

鄂东南低丘马尾松林和枫香林土壤 异养呼吸及温湿度敏感性*

王传华^{1,2} 陈芳清¹ 王愿¹ 李俊清^{2**}

(¹ 三峡大学, 湖北宜昌 443000; ² 北京林业大学森林培育教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要 采用野外监测方法,研究了鄂东南低丘地区主要森林类型枫香林和马尾松林土壤异养呼吸、土壤温湿度的年动态;并通过室内试验研究了土壤呼吸随土壤深度的变化以及表层土壤(0~5 cm)异养呼吸的温湿度敏感性,建立了表层土壤异养呼吸的温湿度响应模型,探讨全球温暖化对该区土壤异养呼吸的潜在影响.结果表明:枫香林和马尾松林0~5 cm土壤呼吸速率分别是5~10 cm、10~15 cm层的2.39、2.62倍和2.01、2.94倍,说明土壤异养呼吸主要发生在土壤表层(0~5 cm);枫香林和马尾松林0~5 cm、5~10 cm及10~15 cm土壤的 Q_{10} 分别是2.10、1.86、1.78和1.86、1.77、1.44;枫香林和马尾松林表层土壤呼吸对温度(T)的响应符合指数模型 $[R = \alpha \exp(\beta T)]$,对湿度(W)的响应符合二次函数模型($R = a + bW + cW^2$);0~5 cm土壤对温湿度双因子的响应符合 $\ln R = a + bW + cW^2 + dT + eT^2$ 模型,且异养呼吸对湿度的响应具有温度依赖性,即在高温下敏感,低温下敏感性下降;应用表层土壤异养呼吸温湿度模型预测枫香林和马尾松林土壤异养呼吸年动态及总量,枫香林土壤异养呼吸量的模拟值比实测值略高,而马尾松林比较接近,说明该方法具有较好的应用价值.在全球温暖化的背景下,该地区马尾松林和枫香林的土壤呼吸会明显上升.

关键词 枫香林 马尾松林 土壤异养呼吸 Q_{10}

文章编号 1001-9332(2011)03-0600-07 中图分类号 S153 文献标识码 A

Soil heterotrophic respiration and its sensitivity to soil temperature and moisture in *Liquidambar formosana* and *Pinus massoniana* forests in hilly areas of southeast Hubei Province, China. WANG Chuan-hua^{1,2}, CHEN Fang-qing¹, WANG Yuan¹, LI Jun-qing² (¹China Three Gorges University, Yichang 443000, Hubei, China; ²Ministry of Education Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(3): 600-606.

Abstract: Field monitoring was conducted to study the annual dynamics of soil heterotrophic respiration and soil temperature and moisture in *Liquidambar formosana* and *Pinus massoniana* forests in hilly areas of southeast Hubei Province, China. At the same time, laboratory experiment was performed to study the heterotrophic respiration rate along soil profile, and the sensitivity of surface soil (0-5 cm) heterotrophic respiration to soil temperature and moisture. Then, a model was established to evaluate the potential effects of warming change on the soil heterotrophic respiration in study area. In *L. formosana* and *P. massoniana* forests, the soil heterotrophic respiration rate in 0-5 cm layer was 2.39 and 2.62 times, and 2.01 and 2.94 times of that in 5-10 cm and 10-20 cm layers, respectively, illustrating that soil heterotrophic respiration mainly occurred in 0-5 cm surface layer. The temperature sensitivity factor (Q_{10}) of soil heterotrophic respiration in 0-5 cm, 5-10 cm, and 10-20 cm layers was 2.10, 1.86, and 1.78 in *L. formosana* forest, and 1.86, 1.77, and 1.44 in *P. massoniana* forest, respectively. The relationship between surface soil heterotrophic respiration and temperature (T) well fitted exponential function $R = \alpha \exp(\beta T)$, and that between surface soil heterotrophic respiration and moisture (W) well fitted quadratic function $R = a + bW + cW^2$. Therefore, the relationship of surface soil heterotrophic respiration with soil temperature and moisture could be described by the model $\ln R = a + bW + cW^2 + dT + eT^2$, which suggested

* 国家“十一五”林业科技支撑计划项目(2006BAD03A16)资助。

** 通讯作者. E-mail: lijq@bjfu.edu.cn

2010-08-20 收稿, 2010-12-18 接受。

that the response of soil heterotrophic respiration to soil moisture was depended on soil temperature, *i. e.*, the sensitivity decreased with decreasing soil temperature. The calculation of the annual soil heterotrophic respiration rate in the two forests with the established model showed that the calculated respiration rate was a slightly higher in *L. formosana* forest but close to the measured one in *P. massoniana* forest, illustrating the applied importance of the model. Our results suggested that the soil heterotrophic respiration in the *L. formosana* and *P. massoniana* forests in hilly areas of south-east Hubei Province would have an obvious increase under the background of global warming.

Key words: *Liquidambar formosana* forest; *Pinus massoniana* forest; soil heterotrophic respiration; Q_{10} .

土壤表面 CO_2 通量(即土壤呼吸)是从陆地生物圈到大气圈最大的 CO_2 通量,是影响大气 CO_2 浓度的关键生态学过程^[1]. 土壤异养呼吸受植被类型、土壤温度和水分、土壤养分、土壤微生物区系及其活性等多种因素的影响,因此了解地区代表性植被土壤呼吸对土壤温湿度的响应,对准确估算区域 CO_2 排放量具有重要意义^[2],尤其是在全球气温升高和降水格局发生变化的背景下更为重要^[3]. 据 IPCC 预测,到 21 世纪末,气温将平均升高 $1.4\text{ }^\circ\text{C} \sim 5.8\text{ }^\circ\text{C}$,其对土壤异养呼吸的影响已引起国内外学者的广泛关注^[4-5].

以往的研究证明,土壤呼吸速率-土壤温度的关系符合简单指数模型^[6],而土壤呼吸-土壤湿度的关系符合线性模型、二次方程模型等^[7]. 由于林型间土壤微生物及其他环境因子的差异^[8],需要通过实际测量来拟合具体林型的相关模型. 研究土壤呼吸对土壤温度和土壤湿度响应的方法,包括野外原位测定和室内控制培养两类^[5,9-11]. 由于温度和水分因子之间存在协同变化,野外条件下很难准确测定其对土壤呼吸的影响^[5]. 在室内控制条件下测定土壤呼吸对温度和湿度的响应成为国际通用的方法^[12]. 我国学者研究土壤呼吸影响因子的方法主要为野外原位研究^[10-11,13],开展室内控制培养的研究较少,仅涉及沙地、湿地和常绿阔叶林等少数土壤类型^[14-16],有关温度和湿度对马尾松林和枫香林土壤呼吸影响的研究尚未见报道.

鄂东南低山丘陵区各种类型次生林的覆盖率达 35%,马尾松(*Pinus massoniana*)林、枫香(*Liquidambar formosana*)林为代表性植被类型^[17-18]. 此外,马尾松林还分布于长江中下游地区和华南地区^[19],兼有用材林和生态林双重功能;枫香林是我国南方地区较典型的次生林植被,分布面积较广^[20]. 因此,研究影响马尾松林和枫香林土壤呼吸的主要因子,对于研究长江中下游地区次生林的土壤碳动态具有重要意义. 本文采用野外原位研究方法测定马尾松林和枫香林土壤的异养呼吸及其温度、水分动态;采用

室内培养的方法,研究上述 2 种林型不同土壤层次对异养呼吸的贡献及表土异养呼吸对土壤温度和湿度变化的响应特点,建立预测上述林型土壤异养呼吸的模型;探讨建立模型的有效性及其未来气候变化对上述林型土壤呼吸的影响,为预测全球气候变化背景下长江中下游地区的 CO_2 排放和森林植被管理提供部分理论支持.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

研究地属大别山余脉的湖北省浠水县清泉镇,位于武汉市东南 91 km ($30^\circ 24' \text{ N}$, $115^\circ 19' \text{ E}$, 海拔 120 ~ 200 m). 该地区属于亚热带大陆性气候,年均气温 $16.9\text{ }^\circ\text{C}$,年均降水量 1350 mm,70% 降水发生在 4-8 月. 马尾松林和落叶阔叶次生林是当地的主要植被类型,在长江中下游地区具有典型性和代表性. 马尾松林林龄约 25 ~ 30 a,建群种为马尾松、枫香、栎类(*Quercus* spp.)、化香(*Platycarya strobilacea*)和合欢(*Albizia julibrissin*),冠层树种的高度在 12 ~ 15 m,胸径在 12 ~ 18 cm;枫香林林龄大于 45 a,纯林,树高 15 ~ 20 m,胸径 12 ~ 25 cm^[21].

1.2 研究方法

1.2.1 土壤异养呼吸速率测定 采用挖壕法测定土壤异养呼吸速率^[22]. 2008 年 2 月选择典型的马尾松林和枫香林,分别设置 20 m × 20 m 的样地 3 块,采用对角线法在每块样地内设置 3 ~ 5 个 1 m × 1 m 的小样方,在小样方四周挖壕深至 100 cm,壕内用双层厚塑料布隔离小样方周围的根系,清除小样方内凋落物和活体植物后,在中央埋设 PVC 管. 2008 年 4 月-2009 年 3 月,用 EGM-4 型土壤呼吸仪(PP-system 公司)测定土壤呼吸速率及 5 cm 深处土壤温度;同时用环刀取 0 ~ 20 cm 的土柱,用烘干法测定土壤含水量. 3-8 月每 15 d 测定一次,9-12 月每 30 d 测定一次;1-2 月因气温较低,仪器无法使用,未测定.

1.2.2 土壤异养呼吸温湿度敏感性测定 1) 土壤取

样与制备: 2008年11月,在上述样地内随机设置若干土壤取样点. 仔细清除地表凋落物后,用环刀取土(直径6.1 cm、高度20 cm),将土柱分成0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm 3层,将同一林型的同层土壤混合后放入低温保温箱中保存. 运回实验室后,一部分样品去掉树根和石头后过6 mm和4 mm筛,置于4℃下备测土壤呼吸. 另一部分参照Rey等^[5]的方法测量土壤含水量、田间持水量(WHC)及pH值(表1);将土壤烘干、磨细过2 mm筛,用10%盐酸除去碳酸盐中的碳后,采用VarioEL III元素分析仪测定土壤有机C含量^[23].

2)不同深度土壤异养呼吸温度敏感性测定:采用黑暗条件下自然失水的方法将土壤湿度控制到略低于60%田间持水量.对每一层土壤,计算并准确称取折合为30 g干土的鲜土壤样品,装入250 ml的玻璃瓶中,用蒸馏水将土壤湿度调整到田间持水量的60%,用透气膜封住瓶口,分别放入30、20、10和4℃的恒温箱中培养,每温度3瓶作为重复.

3)表层土壤异养呼吸的温湿度敏感性测定:试验2)的结果表明,马尾松林和枫香林0~5 cm土层的异养呼吸强度显著高于5~10 cm、10~20 cm土层,故只选择0~5 cm的土壤为试验材料.首先在黑暗条件下逐步阴干土壤并测定其含水量,然后准确称取折合30 g干土的鲜土壤装入250 ml的玻璃瓶中,喷施少量蒸馏水将土壤湿度调整到田间持水量的100%、80%、60%、40%和20%后,分别放入温度为30℃、20℃、10℃和4℃的恒温箱中培养,每温度3瓶作为重复.

4)土壤培育及呼吸测定:培育周期为7 d,共4个周期.每个培养期结束时,用EGM-4型便携式CO₂分析仪(PP-systems公司,英国)测定土壤CO₂的释放速率.测定时,先将两个医用针头(内径1 mm)

分别与分析仪进、气出口引出的软管相连.测定时先用橡皮塞密封瓶口,立即用针头刺穿橡皮塞形成气体回路,记录起始时间(T_0 , min)和培养瓶内CO₂浓度(C_0 , $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),拔出针头后迅速将培养瓶放回培养箱,3 h后测定瓶内CO₂浓度(C_1 , $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),并记录终止时间(T_1).然后计算该时间间隔的土壤CO₂呼吸速率(R_s , $\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{DM} \cdot \text{d}^{-1}$).土壤异养呼吸速率计算公式为:

$$R_s = [(C_1 - C_0) \times 0.25 \times 1440 \times 44] / [(T_1 - T_0) \times 30]$$

式中,0.25为培养瓶容积(L).

1.3 数据处理

采用SPSS 13.0对0~20 cm各土层间异养呼吸速率的差异进行ANOVA分析;应用 $R = \alpha \exp(\beta T)$ 模型拟合土壤呼吸的温度敏感性^[24],再根据 $Q_{10} = \exp(10\beta)$ 计算 Q_{10} .对于表层(0~5 cm)土壤,采用 $R = a + bW + cW^2$ 和 $R = \alpha \exp(\beta T)$ 分别对湿度(W)和温度(T)进行拟合,然后用 $\ln R = a + bT + cT^2 + dW + eW^2$ 模型对土壤异养呼吸与温湿度的关系进行拟合^[5].应用建立的 $\ln R = a + bT + cT^2 + dW + eW^2$ 模型及实际测定的土壤温湿度,估算马尾松林、枫香林各时点异养呼吸强度及年异养呼吸量,采用线性回归法分析估算值与实测值间的相关关系.估算时,将土壤实际持水量转换为相对田间持水量的百分数.

数据的ANOVA、回归及相关分析均在SPSS 13.0软件中进行,方程拟合及绘图采用Origin 7.5软件.

2 结果与分析

2.1 不同林型各深度土壤有机碳含量变化

研究区枫香林和马尾松林土壤有机碳含量均随土壤深度增加而降低,同一深度的马尾松林土壤有机碳含量显著低于枫香林(表2).

表1 枫香林和马尾松林土壤主要理化性质

Table 1 Main physical and chemical properties of soil (0-20 cm) in *Liquidambar formosana* and *Pinus massoniana* forests (mean \pm SE)

林型 Forest type	土壤深度 Soil depth (cm)	pH	容重 Soil bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	田间持水量 WHC ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)
枫香林 <i>L. formosana</i> forest	0~5 5~10 10~20	6.04 \pm 0.06	0.81 \pm 0.03	0.46 \pm 0.01 0.37 \pm 0.03 0.35 \pm 0.02
马尾松林 <i>P. massoniana</i> forest	0~5 5~10 10~20	6.40 \pm 0.03	0.89 \pm 0.12	0.30 \pm 0.03 0.25 \pm 0.02 0.26 \pm 0.01

表2 枫香林和马尾松林不同深度土壤有机碳含量

Table 2 Content of organic carbon ($\text{g C} \cdot \text{kg}^{-1}$) along soil depth in *Liquidambar formosana* and *Pinus massoniana* forests (mean \pm SE)

土壤深度 Soil depth (cm)	枫香林 <i>L. formosana</i> forest	马尾松林 <i>P. massoniana</i> forest
0~5	9.3 \pm 1.1aA	3.2 \pm 0.7aB
5~10	5.2 \pm 0.3bA	1.5 \pm 0.9bB
10~15	4.9 \pm 0.7bA	1.5 \pm 0.8bB

同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$) Different small letters within the same column indicated significant difference at 0.05 level. 同行数据后不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$) Different capital letters within the same raw indicated significant difference at 0.01 level.

2.2 不同林型各深度土壤异养呼吸变化

枫香林 0~5 cm 土层土壤异养呼吸速率占 0~20 cm 土层土壤呼吸的 55.6%, 极显著地高于 5~10 cm 和 10~20 cm 土层 ($P<0.01$); 5~10 cm 与 10~20 cm 土层间差异不显著。马尾松林 0~5 cm 土层土壤异养呼吸速率为 $271.11 \mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 占 0~20 cm 土层土壤呼吸的 55.0%, 极显著地高于 5~10 cm 和 10~20 cm 土层; 5~10 cm 与 10~20 cm 土层间差异不显著 (表 3)。

2.3 不同深度土壤异养呼吸的温度敏感性

各深度的土壤异养呼吸对温度的响应均符合 Lloyd 和 Taylor 方程 (表 4)。枫香林 0~5、5~10 和 10~20 cm 土层的 Q_{10} 值分别为 2.10、1.86 和 1.78, 马尾松林 0~5、5~10 和 10~20 cm 土层的 Q_{10} 值分别为 1.86、1.77 和 1.44, 说明马尾松林和枫香林土

表 3 枫香林和马尾松林不同深度土壤的异养呼吸
Table 3 Heterotrophic respiration ($\mu\text{g CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) along soil depth in *Liquidambar formosana* and *Pinus massoniana* forests

林型 Forest type	土层 Soil depth (cm)		
	0~5	5~10	10~20
枫香林 <i>L. formosana</i> forest	309.63a	129.15b	118.10b
马尾松林 <i>P. massoniana</i> forest	271.11a	129.80b	92.27b

同行不同字母表示差异极显著 ($P<0.01$) Different letters within the same row indicated significant difference at 0.01 level.

壤呼吸对温度的敏感性随土壤深度而降低。

2.4 温湿度对土壤异养呼吸速率的影响

应用 $R=a+bW+cW^2$ 模型拟合的结果表明, 枫香林和马尾松林表层土壤呼吸对湿度变化的响应符合二次函数模型 (表 5); 土壤呼吸对湿度的敏感性随

表 4 不同深度土壤异养呼吸对温度响应指数模型的拟合参数

Table 4 Parameters of temperature dependence functions (exponential) for heterotrophic respiration along soil depth (mean \pm SE, $n=3$)

林型 Forest type	土层 Soil depth (cm)	R_0	β	R^2	P	Q_{10}
枫香林 <i>L. formosana</i> forest	0~5	72.98 \pm 15.42a	0.074 \pm 0.008a	0.989	<0.01	2.10
	5~10	39.59 \pm 2.70b	0.062 \pm 0.003a	0.998	<0.01	1.86
	10~20	40.48 \pm 12.35b	0.058 \pm 0.012a	0.951	<0.05	1.78
马尾松林 <i>P. massoniana</i> forest	0~5	83.54 \pm 6.43a	0.062 \pm 0.007a	0.983	<0.01	1.86
	5~10	44.58 \pm 6.56b	0.057 \pm 0.006a	0.988	<0.01	1.77
	10~20	48.93 \pm 2.05b	0.036 \pm 0.018a	0.720	>0.05	1.44

同列数据后不同字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different letters within the same column indicated significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

表 5 枫香林和马尾松林土壤异养呼吸单因子 [温度 $R=R_0 \exp(\beta T)$ 或湿度 $R=R_0+aW+bW^2$] 模型的拟合参数

Table 5 Parameters of single factor functions [soil temperature $R=R_0 \exp(\beta T)$ and soil moisture $R=R_0+aW+bW^2$] for heterotrophic respiration of surface soil (0~5 cm) in *Liquidambar formosana* and *Pinus massoniana* forests (mean \pm SE, $n=3$)

林型 Forest type	因子 Factor	R_0	a	b	β	P	R^2	Q_{10}	
枫香林 <i>L. formosana</i> forest	温度 T ($^{\circ}\text{C}$)	4	48.34 \pm 5.98	-0.08 \pm 0.23	0.006 \pm 0.002		<0.01	0.990	
		10	34.41 \pm 33.12	3.12 \pm 1.26	-0.014 \pm 0.010		<0.05	0.953	
		20	34.47 \pm 28.69	7.93 \pm 1.09	-0.031 \pm 0.009		<0.01	0.995	
		30	-56.86 \pm 236.51	17.22 \pm 9.01	-0.074 \pm 0.074		<0.05	0.923	
	湿度 M (% WHC)	20	51.48 \pm 16.65			0.053 \pm 0.012	<0.05	0.930	1.71a
		40	59.18 \pm 11.67			0.076 \pm 0.007	<0.01	0.991	2.14a
		60	85.24 \pm 31.36			0.066 \pm 0.014	<0.05	0.954	1.94a
		80	94.73 \pm 20.25			0.077 \pm 0.008	<0.01	0.990	2.15a
马尾松林 <i>P. massoniana</i> forest	温度 T ($^{\circ}\text{C}$)	4	-6.08 \pm 18.33	2.14 \pm 0.70	-0.013 \pm 0.006		<0.05	0.924	
		10	-23.45 \pm 51.84	2.40 \pm 1.98	-0.007 \pm 0.016		<0.05	0.899	
		20	-138.00 \pm 40.81	12.07 \pm 1.56	-0.061 \pm 0.013		<0.01	0.993	
		30	-147.27 \pm 97.30	13.75 \pm 3.71	-0.067 \pm 0.030		<0.05	0.972	
	湿度 M (% WHC)	20	56.00 \pm 31.66			0.021 \pm 0.025	>0.05	0.310	1.24a
		40	58.14 \pm 17.60			0.059 \pm 0.011	<0.05	0.954	1.80b
		60	111.58 \pm 41.47			0.048 \pm 0.014	<0.05	0.890	1.62b
		80	120.32 \pm 64.95			0.049 \pm 0.021	>0.05	0.805	1.63b
	100	122.36 \pm 47.32			0.054 \pm 0.015	<0.05	0.910	1.71b	

土壤温度上升而提高. 随温度上升, 枫香林土壤基础呼吸速率(R_0)和 b 值降低, a 值升高; 马尾松林 R_0 降低, a 值、 b 值变化不明显.

枫香林各湿度下土壤呼吸对温度变化的响应均符合 Lloyd 和 Taylor 方程 ($P < 0.05$), 20% 田间持水量的 Q_{10} 显著低于其他各湿度. 马尾松林土壤湿度为 40%、60% 和 100% 田间持水量时, 土壤呼吸对温度变化的响应符合 Lloyd 和 Taylor 方程 ($P < 0.05$); 而当土壤湿度 \geq 田间持水量的 40%, 土壤异养呼吸的温度敏感性变化不明显(表 5).

采用湿度、温度两因子模型 $\ln R = a + bW + cW^2 + dT + eT^2$ 对枫香林、马尾松林表层土壤呼吸模拟, 结果表明, 模型能较好地拟合温度和水分对马尾松林和枫香林土壤异养呼吸的影响 ($P < 0.01$); 高温区土壤呼吸对湿度的响应较低温区敏感(表 6).

2.5 马尾松林和枫香林土壤年呼吸量估算

从表 7 可以看出, 马尾松林和枫香林各时点异养呼吸估算值和实测异养呼吸存在显著的相关关系, 说明建立的土壤温湿度模型能较好地拟合土壤异养呼吸. 根据土壤物理性质(表 1)及模型预测值对两种林型土壤异养呼吸的估算得到, 枫香林的年异养呼吸量为 $2746.4 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$, 比实测值 ($2471.8 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$) 高 11.1%; 马尾松林的年异养呼吸量为 $2660.7 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$, 比实测值 ($2717.7 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$) 低 2.1%.

表 6 枫香林和马尾松林 0~5 cm 土壤异养呼吸两因子(土壤湿度、温度)模型的拟合参数

Table 6 Parameter of the polynomial factors (soil moisture and soil temperature) functions for heterotrophic respiration (ln-transformed) of the top soil layer (0~5 cm) in *Liquidambar formosana* and *Pinus massoniana* forests

林型 Forest type	参数 Parameter	估计值 Estimated value	标准误 SE	P
枫香林 <i>L. formosana</i> forest	a	2.502	0.164	<0.0001
	b	0.028	0.006	<0.0001
	c	-0.00013	<0.000	<0.0001
	d	0.150	0.016	<0.0001
	e	-0.002	<0.000	<0.0001
马尾松林 <i>P. massoniana</i> forest	a	1.362	0.358	<0.0001
	b	0.065	0.011	<0.0001
	c	-0.0003901	<0.000	<0.0001
	d	0.148	0.031	<0.0001
	e	-0.003	<0.000	<0.005

表 7 枫香林和马尾松林土壤呼吸估计值和实测值的比较
Table 7 Comparison of estimated values and measured values for soil heterotrophic respiration in *Liquidambar formosana* and *Pinus massoniana* forests

日期 Date (m-d)	枫香林 <i>L. formosana</i> forest		马尾松林 <i>P. massoniana</i> forest	
	估计值 Estimated ($\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	实测值 Measured ($\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	估计值 Estimated ($\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	实测值 Measured ($\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
	03-15	0.237	0.133	0.410
04-15	0.421	0.477	0.398	0.415
05-01	0.335	0.344	0.406	0.397
05-15	0.380	0.360	0.364	0.417
06-01	0.461	0.524	0.351	0.480
06-15	0.568	0.591	0.442	0.491
07-01	0.547	0.518	0.450	0.413
07-15	0.651	0.518	0.680	0.633
08-01	0.608	0.408	0.809	0.513
08-15	0.557	0.280	0.410	0.520
09-15	0.461	0.409	0.312	0.409
10-15	0.312	0.297	0.317	0.297
11-15	0.113	0.152	0.111	0.090
12-15	0.143	0.136	0.128	0.113
相关性 Correlation	$R = 0.814, P < 0.01$		$R = 0.824, P < 0.01$	

3 讨论

3.1 0~5 cm 土壤异养呼吸对土壤表面 CO_2 通量的贡献

本研究结果表明, 0~5 cm 土壤异养呼吸是土壤表面 CO_2 通量的主要贡献者. 鄂东南低丘地区马尾松林和枫香林土壤异养呼吸随深度增加而下降, 与欧洲、美国的研究结果一致^[5, 25-26]. 枫香林和马尾松林 0~5 cm 土层土壤异养呼吸分别为 5~10 cm、10~20 cm 的 2.39、2.62 倍和 2.01、2.94 倍. 土壤异养呼吸速率随土壤深度迅速下降, 可以从不同土层的有机质含量及组成变化加以解释^[27]. 本研究中, 马尾松林土壤异养呼吸与有机质含量(表 1)有相关趋势 ($P = 0.12$), 而枫香林土壤异养呼吸与有机质含量极显著正相关 ($P = 0.006$). 其原因可能是接近表层的土壤含有更多活化态 (liable) 的有机碳^[5]; 其次可能源于深层 CO_2 向上输送受到上层土壤的限制^[28-29]. 即使矿化速率很高的土层, 如果向上输送受到限制, 对土壤表层 CO_2 通量的贡献也有限; 而在特定季节(如夏季)由于降水过多, 土壤表面 CO_2 通量下降, 也会使输送受限^[28]. 由此认为, 0~5 cm 土层对马尾松林和枫香林表层土壤 CO_2 通量贡献最大; 5 cm 以下土层由于异养呼吸较低和输送限制的双重影响, 对土壤 CO_2 通量贡献有限. 选择 0~5 cm 土层

进行土壤异养呼吸模拟具有一定的合理性。

3.2 马尾松林和枫香林土壤异养呼吸的特点

土壤异养呼吸与气候带及林型有关^[28,30-31]。本试验中 Q_{10} 值符合地带性特点。Zheng 和 Yu^[27] 报道,我国不同气候带的森林具有气候带越冷、 Q_{10} 值越大的特点,寒带、温带、暖温带、亚热带和热带的 Q_{10} 值分别为 2.69、2.66、2.22、1.94 和 2.31。本试验中马尾松林 Q_{10} 值比其他地区的马尾松林略低^[32],可能是由于试验方法不同和立地条件的差异所致;枫香林 Q_{10} 符合落叶阔叶林 Q_{10} 大于常绿针叶林的规律^[27]。

土壤温湿度是影响土壤呼吸的重要因子^[33],但其函数关系因生态系统而异。本研究结果表明,在特定温度下,土壤呼吸对湿度的响应符合二次函数模型($P < 0.05$),与 Rey 等^[5]对地中海森林的研究结果类似;而 Jia 和 Zhou^[33] 研究发现,半干旱区草原生态系统土壤湿度对呼吸的影响符合线性关系。本研究中,20% 土壤湿度下 Q_{10} 显著低于其他湿度,而土壤湿度高于 40% 以后 Q_{10} 差异不显著,其原因可能是微生物在 20% 湿度条件下主要受水分限制,而在高湿条件下主要受氧气供给不足限制。在较高温度(20 °C、30 °C)条件下,土壤异养呼吸对湿度变化更敏感,在高湿情况下出现呼吸饱和现象,也可能是供氧不足所致。将土壤水分引入异养呼吸模型的难点在于难以获得长期、连续的土壤湿度资料。因此在今后研究中,应该充分考虑湿度对土壤呼吸的影响,提高模型预测的准确性。

3.3 鄂东南低丘马尾松林和枫香林的土壤异养呼吸估计

应用建立的表层(0 ~ 5 cm)土壤温湿度模型和实测的土壤呼吸及土壤温湿度,估算了枫香林、马尾松林的土壤异养呼吸(R_s),结果表明,枫香林 R_s 的估算值比实测值偏高,而马尾松林的估算值和实测值较接近。推测枫香林土壤呼吸估算值偏高的原因在于室内试验条件未能有效模拟野外土壤湿度改变所引起的土壤微生物数量的变化。Rey 等^[5]研究了土壤复水(re-wetting)过程对土壤呼吸的影响,认为复水是导致估算误差的重要因素。在今后的试验中,有必要研究反复降雨对土壤异养呼吸的影响。

综上,尽管土壤异养呼吸具有复杂性,但采用室内控制试验的方法,通过测定 0 ~ 5 cm 表土异养呼吸对温度和湿度的响应,建立二次函数模型 $\ln R = a + bW + cW^2 + dT + eT^2$ 来预测鄂东南低丘马尾松林和枫香林的土壤异养呼吸具有可行性,但需要引进新

的参数(如校正降水过程对土壤呼吸的影响,以及土壤含水量对 CO_2 释放的影响),以进一步提高模型的准确度。

参考文献

- [1] Schlesinger WH, Andrews JA. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 7-20
- [2] Knorr W, Prentice C, House JI, et al. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 2005, **433**: 298-301
- [3] Davidson EA, Janssens IA. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, **440**: 165-173
- [4] Yang Y-S (杨玉盛), Chen G-S (陈光水), Xie S-J (谢世杰), et al. Soil heterotrophic respiration in native *Castanopsis kawakamii* forest and monoculture *Castanopsis kawakamii* plantations in subtropical China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2005, **43**(1): 53-61 (in Chinese)
- [5] Rey A, Jarvis PG, Grace J. Effect of temperature and moisture on rates of carbon mineralization in a Mediterranean oak forest soil under controlled and field conditions. *European Journal of Soil Science*, 2005, **56**: 589-599
- [6] Cox PM, Betts RA. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, **408**: 184-187
- [7] Howard DM, Howard PJA. Relationships between CO_2 evolution, moisture content and temperature for a range of soil types. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, **25**: 1537-1546
- [8] Liu S (刘爽), Wang C-K (王传宽). Spatio-temporal patterns of soil microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(12): 3135-3143 (in Chinese)
- [9] Rey A, Pegoraro E. Annual variation in soil respiration and its components in an oak coppice forest in central Italy. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 851-866
- [10] Yang K (杨阔), Wang C-K (王传宽), Jiao Z (焦振). Vernal soil respiration of five temperate forests in Northeastern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(12): 3155-3162 (in Chinese)
- [11] Liang Y (梁宇), Xu J-W (许佳巍), Hu Y-M (胡远满), et al. Soil respiration of degraded Korean pine forest ecosystem in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(5): 1097-1104 (in Chinese)
- [12] Kirschbaum MUF. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 21-51
- [13] Jiang Y (姜艳), Wang B (王兵), Wang Y-R (王玉茹), et al. Soil respiration in subtropical forests and model simulation of its relationships with soil temperature and moisture content. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(7): 1641-

- 1648 (in Chinese)
- [14] Li Y-Q (李玉强), Zhao H-L (赵哈林), Zhao X-Y (赵学勇), *et al.* Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different sand dune types. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2006, **20**(3): 154–158 (in Chinese)
- [15] Xu X-F (徐小锋), Song C-C (宋长春), Song X (宋霞), *et al.* Carbon mineralization and the related enzyme activity of soil in wetland. *Ecology and Environment* (生态环境), 2004, **13**(1): 40–42 (in Chinese)
- [16] Wang Q-K (王清奎), Wang S-L (汪思龙), Yu X-J (于小军), *et al.* Soil carbon mineralization potential and its effect on soil active organic carbon in evergreen broadleaved forest and Chinese fir plantation. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2007, **26**(12): 1918–1923 (in Chinese)
- [17] Wang Y-M (王映明). On the vegetation regionalization of Hubei Province (A). *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), 1985, **3**(1): 61–73 (in Chinese)
- [18] Wang Y-M (王映明). On the vegetation regionalization of Hubei Province (B). *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), 1985, **3**(2): 165–176 (in Chinese)
- [19] He Q-T (贺庆棠), Yuan J-Z (袁嘉祖), Chen Z-B (陈志伯). Possible effects of the climate changes on the distribution of *Pinus massoniana* and *Pinus yunnanensis* in South China. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 1996, **18**(1): 22–28 (in Chinese)
- [20] Editorial Board of China Forest (《中国林业》编写组). China Forest. Beijing: China Forestry Press, 1997 (in Chinese)
- [21] Wang C-H (王传华), Wei B (魏斌), Li J-Q (李俊清). Community structure and seedlings regeneration of Chinese sweetgum (*Liquidambar formosana*) forest and pine (*Pinus massoniana*)-sweet gum mixed forest in southeast hilly region of Hubei Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(9): 4681–4692 (in Chinese)
- [22] Yang J-Y (杨金艳), Wang C-K (王传宽). Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(11): 2875–2882 (in Chinese)
- [23] Li T, Yu LJ, Li MT, *et al.* Comparative studies on the qualities of green teas in Karst and non-Karst areas of Yichang, Hubei Province, PR China. *Food Chemistry*, 2007, **103**: 71–74
- [24] Lloyd J, Taylor JA. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, **8**: 315–323
- [25] Persson T, Karlsson PS, Seyferth U, *et al.* Carbon Mineralisation in European Forest Soils. Berlin: Springer, 2000
- [26] Federer CA. Nitrogen mineralization and nitrification; Depth variation of four New England forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, **47**: 1008–1014
- [27] Zheng ZM, Yu GR. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41**: 1531–1540
- [28] Gaumont-Guay D, Black TA. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**: 220–235
- [29] Ding P (丁平), Shen C-D (沈承德), Wang N (王宁), *et al.* Carbon isotopic composition, turnover and origins of soil CO₂ in a monsoon evergreen broadleaf forest in Dinghushan Biosphere Reservoir, South China. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2010, **55**(9): 779–787 (in Chinese)
- [30] Liski J. CO₂ emissions from soil in response to climatic warming are overestimated—The decomposition of old organic matter is tolerant of temperature. *Ambio*, 1999, **28**: 171–174
- [31] Davidson EA, Belk E, Boone RD. 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
- [32] Wang G-J (王光军), Tian D-L (田大伦), Yan W-D (闫文德), *et al.* Response of soil respirations to litter-fall exclusion and addition in *Pinus massoniana* plantation in Hunan, China. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2009, **45**(1): 27–30 (in Chinese)
- [33] Jia B, Zhou G. Modeling and coupling of soil respiration and soil water content in fenced *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia. *Ecological Modelling*, 2007, **201**: 157–162

作者简介 王传华,男,1974年生,博士,副教授.主要从事恢复生态学研究. E-mail: wang740301@yahoo.com.cn

责任编辑 李凤琴
