

稻田 CO₂ 排放对大气 CO₂ 浓度升高的响应^①

孙会峰^{1,2}, 朱建国^{1*}, 谢祖彬¹, 刘 钢¹, 蔺兴武¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用 FACE (free-air carbon dioxide enrichment) 平台, 采用静态暗箱-气相色谱法, 研究了大气 CO₂ 浓度升高对稻田土壤 CO₂ 通过土壤-大气(土气)和植被-大气(植气)界面排放的影响。在整个水稻生长季中, 土气界面 CO₂ 排放通量与土壤表面土层深度指数负相关, 且在中期烤田和收获前排水阶段出现较大值; 而植气界面 CO₂ 排放通量与根系生物量的变化趋势基本一致。在低氮(N 125 kg/hm²)和常氮(N 250 kg/hm²)水平上, 高浓度 CO₂ (对照大气 CO₂ 浓度 + 200 μmol/mol) 有提高水稻生物量、降低土气和植气界面 CO₂ 累积排放量的趋势。在水稻的拔节、抽穗和成熟期, 较高的施氮量显著增加水稻地上部分生物量, 促进植气界面 CO₂ 的排放。研究结果表明, 未来大气 CO₂ 浓度升高的环境下, 稻田生态系统有增加 CO₂ 的固定(增加水稻生物量), 减少 CO₂ 的排放(土气和植气界面 CO₂ 的排放)的趋势, 可能发挥着碳汇的作用。

关键词: 大气 CO₂ 浓度升高; 稻田; 土气界面 CO₂ 排放; 植气界面 CO₂ 排放

中图分类号: X511; S161

大气 CO₂ 浓度升高, 增加植物(特别是 C₃ 植物)的净光合速率, 提高其地上地下生物量, 促进根系分泌物的排放, 最终对土壤呼吸及植物地上部分呼吸产生影响^[1-2]。很多研究者已经对森林、草地、农田等陆地生态系统中的土壤呼吸对高浓度 CO₂ 的响应已经做了大量的研究工作^[3-5], 但关于稻田土壤呼吸对大气 CO₂ 浓度升高的响应的研究相对较少。

稻田土壤排放的 CO₂ 包括土壤呼吸的 CO₂ 和甲烷氧化菌氧化 CH₄ 产生的 CO₂, 本文将所谓的土壤呼吸称为“土壤-大气(土气)界面 CO₂ 的排放”。前人的研究表明, 高浓度 CO₂ 能够降低土气界面 CO₂ 的排放, 原因可能与藻类的光合作用^[6]或土壤中的 CO₂ 向 CH₄ 的转化^[7]有关。大气 CO₂ 浓度升高增加植物地上部分生物量, 提高叶片及茎中碳水化合物的含量^[8], 从而为地上部分呼吸提供了更多的底物, 在短期内可增强地上部分呼吸。但是, 大气 CO₂ 浓度升高有降低植物组织含氮量的趋势^[9], 这一定程度上能降低单位地上部分生物量的呼吸量^[10]。稻田土壤中产生的 CO₂ 可经水稻的通气组织通过叶鞘较低部位的气孔和近轴薄壁组织进入大气^[11], 因此水稻地上部分排放的 CO₂ 包括土壤产生的一部分 CO₂ 和植物自身的呼吸。本文

将所谓的地上部分呼吸称为“植被-大气(植气)界面 CO₂ 的排放”。

迄今的相关研究工作大多是在环境控制箱中进行的, 对说明自由大气环境下的情形有诸多不确定性。利用开放式自由大气 CO₂ 浓度升高 (FACE) 的技术, Xu 等^[12]采用暗箱法, 将割除水稻地上部分前后的生态系统呼吸量的差值作为植气界面 CO₂ 的排放量。该方法中, 水稻的伤呼吸和土壤表面土水层的人为搅动会影响对植气界面 CO₂ 排放量的准确估算, 最终会影响植气界面 CO₂ 的排放对大气 CO₂ 浓度升高的响应的评估。因此, 为了更准确地评估高浓度 CO₂ 对水稻植气界面 CO₂ 排放的影响, 利用 FACE 技术, 进行原位的植气界面 CO₂ 排放通量的观测是非常有必要的。

本试验基于一种可同时测定土气界面 CO₂ 和植气界面 CO₂ 排放通量的静态暗箱, 以研究: ①稻田土气和植气界面 CO₂ 排放通量的季节变化规律及其影响因素; ②稻田土气和植气界面 CO₂ 的排放对大气 CO₂ 浓度升高的响应。其结果可为估算未来大气 CO₂ 浓度升高的情形下该地区稻田生态系统的碳收支提供一定的试验支持。

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41171191)、中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-07, KZCX2-EW-409, KZCX3-SW-440)、科技部国际科技合作项目(2010DFA22770)和国家科技攻关计划项目(2008BAD95B05)资助。

* 通讯作者(jgzhu@issas.ac.cn)

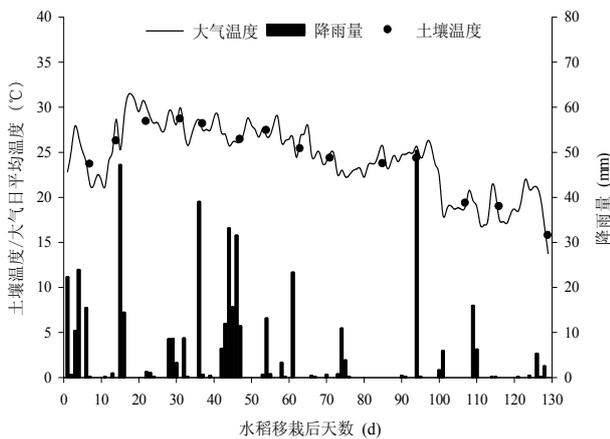
作者简介: 孙会峰(1983—), 男, 山东沂水人, 博士研究生, 主要从事全球气候变化与温室气体排放方面的研究。E-mail: hfsun2010@gmail.com

1 材料与方 法

1.1 FACE 平台及环境因子观测

稻麦轮作FACE(free-air carbon dioxide enrichment)系统平台建于江苏省江都市小纪镇马凌村(32°35'5" N, 119°42'0" E), 于 2004 年的水稻生长季开始运行。该系统包括 3 个 FACE 圈(对照 CO₂ 浓度 + 200 μmol/mol) 和 3 个对照圈(对照 CO₂ 浓度)。FACE 圈和对照圈间的距离在 70 m 以上。试验采用裂区设计, CO₂ 浓度作为主处理, 氮肥水平作为副处理。在每个 FACE 或者对照圈内设置低氮(LN, N 125 kg/hm²) 和常氮(NN, N 250 kg/hm²) 两个氮水平。因此, 试验分为 FACE-LN (FL)、对照-LN (AL)、FACE-NN (FN) 和对照-NN (AN) 4 个处理。FACE 系统的具体设计方法、原理及运行方式等参考刘钢等^[13]。

试验从 2008 年 6 月 17 日开始, 到 10 月 24 日结束, 一共持续 129 天。试验期间的气象数据从试验区域附近田块中自建的小型气象站获得。在气体样品采集过程中, 用带有硅半导体传感器的土壤温度计(JM222L, 天津今明仪器有限公司)进行土壤温度(土壤深度 10 cm) 的测定。观测期间大气日平均温度和土壤温度分别在水稻移栽后 20 天和 30 天左右达到整个生长季的最大值(图 1)。季平均大气温度和降雨量分别是 24.4℃ 和 463.5 mm。



(土壤温度为采样时期所有处理土壤深度 10 cm 温度的平均值)

图 1 水稻生长季中大气日平均温度、土壤温度和日降雨量的季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of daily mean air temperature, soil temperature and daily precipitation in rice growing season

1.2 供试土壤

该地区耕作层土壤的深度大约为 15 cm。供试土

壤采自于试验圈外的田块, 其物理、化学基本性质如下: 有机碳 20.7 g/kg, 总氮 1.99 g/kg, 体积质量 1.16 g/cm³, pH 值(土:水 = 1:2.5) 6.3, 黏粒(<0.002 mm) 203 g/kg, 粉粒(0.002~0.02 mm) 262 g/kg, 砂粒(0.02~2 mm) 535 g/kg。土壤为砂姜潮湿锥形土。供试土壤被挖取后, 挑出冬小麦生长季残留的根及根茬, 风干至 15% 体积含水量左右, 并过 2 mm 筛。再按照土:石英砂为 9:1(干重比)的比例添加石英砂于供试土壤中, 并混匀。土壤中添加石英砂是为了更容易地洗掉黏附在水稻根系表面的土壤以获取较准确的水稻根系生物量。

1.3 静态暗箱结构

图 2 为用于测定土气和植气界面 CO₂ 排放通量的静态暗箱的示意图。每一套静态暗箱包括一个底箱, 一个生长管(PVC 管)和两个顶箱(A 和 B)。底箱和顶箱 A、B 均由 2 mm 厚的 PVC 板制作。每个底箱的内径尺寸为 20 cm×15 cm×20 cm(长×宽×高, 以下同), 其中心位置可栽种一穴水稻。在底箱的顶部有水槽(放置顶箱 A), 而底部用孔径为 48 μm 的尼龙网封住, 以防止水稻根系长到底箱外部。

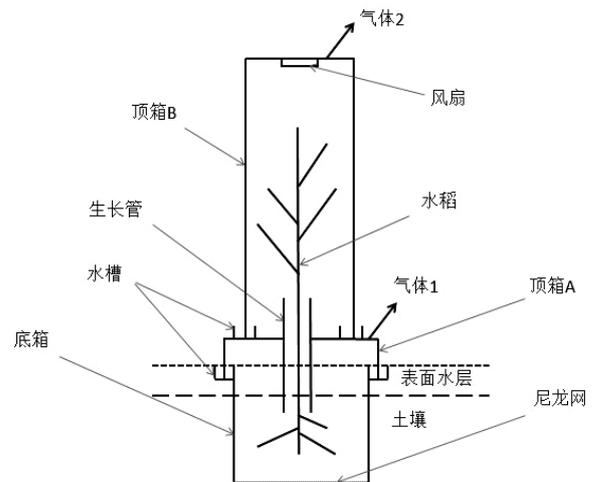


图 2 用于气体采样的静态暗箱的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of static chamber for gas sampling

用顶箱 A(21 cm×16 cm×7.5 cm) 和圆柱形的生长管(3.2 cm×15 cm, 内直径×高)来测定土气界面 CO₂ 的排放。在底箱 A 的顶部中心位置打孔后, 将生长管顶部从孔中伸出来, 而生长管底部插入土壤 1~2 cm。顶箱 A 顶部有水槽可放置顶箱 B。顶箱 B(15 cm×13.5 cm×15 cm 和 15 cm×13.5 cm×100 cm) 的使用可测定植气界面 CO₂ 的排放。当水稻植株高度低于 15 cm 时, 采用 15 cm 高的顶箱 B; 当其高度高于 15 cm

时, 采用 100 cm 高的顶箱 B。在较高的顶箱 B 的内顶部安装一个电池驱动的风扇用于搅匀顶箱 B 内的空气。

在每个氮副处理下, 按照 24 穴/m² 的密度放置 5 个静态暗箱, 而底箱间的空隙用土填充。在每个底箱中加入 5.2 kg (烘干土计) 并轻微压实至 15 cm 的高度以保证底箱内外的土壤表面在一个水平面上。另外, 为了便于试验管理如土壤表面水层的控制, 用一个 PVC 板 (4 mm 厚) 制作的隔离框 (150 cm×100 cm×30 cm) 将试验区域与周围隔开。

1.4 供试水稻品种和农业措施

供试水稻品种为武香粳 14 号 (*Oryza sativa* L.)。在 2008 年 6 月 17 日, 将大约 30 日苗龄、有 3 个分蘖的一株秧苗人工移栽到底箱的生长管中。

水稻生长季中, 复合肥 (N:P₂O₅:K₂O = 15:15:15, %) 和尿素 (N, 46.3%) 混施。在常氮水平上, 按施氮量的 36%、24% 和 40% 分别作为基肥、分蘖肥和穗肥施入; 在低氮水平上则按施氮量的 60% 和 40% 分别作为基肥和穗肥施入。基肥、分蘖肥和穗肥的施用日期分别是 6 月 16 日 (水稻移栽前 1 天)、6 月 24 日 (水稻移栽后 7 天) 和 8 月 3 日 (水稻移栽后 47 天)。在所有处理中, 磷钾肥以复合肥的形式作为基肥一次性施入土壤。用自来水将肥料溶解搅匀后, 用塑料注射器将肥料溶液定量加入到底箱中。

中期烤田从 7 月 22 日 (水稻移栽后 35 天) 开始, 到 8 月 12 日 (水稻移栽后 56 天) 结束, 持续 22 天。收获前的田间排水日期为 10 月 1 日 (水稻移栽后 106 天)。

1.5 气体样品的采集及 CO₂ 浓度的测定

采用静态暗箱-气相色谱法测定两个界面 CO₂ 的排放通量。将顶箱 A 放置到底箱上的水槽中, 用水密封, 同时用橡皮泥将顶箱 A 与生长管间的缝隙封住。同时, 将顶箱 B 放置到顶箱 A 上的水槽中, 用水密封。采集来自土气和植气界面的气体样品之前, 顶箱 A (气体 1) 和 B (气体 2) 的顶部空间内的气体分别用 20 ml 注射器混匀几次和风扇混匀 2 min。前后间隔 20 min, 用 20 ml 注射器采取顶箱 A 或 B 内的气体样品两次, 并将气体样品注入 18.5 ml 的真空棕色小瓶, 再将气体样品带回实验室尽快测定 CO₂ 浓度。底箱气体样品采集完成后, 将顶箱 B 取下, 把顶箱 A 稍微提起、围绕生长管旋转约 45° 后放置到底箱的水槽上。气体样品采样时间为 7:00—13:00。气体样品采集频率为一周一次 (抽穗期以前) 或者两周一次 (抽穗期以后)。在气体

样品采集过程中, 利用直尺进行底箱内土壤表面水层深度的测定。

气体样品中 CO₂ 浓度采用安装有热导检测器 (TCD) 的瓦里安气相色谱 CP-3380 (Varian America Inc.) 进行测定。气相色谱的运行环境: 进样口温度为 50℃, 柱温为 40℃, 检测器温度为 100℃; 载气为 99.999% 的高纯 N₂。

1.6 水稻样品生物量及其含氮量的测定

在水稻的拔节期 (水稻移栽后 63 天)、抽穗期 (水稻移栽后 71 天)、灌浆期 (水稻移栽后 94 天) 和成熟期 (水稻移栽后 129 天) 进行根系和地上部分生物量的测定。在每个生育期的每个氮副处理下, 将一个底箱挖出, 并将绑在底箱底部的尼龙网去除。用水泵 (220V, 50W) 冲洗掉底箱内部的土壤, 接着用自来水和去离子水清洗水稻根系和地上部分。用烘箱 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘至恒重, 称取两部分的质量。将水稻成熟期的根系和地上部分样品粉碎、过 60 目筛后, 用碳氮分析仪 (PE 2400, CHNS/O Analyzer Perkin Elmer, USA) 测定其全氮含量。

1.7 数据计算及统计分析

土气或植气界面 CO₂ 排放通量的计算公式为:

$$F = \frac{\Delta C \times M \times V}{22.4 \times \Delta t \times A} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中, F 代表土气或植气界面 CO₂ 的排放通量 (CO₂ mg/(m²·h)); ΔC 代表一定时间间隔前后 CO₂ 浓度的变化 (μg/g); M 代表 CO₂ 的分子量 (g/mol); V 代表顶箱内部有效体积 (L); 22.4 代表标准状态下单位摩尔气体所占的体积 (L/mol); Δt 代表时间间隔 (h); A 代表底箱所占据的面积 (m²); 10⁻³ 代表 μg 转化成 mg 的转化系数。

土气或植气界面 CO₂ 的累积排放量的计算公式为:

$$C = \sum_1^i \frac{(F_{i-1} + F_i)}{2} \times (t_{i+1} - t_1) \times 24 \times 10^{-5} \quad (2)$$

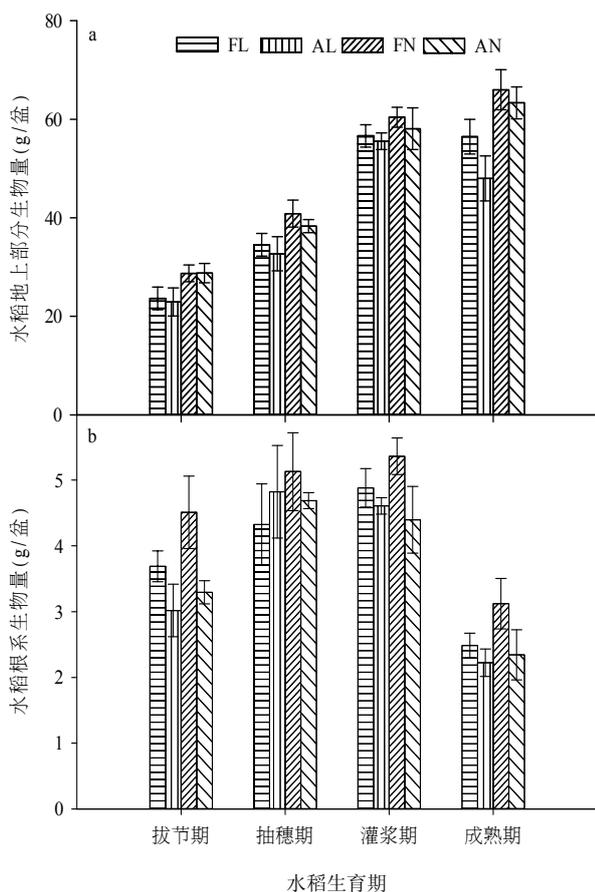
式中, C 代表土气或植气界面 CO₂ 的累积排放量 (CO₂ t/hm²); F 代表每次采样时的土气或植气界面 CO₂ 的排放通量 (CO₂ mg/(m²·h)); i 代表采样次数; t 代表采样时间 (水稻移栽后天数); 24 代表每天的小时数; 10⁻⁵ 代表 mg/m² 转化成 t/hm² 的转化系数。

采用 SPSS13.0 统计软件的 One-way ANOVA 和 Univariate 进行单因素和双因素方差分析及 Biovariate Correlations 进行相关性分析。采用 Sigmaplot12.0 绘图软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 水稻生物量及其含氮量

在水稻成熟期, 所有处理的地上部分生物量达到整个生长季的最大值 (AL 处理除外, 图 3a)。但高浓度 CO₂ 和对照处理的根系生物量分别在灌浆期和抽穗期达到最大值 (图 3b)。



(图中误差线表示平均值的标准误差 ($n=3$), 下同)

图 3 不同水稻生育期的地上部分 (a) 和根系 (b) 生物量

Fig. 3 Root and shoot biomass of rice in different rice growing stages

在水稻的所有生育期中, 大气 CO₂ 浓度升高在两个氮水平上有增加地上部分 (3.1%~17.6%) 和根系生物量 (5.9%~36.8%) 的趋势。但是, 只有在拔节期, 根系生物量对高浓度 CO₂ 的响应达到显著水平 ($P<0.05$), 且该响应程度在整个生育期中最大。

高浓度 CO₂ 条件下, NN 处理比 LN 处理明显增加各生育期的地上部分和根系生物量; 但是在对照 CO₂ 条件下, 只有地上部分生物量对较高施氮量的响应较为明显。在水稻的拔节、抽穗和成熟期, 较高的施氮量分别显著增加 23.6%、17.8% 和 23.8% 的地上部分

生物量 ($P<0.05$)。在水稻成熟期, 大气 CO₂ 浓度升高降低根系和地上部分含氮量, 但都没达到显著水平 (表 1)。较高的施氮量有增加根系含氮量的趋势。CO₂ 浓度和氮水平对根系或地上部分的生物量或含氮量也未表现出交互作用。

表 1 成熟期水稻根系和地上部分的含氮量

Table 1 N concentrations in root and shoot of rice at maturity stage

处理	根系 (g/kg)	地上部分 (g/kg)
FL	12.7 (0.9) a	11.2 (1.0) a
AL	13.7 (0.4) a	11.5 (0.7) a
FN	14.1 (0.2) a	10.9 (0.5) a
AN	14.3 (0.8) a	12.0 (0.4) a

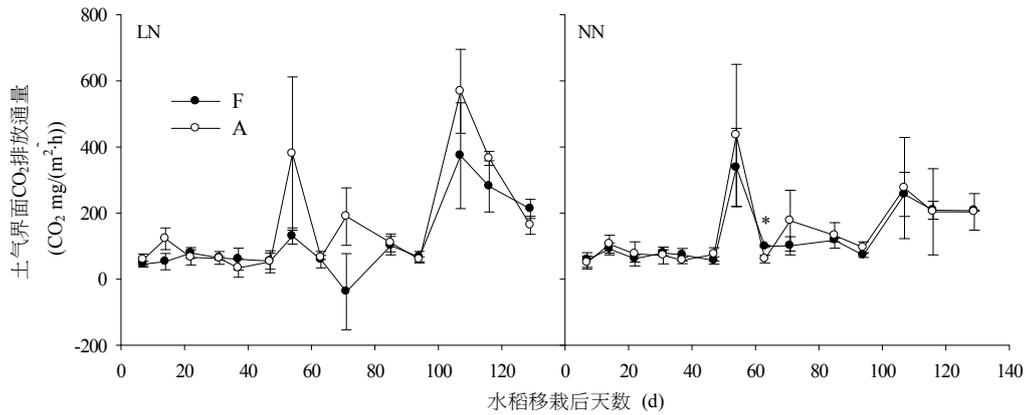
注: 括号内的数字表示平均值的标准误差 ($n=3$); 同列数据不同小写字母表示处理间差异在 $P<0.05$ 水平上显著, 下同。

2.2 稻田土气界面 CO₂ 的排放

从图 4 上可以看出, 在水稻生长初期 (从水稻生长季开始到水稻移栽后 47 天), 土气界面 CO₂ 排放通量较小, 随后在水稻移栽后 54 天出现第一个峰值。从水稻移栽后 63 天到 94 天, 土气界面 CO₂ 排放通量震荡起伏, 而在水稻移栽后 107 天出现第二个峰值。在水稻生长季结束时, 土气界面 CO₂ 排放通量下降至 200 mg/(m²·h) 左右。高浓度 CO₂ 在两个氮水平都有降低土气界面 CO₂ 排放通量的趋势, 主要体现在水稻移栽后 54 天到 107 天这段时间内。高浓度 CO₂ 在 LN 和 NN 水平上分别降低了 34.3% 和 10.4% 的土气界面 CO₂ 的累积排放量; 较高的施氮量有增加 (高浓度 CO₂ 条件) 和降低 (对照条件) 土气界面 CO₂ 排放的趋势, 但这些差异都不显著 (表 2)。

2.3 稻田植气界面 CO₂ 的排放

随着水稻生长发育进程的进行, 植气界面 CO₂ 的排放通量先增加后减少, 在水稻移栽后 85 天出现整个生长季的峰值 (图 5)。在 LN 水平上, 高浓度 CO₂ 和对照处理的植气界面 CO₂ 的累积排放量基本相当; 但在 NN 水平上, 大气 CO₂ 浓度升高有降低植气界面 CO₂ 排放的趋势 (表 2)。高浓度 CO₂ 在 LN 和 NN 水平上降低了 15.6% 和 7.8% 的单位地上部分生物量的 CO₂ 排放量, 但差异不显著。较高的施氮量有增加植气界面 CO₂ 的累积排放量和单位地上部分生物量的 CO₂ 排放量的趋势。CO₂ 浓度与氮水平对植气界面 CO₂ 的累积排放量及单位地上部分生物量的 CO₂ 排放量没有交互作用。



(* 表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平上显著, 下同)

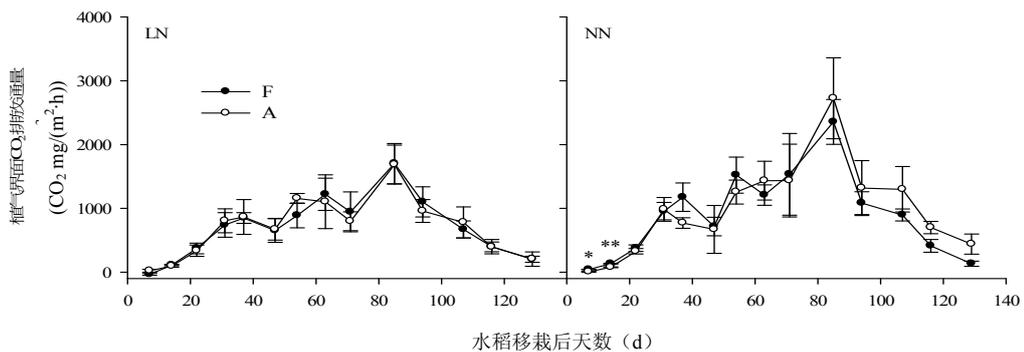
图 4 稻田土气界面 CO₂ 排放通量的季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of CO₂ fluxes through soil-atmosphere interface in rice paddy field

表 2 稻田土气 (C_{土气}) 和植气界面 (C_{植气}) CO₂ 的累积排放量及成熟期单位地上部分生物量的 CO₂ 排放量 (S_{植气})

Table 2 Seasonal cumulative CO₂ emission through soil-atmosphere and plant-atmosphere interfaces, specific cumulative CO₂ emission through plant-atmosphere interface at maturity stage in rice growing season

处理	C _{土气} (CO ₂ t/hm ²)	C _{植气} (CO ₂ t/hm ²)	S _{植气} (CO ₂ kg/kg 干重)
FL	3.5 (0.6) a	22.6 (4.8) a	1.2 (0.2) a
AL	5.3 (0.6) a	22.6 (4.0) a	1.4 (0.2) a
FN	4.0 (0.5) a	29.0 (4.0) a	1.3 (0.3) a
AN	4.5 (1.4) a	31.5 (7.7) a	1.5 (0.3) a



(* 和 ** 分别表示处理间差异在 $P < 0.05$ 和 0.01 水平上显著)

图 5 稻田植气界面 CO₂ 排放通量的季节变化

Fig. 5 Seasonal variations of CO₂ fluxes through plant-atmosphere interface in rice paddy field

3 讨论

3.1 稻田 CO₂ 排放的季节动态及影响因子

在水稻移栽后 54 天和 107 天(中期烤田和收获前排水阶段), 土气界面 CO₂ 的排放通量出现两个峰值。

在稻田排水后, 土壤通气性较强, 好气微生物量活跃, 有利于土气界面 CO₂ 的排放。稻田土气界面 CO₂ 排放的季节动态规律主要取决于土壤表面水层深度的变化(表 3), 这与邹建文等^[14]的研究结论基本一致。土气界面 CO₂ 的排放通量与土壤表面水层深度显著指数负

相关。土壤表面水层深度可解释 64%~79% 的土壤界面 CO₂ 排放通量的季节变化 (表 3)。这表明土壤表面水层深度是驱动稻田土壤界面 CO₂ 排放通量季节变化的重要因素之一。

表 3 稻田土壤界面 CO₂ 的排放通量 (F) 与土壤表面水层深度 (W) 的相关关系

Table 3 Relationship between CO₂ flux through soil-atmosphere interface (F) and soil surface water depth (W) in rice paddy field

处理	相关关系方程式	R^2	P 值
FL	$F = 200.06e^{-0.514W}$	0.74	<0.01
AL	$F = 330.54e^{-0.773W}$	0.79	<0.001
FN	$F = 202.97e^{-0.385W}$	0.68	<0.001
AN	$F = 224.72e^{-0.638W}$	0.64	<0.01

在整个水稻生长季中, 植气界面 CO₂ 排放通量先增大, 并在灌浆前期 (水稻移栽后 85 天) 达到最大值, 而后减小, 呈倒“V”型变化趋势。这与 Xu 等^[12]的研究结果基本一致。本试验结果表明, 水稻植气界面 CO₂ 排放通量与根系生物量显著指数正相关。将水稻 4 个生育期中所有处理的根系生物量和植气界面 CO₂ 的排放通量进行统计分析, 结果表明, 植气界面 CO₂ 的排放通量与根系生物量显著指数正相关 ($R^2 = 0.48$, $P < 0.01$)。在水稻的灌浆前期, 根系生物量达到最大, 同时水稻拥有最大的绿叶生物量^[15]。与枯叶相比, 活性较强的绿叶, 一方面能够增加自身的呼吸作用, 另一方面则增强土壤 CO₂ 通过叶鞘较低部位的气孔和近轴薄壁组织进入大气, 从而有利于植气界面 CO₂ 的排放。因此最大的根系和绿叶生物量引起最强的植气界面 CO₂ 排放通量。水稻灌浆后, 茎和叶中的养分向穗部转移, 根系生物量开始减小, 绿叶生物量迅速下降, 枯叶增多, 引起植气界面 CO₂ 排放通量急剧减小。因此, 水稻根系生物量的季节变化能够间接反映植气界面 CO₂ 排放通量的季节变化。

排除稻田中期烤田和收获前的排水落干过程的影响, 用淹水期的数据分析土壤温度与土壤或植气界面 CO₂ 排放通量的相关关系, 结果表明土壤温度与土壤 ($R^2 = 0.06 \sim 0.17$, $P > 0.05$) 或植气界面 CO₂ 的排放通量 ($R^2 = 0.05 \sim 0.15$, $P > 0.05$) 不存在显著的相关关系。

3.2 稻田 CO₂ 排放对大气 CO₂ 浓度升高的响应

在本试验中, 高浓度 CO₂ 对水稻根系及地上部分表现出一定的促进作用, 这与前人的研究结果基本一

致^[16]。在大气 CO₂ 浓度升高的条件下, 较大根系的自养呼吸以及较多根系沉积物被土壤微生物利用的异养呼吸, 最终有可能引起土壤 CO₂ 排放的增加^[3-5]。然而, 高浓度 CO₂ 增加水稻根系生物量 (图 3b) 的同时, 却有降低土壤界面 CO₂ 累积排放量的趋势 (表 2)。有研究指出, 高浓度 CO₂ 促进了稻田土壤表面及表面水中浮游植物和光合藻类等生物的生长, 增强土壤界面 CO₂ 的光合利用, 从而降低了土壤界面 CO₂ 的排放^[6]。在同一 FACE 平台上, Feng 等^[17]研究发现, 高浓度 CO₂ 增加了稻田土壤中紫色光合细菌的数量及其多样性, 这也许能增强光合细菌对土壤界面 CO₂ 的利用, 从而降低土壤界面 CO₂ 的排放。马红亮等^[7]则指出, 大气 CO₂ 浓度升高条件下, 通过水稻根系进入土壤的有机物质在厌氧环境下更多地被转化成 CH₄, 而不是 CO₂, 从而降低了土壤界面 CO₂ 的排放。而本研究发现, 高浓度 CO₂ 处理的土壤界面 CH₄ 的累积排放量确实要高于对照处理 (未发表的研究结果)。高浓度 CO₂ 降低根系和地上部分的含氮量 (表 1), 也许引起根系自养呼吸和土壤微生物对根际沉积物利用效率的降低, 这最终对稻田土壤 CO₂ 的排放产生影响。

大气 CO₂ 浓度升高有促进水稻地上部分的生长 (图 3a), 但降低其含氮量的趋势 (表 1)。水稻地上部分生物量的增加, 为自身的呼吸提供更多底物 (碳水化合物等) 的同时, 也为土壤 CO₂ 经植株的排放提供更多的通道 (气孔等), 从而增加植气界面 CO₂ 的排放。地上部分单位生物量的 CO₂ 排放量与地上部分含氮量呈线性正相关^[10]。同样地, 本实验也观测到, 随着地上部分含氮量的降低, 单位地上部分生物量的 CO₂ 排放量也相应减少 (表 2)。Xu 等^[12]研究指出, 大气 CO₂ 浓度升高显著增加中后期水稻地上部分的生物量, 而对其含氮量没有影响, 从而增加了植气界面 CO₂ 的累积排放量。在本试验的两个氮水平上, 高浓度 CO₂ 对地上部分生物量在各生育期的增加幅度较小 (图 3a), 对成熟期地上部分含氮量的降低幅度也较小 (表 1)。因此, 根据高浓度 CO₂ 对水稻组织中氮的“稀释”作用^[9], 可以推论得出, 高浓度 CO₂ 对其他生育期的地上部分含氮量的影响也不大。在 LN 水平上, 高浓度 CO₂ 和对照处理的植气界面 CO₂ 的累积排放量基本相当, 这可能是因为高浓度 CO₂ 对地上部分的生物量及含氮量影响较小造成。但是在 NN 水平上, 高浓度 CO₂ 增加地上部分生物量的幅度为 5.0%, 而减小地上部分含氮量的幅度为 8.8%。可能是地上部分含氮量相对较大的降低幅度最终引起植气界面 CO₂ 的累积排放量的降低 (表 2)。因此, 植气界面 CO₂ 的累积排放量

对高浓度 CO₂ 的响应主要是地上部分生物量对高浓度 CO₂ 的正响应和地上部分含氮量对高浓度 CO₂ 的负响应相互权衡的结果。

3.3 稻田 CO₂ 排放对施氮量的响应

较高的施氮量能明显增加水稻地上部分生物量, 但对其根系的促进作用主要体现在高 CO₂ 浓度水平上 (图 3b)。在高 CO₂ 浓度水平上, 较高的施氮量有增加土气界面 CO₂ 排放的趋势。一方面, 与 LN 处理相比, NN 处理增加了各个生育期的根系和地上部分生物量 (图 3), 增加根系的含氮量, 相应地增加了水稻根系的自养呼吸和根际土壤微生物的异养呼吸。另一方面, 水稻生物量的加大, 增加对氮养分的吸收。土壤中相对较少的 NH₄⁺ (由尿素水解产生) 也许会对土壤有机质的分解过程产生刺激作用^[18]。但在对照 CO₂ 浓度水平上, 较高的施氮量倾向于降低土气界面 CO₂ 的排放。较高的施氮量在对照水平上对水稻抽穗期和灌浆期的根系生物量有降低趋势, 引起根际沉积物数量的减少, 最终导致水稻根系自养呼吸和根际土壤微生物异养呼吸的降低, 由此可降低土气界面 CO₂ 的排放。另外, 较高的施氮量下, 根系生物量的减小, 也许能说明这个施氮水平已经达到甚至超过水稻生长对氮的需求量。土壤中相对较多的 NH₄⁺ 也许会抑制土壤微生物对原有机质的分解^[18], 由此也可减少土气界面 CO₂ 的排放。较高的施氮量在拔节期、抽穗期和成熟期显著增加地上部分生物量的同时, 也倾向于增加地上部分的含氮量 (对照 CO₂ 浓度水平)。因此, 较高的施氮量有增加植气界面 CO₂ 累积排放量的趋势。

4 结论

水稻生长季中土气界面 CO₂ 排放通量的季节变化主要受土壤表面水深度的驱动。水稻植气界面 CO₂ 的排放通量与水稻根系的季节变化规律基本一致。大气 CO₂ 浓度升高和较高的施氮量对土气和植气界面 CO₂ 的排放均没有显著影响。但大气 CO₂ 浓度升高有降低土气和植气界面 CO₂ 排放的趋势。较高的施氮量明显增加地上部分生物量, 促进植气界面 CO₂ 的排放。在未来大气 CO₂ 升高的环境下, 稻田生态系统能在一定程度上增加 CO₂ 的固定量 (生物量) 和减少 CO₂ 的排放量 (土气和植气界面 CO₂ 的排放), 可能发挥着碳汇的作用。

参考文献:

- [1] Adair EC, Reich PB, Trost JJ, Hobbie SE. Elevated CO₂ stimulates grassland soil respiration by increasing carbon inputs rather than

by enhancing soil moisture. *Global Change Biology*, 2011, 17(12): 3 546-3 563

- [2] Leakey ADB, Xu FX, Gillespie KM, McGrath JM, Ainsworth EA, Ort DR. Genomic basis for stimulated respiration by plants growing under elevated carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3 597-3 602
- [3] Selsted MB, van der Linden L, Ibrom A, Michelsen A, Larsen KS, Pedersen JK, Mikkelsen TN, Pilegaard K, Beier C, Ambus P. Soil respiration is stimulated by elevated CO₂ and reduced by summer drought: three years of measurements in a multifactor ecosystem manipulation experiment in a temperate heathland (CLIMATE). *Global Change Biology*, 2012, 18(4): 1 216-1 230
- [4] Clark NM, Apple ME, Nowak RS. The effects of elevated CO₂ on root respiration rates of two Mojave Desert shrubs. *Global Change Biology*, 2010, 16(5): 1 566-1 575
- [5] Kou T, Zhu J, Xie Z, Hasegawa T, Heiduk K. Effect of elevated atmospheric CO₂ concentration on soil and root respiration in winter wheat by using a respiration partitioning chamber. *Plant and Soil*, 2007, 299(1/2): 237-249
- [6] Koizumi H, Kibe T, Mariko S, Ohtsuka T, Nakadai T, Mo W, Toda H, Seiichi N, Kobayashi K. Effect of free-air CO₂ enrichment (FACE) on CO₂ exchange at the flood-water surface in a rice paddy field. *New Phytologist*, 2001, 150(2): 231-239
- [7] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 寇太记, 刘钢, 曾青. 高 CO₂ 浓度对稻田 CO₂ 排放影响的初步分析. *农艺科学*, 2007, 23(1): 176-184
- [8] Zhao GY, Liu JS, Wang Y, Dou JX, Dong XY. Effects of elevated CO₂ concentration and nitrogen supply on biomass and active carbon of freshwater marsh after two growing seasons in Sanjiang Plain, Northeast China. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(10): 1 393-1 399
- [9] Pang J, Zhu JG, Xie ZB, Liu G, Zhang YL, Chen GP, Zeng Q, Cheng L. A new explanation of the N concentration decrease in tissues of rice (*Oryza sativa* L.) exposed to elevated atmospheric pCO₂. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 57(1/2): 98-105
- [10] Baker JT, Laugel F, Boote KJ, Allen LH Jr. Effects of daytime carbon dioxide concentration on dark respiration in rice. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(2): 231-239
- [11] Higuchi T, Yoda K, Tensho K. Further evidence for gaseous CO₂ transport in relation to root uptake of CO₂ in rice plant. *Soil Science & Plant Nutrition*, 1984, 30(2): 125-136
- [12] Xu Z, Zheng X, Wang Y, Wang Y, Huang Y, Zhu J. Effect of free-air atmospheric CO₂ enrichment on dark respiration of rice

- plants (*Oryza sativa* L.). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 115(1/4): 105–112
- [13] 刘钢, 韩勇, 朱建国, 冈田益己, 中村浩史, 吉本真由美. 稻麦轮作 FACE 系统平台 I. 系统结构与控制. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1 253–1 258
- [14] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 郑循华, 王跃思. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素. *环境科学学报*, 2003, 23(6): 758–764
- [15] Yang LX, Liu HJ, Wang YX, Zhu JG, Huang JY, Liu G, Dong GC, Wang YL. Impact of elevated CO₂ concentration on inter-subspecific hybrid rice cultivar Liangyoupeijiu under fully open-air field conditions. *Field Crops Research*, 2009, 112(1): 7–15
- [16] Ma H, Zhu J, Xie Z, Liu G, Zeng Q, Han Y. Responses of rice and winter wheat to free-air CO₂ enrichment (China FACE) at rice/wheat rotation system. *Plant and Soil*, 2007, 294(1/2): 137–146
- [17] Feng YZ, Lin XG, Wang YM, Zhang J, Mao TT, Yin R, Zhu JG. Free-air CO₂ enrichment (FACE) enhances the biodiversity of purple phototrophic bacteria in flooded paddy soil. *Plant and Soil*, 2009, 324(1/2): 317–328
- [18] Li Z, Yagi K. Rice root-derived carbon input and its effect on decomposition of old soil carbon pool under elevated CO₂. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(12): 1 967–1 973

CO₂ Emission in Response to Atmospheric CO₂ Enrichment in a Rice Paddy Field

SUN Hui-feng^{1,2}, ZHU Jian-guo¹, XIE Zu-bin¹, LIU Gang¹, LIN Xing-wu¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A static opaque sampling-gas chromatograph measuring method was used to investigate the effect of elevated CO₂ on soil CO₂ emission through soil-atmosphere (SA) and plant-atmosphere (PA) interfaces in rice growing season under FACE system. Through entire rice growing season, soil CO₂ flux through SA interface exponentially correlated with the water depth on soil surface and peaked in the periods of mid-season and pre-harvest drainages, whereas soil CO₂ through PA interface related to rice root biomass. Elevated CO₂ (ambient CO₂ + 200 μmol/mol) had a potential to increase rice biomass and decrease soil CO₂ emission through SA and PA interfaces under low-nitrogen (N 125 kg/hm²) and normal-nitrogen (N 250 kg/hm²) levels. Higher nitrogen supply significantly enhanced rice aboveground biomass at jointing, heading and maturity stages, which promoted CO₂ emission through PA interface. The results indicated that the rice paddy ecosystem probably plays a carbon sink role as a result of an increase in CO₂ fixation by enhancing rice biomass and a decrease in CO₂ emission through SA and PA interfaces under elevated CO₂ condition.

Key words: Atmospheric CO₂ enrichment, Rice paddy field, CO₂ emission through soil-atmosphere interface, CO₂ emission through plant-atmosphere interface