2 累积吸收量比较

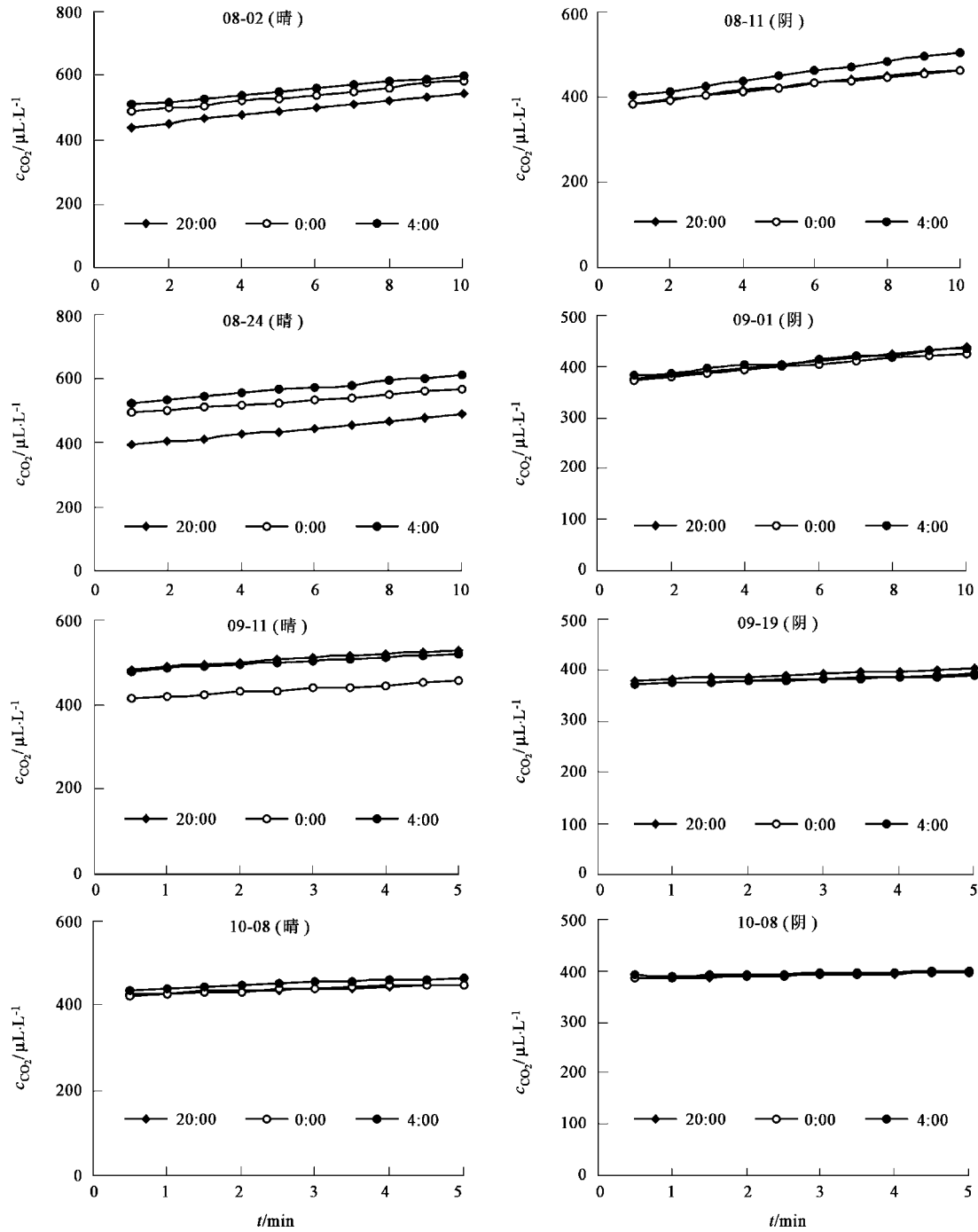


图 2 测定时间内采样箱中 CO₂ 浓度变化(夜间)

Fig.2 Change of CO₂ concentration versus time (nighttime)

根据稻田生态系统 CO₂ 日净交换量结果,可以估算各生育期 CO₂-C 累积吸收量.为了进一步比较 ER 和 LR 2 种计算方法的差异,采用生态系统碳收支间接算法^[9](即植株净固定的 C 量减去异氧呼吸排放的 C 量)所得结果 NEE 分别与 LR 和 ER 2 种计算方法的 CO₂-C 累积吸收量 (NEE_{LR} 和 NEE_{ER}) 进行比较(表 2).除移栽后 10d 时 NEE_{LR} 和 NEE_{ER} 均比 NEE 稍微偏高以外,其它各生育阶段均

偏低.在水稻整个生长期,NEE_{LR} 和 NEE_{ER} 分别较 NEE 偏低 53.8 %和 14.9 %.

尽管 NEE_{LR} 和 NEE_{ER} 均与 NEE 呈极显著的线性相关关系(图 4),但前者与 NEE 的直线斜率仅为 0.469 3,而后者与 NEE 则比较接近,斜率为 0.868 9.这进一步表明采用 LR 法会导致通量结果偏低,尤其是低估了水稻生长旺盛期晴天条件下的 CO₂ 净吸收通量.

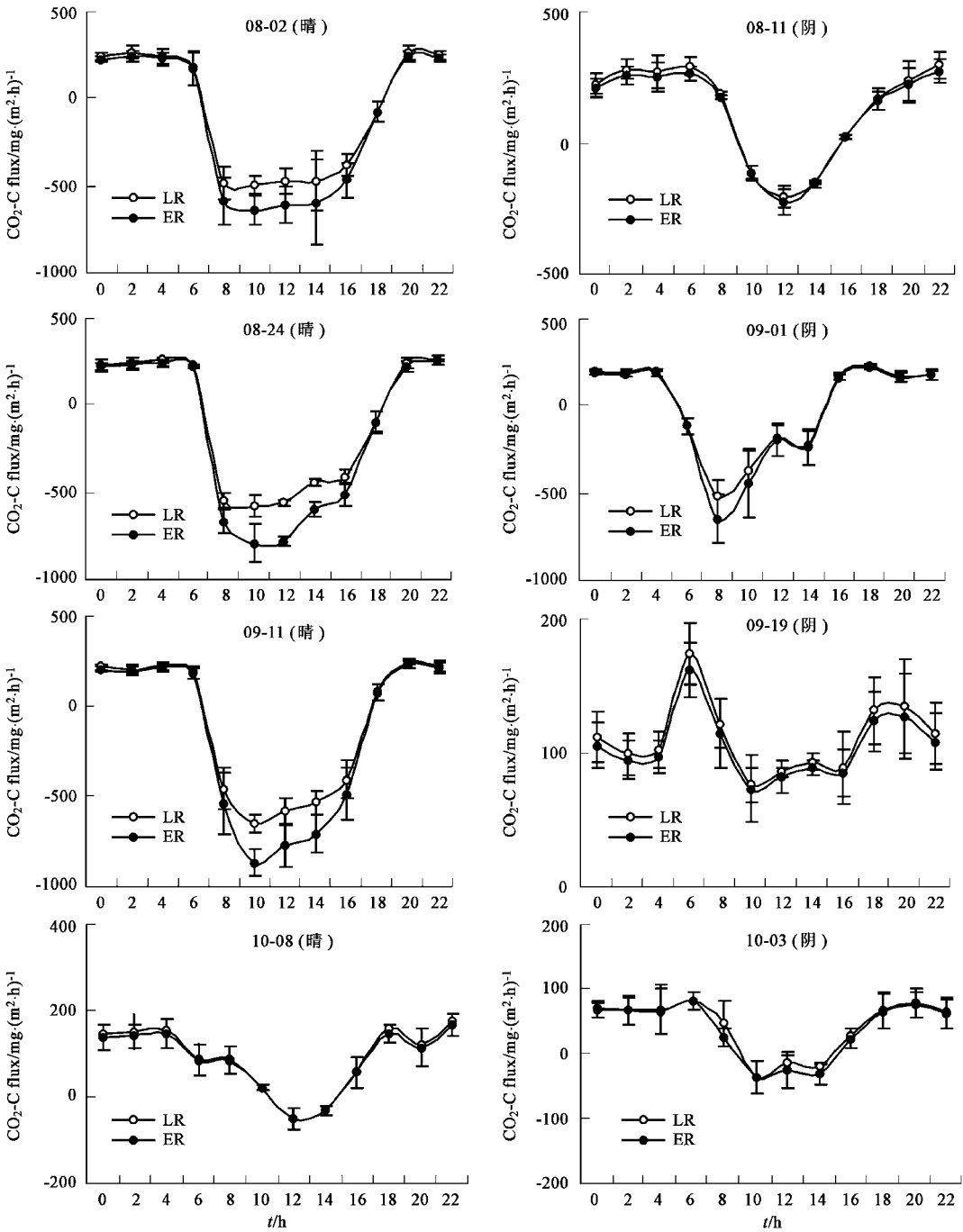


图 3 线性拟合法(LR)和指数拟合法(ER)计算的 CO₂ 通量比较

Fig. 3 Comparison fluxes calculated by LR method with that by ER

NEE_{ER}较 NEE 值仍偏低(14.9%),可能主要由于测定时箱体内太阳光辐射的衰减导致箱内的同化速率低于箱外自然状况下同化速率的原因^[6, 19].根据文献报道,罩箱后箱内太阳光辐射一般较箱外低 10%~20%^[6, 17, 20],并且衰减程度还受箱体的材料、厚度、透光度、反光性以及是否老化等的影响.另外,测定时间的长短也会对通量结果(尤其是光合速

率)产生影响^[6].一般测定时间越长,拟合结果偏低的程度可能越大.目前国外所采用的测定时间一般小于 2 min.相比之下,本研究的测定时间相对较长(5~10 min),这可能也是导致测定结果偏低的一个重要原因.在本试验条件下,能否在保证试验精确度和达到统计分析的要求下进一步缩短测定时间从而降低试验结果的偏差还有待进一步研究.

表 2 稻田系统 CO₂-C 累积吸收量比较

Table 2 Comparison values of net CO ₂ -C exchange calculated with different methods					
移栽后天 数/d	净吸收 C/(t·h ⁻²)			较 NEE 偏离程度 ¹⁾ / %	
	NEE	NEE _{ER}	NEE _{LR}	NEE _{ER}	NEE _{LR}
10	0.07	0.08	0.10	14.3	42.9
20	0.64	0.27	0.25	- 57.8	- 60.9
30	1.15	0.51	0.31	- 55.7	- 73.0
45	1.63	1.38	0.70	- 15.3	- 57.1
53	2.05	1.82	0.96	- 11.2	- 53.2
64	3.29	2.60	1.45	- 21.0	- 55.9
77	3.85	3.12	1.76	- 19.0	- 54.3
92	3.77	3.21	1.74	- 14.9	- 53.8

1) 正值表示偏高, 负值表示偏低。

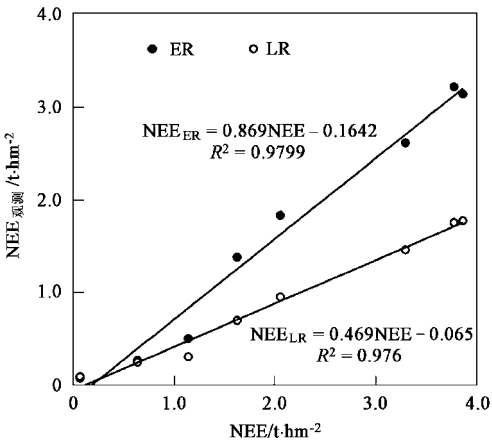


图 4 CO₂ 净收支观测结果 NEE 观测与间接计算结果 NEE
Fig. 4 Relationship between measured and calculated NEEs

4 结论

在水稻同化速率较强的晴天条件下,透明箱内 CO₂ 浓度随测定时间呈非线性下降;LR 拟合法计算的净吸收通量结果明显偏低。而在水稻同化速率较弱的阴天和成熟期,以及以呼吸排放 CO₂ 为主的夜间,箱内 CO₂ 浓度均为线性变化,可以直接采用 LR 拟合法计算 CO₂ 通量。与生态系统 CO₂ 净交换量(NEE)常用方法(即植株净固定 C 量与异氧呼吸排放 C 量的差值)的计算结果比较,LR 法计算通量的累积结果明显偏低,而 ER 法则比较接近。这进一步证实了 ER 可以作为估算包括植被同化过程在内的 CO₂ 通量的有效方法。

参考文献:

[1] 李克让. 土地利用变化和温室气体排放与陆地生态系统碳循环(第一版)[M]. 北京: 气象出版社, 2002.

[2] Albrizio R, Steduto P. Photosynthesis, respiration and conservative carbon use efficiency of four field grown crops [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 116: 19 ~ 36.

[3] Dugas W A, Reicosky D C, Kiniry J R. Chamber and micrometeorological measurements of CO₂ and H₂O fluxes for three C₄ grasses [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 83:

113 ~ 133.

[4] 郑循华, 徐仲均, 王跃思, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高影响稻田-大气 CO₂ 净交换的静态暗箱法观测研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1240 ~ 1244.

[5] 刘强, 刘嘉麟, 贺环宇. 温室气体浓度变化及其源与汇研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(4): 453 ~ 460.

[6] Steduto P, Cetinköku Ö, Albrizio R, et al. Automated closed-system canopy-chamber for continuous field-crop monitoring of CO₂ and H₂O fluxes [J]. Agricultural and forest meteorology, 2002, 111: 171 ~ 186.

[7] Bubier J, Crill P, Mosedale A. Net ecosystem CO₂ exchange measured by autochambers during the snow-covered season at a temperate peatland [J]. Hydrol. Process, 2002, 16: 3667 ~ 3682.

[8] Angell R, Svejcar T, Bates J, et al. Bowen ratio and closed chamber carbon dioxide flux measurements over sagebrush steppe vegetation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108: 153 ~ 161.

[9] 邹建文, 黄耀, 郑循华, 等. 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, 2004, 49(3): 258 ~ 264.

[10] 王跃思, 王明星, 胡玉琼, 等. 半干旱草原温室气体排放/吸收与环境因子的关系研究[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(3): 295 ~ 310.

[11] Huang Y, Jiang J Y, Sass R L, et al. Comparison of field measurements of CH₄ emission from rice cultivation in Nanjing, China and in Texas, USA [J]. Advance in Atmospheric Science, 2001, 18(6): 1121 ~ 1130.

[12] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 601 ~ 612.

[13] 黄耀, 蒋静艳, 宗良纲, 等. 种植密度和降水对冬小麦田 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2001, 22(6): 20 ~ 23.

[14] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, et al. Methane and nitrous oxide from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management [J]. Plant and Soil, 1997, 196(1): 7 ~ 14.

[15] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758 ~ 764.

[16] Angell R, Svejcar T. A chamber design for measuring net CO₂ exchange on rangeland [J]. Range Manage., 1999, 5: 27 ~ 31.

[17] Pickering N B, Jones J W, Boote K J. Evaluation of the portable chamber technique for measuring canopy gas-exchange by crops [J]. Agric. For. Meteorol., 1993, 63: 239 ~ 254.

[18] Wagner S W, Reicosky D C, Alessi R S. Regression models for calculating gas fluxes measured with a closed chamber [J]. Agron. J., 1997, 89(2): 279 ~ 284.

[19] Ivan A J, Andrew S K, Reinhart C. Forest floor CO₂ fluxes estimated by eddy covariance and chamber-based model [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 106: 61 ~ 69.

[20] Leadley P W, Drake B G. Open-top chambers for exposing plant canopies to elevated CO₂ concentration and for measuring net gas-exchange [J]. Vegetation, 1993, 104: 3 ~ 15.