

西双版纳热带季节雨林与橡胶林 土壤呼吸的季节变化*

卢华正^{1,2} 沙丽清^{1*,} 王 君¹ 胡文艳^{1,2} 吴兵霞³

(¹中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南勐腊 666303; ²中国科学院研究生院, 北京 100049;

³北京师范大学研究生院, 北京 100875)

摘 要 采用挖壕沟法与红外气体分析法, 研究了西双版纳热带季节雨林和人工橡胶林内土壤呼吸包括根系呼吸、异养呼吸的干湿季动态变化。结果表明: 季节雨林内土壤呼吸和异养呼吸速率均显著大于橡胶林 ($P < 0.01$), 但根系呼吸差异不显著; 土壤温湿度是呼吸速率变化的主要影响因子, 季节雨林和橡胶林内土壤呼吸和异养呼吸速率均为雨季 > 干热季 > 雾凉季, 但季节雨林内根系呼吸为雨季 > 雾凉季 > 干热季, 而橡胶林内为雾凉季 > 雨季 > 干热季; 季节雨林内根系呼吸对土壤呼吸的贡献率 (29%) 小于橡胶林 (42%, $P < 0.01$), 而季节雨林内异养呼吸对土壤呼吸的贡献率为 71%、橡胶林为 58%; 当 5 cm 土壤温度在 12 °C ~ 32 °C 范围内变化时, 季节雨林内土壤呼吸及根系呼吸、异养呼吸的 Q_{10} 值均大于橡胶林, 且异养呼吸的 Q_{10} 值最大而根系呼吸的 Q_{10} 值最小。

关键词 热带季节雨林 橡胶林 土壤呼吸 根系呼吸 异养呼吸 Q_{10}

文章编号 1001-9332(2009)10-2315-08 中图分类号 S718 文献标识码 A

Seasonal variation of soil respiration and its components in tropical rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan. LU Hua-zheng^{1,2}, SHA Li-qing¹, WANG Jun¹, HU Wen-yan^{1,2}, WU Bing-xia³ (¹Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Graduate School of Beijing Normal University, Beijing 100875, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2009, 20(10): 2315-2322

Abstract By using trenching method and infrared gas analyzer, this paper studied the seasonal variation of soil respiration (SR), including root respiration (RR) and heterotrophic respiration (HR), in tropical seasonal rain forest (RF) and rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation (RP) in Xishuangbanna of Yunnan, China. The results showed that the SR and HR rates were significantly higher in RF than in RP ($P < 0.01$), while the RR rate had less difference between the two forests. Soil temperature and moisture were the key factors affecting the SR, RR and HR. The SR and HR rates in the two forests were rainy season > dry-hot season > foggy season, but the RR rate was rainy season > foggy season > dry-hot season in RF, and foggy season > rainy season > dry-hot season in RP. The contribution of RR to SR in RF (29%) was much lower than that in RP (42%, $P < 0.01$), while the contribution of HR to SR was 71% in RF and 58% in RP. When the soil temperature at 5 cm depth varied from 12 °C to 32 °C, the Q_{10} values for SR, HR, and RR rates were higher in RF than in RP. HR had the highest Q_{10} value, while RR had the lowest one.

Key words tropical seasonal rain forest, rubber plantation, soil respiration, root respiration, heterotrophic respiration, Q_{10} .

森林生态系统既可充当碳源也可充当碳汇, 其

* 云南省自然科学基金项目 (2004C0052M) 和国家自然科学基金项目 (40173039) 资助。

** 通讯作者。E-mail: shalq@xtbg.ac.cn

2009-02-20 收稿, 2009-07-25 接受。

呼吸的年际变化大于光合作用^[1]。土壤呼吸作为土壤碳通量和陆地生态系统碳循环的关键成分, 每年排放 80.4 Pg CO₂-C^[2], 土壤呼吸的微小变化将对大气碳热平衡产生巨大影响^[3]。根据微气候法估算,

热带地区净初级生产力占全球陆地生态系统光合作用的 32%^[4],而热带森林植被和地下碳库占全球陆地碳库的 37%^[5],这种对净生物碳汇的估算由于取样区域所限并不很准确^[6].近年来,亚洲热带天然林正以前所未有的速度转变为次生林或人工林,20 世纪 80 年代每年土壤损失到大气中的碳平均为 0.88 Pg 90 年代为 1.09 Pg^[7].西双版纳热带季节雨林是分布在热带北缘水热和海拔高度极限条件下的森林类型,具有热带森林的结构和群落特征^[8],而热带季节雨林和人工橡胶林分别是西双版纳地区天然林和大面积种植人工林的两种代表类型.西双版纳热带季节雨林面积在 1976—2003 年间减少了 67%,而橡胶林面积由 1.1% 剧增到 11.8%^[9].因此,研究森林采伐后土地利用变化对土壤呼吸及其组分的影响,对于准确估算土壤碳循环具有重要意义.目前土壤呼吸及其影响因子的研究主要集中在典型生态系统的测定上,且多集中在温带森林^[10]、北方针叶林^[11]和半干旱草原^[12]等,仅 Sha 等^[13]和房秋兰等^[14]对我国热带地区天然林演变成人工林后土壤呼吸进行了初步研究,但对不同林型土壤呼吸并区分根系呼吸、异养呼吸变化规律的研究尚未见报道.本文探讨西双版纳地区热带季节雨林和橡胶林土壤呼吸及其两组分的季节变化动态,旨在为准确估算我国热带碳收支提供基础数据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

西双版纳傣族自治州 (99°56′—101°50′ N, 21°08′—22°36′ E)属北热带季风气候,年均降雨量 1557 mm,全年干湿季分明,干季 (11 月至次年 4 月,包括雾凉季和干热季)降雨 264 mm,占年降雨的 17%,雨季 (5—10 月)降雨 1293 mm,占年降雨的 83%,年均相对湿度 86%.太阳年总辐射量 4902.4 MJ·m⁻²,年日照时数 1787.8 h 年均气温 21.5℃,最热月 (5 月)均温 25.3℃,最冷月 (1 月)均温 15.5℃.土壤为砖红壤,样地坡度约 25°.

西双版纳热带季节雨林是印度-马来热带雨林

区的重要组成部分.本研究样地位于西双版纳勐仑自然保护区内 (21°51′ N、101°12′ E),海拔约 756 m.植被结构复杂,物种丰富.季节雨林样地乔木树种有 145 种,胸径 ≥5 cm 植株密度约 730 株·hm⁻²,林分胸高断面积约 32 m²·hm⁻².群落高度约 48 m,林龄约 200 a^[15].该群落分层现象明显,可分为上、中、下乔木层以及灌木层、草本和藤本植物 6 个层次:上层乔木高 30 m 以上,优势种主要为千果榄仁 (*Terminalia myriocarpa*)、番龙眼 (*Pometia tomentosa*)等;中层乔木高度在 16~30 m,常见种有云南玉蕊 (*Barringtonia macrostachya*)、大叶白颜树 (*Girardiniera subaequalis*)、山焦 (*Mitrephora mangayi*)等;下层乔木高 16 m 以下,主要种包括云树 (*Garcinia cawall*)、假广子 (*Knema erratica*)、细罗伞 (*Ardisia tenera*)、蚁花 (*Messittopsis creaghii*)及毒鼠子 (*Dichmpetalum gelonioides*)等.灌木层除上层乔木的幼苗幼树外,常见种有染木 (*Saprosma ternatum*)、狭叶巴戟 (*Morinda angustifolia*)、玉叶金花 (*Mussaenda* sp.)等.草本层与灌木层处于同一层次,种类不多,常见的有凤尾蕨 (*Pteris* sp.)、海芋 (*Aloxisis macrorrhiza*)、盈江南星 (*Arisaema inkiangense*)等^[15].该群落林内藤本及附生植物丰富,板根及茎花现象显著,是西双版纳季节雨林中分布面积较大、保存完好、具有代表性的群系类型^[8].

橡胶林是西双版纳地区分布面积较大的人工植被.从 20 世纪 60 年代初期开始,由于对天然橡胶的迫切需要,我国在西双版纳地区进行大规模的橡胶林种植.橡胶林样地位于中国科学院西双版纳热带森林生态系统研究站的人工群落试验区内 (21°56′ N, 101°15′ E,海拔 580 m),是以 30 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,窄行距 2.5 m,宽行距 19.0 m),群落高 20~30 m,乔木密度 370 株·hm⁻².土壤为砖红壤,土层深厚,坡度约 15°.橡胶林的土壤理化性质与季节雨林有很大差异 (表 1).

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 在季节雨林和橡胶林各选取 4 个

表 1 季节雨林和橡胶林土壤初始理化性质

Tab 1 Physical and chemical properties of soils in tropical rain forest and rubber plantation (mean ±SD)

林型 Forest type	pH	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全 N Total N (g·kg ⁻¹)	全 P Total P (g·kg ⁻¹)	全 K Total K (g·kg ⁻¹)	全 Ca Total Ca (g·kg ⁻¹)	全 Mg Total Mg (g·kg ⁻¹)
季节雨林 Rain forest	4.64±0.32	35.25±0.85	1.96±0.10	0.47±0.02	10.49±2.71	0.66±0.34	0.80±0.15
橡胶林 Rubber plantation	5.38±0.19	25.91±2.11	1.89±0.10	0.45±0.02	10.30±0.85	0.75±0.07	1.38±0.09

10 m × 15 m 样地, 每个样地随机设置 3 个约 4 m × 5 m 的小样方. 每个小样方布置 2 个处理: 切根处理和对照, 处理设为 50 cm × 50 cm, 两者相隔 2 m 左右. 相当于每个样地 3 个重复, 每种林型 12 个重复. 于 2008 年 2 月在季节雨林和橡胶林各样地取 0~20 cm 深土壤 5 份混合成 1 份, 每种林型各取 4 份混合土壤风干进行土壤理化性质分析 (表 1).

1.2.2 土壤表面 CO₂ 通量的测量 于 2007 年 12 月初, 在各样地随机选取 3 个小样方做切根处理: 先量好 50 cm × 50 cm 小区并做好标记, 再在四周垂直向下挖 50 cm 深、15 cm 宽的壕沟切断根系, 然后紧贴沟内壁插入 0.5 cm 厚的 PVC 板 (板相邻的 4 个角留有 4~5 cm 重叠), 板外用原土按层依次回填、压实 (尽量保持土壤容重等其他理化性质与周边一致). 处理小区内被切断的根系不做任何处理, 任其自然分解, 在切根处理小区旁约 2 m 处选取 50 cm × 50 cm 作为原样对照 (CK), 在四周作好标记. 经过约 3 个月平衡后进行数据采集, 对照及切根处理的小区不定期齐地面剪掉所有地上植被.

土壤表面 CO₂ 通量利用 Li820 (LiCOR Inc., Lincoln NE, USA) 进行测定, 自制直径 15 cm、高 15 cm 的圆柱形土壤呼吸室, 圆柱一端开口, 另一端用惰性 PVC 材料和粘胶封好, 其上打有 3 个直径 5 mm 的圆孔, 小孔用来插接进出气管和电子温度计, 测量时用橡皮泥密封. 待切根处理小区平衡几个月后, 于 2008 年 3 月初开始第 1 次测量, 从 2008 年 3 月初到 2009 年 2 月 (干热季、雨季、雾凉季), 每月 2 次, 于 9 00—14 00 用 Li820 测定仪测定各小区土壤表面的呼吸速率. 预先在每个样点固定一个和土壤呼吸室一样大小的圆形地框, 防止干扰过度. 每季度用标气校正 Li820 实验前先预热仪器约 30 min, 测量时收集有效数据 2~3 min.

1.2.3 环境因子测量 采集土壤表面 CO₂ 通量数据时, 用电子温度计测量呼吸气室气温、小区 5 cm、10 cm 土壤温度 (T_5 、 T_{10}), 每个小区测 3 次取平均值; 用便携式测墒仪 (MPk ii) 测量土壤 0~6 cm 体积含水量 (H), 每个小区测 3 次取平均值. 同时记录当天气压、天气、起止气温和时间. 此外, 在样地邻近的气象观测场安装 Campbell Scientific 数据采集器 (Campbell Scientific Inc., Utah, USA), 每 15 min 记录 1 次, 长期连续测定 2 cm 和 10 cm 土深处的土壤温湿度以及大气温湿度和压强. 所测项目基本包括所有地下环境因子和地上环境因子, 基本涵盖了本地区的大气和土壤环境的季节变化范围.

1.2.4 土壤呼吸及其组分速率的计算 土壤呼吸速率计算公式如下:

$$SR = \frac{10^3 P T_0}{22.4 P_0 T} \times H \times \frac{dc}{dt}$$

式中: SR 为土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); P_0 为标况下大气压强 (101.325 kPa); T_0 为标况下绝对零度 (273.15 K); T 为气室内空气温度 (K); P 为大气压强 (kPa); 22.4 为标况下气体的摩尔体积 ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$); H 为气室高度 (实际上为气室体积 V 除以底面积 S , m); dc/dt 为单位时间 CO₂ 浓度变化率 (散点斜率).

对照土壤呼吸速率 (对照小区土壤表面 CO₂ 释放速率, $SR_{\text{对照}}$) 公式如下:

$$SR_{\text{对照}} = \frac{10^3 P_{\text{对照}} T_0}{22.4 P_0 T_{\text{对照}}} \times 0.15 \times \frac{dc}{dt}$$

异养呼吸速率 (切根小区土壤表面 CO₂ 释放速率 HR) 公式如下:

$$HR = \frac{10^3 P_{\text{切根}} T_0}{22.4 P_0 T_{\text{切根}}} \times 0.15 \times \frac{dc}{dt}$$

根系呼吸速率 (RR) = $SR_{\text{对照}} - HR$

1.3 数据处理

采用 SPSS 10.0 对季节雨林和橡胶林的土壤呼吸及组分进行 T 检验; 对每种林型的不同呼吸类型干湿季进行多重比较; 对两种林型的不同呼吸类型与土壤温湿度、空气温度进行线性相关分析; 求算 Q_{10} 值时对温度和呼吸速率进行曲线和非线性相关分析 ($P < 0.05$). 采用 Sigmaplot 10.0 软件作图.

2 结果与分析

2.1 不同林型土壤呼吸及其组分的季节变化

季节雨林和橡胶林土壤呼吸及其组分有明显的季节变化, 呼吸速率变化均呈单峰曲线, 最大值出现在雨季的 6 月底至 9 月初, 最小值出现在干季 (包括干热季和雾凉季, 图 1). 两种林型土壤呼吸和根系呼吸的最大值均出现在 9 月中, 异养呼吸最大值出现在 6 月底 7 月初; 土壤呼吸和根系呼吸最小值均出现在雾凉季的 11 月至次年 1 月, 根系呼吸最小值出现在干热季的 3 月. 季节雨林和橡胶林内土壤呼吸速率分别为 0.89~4.23、1.41~3.13 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 根系呼吸速率分别为 0.16~1.45、0.48~1.62 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 异养呼吸速率分别为 0.51~3.19、0.40~2.09 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

经 T 检验, 除了根系呼吸差异不显著, 季节雨林内土壤呼吸和异养呼吸均极显著大于橡胶林

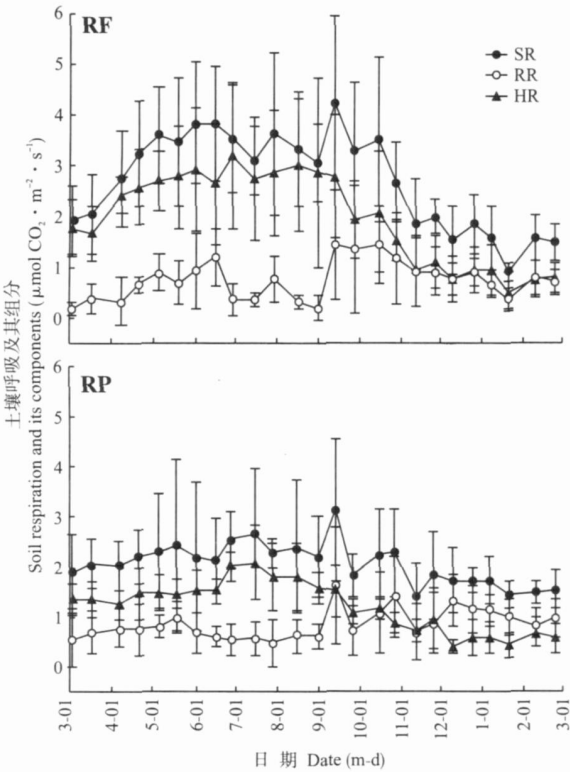


图 1 不同林型土壤呼吸及其组分季节变化
Fig 1 Seasonal variation in soil respiration and its components for different forests (mean $\pm$ SE).
RF: 季节雨林 Rain forest RP: 橡胶林 Rubber plantation SR: 土壤呼吸 Soil respiration HR: 异养呼吸 Heterotrophic respiration RR: 根系呼吸 Root respiration. 下同 The same below.

($P < 0.01$, 图 2). 季节雨林土壤呼吸、根系呼吸和异养呼吸平均速率分别为 2.66 0.71 和 1.95 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 橡胶林分别为 2.06 0.84 和 1.22 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

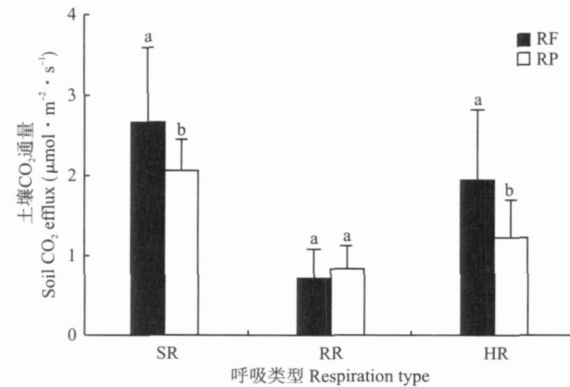


图 2 不同林型内土壤呼吸、根系呼吸和异养呼吸的比较
Fig 2 Comparisons of soil respiration, root respiration and heterotrophic respiration rates in different forests (mean $\pm$ SE).
不同小写字母表示同呼吸类型不同林型间差异极显著 ($P < 0.01$)
Different small letters meant significant difference between the two forests for the same respiration type at 0.01 level

除橡胶林根系呼吸差异不显著外,两种林型内土壤呼吸及其组分呼吸速率均表现出雨季 > 干季 ($P < 0.01$). 经多重比较 (LSD 检验) 可知, 若把干季再分为干热季和雾凉季, 两种林型内的土壤呼吸和异养呼吸为: 雨季 > 干热季 > 雾凉季; 根系呼吸为: 季节雨林内雨季 > 雾凉季 > 干热季, 橡胶林内雾凉季 > 雨季 > 干热季 (图 3).

2.2 土壤呼吸及其组分与土壤温湿度、空气温度的关系

土壤温湿度是影响土壤及各组分呼吸速率的关键因子. 除了橡胶林根系呼吸外, 两种林型内的土壤呼吸及其组分与土壤 5 cm 、 10 cm 的温、湿度和空气温度具有较好的相关性. 而且与温度的相关性高于湿度, 季节雨林的高于橡胶林 (图 4 表 2).

表 2 是用不同温度或温湿度拟合模型 ($R = ae^{bT}$ 或 $R = ae^{bT}$) 计算出来的土壤呼吸及其组分的 Q_{10} 值.

2.3 根系呼吸、异养呼吸对土壤呼吸的贡献率

季节雨林根系呼吸对土壤呼吸的贡献率 (29%) 小于橡胶林 (42% , $P < 0.01$), 相反, 异氧呼

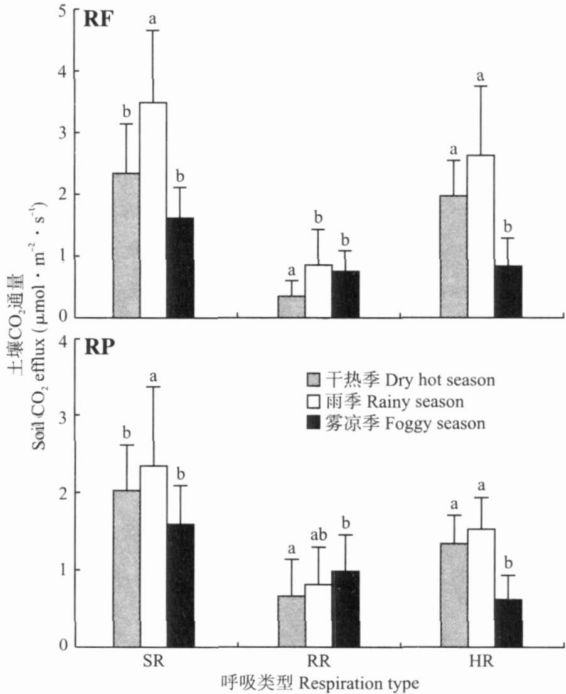


图 3 不同季节中各林型内土壤呼吸、根系呼吸和异养呼吸的多重比较
Fig 3 Multiple comparisons of soil respiration, root respiration and heterotrophic respiration among different seasons in different forests (mean $\pm$ SE).
不同字母表示相同林型同一呼吸类型不同季节间差异显著 Different letters meant significant difference among different seasons for the same respiration type in the same forest

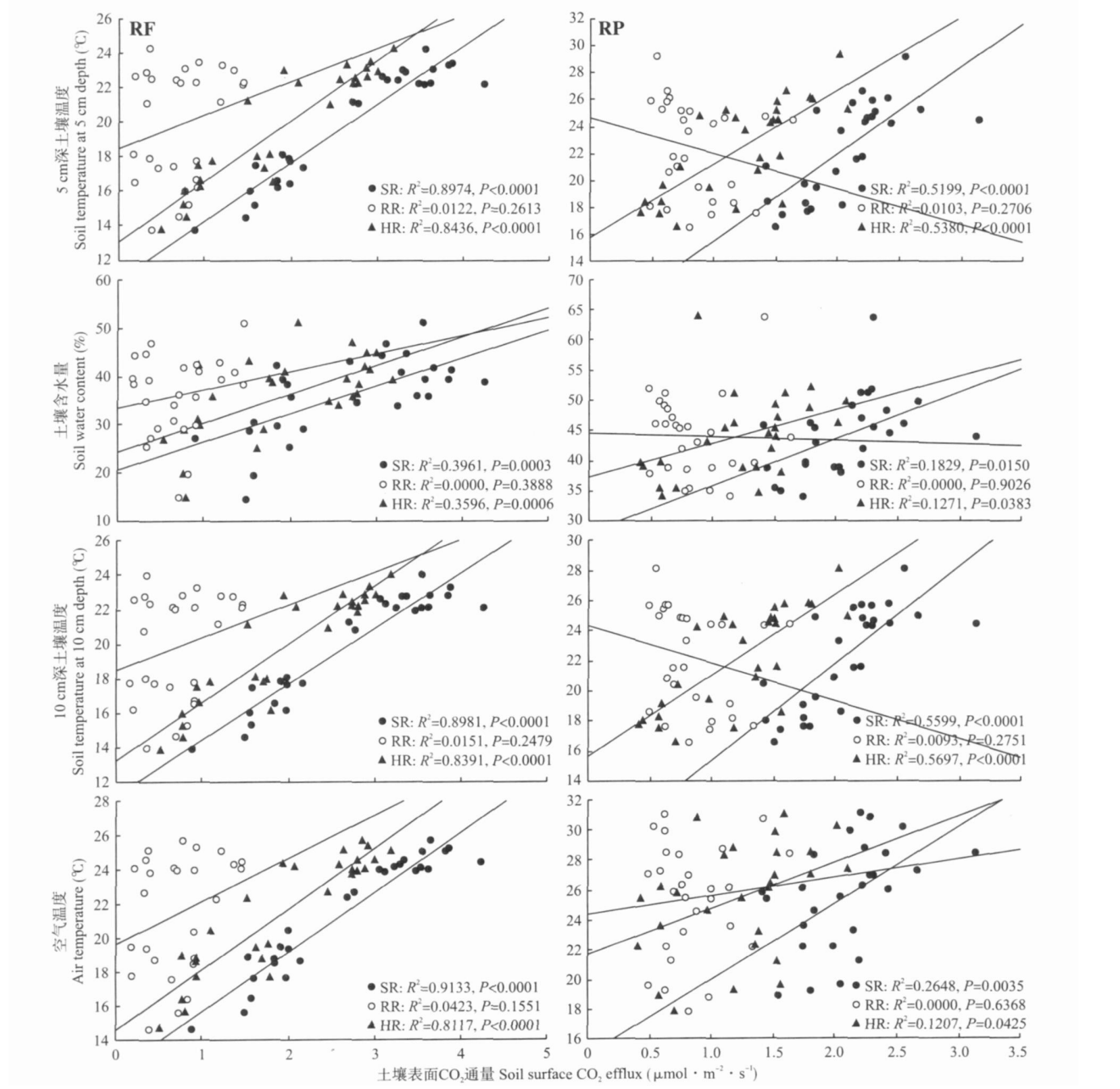


图 4 不同林型内土壤呼吸、根系呼吸和异养呼吸与环境因子的相关性

Fig 4 Correlations between soil respiration, root respiration and heterotrophic respiration rates and environmental factors in different forests

表 2 不同深度土壤温度和空气温度的 Q_{10} 值

Tab 2 Q_{10} in relation to soil temperature at different depths and air temperatures

参数 Parameter	模型 Model	季节雨林 Rain forest			橡胶林 Rubber plantation		
		土壤呼吸 SR	异养呼吸 HR	根系呼吸 RR	土壤呼吸 SR	异养呼吸 HR	根系呼吸 RR
T_5, H	$R = a^{cbTH^c}$	3.004 [*]	4.096 [*]	1.448	1.537 [*]	2.534 [*]	0.748
T_5	$R = a^{cbT}$	2.948 [*]	3.900 [*]	1.455	1.493 [*]	2.328 [*]	—
T_{10}	$R = a^{cbT}$	3.086 [*]	4.133 [*]	1.490	1.548 [*]	2.514 [*]	—
T_a	$R = a^{cbT}$	3.004 [*]	3.834 [*]	1.606	1.332 [*]	1.546 [*]	1.090

T_5 : 5 cm 深的土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth T_{10} : 10 cm 深的土壤温度 Soil temperature at 10 cm depth H : 土壤含水量 Soil water content
 T_a : 空气温度 Air temperature * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

表 3 不同植被类型的土壤呼吸速率
Tab 3 Soil respiration rate in different vegetation types

植被 Vegetation	地理位置 Location	土壤呼吸速率 Soil respiration rate ($\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	参考文献 Reference
热带季节雨林 RF	中国热带 Tropical zone, China	2.66	本研究 This study
橡胶林 RP	中国热带 Tropical zone, China	2.06	本研究 This study
热带季节雨林 RF	中国热带 Tropical zone, China	1.90	[14]
橡胶林 RP	中国热带 Tropical zone, China	2.02	[14]
热带季节雨林 RF	中国热带 Tropical zone, China	2.51	[13]
3种热带森林 Three types forests	澳大利亚热带 Tropical zone, Australia	2.13 ~ 3.18	[16]
热带森林 Tropical forest	巴西热带 Tropical zone, Brazil	1.36 ~ 3.22	[17]
热带森林 Tropical forest	巴拿马热带 Tropical zone, Panama	2.96 ~ 5.77	[18]
热带森林 Tropical forest	泰国热带 Tropical zone, Thailand	5.45 ~ 7.84	[19]
热带森林 Tropical forest	马来西亚热带 Tropical zone, Malaysia	4.46 ~ 5.98	[20]
油棕林 Oil palm plantation	马来西亚热带 Tropical zone, Malaysia	6.10	[20]
温带森林 Temperate forest	中国温带 Temperate zone, China	3.27 ~ 4.14	[21]
温带森林 Temperate forest	中国温带 Temperate zone, China	3.12	[22]

吸的贡献率 (71%) 大于橡胶林 (58%)。贡献率变化范围为: 季节雨林根系呼吸和异养呼吸分别占土壤呼吸的 6% ~ 51% 和 49% ~ 94%; 橡胶林分别占 21% ~ 77% 和 23% ~ 79%。

3 讨 论

3.1 土壤呼吸及其组分干湿季动态变化及其影响因子

季节雨林内土壤呼吸和异养呼吸均极显著大于橡胶林, 而根系呼吸差异不显著。这是由于季节雨林内无论是土壤有机质、全氮全磷含量、地下凋落物含量, 还是土壤动物和微生物量都大于橡胶林 (表 1), 尤其是挖沟切根后相当一段时间内, 季节雨林大量根死亡分解占异养呼吸的比重很大。两种林型内土壤呼吸速率均略大于房秋兰等^[14]用碱吸收法研究的结果。而季节雨林内土壤呼吸速率与 Kiese 等^[16]在澳大利亚和 Fernandes 等^[17]在巴西热带森林的结果相当, 略高于本地区 Sha 等^[13]的结果, 低于 Kursar^[18]在巴拿马、Hashimoto 等^[19]在泰国和 Adachi 等^[20]在马来西亚的研究结果。两种林型内土壤呼吸均低于孟春等^[21]和刘颖等^[22]在温带主要生长季节的土壤呼吸测定结果 (表 3)。这除了与水热条件差异、年际变化、森林生物因子差异有关外, 还与研究方法不同 (如碱吸收法在土壤 CO₂ 通量较小地区偏高, 而在通量较大地区则偏低) 有关。

两种林型土壤呼吸和根系呼吸速率均在 9 月达到最大值, 与土壤温湿度和空气温度动态变化趋势一致^[14, 22]。然而, 两种林型异养呼吸最大值均出现在 6 月底至 7 月初, 最小值和土壤呼吸出现在干季

前期的雾凉季, 但根系呼吸最小值均出现在切根后不久的干热季。这可能与挖沟切根后死根是否完全分解有关。据 Lee 等^[23]研究, 切根后 1~ 2 个月的土壤表面呼吸高于对照, 3~ 4 个月根系变黑并开始分解; Yi 等^[24]研究结果表明, 切根处理后 4~ 5 个月, 根系分解达到平衡状态。本试验于 2007 年 12 月初进行切根处理, 处于干季后期的雾凉季 (11 月至次年 2 月), 土壤温度最低、水分不足, 严重地影响土壤动物和微生物的活性, 根系分解受到很大制约。进入干热季 (3、4 月), 温度升高, 土壤动物和微生物的活性加强, 地下凋落物和根系分解加速, 异养呼吸增加, 但极少的土壤水分和降水制约着土壤呼吸及其组分, 根系呼吸速率出现最低值。当进入湿热的雨季, 水分基本饱和, 高温高湿环境下根系分解加速、土壤动物和微生物作用大大加强, 异养呼吸速率达到最高。切根小区内死根等地下凋落物经过雨季前期的充分分解, 已基本结束, 到雨季后期, 其土壤表面的呼吸主要是无根土呼吸, 因而随着温度降低和降水减少而降低。

逐步回归分析发现, 根系呼吸与环境因子相关性最弱, 而且控制因子常常是温度和湿度的共同作用。当水分含量很低或很高时, 水分成为土壤呼吸限制因子^[25-26], 西双版纳地区 3—4 月降水极少, 水分成为制约因子; 而 5—10 月为湿热季节, 土壤水分基本达到饱和状态, 水分限制作用不再存在, 而是水热组合限制因子。这与 Lee 等^[23]的研究结果相似 (图 4)。由表 2 和图 4 可以看出, 根系呼吸的季节变化模式不同于异养呼吸, 根系呼吸不仅受其他生物因子制约, 还随着本身物候变化而变化^[23, 27]。

不同因子拟合不同呼吸类型得到的 Q_{10} 值有很大差异, 与文献 [22–26–28] 的研究结果相似。总体上, 季节雨林内各呼吸类型的 Q_{10} 值大于橡胶林, 说明季节雨林内的呼吸对温度的响应比橡胶林更敏感; 异养呼吸最大而根系呼吸最小, 表明异养呼吸对温度变化的响应机制有别于根系呼吸^[23], 在全球变暖的情况下, 单从土壤呼吸的角度研究碳通量的变化和响应机制是不够的。季节雨林内土壤呼吸的 Q_{10} 值为 2.948~3.086 高于 Sha 等^[13] 用气相色谱法获得的 2.03 和房秋兰等^[14] 碱吸收法的 2.16 而橡胶林为 1.332~1.548 低于房秋兰等^[14] 的 2.18 而且二者均低于周海霞等^[29] 在温带地区的研究结果 (3.07~3.61)。这是因为 Q_{10} 不但受水热等环境因子影响, 还受生物因子、物候变化、季节交替和研究方法的影响^[28]。

3.2 土壤呼吸组分的贡献率

季节雨林异养呼吸对土壤呼吸的贡献率大于橡胶林, 但根系呼吸的贡献率小于橡胶林, 差异极显著。季节雨林和橡胶林是 2 种层次结构差异很大的林型, 季节雨林层次结构极其复杂, 密闭性好, 藤本附生植物多, 而橡胶林层次结构简单, 土壤有机质、全氮全磷含量、地下凋落物、根生物量、微生物量、土壤动物丰富度均不及季节雨林^[15] (表 1)。因此, 季节雨林的土壤动物、地下凋落物和微生物等呼吸在土壤总呼吸中所占比重很大, 而橡胶林相应组分对土壤总呼吸的贡献率相对较小。

季节雨林和橡胶林根系呼吸对土壤呼吸的贡献率 (6%~51% 和 21%~77%) 偏低与其他同类研究的范围 (10%~90%), 与刘颖等^[21] 的 26.5%~52.6%、Rodeghiero 等^[30] 自养呼吸占土壤呼吸的 16%~58% 基本一致。由于本研究的根系呼吸是通过土壤呼吸减去异养呼吸得到的, 当切根小区死根未分解完全时, 间接得到的根系呼吸主要为活根自养呼吸。因此, 根系呼吸对土壤呼吸贡献率偏低而异养呼吸偏高。根分解呼吸、无根土呼吸究竟占多大比重还有待进一步研究。

4 结 论

季节雨林内土壤呼吸和异养呼吸速率均极显著大于橡胶林, 而根系呼吸速率差异不显著。土壤温湿度是影响土壤呼吸及其组分季节变化的主要因子, 季节雨林和橡胶林土壤呼吸及其组分有明显的季节变化: 雨季高、干季低。季节雨林根系呼吸对土壤呼吸的贡献率极显著小于橡胶林, 异养呼吸则相反。

致谢 本研究得到中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站、土壤生态组生物地球化学实验室的大力支持和刘梦楠、陈志玲和周志华的帮助, 一并感谢!

参考文献

- [1] Valentini R, Matteucci G, Dolman AJ, *et al*. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, **404**: 861–865
- [2] Raich JW, Potter CS, Bhagavati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–1994. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 800–812
- [3] Veenendaal EM, Kolle O, Llyd J. Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mopane woodland) in southern Africa. *Global Change Biology*, 2004, **10**: 318–328
- [4] Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, *et al*. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, **281**: 237–240
- [5] Dixon RK, Brown S, Houghton RA, *et al*. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, **263**: 185–190
- [6] Mahi Y, Grace J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, **15**: 332–337
- [7] Houghton RA. Revised estimates of the annual net flux of C to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000. *Tellus*, 2003, **55**: 378–390
- [8] Zhu H (朱 华). The tropical rain forest vegetation in Xishuangbanna. *Tropical Geography* (热带地理), 1990, **10**(3): 233–240 (in Chinese)
- [9] Li HM, Aile TM, Ma YX, *et al*. Demand for rubber is causing the loss of high diversity rain forest in SW China. *Biodiversity and Conservation*, 2007, **16**: 1731–1745
- [10] Xu M, Qi Y. Soil surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variation in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, **7**: 667–677
- [11] Soe ARB, Buchmann N. Spatial and temporal variations in soil respiration in relation to stand structure and soil parameters in an unmanaged beech forest. *Tree Physiology*, 2005, **25**: 1427–1436
- [12] Maestre FT, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semi-arid steppe. *Applied Soil Ecology*, 2003, **23**: 199–209
- [13] Sha LQ, Zheng Z, Tang JW, *et al*. Soil respiration in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Yunnan.

- SW China *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, **48**: 189–197
- [14] Fang Q-L (房秋兰), Sha L-Q (沙丽清). Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna Yunnan, SW China *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2006, **30** (1): 97–103 (in Chinese)
- [15] Ren Y-H (任泳红), Cao M (曹敏), Tang JW (唐建维), *et al.* A comparative study on litterfall dynamics in a seasonal rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna Yunnan, SW China *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1999, **23**(5): 418–425 (in Chinese)
- [16] Kiese R, Butterbach-Bahl K. N_2O and CO_2 emissions from three different tropical forest sites in the wet tropics of Queensland Australia *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**: 975–987
- [17] Fernandes SAP, Bernoux M, Cerri CC, *et al.* Seasonal variation of soil chemical properties and CO_2 and CH_4 fluxes in unfertilized and P-fertilized pastures in an Ultisol of the Brazilian Amazon *Geoderma*, 2002, **107**: 227–241
- [18] Kunsar TA. Evaluation of soil respiration and soil CO_2 concentration in a lowland moist forest in Panama *Plant and Soil*, 1989, **113**: 21–29
- [19] Hashimoto S, Tanaka N, Suzuki M, *et al.* Soil respiration and soil CO_2 concentration in a tropical forest Thailand *Journal of Forest Research*, 2004, **9**: 75–79
- [20] Adachi M, Bekku SY, Rashidah W, *et al.* Differences in soil respiration between different tropical ecosystems *Applied Soil Ecology*, 2006, **34**: 258–265
- [21] Meng C (孟春), Wang L-H (王立海), Shen W (沈微). Effects of selective cutting on soil respiration in conifer/broad-leaved mixed forests in Xiaoxing'anling *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(4): 729–734 (in Chinese)
- [22] Liu Y (刘颖), Han S-J (韩士杰), Hu Y-L (胡艳玲), *et al.* Effects of soil temperature and humidity on soil respiration rate under *Pinus sylvestris* forest *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(9): 1581–1585 (in Chinese)
- [23] Lee M, Nakane K, Nakatsubo T, *et al.* Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest *Plant and Soil*, 2003, **255**: 311–318
- [24] Yi ZG, Fu SL, Yi WM, *et al.* Partitioning soil respiration of subtropical forests with different successional stages in south China *Forest Ecology and Management*, 2007, **243**: 178–186
- [25] Edwards NT. Effects of temperature and moisture on carbon dioxide evolution in a mixed deciduous forest floor *Soil Science Society of America Journal*, 1975, **39**: 361–365
- [26] Hanson PJ, Wullschlegel SD, Bohman SA, *et al.* Seasonal and topographic patterns of forest floor CO_2 efflux from an upland oak forest *Tree Physiology*, 1993, **13**: 1–15
- [27] Jia B-R (贾丙瑞), Zhou G-S (周广胜), Wang F-Y (王凤玉), *et al.* Affecting factors of soil microorganism and root respiration *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(8): 1547–1552 (in Chinese)
- [28] Boone RD, Nadelhoffer KJ, Canary JD, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration *Nature*, 1998, **396**: 570–572
- [29] Zhou H-X (周海霞), Zhang Y-D (张彦东), Sun H-L (孙海龙), *et al.* Soil respiration in temperate secondary forest and *Larix gmelinii* plantation in Northeast China *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(12): 2668–2674 (in Chinese)
- [30] Rodeghiero M, Cescatti A. Indirect partitioning of soil respiration in a series of evergreen forest ecosystems *Plant and Soil*, 2006, **284**: 7–22

作者简介 卢华正,男,1978年生,硕士研究生.主要从事土壤生态和环境生态学研究,发表论文2篇. E-mail: luhua-zheng@xtbg.org.cn

责任编辑 李凤琴