

土壤温度和湿度对长白松林土壤呼吸速率的影响^{*}

刘颖^{1,2} 韩士杰^{1**} 胡艳玲¹ 戴冠华³

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039; ³ 中国科学院长白山森林生态系统定位研究站, 二道白河 133613)

【摘要】 2003年6月17日、8月5日和10月10日, 研究了长白山长白松林地内土壤呼吸速率和断根土壤呼吸速率日变化, 并于2004年5~9月对其季节变化进行了测定。结果表明, 土壤总呼吸速率和断根土壤呼吸速率的日变化均呈单峰型, 峰值一般出现在12:00~14:00, 8月份土壤呼吸速率的日变化幅度小于6月份和10月份。土壤总呼吸速率、断根土壤呼吸速率和根系呼吸速率具有明显的季节变化, 6~8月份较高, 5月份和9月份较低。2004年5~9月份, 土壤总呼吸速率、断根土壤呼吸速率和根系呼吸速率的平均值分别为3.12、1.94和1.18 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 根系呼吸对土壤总呼吸的贡献为26.5%~52.6%。土壤呼吸速率与土壤温度之间呈显著的指数相关, 与土壤湿度之间呈线性相关。土壤总呼吸速率、断根土壤呼吸速率和根系呼吸速率的 Q_{10} 值分别为2.44、2.55和2.27, 断根土壤呼吸速率对温度的敏感程度大于土壤总呼吸速率和根系呼吸速率。土壤总呼吸速率对土壤湿度的敏感程度大于根系呼吸, 断根土壤呼吸速率对土壤湿度的敏感程度最差。

关键词 长白松 土壤呼吸速率 土壤温度 土壤湿度
文章编号 1001-9332(2005)09-1581-05 **中图分类号** S154 **文献标识码** A

Effects of soil temperature and humidity on soil respiration rate under *Pinus sylvestriformis* forest. LIU Ying^{1,2}, HAN Shijie¹, HU Yanling¹, DAI Guanhua³ (¹ Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, China; ² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; ³ Research Station of Changbai Mountain Forest Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Erdaobaihe 133613, China). - Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(9): 1581~1585.

Employing root-wrenching method and LF6400-09 soil respiration chamber, this paper measured the diurnal changes of soil respiration rate with and without roots in situ on June 17, August 5, and October 10, 2003. The seasonal changes of soil respiration were also measured from May to September, 2004. The results showed that both the total and the root-wrenched soil respiration appeared single diurnal pattern, with the peaks presented during 12:00~14:00. The diurnal fluctuation of soil respiration on August 5 was smaller than that on June 17 and October 10. There were also obvious seasonal changes in total and root-wrenched soil respiration, as well as in root respiration, which were higher from June to August but lower in May and September. The average total soil respiration, root-wrenched soil respiration, and root respiration were 3.12, 1.94 and 1.18 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, and the contribution of roots to total soil respiration ranged from 26.5% to 52.6% from May to September, 2004. There were exponential correlations between respiration rate and soil temperature, and linear correlations between respiration rate and soil humidity. The Q_{10} values were 2.44, 2.55 and 2.27 for total soil respiration, root-wrenched soil respiration, and root respiration, respectively. The effect of soil temperature on root-wrenched soil respiration was larger than that on total soil respiration and root respiration. Soil humidity had a larger effect on total soil respiration than on root respiration and root-wrenched soil respiration.

Key words *Pinus sylvestriformis*, Soil respiration rate, Soil temperature, Soil humidity.

1 引言

目前, 全球气候变化研究已成为热点之一。CO₂作为一种重要的温室气体, 其源、汇及通量的测定受到格外重视。全球土壤作为一个巨大的碳库(1.394 $\times 10^{18}$ gC)^[18], 是大气CO₂的重要源或汇。土壤碳流量及其储量依赖于几个相关过程, 自然生态系统中, 碳主要以凋落物和细根死亡的方式进入土壤, 而凋落物和细根量主要取决于植被第一性生产; 有机质的矿化既依赖于环境温度和水分条件, 也依赖于

其本身的特性。陆地生态系统碳平衡在调节地球表面温度中起着重要作用^[20], 陆地上主要生态系统的净初级生产规律已为人们所熟悉, 但对地下呼吸速率过程却了解得相对较少^[18]。

土壤呼吸包括三类生物学过程(土壤微生物呼吸、植物根系呼吸和土壤动物呼吸)和一个非生物过

^{*}国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412502)和中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX1-SW-01)。

^{**}通讯联系人。

2004-06-24收稿, 2005-04-20接受。

程(含碳矿物质的化学氧化作用)^[21]。根系是土壤呼吸速率的主要贡献者之一。野外根系的准确贡献量很难直接测量,无法用不扰动土壤的办法将根系排除。Hanson 等^[7]比较了几种区分根呼吸和土壤微生物呼吸对土壤呼吸速率贡献量的方法:组分(凋落物、根系和土壤)合成法、根系排除法和同位素示踪法;此外还有根系生物量外推法。每种方法各有优缺点。国外有关根系呼吸对土壤呼吸速率的贡献有许多研究^[1,2,10,14,15,19,22],但不同生态系统间差异很大,国内对土壤呼吸速率及其影响因素研究也有报道^[4,9,11~13,16,23,25],但关于根系对土壤呼吸速率的贡献的研究较少,而长白山地区根系对土壤呼吸速率贡献的研究还未见报道。本研究采取根排除法,采用美国 LFCOR 公司生产的 LF6400 光合作用分析仪(配带土壤呼吸室)首次测定了土壤呼吸速率并估算根系对土壤呼吸速率的贡献,旨在了解该地的土壤释放 CO₂ 规律,寻找影响土壤呼吸速率的生态因子,从而为构建森林生态系统碳循环模型及其对全球变化的响应提供参数。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究地区概况

本实验在长白松(*Pinus sylvestriiformis*)林中进行。该群落分布在我国吉林省长白山二道白河镇附近的河流冲积平原(42°24'N, 128°28'E, 海拔高约 690 m),面积达 100 hm²,已被围栏保护,地势平坦,但自东向西倾斜。群落比较均一,垂直结构分 3 层,乔木层是长白松纯林,郁闭度 0.8,平均树高 14.86 m,胸径平均为 16.87 cm,平均密度 1 653 株·hm⁻²,木材蓄积量约 300 m³·hm⁻²。灌木层高度在 4 m,盖度 40%,优势种主要有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、鼠李(*Rhamnus dahurica*)、小叶鼠李(*Rh. pauciflorus*)、疣枝卫茅(*Evonymus pauciflorus*)、长白忍冬(*Lonicera ruprechtiana*)和黑白悬钩子(*Rubus malumuranus*)等。草本层盖度仅为 40%左右,优势种有苔草(*Carex* spp.)、大油芒(*Spodiopogon sibiricus*)、小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)、凤毛菊(*Saussurea japonica*)和柴胡(*Bupleurum chinense*)等。

该地区属受季风影响的温带大陆性气候,春季干旱,夏季短暂、温暖而多雨,秋季凉爽多雾,冬季漫长、晴朗而寒冷。年均气温 3.9℃,年均降雨量 700.5 mm。土壤为发育在火山灰上的山地暗棕色森林土,土层薄、结构性差,硅酸盐含量大,腐殖质含量低,持水能力差、透水性能强,pH 值约在 4.2~4.9。

2.2 实验方法

2.2.1 土壤呼吸速率测定 长白松侧根主要分布于 30 cm 以上的土层,30 cm 以下几乎没有分布。于 2003 年 5 月 15 日在样地内用钢桶打 5 个深 30 cm 的土柱,将根切断,插入内

径 10.5 cm(与呼吸室内径相同)的塑料管,每个管子旁边放置一个内径 10.5 cm、长 4.5 cm 的土壤环,一段时间后用 LF6400 光合作用测定仪(配带土壤呼吸室),于 2003 年 6 月 17 日、8 月 5 日和 10 月 10 日的 8:00~16:00,每 2 h 测定管内和土壤环内的土壤呼吸速率。于 2004 年 5~9 月进行土壤呼吸速率的季节变化测定,约每周 9:00~11:00 测定一次。根据土壤环与塑料管内土壤呼吸的差值计算根呼吸对土壤总呼吸的贡献。

2.2.2 环境因子测定 土壤 5 cm 的温度用 LF6400 光合作用分析系统配带的温度探针测得,土壤湿度用 TDR 测得。

3 结果与分析

3.1 长白松林不同时期土壤呼吸速率和温度的日变化

由图 1 可以看出,不同时期的土壤总呼吸速率和断根处理后的土壤呼吸日变化均表现为单峰曲线形式,呼吸速率峰值一般出现在 12:00~14:00,土壤和大气温度也有类似变化,说明温度是影响土壤呼吸速率的关键因子。8 月份土壤呼吸速率的日变化幅度小于 6 月份和 10 月份,是由于 8 月份森林郁闭度大于 6 月份和 10 月份,土壤温度变化幅度较小。切断根后的土壤呼吸速率明显低于土壤总呼吸速率,是因为断根直接切断了根系生命活动所需的物质和能量来源。但是不同月份其降低的程度不同,6 月份最低,随着时间的推移,降低的程度逐渐增大。这是由于本实验于 2003 年 5 月 15 日将根切断,6 月份第 1 次测量时,土壤中的根系被切断后,并没有完全枯死,在一段时间内还有呼吸作用,随着切断根系呼吸的影响越来越小,断根后的土壤呼吸速率与土壤总呼吸速率之差逐渐增大。

3.2 长白松林土壤呼吸速率和温度的季节变化

长白松林土壤总呼吸速率和断根土壤呼吸速率有明显的季节变化趋势(图 2)。在整个实验期间,土壤呼吸速率季节变化的总体趋势是夏季高、春秋较低。其趋势基本与大气温度和土壤温度的变化趋势相同,随温度的变化呈现不规则的多峰波动曲线,6~8 月份土壤呼吸速率较高,是因为高温高湿的环境条件有利于土壤呼吸。土壤总呼吸速率在整个实验期间的变化范围是 1.56~4.84 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹,最大值出现在 8 月上旬;断根土壤呼吸的变化范围在 0.97~2.93 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹,最大值出现在 6 月下旬。土壤总呼吸速率和断根土壤呼吸速率在整个生长季内的平均值分别为 3.12 和 1.94 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹。

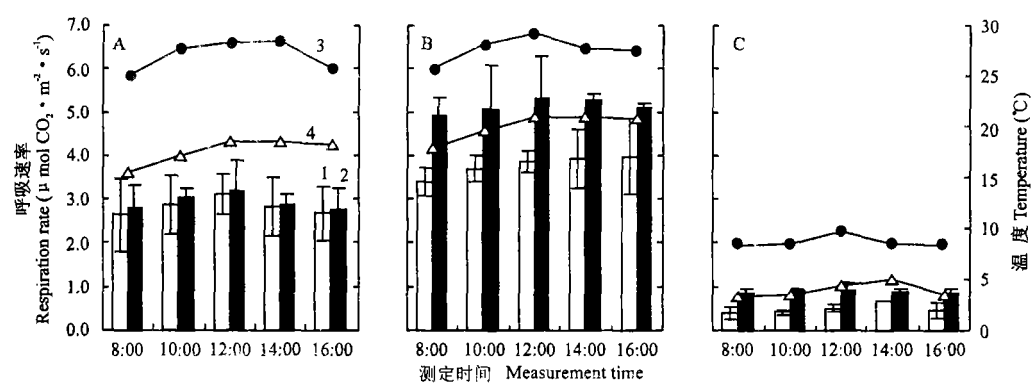


图 1 不同时期土壤呼吸速率和温度的日变化
Fig. 1 Diurnal changes in soil respiration rate and temperature in different period.
A: 6 月 June; B: 8 月 August; C: 10 月 October. 1) 断根土壤呼吸速率 Root-severed soil respiration rate; 2) 土壤总呼吸速率 Total soil respiration rate; 3) 土壤温度 Soil temperature; 4) 大气温度 Air temperature. 下同 The same below.

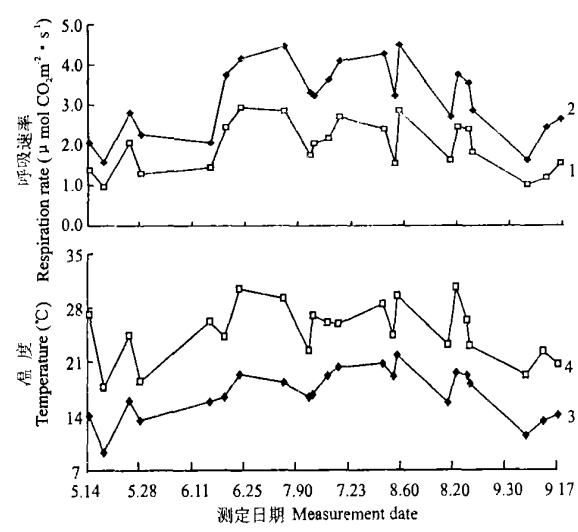


图 2 土壤呼吸速率和温度的季节变化
Fig. 2 Seasonal changes in soil respiration rate and temperature.

由图 3 可见,根系呼吸速率随季节的推移呈现明显的季节变化,其变化趋势基本与土壤总呼吸速率相同,从 5 月份开始,根系呼吸速率逐渐增大,并于 8 月上旬达到最大值($1.87 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),此后随温度的降低逐渐减小,整个生长季内的平均值为 $1.18 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 根系呼吸速率对土壤总呼吸速率的贡献在整个实验期间的变化范围是 26.5 % ~ 52.6 %,平均为 38.1 %.

3.3 土壤温度和湿度对土壤呼吸速率的影响

由图 4 可以看出,土壤总呼吸速率、断根土壤呼吸速率和根系呼吸速率与土壤 5 cm 温度呈显著指数相关.土壤呼吸的 Q_{10} 值通常被用来表征土壤呼吸速率对温度的敏感程度,即温度每升高 10 °C 土壤呼吸速率增加的倍数,据此计算出土壤总呼吸速率、断根土壤呼吸速率和根系呼吸速率的 Q_{10} 值分别为 2.44、2.55 和 2.27,断根土壤呼吸速率对温度的敏感程度大于土壤总呼吸速率、大于根系呼吸速率对

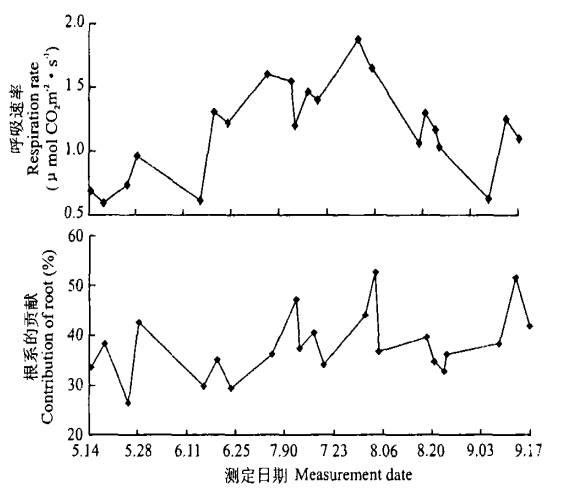


图 3 根系呼吸速率及对土壤总呼吸速率贡献的季节变化
Fig. 3 Seasonal changes in root respiration rate and the contribution of root respiration rate to total soil respiration rate.

温度的敏感程度.

土壤总呼吸速率、断根土壤呼吸速率和根系呼吸速率与土壤湿度之间呈正相关关系(图 4).其中,根系呼吸速率与土壤湿度的相关性好于土壤总呼吸速率,断根土壤呼吸速率最差,表明土壤总呼吸速率对土壤湿度的敏感程度大于根系呼吸速率,断根土壤呼吸速率对土壤湿度的敏感程度最差.

4 讨 论

土壤总呼吸速率和断根土壤呼吸速率具有明显的日变化和季节变化.其变化趋势与基本土壤温度的变化趋势相同,根系呼吸速率也有明显的季节变化,与其他学者^[9~11]的研究结果一致.

全球范围内林木根呼吸速率对土壤总呼吸速率的贡献为 10 % ~ 90 %,大部分在 40 % ~ 60 % 范围内,与森林类型、测定季节有关,实际测得的数值也会受测定方法的影响^[7].本研究测得生长季中根系

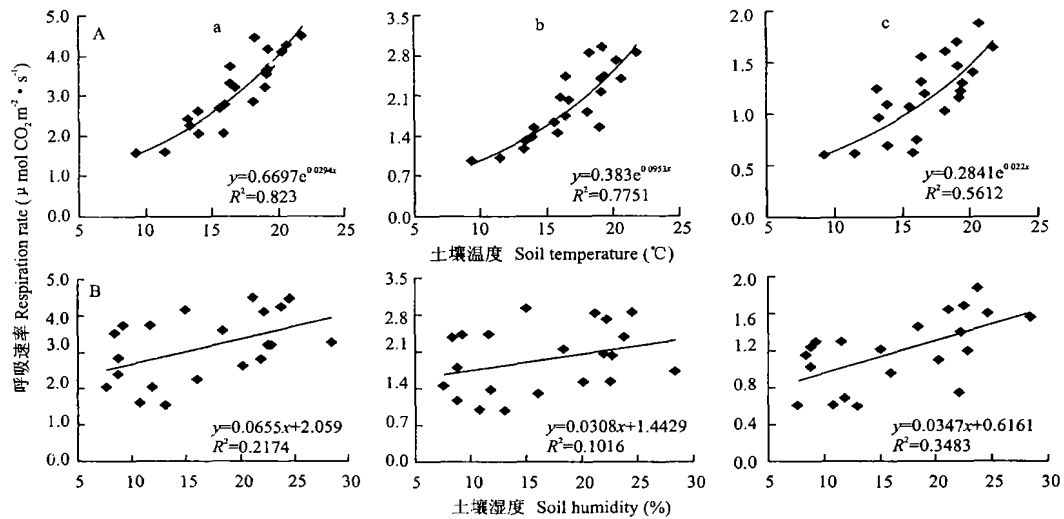


图4 土壤呼吸速率对土壤温度(A)和湿度(B)的响应曲线

Fig. 4 Response of soil respiration rate to soil temperature (A) and humidity (B).

a) 土壤总呼吸速率 Total soil respiration rate; b) 断根土壤呼吸速率 Root-severed soil respiration rate; c) 根系呼吸速率 root respiration rate.

呼吸速率对土壤总呼吸速率的贡献在 26.5% ~ 52.6%, 接近于温带森林根系呼吸速率对土壤总呼吸速率贡献的范围 (33% ~ 62%) [3, 8, 14, 15, 26].

土壤呼吸速率的变化主要受温度和水分共同影响 [17]. 不同研究地点所得到的温度与土壤呼吸速率之间的关系可能各不相同, 但温度对土壤呼吸速率的影响可用一个指数模型来表示 [5], 并以此为基础, 用 Q_{10} 值来说明土壤呼吸速率随温度的变化情况. 有学者研究发现, 北温带森林的 Q_{10} 值在 0.9 ~ 2.2 之间 [6, 24], Raich 和 Schlesinger [18] 研究发现 Q_{10} 值为 2.4. 本研究中土壤总呼吸速率、断根土壤呼吸速率和根系呼吸速率与土壤温度之间都呈显著的指数关系, Q_{10} 值均接近于 2.4. 描述土壤湿度与土壤呼吸速率间关系的模型较多 [5], 但都缺乏普适性. 本研究得到土壤呼吸速率与土壤湿度之间呈线性相关.

断根法估算根系呼吸速率对土壤总呼吸速率贡献的一个基本假设是断根后根系的呼吸活动立刻受到抑制, 但一般认为 [9], 切断后的根系仍能存活并维持呼吸一段时间, 而且死亡根系的分解也可能造成对根系自养呼吸的低估, 但是断根后 3 个月进行实验, 切断的根系对估算根系呼吸速率贡献的影响可以忽略不计. 因此可以认为, 本研究在 2004 年 5 ~ 9 月份得到的根系呼吸速率对土壤总呼吸速率的贡献是合理的. 与挖沟法、砍伐树干法等相比, 原位比较 PVC 管内外土壤呼吸速率不但节省人力, 而且对土壤扰动较小, 是一种简单有效的估算根系呼吸速率对土壤总呼吸速率的贡献的方法.

参考文献

- Atkin OK, Edwards EJ, Loveys BR. 2000. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming. *New Phytol*, **147**: 141 ~ 154
- Behara N, Joshi SK, Pati DP. 1990. Root contribution to total soil metabolism in a tropical forest soil from Orissa, India. *For Ecol Man*, **36**: 125 ~ 134
- Bhupinderpal S, Nordgren A, Ottosson LM, et al. 2003. Tree root and soil heterotrophic respiration as revealed by girdling of boreal Scots pine forest: Extending observations beyond the first year. *Plant Cell Environ*, **26**: 1287 ~ 1296
- Cui Y-T (崔玉亭), Han C-R (韩纯儒), Lu J-D (卢进登). 1997. Dynamics of organic material decomposition and soil respiration in intensive and high-yield agro-ecosystem. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **8**(1): 59 ~ 64 (in Chinese)
- Davidson EA, Verchot LV, Cattanio JH, et al. 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biochemistry*, **48**: 53 ~ 69
- Gulledge J, Schimel JP. 2000. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska. *Ecosystems*, **3**: 269 ~ 282
- Hanson PJ, Edwards NT, Garten CT, et al. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, **48**: 115 ~ 146
- Högberg P, Nordgren A, Buchmann N, et al. 2001. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, **411**: 789 ~ 792
- Jiang G-M (蒋高明), Huang Y-X (黄银晓). 1997. A study on the measurement of CO₂ emission from the soil of the simulated *Quercus liaotungensis* forest sampled from Beijing Mountain Areas. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, **17**(5): 497 ~ 482 (in Chinese)
- Lee M, Nakane K, Nakatsubo T, et al. 2003. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant Soil*, **255**: 311 ~ 318
- Liang W (梁巍), Yue J (岳进), Wu J (吴劭), et al. 2003. Seasonal variations of soil microbial biomass, respiration rate and CH₄ emission in black earth rice fields. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **13**(12): 2278 ~ 2280 (in Chinese)
- Liu Y, Han SJ, Li XF, et al. 2004. The contribution of root respiration of *Pinus koraiensis* seedlings to total soil respiration under ele-

- vated CO₂ concentrations. *J For Res*, **15**(3):187~191
- 13 Liu S-H(刘绍辉), Fang J-Y(方精云), Qing T-X(清田信). 1998. Soil respiration of mountainous temperate forest in Beijing, China. *Acta Phytocol Sin* (植物生态学报), **22**(2):119~126 (in Chinese)
- 14 Nakane K, Kohno T, Horikoshi T. 1996. Root respiration rate before and just after clear-felling in a mature, deciduous, broad-leaved forest. *Ecol Res*, **11**:111~119
- 15 Ohashi M, Gyokusen K, Saito A. 2000. Contribution of root respiration to total soil respiration in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) artificial forest. *Ecol Res*, **15**(3):323~333
- 16 Qiang X-C(强学彩), Yuan H-L(袁红莉), Gao W-S(高旺盛). 2004. Effect of crop-residue incorporation on soil CO₂ emission and soil microbial biomass. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **15**(3):469~472 (in Chinese)
- 17 Raich J W, Potter CS. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochem CY*, **9**:23~36
- 18 Raich J W, Schlesinger WH. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, **44B**:81~89
- 19 Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, et al. 2001. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biol*, **8**:851~866
- 20 Schimel DS. 1995. Terrestrial ecosystems and carbon cycle. *Global Change Biol*, **1**:77~91
- 21 Singh J S, Gupta SR. 1997. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Bot Rev*, **43**:449~528
- 22 Thierron V, Laudelout H. 1996. Contribution of root respiration to total CO₂ efflux from the soil of a deciduous forest. *Can J For Res*, **26**(7):1142~1148
- 23 Wang M(王 森), Ji L-Z(姬兰柱), Li Q-R(李秋荣), et al. 2003. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different forest type in Changbai Mountain. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(8):1234~1238 (in Chinese)
- 24 Widén B, Majdi H. 2001. Soil CO₂ efflux and root respiration at three sites in a mixed pine spruce forest: Seasonal and diurnal variation. *Can J For Res*, **31**:786~796
- 25 Yang Y-S(杨玉盛), Chen G-S(陈光水), Dong B(董 彬), et al. 2004. Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **24**(5):953~958 (in Chinese)
- 26 Yang Y-S(杨玉盛), Dong B(董 彬), Xie J-S(谢锦升), et al. 2004. A review of tree root respiration: Significance and methodologies. *Acta Phytocol Sin* (植物生态学报), **28**(3):426~434 (in Chinese)

作者简介 刘 颖,女,1976年生,博士生.主要从事森林生态和草地生态等方面的研究,发表论文 10 篇. E-mail: liuyingamy@163.com

欢迎订阅 2006 年《南京林业大学学报(自然科学版)》

《南京林业大学学报(自然科学版)》由南京林业大学主办,创刊于 1958 年,是以林业为主的综合类学术期刊.本刊坚持的一贯宗旨是鼓励学术创新,推动科技成果转化,促进学术交流和发

主要内容:生物学、森林地学、林学基础理论、森林培育与经营管理、森林资源与环境、森林与自然保护、水土保持与荒漠化防治、木材工业与技术科学、林业机械与电子工程、林产化学与工业、园林植物与风景园林、林业经济与管理、森林工程、土木工程等以及有关边缘学科的研究成果.另设置专栏集中报道重点项目、基金项目及重大课题的研究成果.

刊物地位:国家科技部中国科技论文统计源期刊;中国科学引文数据库来源期刊;中国学术期刊综合评价数据库来源期刊;中国自然科学核心期刊;《中国学术期刊(光盘版)》首批入编期刊、万方数据(China info)系统入编科技期刊群.被国际国内著名检索刊物如《CA》、《FA》、《FPA》、《国际农业与生物科学研究中心(网络版)》、《剑桥文摘》、《中国林业文摘》、《中国生物学文摘》、《竹类文摘》等数据库收录.

1992 年以来,《南京林业大学学报(自然科学版)》先后获得全国优秀科技期刊三等奖、全国高校优秀学术期刊一等奖、江苏省优秀自然科学学报一等奖等多项荣誉,2001 年入选“中国期刊方阵”,2002 年入选“江苏期刊方阵”,并获优秀期刊称号,2004 年再次荣获全国高校优秀科技期刊一等奖,江苏省第二届期刊方阵优秀期刊奖等荣誉.

读者范围:大中专院校师生、科研院所研究人员.

本刊为双月刊,单月末出版.大 16 开本,每期定价 10 元,全年 60 元.全国各地邮局(所)均可订阅,邮发代号:28-16;国外发行:中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱),发行代号:Q552.也可通过全国非邮发中心联合征订服务部办理订阅手续.天津市大寺泉集北里别墅 17 号,邮编:300385.

编辑部联系电话:025-85428247;E-mail:xuebao@njfu.edu.cn