

土壤温度和湿度对鲁东南杨树人工林土壤呼吸的协同影响

董 彬^{1,2}

1. 临沂大学资源环境学院, 山东 临沂 276000; 2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210046

摘要: 利用 GXH-3051 红外 CO₂ 气体分析仪结合自制密闭箱对鲁东南中龄杨树人工林(MAP)和成熟杨树人工林(MP)土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸进行了为期 2 a 的定位研究, 分析土壤温度和湿度与土壤呼吸的关系及动态变化, 探讨土壤温度和湿度对土壤呼吸的协同影响。结果表明, (1) MAP 和 MP 土壤呼吸具明显的季节特征, 均呈单峰变化, 7 月达到高峰, 分别为 4.43 和 3.55 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 1 月处于低谷, 分别为 0.72 和 0.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。(2) 土壤温度与土壤呼吸的关系可用指数模型 $R=ae^{bT}$ 进行拟合, 土壤湿度与土壤呼吸的关系可用线性模型 $R=aW+b$ 进行拟合。(3) 土壤温度和湿度与土壤呼吸的综合关系可用非线性模型 $R=ae^{bTW}$ 较好地拟合, 共同解释了 MAP 和 MP 不同年份土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸的 83.3%~85.1%、71%~79.2%、58.6%~76.5%和 82.4%~88.3%、68.9%~78.2%、50.2%~78.2%, 双因素模型明显优于仅考虑土壤温度或土壤湿度的单因素模型, 表明鲁东南杨树人工林土壤呼吸主要受土壤温度和土壤湿度的协同影响。

关键词: 土壤温度; 土壤湿度; 杨树人工林; 土壤呼吸; 协同影响

中图分类号: S718.55+4; S718.51+6

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 05-0864-06

土壤呼吸(即土壤 CO₂ 排放)是碳循环中一个重要过程^[1], 全球每年因土壤呼吸作用向大气中释放的碳的估算值约为 75~120 Pg, 仅次于全球陆地总初级生产力(GPP)的估算值^[2]。森林土壤呼吸是陆地生态系统土壤呼吸的重要组成部分, 其动态变化对全球 C 平衡产生深远的影响^[3-4], 土壤呼吸的变化主要受土壤温度^[5]、土壤湿度^[6]、本底物质^[7]及其他因素^[8]的综合影响, 其中土壤温度和土壤湿度是影响土壤呼吸最主要的环境因子^[9], 它们与土壤呼吸的关系在不同的研究中有很大的变异性。目前, 对这种变异性的研究尚不透彻^[10], 关于森林土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸的协同影响的研究相对较少^[11-12], 且多为在室内的模拟研究^[13]。因此, 阐明土壤呼吸作用的过程及其影响因子对理解陆地碳循环和碳平衡极为关键^[14]。本文通过对鲁东南杨树人工林进行为期 2 a 的定位观测, 研究了土壤及各组分呼吸、土壤温度和土壤湿度动态, 探讨了土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸的协同影响, 为更准确地认识土壤呼吸这一重要的碳循环过程提供借鉴, 并为更准确地估算陆地生态系统碳平衡提供理论依据。

1 方法

1.1 试验地概况

试验地位于山东省临沂市沂河林场(118°04' E, 35°15' N), 属于暖温带季风大陆性气候, 四季分明, 雨量充沛, 降水多集中于夏季, 冬季较少, 气候温

和, 全年平均气温 14.1 °C, 极端最高气温 39.5 °C, 最低气温-11.1 °C, 全年无霜期 200 d 以上, 林分特征和土壤性质见表 1。

表 1 不同林分特征和土壤性质

Table 1 Stand characteristics and soil properties in the MAP and MP

Parameters	Forest type ¹⁾	
	MAP	MP
Stand characteristics	/	/
Stand age/ a	11	20
Mean tree height /m	19.1	22.6
Mean tree diameter at breast height/cm	32.4	48.5
Stand density/ (stem·hm ⁻²)	820	680
Stand volume/ (m ³ ·hm ⁻²)	340.141	388.926
Soil properties (top 0 ~ 20 cm)	/	/
Bulk density/ (g·cm ⁻³)	1.10	1.20
w(Organic matter)/(g·kg ⁻¹)	34.6	32.3
w(Max water holding rate)/%	42.09	39.95
w(Field water capacity)/%	27.97	24.50
w(Total N)/(g·kg ⁻¹)	1.23	1.19
w(Total P)/(g·kg ⁻¹)	0.31	0.29
w(Hydrolyzable N)/(mg·kg ⁻¹)	117.2	112.3
w(Available P)/(mg·kg ⁻¹)	5.92	4.69
w(Available K)/(mg·kg ⁻¹)	76.7	61.8

MAP 中龄林 middle-aged *Populus tremuloides* plantation; MP 成熟林 mature *Populus tremuloides* plantation

1.2 土壤呼吸的定位观测

试验自2009年4月初开始, 到2011年12月结束。2009年4月在两种林分中各设立5个20 m×20 m的标准地。在每个固定样地内随机布置8个内径为10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41072139); 山东省自然科学基金项目 (ZR2010CL001)

作者简介: 董彬 (1978 年生), 女, 讲师, 博士研究生, 从事生态系统养分循环和生态修复研究。E-mail: dongbin@lyu.edu.cn; bindong2014@hotmail.com

收稿日期: 2012-04-03

cm, 高为8 cm的PVC土壤环。将PVC环的一端削尖, 压入土中, 保持土壤环在测定期间位置不变。用GXH-3051A红外CO₂气体分析仪结合自制的密闭箱进行测定。在2009年4月至2011年12月期间, 每周测定一次土壤呼吸。同时, 用温度计测定5 cm深处的土壤温度; 用烘干法测定表层0~10 cm的土壤含水量。

1.3 异养呼吸和自养呼吸的观测

在每个标准地内选择2个面积2 m×2 m的小样方, 设置挖壕沟和对照(不挖壕沟)2种处理, 每种处理重复5次。挖壕沟的小区在小区四周开挖深度100 cm、宽为10 cm的小沟, 并布设双层尼龙网隔离根系, 然后按原顺序填入土壤, 再除去小样方内所有活体植物, 并在随后的测定中始终保持小样方内没有活体植物, 最后每个小样方内安置一个PVC环。定期测定各处理的呼吸速率, 当两个处理出现明显差异且挖壕沟小样方内呼吸速率相对稳定后, 于2010年1月(断根8个月后)开始全面观测。对照小样方的土壤呼吸包括异氧呼吸 R_H 和自养呼吸 R_A , 挖壕沟小样方内的呼吸包括微生物呼吸、土壤动物呼吸以及土壤有机物分解释放的CO₂, 即异养呼吸 R_H ; 而对照小样方与挖壕沟小样方呼吸速率之差, 即认为是 R_A 。

1.4 土壤呼吸模型构建与筛选

分析数据时构建了多个单因素模型和双因素模型, 通过比较相关系数(R^2)舍弃了相关系数相对较低的模型, 本文采用的下列模型相关系数均相对较高, 能较好地拟合本研究的数据。土壤呼吸速率 R 与土壤温度(T)和土壤湿度(W)关系的单变量模型和双变量模型分别如下:

单因素模型:

$$\text{温度模型 } R = ae^{bT} \quad (1)$$

$$\text{湿度模型 } R = aW + b \quad (2)$$

双因素模型(温度和湿度):

$$R = ae^{bT} W^c \quad (3)$$

式中, R 为土壤呼吸CO₂速率(以CO₂计),

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; a 、 b 、 c 均为拟合系数; T 为实测的10 cm深的土壤温度, W 为土壤湿度。

1.5 数据分析

采用SPSS 17.0对数据进行分析, 采用Excel 2003软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤及各组分呼吸季节动态

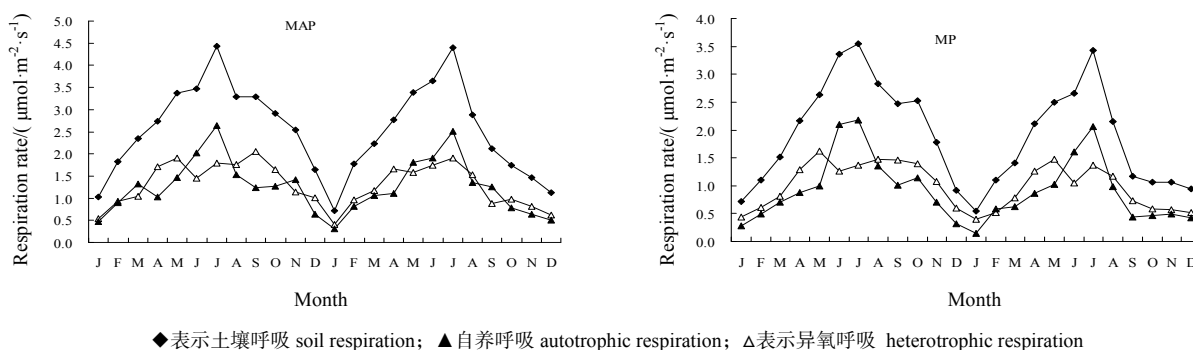
通过2年的野外定位观测, 发现中龄杨树人工林MAP和成熟杨树人工林MP的土壤呼吸具明显的季节变化, 均呈单峰变化, 夏季土壤呼吸较高, 7月达到高峰, MAP和MP的分别为4.43和3.55 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 冬季土壤呼吸速率较低, 一月处于低谷, MAP和MP的分别为0.72和0.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (图1)。两种林分土壤呼吸的大小顺序为: MAP>MP。自养呼吸季节变化与土壤呼吸有相似的趋势, 夏季达到最高, MAP和MP的分别为2.40、2.63 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 冬季最低MAP和MP的分别为0.21、0.12 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 但不如土壤呼吸的明显, 而异氧呼吸虽总体表现为夏秋季较高, 冬季较低, 7月出现高峰, 1月出现低谷, 但变化比较复杂(图1)。土壤呼吸及各组分呼吸的年度变化并不明显, 两种林分2011年的土壤呼吸比2010年的略有降低。

2.2 土壤温度和土壤湿度季节动态

土壤温度有明显的季节变化, 与土壤呼吸的变化相似, 呈单峰变化, 高峰出现在夏季, MAP和MP的分别为25.69和26.54 °C, 低谷出现在12月或1月, 分别为-6.75和-6.76 °C, 土壤湿度的季节波动不如土壤呼吸的大, 主要受降雨水的影响, 趋势也并不跟土壤呼吸及各组分呼吸的完全一致(图2)。

2.3 土壤温度对土壤及各组分呼吸的影响

土壤温度与土壤及各组分呼吸的关系可用指数模型 $R = ae^{bT}$ 进行拟合, 2010年, 土壤温度能分别解释MAP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸81%、67.5%和36.6%的变化, 能解释MP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸80.2%、72.8%和46.2%的变化(表2),



◆表示土壤呼吸 soil respiration; ▲自养呼吸 autotrophic respiration; △表示异氧呼吸 heterotrophic respiration

图1 土壤及各组分呼吸的动态变化

Fig.1 Dynamics of soil respiration and its components in MP and MAP in field

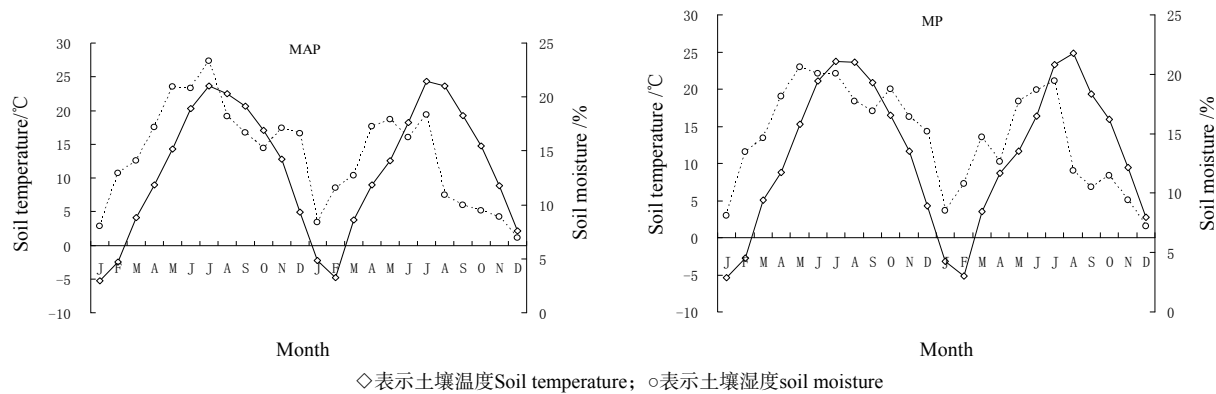


图 2 土壤温度和土壤湿度的动态变化
Fig.2 Dynamics of soil temperature and soil moisture in MP and MAP in field

而2011年,土壤温度仅能分别解释MAP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸21.7%、7.9%和13.7%的变化,能解释MP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸20.6%、22.6%和6.6%的变化(表2),表明2010年土壤温度与土壤及各组分呼吸的相关性比2011年的高。

2.4 土壤湿度对土壤及各组分呼吸的影响

土壤湿度与土壤及各组分呼吸的关系可用线性模型 $R=aW+b$ 进行拟合。2010年,土壤湿度能分别解释MAP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸67.7%、57.1%和32.4%的变化,能解释MP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸63.7%、35.4%和49%的变化(表2),2011年,土壤湿度能分别解释MAP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸74.2%、48.3%和70.7%,能解释MP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸43.8%、14.2%和59.7%(表2),表明MAP土壤及各组分呼吸与土壤湿度的相关性稍高于MP的。

2.5 土壤温度和湿度对土壤及各组分呼吸的协同影响

土壤温度和土壤湿度与土壤及各组分呼吸的综合关系用非线性模型 $R=ae^{bT}W^c$ 拟合。2010年,土

壤温度和土壤湿度共同解释了MAP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸变化的85.1%、79.2%和58.5%,共同解释了MP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸变化的88.3%、78.2%和50.2%(表2),2011年,土壤温度和土壤湿度共同解释了MAP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸变化的83.3%、71%和76.5%,共同解释了MP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸变化的82.4%、68.9%和78.2%共同解释了MP土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸变化的,这种双因素模型明显优于上述仅考虑土壤温度或土壤湿度的单因素模型,表明鲁东南杨树人工林土壤及各组分呼吸速率主要受土壤温度和土壤湿度的协同影响。

3 讨论

3.1 土壤呼吸和土壤温度、湿度动态

杨树人工林土壤呼吸具明显的季节变化,与罗璐等^[15]观测的落叶阔叶林、严俊霞等^[11]观测的油松林(*Pinus tabulaeformis*)土壤呼吸变化趋势一致。本研究中观测到的最大 MAP 的为 4.43 和 3.55 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,比洞庭湖区滩地杨树人工林的 4.8 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 略低^[16],比北京大兴杨树(*Populus*

表2 土壤及各组分呼吸与土壤温度和湿度关系模型参数
Table 2 Model parameters of soil respiration and its components

Year	Forest type	Compartment	$R=ae^{bT}$			$R=aW+b$			$R=ae^{bT}W^c$			
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ³	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>r</i> ²
2010	MAP	<i>R</i>	1.823	0.031	0.81	0.209	-0.796	0.677	0.32	0.021	0.664	0.851
		<i>R_A</i>	0.852	0.037	0.675	0.116	-0.653	0.571	1.04	0.041	-0.082	0.792
		<i>R_H</i>	0.924	0.025	0.366	0.093	-0.142	0.324	0.019	0.001	1.492	0.585
	MP	<i>R</i>	1.178	0.042	0.802	0.221	-1.748	0.637	0.136	0.032	0.804	0.883
		<i>R_A</i>	0.478	0.053	0.728	0.118	-0.994	0.354	0.149	0.058	0.385	0.782
		<i>R_H</i>	0.702	0.028	0.462	0.104	-0.756	0.49	0.021	0.008	1.328	0.502
2011	MAP	<i>R</i>	1.537	0.013	0.056	0.217	-0.683	0.742	0.051	0.016	1.365	0.833
		<i>R_A</i>	1.006	0.004	0.502	0.079	-0.009	0.483	0.056	0.028	0.994	0.71
		<i>R_H</i>	0.641	0.025	0.185	0.137	-0.675	0.707	0.01	0.008	1.758	0.765
	MP	<i>R</i>	1.087	0.026	0.206	0.131	-0.041	0.438	0.058	0.035	1.14	0.824
		<i>R_A</i>	0.393	0.039	0.226	0.039	-0.258	0.142	0.049	0.052	0.817	0.689
		<i>R_H</i>	0.665	0.014	0.066	0.091	-0.031	0.597	0.014	0.025	1.48	0.782

euramericana cv.) 人工林的 $4.23 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 略高^[12] 最低值为 MP 的 $0.54 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 介于洞庭湖区滩地杨树人工林($0.7 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)^[16] 和北京大兴杨树人工林之间($0.1\sim 0.27 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)^[12]。

土壤温度的季节变化特征明显(图2), 除受降水和干旱等气候因素影响, 土壤温度有较小的波动外, 土壤温度的年际变化的差异不大, 2010年土壤及各组分呼吸受土壤温度的影响较大(表2)。与土壤温度的季节变化不同, 土壤湿度的季节变化规律性不强, 具有明显的波动特点(图2)。降水后土壤湿度增加, 若较长时间没有降水, 土壤湿度明显降低, 有时甚至降低到凋萎含水量以下。本研究中, 2011年土壤湿度对土壤及各组分呼吸的影响相对较大, 这可能与该地区降水相对较少有关。

夏季土壤湿度差异可能是土壤呼吸年际差异的主要原因之一。Epron等^[17]在法国南部对一个森林生态系统6 a的研究表明, 土壤呼吸具有明显的季节变化, 夏季的土壤干旱使土壤呼吸明显下降, 他们认为降水量及其分布的差异是引起土壤呼吸年际变化的主要原因。Savage和Davidson^[18]也发现土壤呼吸年际变化的主要原因是夏季土壤湿度的差异造成的。Gaumont-Guay等^[19]认为干旱在解释土壤呼吸和生态系统呼吸年际变化中起着重要作用。森林生态系统土壤呼吸年际变化的原因大多数归因于夏季土壤湿度的差异, 与夏季土壤湿度对土壤呼吸的作用增加有关。但是深入了解土壤呼吸的年际变化仍需要进行长期的定位研究, 包括不同降水年的土壤呼吸测定。

3.2 土壤温度与土壤湿度对土壤呼吸的协同影响

大量研究^[20]表明, 土壤呼吸与温度之间具有显著的相关关系, 描述二者间关系的方程主要有一级动力学方程(指数方程)、Arrhenius方程及修正的Arrhenius方程、幂函数方程及修正的幂函数方程、线性方程等。相对于温度对土壤呼吸的影响而, 土壤水分条件对土壤呼吸的影响更为复杂一些, 水分不仅影响生物酶活性和生理过程, 而且影响气体扩散。通常认为, 很高和很低的土壤含水量会抑制土壤生物活性, 而湿度大的土壤 O_2 扩散速率会降低, 因此, 湿度很大和很小的土壤中呼吸速率均会受影响^[21]。

本研究发现土壤温度和湿度及两者协同作用明显影响土壤呼吸的变化。但野外条件下测定的土壤呼吸实际上反映的是土壤温度、土壤湿度以及其他因子对土壤呼吸综合作用的结果^[22-23], 在野外条件下难以独立控制并区分单一因素的效应。因此, 越来越多的学者采用双因素或多因素的耦合方程描述土壤呼吸作用。Raich等^[24]用二元线性方程拟

合土壤呼吸与气温、降水的关系; Chen等^[25]用温度的指数影响函数和降水的双曲线影响函数的交互作用描述土壤呼吸作用; Bond-lamberty等^[26]将降水与温度对土壤呼吸的影响效应叠加来拟合土壤呼吸, 并考虑温度和降水的距平值来进一步提高拟合精度。本研究采用非线性模型 $R = ae^{bT}W^c$ 能较好地拟合土壤呼吸与土壤温度、土壤湿度的关系, 而且明显优于仅考虑土壤温度或土壤湿度的单因素模型, 因单因素模型中对土壤呼吸的影响均未超过81%。

林丽莎等^[27]发现, 土壤温度和土壤湿度能反映阔叶红松林土壤呼吸91%的变化; 陈光水等^[28]发现正常气候状况下土壤温度和土壤湿度共同可解释格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)自养呼吸季节变化的81%~90%; 杨玉盛等^[8]发现土壤温度和土壤湿度共同解释格氏栲不同年份枯枝落叶层呼吸和无根土壤呼吸速率季节变化的82%~85%和85%~92%; 严俊霞等^[11]用4个双变量(土壤温度和水分)模型模拟油松林土壤呼吸变化, 发现能解释土壤呼吸变化的58%~79%; 本研究发现土壤温度和土壤湿度能共同解释MAP和MP不同年份土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸的83.3%~85.1%、71%~79.2%、58.6%~76.5%和82.4%~88.3%、68.9%~78.2%、50.2%~78.2%, 介于上述研究结果范围之内。Ceccon等^[29]发现单独土壤温度能解释苹果园土壤呼吸年变化的71%, 但土壤湿度却与土壤呼吸呈反相关, 而细根密度可以解释土壤呼吸年变化的一部分。

尽管土壤温度和土壤湿度能解释土壤呼吸变化的80%以上, 但由于土壤呼吸变化是多种因素协同作用的结果, 仅研究土壤温度和土壤湿度的影响还远远不够, 随着全球变化的加剧, 气温升高、降水时空格局改变、植被类型的变化等因素对土壤呼吸的影响将随之发生变化, 因此, 采用多种模型研究多种因素对森林土壤呼吸的协同影响对研究全球碳循环将有深远的意义。

4 结论

中龄杨树人工林和成熟杨树人工林土壤呼吸具明显的季节特征, 均呈单峰变化, 7月达到高峰, MAP和MP的分别为 4.43 和 $3.55 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 冬季土壤呼吸速率较低, 1月处于低谷, MAP和MP的分别为 0.72 和 $0.54 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 自养呼吸季节变化与土壤呼吸有相似的趋势, 土壤温度有明显的季节变化, 土壤湿度则由于受降水的影响, 并不跟土壤呼吸的变化完全一致。

土壤温度与土壤及各组分呼吸的关系可用指数模型 $R = ae^{bT}$ 进行拟合, 土壤湿度与土壤及各组分呼吸的关系可用线性模型 $R = aW + b$ 进行拟合, 但单

因素对土壤及各组分呼吸的影响均未超过81%, 土壤温度和土壤湿度与土壤及各组分呼吸的综合关系可用非线性模型 $R=ae^{bT}W^c$ 较好地拟合, 共同解释了中龄杨树人工林和成熟杨树人工林不同年份土壤呼吸、自养呼吸和异氧呼吸的83.3%~85.1%、71%~79.2%、58.6%~76.5%和82.4%~88.3%、68.9%~78.2%、50.2%~78.2%, 双因素模型明显优于仅考虑土壤温度或土壤湿度的单因素模型, 表明鲁东南杨树人工林土壤及各组分呼吸速率主要受土壤温度和土壤湿度的协同影响。

参考文献:

- BAHN M, JANSSENS I A, REICHSTEIN M, et al. Soil respiration across scales: towards an integration of patterns and processes[J]. *New Phytologist*, 2010, 186(2): 292-296.
- BOND-LAMBERTY B, THOMSON A. A global database of soil respiration data[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(6): 1915-1926.
- 杨玉盛, 董彬, 谢锦升, 等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应[J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 583-591.
YANG Yusheng, DONG Bin, XIE Jinsheng, et al. Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 583-591.
- GAUMONT-GUAY D, BLACK T A, MCCAUGHEY H, et al. Soil CO₂ efflux in contrasting boreal deciduous and coniferous stands and its contribution to the ecosystem carbon balance [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(5): 1302-1319.
- ZHOU X H, WAN S Q, LUO Y Q. Source components and inter-annual variability of soil CO₂ efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(4): 761-775.
- LIU W X, ZHANG Z, WAN S Q. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(1): 184-195.
- BAHN M, RODEGHIERO M, ANDERSON-DUNN M, et al. Soil respiration in European grasslands in relation to climate and assimilate supply [J]. *Ecosystems*, 2008, 11(8): 1352-1367.
- 汤洁, 韩源, 刘森, 等. 吉林西部不同土地利用方式下的生长季土壤CO₂排放通量日变化及影响因素[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 33-37.
TANG Jie, HAN Yuan, LIU Sen, et al. Diurnal variation of soil CO₂ fluxes and factors in different land use types during growing season in western Jilin province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 33-37.
- 杨玉盛, 陈光水, 谢锦升, 等. 格氏栲天然林与人工林土壤异养呼吸特性及动态[J]. *土壤学报*, 2006, 43(1): 53-61.
YANG Yusheng, CHEN Guangshui, XIE Jinsheng, et al. soil heterotrophic respiration in native *castanopsis kawakamii* forest and monoculture *castanopsis kawakamii* Plantations in subtropical china[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 53-61.
- TRUMBORE S. Carbon respired by terrestrial ecosystems- recent progress and challenges[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 141-153.
- 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6366-6376.
YAN Junxia, QIN Zuodong, ZHANG Yihui, et al. Effect of soil temperature and moisture on soil CO₂ efflux in a *Pinus tabulaeformis* forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6366-6376.
- 谭炯锐, 查同刚, 张志强, 等. 土壤温湿度对北京大兴杨树人工林土壤呼吸的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 2308-2315.
TAN Jiongrui, ZHA Tonggang, ZHANG Zhiqiang, et al. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in a poplar plantation in Daxing district, Beijing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5): 2308-2315.
- 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[J]. *生态学报*, 2004, 24(5): 953-958.
YANG Yusheng, CHEN Guangshui, DONG Bin, et al. Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 953-958.
- HOUGHTON R A. Balancing the global carbon budget[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, 35(1): 313-347.
- 罗璐, 申国珍, 谢宗强, 等. 农架海拔梯度上4种典型森林的土壤呼吸组分及其对温度的敏感性[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(7): 722-730.
LUO Lu, SHEN Guozhen, XIE Zongqiang, et al. Components of soil respiration and its temperature sensitivity in four types of forests along an elevational gradient in Shennongjia, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(7): 722-730.
- 唐洁, 汤玉喜, 王胜, 等. 洞庭湖区滩地杨树人工林土壤呼吸动态分析[J]. *湖南林业科技*, 2009, 36(2): 10-12.
TANG Jie, TANG Yuxi, WANG Sheng, et al. Dynamic analysis on soil respiration of *Populus* plantation on beach land in Dongting Lake [J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2009, 36(2): 10-12.
- EPRON D, NGAO J, GRANIER A. Interannual variation of soil respiration in a beach forest ecosystem over a six year study [J]. *Annals of Forest Science*, 2004, 61(6): 499-505.
- SAVAGE K E, DAVIDSON E A. Interannual variation of soil respiration in two New England forests [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(22): 337-350.
- GAUMONT- GUAY D, ANDREW B T, GRIFFIS T J, et al. Influence of temperature and drought on seasonal and interannual variation of soil bole and ecosystem respiration in a boreal aspen stand [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/4): 203-219.
- 陈书涛, 胡正华, 张勇, 等. 陆地生态系统土壤呼吸时空变异的影响因素研究进展[J]. *环境科学*, 2011, 32(8): 2184-2191.
CHEN Shutao, HU Zhenghua, ZHANG Yong, et al. Review of the factors influencing the temporal and spatial variability of soil respiration in terrestrial ecosystem [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(8): 2184-2191.
- REICHSTEIN M, BEER C. Soil respiration across scales: The importance of a model- data integration framework for data interpretation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(3): 344-354.
- DAVIDSON E A, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent of confounded factors controlling soil respiration in a temperature mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- ALMAGRO M, LÓPEZ J, QUEREJETA J I, et al. Temperature dependence of soil CO₂ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 594-605.
- RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, 44B(2): 81-89.

- [25] CHEN S T, HUANG Y, ZOU J W. Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(4): 590-605.
- [26] BOND-LAMBERTY B, THOMSON A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010(b), 464(7288): 579-582.
- [27] 林丽莎, 韩士杰, 王森, 等. 温度与土壤含水量对阔叶红松林土壤呼吸影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(2): 297-300.
LIN Lisha, HAN Shijie, WANG Miao, et al. Influence of temperature and soil water content on soil respiration in a broad-leaved Korean pine forest [J], *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, 25(2): 297-300.
- [28] 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): 1941-1946.
CHEN Guangshui, YANG Yusheng, WANG Xianguo, et al. Root respiration in a natural forest and two plantations in subtropical China: seasonal dynamics and controlling factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1941-1946.
- [29] CECCON C, PANZACCHI P, SCANDELLARI F, et al. Spatial and temporal effects of soil temperature and moisture and the relation to fine root density on root and soil respiration in a mature apple orchard, *Plant Soil*, 2011, 342(1/2): 195-206.

Synergistic effects of soil temperature and moisture on soil respiration in *Populus tremula* plantations in southeast Shandong province

DONG Bin^{1,2}

1. College of resource and environment, Linyi University, Linyi 276000, China;

2. College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

Abstract: Soil respiration, heterotrophic respiration and autotrophic respiration were investigated in middle-aged *Populus tremula* plantation (MAP) and mature *Populus tremula* plantation (MP) with portable infrared CO₂ gas analyzer (GXH-3051) combined homemade closed chamber in Linyi, Shandong Province for two years to analyze the dynamics of soil respiration and its correlations to soil temperature and moisture, and finally to determine the synergistic effects of soil temperature and moisture on soil respiration. The results showed that: (1) The soil respiration in MAP and MP showed distinct seasonal dynamics with unimodal curve in the field. Soil respiration was highest in July (4.43 and 3.55 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively) and lowest in January (0.72 and 0.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively). (2) The correlations between soil temperature and soil respiration, autotrophic respiration, soil heterotrophic respiration were all exponential with $R = ae^{bT}$, and the correlations between soil moisture and soil respiration and its components were all linear with $Y = kx + e$. However, the effect of single factor on soil respiration and its components was under 81%. (3) The synergistic correlations between soil temperature, soil moisture and soil respiration were fit by the model $R = ae^{bT}W^c$ (R stands for soil CO₂ efflux, T for soil temperature and W for soil water content at 0~10 cm soil depth, and a , b , c for the constants). Soil temperature and moisture together could explain soil respiration, heterotrophic respiration and autotrophic respiration 83.3%~85.1%, 71%~79.2%, 58.6%~76.5% and 82.4%~88.3%, 68.9%~78.2%, 50.2%~78.2% of MAP and MP, respectively. The results showed that the double factor model was better than single factor model. Therefore, soil respiration was affected synthetically by soil temperature and moisture of MAP and MP in field.

Key words: soil temperature; soil moisture; *Populus tremula* plantation; soil respiration; synergistic effect