

冬小麦旺盛生长期间 CO₂ 浓度升高对根际呼吸的影响

寇太记^{1,2}, 朱建国^{1,*}, 谢祖彬¹, 刘 钢¹, 曾 青¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室 南京 210008 2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 依托 FACE (free air carbon dioxide enrichment) 技术平台, 利用阻断根法, 采用 LI6400 红外气体分析仪 (IRGA)-田间原位测定的方法, 研究了大气 CO₂ 浓度升高和不同氮肥水平对水稻/小麦轮作制中冬小麦旺盛生长期间根际呼吸的影响。结果表明, 在整个测定期间, 大气 CO₂ 浓度升高增强了根际呼吸速率, 提高了根际呼吸排放量。在高 N 和低 N 处理中, 高 CO₂ 浓度下的根际呼吸总排放量分别比 Ambient 极显著增加 117.0% 和 90.8%。根际呼吸速率在孕穗初期达到最大值, 使根际呼吸在土壤呼吸中的比重由 24.5% (N) ~ 26.7 (HN) 提高到 39.8% (N) ~ 47.1% (HN)。CO₂ 浓度升高与氮肥用量对根际呼吸产生交互效应。表明大气 CO₂ 浓度升高将加快土壤向大气的 CO₂ 排放, 结果将有助于评价未来高 CO₂ 浓度背景下农田生态系统土壤碳的固定潜力。

关键词 CO₂ 浓度升高; 冬小麦; 根际呼吸; 生育阶段

文章编号 1000-0933 (2007)04-1420-08 中图分类号 Q143 文献标识码 A

Effect of elevated atmospheric pCO₂ on rhizospheric respiration during the wheat growth period from 106 — 183 days after germination

KOU Tai-Ji^{1,2}, ZHU Jian-Gou^{1,*}, XIE Zu-Bin¹, LIU Gang¹, ZENG Qing¹

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

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (4): 1420 ~ 1427.

Abstract A Free-Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) system and root-isolation methods were used to study the effects of elevated atmospheric pCO₂ and nitrogen fertilisation on rhizospheric and soil respiration, determined by in situ IRGA (LI6400) measurements, during the growth of wheat (*Triticum aestivum* L. cv Yangmai 14) between 106 and 183 days after germination in a wheat/rice rotation system. The results showed that elevated atmospheric pCO₂ increased rhizospheric respiration rate and cumulative CO₂ emissions during the experimental period. Under high nitrogen fertilisation (HN) and low nitrogen fertilisation (LN) treatments, elevated atmospheric pCO₂ increased cumulative rhizospheric respiration by 117.0% and 90.8%, respectively. The proportion of cumulative rhizospheric respiration to cumulative soil respiration increased from 24.5% to 39.8% (LN) and 26.7% to 47.1% (HN). While nitrogen fertilisation did not significantly influence rhizospheric respiration, the interaction of elevated atmospheric pCO₂ and nitrogen fertilisation significantly

基金项目 国家“973”资助项目 (CDMCTE-2002CB412502) 中国科学院知识创新重要方向资助项目 (KZCX3-SW-440) 国家自然科学基金资助项目 (40231003, 40110817, 40571157, 30470334)

收稿日期 2006-05-12; **修订日期** 2006-11-28

作者简介 寇太记 (1975 ~), 男, 河南延津人, 博士生, 主要从事土壤化学与环境保护及碳循环研究. E-mail: tjkou@issas.ac.cn

* **通讯作者**: Corresponding author. E-mail: jgzhu@mail.issas.ac.cn

Foundation item This work was financially supported by State 973 Project (CDMCTE-2002CB412502), The Project of Knowledge Innovation Program of CAS (No. KZCX3-SW-440, KZCX2-SW-133), National Natural Science Foundation of China (No. 40231003, 40110817, 40571157, 30470334)

Received date 2006-05-12; **Accepted date** 2006-11-28

Biography: KOU Tai-Ji, Ph. D. candidate, mainly engaged in soil chemistry, environment protection and carbon cycling. E-mail: tjkou@issas.ac.cn

increased rhizospheric respiration. The increase in rhizospheric and soil respiration under conditions of elevated atmospheric pCO₂ indicates that, under future higher CO₂ scenarios, C exchange between the atmosphere and soil will increase in arable ecosystems.

Key Words : elevated atmospheric pCO₂ ; winter wheat ; rhizospheric respiration ; growth stage

自从工业革命以来,大气 CO₂ 浓度持续升高已是不争的事实^[1]。CO₂ 浓度升高对生态系统的影响,已引起各国政府及科学家的关注^[1],科学工作者做了大量的研究,以期评价预测其影响程度。土壤呼吸是全球碳循环的一个重要组成部分^[1],是土壤碳库的主要输出途径和大气 CO₂ 重要的源^[1],已成为全球碳循环研究热点问题之一^[1]。根际呼吸是植物生态系统中土壤呼吸的重要组成部分,是植物根系呼吸释放的 CO₂ 与微生物分解有机物质释放的 CO₂ 的总和。根际呼吸是陆地生态系统土-气界面碳交换的重要途径,它的研究将有助于揭示评价植物生长对土壤呼吸和碳循环的影响。国外关于大气 CO₂ 浓度升高对植物生态系统产生的影响已有大量研究^[1],多集中在森林、草地生态系统。农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,与森林生态系统和草地生态系统相比,受人为活动和环境变化的影响更为强烈。水稻-小麦轮作农田生态系统是我国重要农田生态系统,也是国际典型农田生态系统。开展大气 CO₂ 浓度升高对稻-麦轮作农田生态系统根际呼吸的影响将有助于阐明农作物对大气 CO₂ 浓度升高的反馈作用。农田生态系统中根际呼吸受植物类型、生长状况和植物生长阶段的共同影响,其变化动态是这种影响的综合体现。为了研究大气 CO₂ 浓度升高对根际呼吸的影响,本文利用红外气体分析仪 (RGA)^[1]-田间原位测定方法和阻断根法^[8,9],结合中国 FACE (Free Air CO₂ Enrichment) 技术平台,从冬小麦返青到灌浆结束期间,对长期水稻-小麦轮作农田生态系统的土壤呼吸 (包括小麦根系自养呼吸和微生物异养呼吸) 和基础土壤呼吸 (仅包括微生物异养呼吸) 进行测定,研究根际呼吸对大气 CO₂ 浓度升高的响应及对土壤呼吸的贡献,为预测未来大气环境条件下根际呼吸的变化及其对水稻-小麦轮作农田生态系统碳循环的可能影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

稻麦轮作 FACE 系统平台位于江苏省江都市马陵良种场 (19°42'0"E, 32°35'5")。平台运行系统已有详述^[10]。土壤类型为水耕人为土,年均降水量 980 mm 左右,年均蒸发量 >1100 mm,年平均温度 14.9 °C,年日照时间 >2100 h,年无霜期 220 d,耕作方式为水稻-冬小麦轮作。土壤理化性质为:有机碳 18.4 g/kg,全 N 1.45 g·kg⁻¹,全 P 0.63 g/kg,全 K 14.0 g/kg,速效 P 10.1 mg/kg,速效 K 70.5 mg/kg,砂粒 (φ ~ 0.02 mm) 578.4 g/kg,粉粒 (φ.02 ~ 0.002 mm) 285.1 g/kg,粘粒 (< 0.002 mm) 136.5 g/kg,容重 1.16 g/cm³,pH 7.2。

1.2 田间试验设计

1.2.1 处理设置

试验采用裂区设计,CO₂ 浓度为主处理,N 肥处理为副处理。CO₂ 浓度分 FACE (Ambient + 200 μmol/mol CO₂) 和 Ambient (正常大气 CO₂ 浓度),氮肥分 HN (25 kg/hm²) 和 LN (25.5 kg/hm²),共 FACE-HN (FHN),FACE-LN (FLN),Ambient-HN (AHN),Ambient-LN (ALN) 4 个处理,3 次重复,磷肥 (P₂O₅) 和钾肥 (K₂O) 施用量各 75 kg/hm²。氮肥为尿素,磷、钾肥为复混肥。磷钾肥在小麦播种前 2 d 作基肥一次施入、氮肥分别按基肥、拔节肥 (播种后 113 d) 和孕穗肥 (播种后 146 d) 施用,施用量分别为总量的 50%、10% 和 40%。每个圈每个处理内随机选择长期固定监测点各 3 个,测定总土壤呼吸和基础土壤呼吸,共计 36 个点位。

1.2.2 测定点位布置

在刚播种小麦的田间,分别在 FHN, FLN, AHN 和 ALN 处理中,把用 PVC 材料制成的高 4cm、内直径为 12.0cm 的塑料环垂直压入作物行间土中 3cm,露出地面 1cm (不影响根系在土壤中的生长和穿透),用来测定土壤呼吸,同时用不锈钢制成高 20cm、内直径为 12.0cm 上下开口的圆环,紧贴塑料环垂直砸入土中,露出

地表 1cm,因根系很难透过距土表约 15cm 的犁底层,钢环内土壤不受根系干扰,用来测定基础土壤呼吸,类似方法见文献 [1]。

1.2.3 测定时间与测定方法

冬小麦于 2004 年 11 月 4 日播种 (杨麦-14),11 月 11 日出苗,行距 20cm,225 万株/hm²。由于冬小麦经过越冬期后,从返青期开始 (出苗后第 106 天)到灌浆期结束 (出苗后第 183 天),作物生长旺盛,此期间的根际呼吸能最大程度地反馈养分 (氮素)、CO₂ 浓度差异对植物地下部分及土壤碳的综合影响,故在此期间进行测定。这期间小麦经历了返青-拔节期 (06~147 d)、孕穗-抽穗期 (47~162 d)、开花-灌浆期 (62~183 d)3 个主要生育阶段。土壤呼吸用便携式红外气体分析仪 (LI6400-09,LI-COR, Inc.) 田间原位测定。测定时将连着分析仪的集气室套于塑料环或不锈钢环,确定密闭良好和仪器设定无误的情况后开始测定,同时用直接与仪器相连的温度探针测定土壤 10cm 处的土温。其中在第 136~162 天间,每 5 d 测 1 次,其它时间每 10 d 测 1 次 (降雨顺延),每次测定均在 9:00~11:30 内进行。并在出苗后第 130~131 天与第 165~166 天两次测定日变化,根据日变化曲线求出 9:00~11:30 时段的呼吸速率与日平均排放速率的关系,然后再对数据进行校正。

1.3 数据收集与分析方法

(一) 根际呼吸速率

利用 Holt 等 [1] 的方法求得：
$$R_{rh} = R_{total} - R_{root-free}$$
式中, R_{rh} 根际呼吸速率; R_{total} 土壤呼吸速率; $R_{root-free}$ 基础土壤呼吸速率 [1]。

(二) 累积土壤呼吸或累积根际呼吸总量：

$$M = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(F_{i+1} + F_i)}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \times 3600 \times 10^{-6} \right]$$

式中, M 为累积土壤呼吸或累积根际呼吸 CO₂ 排放总量 (mol/m²); F 为日均土壤呼吸或根际呼吸排放速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; n 为采样次数; t 为采样时间即出苗后天数 (d)。

各生育阶段根际呼吸总量按 (一) 和 (二) 进行计算

数据通过 SPSS 11.5 统计软件,采用 Multivariate- F -检验和 LSD 方法对不同大气 CO₂ 浓度和 N 肥处理的效应及其交互作用进行统计分析。

2 结果

2.1 大气 CO₂ 浓度对日均根际呼吸排放速率和累积排放量的影响

小麦从出苗后第 106~183 天,日均气温从 2.9℃ 迅速升高到 22.6℃,小麦处于整个生长季生长最旺盛时期即返青期-灌浆成熟期。测定期间各处理的日均根际呼吸速率具有明显的动态变化 (图 1),FHN、FLN、AHN 和 ALN 处理的日均最大根际呼吸速率分别达到 2.53、2.15、2.00 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 1.60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,FHN 和 FLN 处理的日均最大根际呼吸速率分别比 AHN 和 ALN 处理显著增加 26.5% ($p < 0.05$) 和 34.4% ($p < 0.05$) (图 1)。不同处理在测定期间根际呼吸排放速率大致为 FHN > FLN > AHN > ALN,FACE 环境两处理的根际呼吸排放速率基本上均高于 Ambient 环境的两处理 (图 1)。

从出苗后第 126~147 天,随着小麦生长发育,各处理日均根际呼吸速率逐渐增加,并在第 147 天左右 (孕穗-抽穗期) 达到最大值;从出苗后第 147 天开始,各处理

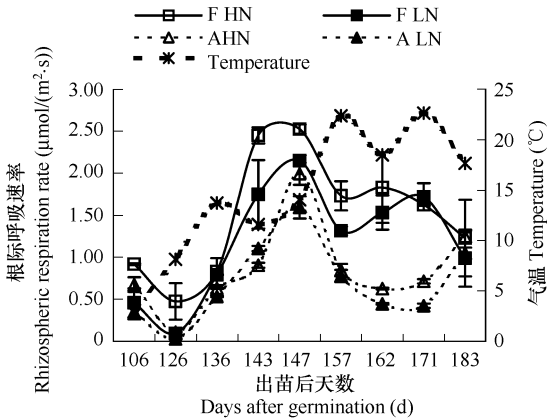


图 1 小麦旺盛生长期日均根际呼吸速率动态变化
Fig. 1 Dynamics of mean daily rhizospheric respiration rate from returning green to late of filling period

理的日均根际呼吸速率逐渐下降(图 1)。在第 171 ~ 183 天(灌浆期后期)期间,FACE 环境中的处理和 Ambient 环境对应处理间的根际呼吸的变化趋势出现明显差异,FACE 环境中各处理的根际呼吸呈下降趋势,而 Ambient 环境中根际呼吸则相对较强。

不同发育阶段影响根际呼吸的作物生长、根系数量和功能及养分供应情况等诸因素差异,造成根际呼吸速率也产生变异^[1]。FHN、AHN、FLN 和 ALN 各处理在返青-拔节、孕穗-抽穗和开花-灌浆 3 个生长阶段平均累积根际呼吸排放的 CO₂ 量分别约为 2.80、1.29、2.15 mol/m² 和 1.13 mol/m²。不同处理的根际呼吸在各生长阶段排放不同,FHN 处理的累积根际呼吸排放量在各阶段均最大,且排放量在各阶段间变异不大,表现为返青拔节期 > 孕穗抽穗期 > 开花灌浆期,FLN 处理表现为开花灌浆期 > 孕穗抽穗期 > 返青拔节期,而 AHN 和 ALN 处理的最大释放阶段为返青拔节期,各阶段排放量依次为返青拔节期 > 开花灌浆期 > 孕穗抽穗期(表 1)。4 个处理累积根际呼吸 CO₂ 排放量在各阶段均为 FHN > FLN > AHN > ALN 处理(表 1)。整个测定期间 FHN 和 FLN 处理的累积根际呼吸 CO₂ 排放量分别比 AHN 和 ALN 处理极显著增加 117.0% ($p < 0.01$) 和 90.8% ($p < 0.01$)(表 2)。

表 1 不同生育阶段根际呼吸累积 CO ₂ 排放量						
Table 1 Cumulative CO ₂ emissions from rhizospheric respiration during different growth stages						
处理 Treatment	各期累积根际呼吸排放总量 Cumulative rhizospheric respiration in each stage (mol/m ²)			各期累积根际呼吸占总累积根际呼吸比例 Cumulative rhizospheric respiration in each stage over that from 106 to 183 days after germination (%)		
	返青拔节期 Returning green- Jointing stage	孕穗抽穗期 Booting- heading stage	开花灌浆期 Flowering- Filling stage	返青拔节期 Returning green- Jointing stage	孕穗抽穗期 Booting- heading stage	开花灌浆期 Flowering- Filling stage
FHN	2.84 ± 0.27a	2.82 ± 0.89a	2.76 ± 0.52a	33.73 ± 2.12	33.49 ± 1.70	32.78 ± 2.41
AHN	1.53 ± 0.24bc	1.10 ± 0.13bc	1.25 ± 0.22c	39.43 ± 0.55	28.35 ± 2.31	32.22 ± 0.50
FLN	1.81 ± 0.57ab	2.07 ± 0.07ab	2.57 ± 0.10ab	28.06 ± 1.04	32.09 ± 0.31	39.85 ± 0.18
ALN	1.25 ± 0.39bc	1.02 ± 0.12bc	1.11 ± 0.32c	36.98 ± 1.11	30.18 ± 0.34	32.84 ± 1.09

数值为 mean ± se The number is mean ± se ;同一列不同字母代表 0.05 水平的差异显著 Different letters in the same column show significant difference at the level of 0.05 ;下同 the same below

2.2 施氮水平对日均根际呼吸排放动态的影响

氮素为作物生长的必须营养元素之一,施氮水平差异对根际呼吸有明显的影响。在同一 CO₂ 浓度环境中,HN 处理日均根际呼吸速率高于 LN 处理(图 1)。FHN 处理的日均最大根际呼吸速率比 FLN 处理显著增大 17.7% ($p < 0.05$),AHN 处理比 ALN 处理显著增大 25.0% ($p < 0.05$)(图 1),说明施高氮量的处理促进了作物的根际呼吸。

同一 CO₂ 浓度环境中,高施氮量处理在 3 个阶段内根际呼吸排放的 CO₂ 量均高于低施氮量处理,其中 FHN 处理的排放量在不同生长阶段约是 FLN 处理的 1.07 ~ 1.57 倍,AHN 处理是 ALN 处理的 1.07 ~ 1.22 倍(表 1)。同一环境中,FHN 处理的总排放量比 FLN 处理增加 30.5% ($p = 0.053$),AHN 处理比 ALN 处理增加 14.8% ($p = 0.107$)(表 2)。

2.3 CO₂ 浓度和施氮水平对日均根际呼吸的综合影响

结果显示 HN 和 LN 处理的根际呼吸在 FACE 环境中的差异基本上较 Ambient 环境下的差异大,说明 CO₂ 浓度和施氮水平对作物的根际呼吸产生交互效应(图 1,表 1 和表 2)。在孕穗抽穗阶段,CO₂ 浓度与施 N 水平

表 2 小麦出苗后第 106 ~ 183 天生长期期间根际和土壤呼吸累积排放 CO₂ 总量

Table 2 Cumulative rhizospheric and soil respiration during 106 ~ 183 days after germination			
处理 Treatment	土壤呼吸总量 Cumulative soil respiration (mol/m ²)	根际呼吸总量 Cumulative rhizospheric respiration (mol/m ²)	R (%)
FHN	17.86 ± 1.17a	8.42 ± 1.28a	47.1
AHN	14.52 ± 0.61bc	3.88 ± 0.44bc	26.7
FLN	16.22 ± 0.32ab	6.45 ± 0.55ab	39.8
ALN	13.82 ± 0.38c	3.38 ± 0.35c	24.5

R 是累积根系呼吸量/累积土壤呼吸总量 R is ratio of cumulative rhizospheric respiration to cumulative soil respiration

对该阶段的日均根际呼吸速率产生了显著的交互效应 ($P < 0.05$),高 CO_2 浓度,HN 处理促进了根际呼吸 CO_2 的排放 (图 1)。

CO_2 浓度与施氮水平两因素对测定期间根际呼吸排放量影响的统计分析见表 3。在 3 个不同的生长阶段, CO_2 浓度与施氮水平对根际呼吸排放量的影响不同。因素分析表明, CO_2 浓度显著或极显著的影响返青拔节期 ($P < 0.05$)、孕穗抽穗期 ($P < 0.05$)、开花灌浆期 ($P < 0.01$) 的根际呼吸累积排放量,施氮水平对不同生长阶段的根际呼吸排放量的影响均未达到显著水平;且 CO_2 与 N 处理的交互效应也未达到显著水平。并且 CO_2 浓度因素极显著的影响整个测定期间的累积根际呼吸排放量 ($P < 0.01$),但氮水平因素的影响在统计上未达到显著水平 ($P = 0.105$)。FHN 与 AHN 处理间根际呼吸排放的 CO_2 总量的差值比 FLN 与 ALN 处理的差值高 47.9%,通过因素分析表明, CO_2 和 N 处理的交互效应显著的影响整个测定期间的根际呼吸排放总量 ($P = 0.045$)。

表 3 CO_2 浓度与施氮水平对根际呼吸累积排放量影响的统计检验

Table 3 Statistical analysis on the effect of CO_2 concentration and nitrogen level on cumulative rhizospheric respiration						
累积排放量 Cumulative CO_2 emission	pCO_2		N		$\text{pCO}_2 \times \text{N}$	
	<i>F</i>	sig.	<i>F</i>	sig.	<i>F</i>	sig.
返青拔节期 Returning green-Jointing stage	7.757	0.043	0.289	0.605	0.259	0.625
孕穗抽穗 Booting-heading stage	10.295	0.016	0.024	0.881	0.017	0.899
开花灌浆 Flowering-Filling stage	21.964	0.002	0.585	0.466	1.087	0.328
总排放量 Cumulative CO_2 emission	27.391	0.001	3.318	0.105	7.558	0.045

2.4 根际呼吸 CO_2 排放总量对土壤呼吸总排放量的贡献

根际呼吸是植物根系呼吸和根系衍生的异养呼吸之和,而光合作用固定的相当大的一部分 C 通过根际呼吸而损失掉^[2],根际呼吸可以占同化碳的 10% ~ 40%^[3]。作物生长阶段不同,FHN、AHN、FLN 和 ALN 各处理在各阶段根际呼吸的累积排放量所占测定期间 (06 ~ 183 d) 总根际呼吸的比例也不同 (表 1),FHN、AHN、ALN 均在返青拔节期阶段对整个测定期间根际呼吸的贡献最大,而 FLN 在开花灌浆期贡献最大。

大气 CO_2 浓度升高极显著的增加累积土壤呼吸 CO_2 排放 ($P = 0.01$)。整个测定期间各处理的根际呼吸累积量占土壤呼吸排放的 CO_2 总量的贡献率在 24.5% ~ 47.1% 之间,FHN 处理根际呼吸对总土壤呼吸贡献率最高,而 ALN 处理最低。大气 CO_2 浓度升高极显著增加了根际呼吸在土壤呼吸中的贡献 ($P = 0.001$),FHN、FLN 处理的根际呼吸量占总土壤呼吸量的比例分别比 AHN、ALN 处理高 20.4%、15.3% (表 2);同时高 N 也有增加根际呼吸在土壤呼吸中贡献的趋势,但统计不显著 ($P = 0.221$)。各处理的贡献率大小依次为 FHN > FLN > AHN > ALN (见表 2)。

3 讨论

全球气候变暖对全球碳循环的影响是研究的热点问题^[1,14],本文通过研究冬小麦旺盛生长期根际呼吸对 FACE 的响应及对土壤呼吸的贡献,来预测未来气候条件对农田生态系统碳循环的可能影响。通常根际呼吸受作物品种、生长阶段、环境条件及营养水平的影响^[1],环境条件和营养水平通过影响作物和根系生长,以及根际微生物数量和活性而影响根际呼吸。本研究表明大气 CO_2 浓度升高促进根际呼吸,同时 HN 营养也提高根际呼吸 (图 1,表 1)。由于 CO_2 是光合原料,大气 CO_2 浓度升高的施肥效应促进了水稻、小麦的光合作用,提高地上部生物量^[5,15~17],增加根系生物量^[5,18,19]。前茬水稻根系及地上部分生物量的增加,使输入麦季土壤的碳增加;另外,高 CO_2 浓度通过促进小麦光合作用,增加光合产物而使更多的碳水化合物输入地下^[9],使微生物有更多的能源底物,促进微生物的生长和活性^[20],最终促进了土壤异养呼吸。根系生物量的增加和根系活性的增强^[9],使根系呼吸增加^[1]。因此,高 CO_2 浓度环境中根际微生物活性增强^[20]和根系呼吸^[1]的增加共同促进了根际呼吸碳损失^[4],并导致土壤呼吸增加 (表 2)。Pandall 等^[1]和 Soe 等^[2]也观测到大气 CO_2

浓度升高增加了小麦和甜菜的土壤呼吸。Zak 等^[3]认为 FACE 条件下激发呼吸的过程是高 CO₂ 浓度对植物生理学过程影响的结果。

作物生长和土壤根际呼吸受环境温度、水分等影响。出苗后第 106 ~ 126 天小麦处于返青拔节期,日平均气温 < 10℃ (图 1),连日的阴雨天气导致土壤水分过饱和 (田间观察到地表滞水现象),可能这是导致第 106 ~ 126 天所有处理根际呼吸下降的原因,Raich and Potter^[4]就发现当土壤滞水时将抑制呼吸。从出苗后第 126 ~ 147 天,随着温度的升高,土壤根际呼吸增加 (图 1)。首先小麦出苗后第 126 ~ 147 天,小麦处于快速营养生长和物质积累阶段,根系生长加快,使根系呼吸增加,同时微生物活性增强,繁殖加快,促进了土壤有机碳的分解,使微生物异养呼吸增加。小麦出苗后第 147 ~ 171 天,根际呼吸逐渐降低 (图 1)。这可能有以下几方面原因: () 随着微生物对土壤有机碳的分解,土壤中易分解的碳逐渐减少,使土壤微生物异养呼吸降低^①; () 小麦出苗后第 147 ~ 171 天,小麦处于孕穗-灌浆阶段,生长中心由营养生长向生殖生长转移,且生殖生长逐渐占主导地位,根系作为重要的营养器官功能逐渐减弱,导致小麦根系呼吸下降,但还有待于研究。在灌浆后期 (出苗后第 171 ~ 183 天),FACE 环境中的根际呼吸呈下降趋势,而 Ambient 环境则相对较强,分析认为由于高 CO₂ 浓度环境促进作物早熟^[5,17],根系衰老提前,根系功能的下降及其分泌物减少降低了根际呼吸,导致作物生长后期根系功能 (如呼吸速率) 与对照产生差异。

在相同大气 CO₂ 浓度环境下,高施氮量处理比低施氮量处理根际呼吸排放量和对土壤呼吸的贡献率均增加 (表 1)。高施氮量处理在 3 个阶段内根际排放的 CO₂ 量均高于低施氮量处理,且在各生长阶段的分配也不同,杨兰芳在玉米、大豆的盆栽试验中也发现了同样的规律^②。氮肥是作物生长的必须营养元素,高 N 促进土壤根际呼吸主要与 N 肥促进作物的生长有关。相比低施 N 量,高施 N 量促进了植物生长和增加了根系活性^[9],导致根系呼吸增加,较多的碳水化合物输入地下促进了根际微生物呼吸。然而氮处理对不同生长阶段和整个测定期间的根际呼吸排放量均未达到显著影响水平 (表 3),表明施氮水平不是影响根际呼吸的主要因素。Soe 等^[2]甜菜的 FACE 试验结果同样表明施用 N 肥对土壤呼吸没有显著影响。

大气 CO₂ 浓度升高增加了 FACE 环境根际呼吸对土壤呼吸的贡献率 (表 2)。Hanson 等^[5]综述认为各种植物的根际呼吸对总土壤呼吸贡献在 10% ~ 90% 间,因植物种类和生长季节而异,本研究结果 (表 2) 与其一致,但低于近年报道的禾谷类和草类的根际呼吸占土壤呼吸 51% ~ 89%^[1,22,26] 的比例,可能同研究的植物种类、生长季节、土壤类型和测定方法等有关。

总之,大气 CO₂ 浓度增加,通过促进根际呼吸和土壤呼吸排放,而加快了土-气界面的 CO₂-C 交换。然而由于根际碳输入与输出的关系难以确定,也缺乏根系自养呼吸的数据,无法准确判定当季作物对农田土壤碳库盈亏的影响。此研究仅为阶段性成果,今后除长期观测根际呼吸和土壤呼吸外,还将深入研究作物光合作用和根际呼吸的关系,光合产物输入量及其在地下的分配,根系呼吸等,并结合预测模型,来确切评价 CO₂ 浓度升高对农田生态系统碳循环的影响。

4 小结

- 4.1 CO₂ 浓度升高促进了 HN 和 LN 处理的根际呼吸排放,显著增加最大日均根际呼吸速率。整个测定期间,高 CO₂ 浓度环境下,高施氮量和低施氮量处理的根际呼吸总排放量比 Ambient 的分别极显著增加约 117.0% 和 90.8%。
- 4.2 小麦根际呼吸的累积排放在不同生长阶段分配不同。CO₂ 浓度升高降低了返青-拔节期根际呼吸在整个测定期间的分配,而增加了在孕穗-抽穗期和开花-灌浆末期的分配。
- 4.3 增加氮肥施用量对根际呼吸影响不显著,说明施 N 水平不是影响根际呼吸的主要因素,但 CO₂ 浓度升高与施氮水平对根际呼吸产生交互效应。根际呼吸占土壤呼吸的比例在 24.5% ~ 47.1%,高 CO₂ 浓度和高施氮

① 黄文昭. 土壤碳库对外源有机物料输入响应. 重庆: 西南大学. 2006,17 ~ 21.
② 杨兰芳. 植物生长对土壤碳循环和 N₂O 排放的影响. 南京: 中国科学院南京土壤所. 2004,41 ~ 81.

量处理均增加了根际呼吸在土壤呼吸中的比重。

4.4 高 CO₂ 浓度促进土壤呼吸和根际呼吸排放,表明大气 CO₂ 浓度升高在增加作物对碳吸收同化的同时,也加快了土壤向大气的 CO₂ 排放,说明在未来高 CO₂ 浓度条件下,土-气界面的碳交换将加快。

References :

[1] Moor B. Internation geosphere-biosphere program :A study of global change, some reflections. IGBP Global Change Newsletter, 1999, 40 :1 – 3.

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2001-Synthesis Reports :Third Assessment Report of the Intergovernm- ental Panel on Climate Change. New York :Cambridge University Press, 2001. 225 – 237.

[3] Bernstson G M, Bazzaz F A. Belowground positive and negative feedbacks on CO₂ growth enhancement. Plant and Soil, 1996, 187 :277 – 288.

[4] Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature’s effects on soil respiration in the global scale. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17 (5) 469 – 476.

[5] Ainsworth E A, Long S P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE) ?A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. New Phytologist, 2005, 165 351 – 372.

[6] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration :correlations and controls. Biogeochemistry, 2000, 48, 71 – 90.

[7] Qi Z Y, Wang H Y, Wang J L, et al. The development on the research of terrestrial ecosystem soil respiration. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2003,19 (1) 116 – 119.

[8] Holt J A, Hodgen M J, Lamb D. Soil respiration in the seasonally dry tropics near Townsville, North Queensland. Australian Journal of Soil Research, 1990, 28 737 – 745.

[9] Owensby C E, Auen L M, Coyne P I. Biomass production in a nitrogen-fertilized, tall grass prairie ecosystem exposed to ambient and elevated levels of CO₂. Plant Soil,1994, 165 105 – 114.

[10] Liu G, Han Y, Zhu J G, et al. Rice wheat rotational FACE platform I . system structure and control. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002,13 (10) 1253 – 1258.

[11] Liu S H, Fang J Y, MakotoKiyota. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China. Acta Phytocological Sinica,1998,22 (1) : 119 – 126.

[12] Rochette P, Flanagan L B. Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61 (1) :466 – 474.

[13] Warembourg F R, Estelrich H D. Towards a better understanding of carbon flow in the rhizosphere a time-dependent approach using carbon-14. Biology and Fertility of Soils, 2000, 30 528 – 534.

[14] Chao Y S, Li Z A, Jiang Y Q, et al. A review of soil respiration of terrestrial ecosystems. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2004, 26 (1) 138 – 143.

[15] Ma H L, Zhu J G, Xie Z B, et al. Effects of Free-air Carbon Dioxide Enrichment on Growth and Uptake of Nitrogen in Winter Wheat. Acta Agronomica Sinica, 2005,31 (2) :1634 – 1639.

[16] Xie Z B, Zhu J G, Zhang Y L, et al. Responses of rice (Oryza sativa) growth and its C, N and P composition to FACE (Free-Air Carbon Dioxide Enrichment) and N, P fertilization. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002,13 (10) :1223 – 1230.

[17] Kimball B A, Zhu J G, Cheng L, et al. Responses of agricultural crops to free air CO₂ enrichment. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (10) 1323 – 1338.

[18] Chen G P, Zhu J G, Xie Z B, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment on root morphology of rice. Ecology and Environment, 2005,14 (4) :503 – 507.

[19] Rogers H H, Runion G B, Krupa S V. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. Environment Pollution, 1994, 83 :155 – 189.

[20] Williams M A, Rice C W, Owensby C E. Carbon dynamics and microbial activity in tallgrass prairie exposed to elevated CO₂ for 8 years. Plant Soil, 2000, 227 127 – 137.

[21] Pendall E, Leavitt, S W, Brooks T, et al. Elevated CO₂ stimulates soil respiration in a FACE wheat field. Basic Applied Ecology, 2001, 2 :193 – 201.

[22] Soe A R B, Giesemann A, Anderson T H, et al. Soil respiration under elevated CO₂ and its partitioning into recently assimilated and older carbon sources. Plant and Soil, 2004, 262 :85 – 94.

[23] Zak D R R, Pregitzer K S, Curtis P S, et al. Elevated atmospheric CO₂ and feedback between carbon and nitrogen cycles. Plant and Soil, 1993, 151 105 – 117.

[4]

Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9 :23 – 36.

[5]

Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* Separating root soil microbial contributions to soil respiration :A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48 :115 – 146.

[6]

Domanski G, Kuzyakov Y, Siniakina S V, *et al.* Carbon flows in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne*) . *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2001, 164 :381 – 387.

参考文献：

[4]

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. *生态学报*, 1997, 17 (5) :469 ~ 476.

[7]

齐志勇,王宏燕,王江丽,等. 陆地生态系统土壤呼吸的研究进展. *农业系统科学与综合研究*, 2003, 19 (1) :116 ~ 119.

[0]

刘钢,韩勇,朱建国,等. 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 (0) :1253 ~ 1258.

[1]

刘绍辉,方精云,清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸. *植物生态学报*, 1998, 22 (1) :119 ~ 126.

[4]

曹裕松,李志安,江远清,等. 陆地生态系统土壤呼吸研究进展. *江西农业大学学报*, 2004, 26 (1) :138 ~ 143.

[5]

马红亮,朱建国,谢祖彬,等. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对冬小麦生长和 N 吸收的影响. *作物学报*, 2005, 31 (2) :1634 ~ 1639.

[6]

谢祖彬,朱建国,张雅丽,等. 水稻生长及其体内 C、N、P 组成对开放式空气 CO₂ 浓度增高和 N、P 施肥的响应. *应用生态学报*, 2002, 13 (0) :1223 ~ 1230.

[7]

Kimball B A,朱建国,程磊,等. 农作物对大气 CO₂ 浓度升高的响应. *应用生态学报*, 2002, 13 (0) :1323 ~ 1338.

[8]

陈改苹,朱建国,谢祖彬,等. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对水稻根系形态的影响. *生态环境*, 2005, 14 (4) :503 ~ 507.