长白山阔叶红松林生态系统土壤呼吸作用研究

蒋延玲 周广胜* 赵敏 王旭 曹铭昌

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

摘要 用密闭静态箱式法观测了长白山阔叶红松林生态系统生长季中的土壤呼吸作用。结果表明, 长白山阔叶红松林生态系统土壤呼吸作用日动态呈单峰曲线, 在 18:00 左右达到最大值。土壤呼吸作用在生长季中的动态呈单峰曲线, 7 月最大。6、7、8、9 各月平均土壤呼吸作用分别为 0.22、0.32、0.23 和 0.13 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。温度升高可以提高土壤呼吸作用强度, 地下 5 cm 的土壤温度比气温更能准确地反映土壤呼吸作用的动态变化; 土壤水分含量在一定范围内增加可使土壤呼吸作用强度增加, 但水分过多也会对土壤呼吸产生抑制作用而导致土壤碳排放减少。

关键词 长白山 阔叶红松林 土壤呼吸 动态 影响因子

SOIL RESPIRATION IN BROAD-LEAVED AND KOREAN PINE FOREST ECOSYSTEMS, CHANGBAI MOUNTAIN, CHINA

JIANG Yan-Ling ZHOU Guang-Sheng* ZHAO Min WANG Xu and CAO Ming-Chang

(Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract The emission of carbon from soils to the atmosphere occurs primarily in the form of CO_2 as the result of soil respiration. Increased storage of carbon in soil could help offset further anthropogenic emissions of CO_2 , whereas a release from soil could significantly exacerbate the increase of atmospheric CO_2 and reinforce the greenhouse-warming effect. Because of the enormous carbon storage in soils, even a small change in soil respiration will be equal to or even exceed the annual CO_2 input into the atmosphere from land use changes or burning of mineral fuels. Thus, changes in soil respiration can have a significant positive or negative impact on atmospheric CO_2 concentrations and therefore affect climate change. Controlling soil respiration potentially can abate increases in atmospheric CO_2 concentrations. To understand the soil respiration dynamics of the broad-leaved and Korean pine forests at Changbai Mountain, and to provide a scientific basis for quantitatively assessing carbon source/sink relationships, soil respiration in broad-leaved and Korean pine forests at Changbai Mountain was measured using a static closed chamber method. The results indicated that the diurnal dynamics of soil respiration presented a single-peaked curve with the maximum occurring around 18:00. The seasonal dynamics of soil respiration also showed a single-peaked curve with the maximum occurring in July during the growing season. The mean soil respiration rates during the growing season were 0.22 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ in June, 0.32 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ in July, 0.23 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ in August, and 0.13 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ in September. Increasing temperatures would accelerate the soil respiration rate. Compared to air temperatures, soil temperatures more precisely reflect the dynamics of soil respiration. More soil water in a certain range would improve soil respiration rates, but excessive water in soil would restrain soil respiration rates and decrease CO_2 emission rates from the broad-leaved and Korean pine forests.

Key words Changbai Mountain Broad-leaved and Korean pine forest, Soil respiration, Global climate change

土壤呼吸作用是全球碳循环中一个主要的流通途径, 导致土壤碳以 CO_2 形式流向大气圈。土壤呼吸作用, 严格意义上讲是指未受扰动的土壤中由于土壤有机体、根和菌根的呼吸排放 CO_2 的所有代谢作用(Singh & Gupta, 1997), 包括 3 个主要的组成部

分: 根呼吸、地表凋落物呼吸和土壤有机质(包括根碎屑)呼吸(Raich & Schlesinger, 1992)。全球土壤呼吸总的碳排放量约为 68 ~ 100 $\text{PgC}\cdot\text{a}^{-1}$, 约是输入土壤表层新鲜岩屑数量的 2.3 ~ 3.3 倍, 仅次于全球陆

收稿日期: 2004-02-19 接受日期: 2004-11-22
基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043407)、国家自然科学基金重点项目(40231018)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-SW-01-12)共同资助
在野外实验观测和论文完成过程中受到中国科学院长白山森林生态系统定位站韩士杰站长、关德新副站长、王淼副站长、中国科学院植物研究所许振柱博士和翁恩生博士的大力帮助, 特此致谢
* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: zhougs@public2.bta.net.cn

地总初级生产力(*GPP*)的估算值 100 ~ 120 PgC·a⁻¹,而高于净初级生产力(*NPP*)的量值 50 ~ 60 PgC·a⁻¹,是全球碳循环的一个主要流通途径。

由于土壤中巨大的碳贮量,土壤呼吸作用即使发生较小的变化也会等于或超过由于土地利用改变和(或)矿物燃料燃烧而进入大气的 CO₂ 年输入量。所以,土壤呼吸作用的变化能显著地减缓或加剧大气中 CO₂ 的增加,进而影响气候变化。控制土壤呼吸作用将能有效地缓和大气中 CO₂ 浓度的升高和全球变暖(李玉宁等,2002)。因而,研究土壤呼吸作用是全球变化和陆地生态系统碳循环研究的一个重要内容。

位于我国东北长白山地区的温带森林一直是我国开展森林生态系统研究的重要研究站点,自 1979 年建立中国科学院长白山森林生态系统定位研究站以来,已在森林碳循环方面开展了广泛的观测和模拟研究(李文华等,1981;徐振邦等,1986;程伯容等,1992;延晓东和赵士洞,1995;张娜等,2003),但由于缺乏对土壤呼吸作用的研究,因而无法准确地评估其碳平衡。

本文试图通过野外观测实验了解长白山阔叶红松林生态系统的土壤呼吸作用动态,揭示影响土壤呼吸作用的环境因子,为定量、准确地评估阔叶红松林生态系统碳收支提供科学依据。

1 样地概况

实验地点位于长白山北坡,中国科学院长白山森林生态系统定位研究站的阔叶红松林标准样地附近(42°24' N, 128°6' E),海拔 740 m,林分为 180 a 左右的天然林。该地区气候属于受季风影响的温带大陆性山地气候,春季干燥而多风;夏季短暂,温暖而多雨;秋季凉爽而多雾;冬季漫长,晴朗而寒冷。土壤为白浆化暗棕色森林土,土质肥沃,腐殖质含量高,适于各种树木生长。阔叶红松林是长白山地区的地带性植被,组成树种以红松(*Pinus koraiensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)为主(占 90%),混有蒙古栎(*Quercus mongolica*)和一些槭树科树种如色木(*Acer mono*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、白牛槭(*Acer mandshuricum*)等,郁闭度 0.8(徐振邦等,1986)。

2 实验方法

土壤呼吸作用的观测采用密闭静态箱式法(杨

平和杜宝华,1996;Bekku *et al.*, 1997)。土壤呼吸箱为 50 cm × 50 cm × 15 cm 的扁方形有机玻璃罩,下面有一金属底座。于每次观测前随机选取 3 个 50 cm × 50 cm 样方,先将土壤呼吸箱的底座砸入土中 5 cm 深,砸实外圈土壤以免漏气,再将样方内所有植物的地上部分全部剪掉。为消除砸底座震动土壤造成对土壤呼吸作用的影响,扣好底座后先静置 1 d,第二天再扣上土壤呼吸箱开始观测实验。从 2002 年 6 月 ~ 9 月(植物生长季),每月观测 2 ~ 3 次。每次从早 8 点左右至晚 6 点左右,每小时观测 1 次。另外,每月进行 1 次 24 h 的连续观测。同时,监测样地内的温、湿度、土壤温度(5、10、15 和 20 cm)和土壤水分含量(0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 和 30 ~ 40 cm,用 ΔT-HH2 土壤水分仪观测),以及箱体内的温湿度变化。

利用红外 CO₂ 分析仪直接测定箱内 CO₂ 浓度的变化值,利用以下公式将其换算为土壤呼吸速率:

$$Q = 0.15 \times (\Delta C / \Delta t) \times (T_0 / T) \times (P / P_0) \times 12 \times 3.6 / 22.4$$

式中, *Q* 为土壤呼吸作用速率(gC·m⁻²·h⁻¹), (Δ*C*/Δ*t*)为在 Δ*t* 时间内土壤呼吸箱内 CO₂ 浓度变化率, *T*₀ = 273.15k, *T* 为箱内的绝对温度(k), *P* 为当地的实际大气压(hPa), *P*₀ 为标准大气压(1.013 × 10⁵ hPa)。

3 结果和讨论

3.1 土壤呼吸作用日动态

阔叶红松林土壤呼吸作用日动态表现为单峰曲线形式(图 1),一般在 18:00 左右土壤呼吸作用最强,而凌晨 5:00 左右土壤呼吸作用最弱。土壤呼吸作用的这种规律性变化主要受温度的影响,即随着温度的升高,土壤微生物活动旺盛,分解作用增强,因而土壤呼吸作用增强。但土壤呼吸作用的变化比气温的变化滞后,而与土壤温度变化相一致。这是由于气温是间接地通过改变土壤温度来影响土壤呼吸作用的,而土壤温度比气温的变化滞后。阔叶红松林土壤呼吸的这一动态变化规律与国内外关于森林土壤呼吸作用的研究结果相近(刘绍辉等,1998;罗辑等,2000;Xu & Qi, 2001)。

3.2 土壤呼吸作用季节动态

阔叶红松林的土壤呼吸作用在植物生长季中的动态变化如图 2 所示。从 6 月份开始,随着气温的上升、降水的增加,土壤微生物活动日趋活跃,枯枝落叶分解速率不断增大,因而土壤呼吸作用也逐渐加强。7月高温、高湿的环境条件最适于有机物分

图1 阔叶红松林土壤呼吸作用与土壤温度日动态
Fig.1 Diurnal dynamic of soil respiration and soil temperature of the broad-leaved and Korean pine forest

图2 阔叶红松林土壤呼吸作用季节动态
Fig.2 Seasonal soil respiration dynamic of broad-leaved and Korean pine forest

解、根系呼吸和微生物的活动,因而土壤呼吸作用在此时达到最大。7月以后,则随着温度的降低而土壤呼吸作用减弱。虽然8月降水较多,土壤水分含量较大,但较低的温度限制了有机物分解、根系呼吸和微生物的活动,因而土壤呼吸作用较弱。9月由于降水减少、气温下降,土壤呼吸作用受低温和干燥的双重限制而强度减小。6、7、8、9月平均土壤呼吸速率分别为 0.22、0.32、0.23 和 0.13 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。生长季中阔叶红松林的平均土壤呼吸作用为 0.21 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,比热带雨林(0.46 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)(骆士寿等,2001)和温带阔叶林(0.26 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)(蒋高明和黄银晓,1997)的土壤呼吸作用强度要小。

3.3 环境因子对土壤呼吸作用的影响

3.3.1 温度 温度升高对植物根系呼吸、土壤微生物活动和有机质分解作用等都具有促进作用,因而

土壤呼吸作用会随着温度的升高而增强。阔叶红松林土壤呼吸作用的观测结果表明,该森林生态系统的土壤呼吸作用与林内近地面气温的相关关系不明显,而与地下 5 cm 的土壤温度有较强的相关关系(图 3),因而用地下 5 cm 的土壤温度比气温更能准确地反映阔叶红松林土壤呼吸作用的动态变化。

3.3.2 水分 水分对阔叶红松林土壤呼吸作用的影响主要通过改变林下土壤的湿润程度来实现。一般认为在一定范围内土壤呼吸强度随土壤水分的增加而增加。土壤过干或过湿均不利于微生物的活动,导致土壤呼吸强度减弱(杜宝华,1994)。在对阔叶红松林的土壤呼吸作用研究中也证实了这种现象。阔叶红松林的土壤呼吸作用速率与 0~10 cm 的土壤水分含量呈二次曲线关系(图 4),即当土壤水分在 7.4% 以下时,土壤呼吸作用速率随着土壤水分的增加而增大;当土壤水分含量超过这一值时,土壤呼吸作用速率则随着土壤水分的增加而减小。二者相关系数 $R^2 = 0.64 (n = 121)$ 。

图3 土壤呼吸与温度关系
Fig.3 Relationship between soil respiration and temperature
a: 近地面气温 Above ground temperature b: 5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm

图4 土壤呼吸与0~10 cm土壤水分含量的关系

Fig.4 Relationship between soil respiration and soil water content at 0–10 cm

4 结 论

阔叶红松林土壤呼吸作用的日动态呈单峰曲线,主要受一天中的温度变化影响,但比气温的变化滞后,而与土壤温度变化较一致。土壤呼吸作用在生长季中的动态变化呈单峰曲线,其季节差异主要受各月的温度和水分条件的影响。6~9各月平均土壤呼吸作用速率分别为0.22、0.33、0.23和0.07 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

阔叶红松林土壤呼吸作用随着温度的升高而增强,其中以土壤呼吸与地下5 cm土壤温度的相关关系最好。因而用地下5 cm处的土壤温度更能准确地反映阔叶红松林土壤呼吸作用的动态变化。水分对土壤呼吸的影响呈二次曲线关系,即在一定土壤水分范围内,阔叶红松林土壤呼吸作用随着土壤水分的增加而增大,水分过多或过少都会抑制凋落物分解作用、根呼吸及土壤微生物的活动,从而降低土壤呼吸作用的强度。

文中在揭示阔叶红松林土壤呼吸作用的日、季动态的同时,简单地分析了各环境因子对阔叶红松林土壤呼吸作用的独立影响,而在更多情况下是几个因子相结合共同对土壤呼吸作用产生影响。例如在许多研究中,对土壤呼吸与土壤水分间的多元回归分析表明,在土壤年呼吸量的总变异中,至少60%以上是由土壤温度和土壤含水量的协同效应引起的(李凌浩和陈佐忠,1998)。因而,今后的工作将进一步研究各影响因子对阔叶红松林土壤呼吸作用的综合影响。

参 考 文 献

Bekku Y, Koizumi H, Oikawa T, Iwaki H (1997). Examination of four methods for measuring soil respiration. *Applied Soil Ecology*,

5, 247–254.
 Cheng BR (程伯容), Ding GF (丁桂芳), Xu GS (许广山), Zhang YH (张玉华) (1992). The biological nutrient cycle of broad leaved/Korean pine forest at Changbai Mountain. *Forest Ecosystem Research* (森林生态系统研究), 6, 185–193. (in Chinese)
 Du BH (杜宝华) (1994). The present and future study situation of CO_2 source and flux in the canopy of crop. *Agricultural Meteorology* (中国农业气象), 15, 44–48. (in Chinese with English abstract)
 Jiang GM (蒋高明), Huang YX (黄银晓) (1997). A study on the measurement of CO_2 emission from the soil of the simulated *Quercus liaotungensis* forest sampled from Beijing mountain areas. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 17, 447–482. (in Chinese with English abstract)
 Li LH (李凌浩), Chen ZZ (陈佐忠) (1998). Soil respiration in grassland communities in the world. *Journal of Ecology* (生态学杂志), 17 (4), 45–51. (in Chinese with English abstract)
 Li WH (李文华), Deng KM (邓坤枚), Li F (李飞) (1981). Study on the productivity of the main ecosystem distributed at Changbai Mountain. *Forest Ecosystem Research* (森林生态系统研究), 2, 34–50. (in Chinese)
 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(2), 351–357. (in Chinese with English abstract)
 Liu SH (刘绍辉), Fang JY (方精云), Makoto K (1998). Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 22, 119–126. (in Chinese with English abstract)
 Luo J (罗辑), Yang Z (杨忠), Yang QW (杨清伟) (2000). CO_2 emission from soils in *Abies fabric* forest region on the east slope of Gongga Mountain. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 37, 402–409. (in Chinese with English abstract)
 Luo SS (骆士寿), Chen BF (陈步峰), Li YD (李意德), Lin MX (林明献), Zhou GY (周光益), Chen DX (陈德祥), Qiu JR (邱坚锐) (2001). Litter and soil respiration in a tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 21, 2013–2017.
 Raich JW, Schlesinger WH (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44(B), 81–99.
 Singh JS, Gupta WH (1997). Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Botanical Review*, 43, 449–529.
 Xu M, Qi Y (2001). Soil-surface CO_2 efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 7, 667–677.
 Xu ZB (徐振邦), Li X (李昕), Dai HC (戴洪才), Tan ZX (谭征祥), Zhang YP (章依平), Guo XF (郭杏芬), Peng YS (彭永山), Dai LM (代力民) (1986). Study on the biomass and productivity of broad leaved/Korean pine forest at Changbai Mountain. *Forest Ecosystem Research* (森林生态系统研究), 5, 33–47. (in Chinese)
 Yan XD (延晓冬), Zhao SD (赵士洞) (1995). Simulating the carbon dynamic of temperate mixed conifer/broad leaved forests. *Journal of Ecology* (生态学杂志), 14 (2), 6–13. (in Chinese with English abstract)
 Yang P (杨平), Du BH (杜宝华) (1996). Overseas study dynamic on soil CO_2 emission. *Agricultural Meteorology* (中国农业气象), 17, 48–50. (in Chinese)
 Zhang N (张娜), Yu GR (于贵瑞), Zhao SD (赵士洞), Yu ZL (于振良) (2003). Study on the ecosystem carbon balance at Changbai Mountain natural protection area. *Environmental Science* (环境科学), 24, 24–32. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 黄建辉 责任编辑: 姜联合