

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.06.009

吴蒙, 马姜明, 梁士楚, 等. 桂林尧山桉树及马尾松林秋季土壤碳通量特征[J]. 广西植物, 2014, 34(6):780—787

Wu M, Ma JM, Liang SC, et al. Characteristics on soil carbon flux of *Eucalyptus* spp. and *Pinus massoniana* forest in autumn in Yaoshan Mountain of Guilin[J]. *Guihaia*, 2014, 34(6):780—787

# 桂林尧山桉树及马尾松林秋季土壤碳通量特征

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省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:** 以桂北地区的 4 年生、20 年生桉树林和 22 年生马尾松林为研究对象。于 2012 年 9~11 月分别对这 3 种林分的土壤呼吸及其组分、土壤温度、土壤湿度进行了 3 个月的观测。结果表明:(1)4 年生桉树林及 22 年生马尾松林的土壤呼吸速率显著大于 20 年生桉树林,4 年生桉树林与 22 年生马尾松林无显著差异;(2)3 种林分自养呼吸速率 4 年生桉树林显著大于 20 年生桉树林及 22 年生马尾松林;异养呼吸速率 22 年生马尾松林显著大于 4 年生桉树林及 20 年生桉树林。4 年生桉树林的自养呼吸贡献率明显大于 20 年生桉树林和 22 年生马尾松林;(3)相关性分析表明,土壤温度是影响土壤呼吸及其组分的主要环境因子,3 种林分土壤温度与土壤呼吸均呈显著的指数关系。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,2 种桉树林的土壤呼吸与土壤含水量的相关性不显著;(4)对温度敏感性系数  $Q_{10}$  值的分析表明,3 种林分中 20 年生桉树林和 22 年生马尾松林的温度敏感性较大,4 年生桉树林最小。

**关键词:** 土壤呼吸; 温度敏感性; 桉树、马尾松人工林; 秋季; 桂林尧山

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2014)06-0780-08

## Characteristics on soil carbon flux of *Eucalyptus* spp. and *Pinus massoniana* forest in autumn in Yaoshan Mountain of Guilin

WU Meng<sup>1</sup>, MA Jiang-Ming<sup>1,2,3\*</sup>, LIANG Shi-Chu<sup>1,2,3</sup>, TIAN Feng<sup>1</sup>, MEI Jun-Lin<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The experiment were conducted on the young-growth *Eucalyptus* spp. forest(4 a), old-growth *Eucalyptus* spp. forest(20 a) and the *Pinus massoniana* forest(22 a) from September 2012 to November 2012 in Yaoshan Mountain of Guilin, the soil respiration and its components, the soil temperature and the soil water content of the three stands had been observed. The results were as follows: (1) The soil respiration rate of the young-growth *Eucalyptus* spp. forest(4 a) and the *Pinus massoniana* forest(22 a) were higher than the old-growth *Eucalyptus* spp. forest(20 a) significantly, but not significant difference between the young-growth *Eucalyptus* spp. forest(4 a) and the *Pinus massoniana* forest(22 a); (2) In the three stands, the autotrophic respiration rate of the young-growth *Eucalyptus*

收稿日期: 2013-12-04 修回日期: 2014-02-16

基金项目: 广西科技重大专项(2010GXNSFD169007), 桂科基 1123014, 11166-01, 桂科基 11199001; 广西研究生教育创新计划(YCSZ2012055); 广西高校科研项目(2013ZD008); 广西区学位点学科建设重点科学研究项目; 珍稀濒危动植物生态与环境保护省部共建教育部重点实验室(桂科能 1101Z003); 广西珍稀濒危动物生态学重点实验室研究基金(桂科能 1301k005)。

作者简介: 吴蒙(1989-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向为土壤碳循环。

\*通讯作者: 马姜明, 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。

spp. forest(4 a) was higher than the old-growth *Eucalyptus* spp. forest(20 a) and the *Pinus massoniana* forest(22 a). The heterotrophic respiration rate of the *Pinus massoniana* forest(22 a) was higher than the young-growth *Eucalyptus* spp. forest(4a) and the old-growth *Eucalyptus* spp. forest(20 a). The rate of contribution of autotrophic respiration of the young-growth *Eucalyptus* spp. forest(4 a) was significantly greater than the old-growth *Eucalyptus* spp. forest(20 a) and the *Pinus massoniana* forest(22 a); (3) According to correlation analysis, we knew that the soil temperature was the main environmental factor influencing the soil respiration rate and its components. There existed exponential relationship between the soil temperature and the soil respiration rate and its components. There were notable negative correlations between soil respiration rate and soil moisture content in the *Pinus massoniana* forest(22 a), but not significant correlation in the young-growth *Eucalyptus* spp. forest(4 a) and the old-growth *Eucalyptus* spp. forest(20 a); (4) As for the three stands, the  $Q_{10}$  value analysis of the temperature sensibility coefficient indicated that the value of the old-growth *Eucalyptus* spp. forest (20 a) and the *Pinus massoniana* forest(22 a) were the higher and the young-growth *Eucalyptus* spp. forest(4 a) was the lowest.

**Key words:** soil respiration; temperature sensitivity; *Eucalyptus* spp. and *Pinus massoniana* forest; autumn; Yaoshan Mountain of Guilin

土壤呼吸(soil respiration,  $R_s$ )作为生态系统碳循环的重要组成部分,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(杨清培等,2004)。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,其中森林土壤中的碳约占全球土壤有机碳的 73%(常建国等,2006;唐罗忠等,2012)。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(Schlesinger *et al.*,2000)。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(Raich *et al.*,2002)。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(栾军伟等,2006)、季节变化特征(丁访军等,2010)、土壤呼吸组分的分离(刘智等,2012)和土壤呼吸及其组分对环境因子变化的响应机制(Cornelissen *et al.*,2007)等方面取得重大研究进展。近年来,我国关于土壤呼吸研究发展较快,在我国温带(金冠一等,2013)、北亚热带-南暖温带过渡区(常建国等,2007)、中亚热带(沈小帅等,2011)、南亚热带(韩天丰等,2011)及热带雨林(沙丽清等,2004)等地区均有关于土壤呼吸的研究。然而对于亚热带地区桉树人工林土壤呼吸方面的研究少有报道。

广西自“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 年广西森林资源二类调查数据显示,广西桉树人工林林分面积达 159.02 万  $hm^2$ ,占全区森林总面积的 15.38%,活立木蓄积量达 7 053.8 万  $m^3$ ,占全区森林总蓄积量

的 12.30%,森林资源快速增长(项东云,2011)。随着大面积营造桉树人工林,其社会效益、生态效益等问题日益受到人们关注。本研究以桂林尧山 4 年生、20 年生桉树林和 22 年生马尾松林为研究对象。对这 3 种类型的森林生态系统在秋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 20 年生桉树林、4 年生桉树林及 22 年生马尾松林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,地处广西北部,110°07'32" E,24°55'84" N。桂林市属山地丘陵地区,中亚热带湿润季风气候,气候温和,雨量充沛。年均气温 18.9 °C,年均日照时数 1 670 h。最冷 1 月份平均气温 7.8 °C,最热 7 月份平均气温 28 °C;全年无霜期 300 d;年均降雨量 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(马姜明等,2013)。4 年生、20 年生桉树林和 22 年生马尾松林林地地势平坦,3 种不同林分样地概况见表 1。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

土壤呼吸通常分为自养呼吸和异养呼吸 2 个组

表 1 3 种类型人工林样地基本情况  
Table 1 Conditions of sites in the three forest types

林地类型 Forest type	海拔 Elevation (m)	平均树龄 Mean tree-age(a)	平均树高 Height (m)	平均胸径 DBH (cm)	林分密度 Stand density (株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度 Canopy	林下物种 Species understory
4 年生桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp. plantation (4 a)	150	4	10	11.2	1400	0.85	苎麻 ( <i>Boehme rianivea</i> )、红花酢浆草 ( <i>Oxalis corymbosa</i> )、紫花地丁 ( <i>Herba violae</i> )、积雪草 ( <i>Centella asiatica</i> )
20 年生桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp. plantation (20 a)	150	20	25	26.8	900	0.80	樟树 ( <i>Cinnamomum camphora</i> )、阴香 ( <i>C. burmannii</i> )、苎麻、火炭母 ( <i>Polygonum chinense</i> )
22 年生马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> plantation (22 a)	160	22	10	19.4	1100	0.68	桃金娘 ( <i>Rhodomyrtus tomentosa</i> )、山莓 ( <i>Rubus corchorifolius</i> )、白茅 ( <i>Imperata cylindrica Beauv</i> )、火炭母

分,自养呼吸即植物根系呼吸,异养呼吸主要为土壤微生物呼吸。本研究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。

2012 年 9—11 月,对 3 种类型人工林生态系统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。2012 年 5 月,分别在 4 年生、20 年生桉树林、22 年生马尾松林 3 种人工林生态系统内各设置固定监测样点。在 3 种林分内各设 6 个 2 m×2 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 个用壕沟法做挖壕沟断根处理,用于观测土壤呼吸各组分的呼吸速率。挖壕沟的具体方法如下:在土壤呼吸观测 4 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 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/m<sup>2</sup>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

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,每天从上午 7:00 至下午 19:00 每隔 2 h 对实验样地 3 种林分的土壤呼吸速率进行一天的观测。3 种林分各观测 1 d。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 实验数据处理

2.3.1 土壤呼吸各组分的计算 经过 5 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。通过计算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(陈宝玉等,2009)。

2.3.2 温度敏感性系数  $Q_{10}$  值的计算 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(Luo *et al.*,2001),表示为  $y = ae^{bt}$ 。式中, $y$  为测量的土壤呼吸速率; $t$  为距地表下处 10 cm 的土壤温度; $a$  为 0 °C 时的土壤呼吸速率; $b$  为温度反应系数,则  $Q_{10}$  可表达为  $Q_{10} = e^{10b}$ 。

2.3.3 秋季土壤呼吸总通量的估算 对土壤呼吸秋季通量估算采用逐月计算的方法。即分别计算 2012 年 9~11 月每个月平均值,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、22 年生马尾松林的碳排放量。

2.3.4 数据分析 采用 SPSS 16.0 软件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 土壤总呼吸特征

由表 2 可知,秋季 3 种林分的土壤呼吸速率大小顺序为 22 年生马尾松林( $2.08 \pm 0.65$ )  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  > 4 年生桉树林( $1.97 \pm 0.55$ )  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  > 20 年生桉树林( $1.72 \pm 0.59$ )  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其中 4 年生桉树林和 22 年生马尾松林的土壤呼吸速率显著大于 20 年生桉树林,4 年生桉树林与 22 年生马尾松林之间的土壤呼吸速率差异不显著。4 年生桉树林、20 年生桉树林和 22 年生马尾松林

表 2 秋季各月 3 种林分土壤温度及土壤呼吸速率变化 (单位:  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Table 2 Variation of soil respiration rates and soil temperatures in the three forest types in autumn

月份 Month	4 年生桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp. plantation (4 a)		20 年生桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp. plantation (20 a)		22 年生马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> plantation (22 a)	
	呼吸速率 Respiration rate	土壤温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) Soil temperature	呼吸速率 Respiration rate	土壤温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) Soil temperature	呼吸速率 Respiration rate	土壤温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) Soil temperature
	9 月 September	2.61±0.49aA	21.54	2.53±0.66aA	21.19	2.95±0.39bA
10 月 October	1.86±0.30aB	20.92	1.48±0.14bB	18.47	1.79±0.29aB	18.54
11 月 November	1.46±0.11aC	14.38	1.27±0.29bC	13.70	1.50±0.13aC	15.17
秋季均值 Average	1.97±0.55a	14.14±5.57a	1.72±0.59b	14.31±4.22a	2.08±0.65a	14.91±4.92a

注: 不同小写字母表示 3 种林分间的差异显著性 ( $P < 0.05$ ); 不同大写字母表示月份间的差异显著性 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters represent the significant differences of three forest stands ( $P < 0.05$ ); different uppercase letters represent the significant differences of month ( $P < 0.05$ ).

3 种林分土壤呼吸的最大值均出现在 9 月, 分别为 ( $3.50 \pm 0.21$ )、( $2.69 \pm 0.59$ ) 和 ( $3.14 \pm 0.41$ )  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 土壤呼吸速率最小值均出现在 11 月, 分别为 ( $1.39 \pm 0.12$ )、( $1.16 \pm 0.33$ ) 和 ( $1.42 \pm 0.18$ )  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见, 秋季 3 种类型人工林的土壤呼吸速率变化幅度较大, 下降趋势明显。秋季 3 种林分的土壤 10cm 处温度变化幅度较大, 达到  $7.16 \sim 8.18$   $^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.2 土壤呼吸各组分及自养呼吸贡献率特征

由表 3 可知, 在自养呼吸方面, 4 年生桉树林的呼吸速率最大, 且与 20 年生桉树林、22 年生马尾松林存在差异显著; 20 年生桉树林与 22 年生马尾松林之间的自养呼吸速率差异不显著。大小顺序为 4 年生桉树林 ( $1.16 \pm 0.38$ )  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  > 22 年生马尾松林 ( $0.84 \pm 0.26$ )  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  > 20 年生桉树林 ( $0.74 \pm 0.13$ )  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在自养呼吸贡献率上, 4 年生桉树林的自养呼吸贡献率为 ( $58.37 \pm 5.80$ )%, 显著大于 20 年生桉树林 ( $39.50 \pm 6.12$ )% 和 22 年生马尾松林 ( $40.90 \pm 5.50$ )%。3 种林分的异养呼吸速率变化范围在 ( $0.82 \pm 0.17$ ) ~ ( $1.23 \pm 0.21$ )  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  之间, 22 年生马尾松林的异养呼吸速率显著大于 4 年生桉树林和 20 年生桉树林, 两种桉树林之间差异不显著。

### 3.3 碳排放量估算

对秋季 3 种林分的碳排放量进行估算如表 4 所示。22 年生马尾松林碳排放总量显著大于 4 年生桉树林和 20 年生桉树林, 而在各呼吸组分方面, 3 种林分各有特点。4 年生桉树林自养呼吸碳排放量显著大于 20 年生桉树林及 22 年生马尾松林; 20 年生桉树林与 22 年生马尾松林差别不大。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 3 秋季 3 种林分土壤呼吸及其各组分

呼吸速率变化 (单位:  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Table 3 Variation of soil respiration rates and its components in the three forest types in autumn

森林类型 Forest type	土壤呼吸 $R_s$ Soil respiration	自养呼吸 $R_a$ Autotrophic respiration	异养呼吸 $R_h$ Heterotrophic respiration	自养呼吸 贡献率 (%) Contribution of autotrophic rate
4 年生桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp. plantation (4 a)	1.97±0.55a	1.16±0.38a	0.82±0.17a	58.37±5.80a
20 年生桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp. plantation (20 a)	1.72±0.59b	0.74±0.13b	0.98±0.28a	39.50±6.12b
22 年生马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> plantation (22 a)	2.08±0.65a	0.84±0.26b	1.23±0.21b	40.90±5.50b

注: 不同字母表示不同林分间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Different letters represent the significant differences of three forest stands ( $P < 0.05$ ). The same below.

表 4 秋季 3 种林分土壤呼吸及其各呼吸

组分碳排放量 (单位:  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ )

Table 4 Carbon emissions of soil respiration and its components in the three forest types in autumn

森林类型 Forest type	土壤呼吸 $R_s$ Soil respiration	自养呼吸 $R_a$ Autotrophic respiration	异养呼吸 $R_h$ Heterotrophic respiration
4 年生桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp. plantation (4 a)	186.38a	108.92a	77.46a
20 年生桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp. plantation (20 a)	162.55b	68.91b	93.64a
22 年生马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> plantation (22 a)	195.94a	79.78b	116.47b

### 3.4 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 3 种林分土壤呼吸速率及其各组分与土壤温度的关系均呈显著相关关系 ( $P < 0.05$ ), 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如图 1~3。根据拟合方程计



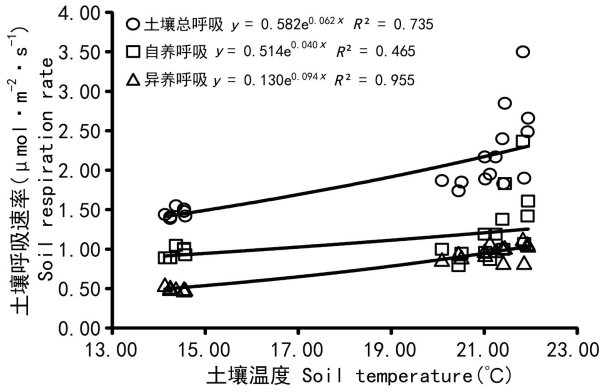


图 1 4 年生桉树林土壤温度与土壤呼吸及其各组分呼吸速率的关系

Fig. 1 Relationships of soil respiration and its components with soil temperature of young-growth *Eucalyptus* spp. forest (4 a)

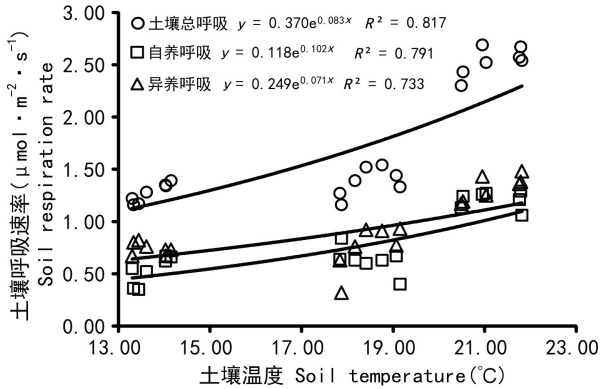


图 2 20 年生桉树林土壤温度与土壤呼吸及其各组分呼吸速率的关系

Fig. 2 Relationships of soil respiration and its components with soil temperature of old-growth *Eucalyptus* spp. forest (20 a)

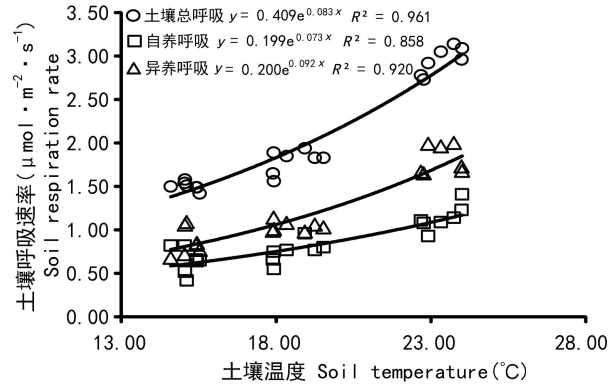


图 3 22 年生马尾松林土壤温度与土壤呼吸及其各组分呼吸速率的关系

Fig. 3 Relationships of soil respiration and its components with soil temperature of *Pinus massoniana* forest (22 a)

表 5 3 种林分土壤呼吸及其组分的温度敏感性系数  $Q_{10}$  值及曲线拟合  $R^2$  值

Table 5  $Q_{10}$  and  $R^2$  values of soil respiration and its components in the three forest types

森林类型 Forest type	土壤总呼吸 Soil total respiration		自养呼吸 Autotrophic respiration		异养呼吸 Heterotrophic respiration	
	$Q_{10}$	$R^2$	$Q_{10}$	$R^2$	$Q_{10}$	$R^2$
4 年生桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp. plantation (4 a)	1.86	0.735 **	1.49	0.465 *	2.56	0.955 **
20 年生桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp. plantation (20 a)	2.29	0.817 **	2.03	0.791 **	2.77	0.733 **
22 年生马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> plantation (22 a)	2.29	0.961 **	2.51	0.858 **	2.08	0.920 **

注: \* 表示在  $P < 0.05$  水平上显著相关; \*\* 表示在  $P < 0.01$  水平上显著相关。

Note: \* represents the correlation is significant at the level of  $P < 0.05$ ; \*\* represents the correlation is significant at the level of  $P < 0.01$ .

算不同林分各呼吸组分的  $Q_{10}$  值及指数回归方程决定系数  $R^2$  值如表 5 所示。

3 种林分土壤呼吸 ( $R_s$ ) 的温度敏感性指数  $Q_{10}$  值如表 5 所示, 其大小顺序为 20 年生桉树林 (2.29) = 22 年生马尾松林 (2.29) > 4 年生桉树林 (1.86), 这表明 4 年生桉树林对温度敏感性最低。对土壤呼吸组分与土壤温度的关系研究可知, 异养呼吸的温度敏感性指数  $Q_{10}$  值的大小顺序为 20 年生桉树林 (2.77) > 4 年生桉树林 (2.56) > 22 年生马尾松林 (2.08)。自养呼吸  $Q_{10}$  值的大小顺序为 22 年生马尾松林 (2.51) > 20 年生桉树林 (2.03) > 20 年生桉树林 (1.49)。可见, 3 种林分自养、异养呼吸的温度敏感性各具特点。

### 3.5 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较复杂, 本研究中对 3 种林分土壤呼吸速率和土壤含水量的相关性分析表明 (表 6), 2 种桉树人工林秋季土壤呼吸速率与土壤含水量无明显的相关关系。22 年生马尾松林土壤呼吸速率与土壤含水量呈显著负相关关系。Yang (2004) 和杨金艳 (2006) 的研究表明, 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, 只在干旱、半干旱或土壤含水量过饱和和情况下, 温度和土壤水分才对土壤呼吸共同起作用。秋季 4 年生、20 年生桉树林和 22 年生马尾松林的土壤含水量分别为 (22 ± 1)%、(19 ± 2)%、(21 ± 2)%。由此可见, 土壤含水量在 20% 左右的情况

下, 2 种桉树林的土壤含水量未成为影响土壤呼吸速率的限制因子; 而 22 年生马尾松林的土壤含水量呈过饱和状态。土壤总呼吸、自养呼吸及异养呼吸速率均与土壤含水量呈极显著负相关关系。

表 6 秋季 3 种林分土壤呼吸及其组分与土壤含水量之间的关系

Table 6 Correlationship of soil respiration and its components with soil moisture content in the three forest types in autumn

森林类型 Forest type	总呼吸 R <sup>2</sup> 值 R <sup>2</sup> of soil total respiration	自养呼吸 R <sup>2</sup> 值 R <sup>2</sup> of Autotrophic respiration	异养呼吸 R <sup>2</sup> 值 R <sup>2</sup> of Heterotrophic respiration	平均土壤 含水量 (%) Average of soil moisture content
4 年生桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp. plantation (4 a)	-0.272	0.026	-0.669 **	22±1
20 年生桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp. plantation (20 a)	-0.331	-0.379	-0.197	19±2
22 年生马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> plantation (22 a)	-0.712 **	-0.637 **	-0.681 **	21±2

注: \*\* 表示在  $P < 0.01$  水平上显著相关。

Note: \*\* represents the correlation is significant at the level of  $P < 0.01$ .

## 4 讨论

### 4.1 土壤呼吸碳排放量及自养呼吸贡献率特点

总体来看, 4 年生桉树林与 22 年生马尾松林的碳排放量分别为 186.38 gC 和 195.94 gC, 差异不显著, 显著大于 20 年生桉树林 (162.55 gC)。从各呼吸组分的碳排放量可以看出, 4 年生桉树林的自养呼吸碳排放量明显高于 20 年生桉树林及 22 年生马尾松林, 比 22 年生马尾松林多出 40%。在异养呼吸碳排放量上 22 年生马尾松林显著大于 4 年生和 20 年生桉树林。3 种林分自养呼吸碳排放量的差异可能是由于 4 年生桉树林处于高速生长的状态, 代谢水平较高, 所以其自养呼吸碳排放量显著高于其它两种林分。异养呼吸碳排放量上的差异可能是由于凋落物的输入量对于土壤的异养呼吸有很大影响 (张俊兴等, 2011)。本研究, 22 年生马尾松林的枯枝落叶层厚度相比 4 年生和 20 年生桉树林较厚, 所以 22 年生马尾松林的异养呼吸碳排放量显著高于 4 年生和 20 年生桉树林。

本研究的地点为中亚热带地区, 在秋季, 20 年生桉树林和 22 年生马尾松林的自养呼吸贡献率分别为  $(39.50 \pm 6.12)\%$  和  $(40.90 \pm 5.50)\%$ , 均比

Raich 等 (1992) 研究得到的全球各生态系统中自养呼吸贡献率平均约为 30% 的结论高。4 年生桉树林的自养呼吸贡献率为  $(58.37 \pm 5.80)\%$ , 明显大于 20 年生桉树林和 22 年生马尾松林。这一结果与陈进等 (2011) 在珠江三角洲对桉树等 4 种林分的土壤碳通量特征的研究结果一致。这说明秋季中亚热带地区的 4 年生桉树林自养呼吸贡献率较大。

### 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通过增强微生物活性, 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 (Rey *et al.*, 2002)。本研究中土壤呼吸与土壤温度均呈显著指数相关关系。这与 Takahashi (2004)、王光军 (2009) 等的研究结果一致。陈华等 (2001) 研究表明,  $Q_{10}$  值的变化大部分在 1.3~5.6 之间, 一般高纬度地区  $Q_{10}$  值较大, 低纬度地区  $Q_{10}$  值较小。本研究中, 4 年生、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均在 1.49~2.56 之间,  $Q_{10}$  值大小处在正常范围。进一步对土壤呼吸各组分进行分析, 4 年生和 20 年生桉树林各呼吸组分的  $Q_{10}$  值为异养呼吸大于自养呼吸, 说明在这两种类型森林生态系统中土壤异养呼吸的温度敏感性高于自养呼吸。22 年生马尾松林表现为自养呼吸 > 异养呼吸; 且土壤自养呼吸  $Q_{10}$  值大于 4 年生和 20 年生桉树林。这可能由于桉树是适应南方气候条件的常绿阔叶速生树种, 且 4 年生桉树林常年保持较快的增长速率, 所以其对温度的响应与 22 年生马尾松林相比较迟钝 (陈进等, 2011)。

本研究中 2 种桉树人工林秋季土壤呼吸速率与土壤含水量无明显的相关关系, 22 年生马尾松林土壤呼吸速率与土壤含水量呈显著负相关关系。这表明秋季 2 种桉树林的土壤含水量未成为影响土壤呼吸速率的限制因子; 而 22 年生马尾松林的土壤含水量呈过饱和状态, 其土壤总呼吸、自养呼吸及异养呼吸速率均受土壤含水量的影响而显著降低。这与许多研究结果基本一致, Davidson *et al.* (1998) 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; 大于 12% 时, 二者呈负相关。Xu *et al.* (2001) 的研究表明, 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; 大于 19% 时, 两者呈负相关。本研究中土壤含水量在 20% 左右时, 22 年生马尾松林土壤呼吸速率与土壤

含水量呈显著负相关关系,而2种桉树人工林明显的相关关系。这可能是由于桉树和马尾松2种林分类型的不同而产生的对土壤含水量的不同响应。对于桉树林土壤含水量达到多少时才会与土壤呼吸速率呈显著负相关关系,我们将在以后继续研究。

#### 4.3 不同林龄对土壤呼吸及其组分的影响

林龄对土壤呼吸通量是一个重要影响因子,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。国外对老龄林与幼龄林的土壤呼吸速率大小的研究无统一结论,有的研究中幼龄林高于老龄林,而有的研究中老龄林高于幼龄林(Irvine *et al.*, 2002)。本研究发现,秋季4年生桉树林的土壤呼吸速率大于20年生桉树林,并存在显著差异。进一步对土壤呼吸各组分进行分析可知,2种桉树人工林的异养呼吸差异不显著,而自养呼吸4年生桉树林显著大于20年生桉树林。这一结果与常建国(2007)等对5个北亚热带—南暖温带过渡区森林关于树龄对土壤呼吸影响的研究结论基本一致。

#### 4.4 土壤呼吸组分的划分及估算

国内外关于土壤呼吸自养呼吸贡献率的研究因为试验设计方案的不同而差异较大,据沈小帅等(2011)的统计,在北半球中纬度地区(主要是北亚热带和北温带),观测的自养呼吸贡献率在29%~90%之间,不同研究间的差异较大。本研究采用挖壕沟断根法来区分土壤呼吸各组分。其优点是对土壤的扰动较小,但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(Bond *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2003)。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4个月后待断根样方内残留的根系基本分解完成后开始观测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:

Bond-Lamberty B, Wang CK, Gower ST. 2004, A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration[J]. *Glob Chang Biol*, **10**:1 756—1 766  
 Chang JG(常建国), Liu SR(刘世荣), Shi ZM(史作民), 2006, Response of soil respiration to soil temperature and moisture regimes in the natural forest of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* (锐齿栎林土壤呼吸对土壤水热变化的响应)[J]. *Sci Sil Sin* (林业科学), **42**(12):21—27  
 Chen BY(陈宝玉), Wang HJ(王洪君), Yang J 杨建. 2009. Separation of soil respiration components and method for measuring soil respiration(土壤呼吸组分区分及其测定方法)[J]. *J*

*Northeastern For Univ*(东北林业大学学报), **37**(1):96—99  
 Chen J(陈进), Xiao YH(肖以华), Chen BF(陈步峰). 2011. The study of soil CO<sub>2</sub> flux of four forest types in pearl river delta(珠江三角洲四种森林类型土壤 CO<sub>2</sub> 通量特征研究)[J]. *Ecol Environ Sci*(生态环境学报), **20**(5):860—864  
 Chen H(陈华), Mark EH, Tian HQ(田汉勤). 2001. Effects of global change on litter decomposition in terrestrial ecosystems (全球变化对陆地生态系统枯落物分解的影响)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **21**:1 549—1 563  
 Cornelissen JH. 2007. Global negative vegetation feedback to climate warming responses of leaf litter decomposition rates in cold biomes[J]. *Ecol Lett*, **10**(7):619—627  
 Davidson EA, Belk E, Boone RD. 1998. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Glob Chang Biol*, **4**:217—227  
 Ding FJ(丁访军), Nie Y(聂洋), Gao YP(高艳平). 2010. Winter Soil Respiration of 5 forest types in the karst areas of central Guizhou Province(黔中喀斯特地区5种林型冬季土壤呼吸研究)[J]. *Bull Soil & Wat Cons*(水土保持通报), **30**(1):11—16  
 Han TF(韩天丰), Zhou GY(周国逸), Li YL(李跃林). 2011. Partitioning soil respiration in lower subtropical forests at different successional stages in southern China(中国南亚热带森林不同演替阶段土壤呼吸的分量量化)[J]. *Chin J Plant Ecol* (植物生态学报), **35**(9):946—954  
 Irvine J, Law BE. 2002. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests[J]. *Glob Chang Biol*, **8**:1—12  
 Jin GY(金冠一), Zhao XH(赵秀海), Kang FF(康峰峰). 2013. The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain(太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **33**(6):1 832—1 841  
 Lee MS, Nakane K, Nakatsubo T, *et al.* 2003. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperature deciduous forest[J]. *Plant & Soil*, **255**:311—318  
 Liu Z(刘智), Yan WD(闫文德), Wang GJ(王光军). 2012. Effects of root exclusion on soil respiration in *Cinnamomum camphora* plantation(去根处理对樟树林土壤呼吸的影响)[J]. *J Centr S Univ For & Technol* (中南林业科技大学学报), **32**(5):120—124  
 Luan JW(栾军伟), Xiang CH(向成华), Luo ZS(骆宗诗). 2006. Research advances in forest soil respiration 森林土壤呼吸研究进展[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **17**(12):2 451—2 456  
 Luo Y, Wan S, Hui D, *et al.* 2001. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, **413**:622—625  
 Ma JM(马姜明), Wu M(吴蒙), Zhan TT(占婷婷). 2013. Changes of species composition and diversity among restoration stages of *Loropetalum chinense* communities in karst area of Li-jiang River valley(漓江流域岩溶区榿木群落不同恢复阶段物种组成及多样性变化)[J]. *Ecol Environ Sci*(生态环境学报), **22**(1):66—71  
 Raich JW, Schlesinger WH. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, **44**(2):81—99  
 Raich JW, Potter CS, Bhagawati D. 2002. Interannual variability in global soil respiration, 1980—94[J]. *Glob Chang Biol*, **8**(8):800—812



- Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, et al. 2002. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in central Italy[J]. *Glob Change Biol*, **8**(9):851—866
- Schlesinger WH, Andrews JA. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochem*, **48**:7—20
- Sha LQ(沙丽清), Zhen Z(郑征), Tang JW(唐建维). 2004. The study of soil respiration in tropical seasonal rainforest of Xishuangbanna(西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究)[J]. *Sci Chin Ser D: Earth Sci*(中国科学 D 辑: 地球科学), **34**:167—174
- Shen XS(沈小帅), Chen ST(陈书涛), Hu ZH(胡正华). 2011. Investigation of heterotrophic and autotrophic components of soil respiration in a secondary forest in subtropical China(亚热带次生林土壤自养和异养呼吸研究)[J]. *Environ Sci*(环境科学), **11**:3 181—3 187
- Takahashi A, Hiyama T, Takahashi HA, et al. 2004. Analytical estimation of the vertical distribution of CO<sub>2</sub> production with in soil application to a Japan esetem perate forest[J]. *Agric & For Meteorol*, **126**:223—235
- Tang LZ(唐罗忠), Ge XM(葛晓敏), Wu L(吴麟). 2012. Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations(南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **32**(22): 7 000—7 008
- Wang GJ(王光军), Tian DL(田大伦), Yan WD(闫文德). 2009. Soil system respiration and its controlling factors in *cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* communities of subtropical China(亚热带杉木和马尾松群落土壤系统呼吸及其影响因子)[J]. *Chin J Plant Ecol*(植物生态学报) 2009, **33**(1):53—62
- Xiang DY(项东云). 2011. Scientific planting *Eucalyptus* spp. — to promote sustainable forestry development(科学种植桉树-促进林业可持续发展)[OL]. [2011-01-16]. <http://www.mrsta.com/Html/zhuanjiaoblog/002130.html>
- Xu M, Qi Y. 2001. Soil surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California[J]. *Glob Chang Biol*, **7**:667—677
- Yang QP(杨清培), Li MG(李鸣光), Wang BS(王伯荪). 2004. Study on soil respiration of the lower subtropical successive forest communities(南亚热带森林群落演替过程中林下土壤的呼吸特征)[J]. *Guihaia*(广西植物), **24**(5):443—449
- Yang J, Huang J H, Zhan X M, et al. 2004. The diurnal dynamic patterns of soil respiration for different plant communities in the agro-pastoral ecotone with reference to different measuring methods[J]. *Acta Phytoecol Sin*, **28**(3):318—325
- Yang JY(杨金艳), Wang CK(王传宽). 2006. Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO<sub>2</sub> flux of forests in northeastern China(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]. *Chin J Plant Ecol*(植物生态学报), **30**(2):286—294
- Zhang JX(张俊兴), Su HX(苏宏新), Liu HF(刘海丰). 2011. Seasonal dynamic and drive mechanism of soil respiration in three temper forests(3 种温带森林土壤呼吸季节动态及其驱动机制)[J]. *J Inn Mong Agric Univ*(内蒙古农业大学学报), **32**(4):160—167

(上接第 746 页 Continue from page 746)

- 在芒果品种鉴定中的应用[J]. *Guihaia*(广西植物), **21**(3): 281—283
- Guo QR(郭起荣), Yang GY(杨光耀), Du TZ(杜天真), et al. 2003. Studies on phenotype hereditary genetics of thick culm wall of *Phyllostachys edulis* cv. *pachyloen*(厚皮毛竹厚壁性状的表型遗传分析)[J]. *Acta Agric Univ Jiangxi; Nat Sci Edit*(江西农业大学学报·自然科学版), **25**(6):811—814
- Guo QR(郭起荣), Ren LN(任立宁), Mou SH(牟少华), et al. 2010. Joint analysis of SRAP, AFLP, ISSR molecular identification for *Phyllostachys edulis*(Poaceae)germplasm(毛竹种质分子鉴别 SRAP、AFLP、ISSR 联合分析)[J]. *Acta Agric Univ Jiangxi; Nat Sci Edit*(江西农业大学学报·自然科学版), **32**(5):982—986
- Guo XQ(郭小勤), Li B(李犇), Ruan XS(阮晓赛). 2009. Genetic diversity of ten *Phyllostachys edulis* cultivars with ACGM markers(利用 ACGM 分子标记研究 10 个毛竹不同栽培变种的遗传多样性)[J]. *Sci Silv Sin*(林业科学), **45**(4):28—32
- Jensen JL, Bohonak AJ, Kelley ST. 2005. Isolation by distance, web service: version 3.23[J]. *BMC Gene*, **6**(13):1—6
- Li LB(李潞滨), Guo XJ(郭晓军), Peng ZH(彭镇华) et al. 2008. Effect of the quantity of AFLP primer combinations on accurately identifying bamboo genetic relationships(AFLP 引物组合数量对准确研究竹子系统关系的影响)[J]. *Chin Bull Bot*(植物学通报), **25**(4):449—454
- Liu SD(刘世东), Liang L(梁梁). 1992. A study on meteorological factors in the prlnelpal phyllostachys Pubescens producer areas of Guangxi(广西毛竹主产区气候因子的分析研究)[J]. *J Fujian Coll For*(福建林学院学报), **12**(4): 445—451
- Nei M. 1972. Genetic distance between populations[J]. *Am Nat*, **106**:283—292
- Nei M, Li WH. 1979. Mathematical model for studying genetic variation in terms of restriction endonucleases[J]. *Proc Nat Acad Sci USA*, **76**(10):5 269—5 273
- Ruan XS(阮晓赛), Lin XC(林新春), Lou YF(娄永峰), et al. 2008. Genetic diversity of *Phyllostachys heterocycla* var. *Pubescentes* povenances by AFLP and ISSR(毛竹种源遗传多样性的 AFLP 和 ISSR 分析)[J]. *J Zhejiang For Sci Technol*(浙江林业科技), **28**(2):29—33
- Rohlf FJ. 2000. Ntsys-pc Numerical taxonomy and multivariate analysis system. Ver 2. 10e [M]. NewYork: Exeter Software, Setauket
- Shi JM(施建敏), Guo QR(郭起荣), Yang GY(杨光耀), et al. 2007. Seasonal photosynthetic responses of *Phyllostachys edulis* to environmental factors(毛竹光合作用对环境因子的季节响应)[J]. *Guihaia*(广西植物), **27**(6):923—928
- Tang MQ(唐美琼), Wei RQ(韦荣昌), Yao SC(姚绍嫦), et al. 2012. AFLP analysis on genetic diversity of *Sarcandra glabra* in Guangxi region(广西草珊瑚种质资源遗传多样性的 AFLP 分析)[J]. *Chin Trad Herb Drugs*(中草药), **43**(7): 1 398—1 402
- Xia M(夏铭). 1999. Research progress of genetic diversity(遗传多样性研究进展)[J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志), **18**(3):59—65
- Yeh FC, Yang RC, Boyle T. 1999. POPGENE 32-version 1. 31. Population genetics software. Hyperlink <http://www.ualberta.ca/~fyeh/fyeh>
- Zhang SF(张守锋), Ma QL(马秋香), Ding YL(丁雨龙). 2007. RAPD analysis for the genetic diversity of *Phyllostachys edulis*(毛竹居群遗传多样性的 RAPD 分析)[J]. *Chin For Sci Technol*(林业科技开发), **21**(2):26—28