

CO₂ 浓度升高和施氮条件下小麦根际呼吸对土壤呼吸的贡献*

寇太记^{1,2,*} 徐晓峰¹ 朱建国² 谢祖彬² 郭大勇¹ 苗艳芳¹

(¹河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003; ²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)

摘要 依托 FACE 技术平台, 采用稳定¹³C 同位素技术, 通过将小麦(C₃作物)种植于长期单作玉米(C₄作物)的土壤上, 研究了大气 CO₂ 浓度升高和不同氮肥水平对土壤排放 CO₂ 的 δ¹³C 值及根际呼吸的影响. 结果表明: 种植小麦后土壤排放 CO₂ 的 δ¹³C 值随作物生长逐渐降低, CO₂ 浓度升高 200 μmol · mol⁻¹ 显著降低了孕穗、抽穗期(施氮量为 250 kg · hm⁻², HN)与拔节、孕穗期(施氮量为 150 kg · hm⁻², LN)土壤排放 CO₂ 的 δ¹³C 值, 显著提高了孕穗、抽穗期的根际呼吸比例. 拔节至成熟期, 根际呼吸占土壤呼吸的比例在高 CO₂ 浓度下为 24% ~ 48% (HN) 和 21% ~ 48% (LN), 在正常 CO₂ 浓度下为 20% ~ 36% (HN) 和 19% ~ 32% (LN). 不同 CO₂ 浓度下土壤排放 CO₂ 的 δ¹³C 值和根际呼吸对氮肥增加的响应不同, CO₂ 浓度与氮肥用量在拔节期对根际呼吸的交互效应显著.

关键词 稳定同位素 生态系统 原有有机碳 生育阶段 FACE

文章编号 1001-9332(2011)10-2533-06 **中图分类号** S161; X171 **文献标识码** A

Contribution of wheat rhizosphere respiration to soil respiration under elevated atmospheric CO₂ and nitrogen application. KOU Tai-ji^{1,2}, XU Xiao-feng¹, ZHU Jian-guo², XIE Zu-bin², GUO Da-yong¹, MIAO Yan-fang¹ (¹College of Agronomy, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China; ²State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(10): 2533-2538.

Abstract: With the support of free-air carbon dioxide enrichment (FACE) system and by using isotope ¹³C technique, and through planting wheat (*Triticum aestivum* L., C₃ crop) on a soil having been planted with maize (*Zea mays* L., C₄ crop) for many years, this paper studied the effects of elevated atmospheric CO₂ and nitrogen application on the δ¹³C value of soil emitted CO₂ and the wheat rhizosphere respiration. With the growth of wheat, the δ¹³C value of soil emitted CO₂ had a gradual decrease. Elevated atmospheric CO₂ concentration (200 μmol · mol⁻¹) decreased the δ¹³C value of emitted CO₂ at booting and heading stages significantly when the nitrogen application rate was 250 kg · hm⁻² (HN), and at jointing and booting stages significantly when the nitrogen application rate was 150 kg · hm⁻² (LN). Nevertheless, the elevated atmospheric CO₂ promoted the proportions of wheat rhizosphere respiration to soil respiration at booting and heading stages significantly. From jointing stage to maturing stage, the proportions of wheat rhizosphere respiration to soil respiration were 24%–48% (HN) and 21%–48% (LN) under elevated atmospheric CO₂, and 20%–36% (HN) and 19%–32% (LN) under ambient atmospheric CO₂. Under both elevated and ambient atmospheric CO₂ concentrations, the δ¹³C value of emitted CO₂ and the rhizosphere respiration had different responses to the increased nitrogen application rate, and there was a significant interactive effect of atmospheric CO₂ concentration and nitrogen application rate on the wheat rhizosphere respiration at jointing stage.

Key words: stable isotope; ecosystem; pre-existing organic carbon; development stage; FACE.

* 国家自然科学基金项目(40231003, 41003030)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-440)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y052010030)和河南科技大学人才基金项目(09001266)资助.

* * 通讯作者. E-mail: tjkou@yahoo.com.cn

2011-03-14 收稿, 2011-07-28 接受.

陆地土壤是地球表面最大的碳库,有机碳储量约为 1400 ~ 1500 Pg C,其中农田土壤贮存的碳占陆地土壤碳贮量的 8% ~ 10%^[1]. 因此,开展农田土壤有机碳库的大气 CO₂源/汇效应研究,对于揭示农田土壤碳源/汇特征、减缓温室效应、提高土壤质量和粮食安全具有重要意义. 土壤呼吸作为土壤碳库的主要输出途径和大气 CO₂的重要源^[2],已成为全球碳循环研究的热点问题之一^[3]. 根际呼吸是土壤-植物系统中土壤呼吸的重要组成部分,是植物根系呼吸与根际微生物分解有机物质释放 CO₂的总和. 准确定量根际呼吸对土壤呼吸的贡献,将有助于估算土壤净碳损失与碳积累,评价植物生长对土壤呼吸与碳循环的影响,是研究农田碳循环的关键环节. 目前定量区分土壤呼吸来源的方法有同位素示踪法和非示踪法两大类^[4],非示踪法只能粗略估算土壤呼吸中根际呼吸的数量,很难定量植物当季光合产物碳与土壤原有有机碳的贡献;而同位素¹³C 和¹⁴C 示踪法可以清楚地获得碳流向和碳通量,为碳循环的深入研究提供更为科学的方法. 尽管¹³C 和¹⁴C 同位素均能准确示踪土壤有机碳的来源和周转^[4-5],但^{δ¹³C}示踪方法因其成本相对较低、无辐射危害、有机碳标记均匀,而被广泛用于定量研究根际呼吸对土壤呼吸的贡献^[4, 6-8].

自 19 世纪中叶以来,大气中 CO₂等温室气体持续升高导致的全球气候变化^[9],将对整个生态系统产生深远影响. 农田生态系统是重要的陆地生态系统,大气中 CO₂浓度的持续增加必然影响农田作物的生长和土-气界面的碳交换,明确 CO₂浓度升高对根际呼吸的影响是全面评价其对农田土壤碳库影响的需要. 国外开展的关于 CO₂浓度升高对土壤-植物生态系统影响的研究主要集中在自然生态系统^[10]. 农田生态系统与自然生态系统不同,受人为干扰和环境变化的影响更为强烈. 本文在开放式大气 CO₂浓度增加环境中,利用稳定同位素¹³C 示踪技术,即将 C₃作物冬小麦种植于 C₄作物玉米土壤上,开展高 CO₂浓度下农作物根际呼吸对土壤呼吸的贡献研究,以期预测未来气候条件下我国农田土壤碳库周转及其演变趋势提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

本试验在江苏省江都市马陵良种场中国 FACE 系统平台(32°35'5" N,119°42'0" E)进行. 试验田土壤类型为下位砂姜土^[11],试验平台运行系统与研究

区概况详见文献[12-13]. 供试客土采自吉林省公主岭市长期玉米单作田,为中层黑土,简称为 C₄土壤. 土壤理化性质为:有机质 18.5 g · kg⁻¹,速效磷 42.8 mg · kg⁻¹,速效钾 128 mg · kg⁻¹,砂粒(2 ~ 0.05 mm) 247 g · kg⁻¹,粉粒(0.05 ~ 0.002 mm) 471 g · kg⁻¹,黏粒(<0.002 mm) 283 g · kg⁻¹,pH 5.3,质地为壤土,供试土壤风干后过 0.5 cm 筛备用. 供试小麦品种为扬麦 14.

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,CO₂浓度为主处理,N 肥水平为副处理. CO₂浓度分为正常大气 CO₂浓度(Ambient)和 FACE (Ambient+200 μmol · mol⁻¹CO₂) 2 个处理,每处理各 3 个圈,氮肥分为高氮(HN, 148 mg N · kg⁻¹干土,即 250 kg · hm⁻²)和低氮(LN,88.9 mg N · kg⁻¹干土,即 150 kg · hm⁻²) 2 个水平,共 4 个处理组合(FACE-HN、FACE-LN、Ambient-HN、Ambient-LN),每个处理 3 次重复.

本试验采用静态箱法采集土壤排放的 CO₂气体,装置为上、下敞口的培养框(长×宽×高=20 cm×15 cm×20 cm),将培养框底部用孔径为 0.1 mm 的尼龙布裹严后埋入试验田,其上部与地表平,每圈每处理各设 4 个培养框,其中 2 个种植作物(Plant)、2 个不种植作物(CK),每次均测定 2 个同类型培养框,结果取平均值. 每个培养框中均加入 7 kg 已制备好的 C₄土壤,装土后加水至田间持水量的 60%. 培养框设置见图 1. 种植作物的培养框每个播 8 粒小麦种子,在越冬前定苗为 6 株,种植密度、日常管理均与大田生产同. 冬小麦于 2004 年 11 月 13 日播种,20 日出苗,2005 年 6 月 1 日收割.

试验用氮肥为尿素,磷、钾肥为复混肥. 磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)施用量各 44.4mg · kg⁻¹干土

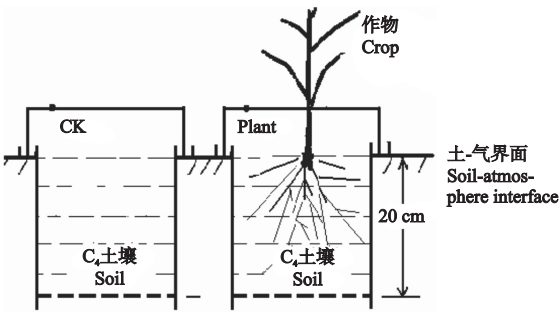


图 1 气体样品采集装置简图
Fig.1 Sketch of sampling gas collection equipment.
Plant:种植作物 Crop planting; CK:不种植作物 No crop planting. 下同 The same below.

(即 75 kg · hm⁻²), 氮肥分 3 次施用, 分别在播种前、拔节期、孕穗期按 5 : 1 : 4 的比例施用, 磷、钾肥于播种前一次性施入. 各种肥料均用水溶解后施用.

1.3 样品采集与测定

分别在小麦拔节期、孕穗期、抽穗期、成熟期 4 个时期(播后第 117、136、143、168 天)采集土壤排放的 CO₂ 气体, 具体操作参见文献[14]. 每次采集时间均为 8:30—11:30, 分别在密封后 0、20 min 采集, 每次所采气体样品分别装于两个 18 mL 的集气真空中, 一份用来测定 δ¹³C 值, 一份用来测定 CO₂ 气体浓度. 采集气体样品时, 同时测定气温和 10 cm 土壤温度. 气体样品采集后刮去用来密封植株与生长孔隙的硅胶, 然后将采样箱向上提起约 45° 交错置于水槽口上, 以利于气体正常交换.

气体 CO₂、植物碳与土壤有机碳的 δ¹³C 值分别用同位素质谱仪-菲尼根 MAT253 和 MAT251 (MAT-253 和 MAT-251, Finnigan, Bremen, Germany) 测定, 标准偏差 < 0.005%. 气体 CO₂ 浓度用气相色谱法测定. 土壤基本理化性质用常规法测定. 不同处理小麦根茬的 δ¹³C 值见文献[15], 平均约为 -28.0‰、C₄ 土壤和试验地土壤 δ¹³C 值分别为 -18.9‰和 -27.8‰.

1.4 数据计算及分析

土壤排放 CO₂ 的 δ¹³C 值计算公式:

δ¹³CO₂ = (δ₂C₂ - δ₁C₁) / (C₂ - C₁) (1)

式中: δ₁ 和 δ₂ 分别为某测定时段始、末气体样品的 δ¹³C 丰富度; C₁ 和 C₂ 分别为始、末 CO₂ 浓度.

用同位素方法计算植物在某一生长阶段根际呼吸占土壤呼吸的比例:

f = (δ_s - δ₀) / (δ_p - δ₀) (2)

式中: f 表示根际呼吸的比例; δ_s 表示土壤呼吸的 δ¹³C 值; δ_p 表示植物体的 δ¹³C 值; δ₀ 表示不种植作物土壤呼吸的 δ¹³C 值.

采用 SPSS 11.5 统计软件处理试验数据, 采用 Multivariate、F-检验和 LSD 法对不同处理进行统计分析, 当 P < 0.05 时达到显著水平.

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度升高对土壤排放 CO₂ 的 δ¹³C 丰度的影响

两个 CO₂ 浓度条件下, 作物-土壤系统中各处理土壤排放 CO₂ 的 δ¹³C 值均从拔节期到抽穗期逐渐降低, 在抽穗期达到最低, 而成熟期又略高于抽穗期. 种植小麦土壤 4 个时期排放 CO₂ 的 δ¹³C 值均小于不种植小麦的裸土. 在 HN 水平下, FACE 处理除拔节期外, 种植小麦土壤排放 CO₂ 的 δ¹³C 值均小于正常大气 CO₂ 浓度处理, 更接近于小麦植株的 δ¹³C 值, 尤其在孕穗期和抽穗期显著降低 (P < 0.05); 在 LN 水平下, FACE 处理 4 个时期的 δ¹³C 值也均小于正常大气 CO₂ 浓度处理, 且在拔节期和孕穗期显著降低 (P < 0.05). 方差分析表明, CO₂ 浓度显著影响孕穗期和抽穗期土壤排放 CO₂ 的 δ¹³C 值丰度, 且 CO₂ 浓度与施氮量在拔节期和抽穗期的交互效应显著 (表 1).

在两个施氮水平下, FACE 与正常大气 CO₂ 浓度处理裸土排放 CO₂ 的 δ¹³C 值均无明显规律, 且差异不显著 (表 1), 这可能表明大气 CO₂ 浓度升高对土壤原有有机碳的分解在短期内无显著影响. 但在两个 CO₂ 浓度条件下, 拔节期、孕穗期裸土排放 CO₂ 的 δ¹³C 值均高于供试土壤的 δ¹³C 值, 而抽穗期、成熟期均低于供试土壤的 δ¹³C 值 (表 1、表 2).

表 1 小麦不同生长时期土壤排放 CO₂ 的 δ¹³C 值变化
Table 1 Change of δ¹³C values of emitted CO₂ from soil at different wheat growth stages (mean±SE, ‰)

处 理 Treatment	拔节期 Jointing stage		孕穗期 Booting stage		抽穗期 Heading stage		成熟期 Maturing stage	
	Plant	CK	Plant	CK	Plant	CK	Plant	CK
FACE-HN	-19.1±0.8ab	-15.2±0.5a	-21.0±0.1c	-18.0±1.3a	-24.0±0.2b	-22.2±1.1a	-22.2±0.7a	-21.0±1.2a
FACE-LN	-20.2±0.7b	-15.2±0.7a	-20.9±0.6bc	-17.4±0.4a	-22.7±0.6a	-21.2±0.9a	-22.4±0.4a	-21.4±0.3a
Ambient-HN	-19.9±0.9b	-16.5±0.5b	-19.9±0.5ab	-18.0±0.5a	-22.2±0.6a	-20.3±0.3a	-21.8±0.9a	-21.0±1.1a
Ambient-LN	-18.3±0.5a	-15.4±0.7ab	-19.7±0.2a	-17.9±0.8a	-22.8±0.1a	-21.2±0.9a	-22.5±0.4a	-21.8±0.4a
变异来源 Sources of variation								
CO ₂	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns
N	ns	*	ns	ns	*	*	ns	ns
CO ₂ × N	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns

Plant: 种植作物 Crop planting; CK: 不种植作物 No crop planting. 同列不同字母表示差异显著 (P < 0.05) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. ns: 不显著 No significant; * 显著 Significant. 下同 The same below.

表 2 根际呼吸占土壤呼吸的比例 ($\delta^{13}\text{C}$ 法)
Table 2 The proportion of rhizosphere respiration to soil respiration by $\delta^{13}\text{C}$ method (mean $\pm$ SE, %)

处 理 Treatment	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturing stage
Ambient-HN	35 $\pm$ 12b	26 $\pm$ 6a	36 $\pm$ 4a	20 $\pm$ 4ab
Ambient-LN	28 $\pm$ 7a	22 $\pm$ 7a	32 $\pm$ 5a	19 $\pm$ 4a
FACE-HN	37 $\pm$ 8b	40 $\pm$ 3b	48 $\pm$ 9b	24 $\pm$ 4b
FACE-LN	48 $\pm$ 7c	42 $\pm$ 9b	35 $\pm$ 3a	21 $\pm$ 2ab
变异来源 Sources of variation				
CO ₂	ns	*	*	ns
N	ns	ns	ns	ns
CO ₂ $\times$ N	*	ns	ns	ns

2.2 根际呼吸对土壤呼吸的贡献率

4 个处理的根际呼吸占土壤呼吸的比例均在成熟期最小,为 19% ~ 24%; Ambient-HN、Ambient-LN、FACE-HN 的根际呼吸占土壤呼吸的比例在抽穗期,FACE-LN 在拔节期达到最大值,为 23% ~ 48% (表 2). 在正常大气 CO₂ 浓度下,根际呼吸所占比例在 4 个生育时期的变化趋势在两个氮肥水平下表现一致,均表现为从拔节至孕穗期降低,在抽穗期增加至最大值,然后在成熟期又快速降低;而在 FACE 条件下,HN 处理从拔节至抽穗期持续增加,在成熟期迅速下降,LN 处理则从拔节至成熟期持续降低.

在两个供氮水平下,FACE 处理的根际呼吸占土壤呼吸的比例在各时期均高于 Ambient 处理. HN 水平下,在孕穗期、抽穗期 FACE 处理分别比 Ambient 处理增加 53.8% 和 33.3%,LN 水平下,在拔节期、孕穗期分别增加 71.4% 和 90.9% ($P<0.05$). 表明 CO₂ 浓度、氮肥供应水平、小麦生育阶段均可影响根际呼吸对土壤呼吸的贡献率. 方差分析表明,CO₂ 浓度除拔节期外 ($P=0.064$),在孕穗、抽穗和成熟期均显著影响根际呼吸对土壤呼吸的贡献率 ($P<0.05$),CO₂ 与施氮量的交互效应在拔节期达到显著水平.

2.3 氮肥用量对土壤排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值及根际呼吸对土壤呼吸贡献的影响

Ambient 条件下,HN 处理种植小麦土壤排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在各时期与 LN 处理差异均不显著,但在 FACE 条件下在抽穗期显著降低 ($P<0.05$); 未种植作物土壤排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 FACE、Ambient 条件下各时期差异均不显著. 方差分析表明,施氮量显著影响抽穗期土壤-植物系统和拔节、抽穗期未种植作物系统土壤排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,且 CO₂ 与施氮量对土壤-植物系统在拔节期、抽穗期的交互效应显著 (表 1).

Ambient 条件下,HN 处理较 LN 处理在拔节期显著增加根际呼吸对土壤呼吸的贡献率 ($P<0.05$),在其他时期呈现增加趋势,说明提高氮肥用量将增加根际呼吸的比例. FACE 条件下,在拔节期与孕穗期为 HN<LN 处理,在抽穗期与成熟期则为 HN>LN 处理,且除孕穗期外均达到显著差异水平 ($P<0.05$),说明在高 CO₂ 浓度条件下不同施氮量对根际呼吸的影响并非单纯供氮问题,应考虑 CO₂ 浓度与施氮水平的交互效应. 但方差分析表明,N 的影响效应在 4 个生育时期均未达到显著水平,且 CO₂ 与 N 的交互效应对根际呼吸对土壤呼吸贡献的影响仅在拔节期达到显著水平.

3 讨 论

将 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著不同的 C₃ 和 C₄ 植被种植互替是利用 $\delta^{13}\text{C}$ 示踪技术研究土壤碳通量与碳流向的常用方法^[4-5]. 本研究中,C₃ 作物小麦根茬与 C₄ 土壤原有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著,确保了 $\delta^{13}\text{C}$ 示踪技术结果可靠、准确. 种植作物土壤排放的 CO₂ 主要包括耕层 C₄ 土壤 (0 ~ 20 cm)、下层 C₃ 水稻土壤 (> 20 cm) 有机质分解和植物根际呼吸排放的 CO₂,而未种植作物系统不包含植物生长带来的 CO₂ 排放. 因土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其主要来源植物十分接近^[16-17],故未种植作物裸土排放的 CO₂ 真实地反映了土壤有机质的分解规律. 本研究全部裸土排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在生长前期高于供试土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,而生长后期低于供试土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (表 1),更接近水稻土的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,表明生长前期源于 C₄ 作物的有机质分解较快,随时间进程 C₄ 土壤中原有少量残留的 C₃ 植物有机质^[17] 与下层水稻土有机质被分解的数量增加. 两个浓度 CO₂ 环境下裸土排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在各时期均无显著差异 (表 1),可能与供微生物分解的底物足够丰富、CO₂ 变化对微生物活性与群

落结构的影响因时间较短仍未体现有关. 而种植比未种植作物体系土壤排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值更小和更接近于 C₃ 作物(表 1), 表明植物生长条件下更多的光合产物通过根际呼吸返回大气, 这是导致两体系排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值不同的主要原因. 氮素是植物主要营养元素之一, 氮肥对种植小麦土壤排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响(表 1), 主要是由于氮供应量影响到植物生长^[18-19] 和光合产物碳向地下的分配^[20].

种植作物体系不同生育阶段土壤排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(表 1)表明: 从拔节至抽穗期随着植物生长通过根际呼吸损失的光合产物数量增加, 在成熟期通过根际呼吸损失的碳数量下降. 以前的研究也发现, 在拔节至孕穗抽穗期冬小麦的根系呼吸较强而在成熟期下降^[14,18]; 营养生长阶段随着根系生长较多同化产物碳输入土壤, 但生长后期明显减少, 与微生物活性的变化一致^[21]. 本研究中, CO₂ 浓度升高显著降低了孕穗期、抽穗期小麦土壤排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(表 1), 表明大气 CO₂ 浓度升高促使更多当季光合碳由地下系统重新返回大气, 这与高 CO₂ 浓度在孕穗、抽穗期增加根系呼吸^[14,18] 的趋势一致, 也符合 Paterson 等^[22] 关于 CO₂ 浓度升高将促使更多光合产物通过根际呼吸损失的猜想. 高 CO₂ 浓度促进植物光合作用^[10] 和光合产物输入地下^[10,22], 使土壤微生物活性增强^[21], 根系呼吸在生长中期增加^[14,18], 这些共同增加了根际呼吸及其贡献率. N 供应量将影响光合碳的合成与分配, 进而影响微生物与根系活性. 不同供 N 水平下, 高 CO₂ 浓度影响根际呼吸对土壤呼吸贡献的时期不同(表 2), 表明 CO₂ 浓度升高环境下作物生长的 N 吸收需求规律发生了改变且受供 N 量制约. 生长前期虽然两个 N 水平均供 N 充足, 但小麦植株体小、生物量低导致根系反映 CO₂ 浓度增加的效应较弱和根系呼吸变异较小^[18], 而土壤原有大量易分解有机质的分解贡献使拔节前期 CO₂ 浓度增加对根际呼吸贡献率的影响不显著. 在高 CO₂ 浓度下冬小麦地下与地上生物量的最大增幅在拔节期^[18], 生长前期充足的 N 供应使较多同化碳被分配于地下将有助于根际呼吸, 而后期随着土壤 N 耗竭或不足限制了同化碳合成及向地下的分配将不利于根际呼吸, 这可能是 CO₂ 与 N 的交互效应对根际呼吸贡献率的影响仅在拔节期显著的原因.

本研究中, 两个供 N 水平下在 4 个生育期根际呼吸占土壤呼吸的比例在正常 CO₂ 浓度下为 19% ~ 36%; 在高 CO₂ 浓度下为 21% ~ 48%. 这与在

小麦生长旺季通过阻断根法测量的根际呼吸占土壤呼吸的比例为 24.5% ~ 47.1%^[20] 的结果基本一致, 而与用 $\delta^{13}\text{C}$ 示踪法测定的冬小麦出苗后 13 ~ 17 d 的相应比例为 89%^[6] 和大豆、向日葵、高粱、苋菜的相应比例分别为 61.2%、61.1%、81.8%、67.4%^[8] 的结果不同, 表明根际呼吸对土壤呼吸的贡献因植物类型和生长阶段而异. 本研究中, CO₂ 浓度增加和供氮水平影响冬小麦根际呼吸对土壤呼吸贡献的变化趋势为: FACE-HN 处理随小麦生长持续增加至抽穗期下降(表 2), 这与 Rochette 和 Flanagan^[7] 在正常大气条件下玉米作物上的研究结果一致; FACE-LN 处理保持持续下降, 不同于其他 3 处理, 可能是由于高 CO₂ 浓度促进了作物生长, 但因 N 肥供应不足在拔节期优先促进了光合产物向地下的分配和根系生长^[18], 后期受 N 供应限制, 作物生长减缓, 根系活性下降, 光合产物向地下分配减少, 根际呼吸及其贡献率呈降低趋势.

以前研究发现, CO₂ 浓度升高和增加施氮水平可促进土壤有机碳更新^[15], 且高 CO₂ 浓度环境下土壤-大气界面的 CO₂ 交换增加^[13,23-24]. 本研究发现, 大气 CO₂ 浓度升高增加了根际呼吸占土壤呼吸的比例, 使土壤原有有机碳分解比例减少, 其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. 但全面评价大气中 CO₂ 等温室气体的增加对农田土壤碳库的影响, 以及未来气候条件下土壤的源汇效应, 需要进一步深入研究输入土壤的碳数量、根际淀积物去向及异养呼吸排放 CO₂ 的地下不同来源(植物新输入碳和土壤原有有机碳的分解)对大气 CO₂ 浓度升高的反馈.

4 小 结

高 CO₂ 浓度显著降低了高氮处理孕穗、抽穗期和低氮处理拔节、孕穗期小麦土壤排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 表明 CO₂ 浓度升高增加了植物当季新输入地下的碳重新返回大气的数量, 加快了土-气界面的碳交换, 在拔节、抽穗期氮肥用量影响 CO₂ 的作用效应.

拔节-成熟阶段小麦根际呼吸占土壤呼吸的比例在高 CO₂ 浓度下高、低氮处理中分别为 24% ~ 48% 和 21% ~ 48%, 在对照中分别为 20% ~ 36% 和 19% ~ 32%. CO₂ 浓度升高显著增加了生长中期根际呼吸的贡献.

土壤-作物系统排放 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和根际呼吸的贡献对施氮水平的响应因 CO₂ 浓度不同而不同, 表明评价氮肥施用对根际呼吸贡献的影响应综合考

考虑 CO₂ 与 N 的交互效应.

参考文献

- [1] Lin E-D (林而达), Li Y-E (李玉娥), Guo L-P (郭李萍), *et al.* Potential Capability of Fixed-nitrogen in Chinese Agricultural Soils and Climate Change. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese)
- [2] Liu S-H (刘绍辉), Fang J-Y (方精云). Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1997, **17**(5): 469–476 (in Chinese)
- [3] Schimel DS. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1995, **1**: 77–91
- [4] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 425–448
- [5] Fang H-J (方华军), Yang X-M (杨学明). The progress of study on soil organic carbon dynamics in cropland. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2003, **34**(6): 562–567 (in Chinese)
- [6] Cheng W. Measurement of rhizosphere respiration and organic matter decomposition using natural ¹³C. *Plant and Soil*, 1996, **183**: 263–268
- [7] Rochette P, Flanagan LB. Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**: 466–474
- [8] Fu S, Cheng W, Susfalk R. Rhizosphere respiration varies with plant species and phenology: A greenhouse pot experiment. *Plant and Soil*, 2002, **239**: 133–140
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2001–Synthesis Reports; Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [10] Ainsworth EA, Long SP. 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
- [11] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所). Chinese Soil Taxonomy. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001 (in Chinese)
- [12] Liu G (刘钢), Han Y (韩勇), Zhu J-G (朱建国), *et al.* Rice wheat rotational FACE platform. I. System structure and control. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(10): 1253–1258 (in Chinese)
- [13] Kou T-J (寇太记), Zhu J-G (朱建国), Xie Z-B (谢祖彬), *et al.* Effect of elevated atmospheric pCO₂ on soil respiration during wheat bloom-growth period. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2007, **26**(3): 1111–1116 (in Chinese)
- [14] Kou TJ, Zhu JG, Xie ZB, *et al.* 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**: 237–249
- [15] Kou T-J (寇太记), Zhu J-G (朱建国), Xie Z-B (谢祖彬), *et al.* Effect of elevated atmospheric pCO₂ and nitrogen level on replacement rate of soil organic carbon in winter wheat field. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2009, **46**(3): 459–465 (in Chinese)
- [16] Dou S (窦森), Zhang J-J (张晋京). Introduction of a method for studying turnover of soil organic matter. *Journal of Jilin Agricultural University* (吉林农业大学学报), 2001, **23**(2): 64–67 (in Chinese)
- [17] Chen Q-Q (陈庆强), Shen C-D (沈承德), Sun Y-M (孙彦敏), *et al.* Spatial and temporal differentiation of mountainous soil organic matter δ¹³C in Dinghushan Biosphere Reserve. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(3): 469–474 (in Chinese)
- [18] Kou T-J (寇太记), Zhu J-G (朱建国), Xie Z-B (谢祖彬), *et al.* Effect of elevated atmospheric CO₂ concentration and level of nitrogen fertilizer on root respiration and biomass of winter wheat. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2008, **32**(4): 922–931 (in Chinese)
- [19] Ma HL, Zhu JG, Xie ZB, *et al.* Availability of soil nitrogen and phosphorus in a typical rice-wheat rotation system under elevated atmospheric [CO₂]. *Field Crops Research*, 2007, **100**: 44–51
- [20] Kou T-J (寇太记), Zhu J-G (朱建国), Xie Z-B (谢祖彬), *et al.* Effect of elevated atmospheric pCO₂ on rhizospheric respiration during the wheat growth period from 106–183 days after germination. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(4): 1420–1427 (in Chinese)
- [21] Yuan X-X (苑学霞), Chu H-Y (褚海燕), Lin X-G (林先贵), *et al.* Responses of soil microbial biomass and respiration to elevated atmospheric CO₂. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2005, **11**(4): 564–567 (in Chinese)
- [22] Paterson E, Hall JM, Rattray EAS, *et al.* Effect of elevated CO₂ on rhizosphere carbon flow and soil microbial processes. *Global Change Biology*, 1997, **3**: 363–377
- [23] Pendall E, Leavitt SW, Brooks T, *et al.* Elevated CO₂ stimulates soil respiration in a FACE wheat field. *Basic and Applied Ecology*, 2001, **2**: 193–201
- [24] Ball AS, Drake BG. Stimulation of soil respiration by carbon dioxide enrichment of marsh vegetation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**: 1203–1205

作者简介 寇太记, 男, 1975 年生, 博士, 副教授. 主要从事物质循环与全球变化、逆境植物营养与农田生态研究. E-mail: tjkou@yahoo.com.cn

责任编辑 张凤丽