

山杨白桦混交次生林与原始阔叶红松林土壤呼吸作用比较

王旭 周广胜* 蒋延玲 贾丙瑞 王凤玉 周莉

(中国科学院植物研究所植被与环境变化重点实验室, 北京 100093)

摘要 比较利用静态箱式法测定长白山原始阔叶红松林 (*Pinus koraiensis*) 和次生杨桦混交林的土壤呼吸作用表明, 两者土壤呼吸作用的日动态均主要受温度影响, 次生林土壤呼吸作用的日变化极值出现时间较原始林提前 1 ~ 2 h, 两者具有明显的季节动态, 其中 8 月土壤呼吸速率最大, 在生长季, 土壤呼吸速率与土壤含水量关系不显著, 而与土壤 5 cm 温度呈显著的指数关系, 生长季 (5 ~ 9 月) 次生林土壤释放 CO₂ 量 (3 449.4 g·m⁻²) 约为原始林 (2 674.4 g·m⁻²) 的 1.3 倍, 这可能是由于次生林内具有比原始林较高的温度和较低的土壤含水量, 更有利于根系生长代谢和土壤微生物的活动引起的。

关键词 原始阔叶红松林 天然次生林 土壤呼吸作用 土壤温度 土壤含水量

SOIL RESPIRATION IN NATURAL MIXED (*BETULA PLATYPHYLLA* AND *POPULUS DAVIDIANA*) SECONDARY FOREST AND PRIMARY BROAD-LEAVED KOREAN PINE FOREST

WANG Xu, ZHOU Guang-Sheng*, JIANG Yan-Ling, JIA Bing-Rui, WANG Feng-Yu, and ZHOU Li

Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract Aims Soil respiration is an important component of terrestrial carbon budgets, but the effects of land use on soil respiration are inadequately understood. The objective of this study was to examine soil respiration in natural mixed (*Betula platyphylla* and *Populus davidiana*) secondary forest and primary Korean pine (*Pinus koraiensis*) forest in the Changbai Mountain, China.

Methods An infrared gas analyzer (IGA) linked to a 50 cm × 50 cm × 15 cm chamber without a bottom was used to measure soil respiration. Three 50 cm × 50 cm steel frames were inserted into the soil to 3 – 5 cm in plots randomly selected one day prior to measurement. When measuring, the chamber was put on the steel frame to make a closed container capturing CO₂ from the soil surface. Soil respiration was measured every 20 – 30 days during the 2003 – 2005 growing seasons.

Important findings Diurnal variations of soil respiration were mainly affected by soil temperatures, and maximum soil respiration appeared 1 – 2 hours earlier in secondary than in primary forests. Soil respiration was the greatest in August. There was a significant exponential relationship with soil temperature at 5 cm depth, but no significant relationship with soil water content in both plots. During the growing season (May – September), total CO₂ efflux from natural secondary forests was estimated as 3 449.4 g·m⁻², about 1.3 times that in primary forests (2 674.4 g·m⁻²). The secondary forests had higher soil temperature and lower soil water content, which enhanced roots activity and soil microorganism metabolism.

Key words primary Korean pine forest, natural secondary forest, soil respiration, soil temperature, soil water content

森林土壤碳占全球土壤碳库的 73% (Post *et al.*, 1982), 在全球碳循环方面发挥着重要的作用。土壤呼吸作用不仅是碳循环的重要组成部分 (Raich & Schlesinger, 1992), 也是土壤有机质矿化速率和异

养代谢活性的指示 (Ewel *et al.*, 1987)。全球土壤呼吸作用约为 68 ~ 100 Pg C·a⁻¹ (Raich & Schlesinger, 1992), 是化石燃料释放碳量的 10 倍左右。不同植被类型和土地利用方式的土壤呼吸作用存在较大差

收稿日期: 2006-05-08 接受日期: 2007-01-11

基金项目: 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交叉型重要方向项目 (KSCX2-SW-133)

感谢长白山森林生态系统定位研究站及所有工作人员对本项研究工作的支持与帮助

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

异(吴建国等,2003),影响区域碳收支评估的精确性。准确评估土壤呼吸作用及其对土地利用方式的响应,不仅有助于减少全球碳收支评估的不确定性,而且有助于减缓气候变化及其影响,确保人类生存环境的可持续发展(周广胜等,2002)。

目前国内关于土壤呼吸的研究多集中在森林、草原和农田等典型生态系统,主要研究土壤呼吸动态特征、土壤呼吸各组分状况及与环境因子之间的关系等方面(蒋高明和黄银晓,1997;李凌浩和陈佐忠,1998;黄承才等,1999;杨玉盛等,2005),而对土地利用方式发生变化对土壤呼吸作用的影响研究较少。原始森林遭受干扰进行自然更新和恢复过程中,植被类型以及生境条件发生动态演替,这严重影响了森林碳循环收支评估的准确性,需对这一过程中土壤呼吸作用的方式和强度变化状况及其作用机理进行研究。本文通过比较研究长白山原始阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林与次生杨桦混交林的土壤呼吸作用方式和强度的差异以及与环境因子的相互关系,为深入研究森林演替进程中的碳循环过程和准确评估森林碳收支提供依据和参考。

1 研究区自然概况

实验地点选在位于长白山北坡的中国科学院长白山森林生态系统定位研究站附近,地理位置为

42°24' N,128°6' E,海拔 738 m。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。年均气温 0.9~3.9 °C,年均降水量 632.8~782.4 mm(迟振文等,1981)。土壤为白浆化暗棕色森林土(王战等,1980)。

红松阔叶混交原始林样地位于研究站 1 号样地,海拔高度约 748 m,坡度 1°~5°,天然林林龄 180 年左右,组成树种以红松、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槭(*Acer mono*)、青楷槭(*A. tegmentosum*)和白牛槭(*A. mandshuricum*)等。林分为复层结构,平均株高 26 m,郁闭度 0.8,下木覆盖度 40%(徐振邦等,1985)。

杨桦混交次生林为天然次生林,紧邻 1 号原始阔叶红松林样地,海拔约 747 m,林龄 60 年左右,主要树种为白桦(*Betula platyphylla*)和山杨(*Populus davidiana*)。林下出现少量的红松幼苗,灌木有毛榛子(*Corylus mandshurica*)、绢毛绣线菊(*Spiraea sericea*)和刺五加(*Eleutherococcus senticosus*)等,草本植物有木贼(*Equisetum hiemale*)、山茄子(*Brachybotrys paridiformis*)和猴腿蹄盖蕨(*Athyrium spinulosum*)等。平均树高 13 m,郁闭度约 0.6,林分结构简单。

表 1 样地描述
Table 1 Sites description

土地类型 Land type	地下生物量 Belowground biomass (g·m ⁻²)	凋落物量 Litters (g·m ⁻²)	有机碳 Organic C (mg·g ⁻¹)	全氮 Total N (mg·g ⁻¹)	碳氮比 C:N ratio	容重 Bulk density (g·m ⁻³)	pH 值 pH value
阔叶红松林 Korean pine forest	1 798.0	1 106.7	125.6	10.6	11.9	0.64	4.9
天然次生林 Natural secondary forest	1 661.3	935.6	81.3	7.3	11.2	0.81	5.2

2 实验方法

2.1 土壤呼吸作用测量方法

用静态密闭箱式法测量土壤呼吸作用。该仪器由 CO₂ 红外线分析仪(GXH-3010D,北京市电脑技术应用研究所生产)和密闭箱(大小 50 cm×50 cm×15 cm)组成,由导管通过密闭箱侧壁上的进出气孔和 CO₂ 分析仪相连。选择晴天测量土壤呼吸速率日动态,每小时测量 1 次,同时测量大气压、箱体内空气

温度和相对湿度。测量前一天,在样地内随机选取 50 cm×50 cm 面积的样方 3 个,把钢圈基座嵌入表层土壤中,深度约 3~5 cm,尽量不破坏原来土壤物理结构,并剪除样方中地表以上的植物活体部分。测量时,密闭箱紧密扣合到前一天设置在土壤表面的钢圈底座上,形成密闭气室。测量时,每间隔 10 s,红外分析仪测量一次箱体内空气 CO₂ 浓度值,测量时间持续 180 s。

2.2 测量时间

土壤呼吸作用测定主要在生长季进行,具体时期为 2003 年 8~10 月、2004 年 8 月和 11 月、2005 年 5~8 月,观测频率为 20~30 d⁻¹次,测量时间为 8:00~10:00 之间(这个时间段的土壤呼吸速率观测值与全天土壤呼吸速率平均值接近)。2003 年 8 月 13 日和 17 日测定红松针阔混交林和次生杨桦林土壤呼吸作用全天 24 h 日变化,每小时观测 1 次。

2.3 环境因子测定

在进行土壤呼吸作用测定的同时,利用曲管温度表(上海医用仪表厂)测量样地 0、5、10、15 和 20 cm 深度的土壤温度,采用水分仪(PR1/4, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK)测量 10 cm 深度的土壤体积含水量。箱体內的空气温度由安装在箱体內的空气温、湿度探头(NKHT, 北京鑫诺金科技发展有限公司)测量,气压表测量空气气压。

2.4 数据分析

箱式法土壤呼吸速率的计算公式如下:

$$Q = \Delta CO_2 \times (h/22.41 \times 10^{-3}) \times (T_0/T) \times (P/P_0) \quad (1)$$

式中, Q 表示土壤呼吸速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 22.41×10^{-3} 为理想气体摩尔体积($\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$), h 代表箱体高度(m), ΔCO_2 为箱内 CO_2 浓度变化速率($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$), $T_0 = 273.15 \text{ K}$, T 为箱內的绝对温度(K), P 为当地的实际大气压(hPa), P_0 为标准大气压($1.013 \times 10^5 \text{ hPa}$)。本研究数据分析采用 Excel2003 和 SPSS12.0 统计分析软件, Sigmaplot9.0 软件辅助作图。

3 结果和分析

3.1 红松针阔混交林和次生杨桦混交林土壤呼吸作用日动态

次生杨桦林和阔叶红松林的土壤呼吸速率日变化都呈单峰曲线,并且与土壤温度变化趋势基本一致,尤其与 5 cm 土壤温度相关性最强(表 2)。一日内,次生林土壤呼吸速率最大值 $6.15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 出现在 16:00 时左右,最小值 $4.09 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 出现在凌晨 6:00~7:00 之间;与阔叶红松林极值出现时间(峰谷值分别在 18:00 和 7:00 左右)相比,约提前 1~2 h,这与两林型土壤温度日变化类似,而土壤含水量的日变化幅度很小($\pm 1\%$ 之间),对土壤呼吸速率的日变化影响可以忽略。由此说明,土壤温度是两种林型土壤呼吸速率日变化特征产生差异的主要原因。

3.2 土壤呼吸作用季节动态

2003~2005 年生长季土壤呼吸作用的测量结果(图 2)表明,两种类型样地土壤呼吸作用变化特征相似,且具有明显的季节动态:2003 年 8~10 月,土壤呼吸速率表现为降低趋势;2004 年 8 月的土壤呼吸速率也明显高于 11 月;2005 年测量土壤呼吸速率从 5 月至 8 月逐渐升高。从 3 年测量结果总体趋势来看,两种类型土壤呼吸作用季节变化呈单峰曲线,且峰值均出现在 8 月,其中次生林地 8 月测量土壤呼吸速率可达 $9.46 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,阔叶红松林地也可达 $8.36 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;但由于冬季限于仪器使用的温度环境,未能确定出全年土壤呼吸速率的极低值及出现时间。另外,从图 2 还可以看出,生长季天然次生林的土壤呼吸速率明显高于原始阔叶红松林。

3.3 土壤呼吸作用与土壤温度的关系

根据生长季土壤呼吸作用观测结果分析,两种林型土壤呼吸速率随土壤温度升高均呈指数增加(图 2),二者存在显著的指数关系($p < 0.05$),回归方程分别为:

$$Q_1 = 2.072e^{0.072T} \quad R^2 = 0.86 \quad n = 13 \quad (2)$$

$$Q_2 = 1.082e^{0.107T} \quad R^2 = 0.85 \quad n = 22 \quad (3)$$

式中, Q_1 、 Q_2 表示次生杨桦林和阔叶红松林的土壤呼吸速率($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), T 表示 5 cm 深处土壤温度($^{\circ}\text{C}$)。利用土壤温度可以解释次生杨桦林和阔叶红松林土壤呼吸作用 86% 和 85% 的变异。从图 3 中还可看出,次生杨桦林土壤呼吸速率随温度升高而增加的幅度小于阔叶红松林,二者 Q_{10} 值分别为 2.1 和 2.9,这与同一地区的其它研究(Wang *et al.*, 2004; 刘颖等, 2005)得出 Q_{10} 值范围在 2.09~3.40 之间结果基本一致。次生林土壤有机质含量低于原始林(表 1)可能是导致其 Q_{10} 数值较小的重要原因。

3.4 土壤呼吸作用与土壤水分的关系

由于土壤含水量在一日内的变化微小(图 1),因而同一日测量不同样地的土壤含水量具有可比性。由图 4 看出,在生长季 5~8 月的 6 个观测日,阔叶红松林平均土壤含水量高于次生杨桦林范围约在 1.5%~8% 之间,这可能与两种林型结构和土壤性质差异有关。

对整个生长季而言,土壤含水量对土壤呼吸作用的影响并不显著($p > 0.05$)(图 5),但在阔叶红松林土壤含水量达 65%~80% 时,土壤呼吸速率略呈下降趋势,说明土壤含水量过高对土壤呼吸作用可能产生抑制作用;而次生杨桦林土壤含水量变化范围在 30%~50% 之间,表现出土壤呼吸速率随土壤水分含量升高而增加的趋势。

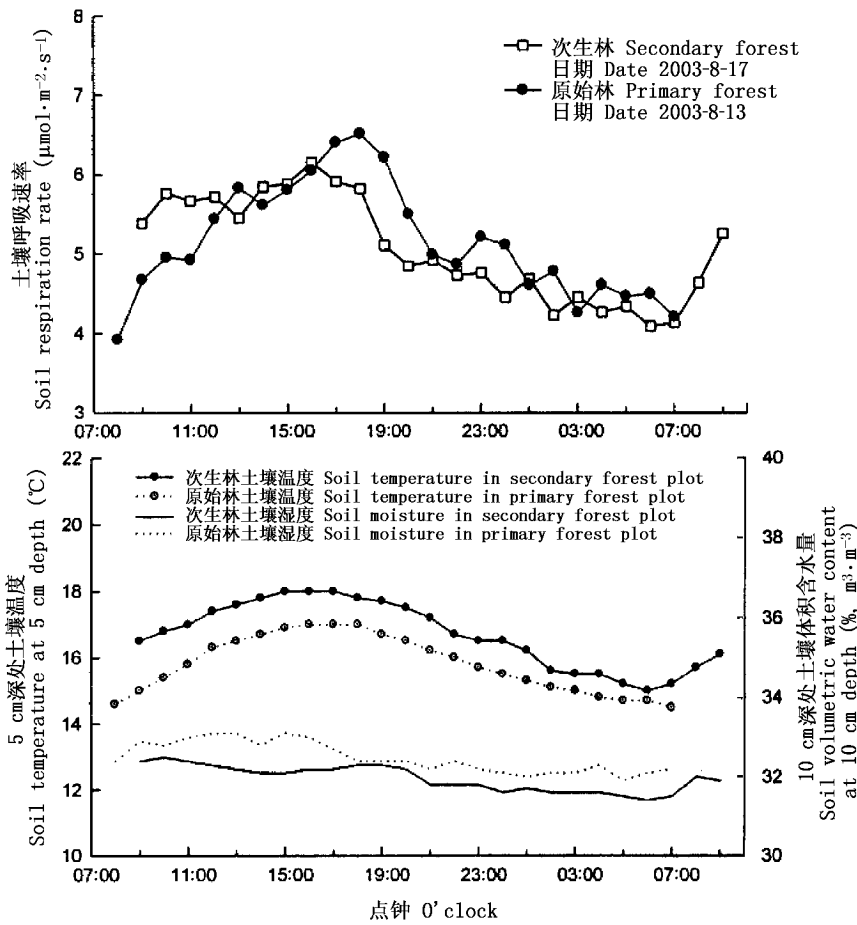


图 1 天然次生林与阔叶红松林土壤呼吸日变化

Fig.1 Daily variations of soil respiration at natural secondary forest and primary forest plots

表 2 土壤呼吸速率与土壤温度的相关系数

Table 2 Correlative coefficients between soil respiration and temperatures at natural secondary forest and primary forest plots

森林类型 Forest type	T_a	T_0	T_5	T_{10}	T_{15}	T_{20}
次生林 Secondary forest	0.648	0.692	0.730	0.435	0.203	-0.487
原始林 Primary forest	0.424	0.585	0.937	0.819	0.525	0.230

T_a 、 T_0 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 和 T_{20} 分别表示气温、地表温度和 5、10、15、20 cm 深度土壤温度 T_a 、 T_0 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} and T_{20} represent mean air temperature, soil surface temperature and soil temperature at 5, 10, 15 and 20 cm depth, respectively.

3.5 生长季土壤呼吸作用强度估算

次生杨桦林和阔叶红松林的内部小气候环境和土壤水热状况存在差异,通过样地的实际观测值和当地气象站同步观测值进行比较分析(图 6),发现二者存在极显著的线性相关关系($p < 0.01$),表达式如下:

$$T_1 = 0.510T_0 + 5.634 \quad R^2 = 0.974 \quad n = 63 \quad (4)$$

$$T_2 = 0.576T_0 + 3.415 \quad R^2 = 0.955 \quad n = 56 \quad (5)$$

式中, T_1 、 T_2 分别为次生杨桦林和阔叶红松林 5 cm 深处土壤温度(°C), T_0 为当地气象站同步观测 5 cm

深处土壤温度(°C)。这样根据气象站土壤温度资料可以模拟计算出两种林型下的土壤温度,再利用公式(2)和(3)通过累加计算,得出生长季 5~9 月次生杨桦林和阔叶红松林土壤呼吸释放 CO_2 量分别为 3 449.4 和 2 674.4 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,次生林土壤呼吸强度约为成熟林的 1.3 倍。

4 结论与讨论

森林遭到自然或者人为等因素的破坏,自然条件下要经历一个漫长而复杂的自我恢复过程,而在

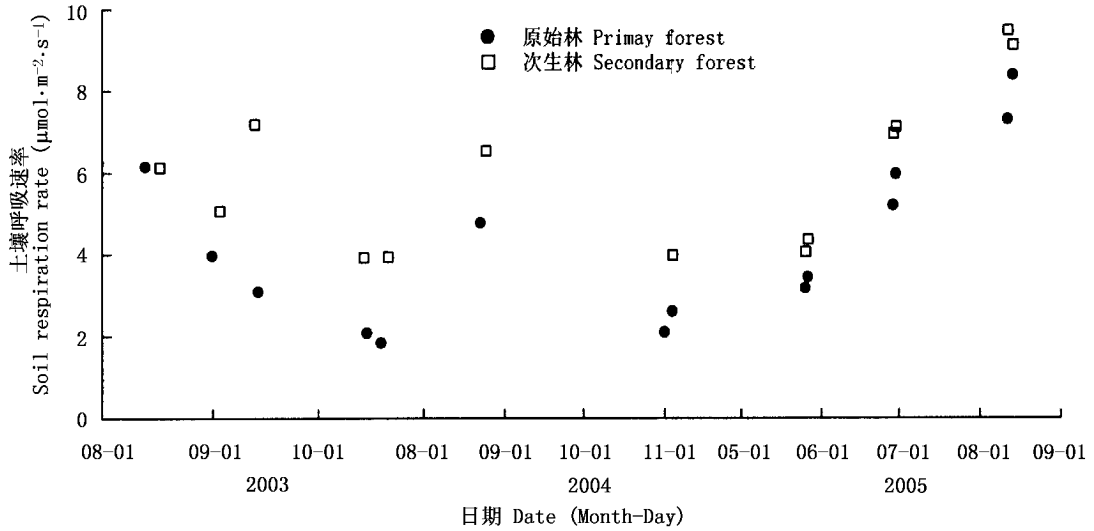


图2 天然次生林和原始阔叶红松林土壤呼吸作用季节变化

Fig.2 Seasonal variations of soil respiration at natural secondary forest and primary Korean pine forest plots

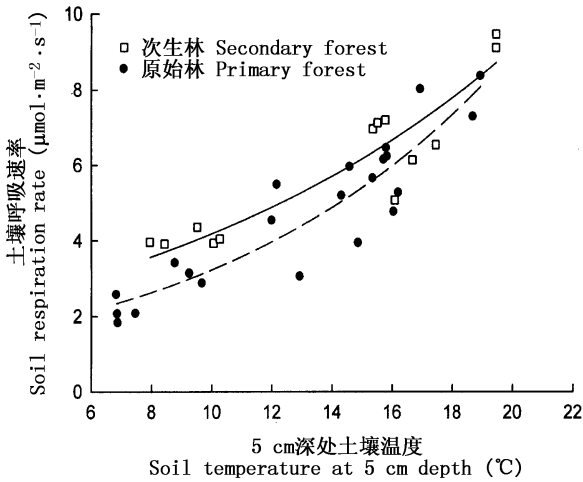


图3 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

Fig.3 Relationships between soil respiration rate and soil temperature at the depth of 5 cm

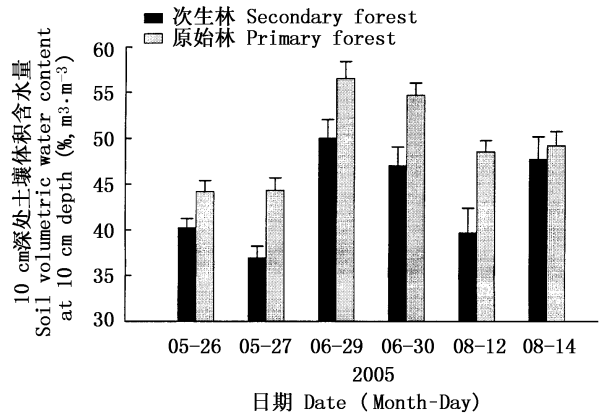


图4 天然次生林与原始林地土壤含水量(0~10 cm)比较

Fig.4 Comparison between soil water contents (during the depth 0-10 cm) at natural secondary forest and primary forest plots

森林演替的不同阶段, 植被群落结构、类型和数量不断变化, 并和周围环境和土壤相互作用, 形成不同演替时期的植被群落土壤生境和内部小气候特征。本研究中的次生杨桦混交林是在原始红松针阔混交林遭受人为干扰后形成的天然更新林, 林木种类主要以白桦和山杨为主, 林分结构简单, 郁闭度低于成熟林, 林内气候环境更易受外界影响, 表现在生长季(5~9月)次生林土壤温度平均高于成熟林 1.1 °C (图6), 而土壤含水量低于成熟林约 6%(图4)。此外, 相同层次的土壤温度日变化也存在差异, 次生林 5 cm 深处土壤温度的极值出现时间略提前于成熟林 1~2 h, 这也是造成次生林和成熟林土壤呼吸速

率日变化差异的主要原因。

土壤呼吸作用主要受温度影响(Lloyd & Taylor, 1994; Fang & Moncrieff, 2001), 而土壤含水量过高或过低, 都会对土壤呼吸作用产生抑制作用(de Jong, 1974), 长白山地区的降雨量多集中在生长季的 6~9 月, 占全年降水量的 80% 以上(迟振文等, 1981), 我们的测量也主要在这段时期进行, 尽管从统计意义上土壤含水量对土壤呼吸作用影响不显著, 但也发现在阔叶红松林土壤含水量过高时(图5), 土壤呼吸速率有降低趋势, 限于观测样本数较少, 其阈值确定需要进一步研究。

次生林无论是生物量或土壤有机碳氮含量均低于成熟林(表1), 但次生林主要由阔叶树种组成, 凋

落物和土壤中的有机质碳氮比较小,有利于微生物代谢活动和有机质分解,这可能在一定程度上弥补了次生林土壤呼吸作用的基础——土壤有机质含量少的不足。

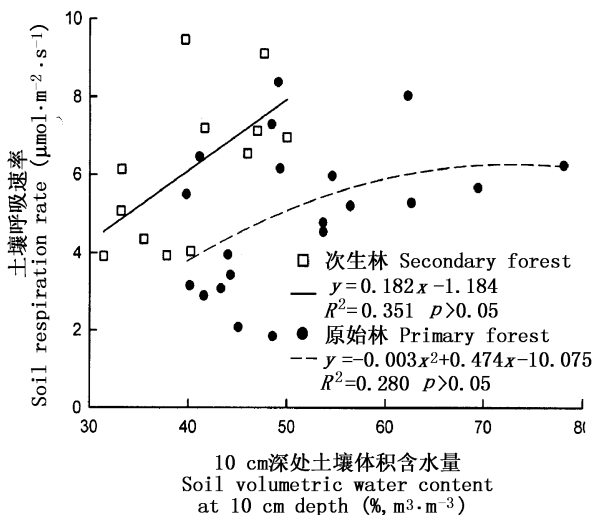


图5 天然次生林与原始林土壤呼吸作用与土壤含水量(0~10 cm)的关系

Fig.5 Relationships between soil respiration and soil water content (during the depth 0-10 cm) at natural secondary forest and primary forest plots

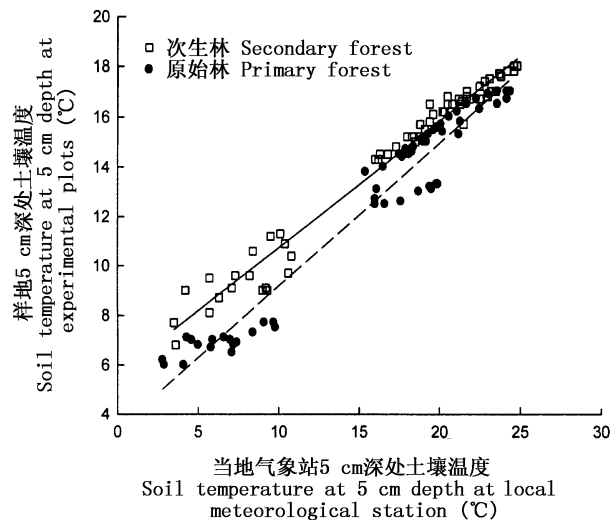


图6 两样地与气象站5 cm深处土壤温度的回归关系

Fig.6 Regressive relationships of soil temperature at 5 cm depth observed between at the experimental plots and meteorological station

在生长季,次生林土壤呼吸强度约为成熟林的1.3倍,这一结果与骆士寿等(2001)发现热带山地雨林更新林土壤呼吸速率大于原始林的研究结果一致,究其原因在于次生林处于演替更新阶段,系统代谢旺盛,林型结构简单,冠层郁闭度低,林内的水热条件和土壤理化性质更利于微生物分解活动和根系

呼吸。

参 考 文 献

- Chi ZW(迟振文), Zhang FS(张凤山), Li XY(李晓晏)(1981). The primary study on water-heat conditions of forest ecosystem on northern slope of Changbai Mountain. *Research of Foest Ecosystem(森林生态系统研究)*, 2, 167-178. (in Chinese with English abstract)
- de Jong E, Schappert HJV, Macdonald KB(1974). Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate. *Canadian Journal of Soil Science*, 54, 299-307.
- Ewel KC, Cropper JWP, Gholz HL(1987). Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations. I. Changes through time. *Canadian Journal of Forest Research*, 17, 325-329.
- Fang C, Moncrieff JB(2001). The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 155-165.
- Huang CC(黄承才), Ge Y(葛滢), Chang J(常杰), Lu R(卢蓉), Xu QS(徐青山)(1999). Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, 19, 324-328. (in Chinese with English abstract)
- Jiang GM(蒋高明), Huang YX(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 Ecologica Sinica(生态学报)*, 17, 477-482. (in Chinese with English abstract)
- Li LH(李凌浩), Chen ZZ(陈佐忠)(1998). Soil respiration in grassland communities in the world. *Chinese Journal of Ecology(生态学杂志)*, 17(4), 45-51. (in Chinese with English abstract)
- Liu Y(刘颖), Han SJ(韩士杰), Hu YL(胡艳玲), Dai GH(戴冠华)(2005). Effects of soil temperature and humidity on soil respiration rate under *Pinus sylvestris* forest. *Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报)*, 16, 1581-1585. (in Chinese with English abstract)
- Lloyd J, Taylor JA(1994). On the temperature-dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 8, 315-323.
- Luo TS(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 in rain forest in Jianfengling, Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, 21, 2013-2017. (in Chinese with English abstract)
- Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, Stangenberger AG(1982). Soil pool and world life zones. *Nature*, 298, 156-159.

- Raich JW, Schlesinger WH(1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44B, 81 – 99.
- Wang CR, Wu J, Liang ZB, Huang GH(2004). Soil carbon dioxide fluxes of a typical broad-leaved/Korean pine mixed forest in Changbai Mountain, China. *Journal of Forestry Research*, 15, 268 – 272.
- Wang Z(王战), Xu ZB(徐振邦), Li X(李昕), Peng YS(彭永山), Qian JJ(钱家驹), Liu ZD(刘子德), Yang Y(杨野), Wei CL(魏成录), Li YZ(李延增)(1980). The main forest types and their features of community structure in northern slope of Changbai Mountain. *Research of Forest Ecosystem* (森林生态系统研究), 1, 25 – 42. (in Chinese)
- Wu JG(吴建国), Zhang XQ(张小全), Xu DY(徐德应)(2003). The temporal variations of soil respiration under different land use in Liupan Mountain forest zone. *Environmental Science* (环境科学), 24(6), 23 – 32. (in Chinese with English abstract)
- 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)(1985). Study on biomass of the broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. *Research of Forest Ecosystem* (森林生态系统研究), 5, 33 – 47. (in Chinese with English abstract)
- Yang YS(杨玉盛), Chen GS(陈光水), Wang XG(王小国), Xie JS(谢锦升), Gao R(高人), Li Z(李震), Jin Z(金钊)(2005). Response of soil CO₂ efflux to forest conversion in subtropical zone of China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 25, 1684 – 1690. (in Chinese with English abstract)
- Zhou GS(周广胜), Wang YH(王玉辉), Jiang YL(蒋延玲), Yang LM(杨利民)(2002). Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling. *Acta Photoecologica Sinica* (植物生态学报), 26, 250 – 254. (Chinese with English abstract)

责任编辑:欧阳 华 责任编辑:姜联合