

# 桂林市尧山桉树及马尾松林春、夏两季土壤碳通量特征

吴蒙<sup>1</sup>, 马姜明<sup>1,2,3</sup>, 梁士楚<sup>1,2,3</sup>, 田丰<sup>1</sup>, 梅军林<sup>1</sup>

(1. 广西师范大学 生命科学学院, 广西 桂林 541004; 2. 珍稀濒危动植物生态与环境保护部  
共建教育部重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 广西珍稀濒危动物生态学重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:** [目的] 以广西壮族自治区桂林市尧山地区的 4 年生桉树林、20 年生桉树林和 22 年生马尾松林为研究对象, 旨在研究由森林类型、林龄及其它因子驱动的森林土壤呼吸动态变化特征, 并为桉树、马尾松人工林生态系统碳动态模拟提供基础数据。[方法] 采用 Li-8100 土壤碳通量测量系统于 2013 年 3—8 月(春、夏两季), 分别对这 3 种林分的土壤呼吸及其组分、土壤温度、土壤湿度进行了 6 个月的观测。[结果] (1) 3 种林分的土壤总呼吸速率无显著差异。(2) 4 年生桉树林的自养呼吸速率显著大于 20 年生桉树林及 22 年生马尾松林。20 年生桉树林的异养呼吸速率显著大于 4 年生桉树林及 22 年生马尾松林。(3) 土壤温度是影响土壤呼吸及其组分的主要环境因子, 3 种林分土壤呼吸及其组分与土壤温度均呈显著的指数关系;(4) 4 年生桉树林的土壤呼吸与土壤含水量的相关性不显著, 20 年生桉树林的土壤呼吸与土壤含水量呈显著正相关关系, 22 年生马尾松林的土壤呼吸与土壤含水量呈显著负相关关系。(5) 对温度敏感性系数  $Q_{10}$  值的分析表明, 4 年生桉树林的温度敏感性较大, 20 年生桉树林和 22 年生马尾松林较小。

**关键词:** 土壤呼吸; 温度敏感性; 桉树及马尾松人工林; 春、夏季; 桂林市尧山

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)01-0303-08

中图分类号: Q948

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.055

## Characteristics of Soil Carbon Flux of *Eucalyptus* sp. and *Pinus Massoniana* Forest During Spring and Summer in Yaoshan Mountain of Guilin City

WU Meng<sup>1</sup>, MA Jiangming<sup>1,2,3</sup>, LIANG Shichu<sup>1,2,3</sup>, TIANG Feng<sup>1</sup>, MEI Junlin<sup>1</sup>

(1. College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education, China, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Rare and Endangered Animal Ecology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** [Objective] Based on the 4 years old, 20 years old *Eucalyptus* sp. plantations and 22 years old *Pinus massoniana* plantations in Yaoshan Mountain in Guilin City of Guangxi Zhuang Autonomous Region, this study conducted the characteristics of forest soil respiration which droved by forest types, forest age and other factors, so that to provide basic data with carbon dynamic simulation on *Eucalyptus* and *Pinus massoniana* plantations ecosystem. [Methods] From March to August in 2013 (during Spring and Summer), the soil respiration and its components (soil autotrophic respiration and soil heterotrophic respiration), soil temperature and the soil water content of the three forests were observed monthly with the Li-8100 automated soil CO<sub>2</sub> flux system respectively. [Results] (1) There was no significant difference in the soil respiration rate among the three forests; (2) The autotrophic respiration rate of the 4 years old *Eucalyptus* sp. forest was higher than that of the 20 years old *Eucalyptus* sp. forest and 22 years old *Pinus massoniana* forest. The heterotrophic respiration rate of the 20 years old *Eucalyptus* sp. forest was higher than the 4 years old *Eucalyptus* sp. forest and the 22 years old *Pinus massoniana* forest; (3) According to the correlation coefficient analysis, soil temperature was the main environmental factor influencing the soil respiration rate and its components. There existed exponential relationships between soil temperature and soil respiration rate and

收稿日期: 2014-01-18

修回日期: 2014-03-03

资助项目: 广西科技重大专项课题“桉树人工林生态效应与调控机制研究”(2010GXNSFD169007); 国家自然科学基金项目(31160156); 广西高校科研项目(2013ZD008); 广西珍稀濒危动物生态学重点实验室开放基金项目(1402k008); 广西区学位点学科建设重点科学研究项目

第一作者: 吴蒙(1989—), 男(汉族), 安徽省六安市人, 硕士研究生, 研究方向为植物生态学。E-mail: 171829987@qq.com。

通信作者: 马姜明(1967—), 男(汉族), 江西省永新县人, 博士, 教授, 研究方向为退化生态系统的恢复与重建。E-mail: mjming03@163.com。

its components; (4) In the 4 years old *Eucalyptus* sp. forest, the correlation between soil moisture content and soil respiration rate was indistinctive, there were significant positive correlations between soil respiration rate and soil moisture content in the 20 years old *Eucalyptus* sp. forest, and significant negative correlations between soil respiration rate and soil moisture content in the 22 years old *Pinus massoniana* forest; (5) the  $Q_{10}$  value analysis of the temperature sensibility coefficient of the three forests indicated that the value of the 4 years old *Eucalyptus* sp. forest was higher, the 20 years old *Eucalyptus* sp. forest and the 22 years old *Pinus massoniana* forest were lower.

**Keywords:** soil carbon flux; temperature sensitivity; *Eucalyptus* sp. and *Pinus massoniana* forest; spring and summer; Yaoshan mountain of Guilin City

在全球变暖日益加剧的情况下,土壤呼吸(soil respiration,RS)越来越受到全球研究者的重视。土壤呼吸作为生态系统碳循环的重要组成部分,其直接关系到温室气体的排放,在调控地球系统的大气 $CO_2$ 浓度和气候动态方面起着十分关键的作用。土壤是全球陆地系统中最大的碳库载体,其碳储量约为1 500 PgC,是全球陆地植被碳库的2~3倍,是大气碳库的2倍多<sup>[1]</sup>。其中森林土壤中的碳占全球土壤有机碳的73%左右<sup>[2]</sup>。研究表明,全球土壤呼吸年通量高达80.4 PgC,是化石燃料释放 $CO_2$ 的13倍<sup>[3]</sup>。可见,土壤呼吸的微小变化都将直接影响全球气候系统和碳平衡<sup>[4]</sup>。

20世纪90年代以来,随着全球变暖的持续,森林土壤呼吸作为大气 $CO_2$ 重要的来源愈来愈受关注。国内外研究者在土壤呼吸的测定方法<sup>[5-6]</sup>,季节变化特征<sup>[7-8]</sup>,土壤呼吸组分的分离<sup>[9-10]</sup>和土壤呼吸及其组分对环境因子变化的响应机制<sup>[11-12]</sup>等方面获得重大的研究进展。近年来,中国关于马尾松林土壤呼吸的研究相对较多,如王广军等<sup>[13]</sup>在湖南地区、胡凡根等<sup>[14]</sup>在赣南地区、王传华等<sup>[15]</sup>在鄂东地区等均有关于马尾松林的研究。对于桉树人工林的研究则较少,研究区域主要集中在广州<sup>[16]</sup>及中国西南地区<sup>[17]</sup>,对广西壮族自治区桉树土壤呼吸的研究还未见报道。

广西壮族自治区自“十五”计划以来,实施南方速生丰产林工程,桉树人工林得到迅速发展。2010年,森林资源二类调查数据显示,该区桉树人工林林分面

积已达 $1.59 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,占全区森林总面积的15.38%,活立木蓄积量达到 $7.05 \times 10^7$  m<sup>3</sup>,占全区森林总蓄积量的12.30%,森林资源快速增长<sup>[18]</sup>。随着大面积营造桉树人工林,在获得经济较大效益的同时,其社会效益和生态效益等问题日益受到人们关注。本研究以桂林尧山地区的4年生桉树林、20年生桉树林、22年生马尾松林为研究对象,对这3种类型的人工林生态系统在春、夏两季的土壤呼吸及驱动因子(土壤温度、土壤湿度等)进行月份动态监测,在气候条件和土壤母质相似情况下,比较分析3种林分的土壤呼吸的动态变化特征,旨在研究由森林类型、林龄及其它非生物因子等驱动的森林土壤呼吸动态变化特征,为桉树、马尾松人工林生态系统碳动态模拟提供基础数据。

## 1 研究区概况

研究地区位于广西壮族自治区桂林市尧山,地处广西东北部,地理坐标为 $109^{\circ}36'—111^{\circ}29'E$ , $24^{\circ}15'—26^{\circ}23'N$ 。尧山是一座土山,属山地丘陵地区,土壤为红壤;海拔100~500 m,中亚热带湿润季风气候,年平均日照时数1 670 h;年平均气温18.9℃,最冷的1月平均气温7.8℃,最热的7月平均气温28℃,全年无霜期300 d;年平均降雨量1 949.5 mm,降雨量年分配不均,秋、冬季干燥少雨;年平均蒸发量1 490~1 905 mm<sup>[19]</sup>。4年生桉树林、20年生桉树林和22年生马尾松林的林地地势平坦。3种不同林分样地概况见表1。

表1 3种类型人工林样地基本情况

林地类型	海拔/ m	平均 树龄/a	平均 树高/m	平均 胸径/cm	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度	林下物种
4年生 桉树林	150	4	10	11.2	1 400	0.85	苕麻( <i>Boehmerianivea</i> )、红花酢浆草( <i>Oxaliscorymbosa</i> )、紫花地丁( <i>Violaephippica</i> )、积雪草( <i>Centellaasiatica</i> )
20年生 桉树林	150	20	25	26.8	900	0.80	樟树( <i>Cinnamomumcamphora</i> )、阴香( <i>Cinnamomumburmannii</i> )、苕麻( <i>Boehmerianivea</i> )、火炭母( <i>Polygonumchinense</i> )
22年生 马尾松林	160	22	10	19.4	1 100	0.68	桃金娘( <i>Rhodomyrtustomentosa</i> )、山莓( <i>Rubuschorifolius</i> )、白茅( <i>Imperatacylindrica</i> )、火炭母

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

于 2013 年 3—8 月对 3 种林分的土壤呼吸及环境因子(土壤温度、土壤湿度等)进行月份动态监测。采用挖壕沟断根法来确定总土壤呼吸中异养呼吸和自养呼吸的组分。于 2012 年 5 月,分别在 4 年生桉树林、20 年生桉树林、22 年生马尾松林 3 种林分内各设置固定监测样点。在 3 种林分内各设 6 个  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  的小样方,并在小样方内布置内径为 20 cm 的 PVC 环,PVC 环底端插入土壤 5 cm 左右,用于土壤呼吸的原位测定,其中 3 个小样方不做处理,用于观测土壤总呼吸速率;另外 3 个用壕沟法做挖沟断根处理,用于观测土壤呼吸各组分的呼吸速率。挖壕沟法的具体方法如下:在土壤呼吸观测 8 个月前,预先在正方形断根小区四周 1 m 外挖环型壕沟,沟深约为 1 m (以看不到植被根系为止),沟宽约为 30 cm,在壕沟中铺设筛孔大小 400 目/ $\text{m}^2$  的尼龙网后按原样填回,以阻断树木根系再次进入试验小区,同时,将试验小区内植被地上部分剪断,并定期去除新生长出来的植物。

### 2.2 土壤呼吸的测定

采用 Li-8100 开路式土壤碳通量系统,连接 20 cm 短期腔室,测定土壤呼吸速率。野外观测选择每月中旬的晴好天气,从每天上午 7:00 至下午 19:00 每隔 2 h 对试验样地 3 种林分的土壤呼吸速率进行 1 d 的观测<sup>[20]</sup>。3 种林分各观测 1 d。并在观测土壤呼吸速率的同时,用 Li-8100 开路式土壤碳通量系统配套的电子温度探针和水分传感器测量土壤 10 cm 处的温度及每个 PVC 环附近土壤含水量。

### 2.3 试验数据处理与分析

2.3.1 土壤呼吸各组分的计算 采用挖壕沟法来划分土壤自养和异养呼吸组分。经过 7 个月的时间间隔,壕沟法处理样方内的植物根系已断根,且已基本分解完毕,其土壤自养呼吸速率基本为零。断根样方内的土壤呼吸速率即为土壤异养呼吸速率,不做处理的小样方内土壤呼吸速率即为土壤总呼吸速率。通过测定的土壤总呼吸和异养呼吸速率之差即可以估算土壤自养呼吸速率<sup>[21]</sup>。

2.3.2 温度敏感性系数  $Q_{10}$  值的计算 近年来,国内外关于土壤温度与土壤呼吸的关系已有许多经验模型,最为常用的是采用指数方程来估测土壤温度与土壤呼吸的关系<sup>[22-23]</sup>:

$$y = ae^{bt} \quad (1)$$

式中: $y$ ——测量的土壤呼吸速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];  
 $t$ ——距地表下处 10 cm 的土壤温度 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $a$ —— $0^{\circ}\text{C}$  时的土壤呼吸速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];  $b$ ——温度反应

系数,则  $Q_{10}$  可表达为:  $Q_{10} = e^{10b}$ 。

2.3.3 土壤呼吸总通量的估算 对土壤呼吸年通量估算采用的方法为逐月计算的方法。即,分别计算 2012 年 3 月到 8 月每个月平均值,然后乘以该月的天数,得到相应月份的呼吸通量,然后逐月累加得到桉树、马尾松林的碳排放量。

2.3.4 数据分析 采用统计软件 SPSS 16.0 中的重复测量方差分析(repeated measurement ANOVA)、LSD 多重比较(least significant difference)及相关性分析等方法检验不同林分间土壤呼吸速率、各组分呼吸速率的差异显著性,以及分析土壤呼吸及其各组分与土壤温度、土壤含水量的相关关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同林分土壤呼吸及其各呼吸组分特征

研究地区属中亚热带地区,季节变化较明显。季节性的变化会导致各种生物和生物非生物因素随之发生明显变化,进一步使土壤呼吸出现明显季节性差异。图 1 为 4 年生桉树林、20 年生桉树林及 22 年生马尾松林 2013 年 3—8 月的土壤总呼吸变化动态图。由图 1 可以看出,3 种林分的土壤呼吸变化趋势基本一致,表现为春季随着土壤温度的增加 3 种林分的土壤呼吸速率均呈上升趋势;夏季 3 种林分的土壤呼吸均在 7 月达到最高值,并在 8 月均呈现下降趋势。

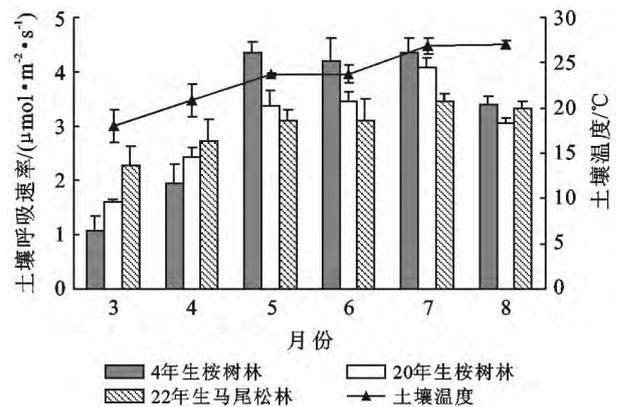


图 1 3 种林分春、夏两季土壤呼吸变化动态

图 2—4 为 4 年生桉树林、20 年生桉树林及 22 年生马尾松林春、夏两季土壤呼吸各组分变化动态。可见,3 种林分土壤呼吸速率最小值出现在春季 3 月,最小值分别为  $0.78 \pm 0.13$ ,  $1.53 \pm 0.22$  和  $1.48 \pm 0.05 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。随着气温的回升,3 种林分土壤的呼吸速率呈上升的趋势;夏季各林分的土壤呼吸速率达到较高水平并在 7 月达到最大值,3 种林分土壤的呼吸速率分别为  $4.35 \pm 0.27$ ,  $4.07 \pm 0.18$  和  $3.44 \pm 0.17 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,8 月随着气候的变化 3

种林分的土壤的呼吸速率均呈现下降趋势。利用 SPSS 多重比较分析可知,4 年生桉树林春、夏两季的土壤呼吸速率  $3.01 \pm 0.84 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  显著大于 20 年生桉树林  $3.26 \pm 1.32 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  及 22 年生马尾松林  $2.98 \pm 0.54 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 20 年生桉树林与 22 年生马尾松林两种林分间土壤呼吸速率的差异不显著。

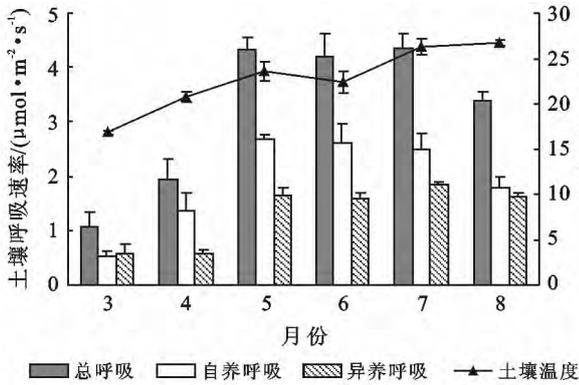


图 2 4 年生桉树林土壤呼吸及其组分变化动态

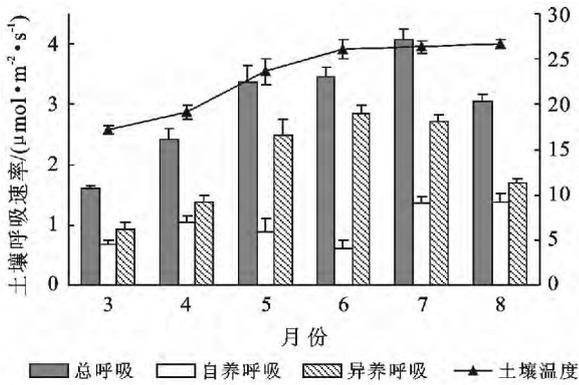


图 3 20 年生桉树林土壤呼吸及其组分变化动态

3 种林分土壤呼吸各组分情况如表 2 所示。多重比较分析可知,春、夏两季 4 年生桉树林的自养呼吸速率  $1.92 \pm 0.84 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  显著大于 20 年生桉树林  $0.99 \pm 0.34 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  及 22 年生马尾松林

$1.56 \pm 0.53 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 且 20 年生桉树林土壤呼吸速率显著小于 22 年生马尾松林。在异养呼吸方面,4 年生桉树林  $1.34 \pm 0.53 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  及 22 年生马尾松林  $1.43 \pm 0.50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的异养呼吸速率显著小于 20 年生桉树林  $2.02 \pm 0.75 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 4 年生桉树林于 22 年生马尾松林两种林分间异养呼吸速率的差异不显著。

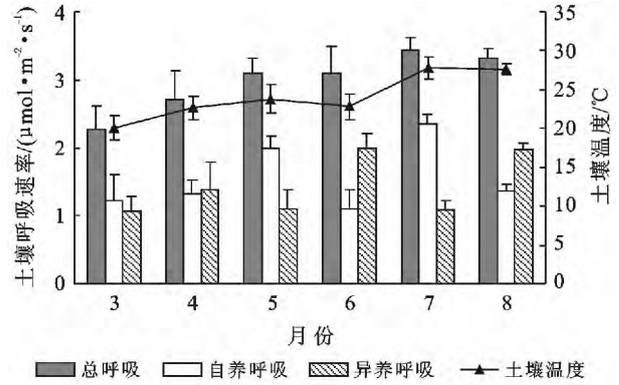


图 4 22 年生马尾松林土壤呼吸及其组分变化动态

自养呼吸贡献率方面,春、夏两季 4 年生桉树林的自养呼吸贡献率分别为  $58.87\% \pm 9.94\%$ ,  $57.20\% \pm 5.20\%$ ; 20 年生桉树林的自养呼吸贡献率分别为  $37.62\% \pm 7.96\%$ ,  $31.81\% \pm 11.82\%$ ; 22 年生马尾松林的自养呼吸贡献率分别为  $56.26\% \pm 8.49\%$ ,  $48.69\% \pm 15.67\%$ 。多重比较分析可知,4 年生桉树林的自养呼吸贡献率 ( $57.97\% \pm 7.96\%$ ) 显著大于 20 年生桉树林 ( $34.49\% \pm 10.51\%$ ) 和 22 年生马尾松林 ( $52.19\% \pm 13.72\%$ ); 且 20 年生桉树林土壤呼吸速率显著小于 22 年生马尾松林。两种桉树林之间 4 年生桉树林的自养呼吸贡献率 ( $57.97\% \pm 7.96\%$ ) 显著大于 20 年生桉树林 ( $34.49\% \pm 10.51\%$ ); 两种老龄林间, 22 年生马尾松林自养呼吸贡献率 ( $52.19\% \pm 13.72\%$ ) 显著大于 20 年生桉树林。

表 2 春、夏两季 3 种林分土壤呼吸及其各组分呼吸速率变化

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

森林类型	土壤总呼吸		自养呼吸		异养呼吸	
	春季	夏季	春季	夏季	春季	夏季
4 年生桉树林	$2.41 \pm 1.47a$	$3.89 \pm 0.52a$	$1.48 \pm 0.96a$	$2.30 \pm 0.47a$	$0.93 \pm 0.54a$	$1.68 \pm 0.14a$
20 年生桉树林	$2.40 \pm 0.79a$	$3.53 \pm 0.45b$	$0.86 \pm 0.19b$	$1.11 \pm 0.39b$	$1.55 \pm 0.68b$	$2.42 \pm 0.54b$
22 年生马尾松林	$2.64 \pm 0.56a$	$3.29 \pm 0.29b$	$1.51 \pm 0.49a$	$1.61 \pm 0.58c$	$1.13 \pm 0.27a$	$1.68 \pm 0.52a$

注:同一列不同字母表示林分间存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。

### 3.2 土壤呼吸及其组分与土壤温度的关系

相关性分析表明,4 年生桉树林、20 年生桉树林和 22 年生马尾松林的土壤呼吸速率与土壤温度的关系均呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ), 3 种林分土壤

呼吸及各呼吸组分与土壤温度关系的指数拟合曲线及回归方程决定系数  $R^2$  值如图 5—7 所示。根据拟合方程计算不同林分各呼吸组分的  $Q_{10}$  值及各林分土壤呼吸与土壤温度的相关系数见表 3。

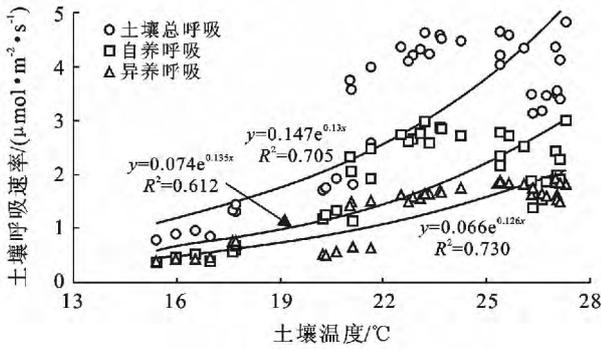


图 5 4 年生桉树林土壤温度与土壤呼吸及其各组分呼吸速率的关系

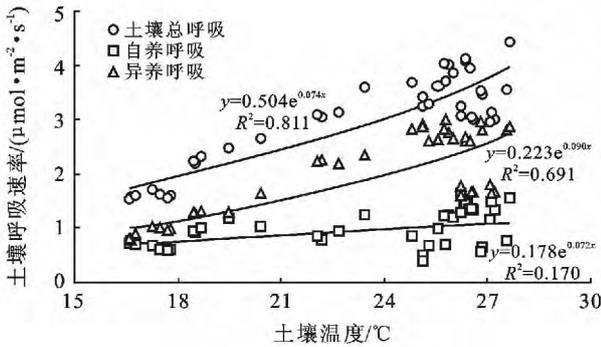


图 6 20 年生桉树林土壤温度与土壤呼吸及其各组分呼吸速率的关系

及各呼吸组分与土壤温度均呈极显著指数相关关系。3 种林分土壤总呼吸、自养呼吸及异养呼吸的温度敏感性指数  $Q_{10}$  值的大小顺序均表现为 4 年生桉树林最大, 20 年生桉树林次之, 22 年生马尾松林最小。4 年生桉树林和 22 年生马尾松林的自养呼吸  $Q_{10}$  值大于异养呼吸  $Q_{10}$  值; 20 年生桉树林的异养呼吸  $Q_{10}$  值大于自养呼吸  $Q_{10}$  值。可见, 春、夏两季 4 年生桉树林和 22 年生马尾松林自养呼吸受温度的影响较异养呼吸大, 而 20 年生桉树林的自养呼吸受温度的影响较异养呼吸小。这可能是由于 3 种林分的自养呼吸贡献率的差异造成的, 4 年生桉树林和 22 年生马尾松林的自养呼吸贡献率显著大于 22 年生马尾松林。

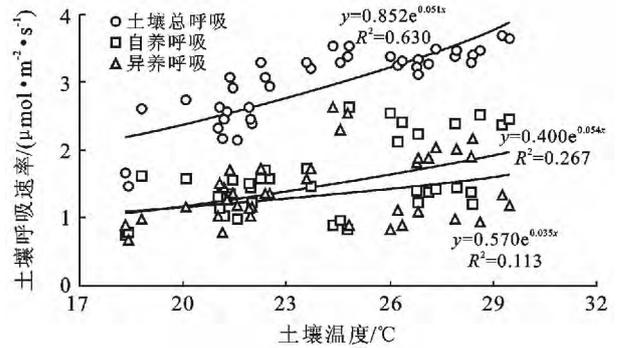


图 7 22 年生马尾松林土壤温度与土壤呼吸及其各组分呼吸速率的关系

由表 3 可见, 除了 22 年生马尾松林的自养呼吸速率与土壤温度呈显著关系以外, 3 种林分土壤呼吸

表 3 3 种林分土壤呼吸及其组分的温度敏感性系数 ( $Q_{10}$ ) 值及相关系数 ( $r$ )

森林类型	土壤总呼吸		自养呼吸		异养呼吸	
	$Q_{10}$	$r$	$Q_{10}$	$r$	$Q_{10}$	$r$
4 年生桉树幼龄林	3.669	0.794**	3.857	0.699**	3.525	0.862**
20 年生桉树老龄林	2.096	0.885**	2.054	0.474**	2.459	0.786**
22 年生马尾松林	1.665	0.630**	1.716	0.528**	1.419	0.330*

注: \*\* 表示在  $p < 0.01$  水平上显著相关。

### 3.3 土壤含水量对土壤呼吸的影响

土壤呼吸速率和土壤含水量的关系比较复杂, 许多学者研究表明<sup>[24-25]</sup>, 在土壤水分适量的地区, 土壤含水量不是土壤呼吸的主要限制因子, 只有在干旱、半干旱或土壤含水量过饱和的情况下, 温度和土壤水分才对土壤呼吸共同起作用。本研究中由于 3 种林分乔木及灌木层郁闭度的不同, 其春、夏两季林下土壤含水量也存在一定的差异(图 8)。20 年生桉树林土壤含水量( $23.8\% \pm 6.7\%$ )显著小于 4 年生桉树林( $30.3\% \pm 6.4\%$ )和 22 年生马尾松林( $32.1\% \pm 6.5\%$ )。相关性分析可见, 4 年生桉树林土壤呼吸速率与土壤含水量相关性不显著; 20 年生桉树林土壤呼吸速率与土壤含水量呈极显著的正相关线性关系; 22 年生马尾松林的土壤呼吸速率与土壤含水量之间呈

极显著的负相关线性关系。各林分土壤呼吸与土壤含水量的相关系数、拟合线性方程及拟合线性方程的判定系数如表 4 所示( $R_s$  为土壤总呼吸速率;  $W$  为土壤含水量)。

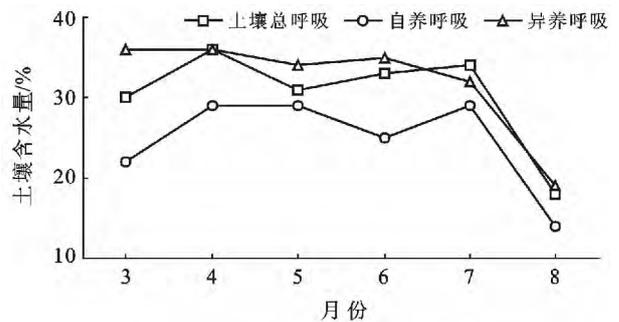


图 8 春、夏两季 3 种林分土壤含水量变化

表 4 3 种林分土壤呼吸与土壤含水量的关系

森林类型	土壤呼吸速率与土壤含水量之间			
	相关关系	显著性水平	拟合方程	判定系数
4 年生桉树林	0.006	0.970	$R_s = 3.290 - 0.131 W$	0.000
20 年生桉树林	0.410**	0.010	$R_s = 1.840 + 4.900 W$	.170
22 年生马尾松林	0.436**	0.006	$R_s = 4.102 - 3.515 W$	0.190

注: \*\* 表示在  $p < 0.01$  水平上显著相关。

可见,春、夏两季在土壤含水量为  $30.3\% \pm 6.4\%$  的环境下,土壤含水量对 4 年生桉树林的土壤呼吸并没有产生影响。在土壤含水量为  $23.8\% \pm 6.7\%$  的环境下土壤含水量制约了 20 年生桉树林的土壤呼吸。而在土壤含水量为  $32.1\% \pm 6.5\%$  的环境下,土壤含水量抑制 22 年生马尾松林的土壤呼吸速率。可以看出,在无差异土壤含水量的环境下桉树林和马尾松林对土壤含水量的响应并不相同。

### 3.4 种不同林分碳排放量估算

由表 5 可知,春、夏两季 3 种林分在碳排放总量方面间差异不显著,4 年生桉树林稍大于 20 年生桉树林及 22 年生马尾松林。在各呼吸组分方面,4 年生桉树林的自养呼吸碳排放量显著大于 20 年生桉树林和 22 年生马尾松林;22 年生马尾松林显著大于 20 年生桉树老龄林。异养呼吸碳排放量方面,4 年生桉树林和 20 年生桉树林的异养呼吸碳排放量差异不显著,且均显著小于 22 年生马尾松林。

表 5 3 种林分土壤呼吸及其各呼吸组分碳排放量  $g/m^2$ 

森林类型	土壤呼吸	自养呼吸	异养呼吸
4 年生桉树幼龄林	609.71a	360.19a	249.52a
20 年生桉树老龄林	565.80a	187.63b	378.17b
22 年生马尾松林	565.58a	297.24c	268.34a

注:同一列不同字母表示林分间存在显著差异( $p < 0.05$ )。

## 4 讨论

### 4.1 3 种林分土壤呼吸及其各组分特征

总体来看,春、夏两季 3 种林分的土壤呼吸速率均处在较高水平,4 年生桉树林和 20 年生桉树林土壤呼吸速率平均值均大于华西玉屏区 7 月巨桉人工林<sup>[17]</sup>土壤呼吸均值  $2.25 \pm 0.36 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 小于珠江三角洲地区尾叶桉人工林<sup>[16]</sup>土壤呼吸速率年平均值  $3.35 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。22 年生马尾松林的土壤呼吸速率平均值高于湖南森林植物园地区<sup>[26]</sup>马尾松林年土壤呼吸速率  $1.49 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,基本等于湖南长沙<sup>[13]</sup>马尾松林 8 月土壤呼吸速率约  $2.95 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。3 种林分碳排放量大小顺序是 4 年生桉树幼龄林 > 20 年生桉树老龄林 > 22 年生马尾松林(表

5),这与国内外大多数的研究结果相一致,即阔叶林大于针叶林<sup>[27-28]</sup>。

在自养呼吸方面,据沈小帅等统计<sup>[29]</sup>,在北半球中纬度(主要是北亚热带和北温带地区)地区,观测的自养呼吸贡献率在  $29\% \sim 90\%$  之间。本研究 3 种林分的自养呼吸贡献率均在正常范围内。由表 5 可见,两种桉树林间,4 年生桉树幼龄林的自养呼吸碳排放量明显高于 20 年生桉树老龄林,且 4 年生桉树林的自养呼吸贡献率明显大于 20 年生桉树林。造成桉树林间自养呼吸碳排放量方面的差异可能是由于 4 年生桉树林处于高速生长的状态,代谢水平较高,根系活动旺盛,所以其自养呼吸碳排放量显著高于老龄林。两种老龄林之间,22 年生马尾松林的自养呼吸碳排放量显著大于 20 年生桉树林,这可能是由于两者林分类型的不同造成的。

在异养呼吸方面,4 年生桉树林显著小于 20 年生桉树林。有研究表明<sup>[30]</sup>,凋落物作为异养呼吸的主要底物对土壤的异养呼吸有很大的影响。4 年生桉树幼龄林的种植时间相对较短,枯枝落叶层厚度相比 20 年生桉树老龄林较薄,所以造成 4 年生桉树幼龄林的异养呼吸碳排放量显著低于 20 年生桉树老龄林。20 年生桉树林和 22 年生马尾松林两种老龄林间的异养呼吸碳排放量无显著差异。

### 4.2 环境因子对土壤呼吸的影响

土壤温度对土壤呼吸的影响主要是通过增强微生物的活性,从而加速土壤有机质的分解来增加土壤中  $\text{CO}_2$  浓度,温度升高可影响植物生长和生理活动来加强根系呼吸作用<sup>[31]</sup>。本研究中土壤呼吸与土壤温度均呈显著指数相关关系( $p < 0.01$ )。这与 Takahashi 等<sup>[32]</sup>、陈宝玉等<sup>[20]</sup>、王光军等<sup>[13]</sup>国内外专家的研究结果一致。关于陆地生态系统土壤呼吸及组分的研究表明<sup>[33]</sup>, $Q_{10}$  值的变化大部分在  $1.3 \sim 5.6$  之间,一般在高纬度地区  $Q_{10}$  值比较大,在低纬度地区  $Q_{10}$  值比较小。在本研究中,4 年生桉树林、20 年生桉树林和 22 年生马尾松林这 3 种林分的土壤呼吸、自养呼吸与异养呼吸温度敏感性指数的变化范围分别为  $1.42 \sim 3.86$  之间, $Q_{10}$  值的大小处在正常的范围。总体来看,春、夏两季 4 年生桉树林的温度敏感性 >

20年生桉树林>22年生马尾松林。土壤温度分别可以解释3种林分土壤呼吸变化的70.5%,81.1%和63.0%(图5—7)。

本研究中3种林分土壤呼吸与土壤含水量的关系较复杂。4年生桉树林的土壤呼吸速率与土壤含水量没有明显的相关关系;20年生桉树林土壤呼吸速率与土壤含水量呈极显著正相关关系;22年生马尾松林土壤呼吸速率与土壤含水量呈极显著负相关关系(见表4)。可见在土壤水分适量的地区,土壤含水量不是土壤呼吸的主要限制因子,只有在干旱、半干旱或土壤含水量过饱和的情况下,温度和土壤水分才对土壤呼吸共同起作用。这与许多研究结果基本一致,Davidson等<sup>[34]</sup>对温带阔叶混交林的温带混交林研究表明,当土壤体积含水量小于12%时,土壤呼吸速率和土壤湿度呈正相关,土壤体积含水量大于12%时,二者呈现负相关。Xu等<sup>[35]</sup>对7~8年生黄松林的研究表明:当土壤体积含水量小于19%时,土壤呼吸速率和体积含水量呈正相关,土壤体积含水量大于19%时,两者呈现负相关。本研究中在土壤含水量为30.3%±6.4%的环境下,土壤含水量对4年生桉树林的土壤呼吸并没有产生影响,表明春、夏两季4年生桉树林处于适量土壤含水量下。而20年生桉树林的土壤含水量与其土壤呼吸速率呈正相关关系,表明在土壤含水量为23.8%±6.7%的水平下20年生桉树林并没有达到其适量含水量,土壤含水量对土壤呼吸起制约作用。22年生马尾松林土壤呼吸与其土壤含水量的关系显示,在土壤含水量为32.1%±6.5%时,22年生马尾松林处于土壤含水量过饱和状态,土壤含水量对其土壤呼吸起抑制作用。可见3种林分对土壤含水量的响应均不相同,这可能是由于树龄及林分类型的不同而产生的对土壤含水量的不同响应。对于4年生桉树林、20年生桉树林及22年生马尾松林的适量土壤含水量阈值我们将在以后继续研究。

#### 4.3 林龄对土壤呼吸及其组分的影响

林龄是对土壤呼吸通量一个重要影响因子,老龄林与幼龄林的呼吸速率在以往的研究中很少加以比较。在国外对老龄林与幼龄林的土壤呼吸速率大小的研究没有统一的结论<sup>[36]</sup>,有的研究中幼龄林的土壤呼吸速率高于老龄林,而有的研究中老龄林高于幼龄林。本研究发现,春、夏两季4年生桉树林的土壤呼吸碳排放量要大于20年生桉树林,但是并不存在显著差异(表5)。进一步对土壤呼吸各组分进行分析可以看出,4年生桉树林的自养呼吸碳排放量显著大于20年生桉树林;而异养呼吸方面,20年生桉树林的碳排放量显著大于4年生桉树林。这一结果与常建国

等<sup>[37]</sup>在宝天曼自然保护区关于不同树龄锐齿栎的土壤呼吸特征研究结论基本一致。

#### 4.4 土壤呼吸组分的划分及估算

土壤呼吸主要由微生物和土壤动物的异养呼吸及根系的自养呼吸组成,在全球变化条件下,自养呼吸和异养呼吸对环境变量的响应不同可能形成不同的碳通量变化格局。所以,土壤呼吸及其组分的分离和量化已经成为当今全球气候变化模拟、碳循环研究等诸多学科研究中的一个重要议题<sup>[36]</sup>。本研究采用的是挖壕沟断根法来区分土壤呼吸各组分的。其优点是对土壤的扰动较小,但是,不可否认挖壕沟切断植物根系的同时,断根样方内残留的根系在短时间里不会死掉,这无疑增加了小样方内的分解底物,增加异养呼吸的比例<sup>[37-38]</sup>。为了尽量减少断根法对土壤呼吸的影响,本研究在断根处理后的第8个月,待断根样方内残留的根系基本分解完成后开始进行观测,所以对土壤呼吸各呼吸组分呼吸速率及自养呼吸贡献率的估算基本准确。

#### [参 考 文 献]

- [1] 唐罗忠,葛晓敏,吴麟,等.南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析[J].生态学报,2012,32(22):7000-7008.
- [2] 常建国,刘世荣,史作民,等.锐齿栎林土壤呼吸对土壤水热变化的响应[J].林业科学,2006,42(12):21-27.
- [3] William H. Schlesinger, Jeffrey A. Andrews. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. Biogeochemistry, 2000,48(1):7-20.
- [4] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94 [J]. Global Change Biology, 2002,8(8):800-812.
- [5] 钱登峰,马和平.土壤碳排放量测定技术[J].四川林勘设计,2011(4):78-88.
- [6] 栾军伟,向成华,骆宗诗,等.森林土壤呼吸研究进展[J].应用生态学报,2006,17(12):2451-2456.
- [7] 丁访军,聂洋,高艳平,等.黔中喀斯特地区5种林型冬季土壤呼吸研究[J].水土保持通报,2010,30(1):11-16.
- [8] 王超,杨智杰,陈光水,等.万木林保护区毛竹林土壤呼吸特征及影响因素[J].应用生态学报,2011,22(5):1212-1218.
- [9] 孟春,罗京,庞凤艳.落叶松人工林生长季节土壤呼吸通量各组分的变化[J].应用生态学报,2013,24(8):2135-2140.
- [10] 刘智,闫文德,王光军,等.去根处理对樟树林土壤呼吸的影响[J].中南林业科技大学学报,2012,32(5):120-124.
- [11] Burton Andrew J, Pregitzer Kurt S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine

- [J]. *Tree Physiology*, 2003, 2(4): 273-280.
- [12] Cornelissen JH. Global negative vegetation feedback to climate warming responses of leaf litter decomposition rates in cold biomes [J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(7): 619-627.
- [13] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 亚热带杉木和马尾松群落土壤系统呼吸[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 53-62.
- [14] 胡凡根, 李志忠, 熊平生, 等. 赣南红壤地区马尾松林和草地土壤呼吸变化研究[J]. *海南师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 24(1): 101-107.
- [15] 王传华, 陈芳清, 王愿, 等. 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[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 600-606.
- [16] 陈进, 肖以华, 陈步峰, 等. 珠江三角洲四种森林类型土壤 CO<sub>2</sub> 通量特征研究[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(5): 860-864.
- [17] 向元彬, 胡庭兴, 张健, 等. 华西雨屏区不同密度巨桉人工林土壤呼吸特征[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(1): 79-86.
- [18] 项东云. 科学种植桉树—促进林业可持续发展[OL]. [2011-01-16]. <http://www.mrsta.com/html/zhuanjiablog/002130.html>.
- [19] 马姜明, 张秀珍, 梁士楚, 等. 桂林尧山常见植物叶片性状研究[J]. *广西师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 30(1): 77-82.
- [20] 陈宝玉, 刘世荣, 葛剑平, 等. 川西亚高山针叶林土壤呼吸速率与不同土层温度的关系[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1219-1224.
- [21] 沈小帅, 陈书涛, 胡正华, 等. 亚热带次生林土壤自养和异养呼吸研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(11): 3181-3187.
- [22] 韩天丰, 周国逸, 李跃林, 等. 中国南亚热带森林不同演替阶段土壤呼吸的分离量化[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(9): 946-954.
- [23] 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): 2184-2192.
- [24] Yang Jing, Huang Jianhui, Zhan Xueming, et al. The diurnal dynamic patterns of soil respiration for different plant communities in the agro-pastoral ecotone with reference to different measuring methods[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(3): 318-325.
- [25] 杨金艳, 王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面 CO<sub>2</sub> 通量的影响[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 286-294.
- [26] 闫照刚, 闫文德, 李树战, 等. 亚热带马尾松与樟树林土壤呼吸速率特征比较[J]. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(5): 229-233.
- [27] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 2875-2882.
- [28] Raich J W, Tuffkcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [29] 沈小帅, 陈书涛, 胡正华, 等. 亚热带次生林土壤自养和异养呼吸研究[J]. *环境科学*, 2011(11): 318-3187.
- [30] 张俊兴, 苏宏新, 刘海丰, 等. 3 种温带森林土壤呼吸季节动态及其驱动机制[J]. *内蒙古农业大学学报*, 2011, 32(4): 160-167.
- [31] Ana Rey, Emiliano Pegoraro, Vanessa Tedeschi, et al. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(9): 851-866.
- [32] Takahashi A, Hiyama T, Takahashi H A, et al. Analytical estimation of the vertical distribution of CO<sub>2</sub> production with in soil application to a Japan esetem perate forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126(3/4): 223-235.
- [33] 陈华, Mark E Harmon, 田汉勤. 全球变化对陆地生态系统枯落物分解的影响[J]. *生态学报*, 2001, 21(9): 1549-1563.
- [34] 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 [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [35] Xu Ming, Qi Ye. Soil surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in Northern California [J]. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 667-677.
- [36] Irvine J, Law B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(12): 1183-1194.
- [37] 常建国, 刘世荣, 史作民, 等. 北亚热带—南暖温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离[J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1791-1802.
- [38] 孟春, 罗京, 庞凤艳. 落叶松人工林生长季节土壤呼吸通量各组分的变化[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(8): 2135-2140.