

西双版纳橡胶林土壤呼吸季节变化及其影响因子

周文君^{1,2}, 沙丽清^{1*}, 沈守良^{1,2}, 郑征¹

(1 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223 2 中国科学院研究生院 北京, 100039)

摘要: 橡胶 (*Hevea brasiliensis*) 林是热带地区重要的经济林, 其土壤碳排放除受温度、湿度等非生物因子影响外, 还受到橡胶林独特物候特征的影响。为探讨橡胶林土壤呼吸季节变化与生物、非生物因子的关系, 本实验再西双版纳橡胶林内设去除凋落物 (NL) 和对照 (CK) 两种处理, 自 2005-08 到 2006-08 用 IRGA 法测定土壤呼吸速率 (SR), 同时测定温、湿度因子; 记录橡胶林的物候节律; 每月中旬测定叶面积指数; 进行为期一年的细根生长和分解试验。结果表明: 1) 两种处理 SR 有明显的季节变化, 且趋势相同, 即雨季 (CK: $14.10 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$; NL: $13.00 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$) > 干热季 (CK: $9.91 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$; NL: $9.70 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$) > 雾凉季 (CK: $10.87 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$; NL: $10.33 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$); 2) 通过温度、湿度与 SR 的相关分析和回归方程模拟, 表明两处理各季节 SR 与温度因子、湿度因子相关关系不同; 影响 SR 的主导因子在雨季为湿度因子, 雾凉季是温度因子, 干热季 SR 受到温、湿度因子的双重制约。3) 在雨季, 凋落物对土壤呼吸影响显著 ($p = 0.036$), 在干热季和雾凉季影响不显著 ($p = 0.701$, $p = 0.308$); 4) 细根生长试验和 LAI 的测定结果表明两处理的土壤呼吸速率季节变化与橡胶树生长节律基本一致, 生长旺盛期 (雨季, 5~10 月) > 生长减缓期 (雾凉季, 11~12 月) > 生长恢复期 (干热季, 3~4 月) > 相对休眠期 (雾凉季, 1~2 月); 5) 通过主成分分析, 土壤呼吸源的季节变化是影响橡胶林土壤呼吸的第一主成分, 方差贡献率为 65.98%, 第二主成分是地上部分光合产物的输入, 方差贡献率为 34.02%。两成分可完全解释土壤呼吸的季节变化。故橡胶林的 SR 季节变化是温度因子、湿度因子及橡胶树生长季相变化协同作用的结果。

关键词: 橡胶林, 土壤呼吸, 生长节律, 温度, 土壤含水量

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

森林土壤呼吸占整个森林生态系统呼吸量的 2/3 强^[1~3], 森林土壤碳贮存和释放的微量变化将导致大气 CO_2 浓度显著变化, 进而对全球气候变化产生显著影响^[4]。人工林是森林的重要组成部分, 对其土壤呼吸的研究和对天然林土壤呼吸研究具有同等重要的科学价值和社会价值。橡胶 (*Hevea brasiliensis*) 林作为重要的热带经济林, 不仅有其独特的经济价值, 也有其重要的生态学意义, 其土壤碳贮存能力与橡胶林地上部分的碳贮存能力相当^[5]。目前对橡胶林土壤呼吸的研究主要集中在年际尺度的

土壤水分、温度的影响^[6~9], 而对各季节温度、湿度和胶树生长节律对胶林土壤呼吸季节变化综合影响的探讨较少。

本研究在中国西南部云南省西双版纳地区进行, 该地区橡胶林面积为 $13.62 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[10], 到 2003 年橡胶林面积已占林地面积的 11.3%^[11], 是当地的主要经济林。研究区位于印度马来热带雨林区的北缘, 终年受西南季风 (印度季风) 控制, 干、湿季分明^[12]。橡胶林为热带阔叶落叶林, 具显著的季相特征。针对当地的气候特征和橡胶林独特的物候特征

收稿日期 (Received date): 2007-11-13; 改回日期 (Accepted): 2008-03-05。

基金项目 (Foundation item): 云南省自然科学基金 (2004C0052M) 和中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01) 资助。[Supported by the Natural Science Foundation of Yunnan Province (2004C0052M) and the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (Grant No KZCX1-SW-01)]

作者简介 (Biography): 周文君 (1977-), 女, 河北人, 在读硕士研究生, 研究方向为环境生态学。E-mail: zhouwenjun@xtbg.ac.cn [Zhou Wenjun (1977-), female, presently a candidate for M. Sc Degree major in environment ecology.]

* 通讯作者 Corresponding author: E-mail: shaliqing@xtbg.ac.cn Tel: 0871-5112637 Fax: 0871-5160916

对橡胶林土壤呼吸与生物和非生物因子的关系进行研究,明确各季节内橡胶林土壤呼吸与各因子的关系;并利用主成分分析法提取综合因子,解释土壤呼吸的季节变化。从而深入探讨由热带雨林开发而成的橡胶林土壤呼吸季节变化及其与生物、非生物因子的关系,为评价橡胶林对区域碳平衡的影响提供依据。

1 实验样地概况

西双版纳地处云南南部,常年受西南季风控制,属热带季风气候,全年分为雾凉季(11月至次年2月)、干热季(3~5月)、雨季(6~10月)三个季节。年平均气温 21.5℃,≥10℃积温 7 860℃,平均最低气温 7.5℃,年日照时数 1 828 h,年降水量 1 557 mm,年相对湿度 86%,干燥度 1.01,年径流量 764 mm。本实验样地设于中国科学院西双版纳热带雨林生态系统定位研究站的人工群落试验区内(21°55′25″N, 101°16′3″E),海拔 580 m,缓坡,样地位于坡上部,排水良好,无灌溉,土壤为河漫滩沉积物发育而来的砖红壤,土层深厚,轻度片蚀。该林是以25年生橡胶林为主的单优人工群落,采用宽窄行密株的种植方式,株距 3.1 m,宽行距 19 m,窄行距 2.5 m,木层数目密度 370株·hm⁻²。

2 研究方法

2.1 实验设置

试验设去凋(no litter NL)和对照(control CK)两种处理,在样地内设 60 m×30 m 大样方,样方内随机设置 10 个小样方,小样方面积为 1 m×1 m,每小样方设置 NL (0.5 m×1 m) 和 CK (0.5 m×1 m) 两种处理,NL处理用纱网承接地上凋落物。为避免地表低矮植被对土壤呼吸的影响,在每次测定土壤呼吸前 24 小时,贴地剪除地表低矮植物。土壤呼吸速率(soil respiration, SR)每月上旬和下甸各测定一次,同时测定土壤 5 cm 温度(soil temperature at 5 cm depth T₅)、气室温度(cell temperature T_{cell})、土壤容积含水量(soil water volumetric content SWC);月中测定橡胶林叶面积指数(leaf area index, LAI);并进行为期一年的细根生长和分解的动态试验。

2.2 实验方法

2.2.1 土壤理化性状的测定

在整个试验开始前于橡胶林大样方内随机选取 10 点,尽量避开橡胶大根,用环刀取 0~10 cm 土样,带回实验室,风干,磨碎,过 60 目筛,进行土壤基本理化性质的分析(见表 1)。

表 1 橡胶林土壤基本性状

Table 1 Physical and chemical properties of soil under rubber plantation in Xishuangbanna						
项目	item	pH	O·M (g/kg)	T·N (g/kg)	T·P (g/kg)	T·K (g/kg)
值	value	5.43	35.74	1.96	0.380	14.10

2.2.2 土壤呼吸速率(SR)测定

土壤呼吸用 LI-820 CO₂ 气体分析仪(Licor USA)在野外直接原位测定分析(IRGA)。气室由不透明 PVC 管制成,气室内径 150 mm,高 150 mm,顶部用不透明隔热板封闭,底部开口;顶部有进气管和出气管与红外 CO₂ 分析仪相连接,形成闭合稳定动态循环气路。每月测两次,分别选在每月的 5~8 日和 22~24 日无雨日测定,测定时间为每天的上午 09:00~11:00 先后测定每个小样方 NL 和 CK 的呼吸排放量,连续测 3 分钟,每隔 10 秒采集一个数据。

计算该时间间隔内 CO₂ 平均增量代表该时刻单位面积的 CO₂ 排放通量,计算公式为

$$F = \frac{M}{V_0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{V} H \frac{dc}{dt}$$

式中 F 为 CO₂ 排放通量 (mg CO₂ · m⁻² · min⁻¹), M 为 CO₂ 摩尔质量 (g · mol⁻¹), V₀ 为 CO₂ 在标准状态下的摩尔体积 (22.41 L · mol⁻¹), H 为采样箱内气室高度 (m), P 和 T 为采样时气室内实际气压 (hPa) 和气温 (℃), P₀ = 1 013.25 hPa, T₀ = 273.15 K 为理想气体标准状态下的空气压力和气温, V 为气室体积 (m³), A 为气室底面积 (m²), dc/dt 观测时间内 CO₂ 浓度随时间变化的直线回归斜率。

2.2.3 温度

在测定土壤呼吸速率时分别用长杆电子温度计测定每个小样方的土壤 5 cm 温度(T₅)和气室温度(T_{cell})。

2.2.4 全年大气温度(Air temperature)与降水量

(Precipitation)

采用中国科学院西双版纳热带植物园热带雨林生态系统定位研究站观测数据, 该站距实验样林 1 km, 能真实反映样林大气温度和降水的变化情况。

2.2.5 土壤容积含水量 (soil water volumetric content SWC)

在测定土壤呼吸时用便携式测墒仪 (MPkit) 测定土壤 (0~6 cm) 容积含水量, 在每个小样方周围测 6 个点, 6 点平均值作为该小样方的土壤容积含水量。

2.2.6 叶面积指数 (leaf area index LAI)

在 SR 测定样林选 25 m × 30 m 的样方, 利用林冠分析仪 (LAI-2000, LI-COR, Licor, USA) 进行测定, 在观测样方内用“之”字法选 10 个观测点并加以标记, 用于测定 B 值, 在附近找一处空旷地标记 5 个点用于测定 A 值, 以样地为单位记录最终的叶面积指数值, 每月中旬测定一次。观测时间尽量选在阴天或晴天的早晨、黄昏, 如是光线较强时候测量, 则选择适当角度的镜盖 (90°、180°、270° 等) 以阻挡光线对分析仪探头的直射^[13]。

2.2.7 橡胶细根分解率 (Decomposition rate of fine root of rubber tree) 和橡胶细根长入量 (Fine root growth biomass of rubber tree)

橡胶细根长入量: 在橡胶林样地内设 3 个 10 m × 10 m 的样方, 样方内平行拉 6 根样线, 于每样线上均匀的选取 6 个点, 用内径 10 cm 的土钻在每样地内钻取 36 个土芯, 深度为 10 cm, 用大小和钻孔相同的尼龙网袋 (孔径为 2 mm) 装入无根土和细沙混合, 埋入地下, 每隔 2 个月取样 1 次, 每根样线上按照顺序各取一袋, 3 块样地每次共取样 18 袋, 捞出长入生长袋内的橡胶新根, 烘干称质量^[14]。

橡胶细根分解率试验: 采集直径 ≤ 2 mm 的橡胶树细根, 冲洗, 烘干后剪成 5 cm 的小段, 装入 15 cm × 20 cm 孔径为 0.5 mm 的尼龙网袋内, 每袋装入 5.00 g 共 180 袋, 然后用塑料牌分别标号, 放入样地内。在 10 m × 10 m 样地的每根样线上选 6 个点, 每个点放 1 袋。因细根集中在土壤表层 20 cm 之内, 分解袋放在离地表 10 cm 的土层中, 以后每 2 个月取样 1 次, 每个样线上按顺序各取 1 袋, 每次共 18 袋, 用于失质量分析^[14]。

2.3 数据分析方法

在 SPSS 13.0 统计包中对分别对土壤呼吸和土壤 5 cm 温度, 土壤呼吸和 SWC 进行曲线估计 (curve

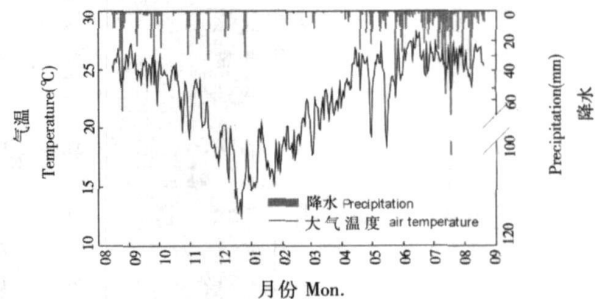
estimate) 和相关分析 (Pearson correlation (two-tailed)); 进行凋落物对土壤呼吸影响的双尾 T 检验 (Two-tailed T test); 对影响土壤呼吸的因子进行主成分分析 (principal component analysis PCA) 提取主成分。

文中用图均在 Sigmaplot 中绘制。

3 结果

3.1 土壤呼吸速率的季节变化规律

一年的观测结果表明 SR 呈双峰、双底的季节变化趋势 (图 1), 其峰值分别在 2005 年 10 月下旬 (CK: 20.11 mg CO₂ · m⁻² · m in⁻¹, NL: 19.75 mg CO₂ · m⁻² · m in⁻¹) 和次年 5 月上旬 (NL: 16.37 mg CO₂ · m⁻² · m in⁻¹, CK: 18.80 mg CO₂ · m⁻² · m in⁻¹),

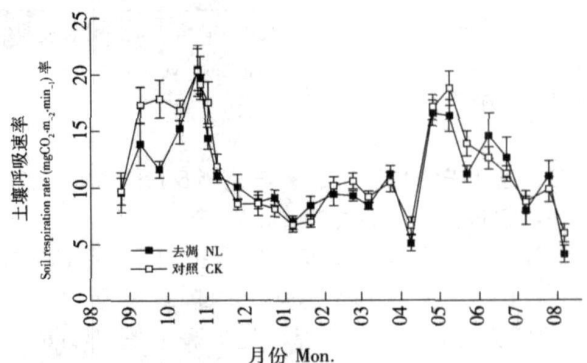


注: 数据来自中国科学院西双版纳热带植物园
热带雨林生态系统定位研究站

Note: Data are from Xishuangbanna Tropical
Rainforest Ecosystem Station

图 1 西双版纳生态站全年气温与降水

Fig. 1 Air temperature, precipitation from Xishuangbanna Tropical Rainforest Ecosystem Station



注: SR 数据为平均值 ± 标准差 (n = 10)

Note: Data are mean ± SD (n = 10)

图 2 西双版纳橡胶林全年气温、降水与土壤呼吸

Fig. 2 Seasonal changes in soil respiration under rubber plantation in Xishuangbanna

低谷出现在次年 4 月上旬 (NL: $5.09 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m in}^{-1}$, CK: $6.65 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m in}^{-1}$) 和次年 8 月上旬 (NL: $4.23 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m in}^{-1}$, CK: $6.01 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m in}^{-1}$)。一年中 SR 总体趋势为雨季 2005-08~10 逐渐上升, 进入雾凉季的 11 月到次年 1 月逐渐下降, 下降趋势在 11 月最强, 12 月到 1 月的下降趋势缓慢, 雾凉季后期到干热季缓慢上升 (1~3 月), 在 4 月上旬出现低点, 随后 SR 迅速上

升, 5 月达到峰顶, 并在 5~8 月呈下降趋势。各季节 SR 平均排放速率为 CK: 雨季 ($14.10 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m in}^{-1}$) > 干热季 ($10.87 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m in}^{-1}$) > 雾凉季 ($9.91 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m in}^{-1}$); NL: 雨季 ($13.00 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m in}^{-1}$) > 干热季 ($10.33 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m in}^{-1}$) > 雾凉季 ($9.70 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m in}^{-1}$)。

表 2 土壤 5 cm 温度、容积含水量与土壤呼吸速率的回归方程

Table 2 Regression equations of T5, SWC with SR

自变量 Variable	季节 Season	处理 Treatment	回归方程 Regression equation	R^2	p
土壤 5 cm 温度 $T5$	雾凉季	NL	$F = 3.95e^{0.0575}$	0.208	< 0.01
	Fog-cool season	CK	$F = 2.64e^{0.0775}$	0.275	< 0.01
	雨季	NL	$F = 368.37e^{-0.1575}$	0.114	< 0.01
	Rainy season	CK	$F = 668.48e^{-0.1775}$	0.210	< 0.01
	干热季	NL	$F = 8.42e^{0.00575}$	0.000	0.94
	Dry season	CK	$F = 2.62e^{0.0675}$	0.040	0.25
土壤容积含水量 SWC	雾凉季	NL	$F = 18.93 - 0.746SWC + 0.014SWC^2$	0.062	0.08
	Fog-cool season	CK	$F = 2.38 + 0.365SWC - 0.004SWC^2$	0.030	0.30
	雨季	NL	$F = 24.71 - 0.099SWC - 0.006SWC^2$	0.360	< 0.01
	Rainy season	CK	$F = 11.83 + 0.749SWC - 0.018SWC^2$	0.412	< 0.01
	干热季	NL	$F = 46.62 - 2.79SWC + 0.051SWC^2$	0.172	0.05
	Dry season	CK	$F = 25.46 - 0.982SWC + 0.015SWC^2$	0.085	0.23
土壤容积含水量和 土壤 5 cm 温度 $SWC \& T5$	雾凉季	NL	$F = 5.79e^{0.07675}SWC^{-0.269}$	0.212	< 0.01
	Fog-cool season	CK	$F = 5.51e^{0.05075}SWC^{-0.114}$	0.289	< 0.01
	雨季	NL	$F = 396.23e^{0.15875}SWC^{-2.034}$	0.338	< 0.01
	Rainy season	CK	$F = 698.55e^{0.01675}SWC^{-1.222}$	0.324	< 0.01
	干热季	NL	$F = 72.17e^{-0.00375}SWC^{-0.638}$	0.063	0.36
	Dry season	CK	$F = 10.29e^{0.05975}SWC^{-0.405}$	0.075	0.30

注: F 为土壤呼吸速率 ($\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m in}^{-1}$), T5 为土壤 5 cm 温度 ($^{\circ}\text{C}$), SWC 是土壤容积含水量 (%)。

Note F is the soil respiration rate ($\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m in}^{-1}$), T5 is the soil temperature at 5 cm depth ($^{\circ}\text{C}$), SWC is the soil volumetric water content (%).

3.2 各季节土壤呼吸速率与土壤 5 cm 温度、土壤容积含水量的关系

T5 与 SR 在雾凉季呈极显著正相关关系 (CK: $r = 0.504$ $p < 0.01$; NL: $r = 0.444$ $p < 0.01$); 指数回归方程对 SR 的解释率达显著水平 (NL: $R^2 = 0.208$ $p < 0.01$; CK: $R^2 = 0.275$ $p < 0.01$), 很好的解释了 SR 与 T5 的正相关关系; 雨季 T5 与 SR 呈极显著负相关 (CK: $r = -0.511$ $p < 0.01$; NL: $r = -0.402$ $p < 0.01$), 这是因为实验林为坡地, 雨季连续的高强度降水和暴雨会冲刷表层土壤, 使地表

有机质层减少, 土壤呼吸底物减少, SR 变小, 从而 SR 和 T5 表现为负相关关系, NL 的指数回归方程 ($R^2 = 0.114$ $p < 0.01$) 对 SR 的解释率低于 CK 的 ($R^2 = 0.210$ $p < 0.01$), 也说明此问题; 干热季 CK 处理与 SR 呈显著正相关, NL 处理与 SR 相关关系不显著 (CK: $r = 0.358$ $p < 0.05$; NL: $r = 0.193$ $p > 0.05$), 这是因为 CK 处理表面覆盖的凋落物对土壤温度具有调节作用, 使得温度变化比去凋处理的波动小。两处理的 SR 与 T5 的指数回归方程在各季节对 SR 解释率为雾凉季 > 雨季 > 干热季,

且方程对 CK 的 SR 解释率高于 NL 的。

各季节 SR 与 SWC 的相关关系也表现出季节差异, 雨季两处理的 SR 与 SWC 呈极显著负相关关系 (CK: $r = -0.616$ $p < 0.01$; NL: $r = -0.597$ $p < 0.01$), 回归方程对 SR 解释率达到极显著水平, 这是因为雨季降水量大, SWC 多在 40% 以上, 水分阻塞土壤孔隙, 抑制土壤呼吸; 干热季 NL 的 SR 和 SWC 呈显著负相关 ($r = -0.339$ $p < 0.05$), CK 的 SR 与 SWC 呈不显著负相关关系 ($r = -0.292$ $p > 0.05$), 这与凋落物的持水能力强使得 CK 与 NL 的 SR 与 SWC 的关系不同有关; 雾凉季的 SR 与 SWC 具不显著的正相关 (CK: $r = 0.207$ $p > 0.05$; NL: $r = 0.171$ $p > 0.05$)。 SWC 与 SR 拟合的一元二次方程对各季节 SR 解释率 CK: 雨季 41.2% > 干热季 17.2% > 雾凉季 3.0%; NL: 雨季 36.0% > 干热季 8.3% > 雾凉季 6.2%, 可见两种处理的回归方程对 SR 的解释率具明显的季节差异 ($p < 0.01$)。

$T5$ 和 SWC 与 SR 拟合的二元回归方程对各季节 SR 解释率为 CK: 雨季 32.4% > 雾凉季 28.9% > 干热季 7.5%; NL: 雨季 33.8% > 雾凉季 21.20% > 干热季 6.3%。从表 3 看两种处理的二元回归方程对 SR 的解释率在雨季略低于 SWC 与 SR 的, 高于 $T5$ 与 SR 的, 总体达显著水平。雾凉季的二元回归方程对土壤呼吸的解释率明显高于 $T5$ 与 SR 回归方程和 SWC 与 SR 回归方程的解释率, 表明两因子在雨季和雾凉季对 SR 有协同作用; 干热季略高于 $T5$ 与 SR 的, 低于 SWC 与 SR 的, 但解释率低于 10%, 表明两因子对 SR 在本季节没有显著的影响, 这可能和干热季时间短, 观测次数少, 温湿度波动大有关。

3.3 土壤呼吸速率与橡胶林生长季相变化关系

橡胶树的根系生长和叶面积指数具有明显的季节动态, 是植物生长节律的重要指标。根据对橡胶树的物候观测其生长周期可分为相对休眠期和生长期。相对休眠期自雾凉季落叶时起至干热季萌芽时止 (1~2 月, 雾凉季后期); 生长期自干热季萌芽始至雾凉季落叶时止, 该期又可根据胶树季相特征分为恢复生长期 (3~4 月, 干热季), 旺盛生长期 (5~10 月, 雨季) 和生长减缓期 (11~12 月, 雾凉季前期)。在胶树的相对休眠期, 胶树叶集中凋落, 芽开始萌发, 活细根长入量低, 细根分解率小 (图 2), 叶面积指数因集中落叶呈全年最低水平 (图 3), SR 保持相对较低的水平 (NL: $8.55 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$;

m^{-1} ; CK: $8.65 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$) (图 1)。干热季 (3~4 月), 胶树恢复生长进入展叶期, LAI 迅速增加, 在 4 月达到最大, 因胶树集中于地上营养生长使细根长入率出现负值, 活细根减少, 死细根增多, 细根分解率较低, 但 SR 呈上升趋势。进入生长旺盛阶段 (雨季, 5~10 月), 这个季节叶面积指数达到高位稳定阶段 (图 4), 地上光合作用强, 输入到地下部分的光合产物增多, 同时地下根系生长活跃并在 4~6 月的达最高生长量, 细根分解率在 10 月达到最高 (图 2), 土壤呼吸速率在本季节也处在高位 (NL: $13.01 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$; CK: $14.04 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$)。进入雾凉季 (11~12 月), 胶树生长变弱, 落叶量累积增加, LAI 逐渐变小, 地下细根长入率低, 分解率也变小, SR 随着递减 (NL: $10.71 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$; CK: $10.95 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$), 低于相对休眠期。

各生长期橡胶树 LAI 的均值与 SR 的均值无显

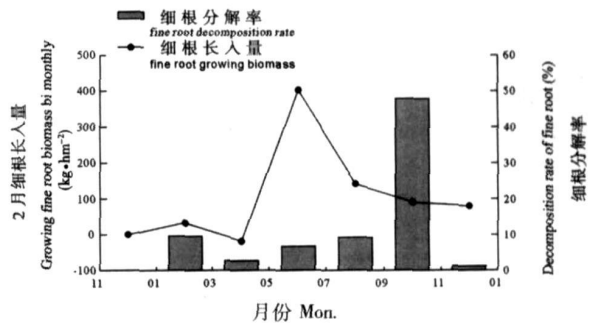
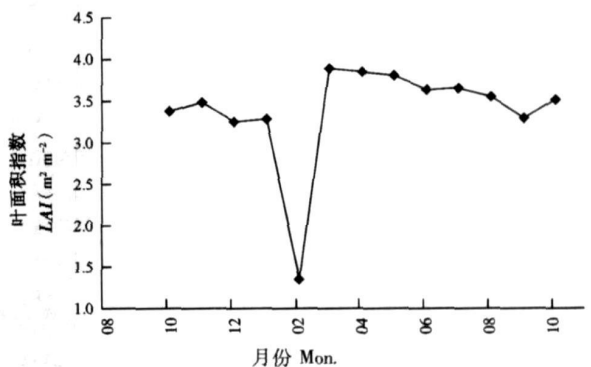


图 3 西双版纳橡胶林 0~20 cm 土层中细根长入量和细根分解动态

Fig. 3 Dynamics of growth and decomposition rate of fine roots at the depth 0~20 cm in rubber plantation in Xishuangbanna



注: 数据为 10 点平均值 ($n = 10$)

note: Datas are means ($n = 10$)

图 4 西双版纳橡胶林叶面积指数季节动态

Fig. 4 Dynamics of LAI in rubber plantation in Xishuangbanna

著相关关系 (NL: $r = 0.669$ $p = 0.331$ $n = 4$ CK: $r = 0.671$ $p = 0.329$ $n = 4$)。2月细根长入量与2月平均SR相关关系不显著 (NL: $r = -0.053$ $p = 0.921$ $n = 6$ CK: $r = 0.281$ $p = 0.590$ $n = 6$), 而细根2月分解率与2月平均SR呈显著正相关关系 (NL: $r = 0.828$ $p = 0.042$ $n = 6$ CK: $r = 0.992$ $p = 0.00$ $n = 6$)。

3.4 凋落物对土壤呼吸的影响

两种处理的SR季节变化趋势相同, 总体上CK高于NL($t = 2.205$ $p < 0.05$) (图1)。为确定凋落物对各季节SR的影响情况, 我们进行了paired-T test (two way) 检验, 结果表明雾凉季和干热季的凋落物对NL和CK的SR没有显著的影响 ($t_{\text{Fog-cool season}} = -0.385$ $n = 81$ $p = 0.701$; $t_{\text{Dry season}} = -1.036$ $n = 34$ $p = 0.308$), 雨季SR受到凋落物的显著影响 ($t_{\text{Rainy season}} = -2.119$ $p = 0.036$ $n = 119$)。凋落物对土壤呼吸的贡献率为雨季7.92% > 干热季5.22% > 雾凉季1.74%, 具有显著的季节差异 ($p < 0.01$)。

3.5 主成分分析结果

主成分分析结果(表3)中两个主成分向量特征值大于1, 对SR的季节方差贡献率为100%, 说明两个主成分可以完全解释SR的季节变化。PCA1中土壤容积含水量, 日均降水量、橡胶细根分解率, 橡胶细根长入率, 凋落物分解贡献率的特征值 > 0.8, 该主成分方差贡献率为65.98%。土壤容积含水量和日均降水量是直接反应土壤水分情况的因子, 对细根长入率、细根分解率和凋落物分解量有直

接影响, 因此PCA1是土壤呼吸源因子。PCA2中日均气温和叶面积指数的特征值 > 0.8 第二主成分的贡献率为34.02%。叶面积指数是森林生态系统物质和能量固定的重要参数, 受到气温的影响大, 故PCA2是表征橡胶树光合产物输入对土壤呼吸季节变化的影响, 其方差贡献率小于PCA1这一直接影响因子。

4 讨论与结论

4.1 橡胶林土壤呼吸季节变化与温度、湿度因子
相关研究表明森林土壤呼吸在温湿度因子的主导作用下呈现明显的季节变化^[15-17]。本研究中橡胶林的SR具有明显的季节动态, 在雨季的5月和10月出现双峰; 在温度最低、湿度居中的雾凉季, SR最小; 温度逐渐升高, 湿度较小的干热季SR居中(图2)。胶林SR的季节动态和沙丽清等^[18]在西双版纳热带季节雨林及房秋兰和沙丽清^[6]在西双版纳橡胶林进行的SR研究季节趋势一致。本研究中无论是温度与湿度因子单独对SR的解释率, 还是两者对SR的共同解释率在各季节都低于房秋兰和沙丽清^[6]在橡胶林所做的研究全年的解释率(土壤+凋落物处理, 温度: 82%; 土壤水分含量: 63%), 也低于沙丽清等^[18]在热带季节雨林的研究结果(土壤温度: 42.28% ~ 64.72%; 土壤容积含水量: 28.89% ~ 45.76%)。解释率上的差异是因本研究针对的是各季节温湿度因子和土壤呼吸的关系, 森林类型、试验林地土壤质地和测定方法等要素也会引起差异。

4.2 胶林SR季节变化与生物因子

有研究表明植物物候现象和温度对土壤呼吸影响有同样的敏感程度^[19], 叶面积指数作为植物物候现象的重要参数和评价指标与植物的光合作用密切相关, 直接决定了植物对干物质的固定能力, 地上碳输入也影响到土壤呼吸的排放。Frank发现, 日平均土壤CO₂通量与叶面积指数和生物量的年变化趋势一致, 而且有很好的正相关关系^[20]。Sims和Bradford选取20d的日平均土壤CO₂通量值和同时测量的叶面积指数值进行线性回归后发现显著的相关性表明叶面积指数的季节性变化会导致土壤CO₂通量模式的变化^[21]。本研究中各生长期叶面积指数与土壤呼吸没有显著相关关系, 这可能因本实验测定的叶面积指数和土壤呼吸速率测定的时间

表3 载荷因子转置矩阵和累计贡献率		
Table 3 Rotated component matrix and total variance explained		
影响因子 Variable	主成分 1 PCA 1	主成分 2 PCA 2
5 cm 温度 T5	0.635 9	0.771 7
土壤容积含水量 SWC	0.989 9	-0.141 5
日均气温 Air temperature	0.479 7	0.877 4
日均降水量 Precipitation	0.875 8	0.482 7
月均叶面积指数 LAI	-0.225 1	0.974 3
2月均细根分解率 Fine root decomposition rate	0.954 4	0.298 7
2月细根长入量 Fine root growth biomass	0.993 5	0.113 4
凋落物分解对 SR 贡献率 Contribution of above-ground litter decomposition to SR	0.974 0	0.226 6
特征值 Eigenvalue	5.28	2.72
累积贡献率% Cumulative%	65.98	100.00

有差异所致。

森林土壤呼吸是由自养呼吸和异养呼吸组成, 自养呼吸是指森林地下根呼吸。有研究表明根呼吸与林木地上光合作用所提供的同化物密切相关^[15], 大于 50% 的光合产物通过根系呼吸释放出来^[22], 根呼吸占土壤呼吸总量的 33% ~ 63%^[23, 24], 根呼吸对土壤呼吸作用的贡献因季节的变化而不同^[25, 26], 因此根系生物量可以估计根系呼吸对土壤呼吸的贡献, 根呼吸是随着根系生物量增加而呈线性增加的^[27], 虽然本研究中没有直接测定根系呼吸, 但可用细根生物量的季节动态来表示细根呼吸的动态。本研究中 SR 与 2 月细根生物量没有显著相关关系, 而 Bond-Lamberty 等^[28]的研究表明全球根系呼吸与土壤呼吸呈线性相关。这种差异是因为本研究的时间尺度是以月为周期的, 而 Bond-Lamberty 等的研究时间尺度最短的为季节周期所致。

凋落物分解释放的 CO₂ 是土壤异养呼吸的重要来源, 大批量的凋落物输入为微生物和土壤动物提供了大量可供分解的 C 源^[23, 29, 30], 但因水热因子的限制, 凋落物分解对土壤呼吸的贡献率有明显的季节变化^[16, 17, 31-33]。橡胶林地上凋落物输入具有明显的季节性, 叶输入集中在 1 月下旬至 2 月上旬, 果实输入在雨季的 8 月下旬至 9 月中旬, 形成橡胶林凋落物输入的两个高峰^[34]。本试验凋落物分解对土壤呼吸的贡献率最高的季节是雨季, 表明雨季较好的水热条件和微生物分解作用利于凋落物的破碎和生物化学分解, 使得雾凉季输入的落叶和雨季输入的花果枝干等集中分解释放 CO₂ 贡献率最高, 这一结论和周存宇等^[17]在鼎湖山的试验结果一致。

4.3 主成分分析

土壤呼吸在生物因子和非生物因子的共同作用下表现出明显的季节变化, 对本试验的所有影响因素进行主成分分析。结果表明橡胶细根长入率、橡胶细根分解率、凋落物分解对土壤呼吸的贡献率、土壤容积含水量和降水量形成的橡胶林土壤呼吸源和水分因子 (PCA 1) 是解释橡胶林 SR 季节变化的主要因子, Hashimoto^[35]的研究表明热带地区常年高温且变化幅度小, 温度并不是影响 SR 的主要因子, 而水分呈现出明显的干湿季变化, 致使水分成为影响 SR 的主要原因, 并且凋落物分解, 根系生长受湿度影响更明显, 因此 PCA 1 对 SR 的影响更显著。在主成分分析中, 叶面积指数与大气温度和土壤温度季节平均值形成的 PCA 2 对 SR 季节变化的贡献率为

34.02%, 表明温度因子和叶面积指数的季节差异对 SR 季节变化有显著作用。这是因为叶面积指数与温度因子成正相关关系, 与降雨相关关系较弱^[36]。PCA 2 的方差贡献率表明 SR 组分 (根系呼吸与异养呼吸) 要紧密切依赖于植物所提供的光合产物^[28], 但影响不如 PCA 1 强。

从以上分析可见, 温度、湿度因子影响着橡胶树的生长节律, 对橡胶林 SR 季节变化起着重要作用, 与橡胶林生态系统的生物因子通过直接 (根呼吸) 或间接 (凋落物分解) 的方式影响着橡胶林 SR 的季节动态。因此橡胶林的 SR 季节性变化是温度、湿度因子, 胶树生长节律的协同作用所致。若当地气候条件改变, 胶树生长受到影响, 土壤呼吸也必然受到影响, 进而影响到当地土壤碳储量, 进一步对当地气候形成反馈效应。故重视胶林土壤碳排放, 对实现胶林的可持续管理意义重大。若要深入探讨橡胶林土壤碳排放对当地气候的反馈效应和机理需进行长期的连续性研究。

致谢: 中国科学院西双版纳热带植物园版纳站提供常规气象数据, 生物地球化学实验室分析土壤理化性质, 特此感谢。

参考文献 (references)

- [1] Hibbard K A, Law B E, Reichstein M, *et al*. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems [J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73: 29~70
- [2] Law B E, Ryan M G, Anthoni P M. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5: 69~182
- [3] Xu M, Qi Y. Soil surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California [J]. *Global Change Biology*, 2001, 7: 667~677
- [4] Kirschbaum M U F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 21~51
- [5] Yang J C, Huang J H, Tang J W, *et al*. Carbon sequestration in rubber tree plantations established on former arable lands in Xishuangbanna SW China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(2): 296~303 [杨景成, 黄建辉, 唐建维, 等. 西双版纳农田弃耕后橡胶园的建立对碳的固存作用 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(2): 296~303]
- [6] Fang Q L, Sha L Q. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan, SW China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30: 97~103 [房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸 [J]. 植物生态学报, 2006, 30: 97~103]
- [7] Dinesh R, Chaudhuri S G, Sheeja T E. Soil biochemical and micro-

- bial indices in wet tropical forests: Effects of deforestation and cultivation [J]. *Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167 (1): 24~32
- [8] Adachi M., Bekku Y. S., Konuma A., *et al*. Required sample size for estimating soil respiration rates in large areas of two tropical forests and of two types of plantation in Malaysia [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 210: 455~459
- [9] Wemer C., Zheng X. H., Tang J. W., *et al*. N_2O , CH_4 and CO_2 emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China [J]. *Plant and Soil*, 2006, 289: 335~353
- [10] Zhang K. Y. The characters of climate in southern Yunnan and the influence factors *Acta Meteorologica Sinica*, 1963, 33(2): 218~230 [张克映. 滇南气候的特征及其形成因子的初步分析. 气象学报, 1963, 33(2): 218~230]
- [11] Statistical Bureau of Yunnan Province. Yunnan Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 1998, 39~61 [云南省统计局. 云南省统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1998, 39~61]
- [12] Li H. M., Michell A. I. D., Ma Y. X., *et al*. 2007. Demand for rubber is causing the loss of high diversity rain forest in SW China [J]. *Biodiversity Conservation*, 16: 1731~1745
- [13] Nackaert K., Coppin P., Muys B., Henry M. 2000. Sampling methodology for LAI measurements with LAI-2000 in small forest stands [J]. *Agricultural Forest Meteorology*, 101: 247~250
- [14] Fang Q. L., Sha L. Q. Study of fine roots biomass and turnover in the rubber plantation of Xishuangbanna [J]. *Journal of Central South University of Forestry*, 2005, 25: 40~44 [房秋兰, 沙丽清. 西双版纳橡胶林细根生物量及其周转 [J]. 中南林业学院学报, 2005, 25: 40~44]
- [15] Yang Y. S., Cheng G. S., Dong B., *et al*. Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China [J]. *Acta Ecology Sinica*, 2004, 24: 953~958 [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: 953~958]
- [16] Sulzman E. W., Brant J. B., Bowden R. D., *et al*. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO_2 efflux in an old growth coniferous forest [J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73 (1): 231~256
- [17] Zhou C. Y., Zhou G. Y., Zhang D. Q., *et al*. CO_2 efflux from different forest soils and impact factors in Dinghushan mountain, China [J]. *Science in China Ser. D. Earth Sciences*, 2004, 34 (Supp. II): 175~182 [周存宇, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山森林地表 CO_2 通量及其影响因子的研究 [J]. 中国科学: D辑, 2004, 34: 175~182]
- [18] Sha L. Q., Zheng Z., Tang J. W., *et al*. Soil respiration in tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, SW China [J]. *Science in China Ser. D. Earth Sciences*, 2004, 34 (Supp. II): 167~174 [沙丽清, 郑征, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究 [J]. 中国科学: D辑, 2004, 34: 167~174]
- [19] Curiel-Yuste J., Janssens I. A., Carrara A., *et al*. Annual Q_{10} of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10 (2): 161~169
- [20] Frank A. B. Carbon dioxide fluxes over a grazed prairie and seeded pasture in the Northern Great Plains [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116: 397~403
- [21] Sims P. L., Bradford J. A. Carbon dioxide fluxes in a southern plains prairie [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109: 117~134
- [22] Rey A. E., Pegoraro V., Tedeschi I., *et al*. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 851~866
- [23] Anderson J. M. Responses of soils to climate change [J]. *Advances in Ecological Research*, 1992, 22: 163~210
- [24] Högberg P., Nordgren A., Buchmann N., *et al*. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration [J]. *Nature*, 2001, 411: 789~792
- [25] Gupta S. R. and Singh J. S. Soil respiration in a tropical grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1981, 13: 261~268
- [26] Harris D. G., Van Bavel C. H. M. Root respiration of tobacco, corn and cotton plants [J]. *Agron Journal, Madison*, 1957, 49: 182~184
- [27] Jia G., Zhou F., Wang Y., *et al*. Partitioning root and microbial contributions to soil respiration in *Leymus chinensis* populations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38 (4): 1~8
- [28] Bond-Lamberty B., Wang C. K., Gower S. T. A global relationship between the heterotrophic and autotrophic components of soil respiration [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10: 1756~1766
- [29] Davidson E. A., Ishida F. Y., Nepstad D. C. Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10: 718~730
- [30] Yang Jinyang, Wang Chuankuan. Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO_2 flux of forests in Northeast China [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30 (2): 286~294 [杨金艳, 王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面 CO_2 通量的影响 [J]. 植物生态学报, 2006, 30(2): 286~294]
- [31] Jiang Yanlin, Zhou Guangsheng, Zhao Min, *et al*. Soil respiration in broad-leaved and Korean pine forest ecosystems, Changbai Mountain [J]. *Acta Phytocologica Sinica China*, 2005, 29 (3): 411~414 [蒋延玲, 周广胜, 赵敏, 等. 长白山阔叶红松林生态系统土壤呼吸作用研究 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 411~414]
- [32] Wang Wei, Guo Jikun, Zhang Baotiang. Seasonal dynamics of environmental factors and decomposition rate of litter in *Leymus chinensis* community in songnen grassland in Northeast China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12 (1): 47~52 [王妮, 郭继勋, 张保田. 东北松嫩草地羊草群落环境因素与凋落物分解季节动态 [J]. 草业学报, 2003, 12(1): 47~52]
- [33] Maggs J., Hewett B. Soil and litter respiration in rainforests of contrasting nutrient status and physiognomic structure near Lake Eacham, northeast Queensland [J]. *Austral ecology*, 1990, 15 (3): 329~336
- [34] Ren Y. H., Cao M., Tang J. W., *et al*. Comparative study on litterfall dynamics in a seasonal rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, SW China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 1999,

- 23 (5): 418~ 425[任泳红, 曹敏, 唐建维, 等. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究 [J]. 植物生态学报, 1999 23(5): 418~ 425]
- [35] Hashimoto S, Tanaka N, Suzuki M, *et al* Soil respiration and soil CO₂ concentration in a tropical forest, Thailand [J]. *Forest Research*. 2004 9: 75~ 79
- [36] Zhang JH, Fu Z B, Yan X D, *et al* Global response analysis of LAI versus surface air temperature and precipitation variations [J]. *Chinese Journal of Geophysics*. 2002, 45 (5): 631~ 639 [张佳华, 符凉斌, 延晓冬, 等. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究 [J]. 地球物理学报, 2002, 45(5): 631~ 639]

Seasonal Change of Soil Respiration and Its Influence Factors in Rubber (*Hevea brasiliensis*) Plantation in Xishuangbanna, SW China

ZHOU Wenjun^{1, 2}, SHA Liqing¹, SHEN Shougen^{1, 2}, ZHENG Zheng¹

(1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, The Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China

2 Graduate School of the Chinese Academy of sciences, 100039, China)

Abstract One-year in-situ study was carried out to investigate the seasonal variation of soil respiration rate (*SR*) and its relationship with abiotic factors and biotic factors in rubber plantation in Xishuangbanna, Southwest China. Two treatments were designed with litter (CK) and no litter (NL). *SR* was measured by RGA from Aug. 2005 to Aug. 2006, and soil temperature at 5 cm depth (*T*₅), cell temperature (*T*_{cell}), soil volumetric water content (*SWC*) were observed concurrently. The rubber phenology including Leaf area index and the dynamics of fine root growth and died fine roots decomposition were observed for one year. Results showed: 1. *SR* of both treatments were relatively high during the rainy season (May – Oct. CK: 14.10 mg CO₂ · m⁻² · min⁻¹; NL: 13.00 mg CO₂ · m⁻² · min⁻¹), low in the fog-cool season (Nov. – Feb. CK: 9.91 mg CO₂ · m⁻² · min⁻¹; NL: 9.70 mg CO₂ · m⁻² · min⁻¹), and intermediate in the dry season (Mar. – Apr. CK: 10.87 mg CO₂ · m⁻² · min⁻¹; NL: 10.33 mg CO₂ · m⁻² · min⁻¹). 2. Regression analysis demonstrated that the relationship between *SR* and *T* or *SWC* were different in three seasons, and the rate of *SR* was predominantly controlled by *SWC* in rainy season, by temperature in the fog-cool season, and by both in the dry season of the both treatments. 3. Contribution of above-ground litter decomposition to soil respiration varied seasonally (*p* < 0.01), with a rank of rainy season (7.92%) > dry season (5.22%) > fog-cool season (1.74%), which affected by the seasonal input and decomposition of above-ground litter. 4. *SR* seasonal dynamics of NL and CK were similar to the rubber tree growth dynamics, that was the *SR* in rubber main growth phase (May – Oct., rainy season) > late growth phase (Nov. – Dec., early fog-cool season) > early growth phase (Mar. – Apr., dry season) > resting phase (Jan. & Feb., late fog-cool season). 5. Based on principal components analysis (*PCA*), the biotic and abiotic variables in rubber plantation could be classified into two components, namely *SR* components and carbon input, which accounted for 100% of the *SR* seasonal variability. In conclusion, the seasonal change of *SR* in rubber plantation is determined by the covariance of multiple factors.

Key words rubber plantation, soil respiration, phenology, temperature, soil moisture