

# CO<sub>2</sub>浓度倍增、高氮沉降和高降雨对南亚热带人工模拟森林生态系统土壤呼吸的影响

邓琦<sup>1,2</sup> 周国逸<sup>1</sup> 刘菊秀<sup>1</sup> 刘世忠<sup>1</sup> 段洪浪<sup>1,2</sup> 陈小梅<sup>1,2</sup> 张德强<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院华南植物园,广州 510650) (2 中国科学院研究生院,北京 100049)

**摘要** 土壤呼吸响应全球气候变化对全球C循环具有重要作用。应用大型开顶箱(Open-top chamber, OTC)人工控制手段,研究了大气CO<sub>2</sub>浓度倍增、高氮沉降和高降雨处理对南亚热带人工森林生态系统土壤呼吸的影响。结果表明:对照箱、CO<sub>2</sub>浓度倍增处理以及高氮沉降处理下土壤呼吸速率都具有明显的季节变化,雨季(4~9月)的土壤呼吸速率显著高于旱季(10月至次年3月) ( $p < 0.001$ );但高降雨处理下无明显的季节差异( $p > 0.05$ )。CO<sub>2</sub>浓度倍增能显著提高土壤呼吸速率( $p < 0.05$ ),其他处理则变化不大。大气CO<sub>2</sub>浓度倍增、高氮沉降、高降雨处理和对照箱的土壤呼吸年通量分别为4 241.7、3 400.8、3 432.0和3 308.4 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。但在不同季节,各种处理对土壤呼吸的影响是不同的。在雨季,大气CO<sub>2</sub>浓度倍增和高氮沉降的土壤呼吸速率显著提高( $p < 0.05$ ),其他处理无显著变化;而在旱季,高降雨的土壤呼吸速率显著高于对照箱( $p < 0.05$ ),氮沉降处理则抑制土壤呼吸作用( $p < 0.05$ )。各处理的土壤呼吸速率与地下5 cm土壤温度之间具有显著的指数关系( $p < 0.001$ );当土壤湿度低于15%时,各处理的土壤呼吸速率与地下5 cm土壤湿度具有显著的线性关系( $p < 0.001$ )。

**关键词** CO<sub>2</sub>浓度倍增 开顶箱(OTC) 氮沉降 降雨 土壤呼吸

## EFFECTS OF CO<sub>2</sub> ENRICHMENT, HIGH NITROGEN DEPOSITION AND HIGH PRECIPITATION ON A MODEL FOREST ECOSYSTEM IN SOUTHERN CHINA

DENG Qi<sup>1,2</sup>, ZHOU Guo-Yi<sup>1</sup>, LIU Ju-Xiu<sup>1</sup>, LIU Shi-Zhong<sup>1</sup>, DUAN Hong-Lang<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-Mei<sup>1,2</sup>, and ZHANG De-Qiang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China, and <sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract Aims** Responses of soil respiration to global change play an important role in global carbon cycling, but the effects of increasing atmospheric carbon dioxide concentration ([CO<sub>2</sub>]), nitrogen (N) deposition and precipitation on soil respiration in subtropical China are unclear. Our objective was to test the effects of increased [CO<sub>2</sub>], N deposition and precipitation on soil respiration and to determine how they influence soil respiration in subtropical China.

**Methods** A model forest ecosystem was constructed of six tree species native to South China. The species were exposed to four experimental treatments in open-top chambers beginning March 2005. Three chambers were used for elevated [CO<sub>2</sub>] (CC), two for high N treatment (NN) and the control (CO) and one for elevated precipitation (HR). The CC treatment was achieved by supplying additional CO<sub>2</sub> from a tank until the chambers had a concentration of (700 ± 20) μmol CO<sub>2</sub>·mol<sup>-1</sup>. The NN treatment was achieved by spraying seedlings once a week for a total amount of NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> of 100 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>. The HR treatment was achieved by weekly irrigation with 100 L water.

**Important findings** For two years, soil respiration displayed strong seasonal patterns with higher values observed in the wet season (April to September) and lower values in the dry season (October to March) in the control chambers (CO) and the CC and NN treatments ( $p < 0.001$ ). There was no seasonal difference in the HR treatment ( $p > 0.05$ ). The CC enrichment affected soil respiration significantly

收稿日期: 2009-03-06 接受日期: 2009-06-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421101)、国家自然科学基金(30725006、40730102和30700112)和广东省自然科学基金(8351065005000001和7006918)。

\* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: zhangdeq@scib.ac.cn

( $p < 0.05$ ), and there were no significant differences in annual  $\text{CO}_2$  effluxes between CO and the other two treatments. The annual  $\text{CO}_2$  effluxes reached 4 241.7, 3 400.8, 3 432.0 and 3 308.4  $\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  in the CC, NN, HR and CO treatments, respectively. Soil respiration showed diverse responses between dry and wet seasons under different treatments. Higher soil respiration in the CC and NN treatments occurred in the wet season ( $p < 0.05$ ). In the dry season, soil respiration increased in the HR treatment ( $p < 0.05$ ) and decreased in the NN treatment ( $p < 0.05$ ). We found significant exponential relationships between soil respiration rates and soil temperature and significant linear relationships between soil respiration rates and soil moisture (below 15%).

**Key words**  $\text{CO}_2$  enrichment, open-top chamber (OTC), nitrogen deposition, precipitation, soil respiration

DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.06.002

土壤是陆地生态系统最大的碳(C)库(Mielnick & Dugas, 2000), 其C贮量达1 500 Pg (1 Pg= $10^{15}$  g), 大约是大气层C贮量(750 Pg)的2倍, 陆地植被C贮量的3倍(Schlesinger, 1990, 1995)。土壤呼吸(Soil respiration)是指土壤向大气释放 $\text{CO}_2$ 的过程, 主要由微生物氧化有机物和根系呼吸产生, 极少部分来自于土壤动物呼吸和化学氧化。土壤呼吸是陆地生态系统C循环的重要组成成分, 是除植被光合作用之外陆地生态系统C收支中最大的通量(Raich & Schlesinger, 1992), 在全球C收支中扮演着极为重要的角色, 其变化对全球C平衡具有重大的影响(Schlesinger & Andrews, 2000)。

在过去很长一段时间内, 自然系统和生物地球化学循环一直使得这些C库处于动态平衡中, 但在近代, 特别是自工业革命以来的人类活动(土地利用方式的改变及化石燃料的燃烧等)所造成的大气 $\text{CO}_2$ 等温室气体浓度的升高, 已改变了原有的C动态平衡。同时, 大气中大量的氮化物不断地向陆地和水域生态系统沉降, 也影响了地球系统的生物地球化学循环过程(Vitousek *et al.*, 1997)。随着经济发展的全球化, 大气 $\text{CO}_2$ 浓度升高和氮(N)沉降增加也呈现出全球化的趋势(Matson *et al.*, 1999)。在过去的20年里, 大气 $\text{CO}_2$ 浓度已经增加了大约35%, 预计到本世纪末将达到700  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$  (IPCC, 2001); 而全球N沉降也由1961年的14  $\text{Tg N} \cdot \text{a}^{-1}$ 增加到2000年的68  $\text{Tg N} \cdot \text{a}^{-1}$ , 预计到2030年全球N沉降量将达到105  $\text{Tg N} \cdot \text{a}^{-1}$  (Zheng *et al.*, 2002)。其中, 大气 $\text{CO}_2$ 浓度升高将引起森林地上与地下部分中一些重要生命过程发生改变, 尤其会影响土壤中C源的输入以及土壤和根际间微生物的活性。大气N沉降会增加生态系统的N输入量, 改变土壤中C/N比值, 影响植物的生长。同时, 也使得全球水分分布状况

发生巨大的改变(Houghton *et al.*, 1990)。自20世纪以来, 全球的年均降水量增加了2% (Jones & Hulme, 1996; Hulme *et al.*, 1998),  $30^\circ \sim 85^\circ \text{N}$ 的地区降水增加尤为显著, 增加了7%~12% (Houghton, 2001)。就季节分配而言, 降水增加主要发生在秋冬季节, 夏季蒸发量的增加会导致中纬度地区土壤水分的减少(MacCracken *et al.*, 1991; Dai *et al.*, 2001a, 2001b)等。这些全球性的气候变化直接或间接地影响着土壤呼吸作用的过程(李玉宁等, 2002; 彭少麟等, 2003; 陈全胜等, 2003, 2004; Astrid *et al.*, 2004; Bernhardt *et al.*, 2006; 周玉梅等, 2007; Mo *et al.*, 2007, 2008)。

当前研究最多的是提高大气 $\text{CO}_2$ 浓度对土壤呼吸的影响。多数研究认为,  $\text{CO}_2$ 浓度升高后, 土壤呼吸会有所增加(Astrid *et al.*, 2004; King *et al.*, 2004; Bernhardt *et al.*, 2006), 也有一些研究认为, 高浓度 $\text{CO}_2$ 对土壤呼吸作用没有影响或有抑制作用(Oberbauer *et al.*, 1986; 周玉梅等, 2006)。模拟N沉降对土壤呼吸影响的研究越来越多, 但仍未得到相对一致的结论, 多表明低水平的N沉降对土壤C释放过程有一定的促进作用(曹裕松等, 2006), 而随着沉降水平的升高才表现为抑制作用(Mo *et al.*, 2007, 2008); 不同水分输入对土壤呼吸的影响研究不多(陈全胜等, 2003, 2004)。总的来说, 土壤呼吸对大气 $\text{CO}_2$ 浓度倍增、高N沉降和高降雨的响应规律及作用机制目前仍不清楚。

我们通过开顶箱控制实验, 分别在 $\text{CO}_2$ 浓度倍增、模拟氮(N)沉降和高降雨处理条件下, 对土壤呼吸速率及其相关环境因子进行了长期观测研究, 试图揭示土壤呼吸对 $\text{CO}_2$ 浓度倍增、高N沉降和高降雨的响应机制, 并为正确评估森林生态系统中的C平衡及其对全球气候变化的响应提供基础数据和

科学依据。

## 1 试验地概况

试验地位于广州市近郊的中国科学院华南植物园科研办公区(23°10'46.4" N, 113°21'9.1" E)。该地区受季风气候的影响,全年平均太阳辐射总量为4 367.2~4 597.3 MJ·m<sup>-2</sup>,年平均气温约21.5 °C,年均降水量约为1 700 mm,其中4~9月的降水量约占全年降水量的80%,平均相对湿度为77%。该地区大气污染严重,是我国的高N沉降地区。1988年广州市的降水N沉降量为46 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,1990年上升到73 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>(任仁等,2000)。

## 2 材料和方法

### 2.1 开顶箱概况

实验在8个开顶箱(Open-top chamber, OTC)系统进行。开顶箱系统为圆柱形结构,每套开顶箱系统由底座、箱体及充气系统组成。底座为下沉式圆筒,圆周为砖墙结构,直径300 cm,高70 cm,砖墙表面及圆筒体底部贴上瓷片,以隔断与周围土壤的水分传输,底座砖墙高出地面10 cm,底座基部四周设4个直径为3 cm的出水孔,并通过聚氯乙烯(PVC)管收集土壤水,形成一个封闭的系统。箱体连接底座,直径300 cm,高300 cm,由7根角钢支撑,然后围上铁丝网,最后再围上塑料薄膜。充气系统包括气瓶、流量计、鼓风机和PVC管。PVC管(内径为7.5 cm)围绕箱体一周,其高度随植物生长可进行调整,PVC管朝箱体中央一侧每隔1 cm开直径为0.1 cm的小孔。气瓶排出的CO<sub>2</sub>在鼓风机作用下通过PVC管上的小孔均匀分布在开顶箱内,通过流量计调节流量,使箱体内形成相对均一的CO<sub>2</sub>浓度。开顶箱内的光线是外界环境的97%,降雨强度与气温在开顶箱内外没有差别。

开顶箱内的土壤是从野外自然林运来的赤红壤,分3个层次填埋,自上而下分别为0~20、20~40和40~70 cm土壤层,各层土壤来自附近自然林中对应的土壤层,土壤理化性质的背景值参照Liu等(2008)。2005年3月,从苗圃地选择株高、基径大小及生长状况基本一致的南亚热带乡土树种——荷木(*Schima superba*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)、海南红豆(*Ormosia pinnata*)、肖蒲桃(*Acmena acuminatissima*)、红鳞蒲桃(*Syzygium hancei*)和马尾松(*Pinus massoniana*)共6种苗木,并对苗木进行了株高

和基径测量,记录其生长状况。使同一种苗木情况达到基本一致,然后再移栽到开顶箱。6种植物苗木各8株,随机排列于开顶箱内,使之形成小型混交林生态系统。所有苗木均为营养袋实心苗,苗龄除红鳞蒲桃为2 a外,其余都为1 a。

### 2.2 实验处理

苗木成活后,从2005年5月开始,对开顶箱内进行如下处理:1)高浓度CO<sub>2</sub>((700±20) μmol CO<sub>2</sub>·mol<sup>-1</sup>) +背景N沉降(用CC表示),每天8:00~18:00充气,雨天停止充气,共设置3个开顶箱;2)高N沉降(10 g NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-N·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) +背景CO<sub>2</sub>(用NN表示),即每个开顶箱每个星期施用1.35 g N肥,N沉降浓度约为100 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,共设置2个开顶箱;3)高降雨(用HR表示),指在其他处理正常浇水的基础上,每个星期再多浇100 L水,共设置1个开顶箱;4)背景CO<sub>2</sub>+背景N沉降(用CO表示),共设置2个开顶箱。所有开顶箱内除高N沉降(10 g NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-N·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) +背景CO<sub>2</sub>处理外,不施任何肥料,仅用人工浇水,保证开顶箱内有足够的水分供植物生活。

### 2.3 土壤呼吸测定

经过上述处理1 a后,从2006年6月27日起,利用LI-6400(Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)气体分析仪配带的土壤呼吸气室分别测定各开顶箱内的土壤呼吸,每周一次,测定时间为9:00~12:00,将温度探针插入土壤呼吸室附近5 cm深土壤内测定时,将呼吸气室置于土壤环上,待系统内气体交换平衡后,由仪器自动计算土壤呼吸速率,同时记录相应时间的土壤温度和气温等指标。每个开顶箱设置4个土壤环,大致均匀分布在开顶箱内,每个土壤环大致位于4个苗木之间,土壤环两两间隔不少于50 cm,每个土壤环上记录3组数据。同时,在开顶箱内随机选取5个测量点,用TDR土壤墒情仪(MPKit,江苏瑞迪生科技有限公司,南京)测定地下0~5 cm土壤湿度(cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O·cm<sup>-3</sup> soil)(%),取5个点的平均值代表该开顶箱内的土壤湿度。

### 2.4 统计方法

采用SPSS 11.5 软件对实验数据进行统计分析,各种处理条件下的土壤呼吸、土壤温度及土壤湿度的两两间差异性,运用单因素方差分析法分析。

## 3 实验结果

### 3.1 不同处理间的环境因子

在不同处理下,开顶箱内土壤温度和土壤湿度

都具有明显的季节动态, 雨季(4~9月)较高, 旱季(10月~次年3月)较低( $p < 0.001$ ) (图1; 表1)。不同处理间土壤温度变化无显著差异( $p > 0.05$ ); 土壤湿度则有所不同, 高浓度 $\text{CO}_2$  ( $(700 \pm 20) \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$ ) + 背景N沉降和高降雨处理下的土壤湿度显著高于对

照( $p < 0.05$ ), 高N处理则显著降低了土壤湿度( $p < 0.05$ )。

### 3.2 不同处理间的土壤呼吸

由图1及表1可以看出,  $\text{CO}_2$ 与CC、NN的土壤呼吸速率都具有明显的季节动态, 雨季(4~9月)中的

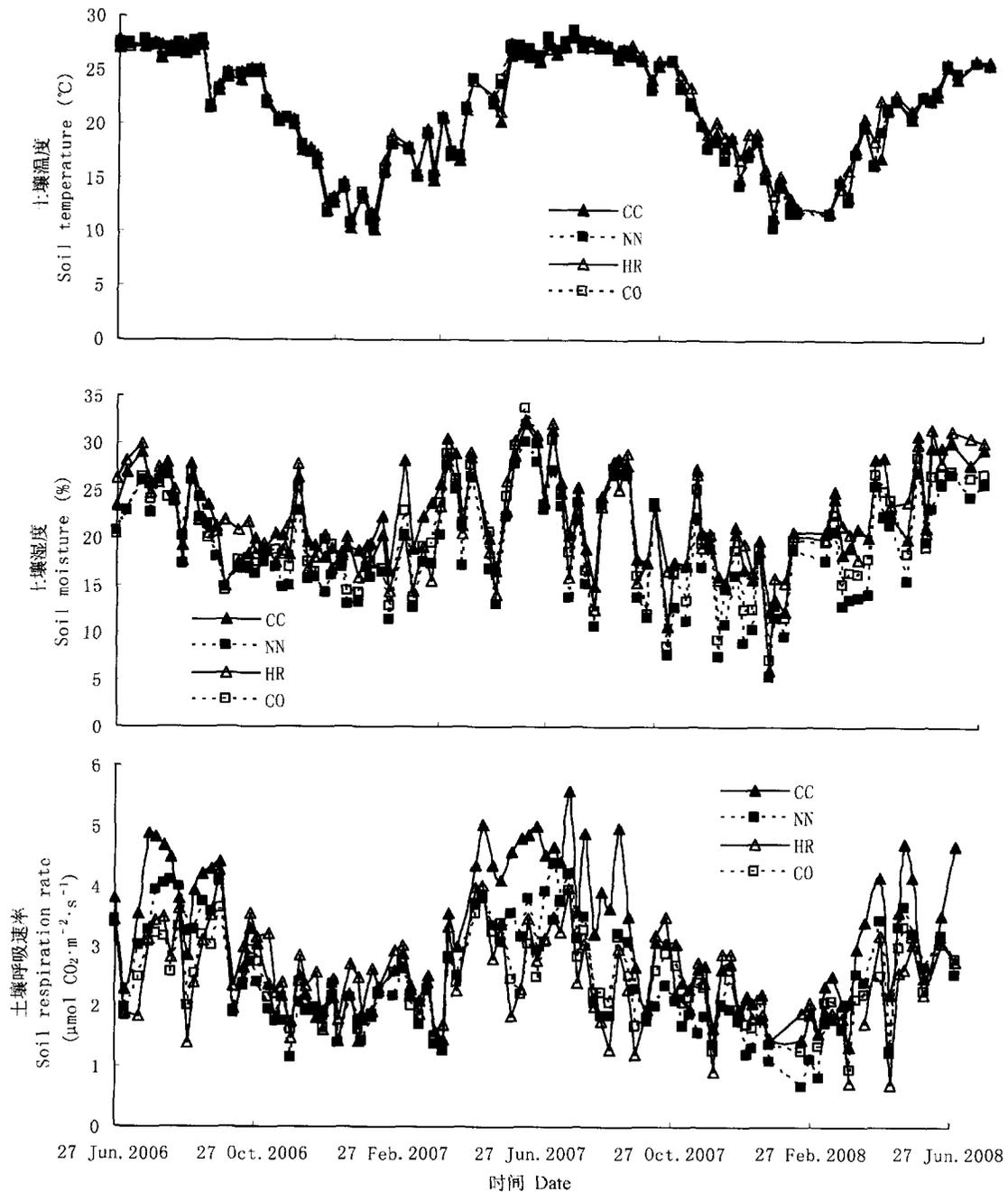


图1 不同处理下土壤呼吸速率和环境因子的季节动态

Fig. 1 Seasonal dynamics of soil respiration rate and environmental factors under different treatments

CC:  $\text{CO}_2$  浓度倍增 ( $(700 \pm 20) \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$ ) + 背景N沉降  $\text{CO}_2$  enrichment ( $(700 \pm 20) \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$ ) + ambient N deposition  
 CO: 背景 $\text{CO}_2$  浓度 + 背景N沉降 Ambient  $\text{CO}_2$  concentration + ambient N deposition  
 NN: 高N沉降 ( $100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) + 背景 $\text{CO}_2$  浓度 High N deposition ( $100 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) + ambient  $\text{CO}_2$  concentration  
 HR: 高降雨 High precipitation ( $100 \text{ L H}_2\text{O}$ )

表1 土壤呼吸速率和环境因子的处理间差异性(平均值±标准偏差)  
Table 1 Differences in soil respiration rates and environmental factors under different treatments (mean±SD)

处理 Treatment	时间 Time	CC	NN	HR	CO
土壤呼吸速率 Soil respiration rate ( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	雨季 Wet season	3.85±1.00 <sup>a*</sup>	3.19±0.80 <sup>b*</sup>	2.66±0.88 <sup>c</sup>	2.71±0.70 <sup>c*</sup>
	旱季 Dry season	2.23±0.47 <sup>ab*</sup>	1.80±0.44 <sup>c*</sup>	2.32±0.57 <sup>a</sup>	2.05±0.42 <sup>b*</sup>
	年平均值 Annual mean value	3.06±1.13 <sup>a</sup>	2.46±0.91 <sup>b</sup>	2.49±0.66 <sup>b</sup>	2.39±0.76 <sup>b</sup>
土壤温度 Soil temperature (°C)	雨季 Wet season	24.81±2.99 <sup>a*</sup>	25.10±2.87 <sup>a*</sup>	25.22±2.71 <sup>a*</sup>	25.26±2.80 <sup>a*</sup>
	旱季 Dry season	17.21±4.08 <sup>a*</sup>	17.70±4.20 <sup>a*</sup>	17.23±4.03 <sup>a*</sup>	17.26±4.11 <sup>a*</sup>
	年平均值 Annual mean value	21.05±5.22 <sup>a</sup>	21.50±5.44 <sup>a</sup>	21.16±5.25 <sup>a</sup>	21.38±5.04 <sup>a</sup>
土壤湿度 Soil moisture (%)	雨季 Wet season	25.03±4.60 <sup>a*</sup>	22.26±4.96 <sup>b*</sup>	25.76±5.16 <sup>a*</sup>	23.64±4.82 <sup>ab*</sup>
	旱季 Dry season	19.34±3.64 <sup>a*</sup>	15.01±3.84 <sup>c*</sup>	19.75±3.50 <sup>a*</sup>	17.03±3.95 <sup>b*</sup>
	年平均值 Annual mean value	22.25±5.03 <sup>a</sup>	18.71±5.73 <sup>c</sup>	20.41±5.50 <sup>a</sup>	22.83±5.34 <sup>b</sup>

同一行中数据后不同小写字母表示差异达到  $p = 0.05$  显著水平 Values within the same row with different lowercase letters show significantly different at  $p = 0.05$  level 同一列中数据后用\*标记者表示其旱雨季之间差异达到  $p = 0.05$  显著水平 Values within the same column indicated by the asterisk show significant differences between wet season and dry season at  $p = 0.05$  level CC、CO、NN、HR: 见图1 See Fig.1

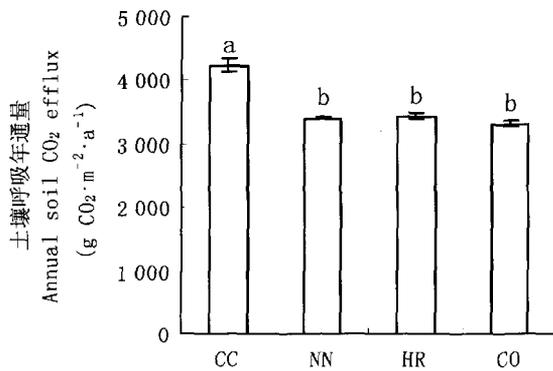


图2 不同处理下土壤呼吸的年通量  
(平均值±标准偏差)

Fig. 2 Annual soil CO<sub>2</sub> efflux under different treatments (mean±SD)

不同小写字母表示差异达到 $p=0.05$ 显著水平 Different lowercase letters indicate significant difference at  $p=0.05$  level CC、CO、NN、HR: 见图1 See Fig. 1

土壤呼吸速率显著高于旱季(10月~次年3月) ( $p<0.001$ ); 而HR的旱季和雨季的土壤呼吸速率无明显差异( $p>0.05$ ) (表1)。如图2所示, CO<sub>2</sub>浓度倍增能显著提高土壤呼吸速率( $p<0.05$ ), 其他处理则变化不大。我们测得CC、NN、HR和CO土壤呼吸年通量分别为4 241.7、3 400.8、3 432.0和3 308.4 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。表1结果表明: 在不同季节, 各种处理对土壤呼吸的影响是不同的。在雨季, CC和NN的土壤呼吸速率显著提高( $p<0.05$ ), 其他处理无显著变化; 而在旱季, HR的土壤呼吸速率显著高于CO ( $p<0.05$ ), 而高N处理是抑制土壤呼吸作用的 ( $p<0.05$ ), CC处理的土壤呼吸速率则无明显变化。

### 3.3 土壤温度和土壤湿度的影响

所有处理的土壤呼吸速率与地下5 cm温度之间具有很好的指数关系, 两者均达到极显著水平 ( $p<0.05$ ) (图3); CC、NN、HR和CO的 $Q_{10}$ 值分别为1.80、1.67、1.38和1.43, 说明升高CO<sub>2</sub>浓度和N沉降均可能使土壤呼吸对土壤温度的敏感度提高(图3)。当土壤湿度低于15%时, 各处理的土壤呼吸速率与地下5 cm土壤湿度具有显著的线性关系( $p<0.001$ ) (图4)。

## 4 讨论

### 4.1 不同处理间土壤呼吸年通量的差异

我们测得CC、NN、HR和CO的土壤呼吸年通量分别为4 241.7、3 400.8、3 432.0和3 308.4 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 统计结果表明CO<sub>2</sub>浓度倍增能显著提高土壤呼吸( $p<0.05$ ), 其他处理则影响不大。

提高CO<sub>2</sub>浓度后, 土壤呼吸作用也会加强 (Zak *et al.*, 2000; Houghton, 2001; King *et al.*, 2004)。本实验也表明: 提高CO<sub>2</sub>浓度后, 土壤呼吸年通量相对于对照显著提高了28%, 低于使用开顶箱对美国黄松(*Pinus ponderosa*)林(Vose *et al.*, 1997)以及芬兰东部的研究结果(Sini *et al.*, 2004), 但高于美国杜克森林FACE实验结果(Bernhardt *et al.*, 2006)。美国黄松林经过3 a大气+175  $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$ 处理后, 土壤呼吸平均增加67%, 而在大气+350  $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$ 处理下平均增加35% (Vose *et al.*, 1997); 芬兰东部开顶箱实验也表明, 大气CO<sub>2</sub>浓度升高能提高土壤30%的CO<sub>2</sub>排放量(Sini *et al.*, 2004); 而在美国杜克森林FACE实验中, 提高大气CO<sub>2</sub>浓度使土壤呼吸

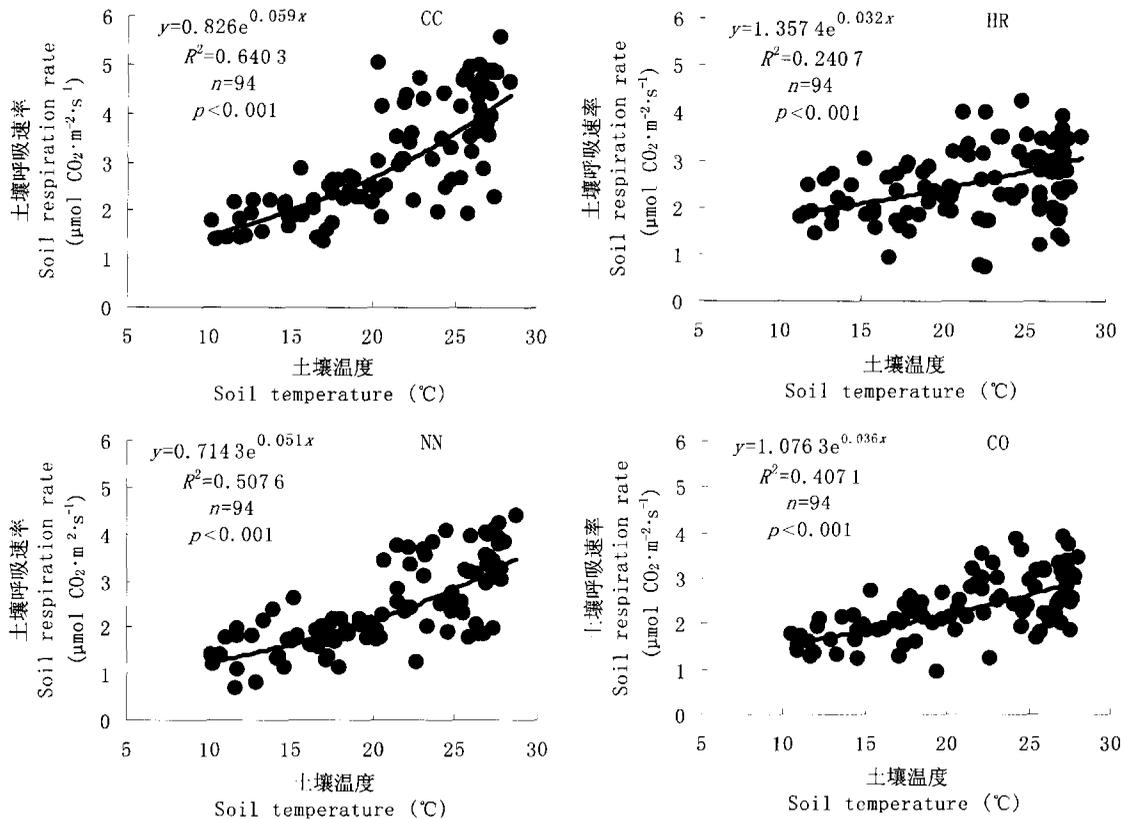


图3 不同处理下土壤呼吸速率和土壤温度的相关性

Fig. 3 Correlations between soil respiration rate and soil temperature under different treatments

CC、CO、NN、HR: 见图1 See Fig. 1

仅提高了约16% (Bernhardt *et al.*, 2006)。此外, 欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 经过6个月大气+350  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$  处理后, 土壤呼吸也表现出增加的现象 (Janssens *et al.*, 1998)。提高大气 $\text{O}_2$ 浓度导致土壤呼吸升高, 可能是由于在高 $\text{CO}_2$ 下更多C贮存于地下部分 (Casella & Soussana, 1997; Nitschelm *et al.*, 1997; Van Ginkel & Gorissen, 1998; John *et al.*, 2008), 这可能与根分泌、周转、菌根发育、N固定等根际微生物生态系统的活动在高 $\text{CO}_2$ 下比较强烈有关。为满足高 $\text{CO}_2$ 下植物的快速生长, 分配到根系的C量也相应增加, 促使根系生物量增加, 尤其是细根的生物量增加 (Rogers *et al.*, 1994), 以及植物的根茎比略有上升 (O'Neil, 1994), 从而促进根呼吸速率升高。在草地和森林系统中, 就有直接的证据表明: 高 $\text{CO}_2$ 下根系统C分配增加时, 根周转也加速; 在另外两种温带树种中也同样发现了根周转速率加快的现象 (Pregitzer *et al.*, 1995; Bemtson &

Bazzaz, 1996)。根周转速率的加快意味着植物将会为土壤提供更多的有机物质, 从而影响到土壤的肥力状况, 这对植物和地下生物都将是有益的。另外, 土壤微生物是地下部分的一个重要C库。目前, 对高浓度 $\text{CO}_2$ 下土壤微生物群系的组成、活动及生物量的研究还很少, 但发现高浓度 $\text{CO}_2$ 可使土壤中微生物的生物量增加 (Cotrufo & Gomssen, 1997)。本实验中, CC处理下土壤湿度较高 ( $p < 0.05$ ) (表1; 图4), 也可能会刺激土壤微生物活性, 促进土壤呼吸作用 (Lin *et al.*, 1998)。

高N沉降处理对土壤呼吸年通量均没有显著影响 ( $p > 0.05$ ), 这与其他研究表明N沉降能显著抑制土壤呼吸的结果不相一致 (Bowden *et al.*, 2004; Mo *et al.*, 2008), 但与亚热带马尾松林土壤呼吸响应N沉降的结果是相似的 (Mo *et al.*, 2007)。目前, 土壤呼吸对N沉降响应机制的研究仍未得到相对一致的结论。曹裕松等 (2006) 的研究认为, N沉降对湿地松

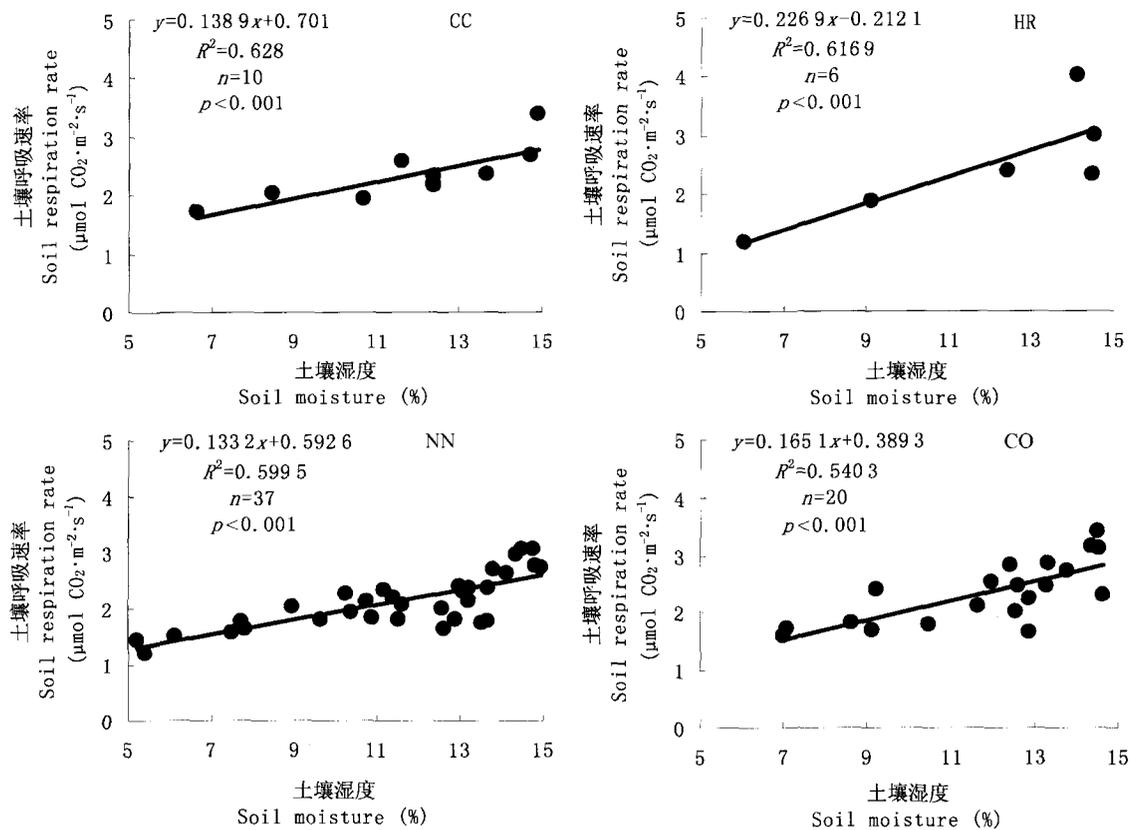


图4 不同处理下土壤呼吸速率和土壤湿度(<15%)的相关性  
Fig. 4 Correlations between soil respiration rate and soil moisture (below 15%) under different treatments  
CC、CO、NN、HR: 见图1 See Fig. 1

(*Pinus eliotii*)林土壤呼吸过程有很强的抑制作用,且随着N处理浓度的升高而加强;但低水平的N沉降对荷木和马占相思(*Acacia mangium*)林土壤C释放过程有一定的促进作用,随着N沉降水平的升高,才表现为抑制作用。Vose等(1997)的研究发现:模拟N沉降在第一年促进了土壤呼吸的增加,但随着N沉降的进行,土壤呼吸在随后的第二年和第三年则表现出明显的下降趋势。广东地区大气污染相当严重,是我国的高N沉降地区。广州市1988年的降水N沉降量为46 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,1990年上升到73 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>(任仁等,2000)。增加N沉降有可能抑制微生物活性,降低微生物呼吸,或者改变土壤微生物的群落组成,从而影响土壤呼吸(Allison *et al.*, 2008)。但本试验地中,植物是由幼苗开始种植的,生长较快,因此,系统对N元素的需求量较大。增加N沉降能有效地促进植物的生长,相应地增加植物的根生物量,从而促进根呼吸和根际间微生物的呼

吸。我们没有单独对土壤呼吸组分进行过测定,但两者抵消将有可能导致土壤呼吸年通量变化不大。

高降雨处理对土壤呼吸年通量均没有显著影响( $p > 0.05$ )。我国南方雨量充沛,年平均降水量约为1700 mm,对水分的需求不大,因此,全年来看,水分对土壤呼吸的作用不大。

#### 4.2 3种处理对土壤呼吸影响的季节差异

本实验中,在不同季节下,3种处理对土壤呼吸的影响是不同的。

其中,提高CO<sub>2</sub>浓度在雨季中能极大地促进地表CO<sub>2</sub>排放,旱季则无明显作用。产生这种差异的原因,可能是由于在雨季中太阳辐射强度大,光照时间长,提高CO<sub>2</sub>浓度有助于提高光合速率,增加光合产物,而这部分产物主要分配到地下部分,有效地促进了植物根系的生长,同时随着初级生产力的上升,地上凋落物也会增加,加上雨季中高温多雨的气候有利于凋落物的分解,从而刺激了土壤微

生物的活性,进而显著提高了土壤呼吸速率;在旱季,低温少雨气候是抑制根系生长和土壤微生物活性的主要因素,即使提高了CO<sub>2</sub>浓度,但由于旱季太阳辐射强度小,光照时间短,对提高光合速率作用较小,不足以引起土壤呼吸作用的较大变化。这表明土壤呼吸对高浓度CO<sub>2</sub>的响应与植物生长或同化作用具有直接的关系。

高N沉降在雨季对土壤呼吸有一定的促进作用,在旱季则抑制土壤呼吸作用。产生这种差异的原因,可能是由于雨季是南亚热带生长季节,植物生长对N的需求量较大,N的施肥效应更显著,刺激植物地上部分生长的同时也促进了植物根系的生长,从而提高了土壤呼吸速率;而在旱季,低温少雨的气候下植物生长缓慢,对N元素的需求量较小,同时,本试验地背景N沉降浓度较高,N的施肥效应不明显,随着高N输入导致土壤有效C减少,此外,高N处理下土壤湿度较低( $p < 0.05$ ) (表1;图4),将大大地降低土壤活性有机C的含量,抑制土壤微生物活性,从而降低土壤呼吸作用。Mo等(2007)认为,土壤呼吸对N沉降的响应结果可能受试验地对N元素的需求不同所影响。在马尾松林样地,增加N沉降能在一定程度上促进植物根的生长,从而导致土壤呼吸变化不大,而随着森林演替的发展,在针阔叶混交林样地,由于增加N沉降对植物生长促进作用不大,从而能显著抑制土壤呼吸。此外,赵玉涛等(2009)的实验也表明,N沉降增加对土壤微生物C、N的影响会因森林类型和植物生长阶段的不同发生改变。这可能就是本实验增加N沉降对土壤呼吸的影响具有季节间差异的原因,也表明土壤呼吸对N沉降的响应与植物的生长具有密切的关系。

在高降雨处理中,土壤呼吸作用在旱季是显著提高的,在雨季则无明显差异。这是由于广东为季风气候,雨季雨热同季,雨量丰富,此时提高降雨量对生态系统影响不大,但在旱季则不同,降水量显著较低,只占全年降水量的20%,土壤湿度较低,降雨是土壤微生物和植物根系活性的主要限制因子,此时提高开顶箱内降雨量,可以缓解土壤中水分的不足,提高土壤湿度,植物和土壤微生物新陈代谢所需要的激发能减少,植物根系和土壤微生物的活性增强,从而引起土壤呼吸速率升高(Salamanca *et al.*, 2003),表明土壤呼吸对高降雨的响应与土壤本底含水量有关。Kucera和Kirkham

(1997)的研究也表明,通常在土壤湿度较低时土壤呼吸随含水量的增加而增加,原因是含水量增加时,新陈代谢所需要的激发能就会减少,土壤呼吸增加比较迅速;当水分含量达到一定程度时,土壤呼吸又随含水量的增加而减少,但是这种减小的速率相对较小,因为水分过高会导致CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>传输困难,而CO<sub>2</sub>仍然产生,所以其斜率较前者的小。今后研究应多结合不同降雨强度和不同土壤湿度情况下对土壤呼吸作用的影响;此外,单次降雨事件对土壤湿度的迅速改变对土壤呼吸的物理作用也不容忽视。

#### 4.3 不同处理下土壤呼吸的季节动态

在本实验中,CC、NN和CO的土壤呼吸具有明显的季节动态,在高温多雨季节,水热充沛,植物光合作用较强,生长快,土壤中所获得的C输入也大,微生物的活性高,因而土壤呼吸速率也高;而在低温干旱季节,温度和湿度都较低,植物光合作用较低,生长较慢,微生物活性受到一定的抑制,土壤呼吸速率较低(图1;表1)。这与其他南亚热带森林土壤呼吸研究的结果(Tang *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2006; Mo *et al.*, 2007, 2008)一致。高降雨处理后,土壤呼吸速率在旱季雨季中无明显差异(表1)。这种现象主要是由于在雨季高降雨处理下的土壤湿度和对照无明显差异,在旱季则显著高于对照箱,从而提高了HR在旱季中的土壤呼吸速率,缩小了在旱雨季之间的差异。

#### 4.4 土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸速率的影响

土壤呼吸受到多种因素的综合影响,而在土壤呼吸众多的影响因素中,温度和土壤湿度无疑是两个最主要的影响因子。本实验中,所有处理的土壤呼吸速率随着土壤温度的升高而升高,具有极显著的指数相关,CC、NN、HR和CO的 $Q_{10}$ 值分别为1.80、1.67、1.38和1.43,说明升高CO<sub>2</sub>浓度和N沉降均可能使土壤呼吸对土壤温度的敏感度提高(图2),土壤温度是控制土壤呼吸季节变化的主要限制因子。由于广东雨量充足,土壤湿度保持较高水平,难以成为控制土壤呼吸的限制因子。而当土壤湿度低于15%时,土壤呼吸速率与土壤湿度具有显著的线性关系,这表明随着土壤变干旱,土壤湿度对土壤呼吸的影响比重将加大。Inclan等(2007)的研究也表明:在较低土壤湿度时,土壤湿度对土壤呼吸的影响会更为明显,并且会随不同的土壤质地有所变化。

## 5 结 论

5.1 CC、NN、HR和CO土壤呼吸年通量分别为4 241.7、3 400.8、3 432.0和3 308.4 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 表明CO<sub>2</sub>浓度倍增能显著提高土壤呼吸( $p<0.05$ ), 其他处理则影响不大。

5.2 在不同季节, 3种处理的土壤呼吸速率有不同的变化模式: CC和NN的土壤呼吸速率在雨季中显著提高( $p<0.05$ ), 旱季则变化不大, 表明土壤呼吸对高CO<sub>2</sub>浓度和N沉降的响应与植物生长有密切关系; 而HR的土壤呼吸速率在旱季中显著高于CO( $p<0.05$ ), 雨季则无明显变化, 表明土壤呼吸对高降雨的响应与土壤本底含水量有关。

5.3 对照箱(CO)、CC和NN处理下的土壤呼吸速率都具有明显的季节动态, 雨季(4~9月)的土壤呼吸速率显著高于旱季(10月~次年3月) ( $p<0.001$ ); 而HR处理下无明显差异( $p>0.05$ )。

5.4 CO<sub>2</sub>浓度倍增、高N沉降、高降雨和对照箱的土壤呼吸速率与土壤温度具有显著的指数相关关系, 其 $Q_{10}$ 值分别为1.83、1.65、1.38和1.43, 说明CO<sub>2</sub>浓度倍增和高N沉降条件下, 将可能提高土壤呼吸对土壤温度的敏感度。同时, 当土壤湿度较低时, 土壤湿度对土壤呼吸的影响更加显著。

## 参 考 文 献

- Allison SD, Czimczik CI, Treseder KK (2008). Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest. *Global Change Biology*, 14, 1156–1168.
- Astrid RB, Giesemann A, Anderson TH, Weigel HJ, Buchmann N (2004). Soil respiration under elevated CO<sub>2</sub> and its partitioning into recently assimilated and older carbon sources. *Plant and Soil*, 262, 85–94.
- Bemtson GM, Bazzaz FA (1996). The influence of elevated CO<sub>2</sub> on the allometry of root production and root loss in *Acer rubrum* and *Betula papyrifera*. *American Journal of Botany*, 101, 608–616.
- Bernhardt ES, Barber JJ, Phippen JS, Taneva L, Andrews JA, Schlesinger WH (2006). Long-term effects of free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on soil respiration. *Biogeochemistry*, 77, 91–116.
- Bowden RD, Davidson E, Savage K, Arabia C, Steudler P (2004). Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 196, 43–56.
- Cao YS (曹裕松), Li ZA (李志安), Fu SL (傅声雷), Zou B (邹碧), Ding YZ (丁永祯), Zhang WX (张卫信) (2006). Effects of simulated nitrogen deposition on carbon release from three plantation soils in Heshan. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition)* (江西农业大学学报(自然科学版)), 28, 101–105. (in Chinese with English abstract)
- Casella E, Soussana JF (1997). Long-term effects of CO<sub>2</sub> enrichment and temperature increase on the carbon balance of a temperate grass sward. *Journal of Experimental Botany*, 48, 1309–1321.
- Chen QS (陈全胜), Li LH (李凌浩), Han XG (韩兴国), Yan ZD (阎志丹) (2003). Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 23, 972–978. (in Chinese with English abstract)
- Chen QS (陈全胜), Li LH (李凌浩), Han XG (韩兴国), Dong YS (董云社), Wang ZP (王智平), Xiong XG (熊小刚), Yan ZD (阎志丹) (2004). Acclimatization of soil respiration to warming. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 24, 2649–2655. (in Chinese with English abstract)
- Cotrufo MF, Gomssan A (1997). Elevated CO<sub>2</sub> enhances below-ground C allocation in three perennial grass species at different levels of N availability. *New Phytologist*, 37, 421–431.
- Dai A, Meehl GA, Washington WM, Wigley TML, Arblaster JM (2001a). Ensemble simulation of twenty-first century climate changes: business-as-usual versus CO<sub>2</sub> stabilization. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 2377–2388.
- Dai A, Wigley TML, Boville BA, Kiehl JT, Buja LE (2001b). Climates of the twentieth and twenty-first centuries simulated by the NCAR Climate System Model. *Journal of Climate*, 14, 485–519.
- Houghton RA (2001). Counting terrestrial sources and sinks of carbon. *Climatic Change*, 48, 525–534.
- Houghton JT, Jenkins GJ, Ephraums JJ (1990). *Climate Change: The IPCC Scientific Assessments*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, USA.
- Hulme M, Osborn TJ, Johns TC (1998). Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophysical Research Letters*, 25, 3379–3382.
- Inclan R, Dela Torre D, Benito M, Rubio A (2007). Soil CO<sub>2</sub> efflux in a mixed pine-oak forest in Valsain (central Spain). *The Scientific World Journal*, 7, 166–174.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001). *Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Cambridge University Press, Cambridge, USA, 1–51.
- Janssens IA, Crookshanks M, Taylor G, Ceulemans R (1998). Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> increases fine root production, respiration, rhizosphere respiration and CO<sub>2</sub> efflux in Scots pine seedlings. *Global Change Biology*, 4, 871–878.
- John L, Billings SA, Ziegler S, Gaindh D, Ryalls R, Finzi AC, Jackson R (2008). Soil carbon sequestration in a pine forest after 9 years of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment. *Global*

- Change Biology*, 14, 2910–2922.
- Jones PD, Hulme M (1996). Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International Journal of Climatology*, 16, 361–377.
- King JS, Hanson PJ, Bernhardt E, DeAngelis P, Norby RJ, Pregitzer KS (2004). A multiyear synthesis of soil respiration responses to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> from four forest FACE experiments. *Global Change Biology*, 10, 1027–1042.
- Kucera CL, Kirkham DR (1997). Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology*, 52, 315–323.
- Li YN (李玉宁), Wang GY (王关玉), Li W (李伟) (2002). Soil respiration and carbon cycle. *Earth Science Frontiers* (地学前缘), 9, 351–357. (in Chinese with English abstract)
- Lin GH, Marino CV, Wei YD, Adams J, Tubiello F, Berry JA (1998). An experimental and modeling study of response to ecosystems carbon exchanges to increasing CO<sub>2</sub> concentrations using a tropical rain forest mesocosm. *Australian Journal of Plant Physiology*, 25, 547–556.
- Liu JX, Zhang DQ, Zhou GY, Benjamin FV, Deng Q, Wang CL (2008). CO<sub>2</sub> enrichment increases cation and anion loss in leaching water of model forest ecosystems in southern China. *Biogeosciences*, 5, 1783–1795.
- MacCracken M, Cubasch U, Gates WL, Harvey LD, Hunt B, Katz R, Lorenz E, Manabe S, McAvaney B, McFarlane N, Meehl G, Meleshko V, Robock A, Stenchikov G, Stouffer R, Wang WC, Washington W, Watts R, Zebiak S (1991). A critical appraisal of model simulations. In: Schlesinger ME ed. *Greenhouse-Gas-Induced Climate Change: a Critical Appraisal of Simulations and Observations, Developments in Atmospheric Science 19*. Elsevier, Amsterdam, 583–591.
- Matson PA, McDowell WH, Townsend AR, Vitousek PM (1999). The globalization of N deposition: ecosystem consequences in tropical ecosystems. *Biogeochemistry*, 46, 67–83.
- Mielnick PC, Dugas WA (2000). Soil CO<sub>2</sub> efflux in a tallgrass prairie. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 221–228.
- Mo JM, Zhang W, Zhu WX, Fang YT, Li DJ, Zhao P (2007). Response of soil respiration to simulated N deposition in a disturbed and a rehabilitated tropical forest in southern China. *Plant and Soil*, 296, 125–135.
- Mo JM, Zhang W, Zhu WX, Gundersen P, Fang YT, Li DJ, Wang H (2008). Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 14, 403–412.
- Nitschelm J, Lüscher A, Hartwig U, Kessel C (1997). Using stable isotopes to determine soil carbon input differences under ambient and elevated atmosphere CO<sub>2</sub> conditions. *Global Change Biology*, 3, 411–416.
- Oberbauer SF, Oechel WC, Riechers GH (1986). Soil respiration of Alaskan tundra at elevated atmospheric carbon dioxide concentrations. *Plant and Soil*, 96, 145–148.
- O'Neil EG (1994). Response of soil biota to elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant and Soil*, 165, 55–65.
- Peng SL (彭少麟), Li YL (李跃林), Ren H (任海), Zhao P (赵平) (2003). Progress in research on soil respiration under the global change. *Advances in Earth Sciences* (地球科学进展), 17, 705–713. (in Chinese with English abstract)
- Pregitzer KS, Zak DR, Curtis PS, Kubiske ME, Teeri JA, Vogel CS (1995). Atmospheric CO<sub>2</sub>, soil nitrogen and turnover of fine roots. *New Phytologist*, 129, 579–585.
- Raich JW, Schlesinger WH (1992). The global carbon dioxide flux on soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44, 81–89.
- Ren R (任仁), Mi FJ (米丰杰), Bai NB (白乃彬) (2000). A chemometrics analysis on the data of precipitation chemistry of China. *Journal of Beijing Polytechnic University* (北京工业大学学报), 26, 90–95. (in Chinese with English abstract)
- Rogers HH, Runion GB, Krupa SV (1994). Plant response to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. *Environmental Pollution*, 83, 155–189.
- Salamanca EF, Kaneko N, Katagifi S (2003). Rainfall manipulation effects on litter decomposition and the microbial biomass of the forest floor. *Applied Soil Ecology*, 3, 271–281.
- Schlesinger WH (1990). Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 348, 232–234.
- Schlesinger WH (1995). An overview of the C cycle. In: Lal R, Levine LE, Kimble JM, Stewart BA eds. *Soils and Global Change*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 9–26.
- Schlesinger WH, Andrews JA (2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48, 7–20.
- Sini MN, Jouko S, Seppo K (2004). Soil CO<sub>2</sub> efflux in a boreal pine forest under atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment and air warming. *Global Change Biology*, 10, 1363–1376.
- Tang XL, Liu SG, Zhou GY, Zhang DQ, Zhou CY (2006). Soil atmospheric exchange of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in three subtropical forest ecosystems in Southern China. *Global Change Biology*, 12, 546–560.
- van Ginkel JH, Gorissen A (1998). *In situ* decomposition of grass roots as affected by elevated atmospheric carbon dioxide. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 951–958.
- Vitousek PM, Aber JD, Howarth RW, Likens GE, Matson PA, Schindler DW, Schlesinger WH, Tilman DG (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 7, 737–750.
- Vose JM, Elliott KJ, Johnson DW, Tingey DT, Johnson MG (1997). Soil respiration response to three years of elevated CO<sub>2</sub> and N fertilization in ponderosa pine (*Pinus ponderosa*

- Doug. ex Laws). *Plant and Soil*, 190, 19–28.
- Zak DR, Pregitzer KS, King JS, Holmes WE (2000). Elevated atmospheric CO<sub>2</sub>, fine roots and the response of soil microorganisms: a review and hypothesis. *New Phytologist*, 147, 201–222.
- Zhang DQ, Sun XM, Zhou GY, Yan JH, Wang YS, Liu SZ, Zhou CY, Liu JX, Tang XL, Li J, Zhang QM (2006). Seasonal dynamics of soil CO<sub>2</sub> effluxes with responses to environmental factors in lower subtropical forest of China. *Science in China Series D*, 49 (Suppl. II), 139–149.
- Zhao YT (赵玉涛), Han SJ (韩士杰), Li XF (李雪峰), Hu YL (胡艳玲) (2009). Effect of simulated nitrogen deposition on soil microbial biomass. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 37, 49–51. (in Chinese with English abstract)
- Zheng XH, Fu CB, Xu XK, Yan XD, Huang Y, Han SH, Hu F, Chen GX (2002). The Asian nitrogen cycle case study. *AMBIO-A Journal of the Human Environment*, 31, 79–87.
- Zhou YM (周玉梅), Han SJ (韩士杰), Xin LH (辛丽花) (2006). Soil respiration of *Pinus koraiensis* and *P. sylvestris* trees growing at elevated CO<sub>2</sub> concentration. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 17, 1757–1760.
- Zhou YM (周玉梅), Han SJ (韩士杰), Zheng JQ (郑俊强), Xin LH (辛丽花), Zhang HS (张海森) (2007). Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentrations on soil microbial respiration and root/rhizosphere respiration in forest soils. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), 31, 386–393. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 骆世明 责任编辑: 王 葳