

文章编号: 1001-1498(2007)06-0820-06

华北山区非主要生长季典型人工林土壤呼吸变化特征

王鹤松¹, 张劲松^{1*}, 孟平¹, 高峻¹, 贾长荣²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 济源市国有大沟河林场, 河南 济源 454650)

摘要: 2005年11月至2006年3月, 利用Li-8100土壤呼吸自动观测系统及AR-A-ECH土壤温度湿度自动观测系统, 观测了华北山区30年生侧柏和25年生栓皮栎林土壤呼吸速率与土壤温度及湿度, 分析了非主要生长季土壤呼吸变化特征。结果表明: (1) 晴或多云条件下, 2种人工林林地土壤呼吸速率都明显高于阴天, 但日变化均不明显; 整个非主要生长季, 土壤呼吸速率(SRR)呈现出明显的日际变化特征; 2005年11月至2006年1月, SRR呈显著降低的趋势, 在2月份, 维持在相对较低水平, 进入3月中旬则迅速回升, 降雪使SRR均有不同程度的增加; 整个非主要生长季, 侧柏林地与栓皮栎林地的平均SRR分别为0.61、0.39 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。(2) 2种人工林林地地表及地下5、10、15、20 cm深处土壤温度与SRR都存在显著的指数相关关系($p < 0.01$), 且5 cm深处的土壤温度与SRR的相关性最好, 侧柏和栓皮栎在该深处的 Q_{10} 值分别是2.280和1.602; 侧柏、栓皮栎林地SRR与土壤含水量分别呈显著的线性相关关系、多项式相关关系($p < 0.01$)。这2种人工林林地SRR与5 cm深处的土壤温度和土壤含水量均有很好的复相关关系($p < 0.01$), 且比较偏相关系数表明: 影响2种林地土壤呼吸速率的最主要土壤环境因子都是土壤温度。

关键词: 华北山区; 侧柏; 栓皮栎; 土壤呼吸; 非主要生长季

中图分类号: S714.3

文献标识码: A

Soil Respiration of the Representative Artificial Forests During the Minor Growing Season in the Hilly Region of North-China

WANG He-song¹, ZHANG Jin-song¹, MENG Ping¹, GAO Jun¹, JIA Chang-rong²

(1. Research Institute of Forestry, CAF; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China;

2. Dagouhe Forest Farm, Jiyuan 454650, Henan, China)

Abstract: Soil respiration of two representative artificial forests during the minor growing season in the hilly region of North-China, in case of 30 years old *Platycladus orientalis* and 25 years old *Quercus variabilis*, were analyzed. Soil respiration rate was measured by Li-8100 automatic monitoring system, and the soil temperature and soil water content was measured by AR-A-ECH automatic monitoring system from Nov. of 2005 to Mar. of 2006. The main results are as follows: (1) For both the two artificial forests, soil respiration rate (SRR) in clear-cloudy day was markedly higher than that in overcast day, but the diurnal variation of SRR was not apparent under the two weather conditions. Daily SRR changed significantly, and characterized with that SRR decreased sharply from November to January of the next year, and maintained at a relatively low value in February, and then increased rapidly after the middle of March. Snowing made SRR rise varying extents during this season. The average SRR of *Platycladus orientalis* and *Quercus variabilis* were 0.61 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and 0.39 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ respectively in the whole minor

收稿日期: 2006-09-04

基金项目: 科技部社会公益性项目(2003D B4J142)、国家十五攻关课题(2004BA510B11)及黄河小浪底森林生态系统定位研究站基金资助项目部分研究内容

作者简介: 王鹤松(1968—), 男, 辽宁沈阳人, 博士生, wanghs119@sohu.com

*通讯作者: 张劲, 研究员, E-mail: zhangjs@caf.ac.cn

growing season (2) Significant relationship were found between the two artificial forests *SRR* and soil temperatures at the 0, 5, 10, 15 and 20 cm depth from the soil surface ($p < 0.01$), which could be well described by exponential equations, and the best significant relationship happened at the 5 cm depth, where Q_{10} of *Platycladus orientalis* and *Quercus variabilis* were $2.280 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $1.602 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ respectively. *SRR* was also correlated with the soil water content ($p < 0.01$), the regression equation for *Platycladus orientalis* was linear, but multinomial for *Quercus variabilis* *SRR* was significantly related to soil temperature (T_s) and soil water content (SW) at 5 cm depth. T_s was the most important factor that effected on *SRR* for both the two artificial forests through comparing the partial coefficient of T_s and SW at the 5 cm depth.

Key words: hilly region of North-China; *Platycladus orientalis*; *Quercus variabilis*; soil respiration; minor growing season

土壤是陆地生态系统中最主要的碳库,碳储量约占生物圈陆地总碳储量的 2/3,土壤呼吸是土壤碳库输出及全球碳循环的主要途径。每年土壤呼吸释放到大气中的 CO_2 是化石燃料燃烧释放的 10 倍以上^[1],土壤呼吸即便发生较小的变化,也会显著地影响大气中的 CO_2 浓度^[2],进而影响气候变化。森林土壤是陆地最大的碳存储库,占全球土壤碳的 73%^[3],在全球碳循环等方面发挥重要作用。森林土壤呼吸是当前陆地生态系统碳循环和全球变化研究的一个重要内容。现有森林土壤呼吸的研究多集中在主要生长季,而有关非主要生长季的研究相对较少。非主要生长季的土壤呼吸虽明显小于主要生长季,但作为全年土壤呼吸的一部分,在某种程度上决定了整年的土壤呼吸速率^[4]。目前,仅国外有关于非主要生长季土壤呼吸的研究报道^[5,6]。研究森林非主要生长季土壤呼吸有助于进一步揭示森林全年的土壤呼吸变化特征,进而全面地了解森林生态系统的碳收支情况。

目前我国的森林面积约为 1.747 亿 hm^2 ,其中人工林面积达 0.533 亿 hm^2 ,人工林面积居世界首位,且每年增加 $10 \sim 15 \times 10^6 \text{hm}^2$,但森林土壤呼吸的主要研究对象多为温带和亚热带气候区的森林生态系统^[7-14],且有关暖温带地区仅有对主要生长季的人工林林地土壤呼吸的报道^[15-18]。我国北方大部分地区属于暖温带气候区,不同的地带由于其地形、降水条件不同,造成了具体生态环境的不同,因此,深入研究我国北方地区非主要生长季节人工林林地土壤呼吸具有十分重要的科学意义。华北山区地处暖温带气候区,一直是我国林业生态建设的重点区域。本研究以该地区侧柏 (*Platycladus orientalis* Franco) 和栓皮栎 (*Quercus variabilis* B1) 典型树种为例,利用由 Li-8100 土壤呼吸自动观测系统测定

得到的土壤呼吸数据,结合土壤水分及温度观测数据,分析土壤呼吸变化特征,为精确计算非主要生长季节人工林林地土壤呼吸总量提供科学依据。

1 试验设计

1.1 试验区概况及试验材料

试验地位于黄河小浪底森林生态系统定位研究站 (35°01' N, 112°28' E) 站区内。该定位研究站隶属于中国森林生态系统定位研究网络 (CFERN), 站区 (试验区) 位于河南省济源市境内,地貌类型属华北石质山区。气候属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 $12.4 \sim 14.3$,全年日照时数为 2367.7 h,年日照率为 54%,0 的多年平均积温为 5282,历年平均降水量 641.7 mm,6—9 月多年平均降水量为 438.0 mm,占全年降水量的 68.3%。试验区林分以人工林为主,侧柏、栓皮栎为该地区代表性树种。

综合考虑林分密度,土层厚度,林下植被等因素,在试验区内选取代表性的侧柏、栓皮栎人工林样地,样地位于半阳坡中部的退耕还林地。土壤类型为褐土。侧柏林龄为 30 a,林分密度 $1455 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均株高 7.2 m,平均胸径 10.3 cm,郁闭度 0.8,平均土层厚度 25 cm。栓皮栎林龄为 25 a,林分密度 $1890 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均株高 7.5 m,平均胸径 10.8 cm,郁闭度为 0.9,平均土层厚度为 40 cm。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤呼吸观测 采用 Li-8100 便携式红外气体分析仪 (美国, Licor Biosciences), 分别对上述 2 个样地的土壤呼吸速率进行观测。每个样地内随机选取 5 个样点,每个样点用 PVC 环打入土层 8 cm,露出地面 1 cm 与气室紧密接触,待 7

d后 PVC环已与土壤接触紧密,开始测量。于每天 12:00时同时观测 5个样点,取各样点平均观测值作为该日的土壤呼吸速率^[19,20]。选择与平均观测值最接近的样点,每旬连续测量 3 d,每小时观测 1次。观测期为 2005年 11月 1日至 2006年 3月 31日。

1.2.2 土壤温度和湿度观测 在每个样地的 5个样点中心处,使用 AR-A-ECH土壤温度湿度自动观测系统观测土壤温度及土壤体积含水量。土壤温度测定深度:表层(0 cm)、5、10、15、20 cm,土壤湿度测定深度 20 cm。所采用的土壤温度传感器、土壤含水量传感器分别为 A107(美国,YSI)和 ECH₂O(美国,Decagon)。数据采集器为 AR5-8A-SE,每 2 min采集 1次,每 30 min存取 1次平均值。观测期为 2005年 11月 1日至 2006年 3月 31日。

1.2.3 数据分析 采用回归分析法,利用 SPSS11.5,Office excel 2003等软件完成。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸速率的变化规律

2.1.1 土壤呼吸速率的日变化规律 由图 1可知,在晴或多云条件下,侧柏及栓皮栎林地土壤呼吸速率(*SRR*)明显高于阴天,且在 2种天气条件下,*SRR*的日变化都不明显。*SRR*低且日变化不明显的主要原因在于:整个非主要生长季土壤温度低,且日内变化幅度小;另外,期间林木耗水量及降水少,使得土壤含水量较低。计算表明:侧柏林地在晴或多云和阴天 2种天气条件下的 *SRR*日均值分别为 0.64、0.43 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,栓皮栎林地则为 0.41、0.34 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

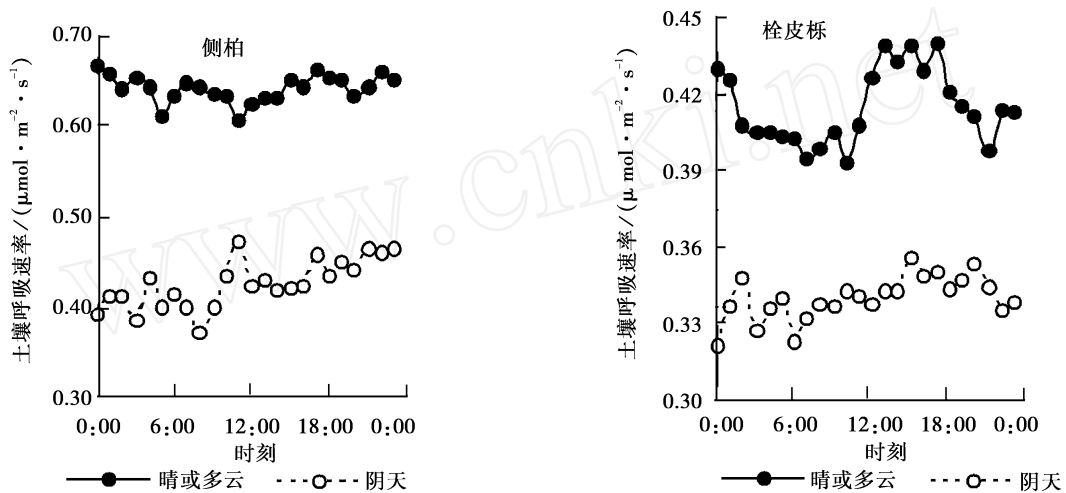


图 1 非主要生长季典型天气侧柏和栓皮栎林地土壤呼吸速率日变化规律

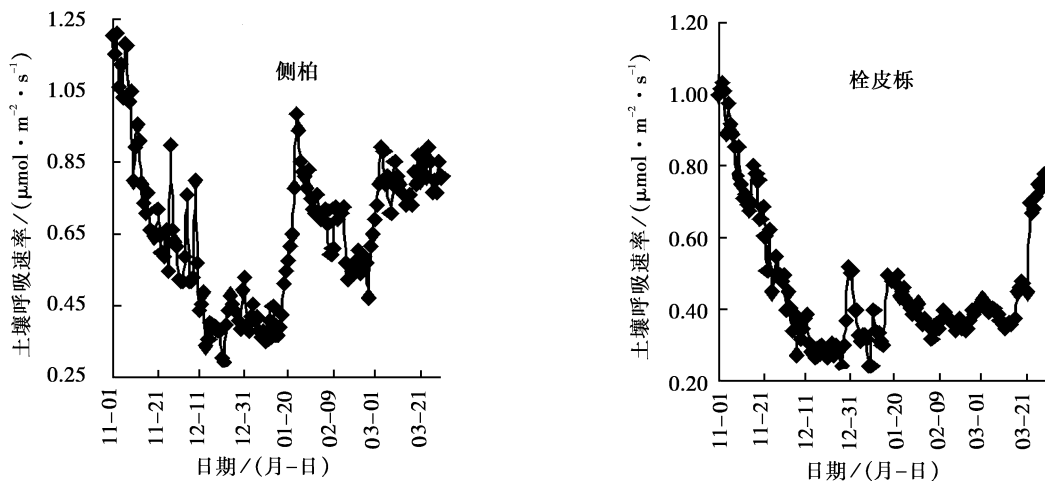


图 2 非主要生长季侧柏和栓皮栎林地土壤呼吸速率的日变化规律

2.1.2 土壤呼吸速率的日际变化特征 从图 2 可以看出, SRR 呈现出明显的日际变化特征。2005 年 11 月至 2006 年 1 月, SRR 呈显著降低的趋势。这是由于随着气温的降低及降水的减少、林木叶片的脱落及耗水量的降低, 导致土壤温度和含水量均有所降低, 最终影响到 SRR 。在 2 月, SRR 变化不大, 维持在相对较低水平; 进入 3 月, 随冬季结束及初春来临, 气温回升较快, SRR 也随之增加。2005 年 12 月底和 2006 年 1 月中下旬的 2 次降雪, 导致土壤水分略有上升, 使侧柏和栓皮栎人工林林地的 SRR 均有不同程度的增加。在整个非主要生长季, 侧柏林地的 SRR 平均值为 $0.61 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 栓皮栎林地地为 $0.39 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 明显低于纬度相近地区针、阔叶人工林林地土壤呼吸速率的全年平均值^[15,21]。

2.2 土壤呼吸与主要环境因子的关系

2.2.1 温度对土壤呼吸速率的影响 将各日的 SRR 与各日不同深度的土壤温度进行了回归分析,

结果 (表 1、图 3) 表明: 侧柏和栓皮栎人工林林地的土壤温度 (T_s) 与 SRR 都存在显著的相关关系 ($p < 0.01$); 但栓皮栎林地的 SRR 与 T_s 的相关性要好于侧柏林地。比较 SRR 与不同深度 T_s 的相关系数可知, SRR 与 5 cm 深的 T_s 的相关性最好 (表 1), 回归方程分别为:

侧柏林地: $SRR = 0.348e^{0.08247T_s}$ ($F = 69.268 > F_{(0.01)} = 6.63, r = 0.708, n = 152$) (1)

栓皮栎林地: $SRR = 0.281e^{0.04717T_s}$ ($F = 33.111 > F_{(0.01)} = 6.63, r = 0.659, n = 152$) (2)

式 (1)、(2) 中: SRR 为土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), T_s 为 5 cm 深度处土壤温度 ()。

由表 1 还可知, 除 5 cm 深处的土壤温度外, 地表 T_s 与 SRR 相关性最好; 10 cm 以下, 随着深度的增加, T_s 与 SRR 的相关系数越来越低。这是由于土壤微生物主要分布在土壤表层, SRR 对表层土壤温度的变化比较敏感^[9]。

表 1 不同深度处土壤温度 (T_s) 与土壤呼吸速率 (SRR) 的回归关系及 Q_{10} 值

土层深度 / cm	侧柏林地			栓皮栎林地		
	回归方程	相关系数	Q_{10}	回归方程	相关系数	Q_{10}
0 (地表)	$SRR = 0.335e^{0.08227T_s}$	0.638	2.275	$SRR = 0.272e^{0.04697T_s}$	0.581	1.598
5	$SRR = 0.348e^{0.08247T_s}$	0.708	2.280	$SRR = 0.281e^{0.04717T_s}$	0.659	1.602
10	$SRR = 0.321e^{0.08657T_s}$	0.588	2.375	$SRR = 0.269e^{0.04817T_s}$	0.580	1.618
15	$SRR = 0.287e^{0.08897T_s}$	0.548	2.433	$SRR = 0.266e^{0.04837T_s}$	0.525	1.629
20	$SRR = 0.292e^{0.09037T_s}$	0.513	2.467	$SRR = 0.262e^{0.04917T_s}$	0.500	1.634

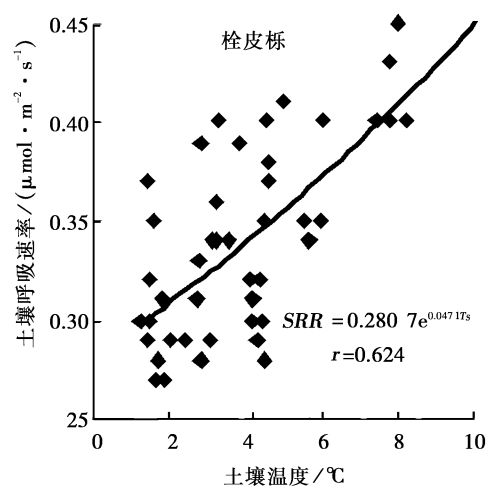
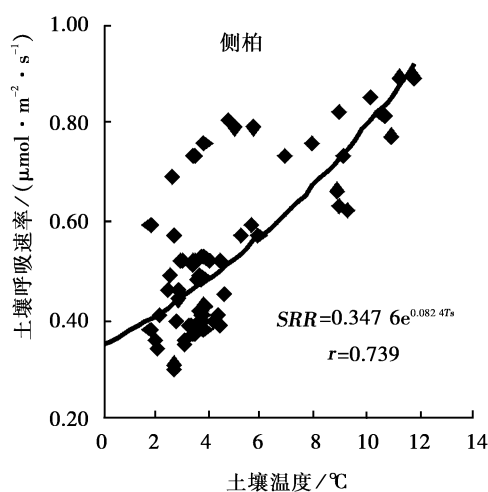


图 3 非主要生长季节土壤呼吸速率与 5 cm 深度处土壤温度的关系

分析 Q_{10} 值的垂直变化特征表明 (表 1): 2 种人工林林地的 Q_{10} 值都随着土壤深度加大而增大, 但侧柏林地的 Q_{10} 值高于栓皮栎林地, 说明温度升高对侧

柏林地土壤呼吸的提升作用要大于栓皮栎。

2.2.2 土壤含水量对土壤呼吸速率的影响 回归分析表明: 侧柏和栓皮栎人工林林地的 SRR 都与土

壤含水量 (SW) 存在显著的相关关系 ($p < 0.01$) (图 4), 但它们的相关模型有一定差异, 回归方程分别为:

$$\text{侧柏: } SRR = 0.033SW + 0.243 \quad (F = 152.096 > F_{(0.01)} = 6.63, r = 0.75, n = 152) \quad (3)$$

$$\text{栓皮栎: } SRR = -0.0023SW^2 + 0.087SW - 0.3959 \quad (F = 22.226 > F_{(0.01)} = 4.79, r = 0.607, n = 152) \quad (4)$$

式 (3)、(4) 中: SRR 为土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot$

$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), SW 为土壤体积含水量, 以 % 表示。

从图 4 及式 (3)、(4) 可知, 侧柏林地 SRR 随 SW 的增加而增加, 二者呈线性相关关系; 栓皮栎林地 SRR 与 SW 呈多项式相关, SRR 先随 SW 的增大而增大, SW 达到 20% 以后, SW 继续增加时, SRR 会减弱。这说明侧柏林地土壤水分相对较低, SRR 在该范围内随土壤水分的增加而增加, 栓皮栎林地土壤水分的变化范围则较大, 超出了一定范围后, SRR 随土壤水分的增加而降低。

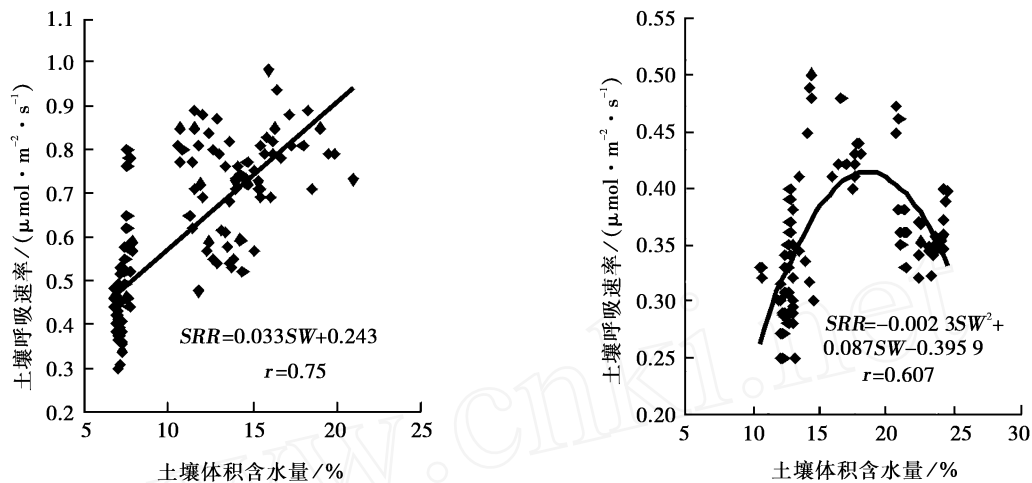


图 4 侧柏和栓皮栎林地土壤呼吸速率与土壤含水量的相关性

2.2.3 土壤温度与土壤含水量对土壤呼吸的共同影响 土壤呼吸受土壤温度与土壤水分的共同影响^[22,23]。本研究采用 5 cm 深处的观测数据, 分析 SRR 与土壤温度 (T_s) 及土壤含水量 (SW) 的关系, 结果表明, 侧柏与栓皮栎林地 SRR 与 T_s 、 SW 具有很好的线性复相关关系 ($p < 0.01$), 回归方程分别为:

$$\text{侧柏: } SRR = 0.179 + 0.034T_s + 0.021SW \quad (F = 77.351 > F_{0.01(2,149)} = 4.61, r = 0.841, n = 152) \quad (5)$$

$$\text{栓皮栎: } SRR = 0.264 + 0.014T_s + 0.001SW \quad (F = 18.920 > F_{0.01(2,149)} = 4.61, r = 0.693, n = 152) \quad (6)$$

式 (5)、(6) 中: SRR 为土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), T_s 为 5 cm 深处的土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$), SW 为土壤体积含水量 (%)。

侧柏林地 SRR 与 T_s 、 SW 的偏相关系数分别为 0.599、0.576, 栓皮栎林地 SRR 与 T_s 、 SW 的偏相关系数分别为 0.529、0.234, 可见, 影响这 2 种林地土壤呼吸速率的主要因子都是土壤温度。

3 结论与讨论

(1) 侧柏、栓皮栎林地在晴天或多云天气条件下的土壤呼吸速率 (SRR) 明显比阴天的高, 而且日内变化都不明显。整个非主要生长季, SRR 呈现出明显的日际变化特征。2005 年 11 月至 2006 年 1 月, SRR 呈显著降低的趋势, 在 2 月份, 维持在相对较低水平, 进入 3 月中旬则迅速回升。非主要生长季初期 (11 月及 12 月) 的温度降低以及后期 (3 月左右) 的温度回升, 是侧柏、栓皮栎林地 SRR 大幅下降和上升的主要原因; 此期间的 2 次降雪, 导致土壤含水量升高, 使得 SRR 有所提高。与已经报道的纬度相近地区针叶人工林、阔叶人工林相比^[15,21], 本试验区侧柏、栓皮栎人工林林地在非主要生长季内的 SRR 明显比全年的平均值低。

(2) 侧柏、栓皮栎人工林林地的土壤温度与 SRR 都存在显著的指数相关关系 ($p < 0.01$), 5 cm 深处的土壤温度与 SRR 的相关性最好, 地表温度次之, 10 cm 深以下, 随着深度的增加, 温度与 SRR 的相关系数越来越低。侧柏林地的 Q_{10} 值高于栓皮栎林地,

说明温度升高对侧柏林地土壤呼吸速率的提升作用要大于栓皮栎。侧柏林地 SRR 与土壤体积含水量 (SW) 存在显著的线性正相关关系 ($p < 0.01$), 栓皮栎林地 SRR 与 SW 呈多项式相关关系 ($p < 0.01$), SW 低于 20% 时, SRR 随 SW 的增加而增加, 但高于 20% 后, SRR 随 SW 的增加而减弱。2 种林地 SRR 与土壤温度和湿度都具有很好的复相关关系 ($p < 0.01$), 但土壤温度是 SRR 的最主要影响因子。

(3) 由于土壤呼吸存在着较大的空间变异性, 而受技术条件的限制, 现有的仪器只能从一个点来分析土壤呼吸速率的时间变化。虽然 Li-8100 配合短期气室可以较方便地在短时间内对不同点的土壤呼吸速率进行测量, 但仍不能同时对多点进行连续测量, 而早先使用的碱液吸收法又存在着精度较低的问题。故今后应进一步采用多通道的红外 CO_2 分析系统, 以期进一步揭示整个林分的土壤呼吸时空变化规律。

参考文献:

- [1] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1995, 9: 23 ~ 36
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7 ~ 20
- [3] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, *et al*. Soil pool and world life zones [J]. *Nature*, 1982, 298: 156 ~ 159
- [4] Russell K M. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition [J]. *Nature*, 2006, 439: 711 ~ 714
- [5] Monson R K, Sparks J P, Rosenstiel T N, *et al*. Climatic influences on net ecosystem CO_2 exchange during the transition from wintertime carbon source to springtime carbon sink in a high-elevation, subalpine forest [J]. *Oecologia*, 2005, 146: 130 ~ 147
- [6] Hubbard R M, Ryan M G, Elder, *et al*. Seasonal patterns in soil surface CO_2 flux under snow cover in 50 and 300 year old subalpine forests[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73: 93 ~ 107
- [7] 蒋延玲, 周广胜, 赵敏, 等. 长白山阔叶红松林生态系统土壤呼吸作用研究 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29(3): 411 ~ 414
- [8] 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 等. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳排放研究 [J]. *生态学报*, 2003, 23(8): 1673 ~ 1678
- [9] 周存宇, 周国逸, 王迎红, 等. 鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(4): 23 ~ 27
- [10] 陈光水, 杨玉盛, 王小国, 等. 格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态及影响因素 [J]. *生态学报*, 2005, 25(8): 1941 ~ 1947
- [11] 骆士寿, 陈步峰, 李意德, 等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究 [J]. *生态学报*, 2001, 21(12): 2013 ~ 2017
- [12] 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究 [J]. *生态学报*, 1998, 18(4): 371 ~ 378
- [13] 肖复明, 汪思龙, 杜天真, 等. 杉木人工林林地土壤呼吸研究 [J]. *江西农业大学学报*, 2005, 27(4): 580 ~ 584
- [14] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸 [J]. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 97 ~ 103
- [15] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 等. 火地塘林区锐齿栎林土壤碳循环的动态模拟 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2003, 31(6): 14 ~ 18
- [16] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 等. 秦岭天然油松锐齿栎林地土壤呼吸与 CO_2 释放 [J]. *林业科学*, 2003, 39(2): 8 ~ 13
- [17] 马钦彦, 张学培, 韩海荣, 等. 山西太岳山森林土壤夏日 CO_2 释放速率的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2000, 22(4): 89 ~ 91
- [18] 刘绍辉, 方精云, 清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸 [J]. *植物生态学报*, 1998, 22(2): 119 ~ 126
- [19] Eric B, Elizabeth B, Richard B. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperature mixed hardwood forest [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217 ~ 227
- [20] Luitgard S, Edzo V, Tania B, *et al*. Spatial and temporal variation in soil CO_2 efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 64: 111 ~ 128
- [21] 蒋高明, 黄银晓. 北京山区辽东栎林土壤释放 CO_2 的模拟实验研究 [J]. *生态学报*, 1997, 17(5): 477 ~ 482
- [22] 崔晓勇, 陈佐忠, 陈四清. 草地土壤呼吸研究进展 [J]. *生态学报*, 2001, 21(2): 315 ~ 325
- [23] 易志刚, 蚁伟民. 森林生态系统中土壤呼吸研究进展 [J]. *生态环境*, 2003, 12(3): 361 ~ 365