

# 橡胶林土壤呼吸速率及其与土壤温湿度的关系\*

王春燕<sup>1,2</sup> 陈秋波<sup>1</sup> 袁 坤<sup>1</sup> 李光明<sup>1,3</sup> 杨礼富<sup>1</sup> 王真辉<sup>1†</sup>

(1 中国热带农业科学院橡胶研究所/国家农业部儋州热带作物科学观测实验站, 海南儋州 571737)

(2 海南省农垦科学院, 海口 570206)

(3 微山县环境保护局, 山东济宁 277600)

**摘 要** 利用 Li-6400 光合仪研究 4 a、12 a 和 19 a 橡胶林的土壤呼吸及其各组分(微生物呼吸、根系呼吸、凋落物呼吸)呼吸速率的日变化和年变化特征, 探索土壤温度和湿度对土壤呼吸速率的影响。结果表明: 不同树龄橡胶林土壤呼吸速率在全天观测期间, 出现最大值和最小值的时刻有很大差异, 但在 9:00 ~ 11:00 时刻的测定值均接近日均值; 在不同树龄橡胶林中各组分呼吸速率日变化大小虽不一致, 但均表现为凋落物呼吸速率最小。4 a、12 a 和 19 a 橡胶林土壤呼吸速率均有明显的月变化, 月均值分别是 2.45、2.63 和 2.96  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; 最大值出现在 7 月和 8 月, 最小值出现在 2 月和 3 月; 不同树龄橡胶林土壤呼吸速率月变化相互间差异不显著; 土壤微生物呼吸占土壤呼吸的比例最高(为 43.6%), 根系呼吸次之(为 36.1%), 凋落物呼吸较小(为 20.4%)。土壤呼吸速率与土壤温度之间具有显著的指数函数关系, 但与土壤湿度的相关性不显著, 从而得知海南橡胶林土壤温度与土壤呼吸速率有着密切的关系, 土壤水分与土壤呼吸速率可能没有直接的关系。

**关键词** 橡胶林; 土壤呼吸速率; 土壤温度; 土壤湿度

**中图分类号** S794.1 **文献标识码** A

土壤呼吸是土壤碳输出的主要途径, 同时是全球碳循环的主要方式, 已成为大气  $\text{CO}_2$  输入最主要的来源, 每年土壤呼吸向大气释放的碳是 68 Gt (1 Gt =  $10^{15}$  g), 是燃料燃烧而释放的  $\text{CO}_2$  含碳量的 10 倍以上<sup>[1]</sup>。土壤呼吸即使发生较小的变化, 也会对大气  $\text{CO}_2$  浓度产生显著的影响<sup>[2-3]</sup>。因此, 研究土壤呼吸及其影响因子及其对全球气候变化的响应是碳循环研究的一个重要内容。

国外对土壤呼吸研究重视较早, 从 20 世纪 70 年代以来就已开展研究, 目前主要研究是影响土壤呼吸的自然因素(温度、湿度、土壤肥力条件、植被类型等)<sup>[4]</sup>、经营措施(采伐、灌溉、放牧等)<sup>[5]</sup>、大气  $\text{CO}_2$  浓度升高、氮沉降等。我国于 20 世纪 90 年代开始对土壤呼吸方面的研究, 现有对森林草原生态系统的土壤呼吸研究较多<sup>[6-8]</sup>, 然而森林土壤呼吸多数集中在温带和亚热带森林<sup>[9-13]</sup>, 且对海南橡胶林土壤呼吸的研究就更少。2010 年我国橡胶林种

植面积已发展到约 100 万  $\text{hm}^2$ , 因此研究橡胶林的土壤呼吸迫在眉睫, 目前许多研究得出林地土壤呼吸主要受土壤温度与湿度等主要因子的影响。本文旨在研究 4 a、12 a 和 19 a 不同树龄橡胶林土壤呼吸速率的日变化和月变化, 弄清土壤呼吸各个组分在土壤呼吸速率中的贡献, 探索土壤温度和湿度对土壤呼吸速率的影响, 以及在不同水热条件下土壤呼吸速率的变化特征, 为准确评估橡胶林的碳吸收量和吸收潜力以及确定其在碳循环中源/汇的功能具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验区位于海南省儋州市中国热带农业科学院试验场(19°32' N, 109°28' E), 平均海拔 134 m。该区属于热带海岛季风气候, 年平均气温为 23.2 ~

\* 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(XJSYWFZX2008-18, XJSYWFZX2009-30)资助

† 通讯作者: 王真辉(1972—), 男, 山西祁县人, 博士, 主要从事农业生态学研究。电话: 0898-23300595, E-mail: wzh-36@163.com

作者简介: 王春燕(1983—), 女, 广东清远市人, 硕士研究生, 主要从事农业生态学研究。电话: 0898-66556562, E-mail: wyling123@

23.9 °C, 日均气温  $\geq 15$  °C 的活动积温为 7 500 ~ 8 500 °C, 最冷月平均气温为 16.9 ~ 18.0 °C, 年降水量 1 500 ~ 2 000 mm (数据来源于中国热带农业科学院气象站)。土壤类型为砖红壤, 酸性土壤 (pH = 4.61)。该试验区为第二代胶园, 所种品系为热研 7-33-97, 采用宽行密植模式种植, 株行均距为 3 m  $\times$  7 m, 从而形成单一人工群落, 造成群落结构简单。试验橡胶林下以多年生草本植物及当年生草本植物居多, 如弓果黍 (*Cyrtococcum patens*)、巢蕨 (*Neotopteris nidus*)、叶下珠 (*Phyllanthus simplex*)、假臭草 (*Eupatorium catarium*)、地胆头 (*Elephantopus scaber*)、竹叶草 (*Oplismenus compositus*) 等, 极少见灌木、亚灌木。

## 1.2 样地设置

试验选用 4 a、12 a 和 19 a 橡胶林 (见表 1), 每种树龄设 1 个固定的样地 (100 m  $\times$  100 m)。本试验采用 Li-6400 便携式光合作用测定仪连接土壤气室, 测定土壤呼吸及其各组分呼吸速率。有研究表明, 橡胶树根系主要分布在 0 ~ 40 cm, 约占总根量的 90%<sup>[14]</sup>。根据张宪权等<sup>[15]</sup>研究方法, 2009 年 12 月, 在每个固定样地橡胶林行间插入 6 个带小孔的 PVC 管 (直径 25 cm, 高 50 cm, 壁厚 3 mm), 每排 2 个, 分成 3 排。随机在平衡于橡胶树 1.5 m 的行间

中填埋 PVC 管, 管与管之间水平间隔 1.5 m, 斜对齐排列, 排与排之间重复间隔两行橡胶树, 约 20 m。PVC 管插入土壤深度 45 cm, 用以切断植物根系, 管内部分形成 6 个圆形样方, 清除每小样方内所有活体植物, 且在每个样方内再插入 1 段小硬塑料圈 (直径 10.2 cm, 高 5 cm, 壁厚 3 mm), 插入土壤深度 3 ~ 4 cm, 形成 1 个小样方测定土壤无根呼吸; 在每个样方附近各设 2 个小塑料圈, 其中 1 个留有枯枝落叶, 测定土壤总呼吸; 另外 1 个清除凋落物, 测定根系呼吸。将小硬塑料圈插入土壤, 插入深度为 3 ~ 4 cm (详见附图 5 和图 6)。土壤呼吸各组分分别为土壤微生物呼吸速率 (Microbial respiration rate, 简称 Rm)、根系呼吸速率 (Root respiration rate, 简称 Rr) 和凋落物呼吸速率 (Litter respiration rate, 简称 Rl)。小样方外部有凋落物的小硬塑料测定的呼吸速率为土壤总呼吸速率 (Total respiration rate, 简称 Rt); 小样方内部小硬塑料圈测定的呼吸速率代表土壤微生物呼吸速率; 根系呼吸速率是样方外无凋落物的小硬塑料圈测定的呼吸速率与样方内部呼吸速率之差; 凋落物呼吸速率等于样方外有凋落物的小硬塑料圈测定的减去样方外无凋落物的小硬塑料圈测定的土壤呼吸速率。

表 1 试验胶园基本概况及土壤养分

Table 1 General information of the experimental field and soil nutrients

树龄 Age (a)	定植年份 Planting year	割龄 Tapping age (a)	品种 Rubber clone	胸径 DBH (cm)	位置 Location	经纬度 Latitude and longitude	0 ~ 15 cm 土层有机碳 Soil organic carbon (g kg <sup>-1</sup> )	0 ~ 15 cm 土层全氮 Soil total nitrogen (g kg <sup>-1</sup> )
4	2006	0	热研 7-33-97 Reyan7-33-97	13.15 $\pm$ 0.15	中国热带农业科学院试验场六队 Team 6, the Experiment Farm of the Chinese Academy of Tropical Agriculture	19°28'N、 109°29'E	7.49	0.55
12	1998	4	热研 7-33-97 Reyan7-33-97	18.79 $\pm$ 0.37	中国热带农业科学院试验场三队 Team 3 of the Experiment Farm of the Chinese Academy of Tropical Agriculture	19°31'N、 109°39'E	8.15	0.71
19	1991	11	热研 7-33-97 Reyan7-33-97	22.32 $\pm$ 0.44	中国热带农业科学院试验场三队 Team 3 of the Experiment Farm of the Chinese Academy of Tropical Agriculture	19°32'N、 109°28'E	7.58	0.76

### 1.3 土壤呼吸速率及土壤温湿度的测定

本研究于2010年3月始到2011年3月为止。选择晴朗的天气测定土壤呼吸速率,从2010年5月8日上午9:00至次日上午7:00测定土壤呼吸速率日变化,每隔2h测定1次,每个小硬塑料圈测3次重复。土壤呼吸速率月变化测定间隔约29d,于测定日上午9:00~11:00进行,同时测量距地表5cm深处土壤温度,测定完毕后立即采集距小硬塑料圈50cm处,深5cm的土样,用于测定土壤含水量。

### 1.4 数据处理

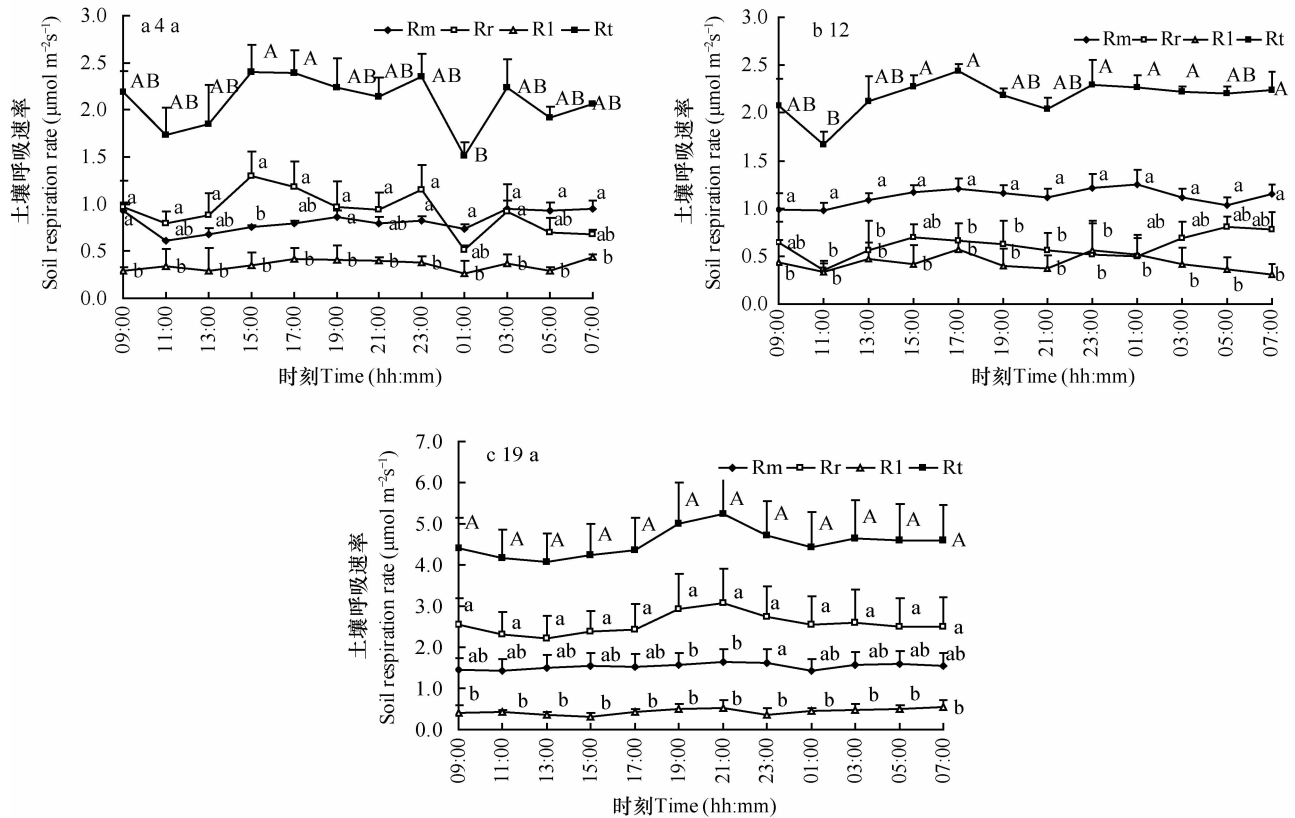
采用Excel 2003软件对数据进行整理和作图,并用DPS V6.55版软件进行统计分析。二因素方差分析和新复极差法(Duncan's)比较不同数据组间的差异。

## 2 结果

### 2.1 橡胶林土壤呼吸速率及其各组分呼吸速率的日变化

不同树龄橡胶林土壤呼吸速率日变化的波动幅度大小不同(见图1),出现最大值和最小值的时间也有较大的差异,但在9:00~11:00时刻的土壤呼吸速率均接近日均值,4a、12a和19a橡胶林土壤呼吸速率的日均值分别为2.08、2.17和4.54  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。在全天观测期间,同龄橡胶林相邻时间的土壤呼吸速率差异不显著。

土壤呼吸各组分呼吸速率在不同树龄橡胶林中的日变化值大小虽不一致,但均表现为R1最小。在同一观测时间,4a胶园土壤各组分呼吸速率的大小基本表现为Rr > Rm > R1,12a胶园土壤各组分呼



注:图中小写字母表示同一时间各组分的差异性,大写字母表示Rt在不同时刻的差异性。Rm,微生物的呼吸速率;Rr,根系的呼吸速率;R1,凋落物的呼吸速率;Rt,土壤呼吸速率。下同

Notes: In the figure, the lower-case letters indicate difference  $p < 0.05$  between components of soil respiration at the same time, and the capital letters indicate statistical difference between Rt's monitored at different times. Rm: microbial respiration rate; Rr: root respiration rate; R1: litter respiration rate; Rt: soil respiration rate. The same below

图1 橡胶林土壤呼吸及其各组分的日变化

Fig. 1 Diurnal variations of soil respiration and its components in rubber plantations different in age (mean  $\pm$  SE,  $n = 3$ )

吸速率的  $R_m$  在不同观测时间均为最大,表现为  $R_m > R_r > R_l$ , 19 a 胶园土壤各组分呼吸速率日变化明显,  $R_r$  均为最大,表现为  $R_r > R_m > R_l$ 。

### 2.2 橡胶林土壤呼吸速率的月变化

由图 2 可知, 4 a、12 a 和 19 a 橡胶林土壤呼吸速率月变化明显, 呈现较为一致的变化趋势, 最大值均出现在 8 月, 其值分别为 4.98、4.97 和 4.59  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; 最小值出现在 2 月或 3 月, 其值分别为 1.47、1.47 和 1.56  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; 其年均值随树龄的增大呈增大, 即 19 a > 12 a > 4 a, 分别为 2.96、2.63 和 2.45  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。不同树龄胶园土壤呼吸速率月变化相互间差异不显著。

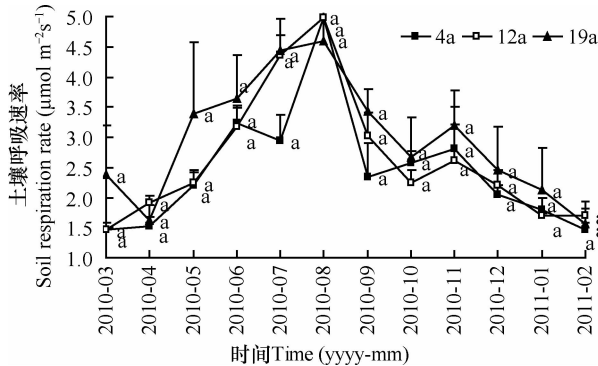


图 2 橡胶林土壤呼吸速率的月变化

Fig. 2 Monthly variation of soil respiration rate in rubber

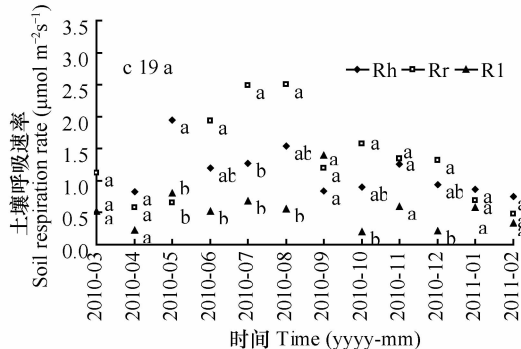
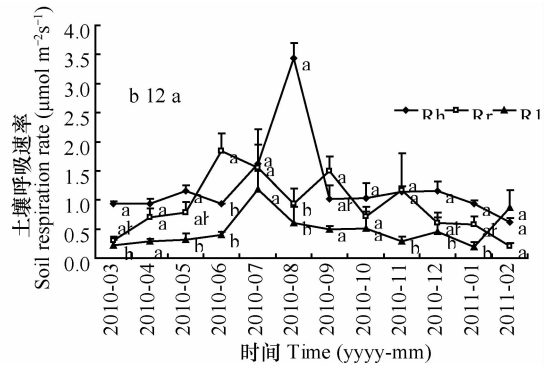
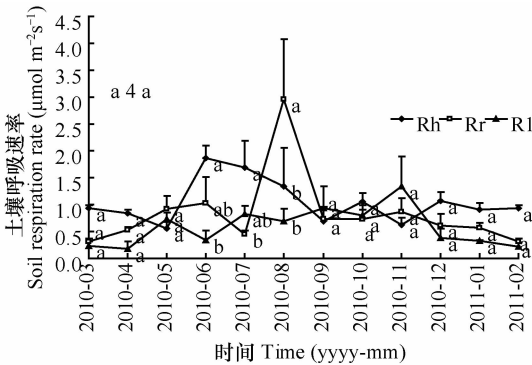
### 2.3 橡胶林土壤各组分呼吸速率的月变化

由图 3 可见, 4 a、12 a 和 19 a 橡胶林土壤各组分呼吸速率的在观测期间, 均是  $R_l$  值最小, 其值分别为 0.58、0.48 和 0.55  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; 而  $R_m$  均在 1.04 ~ 1.24  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  之间, 其大小表现为 4 a < 19 a < 12 a;  $R_r$  的范围均为 0.83 ~ 1.32  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 其大小表现为 4 a < 12 a < 19 a, 随树龄的增大而增大。

在 4 a、12 a 和 19 a 橡胶林土壤各组分的呼吸中,  $R_m$  和  $R_r$  的最大值均出现在 6 ~ 8 月, 其中  $R_m$  值依次分别为 1.87、3.43 和 1.94  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;  $R_r$  值分别为 2.96、1.84 和 2.50  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $R_l$  年变化的波动均较大。不同树龄橡胶林土壤各组分呼吸速率在 6 月和 8 月明显出现差异, 而在 9 月和 10 月则基本表现为差异不显著, 其余月份不同树龄各组分呼吸速率的差异性表现各异。

### 2.4 土壤各组分呼吸在土壤呼吸中所占的比例

由表 2 可见, 在不同树龄橡胶林中的  $R_m$  占  $R_t$  的比例均在 22.1% ~ 69.0% 之间, 均值为 43.6%;  $R_r$  占  $R_t$  的比例均在 12.3% ~ 59.4% 之间, 均值为 36.1%;  $R_l$  占  $R_t$  的比例均在 7.5% ~ 51.0% 之间, 均值为 20.4%。因此得出,  $R_m$  占  $R_t$  的比例最大,  $R_r$  占的比例次之,  $R_l$  占的比例较小。但在不同树



注: 图 3 中 a、b 和 c 分别为 4 a、12 a 和 19 a 橡胶林土壤各组分呼吸速率的月变化

Note: Fig. 3 a, b and c illustrates monthly variation of soil respiration in rubber plantations 4, 12 and 19 years old separately

图 3 橡胶林土壤各组分呼吸速率的月变化

Fig. 3 Monthly variation of soil respiration and its components (mean ± SE, n = 3)

表 2 不同树龄橡胶林土壤呼吸各组分占土壤呼吸的比例

Table 2 Proportion of each soil respiration component to total soil respiration(%)

时间 Time (yyyy-mm)	微生物呼吸速率 Rm Microbial respiration rate			根系呼吸速率 Rr Root respiration rate			凋落物呼吸速率 Rl Litter respiration rate		
	4 a	12 a	19 a	4 a	12 a	19 a	12 a	19 a	
	2010-03	63.6	63.6	31.2	21.0	21.0	47.1	15.4	15.4
2010-04	54.6	48.5	50.6	34.3	36.3	35.9	11.2	15.2	13.5
2010-05	25.4	51.4	57.2	41.5	34.8	19.4	33.1	13.9	23.4
2010-06	57.9	29.6	32.7	31.6	57.9	53.0	10.5	12.5	14.2
2010-07	57.2	37.3	28.5	15.1	35.7	56.1	27.8	27.0	15.4
2010-08	26.8	69.0	33.5	59.4	18.9	54.5	13.8	12.1	12.0
2010-09	29.1	33.8	24.3	31.2	49.8	34.9	39.7	16.4	40.8
2010-10	40.6	45.6	33.6	28.3	31.5	58.9	31.1	22.9	7.5
2010-11	22.1	43.8	39.5	30.6	45.1	42.0	47.4	11.1	18.5
2010-12	52.1	52.1	38.0	29.4	27.2	53.7	18.5	20.7	8.3
2011-01	50.8	55.0	40.3	31.4	34.1	32.4	17.8	10.9	27.3
2011-02	63.9	36.7	47.8	21.5	12.3	30.5	14.7	51.0	21.7
均值 The mean	45.3	47.2	38.1	31.3	33.7	43.2	23.4	19.1	18.7

龄、不同月份中土壤各组分呼吸速率变化趋势不同。4 a 和 12 a 橡胶林土壤中 Rm 在 Rt 中所占比例的年均值均大于 Rr 在 Rt 中所占的比例,而在 19 a 橡胶林中则反之。

### 2.5 土壤呼吸速率与土壤温湿度的相关性分析

4 a、12 a 和 19 a 橡胶林土壤温湿度与土壤呼吸速率的相关关系如图 4 所示,指数回归分析的显著

性见表 3。由图 4 和表 3 得出:3 个不同树龄橡胶林土壤呼吸速率与土壤温度呈显著的指数关系 ( $R^2 = 0.5523, p < 0.05$ ),而 5 cm 深处土壤温度能说明橡胶林土壤呼吸速率变化的 55% ~ 86%。3 个不同树龄橡胶林土壤呼吸速率与土壤湿度没有显著的指数关系 ( $R^2 = 0.2416, p > 0.05$ )。

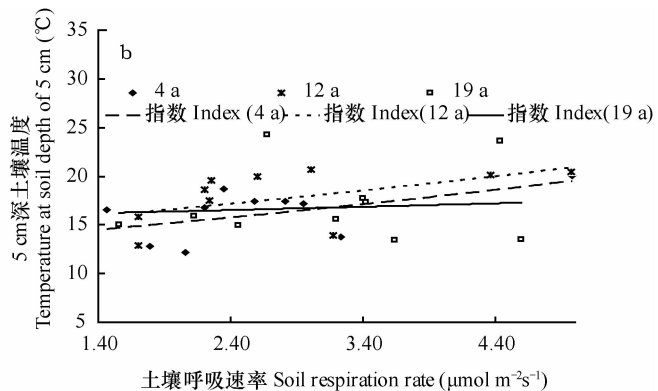
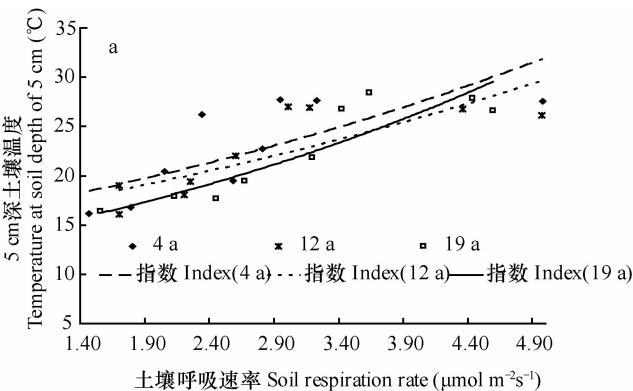


图 4 土壤呼吸速率与土壤温湿度的相关关系

Fig. 4 Relationship of soil respiration rate with soil temperature and soil moisture

表 3 土壤呼吸速率与土壤温湿度线性相关显著性检验结果

Table 3 Duncan test of the linear relationship of soil respiration with soil temperature and soil moisture in rubber plantations different in age

树龄 Age (a)	温度 Temperature			湿度 Moisture		
	回归方程 Regression equation	$R^2$	$p$	回归方程 Regression equation	$R^2$	$p$
4	$y = 14.65 e^{0.1561x}$	0.552 3	0.020 9	$y = 12.91 e^{0.0829x}$	0.241 6	0.118 5
12	$y = 14.52 e^{0.1436x}$	0.656 2	0.007 6	$y = 14.29 e^{0.0763x}$	0.240 8	0.130 5
19	$y = 10.95 e^{0.2344x}$	0.859 9	0.000 8	$y = 15.74 e^{0.0202x}$	0.008 9	0.733 9

## 3 讨论

### 3.1 橡胶林土壤呼吸速率的日变化

有研究证实<sup>[10]</sup>,在土壤含水量充足、不成为限制因子的情况下,土壤呼吸与土壤温度呈正相关。海南为热带季风气候区,雨水较多,土壤含水量较为丰富,土壤含水量不是土壤呼吸的限制因子。同时 Hashimoto 等<sup>[16]</sup>的研究表明热带地区常年高温且变化幅度小,而本试验在观测期间均为晴天,24 h 内(若没有降雨)土壤含水量和土壤温度变化不大,结果得出:土壤呼吸速率日变化差异不显著。试验橡胶林样地的空气湿度、土壤含水量及土壤有机质在一天内变化很小,且不受到林下植被的影响,土壤呼吸速率日变化特征也许受到土壤温度的影响,因为土壤温度的高低将会影响到土壤微生物分解能力的大小。我们测定不同树龄橡胶林的土壤呼吸速率日变化存在差异,且最大值和最小值出现的时刻有很大不同,但不同树龄橡胶林在 9:00 ~ 11:00 时刻的土壤呼吸速率值均接近日均值,这与黄辉等<sup>[17]</sup>研究杉木林与楠木林土壤呼吸昼夜变化的结果相一致。

### 3.2 橡胶林土壤呼吸速率的月变化

不同树龄橡胶林土壤呼吸速率在各月动态变化趋势基本一致,但变化幅度大小和动态变化皆因不同树龄而有所差异。在 7 月份和 8 月份,各橡胶林土壤呼吸速率均明显高于其他月份,这可能是受到季节性气候的影响,从而造成各生物因子的活性发生变化。7 月和 8 月为海南气温最高月,因较强光照,从而土壤温度受到影响,温度升高促使土壤微生物活性增强;且此时植物光合作用加强,从而影响到根系呼吸,这与其他学者的研究结果相一致<sup>[18-20]</sup>。有研究还表明:土壤温度和植物生长时期有密切关系,土壤温度的变化造成植物的土壤微生物呼吸,根系呼吸以及凋落物呼吸所占比重不同。

例如,微生物呼吸在秋季所占比例较高,而根系呼吸在春季和夏季所占比例较高,枯枝落叶呼吸则在春季占比例较高<sup>[15]</sup>。本研究得出,4 a、12 a、19 a 胶园土壤呼吸速率年均值分别为 2.45、2.63 和 2.96  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,略高于房秋兰和沙丽清<sup>[21]</sup>及卢华正等<sup>[22]</sup>研究云南橡胶林的土壤呼吸速率(分别为 2.02 和 2.06  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),但低于叶功富等<sup>[23]</sup>研究关于 6、17、19 和 31 年生木麻黄人工林的土壤呼吸速率(分别为 2.62、3.72、4.02 和 3.10  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )。

### 3.3 土壤各组分呼吸速率在土壤呼吸中所占的比例

学者对土壤各组分呼吸在土壤呼吸中所占比例大小持有不同的看法。有研究发现,在土壤各组分所占土壤呼吸的比例中,根系呼吸占的比例大于土壤微生物呼吸占的比例。如 Hogberg 等<sup>[24]</sup>研究樟子松林土壤呼吸时,发现 54% 呼吸来自根系呼吸。但许多研究又认为<sup>[25-27]</sup>,土壤微生物呼吸占土壤呼吸的大部分(约 70%),而根系呼吸占土壤呼吸的小部分(约 23%)。如 Bowden<sup>[28]</sup>指出栎林根系呼吸占 33%,张宪权等<sup>[15]</sup>认为土壤微生物呼吸占整个土壤呼吸的比例最高,平均均在 60% 以上,其次是根系呼吸,平均为 20% ~ 30%。然而在本研究中,土壤微生物呼吸占土壤呼吸的比例均值为 43.6%,土壤根系呼吸占土壤呼吸的比例均值为 36.1%,凋落物呼吸占土壤呼吸的比例均值为 20.4%,且不同树龄橡胶林土壤各组分基本表现为微生物呼吸 > 根系呼吸 > 凋落物呼吸,此结果与其他研究相一致<sup>[26-27,29]</sup>。本研究还得出土壤微生物呼吸呈现随树龄增长而不断增加的趋势,这可能是由于随着树龄的增加,进入土壤的凋落物量相应增加,从而使土壤有机碳含量相对增高,进而使得土壤微生物可利用的营养物质增多,土壤微生物的活性增大,土壤微生物呼吸速率也增加。这与易志刚等<sup>[30]</sup>研究的结果一致,如土壤微生物对土壤呼吸有

较大的影响,土壤微生物活性大的土壤中,其土壤呼吸速率相对较高。

### 3.4 土壤呼吸与土壤温湿度的相关性分析

环境因子影响人工林土壤呼吸的研究结果<sup>[31-35]</sup>表明,在土壤水分含量适中的环境下,土壤温度是影响土壤呼吸最重要的因子,且当土壤水分在过高或过低的条件下也会影响土壤呼吸。在本研究中,不同树龄橡胶林土壤呼吸速率与土壤温度之间具有显著的指数函数关系,与土壤湿度的相关性不显著,这与张剑锋等<sup>[33]</sup>、王国兵<sup>[36]</sup>的研究结果基本一致。由于土壤湿度对土壤呼吸的影响比较复杂,以前的研究认为在一定土壤湿度范围内,土壤呼吸速率随湿度的增加而增加<sup>[37]</sup>,土壤湿度太高或太低对土壤呼吸均有抑制作用。本研究结果发现,橡胶林土壤呼吸与土壤湿度没有显著的相关关系,可以得出在本地区土壤水分不是土壤呼吸的直接影响因素。纵观亚热带地区对森林土壤呼吸的研究<sup>[38-40]</sup>,结果均是土壤温度为土壤呼吸直接影响因素,只是在不同地区,两者间相关系数会存在差异。

人工林土壤碳通量是一个无时无刻不在变化的动态过程,某个时段的观测结果只能代表某个时间节点的基本现状,不能完全代表整个动态过程。因此,只有不间断、多点、多方式的观测结果相结合才能较好地反映土壤碳的变化动态,才能更好地为增加土壤碳贮存能力而提出合理的土壤耕作办法。这将是一个长期的、艰苦的、细致的过程。此外,土壤碳动态观测应该与地上植物的观测相结合,进行全方位的碳固定与碳释放研究,这样才能系统地揭示整个林地碳的动态,有助于探讨在人工林经营中多固碳、少排放 CO<sub>2</sub> 等温室气体的管理活动和策略。

## 4 结 论

本研究对 4 a、12 a 和 19 a 不同树龄橡胶林的土壤呼吸速率的日变化和月变化进行动态研究,探索土壤温度和湿度对土壤呼吸速率的影响,发现不同树龄橡胶林土壤呼吸出现最大值和最小值的时间有较大的差异,但在 9:00 ~ 11:00 时刻的测定值均接近日均值,同龄橡胶林相邻时刻的土壤呼吸速率差异不显著,在全年观测时间的动态变化明显,变化趋势基本一致,年均值呈随树龄增大而增大。土壤各组分的呼吸占土壤呼吸的比例基本均呈现

微生物呼吸 > 根系呼吸 > 凋落物呼吸,且微生物呼吸呈随树龄增大而增大。土壤呼吸速率与土壤温度之间具有显著的指数函数关系,但与土壤湿度的相关性不显著,海南地区土壤温度是影响土壤呼吸速率变化的直接影响因子,土壤湿度可能不是土壤呼吸速率的直接影响因素。

## 参 考 文 献

- [1] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 23—36
- [2] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263: 185—190
- [3] 张雪黎, 罗来涛. 稀土催化材料在工业废气、人居环境净化中的研究与应用综述. *气象与减灾研究*, 2006, 29(4): 47—52. Zhang X L, Luo L T. Research and application of the rare earths catalytic materials in purification of industrial exhaust gas and living surroundings (In Chinese). *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2006, 29(4): 47—52
- [4] Zak D R, Pregitzer R S, Curtis P S, et al. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and feedback between carbon and nitrogen cycles. *Plant and Soil*, 1993, 151: 105—117
- [5] Sohlenius B, Sandor A. Ploughing of a perennial grassland effect on the nematode fauna. *Pedobiology*, 1989, 33(4): 199—210
- [6] 陈四清, 崔骁勇, 周广胜, 等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解 CO<sub>2</sub> 排放速率研究. *植物学报*, 1999, 41(6): 646—650. Chen S Q, Cui X Y, Zhou G S, et al. Study on the CO<sub>2</sub> release rate of soil respiration and litter decomposition in *Stipa grandis* steppe in Xilin River Basin, Inner Mongolia (In Chinese). *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(6): 646—650
- [7] 王妮, 郭继勋. 东北松嫩平原羊草群落的土壤呼吸与枯枝落叶分解释放 CO<sub>2</sub> 贡献量. *生态学报*, 2002, 22(5): 655—660. Wang W, Guo J X. Contribution of CO<sub>2</sub> emission from soil respiration and from litter decomposition in *Lymus chinensis* community in Northeast Songnen grassland (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 655—660
- [8] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 退化草地暗沃寒冻锥形土 CO<sub>2</sub> 释放的日变化和季节变化动态. *土壤学报*, 2001, 38(1): 31—40. Zhang J X, Cao G M, Zhou D W, et al. Diel and seasonal changes of carbon dioxide emission from mollic-cryic cambisols on degraded grassland (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 31—40
- [9] 刘绍辉, 方精云, 清田信. 北京山地温带森林土壤呼吸研究. *植物生态学报*, 1998, 22(2): 119—126. Liu Shaohui, Fang J Y, Qing T X. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2): 119—126
- [10] 王森, 姬立柱, 李秋荣, 等. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸研究. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1234—1238. Wang M, Ji L Z, Li Q R, et al. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different forest

- types in Changbai Mountain (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(8): 1234—1238
- [11] 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 等. 东北地区落叶松人工林的根呼吸. 植物生理学通讯, 2004, 40(1): 27—30. Jiang L F, Shi F C, Wang H T, et al. Root respiration in *Larix gmelinii* plantations in Northeast China (In Chinese). Plant Physiology Communications, 2004, 40(1): 27—30
- [12] 刘建军, 王德祥, 雷瑞德, 等. 秦岭天然油松、锐齿栎林地土壤呼吸与 CO<sub>2</sub> 释放. 林业科学, 2003, 39(2): 8—13. Liu J J, Wang D X, Lei R D, et al. Soil respiration and release of carbon dioxide from natural forest of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* in qinling mountains (In Chinese). Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(2): 8—13
- [13] 骆士寿, 陈步峰, 李意德, 等. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物土壤呼吸研究. 生态学报, 2001, 21(12): 2013—2017. Luo S S, Chen B F, Li Y D, et al. Litter and soil respiration in a tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan Island (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(12): 2013—2017
- [14] 中国热带农业科学院, 华南热带农业大学. 中国热带作物栽培学. 北京: 中国农业出版社, 1998. Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, South China University of Tropical Agriculture. Chinese tropical crops cultivation (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1998
- [15] 张宪权, 王文杰, 祖元刚, 等. 东北地区几种不同林分土壤呼吸组分的差异性. 东北林业大学学报, 2005, 33(2): 46—47, 73. Zhang X Q, Wang W J, Zu Y G, et al. The difference between different components of soil respiration in several types of forests in Northeastern China (In Chinese). Journal of Northeast Forestry University, 2005, 33(2): 46—47, 73
- [16] Hashimoto S, Tanaka N, Suzuki M, et al. Soil respiration and soil CO<sub>2</sub> concentration in a tropical forest, Thailand. Forest Research, 2004, 9: 75—79
- [17] 黄辉, 杨玉盛, 高人, 等. 杉木林与楠木林土壤呼吸昼夜变化及与土温变化的关系. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2009, 25(2): 113—118. Huang H, Yang Y S, Gao R, et al. Relationships between diurnal patterns of soil respiration and soil temperature of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook and *Phoebe bournei* in Subtropical China (In Chinese). Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition, 2009, 25(2): 113—118
- [18] Xu M, Ye Q. Soil surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variation in a young ponderosa pine plantation in northern California. Global Change Biology, 2001, 7: 667—677
- [19] Widen B. Seasonal variation in forest floor CO<sub>2</sub> exchange in a Swedish coniferous forest. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(4): 283—297
- [20] 褚金翔, 张小全. 川西亚高山林区三种土地利用方式下土壤呼吸动态及组分区分. 生态学报, 2006, 26(6): 1693—1700. Chu J X, Zhang X Q. Dynamic and fractionalization of soil respiration under three different land use/covers in the subalpine region of western Sichuan Province, China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1693—1700
- [21] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸. 植物生态学报, 2006, 30(1): 97—103. Fang Q L, Sha L Q. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan, sw China (In Chinese). Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 97—103
- [22] 卢华正, 沙丽清, 王君, 等. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸的季节变化. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2315—2322. Lu H Z, Sha L Q, Wang J, et al. Seasonal variation of soil respiration and its components in tropical rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(10): 2315—2322
- [23] 叶功富, 肖胜生, 郭瑞红, 等. 不同林龄木麻黄人工林土壤呼吸的季节动态. 海峡科学, 2008, 10(22): 37—38, 56. Ye G F, Xiao S S, Guo R H, et al. Different forest age *Casuarina* plantation seasonal dynamics of soil respiration (In Chinese). Straits Science, 2008, 10(22): 37—38, 56
- [24] Hogberg P, Nordgren A, Buchmann N, et al. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. Nature, 2001, 411: 789—792
- [25] Kelting D L, Burger J A, Edwards G S. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30: 961—968
- [26] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 1625—1635
- [27] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, et al. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. Global Change Biology, 2002, 8: 851—866
- [28] Bowden R D. Contributions of above-ground litter, below-ground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hard wood forest Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23: 1402—1407
- [29] Tate K R, Ross D J, Obrien B J, et al. Carbon storage and turnover, and respiration activity in the litter and soil of an old-growth southern beech forest Soil. Biology and Biochemistry, 1993, 25: 1601—1612
- [30] 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 等. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究. 生态学报, 2003, 23(5): 1673—1678. Yi Z G, Yi W M, Zhou G Y, et al. Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(5): 1673—1678
- [31] 杨玉盛, 陈光水, 董彬, 等. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应. 生态学报, 2004, 24(5): 953—958. Yang Y S, Chen G S, Dong B, et al. Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 953—958
- [32] 刘颖, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 土壤温度和湿度对长白松林土壤呼吸速率的影响. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1581—1585. Liu Y, Han S J, Hu Y L, et al. Effects of soil temperature and humidity on soil respiration rate under *Pinus sylvestrifor-*



- mis forest (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(9): 1581—1585
- [33] 张剑锋, 闫文德, 田大伦, 等. 杉木人工林土壤呼吸日变化及其影响因素分析. 中南林业科技大学学报, 2007, 27(2): 13—16. Zhang J F, Yan W D, Tian D L, et al. Soil respiration and its influential factors in China fir plantation on different ground utilizations (In Chinese). Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2007, 27(2): 13—16
- [34] 施政, 汪家社, 何容, 等. 武夷山不同海拔植被土壤呼吸季节变化及对温度的敏感性. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2357—2363. Shi Z, Wang J S, He R, et al. Seasonal variation and temperature sensitivity of soil respiration under different plant communities along an elevation gradient in Wuyi Mountains of China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(11): 2357—2363
- [35] 周正朝, 上官周平. 黄土高原人工刺槐林土壤呼吸及其与土壤因子的关系. 生态环境学报, 2009, 18(1): 280—285. Zhou Z C, Shangguan Z P. Soil respiration of plantation *Robinia pseudoacacia* L forest and its relationship with soil factors in the Loess Plateau (In Chinese). Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(1): 280—285
- [36] 王国兵. 北亚热带次生栋林与火炬松人工林土壤碳动态研究. 南京: 南京林业大学森林资源与环境学院, 2008. Wang G B. study on the dynamics of soil carbon in a secondary oak forest and a pine plantation in north sub-tropical area, south-eastern China (In Chinese). × Nanjing: College of Forest Resources and Environment, × Nanjing Forestry University, 2008
- [37] Liu X Z, Wan S Q, Su B, et al. Response of soil efflux to water manipulation in a tall grass prairie ecosystem. Plant and Soil, 2002, 240: 213—223
- [38] 易志刚, 蚁伟民, 周丽霞. 土壤各组分呼吸区分方法研究进展. 生态学杂志, 2003, 22(2): 65—69. Yi Z G, Yi W M, Zhou L X. Advances in the research on the methods for separating the components of soil respiration (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(2): 65—69
- [39] 杨清培, 李鸣光, 王伯荪. 南亚热带森林群落演替过程中林下土壤呼吸特征. 广西植物, 2004, 24(5): 443—449. Yang Q P, Li M G, Wang B S. Study on soil respiration of the lower subtropical successive forest communities (In Chinese). Guihaia, 2004, 24(5): 443—449
- [40] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响. 生态学报, 2005, 25(7): 1684—1690. Yang Y S, Chen G S, Wang X G, et al. Response of soil CO<sub>2</sub> efflux to forest conversion in subtropical zone of China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1684—1690

## SOIL RESPIRATION RATE AND ITS RELATIONSHIP WITH SOIL TEMPERATURE AND MOISTURE IN RUBBER PLANTATIONS

Wang Chunyan<sup>1,2</sup> Chen Qiubo<sup>1</sup> Yuan Kun<sup>1</sup> Li Guangming<sup>1,3</sup> Yang Lifu<sup>1</sup> Wang Zhenhui<sup>1†</sup>

(1 Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Danzhou Investigation & Experiment Station of Tropical Crops, China; Ministry of Agriculture, Danzhou, Hainan 571737, China)

(2 Hainan Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Haikou 570206, China)

(3 Weishan County Environmental Protection Bureau, Jining, Shandong 277600, China)

**Abstract** To determine impacts of soil temperature and soil moisture regimes on soil respiration, daily and annual variation patterns of total soil respiration rate and its components, i. e. soil microbial respiration rate, soil root system respiration rate, and litter respiration rate in rubber plantations, 4 a, 12 a and 19 a old separately, were investigated with a Li-6400 portable photosynthesis system. Results show that during a day of observation, the appearance of peak and valley of soil respiration rate varied sharply from plantation to plantation different in age. However, the values obtained between 9:00 and 11:00 were all quite close to the daily mean values of soil respiration. Although daily variations of the components differed in extent with age of the plantation, the component of litter respiration rate was the lowest in any case. Obvious monthly variations of soil respiration were found in rubber plantations, 4 a, 12 a and 19 a old, with the mean rate being 2.45, 2.63 and 2.96  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectively, and the maximum value recorded in July or August and the minimum in February or March. No significant difference was observed in monthly variation of soil respiration between rubber plantations different in age. Soil microbial respiration accounted for 43.6% of the total soil respiration, being the highest, and was followed by root system respiration (36.1%) and litter respiration (20.4%). A remarkable exponential relationship was found between soil respiration rate and soil temperature, but not so as such was between soil respiration rate and soil moisture. It is, therefore, concluded that soil respiration is closely related to soil temperature, but may not be directly related to soil moisture in rubber plantations in Hainan.

**Key words** Rubber plantation; Soil respiration rate; Soil temperature; Soil moisture

附图:



图5 土壤无根呼吸速率  
Fig.5 Root-free soil respiration rate



图6 土壤总呼吸速率  
Fig.6 Total soil respiration rate

(责任编辑:汪枳生)