

亚热带稻田生态系统 CO₂ 排放及影响因素

朱咏莉^{1,2}, 吴金水^{1,2*}, 周卫军², 童成立², 夏卫生¹ (1.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, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125)

摘要: 采用静态箱法对亚热带稻田生态系统 CO₂ 排放进行了定位观测. 结果表明, 水稻生长条件下的稻田 CO₂ 总排放通量(R_t) 随晚稻生育期进程波动幅度较大, 平均值为 926.2mg/(m²·h); 土壤 CO₂ 排放通量(R_s) 则波动较小, 平均值为 285.4mg/(m²·h). 二者与气温、不同土层(0, 5, 10, 15cm) 土壤温度均呈极显著的指数相关关系, 温度系数(Q_{10}) 分别为 2.33 和 1.70. 稻田生态系统 CO₂ 累积排放量与水稻生物量间存在极显著的对数关系. 在晚稻整个生育期, 稻田生态系统从大气中净固定碳量为 3.85t/hm².

关键词: CO₂ 排放; 影响因素; 静态箱法; 稻田生态系统

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2005)02-151-04

CO₂ emission from the paddy ecosystem in subtropical region and its influence factors. ZHU Yong-li^{1,2}, WU Jin-shui^{1,2*}, ZHOU Wei-jun², TONG Cheng-li², XIA Wei-sheng¹ (1.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; 2.Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China). *China Environmental Science*, 2005,25(2): 151~154

Abstract: The orientational observation of CO₂ emission from paddy ecosystem in subtropical region was carried out, adopting closed static chamber technique. Under the growth condition of paddy rice, the total emission flux (R_t) of paddy CO₂ had greater fluctuation in the growth course of late rice, with an average value of 926.2mg/(m²·h). The soil CO₂ emission flux (R_s) had small fluctuation, with an average value of 285.4mg/(m²·h). Both fluxes appeared marked exponential relationships with air temperature and soil depth (0, 5, 10, 15cm). The temperature coefficients (Q_{10}) were 2.33 and 1.70 respectively. There was a very marked logarithmic relationship between CO₂ accumulative emission amount of paddy ecosystem and rice biomass. During the entire growing period of late rice, the net carbon amount of paddy ecosystem fixed from atmosphere was 3.85t/hm².

Key words: CO₂ emission; influence factors; closed static chamber technique; paddy ecosystem

全球土壤呼吸碳估计量为 68~77Pg/a, 仅次于陆地总初级生产力的估算值 100~120Pg/a, 是碳循环中一个主要的流通途径^[1]. 稻田生态系统对大气温室气体的吸收/排放以及对全球气候变化起着不可忽视的影响^[2]. 我国水稻播种面积为 28.6×10⁶hm², 占世界水稻播种面积的 23%. 目前国内有关稻田温室气体的研究主要集中在 CH₄ 和 N₂O 的产生机理、排放规律及其影响因素^[3,4] 以及大气 CO₂ 浓度倍增对作物生长和气候环境的影响等方面^[5], 而对稻田生态系统 CO₂ 的排放研究相对较少, 尤其缺乏长期的田间定位观测. 因此, 难以对该系统碳收支平衡做出准确评价.

农田 CO₂ 排放以生物学过程为主, 主要受温

度、湿度、植被生产力等多种因素的共同影响^[6]. 旱地农田的研究结果表明, 在一定的温度范围内, CO₂ 排放速率与温度呈多种形式的正相关关系^[7]. 而稻田的耕作栽培条件与旱地差别较大, 这些关系的适用性必须通过实验进行验证. 本研究采用静态箱法对 CO₂ 排放通量进行监测, 目的是探讨稻田生态系统 CO₂ 的排放特征及影响因素, 并对该系统 CO₂-C 收支进行估算, 为评价稻田生

收稿日期: 2004-08-19

基金项目: 国家“973”项目(2002CB412503); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-426); 国家自然科学基金资助项目(40235057)

* 责任作者, 研究员, jswu@isa.ac.cn

态系统在陆地生态系统碳循环中的作用以及对气候变化的贡献提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验在中国科学院桃源农业生态站(28°55'N、111°30'E、海拔 91.6m)进行。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,年平均气温 16.5,年降雨量 1447.9mm,年蒸发量 1157mm,日照时数 1531.4h,太阳辐射 422.6kJ/cm²。土壤为第四纪红土发育而成的水稻土,质地为黏壤。土壤有机碳 17.6g/kg,全氮 1.99g/kg,全磷 1.37g/kg,全钾 18.07g/kg, pH 5.74,土壤容重 1.25g/cm³。

晚稻品种为籼优桂-99,2003 年 6 月 16 日播种,7 月 20 日移栽(密度为 21 穴/m²),10 月 20 日收割。其中 7 月 19 日施用尿素 150kg/hm²、复合肥(N:P₂O₅:K₂O=8:8:9)75kg/hm²、磷肥 150kg/hm²作基肥;7 月 26 日施尿素 150kg/hm²。田间水分按当地常规方式管理,8 月 4~8 日烤田,10 月 10 日以后落干,其余时间田间处于淹水状态,保持水层 5cm 左右。

1.2 气体采集与气象因子观测

采用箱式法进行采样。采样箱由箱体与箱底座组成。箱体由 65cm×65cm×90cm 的有机玻璃板制成,罩在事先打入田间的不锈钢支架上,箱基和箱盖之间用粘贴的可压缩橡胶密封条进行密封。箱体顶部除有一接口与 CO₂ 分析仪连接外,上部还安装了 2 个由 12V 电池供电的直径 15cm 的电风扇。采集箱为活盖箱,其箱基部分在实验过程中一直固定嵌在土壤中。

采用暗箱法观测土壤呼吸和有水稻生长条件下的 CO₂ 总排放通量^[3]。观测开始于晚稻移栽后第 7d,每周进行 1~2 次,观测时间为上午 9:00~11:00。测定时间为 10min,气体流速为 0.5L/min。通过线性回归计算该时间间隔内 CO₂ 浓度随时间的变化速率以代表 CO₂ 排放通量^[2]。测定时箱盖短时间关闭,采样完毕后立即打开箱盖。气体分

析用 CI-301PS 便携式光合作用测定仪(美国 CID 公司)的 Absolute 功能进行测定。每次测定前均用 CO₂ 标准气体对仪器进行标定。

测定 CO₂ 浓度的同时,测定箱内温度及利用 TRM-ZS3 小气候自动观测系统(锦州科技发展有限公司)测定太阳辐射、气压、气温以及不同土层温度(0,5,10,15cm)等环境要素。

1.3 生物量测定

从水稻移栽后的第 7d 开始记录茎蘖数,每 10d 调查一次,每次调查 20 穴(小区的东、西、南、北各 5 穴),然后根据平均茎蘖数采集 5 穴水稻,于 105℃ 杀青 15min,80℃ 烘干至恒重,测定地上和地下部分生物量。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 排放通量及其与温度的关系

稻田系统呼吸排放的 CO₂ 来源于植物呼吸与土壤呼吸。在晚稻生长期,CO₂ 总排放通量(R_t)整体上呈现先增加、后下降的趋势(图 1),一方面与温度的变化有关,另一方面也受作物生长状况的影响。在水稻移栽期,排放量较小,可能主要由于水稻生物量小以及土壤微生物活性较小的原因。随水稻生长发育进程,水稻根系分泌物和脱落物的不断增加,为微生物提供了充足的能源和营养源,再加上温度的升高,使得呼吸作用增强。在水稻生长后期呼吸作用则又逐渐减弱。在整个晚稻生长期,稻田生态系统 R_t 变化在 250~1400mg/(m²·h)之间,平均值为 926.2mg/(m²·h)。

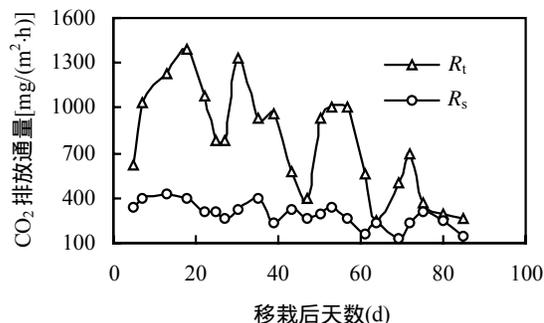


图 1 稻田生态系统 CO₂ 排放速率动态变化

Fig.1 Dynamics of respiration rates in paddy ecosystem

土壤 CO₂ 排放通量(R_s)表现为逐渐减小的变化趋势,且整个晚稻生长期变化幅度相对较小(图 1).这可能主要由于土壤呼吸与土壤温度的变化有关.在晚稻生长期,土壤温度也呈由高到低逐渐减小的变化趋势.整个生长期 R_s 的平均值为 285.4mg/(m²·h),明显低于 R_t 的平均值.由此可见,在水稻生长条件下,CO₂ 排放速率提高了 2.2 倍.

温度对呼吸作用的影响是通过多种途径起作用的,如可以提高作物根系的呼吸,加速土壤中有机质的分解和提高微生物活性等,从而促进 CO₂ 的释放.目前描述 CO₂ 排放速率与温度间关系的方程有指数方程、线性方程和幂函数方程等^[7].分别对 R_t 、 R_s 与气温、地表、5cm 土层、10cm 土层和 15cm 土层温度因子的相关分析表明,二者与气温和土壤温度的关系可以用指数方程进行拟合,相关性均达到极显著水平(表 1).在 5 个温度因素中, R_t 与气温和各层土壤温度的相关系数并无显著差异,这说明气温与土壤温度对 CO₂ 总排放强度的影响程度基本相当.而 R_s 与 15cm 土层温度的相关系数却明显高于其它各土层温度,表明土壤呼吸主要受较深土层温度的影响.

表 1 稻田生态系统 CO₂ 排放通量和土壤 CO₂ 排放通量与温度的关系

Table 1 The relationship between rate of respiration and temperature in paddy ecosystem

温度 ()	$R_t = ae^{bT}$			$R_s = Ae^{BT}$		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>R</i> ²
T_a	85.86	0.08	0.6991*	108.32	0.04	0.5127*
T_g	49.48	0.10	0.6733*	84.02	0.05	0.4897*
T_5	48.07	0.11	0.6738*	84.68	0.05	0.5640*
T_{10}	42.80	0.11	0.6488*	83.15	0.05	0.5841*
T_{15}	27.64	0.12	0.6405*	69.84	0.05	0.6169*

注: $n=22$, * 相关性达到极显著水平, T_a 、 T_g 、 T_5 、 T_{10} 和 T_{15} 分别表示气温、地表、5cm 土层、10cm 土层和 15cm 土层温度. 参数 *a*、*A* 分别为 0 时稻田系统 CO₂ 排放通量和土壤排放通量[mg/(m²·h)], *b* 和 *B* 则为相应的温度反应系数

温度系数 Q_{10} 被认为是表达呼吸速率和温度之间关系的较好参数^[8].对于大多数植物,5~25 范围内呼吸作用的温度系数通常在 2.0~2.4 之间,

随着温度继续增加到 30~35 ,呼吸速率虽有所增加,但增加缓慢, Q_{10} 会略有下降趋势^[9].根据 R_t 、 R_s 分别与气温和 15cm 土层温度的拟合方程,可计算出全生育期稻田生态系统总呼吸的温度系数 $Q_{10(R_t)}$ 和土壤呼吸的温度系数 $Q_{10(R_s)}$,结果分别为 2.33 和 1.70.其适宜的温度范围分别是 11.9~33.2 和 15.8~30.0 .与邹建文等^[3]对南京市稻田(有/无)植株生长条件下 Q_{10} 计算结果基本接近(分别为 2.17 和 1.68),其对应气温和土壤温度的范围分别为 18.1~34.3 和 16.8~28.9 .

2.2 CO₂ 累积排放量与水稻生物量的关系

植物生长对土壤-植物系统 CO₂ 排放的影响可以归结为两方面,一是由于植物生物量的增加引起植株自养呼吸的增强,二是由于凋落物分解、根系分泌物及根际共生体等的共同作用,导致土壤微生物呼吸作用增强^[3].

由图 2 可见,水稻移栽 1 周左右时,由于水稻处于移栽后的适应期,生长量小,因此稻田生态系统 CO₂ 累积排放量(Y_{R_t})仅约为 2.1t/hm².随水稻生长发育,稻田生态系统 Y_{R_t} 和土壤 CO₂ 累积排放量 Y_{R_s} 均呈对数函数增加,相关系数均达到了极显著水平($n=8$).稻田生态系统 Y_{R_t} 平均增加速率为 0.23t/(hm²·d),是 Y_{R_s} 平均增加速率的 3.2 倍.在晚稻的整个生育期,稻田生态系统 Y_{R_s} 和 Y_{R_t} 分别为 20.4t/hm² 和 6.3t/hm².

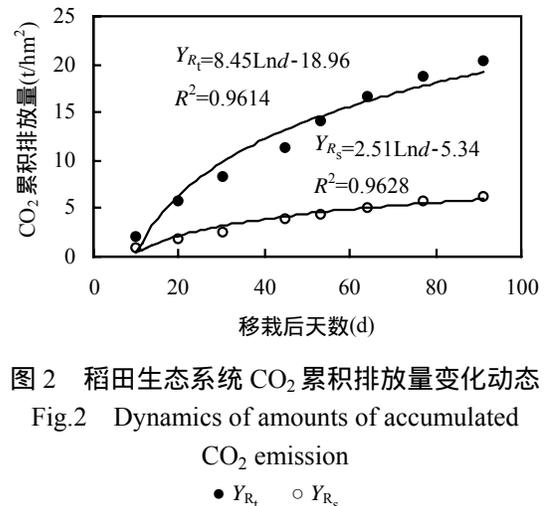


图 2 稻田生态系统 CO₂ 累积排放量变化动态
Fig.2 Dynamics of amounts of accumulated CO₂ emission

分析表明,稻田 Y_{R_t} 与水稻地上部分生物量 (TAGB)和总生物量(NPP)间均存在极显著的幂

函数相关关系,如式(1),式(2)所示:

$$Y_{R_t}=3.61TAGB^{0.70} \quad R=0.9938 \quad (1)$$

$$Y_{R_t}=2.47NPP^{0.80} \quad R=0.9948 \quad (2)$$

由于 Y_{R_t} 与 TAGB 和 NPP 的相关程度基本相当,并且考虑到 TAGB 较 NPP 更易获得,因此可根据水稻地上部分生物量直接对稻田 CO_2 累积排放量进行计算。

2.3 稻田生态系统 CO_2 -C 收支

以 C_{R_s} 表示土壤呼吸 C 排放量, C_{NPP} 表示植株净固定碳量,稻田生态系统 CO_2 -C 收支情况 (ΔC)可由式(3)进行粗略的计算^[2]:

$$\Delta C=C_{NPP}-C_{R_s} \quad (3)$$

式中: $C_{NPP}=0.4144NPP$; $C_{R_s}=0.27Y_{R_s}$. 其中 0.4144、0.27 分别为 NPP 与 Y_{R_s} 折算成 C 的系数。

稻田净固定碳量随生育期进程呈现先增加,至成熟期达到稳定并略有下降的动态变化(图 3)。在水稻移栽后 65d 左右,净固定量达到最大,为 $4.0t/hm^2$,随后由于成熟期作物光合作用较弱, CO_2 吸收量小于排放量而导致净固定量略有下降。晚稻生长期间,水稻净固定碳量为 $5.54t/hm^2$,土壤呼吸碳排放量 $1.69t/hm^2$,因此稻田净吸收碳为 $3.85t/hm^2$,日平均净吸收碳为 $4.18g/m^2$ 由此可见,土壤呼吸对作物生长的作用不可忽视,可以为其提供约 30%的碳源。

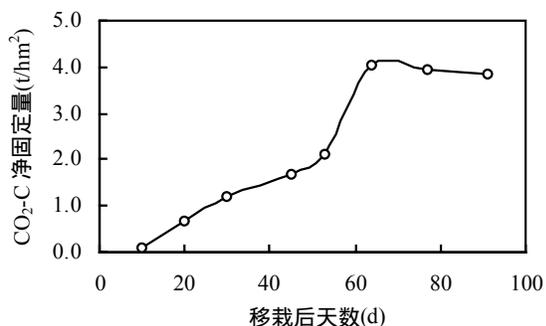


图 3 稻田生态系统 CO_2 -C 碳收支累积量动态

Fig.3 Dynamics of carbon balance of paddy ecosystem

3 结论

3.1 温度是影响生态系统 CO_2 排放的重要因子。稻田 CO_2 总排放速率和土壤呼吸速率与气温和

土壤(层深 0,5,10,15cm)温度均存在极显著的指数相关关系。

3.2 CO_2 累积排放量与水稻生物量存在极显著的幂函数关系,可以通过测定地上部分生物量对 CO_2 累积排放量进行估算。

3.3 稻田生态系统 CO_2 -C 净收支随水稻移栽后天数呈幂函数关系增加。在水稻整个生长期,稻田生态系统从大气中净吸收碳量为 $3.85t/hm^2$,土壤呼吸排放碳量为 $1.69t/hm^2$,占水稻植株净固定碳量的 30%,是植物生长的一个重要碳源。

参考文献:

- [1] Murthy R, Griffin K L, Zarnoch S J, *et al.* Carbon dioxide efflux from a 550 m³ soil across a range of soil temperatures [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003,178(3):311-327.
- [2] 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[M].北京:气象出版社,2002.
- [3] 邹建文,黄耀,宗良纲,等.稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放及其影响因素[J].*环境科学学报*,2003,23(6):758-764.
- [4] 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.
- [5] 郑循华,徐仲均,王跃思,等.开放式空气 CO_2 浓度增高影响稻田-大气 CO_2 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.
- [6] Gullledge J, Schimel J P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska [J]. *Ecosystems*, 2000,3(3):269-282.
- [7] 刘绍辉,方精云.土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J].*生态学报*,1997,17(5):469-476.
- [8] Tang J, Baldocchi D D, Qi Y, *et al.* Assessing soil CO_2 efflux using continuous measurements of CO_2 profiles in soils with small solid-state sensors [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003,118(3-4):207-220.
- [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 CO_2 净交换估算[J].*科学通报*,2004,49(3):258-264.

作者简介:朱咏莉(1976-),女,河南新乡人,中国科学院水利部水土保持研究所在读博士研究生,主要从事农业环境和养分循环方面的研究.发表论文 4 篇。