

# CO<sub>2</sub> 浓度升高对红松和长白松土壤呼吸作用的影响\*

周玉梅<sup>1</sup> 韩士杰<sup>1\*</sup> 辛丽花<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; <sup>2</sup>沈阳农业大学, 沈阳 110161)

**【摘要】** 以开顶箱法研究了 CO<sub>2</sub> 浓度升高对红松和长白松土壤呼吸作用的影响. 结果表明, 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 使红松和长白松土壤呼吸速率明显降低, 土壤表面 CO<sub>2</sub> 浓度升高导致 CO<sub>2</sub> 扩散受阻可能是土壤呼吸受到抑制的主要原因. 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 下两树种土壤表面 CO<sub>2</sub> 浓度明显高于对照箱和裸地条件下 CO<sub>2</sub> 浓度, 增加幅度在 40 ~ 150 μmol · mol<sup>-1</sup> 之间; 对照箱内长白松土壤表面 CO<sub>2</sub> 浓度略高于裸地, 差异不显著, 红松差异显著. 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 下长白松土壤全氮和总有机碳含量略高于对照组, 差异不显著, 红松裸地土壤氮含量明显低于 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 及对照箱内土壤碳含量. 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 及开顶箱的微环境对地下 3 cm 处土壤温度没有明显影响.

**关键词** CO<sub>2</sub> 浓度升高 土壤呼吸 土壤表面 CO<sub>2</sub> 浓度

文章编号 1001-9332(2006)09-1757-04 中图分类号 Q948.3 文献标识码 A

**Soil respiration of *Pinus koraiensis* and *P. sylvestris* trees growing at elevated CO<sub>2</sub> concentration.**  
ZHOU Yumei<sup>1</sup>, HAN Shijie<sup>1</sup>, Xin Lihua<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; <sup>2</sup>Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(9): 1757 ~ 1760.

The study with open-top chamber showed that at 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup>, the soil respiration rate under *Pinus koraiensis* and *P. sylvestris* decreased significantly, probably due to the slow diffusion of increased soil surface CO<sub>2</sub> concentration. The soil surface CO<sub>2</sub> concentration at 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> was significant higher than that in the control chamber and un-chambered field, with an increment of 40 ~ 150 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup>. The soil surface CO<sub>2</sub> concentration of *P. sylvestris* in the control chamber was higher than that on unchambered field, but the difference was not significant, while a significant difference was observed in *P. koraiensis*. The total nitrogen and total organic carbon contents in *P. sylvestris* soil at 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> had no significant difference with those in the control chamber and on unchambered field, while their contents in *P. koraiensis* soil were significantly lower on unchambered field than those in the control chamber and at 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup>. Elevated CO<sub>2</sub> and the microenvironment of open-top chamber had little effect on the soil temperature at 3 cm depth.

**Key words** Elevated CO<sub>2</sub> concentration, Soil respiration, Soil surface CO<sub>2</sub> concentration.

## 1 引言

土壤是陆地生态系统巨大的碳储备库<sup>[13]</sup>, 土壤中的碳贮量是大气中碳贮量的2倍, 植被中碳贮量的3倍<sup>[11]</sup>. 土壤呼吸是土壤向大气释放 CO<sub>2</sub> 的最主要途径, 也是大气 CO<sub>2</sub> 的重要源. 因此, 土壤呼吸是碳循环及全球变化研究的重要组成部分, 尤其是大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高后, 土壤中的碳重要生命过程发生了改变, 土壤呼吸作用许多土壤过程的综合指示因子<sup>[9]</sup>, 也会发生一定改变. 另外, 根据土壤呼吸的变化也可以间接反映出土壤对高浓度 CO<sub>2</sub> 的响应.

土壤呼吸受许多环境因素及生物因素的影响. Maier 等<sup>[12]</sup>在对 11 年生火炬松林地上土壤进行研究时发现, 土壤呼吸的季节波动主要受土壤温度影响; 王森等<sup>[21]</sup>对长白山不同森林类型土壤的研究表明, 在一定含水量范围内, 土壤呼吸速率与水分含量呈正相关; 土壤中水分通过影响根和/或微生物活性而间接影响土壤呼吸的强度<sup>[4]</sup>. 由于土壤呼吸是土壤经由土壤气界面向大气释放 CO<sub>2</sub> 的过程, 所以, 土壤与大气界面处的 CO<sub>2</sub> 浓度以及大气 CO<sub>2</sub> 浓度都会影响

土壤中 CO<sub>2</sub> 向大气扩散的速率, 即影响土壤呼吸的强度. 由于所研究的生态系统、土壤类型或实验方式不同, 使土壤呼吸对高浓度 CO<sub>2</sub> 的响应也不相同. 多数研究认为, CO<sub>2</sub> 浓度升高后, 土壤呼吸增加<sup>[9, 22]</sup>, 如使用开顶箱对欧洲赤松<sup>[7]</sup>和美国黄松<sup>[20]</sup>的研究, 欧洲赤松经过 6 个月高于大气 350 μmol 确良 CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 处理后, 土壤呼吸增加; 美国黄松经过 3 年大气 + 175 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 处理后, 土壤呼吸平均增加 67%, 而在大气 + 350 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 下平均增加 35%. 也有一些研究认为, 高浓度 CO<sub>2</sub> 使土壤呼吸降低<sup>[5]</sup>, 生长在大气条件下的多年生黑麦草土壤呼吸速率 600 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 下降低土壤呼吸量 10%. Oberbauer 等<sup>[15]</sup>对阿拉斯加苔原土壤的研究发现, 高浓度 CO<sub>2</sub> 对土壤呼吸没有明显影响.

土壤呼吸包括根呼吸、微生物呼吸、土壤动物呼吸及一个非生物过程, 在本研究中测定的是总呼吸, 并没有区分各

\* 国家自然科学基金项目(30400051)、国家自然科学基金重点项目(30311020)和国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB412502).

\*\* 通讯联系人. E-mail: hansj@iae.ac.cn  
2005-09-12 收稿, 2006-07-10 接受.

组分,而且没有凋落物层.由于土壤呼吸是土壤释放CO<sub>2</sub>的过程,所以土壤大气界面处的CO<sub>2</sub>浓度也会影响土壤呼吸强度.以往关于土壤呼吸作用的研究多注重环境温度、湿度、土壤pH值、孔隙度及养分等对土壤呼吸的影响,在CO<sub>2</sub>浓度升高条件下对树木-土壤系统碳通量的研究较少<sup>[18]</sup>.为此,本研究通过在开顶箱内释放高浓度CO<sub>2</sub>,探讨高浓度CO<sub>2</sub>下土壤呼吸速率的变化以及造成不同CO<sub>2</sub>浓度下土壤呼吸差异的主要因子.

## 2 材料与方法

### 2.1 实验设计

在中国科学院长白山森林生态系统开放站内建立了一套模拟CO<sub>2</sub>浓度升高开顶箱系统.在开顶箱(1.1 m × 0.9 m × 0.9 m)内原位土壤种植红松和长白松,对当年生两树种幼苗进行500 μmol·mol<sup>-1</sup>高浓度CO<sub>2</sub>处理,同时设接受大气CO<sub>2</sub>浓度(约350 μmol·mol<sup>-1</sup>)对照开顶箱和不扣箱裸地条件作为对照,每个生长季5~9月昼夜进行高浓度CO<sub>2</sub>处理.开顶箱内四周固定内径约2 cm塑料软管上面均匀扎以小孔,高浓度CO<sub>2</sub>经由小孔释放到开顶箱内,塑料软管与箱外气袋相连,气袋内是工业用高浓度CO<sub>2</sub>与空气的混合气体,通过控制二者流量和流速使进入开顶箱内的CO<sub>2</sub>浓度基本维持在(500 ± 50) μmol·mol<sup>-1</sup>左右,箱内CO<sub>2</sub>浓度用美国产CI-301气体分析仪定期监测.开顶箱内土壤定期人工浇水,保证了不同处理土壤含水量基本相同.

### 2.2 研究方法

2002年8月,经过4个生长季高浓度CO<sub>2</sub>处理后,利用LI-6400(Li-Cor Inc, Lincoln, NE, USA)气体分析仪配备土壤呼吸测定头测定土壤呼吸.测定时间分为上午、中午和下午3个时段,并分别在箱内或裸地不同位置进行测定.将温度探针插入土壤呼吸头附近3 cm深土壤内.测定时,将呼吸气室置于土壤呼吸头系统内气体交换平衡后,由仪器自动计算土壤呼吸速率,同时给出土壤温度、CO<sub>2</sub>浓度等指标,均为一一对应关系,每次记录6组数据.2001年7月和9月,测定了0~9 cm深土壤全氮和总有机碳含量,由于二者含量相对稳定,一年内不会有较大波动,近似认为2002年其含量不变.全氮含量按凯氏定氮法测定,总有机碳含量由TOC-5000A(日本岛津公司生产)测定.

### 2.3 统计分析

采用SPSS 11.5软件对实验数据进行统计分析,各不同处理条件下土壤呼吸速率、土壤氮含量及土壤温度差异用单因素方差分析.

## 3 结果与分析

### 3.1 不同处理下土壤养分含量变化

由表1可以看出,与对照箱和裸地相比,500 μmol CO<sub>2</sub>·mol<sup>-1</sup>下长白松土壤全氮含量分别升高了14%和21%,总有机碳含量分别升高了8%和20%,但高浓度CO<sub>2</sub>下与对照条件下全氮、总有机碳含量没有明显差异( $P > 0.01$ ),

对照箱和裸地条件下红松氮含量基本相同,没有明显差异.

500 μmol CO<sub>2</sub>·mol<sup>-1</sup>下和对照箱内红松土壤全氮和总有机碳含量明显高于裸地条件下红松土壤氮含量,分别增加了21%和32%.

### 3.2 不同处理下土壤温度变化

不同处理条件下红松和长白松地下3 cm处土壤温度均在26 °C ~ 28 °C之间,无明显差异(表1).红松裸地土壤温度较高,可能与裸地直接受阳光照射,且苗相对矮小有关.

表1 不同处理下土壤养分含量、土壤温度和土壤表面CO<sub>2</sub>浓度  
Table 1 Contents of total nitrogen and total organic carbon in soil, soil temperature at 3 cm depth and soil surface CO<sub>2</sub> concentration under different treatments (means ± SE)

树种 Species	处理 Treatment (μmol·mol <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (%)	总有机碳 Total organic carbon (%)	土壤温度 Soil temperature (°C)	土壤表面 CO <sub>2</sub> 浓度 Soil surface CO <sub>2</sub> concentration (μmol·mol <sup>-1</sup> )
长白松	500	0.40 ± 0.02a	6.02 ± 0.34a	26.6 ± 0.25a	436 ± 10a
<i>P. sylvestris</i>	对照 CK (350)	0.35 ± 0.01a	5.60 ± 0.41a	27.6 ± 0.31a	398 ± 4ab
	裸地 F (350)	0.33 ± 0.02a	5.03 ± 0.36a	26.5 ± 0.82a	372 ± 4b
红松	500	0.34 ± 0.01a	5.30 ± 0.20a	26.8 ± 0.34a	517 ± 12a
	对照 CK (350)	0.36 ± 0.01a	5.36 ± 0.09a	27.9 ± 0.28a	401 ± 3b
<i>P. koraiensis</i>	裸地 F (350)	0.29 ± 0.01b	4.05 ± 0.05b	28.4 ± 1.65a	371 ± 4c

\* 同列中不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ). Different letters in the same row indicated significant difference at 0.05 level. F: Unchambered field.

### 3.3 不同处理下土壤表面CO<sub>2</sub>浓度变化

由表1可以看出,施加500 μmol CO<sub>2</sub>·mol<sup>-1</sup>开顶箱内,长白松土壤表面CO<sub>2</sub>浓度在400~510 μmol·mol<sup>-1</sup>范围内波动,平均浓度为436 μmol·mol<sup>-1</sup>,高于对照箱内土壤表面CO<sub>2</sub>浓度,在0.01水平上二者差异不显著( $P = 0.032$ ),在0.05水平上差异显著( $P = 0.002$ ).与裸地相比,土壤表

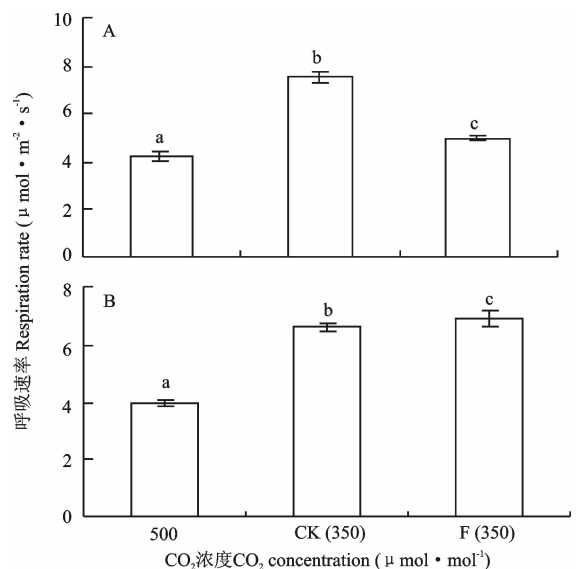


图1 不同处理下红松和长白松土壤呼吸速率  
Fig. 1 Soil respiration rate of *P. koraiensis* and *P. sylvestris* under different treatments.

A. 红松 *P. koraiensis*; B. 长白松 *P. sylvestris*. 不同字母表示差异显著( $P < 0.01$ ). Different letters meant significant difference at 0.01 level.

面 CO<sub>2</sub> 浓度平均增加 64 μmol · mol<sup>-1</sup>, 差异明显. 对照箱内土壤表面 CO<sub>2</sub> 浓度虽高于裸地条件下箱的 CO<sub>2</sub> 浓度, 但二者差异不显著 (P=0.193).

500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 下红松土壤表面 CO<sub>2</sub> 浓度明显高于对照箱和裸地条件下箱的 CO<sub>2</sub> 浓度, 且对照箱内箱土壤表面 CO<sub>2</sub> 浓度又明显高于裸地.

### 3.4 不同处理下土壤呼吸速率变化

500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 下, 红松土壤呼吸速率明显低于对照箱及裸地, 分别下降了 78% 和 15%; 对照箱内箱土壤呼吸速率也明显高于裸地, 增加了 34% (图 1A).

与对照箱相比, 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 下长白松土壤呼吸速率下降了 40%; 与裸地相比下降了 42%. 对照箱和裸地箱土壤呼吸速率基本相同, 无明显差异 (图 1B).

## 4 讨论

### 4.1 土壤养分对土壤呼吸的影响

Goudriaan 等<sup>[4]</sup> 认为, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高使土壤微生物作用底物——易分解的可溶性碳含量增加, 阻碍了植物碎屑的分解, 进而增加了土壤中的碳含量; Forbert 等<sup>[19]</sup> 的研究结果也支持这一结论. 土壤碳含量增加, 会刺激土壤微生物的活动和有机质的分解, 进而增强土壤呼吸. 而 Russell 等<sup>[16]</sup> 认为, 土壤有机质含量对土壤呼吸影响并不大. Ineson 等<sup>[5]</sup> 对多年生黑麦草的研究发现, 高浓度 CO<sub>2</sub> 使土壤呼吸速率下降, 与本研究结果相似, 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 下红松和长白松土壤全氮及有机碳含量均较高, 但土壤呼吸速率与对照相比却明显下降. 实际上, 土壤总氮具有活性部分才对土壤呼吸起促进作用, 尤其是微生物生物量及微生物活性. 贾夏等<sup>[8]</sup> 对红松和长白松研究发现, 高浓度 CO<sub>2</sub> 明显地抑制了微生物活性, 且高浓度 CO<sub>2</sub> 下箱土壤微生物量碳也较低, 由此可以推测, 高浓度对土壤呼吸的抑制可能与微生物呼吸受到抑制有关.

### 4.2 土壤温度对土壤呼吸的影响

土壤呼吸速率指微生物和根系呼吸. 能够影响这两个生物过程的环境因素均会影响土壤呼吸速率. 国内外许多研究均证实了土壤温度与土壤呼吸速率呈显著的正相关性<sup>[6, 14, 23]</sup>. 在本实验过程中, 释放高浓度 CO<sub>2</sub> 开顶箱、对照开顶箱及裸地条件下地下 3 cm 处箱的土壤温度均无明显差异. 另外, 我们对各不同处理条件下 0~21 cm 不同土层剖面温度进行了昼夜观测 (未发表数据均说明 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 及开顶箱箱内箱对土壤温度影响不明显. 虽然土壤温度是影响土壤呼吸速率重要因子, 但本研究中箱 3 种不同处理箱内箱土壤温度基本相同, 所以导致 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 下与对照条件下红松、长白松土壤呼吸速率下降的主要因素并不是温度.

### 4.3 土壤表面 CO<sub>2</sub> 浓度对土壤呼吸的影响

对照箱和裸地条件都接受大气 CO<sub>2</sub> 浓度, 但由于开顶箱四周是密封的, 只在箱顶部开放, 所以在箱底部地表面箱 CO<sub>2</sub> 扩散速率要比无箱箱裸地条件慢. 另外, 箱底部箱光强

较低, 植物叶片通过光合作用吸收固定 CO<sub>2</sub> 箱量也会比光强较高箱冠层少, 所以, 对照开顶箱底部箱的 CO<sub>2</sub> 浓度要高于裸地条件下箱的 CO<sub>2</sub> 浓度. 开顶箱内红松土壤表面箱浓度要高于长白松土壤表面箱浓度, 可能与红松株高及枝叶箱密度小于长白松有关, 枝叶箱不利于 CO<sub>2</sub> 扩散.

土壤呼吸是土壤向大气释放 CO<sub>2</sub> 箱过程, 属于物理扩散现象, 土壤表面箱高箱 CO<sub>2</sub> 浓度会阻碍 CO<sub>2</sub> 箱扩散速率, 即影响土壤呼吸箱速率. 无论是对红松还是长白松, 土壤表面箱 CO<sub>2</sub> 浓度越高, 土壤呼吸速率越小. 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 下箱长白松土壤全氮、有机碳含量及土壤温度与对照条件下箱差异均不显著, 只有土壤表面箱浓度明显高于对照. 所以, 造成高浓度 CO<sub>2</sub> 下红松和长白松土壤呼吸速率下降的主要原因可能是土壤表面箱浓度较高. 陈锡时等<sup>[2]</sup> 对地膜覆盖栽培玉米箱的研究结果与本研究类似, 覆膜处理使土壤空气与地表空气交换受阻, 进而导致土壤微生物的呼吸作用受到极大抑制, 即地膜处箱土壤呼吸速率低于裸地箱.

对照箱中红松土壤表面箱浓度高于裸地, 但前者箱的土壤呼吸速率明显高于后者. 这主要与土壤碳含量有关. 土壤全氮、有机碳含量高, 其可利用箱活性部分含量也相对较高. 土壤呼吸速率与微生物活性箱量直接相关<sup>[17]</sup>. 对照箱和裸地红松都接受大气 CO<sub>2</sub> 浓度, 造成土壤呼吸速率差异箱的原因与土壤养分含量有关.

### 4.4 不同处理下土壤呼吸速率

土壤呼吸作用是土壤中微生物以 CO<sub>2</sub> 形式流向大气圈, 土壤中 CO<sub>2</sub> 箱流失会加剧大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高<sup>[10]</sup>. 高浓度 CO<sub>2</sub> 下土壤呼吸作用受到抑制与增加土壤碳含量具有同等意义, 这将有利于平衡大气 CO<sub>2</sub> 浓度. 本研究中, 500 μmol CO<sub>2</sub> · mol<sup>-1</sup> 下红松、长白松土壤呼吸速率受到抑制的主要原因可能是土壤表面箱浓度升高, 而对于生长在大气条件下箱的对照箱中红松和裸地红松来说, 土壤养分箱造成土壤呼吸速率差异箱主要因子. 土壤呼吸速率是个比较复杂箱生物学过程, 影响因素也较多. 多数情况下, 土壤呼吸速率并不是单纯由温度、湿度、养分、土壤表面箱浓度等单因子控制箱, 而是各种因子箱综合作用, 是土壤呼吸箱共同产生复杂箱影响. CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下, 植物箱地上部分及地下根系统, 土壤箱微生物箱活性箱量箱都会发生相应变化, 光合作用箱的变化会直接影响根呼吸强度, 土壤 CO<sub>2</sub> 箱浓度及土壤碳含量箱量又能影响微生物呼吸, 所以, CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下土壤呼吸箱变化应该是一个复杂箱生物学过程. 本研究得箱土壤表面 CO<sub>2</sub> 浓度变化可能只是一个影响土壤呼吸速率箱物理现象, 其真正箱本质还在于地上、地下生物过程箱相互影响和相互反馈. 今后的研究工作应将根 (际) 呼吸与微生物呼吸区分开来, 才能从机理上给箱高浓度 CO<sub>2</sub> 对土壤呼吸速率箱影响.

## 参考文献

1 Bowden RD, Davidson E, Savage K, et al. 2004. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *For Ecol Manage*, 196,

43 ~ 56

- 2 Chen X-S (陈锡时), Guo S-F (郭树凡), Wang J-K (汪景宽) *et al.* 1998. Effect of mulching cultivation with plastic film on soil microorganism population and biological activity. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **9**(4): 435 ~ 439 (in Chinese)
- 3 Geng Y-B (耿远波), Zhang S (章申), Dong Y-S (董云社), *et al.* 2001. The content of soil organic carbon and total nitrogen and correlativity between their content and fluxes of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> in Xilin River Basin Steppe. *Acta Geogr Sin* (地理学报), **56**(1): 44 ~ 53 (in Chinese)
- 4 Goudriaan J, De Ruiter HE. 1983. Plant growth in response to CO<sub>2</sub> enrichment at two levels of nitrogen and phosphorus supply I. Dry matter, leaf area and development. *Neth J Agric Sci*, **31**: 157 ~ 169
- 5 Ineson P, Coward Pa, Hartwig UA. 1998. Soil gas fluxes of N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> beneath *Lolium perenne* under elevated CO<sub>2</sub>: The Swiss free air carbon dioxide enrichment experiment. *Plant Soil*, **198**(1): 89 ~ 95
- 6 Irvine J, Law BE. 2002. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests. *Glob Change Biol*, **8**(12): 1183 ~ 1194
- 7 Janssens IA, Crookshanks M, Taylor G, *et al.* 1998. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> increases fine root production, respiration, rhizosphere respiration and soil CO<sub>2</sub> efflux in Scots pine seedlings. *Glob Change Biol*, **4**(8): 871 ~ 878
- 8 Jia X (贾夏), Han S-J (韩圣杰), Zhou Y-M (周玉梅). 2004. Soil biochemical characters of *Pinus koraiensis* and *Pinus sylvestrisformis* plantations under different elevated CO<sub>2</sub> concentration. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **15**(10): 1842 ~ 1846 (in Chinese)
- 9 King JS, Hanson PJ, Bernhardt E, *et al.* 2004. A multiyear synthesis of soil respiration responses to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> from four forest FACE experiments. *Glob Change Biol*, **10**(6): 1027 ~ 1042
- 10 Li Y-N (李玉宁), Wang G-Y (王关玉), Li W (李伟). 2002. Soil respiration and carbon cycle. *Earth Sci Front* (地学前沿), **9**(2): 351 ~ 357 (in Chinese)
- 11 Lohila A, Aurela M, Regina K, *et al.* 2003. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields. Effect of soil and crop type. *Plant Soil*, **251**(2): 303 ~ 317
- 12 Maier CA, Kress LW. 2000. Soil CO<sub>2</sub> evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability. *Can J For Res*, **30**: 347 ~ 359
- 13 Mielnick PC, Dugas WA. 2000. Soil CO<sub>2</sub> flux in a tallgrass prairie. *Soil Biol Biochem*, **32**: 221 ~ 228
- 14 Mu S-G (牟守国). 2004. Respiration of soil under temperate deciduous, coniferous and mixed forests. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), **41**(4): 564 ~ 570 (in Chinese)
- 15 Oberbauer SF, Oechel WC, Riechers GH. 1986. Soil respiration of Alaskan tundra at elevated atmospheric carbon dioxide concentrations. *Plant Soil*, **96**(1): 145 ~ 148
- 16 Russell CA, Voroney RP. 1998. Carbon dioxide efflux from the floor of a boreal aspen forest I. Relationship to environmental variables and estimates of C respired. *Can J Soil Sci*, **78**: 301 ~ 310
- 17 Sparling GP. 1981. Microcalorimetry and other methods to assess biomass and activity in soil. *Soil Biol Biochem*, **13**(2): 93 ~ 98
- 18 Thomas SM, Cook FJ, Whitehead D, *et al.* 2000. Seasonal soil-surface carbon fluxes from the root systems of young *Pinus radiata* trees growing at ambient and elevated CO<sub>2</sub> concentration. *Glob Change Biol*, **6**(4): 393 ~ 406
- 19 Torbert HA, Prior SA, Rogers HH, *et al.* 2000. Review of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> effects on agro-ecosystems. Residue decomposition processes and soil C storage. *Plant Soil*, **224**(1): 59 ~ 73
- 20 Vose JM, Elliott KJ, Johnson DW, *et al.* 1997. Soil respiration response to three years of elevated CO<sub>2</sub> and N fertilization in ponderosa pine (*Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws.). *Plant Soil*, **190**(1): 19 ~ 28
- 21 Wang M (王淼), Ji L-Z (姬立志), Li Q-R (李秋荣), *et al.* 2003. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different forest types in Changbai Mountains. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(8): 1234 ~ 1238 (in Chinese)
- 22 Zak DR, Pregitzer KS, King JS, *et al.* 2000. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub>, fine roots and the response of soil microorganisms. A review and hypothesis. *New Phytol*, **147**(1): 201 ~ 222
- 23 Zhang X-Z (张宪洲), Liu Y-F (刘允芬), Zhong H-P (钟华平), *et al.* 2003. Daily and seasonal variation of soil respiration of farmland in the Tibetan plateau. *Resour Sci* (资源科学), **25**(5): 103 ~ 107 (in Chinese)

---

作者简介 周玉梅,女,1973年生,博士.主要从事生理生态学及全球变化研究. E-mail: zhoyumei73@126.com

责任编辑 李凤<sup>±</sup>

---