

枫香 (*Liquidambar formosana*) 和樟树 (*Cinnamomum camphora*) 人工林土壤呼吸及其影响因子的比较

王光军, 田大伦, 朱 凡, 闫文德, 李树战

(中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004)

摘要: 2007 年 1 月至 12 月, 采用 LI-COR-6400-09 气室连接到 LI-COR-6400 便携式 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析系统测定枫香 (*Liquidambar formosana*) 和樟树 (*Cinnamomum camphora*) 人工林的土壤呼吸, 并分析了土壤水热因子及其根生物量对土壤呼吸的影响。研究表明: 枫香和樟树人工林中土壤呼吸的季节动态存在明显的季节性变化, 都呈现不规则的曲线格局。全年土壤呼吸速率平均值分别为 $1.501 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。枫香和樟树林土壤呼吸的季节变化与土壤温度呈显著的指数相关, 土壤温度可以分别解释土壤呼吸变化的 92.7% 和 77.4%, 与土壤含水量呈二次方程关系, 土壤含水量可以解释土壤呼吸变化的 10.6% 和 18%。在 $P=0.05$ 水平上多元回归分析, 分别得出枫香和樟树土壤呼吸与土壤温度和含水量方程: $y = 0.4728e^{0.122x}w^{0.002}$; $y = 0.061e^{0.235x}w^{0.086}$, 土壤温度和含水量共同可以解释土壤呼吸变化的 94.5% 和 88.5%。枫香和樟树林中全年土壤呼吸的 Q_{10} 值分别为 2.62 和 3.26, Q_{10} 值在随着季节温度升高, 而逐渐减小。两种人工林群落土壤呼吸季节变化表现出受非生物因子温度和水分变化的调控, 同时也受森林植被的根生物量、凋落物量的影响。

关键词: 湖南; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤含水量; Q_{10} 值

文章编号: 1000-0933(2008)09-4107-08 **中图分类号:** Q143, Q945, Q948 **文献标识码:** A

Comparison of soil respiration and its controlling factors in sweetgum and Camphortree plantations in Hunan, China

WANG Guang-Jun, TIAN Da-Lun, ZHU Fan, YAN Wen-De, LI Shu-Zhan

College of life science and technology, Central-South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4107 ~ 4114.

Abstract: Seasonal variations of soil respiration in two forest types, Sweetgum (*Liquidambar formosana*) and Camphortree (*Cinnamomum camphora*) plantations, were measured in Tianjiling National Forestry Park of Changsha, Hunan, China. CO_2 effluxes rate was monitored using an infrared gas exchange analyzer (LI-COR-6400-09) from January to December 2007, and the controlling factors, such as soil temperature and moisture were also recorded in the two forests. The results showed that the two plantations had significant different patterns in seasonal soil respiration processes. The two forests exhibited irregular fluctuated curves during the study period with mean rates of soil respiration were $1.501 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $2.800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in Sweetgum and Camphortree stands, respectively. Significant relationships were found between

基金项目: 湖南省杰出青年基金资助项目(07JJ1004); 国家林业局“948”资助项目(2007-4-19); 国家自然科学基金资助项目(30571487); 湖南省科技厅重点资助项目(06FJ3083、05NK3026); 中南林业科技大学青年科学研究基金资助项目(07024B)

收稿日期: 2008-03-22; **修订日期:** 2008-05-29

作者简介: 王光军(1966 ~), 男, 河南信阳人, 副教授, 主要从事森林生态学研究. E-mail: wanggj652@163.com

Foundation item: The project was financially supported by outstanding younger of Hunan province (No. 07JJ1004); State forestry administration of China “948” (No. 2007-4-19); National Science Foundation of China (No. 30571487); Science Foundation of Hunan Province (No. 05JJ40127); Key Project of Science and Technology Department of Hunan (No. 06FJ3083、05NK3026); Project of Education Department of Hunan Province (No. 05C331); Scientific Research Fund of Central South University of Forestry & Technology (No. 07024B)

Received date: 2008-03-22; **Accepted date:** 2008-05-29

Biography: WANG Guang-Jun, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in urban forest ecology; E-mail: wanggj652@163.com

soil respiration rate and soil temperature at 5 cm soil depth in both plantations, which could be best described by exponential equations. However, not significant relationships were found between soil respiration and soil moisture at 5 cm depth. Soil temperature and moisture could explain changes in soil respiration of 92.7%, 77.4% and 10.6%, 18.0%, in the Sweetgum and Camphortree plantations, respectively. The relationship between both soil respiration rate (γ) and the two variables of soil temperature (t) and soil moisture (w) at 5 cm soil depth could be described by the following multiple regression equation: $\gamma = 0.4728e^{0.122t}w^{0.002}$ ($R^2 = 0.945$, $P < 0.0001$), $\gamma = 0.061e^{0.235t}w^{0.086}$ ($R^2 = 0.885$, $P < 0.001$). The multiple equations had much more predicative power than those using only temperature or moisture as a single independent variable. The Q_{10} values in Sweetgum and Camphortree forests were 2.62 and 3.26, respectively, and tended to decrease when soil temperature increased from lower to higher scales. The seasonal patterns of soil respiration in these two forests were not only determined by soil temperature and soil moisture, but also by the fine root mass and litter production as well.

Key Words: Hunan; soil respiration; temperature; moisture; Q_{10} value

以大气层 CO_2 浓度增加(从工业化革命之前的 $280\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 到 2005 年的 $379\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 和地球表面平均温度升高(自 1850 年以来上升了 0.76°C 并且将在本世纪继续升高 $1.8\sim 4.0^\circ\text{C}$) 为标志的全球变化,将对陆地生态系统的碳循环和储量产生长远的深刻影响^[1]。森林生态系统作为陆地生物圈的主体,通过光合作用吸收大气中 CO_2 合成有机物质,并通过根系分泌物和地上与地下凋落物分解和腐殖化作用,形成有机碳固定在土壤中^[2],不仅维持了本身大量的碳库(约占全球植被碳库的 86% 以上),同时也维持着巨大的土壤碳库(约占全球土壤碳库 73%)^[3,4]。土壤呼吸是指土壤释放 CO_2 的过程^[5],包括根际呼吸(根和根际微生物呼吸)和异养呼吸(包括土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸)^[6~8]。土壤呼吸作用全球碳循环的主要能量过程^[9],每年全球土壤呼吸释放 CO_2 量约为 $68\sim 100\text{Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[9,10],是化石燃料释放量的 10 倍左右^[11]。因此,森林土壤呼吸的微弱变动将对大气温室气体的排放总量产生显著的影响^[12]。正因为如此土壤呼吸一直成为全球碳循环研究的重点^[9]。土壤呼吸受到多种因素的影响,国内外研究表明,在季节尺度上,不同生态系统的土壤呼吸均有显著的季节性变化,例如,热带季节雨林和橡胶林^[13]、中亚热带森林^[14]、青藏高原农田生态系统^[15]和北方森林^[16];同时土壤呼吸作用受到土壤温度和湿度的共同影响^[17~20],其中温度是影响土壤呼吸的主要因素之一^[20,21];土壤含水量对呼吸的影响较为复杂,有的研究认为二者正相关,也有研究认为二者不相关,或负相关^[22~24]。

枫香和樟树在我国亚热带森林资源中占有十分重要的地位,研究它们的土壤呼吸动态变化,对于了解枫香和樟树森林生态系统的碳源/汇时空分布格局及碳循环过程的关键驱动因子,确定在碳循环中的源/汇功能有重大价值。本文拟通过研究它们的土壤呼吸,来探讨影响两种森林土壤碳释放模式和强度的环境因子,为准确评估两种森林类型碳收支提供科学依据和参数。

1 实验地概况

试验地位于湖南省长沙市南郊的天际岭国家森林公园,即 $113^\circ 01'\sim 02'\text{E}$, 北纬 $28^\circ 06'\sim 07'\text{N}$,核心区面积约 4356 公顷,海拔 46~114 m,坡度为 $5\sim 25^\circ$ 。当地年平均气温 17.2°C ,1 月最冷,平均 4.7°C ,极端最低温度 -11.3°C ;7 月最热,平均气温 29.4°C ,极端最高气温 40.6°C ;无霜期为 270~300 d,日照时数年均 1677.1 h;雨量充沛,年平均降雨量 1422 mm。属典型的亚热带湿润季风气候。其地层主要是第四纪更新世的冲积性网纹红土和砂砾,属典型红壤丘陵区,园内小生境众多,植物种类达 2200 余种,植被以人工林为主。

本实验从 2006 年 12 月开始,选择树龄相同或相近的枫香(*Liquidambar formosana*)和樟树(*Cinnamomum camphora*)两种人工林作为研究对象,2007 年 1 月调查它们的主要组成成分分别为:枫香林以枫香为优势种,林下生长有木荷(*Schima superba* Gardn.)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、山矾(*Symplocos caudata* Wall.)、大青(*Clerodendron cyrtophyllum*)和樟树,草本植物有五节芒(*Miscanthus floridulus*)、淡竹叶(*Lophanthemum grac-*

ile) 和商陆 (*Phytolacca acinosa*) 为主; 樟树林以樟树为优势种, 林下生长有白栎 (*Quercus fabri* Hance)、毛泡桐 (*Paulownia tomentosa*)、苦槠、山矾、糙叶树 (*Aphananthe aspera*), 草本植物以淡竹叶、酢浆草 (*Oxalis corniculata*)、鸡矢藤 (*Paederia scandens*) 和商陆为主。

2 研究方法

2.1 土壤呼吸的测定

在选择的枫香和樟树林中, 各选择 4 块半径 15 m 的圆形固定样地, 共 8 块样地, 每块样地之间相隔 100 m 以上。2007 年 1 月初在每个固定样地内随机布置 3 个内径为 10.5 cm, 高为 4.5 cm 的 PVC 土壤环。将 PVC 环平放压入土中 2 cm 左右, 剪去环内所有植物的地上部分并保证以后环内没有绿色植物, 砸实外圈土壤以防漏气, 测量在安放土壤环 24h 之后开始, 并保持土壤环在整个测定期间位置不变^[25]。采用 LI-COR-6400-09 (土壤气室) 连接到 LI-COR-6400 便携式 CO₂/H₂O 分析系统 (LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA) 测定土壤呼吸速率。在 9:00 ~ 11:00 每 15d 测定 1 次, 全年共测定 24 次。同时, 用 LI-COR-6400 自带的土壤温度探针测定土壤中 5 cm 的温度, 用 ECH₂O Check (Decagon, USA) 连接 EC-5 测定各样点土壤 5 cm 湿度 (土壤体积水分含水量, cm/m)。

表 1 两种森林的根生物量、凋落物和土壤的理化特性

Table 1 The biomasses of root, litter productions and physical chemical properties in 2 plots over 0 ~ 60cm soil depth

森林类型 Forest type	全 C Total C (mg C·g ⁻¹)	全 N Total N (mg N·g ⁻¹)	碳/氮 C/N	pH	细根 Fine root mass (g·m ⁻²)	粗根 Coarse root mass (g·m ⁻²)	凋落物 Litter production (g·m ⁻² ·yr ⁻¹)
枫香 Sweetgum	13.02 ± 2.15	1.14 ± 0.31	12.82	3.67	173.84 ± 28.20	249.88 ± 65.40	931.53 ± 104.80
樟树 Camphortree	9.45 ± 1.01	0.81 ± 0.18	12.57	3.85	246.80 ± 46.6	671.33 ± 169.70	1003.44 ± 120.90

2.2 根生物量的观测

于 2007 年 1 月、4 月、7 月和 10 月用内径 12 cm, 高 15 cm 土钻, 分别在每个样地内进行 0 ~ 60 cm 土壤根生物量的观测。人工分拣直径 ≤ 2 mm 和 > 2 mm 根, 将分拣好的各样品用水洗净, 在 80 °C 恒温下烘干至恒重后称重, 确定根生物量。年平均根生物量取 4 个月的平均值。根现存量按以下公式计算根生物量^[26]:

细根现存量 (g·m⁻²) = 平均每根土芯根干重 (g) / [π × (d (cm) / 2)²] (cm²), d 为土钻内径。

2.3 凋落物的测定

在每个样地内放置 3 个 1 m² 收集凋落物的纱网。凋落物每月收集 1 次, 在 80 °C 下烘干至恒重后称重, 确定凋落物量。

2.4 土壤有机碳用重铬酸钾氧化-外加热法测定; 全氮用半微量凯氏法测定; pH 值采用电位法测定。

2.5 数据统计分析

所有的统计分析都在 SPSS13.0 软件中进行, 用 One-Way ANOVA 检验土壤呼吸季节变化、不同森林间土壤呼吸、温度和湿度的显著性, 指数回归检验土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量的相关性。所有统计的显著性水平均为 P = 0.05。用 SigmaPlot 9.0 软件作图。

土壤呼吸与温度之间关系采用如下指数模型^[11,27]: $y = ae^{bt}$, 式中, y 为土壤呼吸; t 为气温; a 是温度为 0 °C 时的土壤呼吸^[27]; b 为温度系数。Q₁₀ 值通过下式确定^[28]: $Q_{10} = e^{10b}$ 式中, b 同上式。

3 结果与分析

3.1 土壤温度、湿度的比较

在 2007 年的试验中, 枫香和樟树林之间地下 5 cm 土壤温度差异性显著, 地下 5 cm 土壤温度的变化范围分别在 4.70 ~ 27.26 °C 和 4.40 ~ 27.93 °C, 平均温度分别为 18.27 °C 和 19.10 °C。土壤温度的最大值均出现在 8 月初, 最小值均出现在 1 月份。枫香和樟树林土壤温度呈极显著性相关, R² = 0.99, P < 0.001, 分别与中南林业科技大学城市生态站观测的 5 cm 土壤温度进行相关性分析, 呈极显著性相关, R² = 0.95, P < 0.001,

$R^2 = 0.95, P < 0.001$ 。

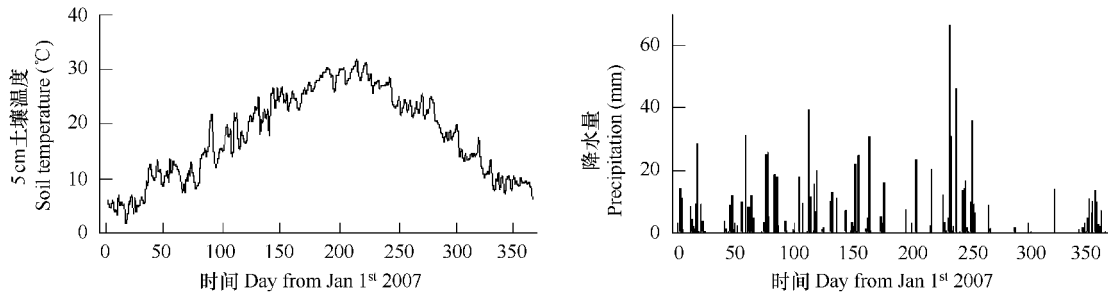


图1 2007年生态站观测的土壤温度、全年的降水量

Fig. 1 Shown are station soil temperature at 5 cm depth, atmosphere precipitation, 2007

枫香和樟树林之间的土壤湿度差异性显著,地下5 cm 土壤含水量变化范围分别在2.01% ~ 20.34%和0.60% ~ 19.874%,平均湿度为12.69%和12.86%。枫香土壤湿度最大值20.34%出现在8月初,而樟树土壤湿度最大值19.87%出现在4月下旬,最小值均出现在11月上旬。两者呈极显著性相关, $R^2 = 0.76, P < 0.001$ 。

3.2 土壤呼吸速率的季节动态

在季节动态上,枫香和樟树林土壤呼吸速率都呈现显著的季节性变化($P < 0.001$,图2),基本上呈现相似的曲线格局,与温度的季节变化趋势基本一致。枫香林的土壤呼吸比樟树的低(除1月初外),全年平均值分别为 $1.501 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从1月开始,枫香的土壤呼吸速率从全年最小值 $0.323 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 随着气温的上升而增加,在3月下旬至4月下旬,土壤呼吸速率停止增长保持水平,5月初至6月初有小幅度的增长,7月上旬达到最大值 $2.655 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,之后至9月下旬,呈下降趋势的小幅度波动,10月初迅速下降,到12月底达到较小值 $0.497 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;樟树林的土壤呼吸速率从1月全年最小值 $0.146 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 开始增加,持续到6月上旬达到第一个峰值 $4.618 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;之后出现小幅度的波动,到8月下旬和9月上旬达到全年的最大值 $5.77 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 后,之后急剧下降,至10月底土壤呼吸速率下降幅度减缓,到12月底接近较小值 $0.683 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。樟树林土壤呼吸速率的最小值比枫香的小,但最大值比枫香林大,是2.17倍。方差分析表明,枫香和樟树林土壤呼吸速率的之间差异性显著($P < 0.001$)。

3.3 土壤呼吸与温度的关系

研究结果表明,两种森林类型的土壤呼吸作用与土壤温度之间具有密切关系,土壤呼吸速率随着温度的升高而升高,两者之间呈显著指数相关($P = 0.000$,图3),

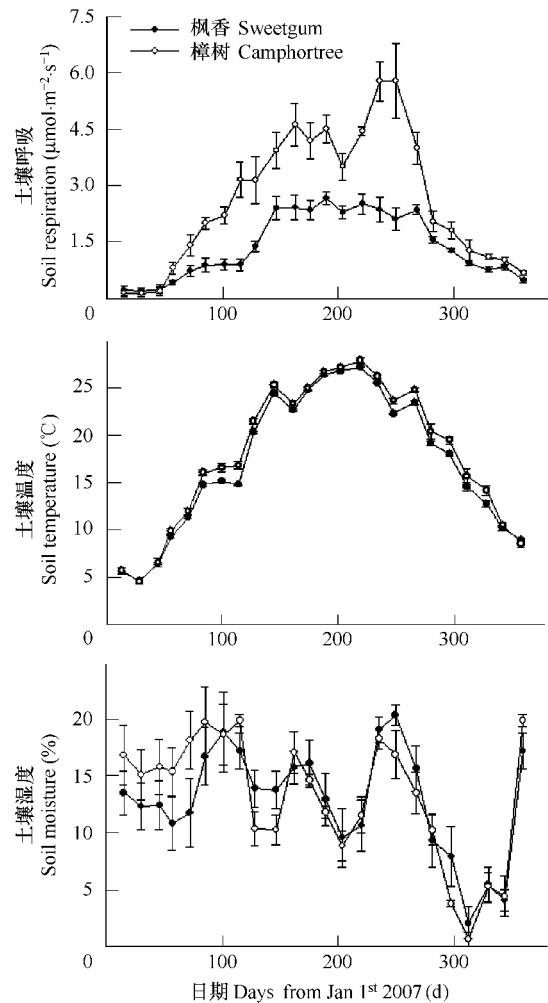


图2 枫香和樟树林土壤呼吸、温度和湿度季节动态

Fig. 2 Seasonal variations of soil respirations, temperatures and moistures in Sweetgum and Camphortree plantation

模拟回归关系方程表达式分别为:

$$\text{枫香林 } y = 0.2177e^{0.0962t} \quad R^2 = 0.927, P = 0.000$$

$$\text{樟树林 } y = 0.2242e^{0.1182t} \quad R^2 = 0.774, P = 0.003$$

式中, y 表示土壤呼吸速率, t 表示 5 cm 土壤温度。从土壤温度指数关系来看, 枫香林土壤呼吸速率受土壤温度影响明显比樟树的大。

3.4 土壤呼吸与湿度的关系

两种森林类型的土壤呼吸速率与土壤含水量之间呈二次方程关系 ($P > 0.05$) (图 4), 相关关系不显著。模拟回归关系表达式分别为:

$$\text{枫香林 } y = -0.0043w^2 + 0.1468w + 0.5331, R^2 = 0.106, P = 0.345$$

$$\text{樟树林 } y = -0.0185w^2 + 0.4901w + 0.1262, R^2 = 0.18, P = 0.153$$

式中, y 表示土壤呼吸速率, w 表示 5 cm 土壤含水量。

3.5 多元回归分析

鉴于土壤呼吸与温度之间的指数关系和标准化后与水分之间的乘幂关系, 以 5 cm 土壤水分的自然对数和温度为变量, 采用多元线性回归中的 Stepwise 方法, 分析土壤呼吸速率的自然对数与温度和湿度的关系, 变量的显著水平设为 0.05, 可以得到这样一个模型:

$$\text{枫香林 } \ln(y) = -0.749 + 0.122\ln(t) + 0.002w$$

$$\text{樟树林 } \ln(y) = -2.792 + 0.235\ln(t) + 0.086w$$

式中, y 为土壤呼吸速率, t 为 5 cm 土壤温度, w 为 5 cm 土壤含水量。

变形后即得到关于土壤呼吸速率同土壤温度和土壤含水量之间的关系模型:

$$\text{枫香林 } y = 0.4728e^{0.122t}w^{0.002}, R^2 = 0.945, P = 0.000$$

$$\text{樟树林 } y = 0.061e^{0.235t}w^{0.086}, R^2 = 0.885, P = 0.001$$

这两个模型可以解释土壤呼吸 94.5% 和 88.5% 的变化情况, 比上述所有单变量模型要好。

4 讨论

4.1 土壤温、湿度对土壤呼吸速率的影响

多数研究表明, 土壤呼吸速率的变化受温度与水分共同调控^[23,29,30]。土壤水热条件是交互作用、共同影响着森林生态系统的土壤呼吸过程, 同时考虑土壤温度和湿度的效应, 可以解释土壤呼吸变化的 67.5% ~ 90.6%^[31~35]。本试验中, 土壤温度是影响土壤呼吸的主要环境因子。枫香和樟树林的土壤呼吸速率与土壤温度呈显著指数关系(图 3), 枫香林土壤温度可以解释土壤呼吸速率变化的 92.7%, 樟树的可以解释 77.4%, 这与 Knapp 等^[29]、Fang 等^[36]、Liu 等^[37]、陈全胜等^[33]、杨金艳等^[35]、常建国等^[38]在不同研究区域和生态系统中, 温度与土壤呼吸之间存在着显著指数关系的研究结果是一致的。1 月份是气温和土壤温度最低的月份, 也是土壤呼吸最小的时候, 3 月初土壤温度上升到 10 °C 以上, 是植物生长季的初期, 根际呼吸开始加强^[39], 6 ~ 9 月份, 是土壤温度最高的月份, 植物光合作用最强时期, 此期间雨水丰富, 土壤含水量变化显著, 此时干湿交替会加速土壤微生物分解地面的凋落物, 刺激微生物生长^[22,40], 这也是土壤呼吸最大的时期。此后, 土壤温度逐渐下降, 同时降水量减少导致土壤湿度的下降, 土壤呼吸速率呈下降的趋势。

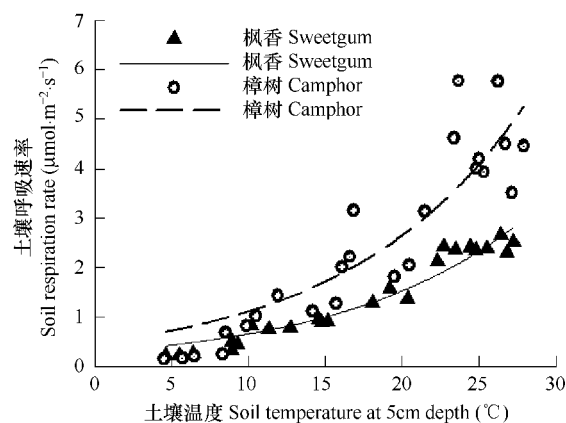


图3 枫香和樟树林土壤呼吸与土壤温度相关关系

Fig. 3 Relationship between soil respirations and soil temperatures at 5 cm depth of Sweetgum and Camphortree plantation

土壤水分对土壤呼吸的影响比较复杂,森林土壤呼吸在一定范围内随土壤湿度增大而增强,在接近田间持水量的一定范围内,土壤呼吸量最高,在饱和或永久萎蔫含水量时,呼吸作用停滞^[41]。Davidson 等^[23]对 Harvard Forest 的温带混交林研究表明,当土壤体积含水量 < 12% 时,土壤呼吸速率和土壤湿度呈正相关,土壤体积含水量 > 12% 时,二者呈现负相关。Xu 和 Qi^[28]对 7~8 年生黄松 (*Pinus ponderosa*) 林的研究表明当土壤体积含水量 < 19% 时,土壤呼吸速率和体积含水量正相关, $R^2 = 0.54$, $P \approx 0.000$; 土壤体积含水量 > 19% 时,二者呈现负相关, $R^2 = 0.74$, $P \approx 0.000$ 。杨金艳等^[35]认为多数情况下土壤湿度对土壤呼吸的影响呈二次曲线关系,土壤呼吸与土壤湿度呈正相关,但当土壤含水量超过一定的阈值,土壤湿度就成了土壤呼吸的抑制因子,主要因为土壤湿度过高或过低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。本试验中,两种森林土壤湿度与呼吸之间呈二次曲线关系,与他们的研究相符,枫香林的土壤含水量 < 17.07% 时,土壤呼吸与含水量呈正相关,大于 17.07% 时,两者呈负相关;樟树林的土壤含水量 < 13.25% 时,土壤呼吸与湿度呈正相关,大于 13.25% 时,两者呈负相关。

4.2 温、湿度对两种人工林 Q_{10} 值的影响

Q_{10} 通常被用来表示土壤呼吸对温度变化响应的敏感程度^[28],温度敏感性指数 (Q_{10} 值) 多为 1.8 ~ 4.1^[28,42,43]。本试验中,分别计算出枫香和樟树林的 Q_{10} 值分别为 2.62 和 3.26,与其它森林生态系统 Q_{10} 值相符。按土壤温度小于 10℃, 10~20℃ 和大于 20℃ 三个温度段,分别计算它们的 Q_{10} 值为 17.24、2.11、1.85 和 14.94、2.38、2.03,呈现显著负相关, $P = 0.000$,这可能是因为在此较低的温度下的 Q_{10} 值较高^[44]。温度变化间接引起的对土壤微生物和植物根系生理活性的不同导致土壤呼吸 Q_{10} 值的差异性,因为与矿质土壤微生物呼吸相比,根呼吸(包括根际呼吸)似乎对温度变化的响应更为敏感^[45]。

4.3 两种森林土壤呼吸的比较

森林土壤呼吸作用主要源于林木根系的自养呼吸和土壤微生物的异养呼吸,在同一区域的森林类型是影响森林土壤呼吸的主要原因之一^[28]。土壤呼吸受水热条件影响的程度,主要是由于不同森林类型的生物量积累、根系生物量及其呼吸量、凋落物质量和数量及土壤微生物数量和活性不同引起的^[43]。Raich & Tufekcioglu^[46]指出,相同立地条件下(气候状况和土壤本底相同),森林植被对土壤呼吸有重要的影响,它可通过影响凋落物数量和质量、根呼吸速率、土壤状况及小气候条件等而影响土壤呼吸。本试验中,气候条件相同,而樟树林的年平均土壤呼吸速率是枫香林的 1.87 倍,可能的原因是:樟树林土壤 0~60 cm 的粗根生物量 (> 2 mm) 比枫香林高 2.69 倍,细根生物量 (≤ 2 mm) 高 1.42 倍,凋落物年平均进入量高 7.2%,从而产生的根呼吸和微生物代谢呼吸较强。另外植物生理活动的差异,是两种群落土壤呼吸不同的原因之一。Tang 等^[8]报道占林地土壤呼吸主要部分的根际呼吸与树木的光合作用相关,根际呼吸滞后于光合作用 7~12 h。由此可见,土壤呼吸速率是众多因子协同作用的结果,但其中的主要限制因子因森林生态系统而异^[32]。

总之,枫香和樟树人工林的土壤呼吸季节变化表现出受非生物因子温度和水分变化的调控,同时也受森林植被的根生物量、凋落物量的影响。但由于野外实验无法将土壤温度和湿度对土壤呼吸的影响区分开,土壤湿度对土壤呼吸的影响容易被土壤温度效应所遮盖,这两个数据是否可靠,要进行室内实验进一步验证。

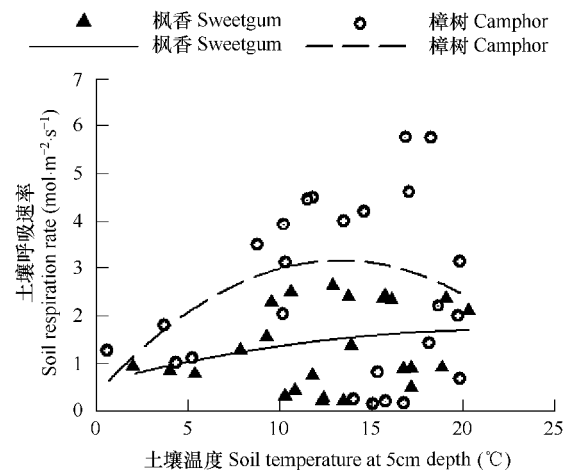


图4 枫香和樟树林土壤呼吸与土壤湿度相关关系
Fig. 4 Relationship between soil respirations and soil moistures at 5 cm depth of Sweetgum and Camphortree plantation

References:

- [1] IPCC (Inter governmental Panel on Climate Change). IPCC WGI Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Switzerland, 2007.
- [2] Matsushima M, Chang S X. Vector analysis of understory competition, N fertilization, and litter layer removal effects on white spruce growth and nutrition in a 13-year-old plantation. *Forest Ecology and Management*, 2006, 236: 332—341.
- [3] Woodwell Q M. The biota and world carbon budget. *Science*, 1978, 199: 141—146.
- [4] Post W M, Emanuel W R. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298: 156—159.
- [5] Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperatures's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469—476.
- [6] Hanson P J, Edwards N T, Garten G T, *et al.* Separating root and microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 115—146.
- [7] Kelting D L, Burger J A, Edwards G S. Estimating root respiration microbial respiration in the rhizosphere and root free soil respiration in forest soils. *Soil biology and Biochemistry*, 1998, 30: 961—968.
- [8] Tang J W, Badocchi D D, Xu L K. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale. *Global Chang Ecology*, 2005, 11: 1298—1304.
- [9] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide efflux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44 (B): 81—99.
- [10] Musselman R C, Fox D G. A review of the role of temperate forests in the global CO₂ balance. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1991, 41: 798—807.
- [11] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biochemical Cycles*, 1995, 9: 23—36.
- [12] Burton A J, Pregitzer K S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine. *Tree physiology*, 2003, 23: 273—280.
- [13] Fang G L, Sha L Q. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan, SW China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30: 97—103.
- [14] Huang C C, Ge Y, Chang J, *et al.* Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China. *Acta Ecological Sinica*, 19(3): 324—328.
- [15] Shi P L, Zhang X Z, Zhong Z M, *et al.* Diurnal and seasonal variability of soil CO₂ efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137: 220—233.
- [16] Rayment M B, Jarvis P G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 35—45.
- [17] Li L H, Wang Q B, Bai Y F, *et al.* Soil respiration of a *Leymus chinensis* grassland stand in the Xilin River basin as affected by over grazing and climate. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24: 680—686.
- [18] Li L H, Han X G, Wang Q B, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to total soil respiration in a grazed grassland in the Xilin River basin. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26: 29—32.
- [19] Li L H, Han X G, Wang Q B, *et al.* Soil carbon balance in a native temperate grassland in the Xilin River basin of Inner Mongolia. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44: 740—743.
- [20] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, *et al.* Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26: 250—254.
- [21] Fang C, Moncrief J B, Gholz H L, *et al.* Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant and Soil*, 1998, 205: 135—146.
- [22] Maier C A, Kress L W. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantation as affected by moisture and nutrient availability. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30: 347—359.
- [23] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217—227.
- [24] O' Neill K P, Kasischke E S, Richter D D. Environmental controls on soil CO₂ flux following fire in black spruce, white spruce, and aspen stands of interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32(9): 1525—1541.
- [25] Wang C K, Bond_Lamberty B, Gower S T. Soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce fire chronosequence. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002, 108: 8224.
- [26] McLaughert C A, Aber J D, Melillo J M. The role of fine root in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology*, 1982, 63: 1481—1490.
- [27] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413: 622—625.

- [28] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15: 687–696.
- [29] Knapp A K, Conard S L, Blair J M. Determinants of Soil CO_2 flux from a sub-humid grassland effect of fire and fire history. *Ecological Application*, 1998, 8(3): 760–770.
- [30] Qi Y, Xu M, Wu J. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprise. *Ecological Modelling*, 2002, 153: 131–142.
- [31] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest. *Plant and Soil*, 1997, 190: 127–141.
- [32] Xu M, Qi Y. Soil surface CO_2 efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, 7: 667–677.
- [33] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of degraded steppe community in the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27: 202–209.
- [34] Kang S Y, Doh S Y, Lee D S, *et al.* Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1427–1437.
- [35] Yang J Y, Wang C K. Partitioning soil respiration of temperate forest ecosystems in Northeastern China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30(2): 286–294.
- [36] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 155–165.
- [37] Liu J J, Wang D X, Lei R D, *et al.* Turnover processes and energy change of fine roots of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus aliena var. acuteserrata* natural forests in Qin ling Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(4): 1–6.
- [38] Chang J G, Liu S R, Shi Z M, *et al.* Soil respiration and its components partitioning in the typical forest ecosystems at the transitional area from the northern subtropics to warm temperate, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27: 1791–1802.
- [39] Feng W T, Zou X M, Sha L Q, *et al.* Comparisons between seasonal and diurnal patterns of soil respiration in a montane evergreen broad-leaved forest of Ailao mountains, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2008, 32(1): 31–39.
- [40] Yang Y S, Chen G S, Dong B, *et al.* Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24: 953–958.
- [41] Irvine J, Law B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests. *Global Change Biology*, 2002, 8: 1–12.
- [42] Ohashi M, Gyokusen K, Saito A. Measurement of carbon dioxide evolution from a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) forest floor using an open-flow chamber method. *Forest Ecology and Management*, 1999, 123: 105–114.
- [43] Erland B, Hakan W. Soil and rhizosphere microorganisms have the same Q_{10} for respiration in a model system. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1788–1791.
- [44] Shi P L, Zhang Z M, Ouyang H. Diurnal and seasonal variability of soil CO_2 efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137: 220–233.
- [45] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396: 570–572.
- [46] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71–90.

参考文献:

- [5] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, 17(5): 469–476.
- [13] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 97–103.
- [14] 黄承才, 葛滢, 常杰, 等. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究. *生态学报*, 1999, 19(3): 324–328.
- [17] 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 680–686.
- [18] 李凌浩, 韩兴国, 王其兵, 等. 锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计. *植物生态学报*, 2002, 26(1): 29–32.
- [20] 周广胜, 王玉辉, 蒋延玲, 等. 陆地生态系统类型转变与碳循环. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 250–254.
- [33] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 202–209.
- [35] 杨金艳, 王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面 CO_2 通量的影响. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 286–294.
- [38] 常建国, 刘世荣, 史作民, 等. 北亚热带-南温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离. *生态学报*, 2007, 27(5): 1791–1802.
- [39] 冯文婷, 邹晓明, 沙丽清, 等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 31–39.
- [40] 杨玉盛, 陈光水, 董彬, 等. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应. *生态学报*, 2004, 24: 953–958.