

西双版纳三叶橡胶林树干呼吸特征

严玉平^{1,2,3}, 沙丽清^{1,*}, 曹 敏¹

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; 2. 江西省遥感信息中心, 南昌 330046;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 采用红外气体分析法 (IRGA) 为期 1a 原位监测西双版纳三叶橡胶 (*Hevea brasiliensis*) 4 个年龄段 (7、15、27、40a) 的树干呼吸情况, 同时对每个年龄段树干监测 2 种高度 (1.3 m-割胶部位、2.0 m-不割胶部位) 和 2 个方向 (南、北面) 以及林内空气和树干 1cm 深温度。结果表明, 4 个年龄的树干呼吸有相同的季节规律, 都是在雨季大于干季。林龄是影响橡胶树树干呼吸的一个重要因素, 15、27a 树干呼吸速率最大, 分别为 (4.989 ± 0.278) , $(4.678 \pm 0.268) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 显著高于 40a 和 7a 树, 40a 树 $((3.753 \pm 0.205) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 显著大于 7a 树 $((2.299 \pm 0.129) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 。所研究的高度和方向上树干呼吸速率无差异, 割胶对树干表层破坏愈合后并不影响树干呼吸。树干呼吸与树干温度呈显著相关性, 有良好的自然指数回归关系, Q_{10} 值为 1.966 ~ 3.127, 南北面 Q_{10} 差异不明显, 4 个年龄段树干呼吸 Q_{10} 值平均为 2.452, 大于已监测的热带树种。各年龄段橡胶林的主干 (一级分枝以下部分树干) 呼吸初步估算表明, 7、15、27a 和 40a 橡胶树主干呼吸分别为 1.74, 5.54, 7.53, 7.59 $\text{t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

关键词: 橡胶树; 林龄; 树干呼吸; 季节变化; Q_{10}

文章编号: 1000-0933(2009)04-1840-09 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Stem respiration characteristics of rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations in Xishuangbanna

YAN Yu-Ping^{1,2,3}, SHA Li-Qing^{1,*}, CAO Min¹

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

2 Jiangxi Remote Sensing and Geo-information System Center, Nanchang 330046, China

3 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1840 ~ 1848.

Abstract: Stem respiration is an important component of the carbon budget in forest stands. Some data for temperate and boreal zones were available, while stem respiration in rubber plantation was not found. In the present study, we made in situ chamber measurements of the stem respiration for 4 ages (7, 15, 27, and 40-year-old) of rubber plantations in Xishuangbanna using an infra-red gas analyzer (IRGA) method. LI-820 CO₂ gas analyzer was connected to a custom-built polyvinyl chloride (PVC) chamber. The chamber was fastened to the stem surface using thin neoprene gaskets with a strap at sampling time. The stem respiration rates of rubber were measured in the south and north sections at 1.3 m and 2.0 m height from March 2004 to February 2005. Measurements were taken once every month. Temperature at 1 cm depth of stem and air temperature in plantations were recorded concurrently. The tendencies of stem respiration in 4 plantations were in remarkable single-peak patterns with high rates during wet season and low rates during dry season. The stem respiration rates for 7, 15, 27, and 40-year rubber were (2.299 ± 0.129) , (4.989 ± 0.278) , (4.678 ± 0.268) , and $(3.753 \pm 0.205) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. Respiration rates were significantly higher for 15a and 27a trees than 40a and 7a tree

基金项目: 云南省自然科学基金资助项目 (2004C0052M); 中国科学院知识创新工程重大资助项目 (KZCX1-SW-01); 国家自然科学基金资助项目 (40173039)

收稿日期: 2007-11-26; 修订日期: 2008-09-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shalq@xtbg.ac.cn

($P < 0.05$), and it significantly higher in 40a tree than that in 7a tree. The stem respiration rates of rubber were similar at the same height in north and south sections and it also similar at 1.3 m and 2.0 m of the same section. Relationship between stem respiration rates and temperature were analyzed. There was an exponential correlation between stem respiration rate and stem temperature ($P < 0.01$). The Q_{10} values for stem respiration of 4 age trees varied from 1.966 to 3.127, and the average Q_{10} value of 4 ages trees was 2.452, which was high compared with the range of Q_{10} values (1.60–2.38) reported in previous studies in tropical trees and were close to other trees in China (1.96–3.33). Annual stem respiration rates (except branches) of 7, 15, 27, and 40-year-old forests were estimated and they were 1.74, 5.54, 7.53, 7.59 $\text{t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively.

Key Words: rubber tree; tree age; stem respiration; seasonal change; Q_{10}

自养呼吸是造成森林生态系统生产力差异的一个关键过程^[1],能消耗自身叶片光合作用固定碳的 50%~70% 以上^[2,3]。尽管木质组织呼吸在不同群落中差异很大,一般认为占有较大比例,能消耗初级生产力 (GPP) 的 6%~50%^[3~9]。树干是组成森林木质组织的重要部分,对森林总自养呼吸的贡献率从 12% (松属类)~42% (温带森林)^[10~12],但由于树干呼吸测定技术限制^[13],该方面的研究还不充分。热带森林约占世界森林总面积的 60%^[14],所处地方气温高,通常被认为具大的呼吸速率,近年研究表明热带雨林地上木质组织呼吸贡献占该生态系统 GPP 的 10%~13%^[15~17],早期对热带森林的估计值更大,认为在 23%~50% 之间^[15,18],这种差异不仅来自森林类型的不同,还可能前后两个时期所采用测量方法的不同。此外,监测时间的长短和样本数量,在尺度放大时也会影响估算结果。树干呼吸对大气温度反应较为敏感,以及大气中 CO_2 浓度升高能增加树干呼吸总量^[6,13,19],表明全球变化会对森林生态系统固碳能力产生影响,而树干呼吸向大气输送 CO_2 反过来也影响大气 CO_2 浓度,所以有必要研究各地区各种树干呼吸特征。

西双版纳热带雨林是世界上第二大热带雨林(远东热带雨林)的重要组成部分^[15],位于该区北缘水热和海拔高度极限条件^[20]。自 20 世纪 60 年代初期,三叶橡胶(*Hevea brasiliensis*)引种该区,生长良好,产生较高的经济价值,目前该地区的热带雨林,进行了大规模的橡胶林种植活动,至 20 世纪 80 年代,橡胶林种植面积占有林地面积的 25.9%^[21],近年来,橡胶林的种植面积进一步增加,目前面积已超过 $1.73 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[22]。我国树干呼吸的研究多集中在针叶树种,监测时间较短,通常不到一年^[23~25],西双版纳树干呼吸研究则刚开始^[26]。本研究利用红外气体分析法(IRGA),为期 1a,原位监测西双版纳 4 个主要种植林龄的三叶橡胶树干呼吸,探讨它们的树干呼吸速率变化特征,林龄、方向和割胶对树干呼吸的影响,并阐明树干呼吸对温度的响应情况,为构建森林生态系统碳循环模型,了解该地区生态系统碳收支状况、全球变化可能对橡胶林树干呼吸产生的影响和对橡胶林生产力的影响提供基础资料。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区

实验材料来自 4 个三叶橡胶林,位于中国科学院西双版纳热带雨林生态系统定位研究站(在云南省西双版纳州勐腊县勐仑镇,21°56'N, 101°16'E,海拔 580~600 m)附近,林龄分别为 7、15、27a 和 40a,皆为单一树种林,采用宽窄行相间的种植方式(株距 2.5~3.0 m,窄行行距 2.5~4.0 m,宽行行距 17.0~22.0 m)。7a 树还未开始割胶,平均每公顷种植 625 株,林冠平均高度 12.4 m,叶面积指数在 2.5~3.0 之间。15a、27a 树正处在割胶的壮年树(一般从第 8 年开始割胶),每公顷种植平均分别为 486 株和 450 株,平均林冠高度分别为 16.2 m 和 24.4 m,两林都已封行,叶面积指数都在 3.0~3.5 之间。40a 树则已停止割胶,平均每公顷种植 380 株,平均林冠高度为 24.6 m,叶面积指数约为 3.0~3.5 之间。割胶部位为从南(或北)面由下 0.2 m 割至 1.5 m,每年约割去长为 0.2 m 的树皮,至 1.5 m 处后换成另一侧再割。所测 1.3 m 部位测量当年未割胶,新周皮已长好。据中国科学院热带生态站气象站多年资料,实验地区年均温为 21.4℃,年均降雨量为 1557

mm,其中雨季(5~10月份)为1355 mm,占全年的87%,干季(11~翌年4月份)为202 mm,仅占年降雨量的13%,全年平均相对湿度为86%。

1.2 树干呼吸测定

1.2.1 树干呼吸测定

从2005年3月上旬至2006年2月上旬,每月1次对样本树进行原位树干呼吸速率测量,测量位置是树干1.3、2.0 m处,南北两个方向。采用Li-820 CO₂气体分析仪(Li-Cor, Inc. Lincoln, N)集中在每月中旬数个8:00~11:00期间进行树干呼吸测量。除15a橡胶林样本数为3以外(该年龄段树每月还同时还采集日变化情况,如果样本数过多,时间上安排不过来,特别是在雨季),其它橡胶林树样本数为4。树干呼吸监测方法参考前人实验的活体监测法^[16, 23, 24, 27],结合实际情况做相应改进,具体制作见严玉平等^[26]。

1.2.2 气室体积及覆盖面积测定

利用气室一端的两孔向气室内注水,所注入水的体积即为气室体积。由于橡胶树树干笔直、光滑,气室与树干相接触的面展开后呈长方形,用纸条紧贴于弧度侧(上下两端平行于树干横切面接触侧),测量该纸条长即为上下边长,与树干垂直接触的两边用直尺直接测量,计算后得出所覆盖面积。

1.2.3 树干和空气温度的测量

对1.3 m和2.0 m南北方向树干温度监测,经过多次监测比较,两侧温度基本一致,所以树干温度则固定在样本树的一个点进行监测,减少对样本树的破坏。具体是用钉子在树干1.3 m高西侧打一个深约1 cm的小孔,在进行CO₂气体测量时用长杆电子温度计(long-stem soil thermometers, USA)插入该小孔,数值稳定后读数,之后取出温度计放在离地面约1.3 m高处测量空气温度。

1.2.4 树干表面积测定

仅测主干(一级分枝以下部分树干)表面积。在实验结束后,用精度为0.5 cm的皮尺分段测量,累积各段表面积为树干主干表面积,样本树为5。

1.2.5 气象资料

由中国科学院热带生态站气象站提供气象资料。

1.2.6 树干呼吸计算

Li-820-CO₂气体分析仪测量出的结果是气室内CO₂浓度增加速率,可由公式(1)计算树干CO₂呼吸速率:

$$R_t = \frac{V}{S} \frac{dC_t}{dt} \quad (1)$$

式中, V 为气室体积, S 为气室所覆盖的树干表面积, dC_t/dt 为气室内CO₂浓度变化率。

用公式(2)拟合树干呼吸速率与树干及空气温度间的关系^[28, 29]:

$$R_t = \beta e^{kT} \quad (2)$$

式中, R_t 为树干呼吸速率, T 为树干或空气温度, β 和 k 为常数。

Q_{10} 的计算: Q_{10} 是温度每增加10℃树干呼吸速率增加的倍数,利用公式(3)可计算 Q_{10} ^[28]:

$$Q_{10} = e^{10k} \quad (3)$$

1.2.7 统计分析

不同树龄段间树干呼吸比较,同一树龄不同方向和高度树干呼吸的比较均采用单因子ANOVA中的LSD检验,树干呼吸速率与温度的相关性及相关分析分别采用Bivariate及指数模型方法,以上分析在SPSS 10.0软件上进行。

2 结果与分析

2.1 树干呼吸速率一般特征

西双版纳地区有明显的两季,即干季和雨季,雨季通常发生在5月初至10月底,此时气温较高(图1),11月初至来年4月底降雨量小,为干季,气温较低(图1)。4个橡胶林林中气温和树干温度有着明显的相似的

季节变动,都是在雨季高于干季。分析表明,树干温度(T_{stem})与林中气温(T_{air})有着良好的线性关系,其关系如下:

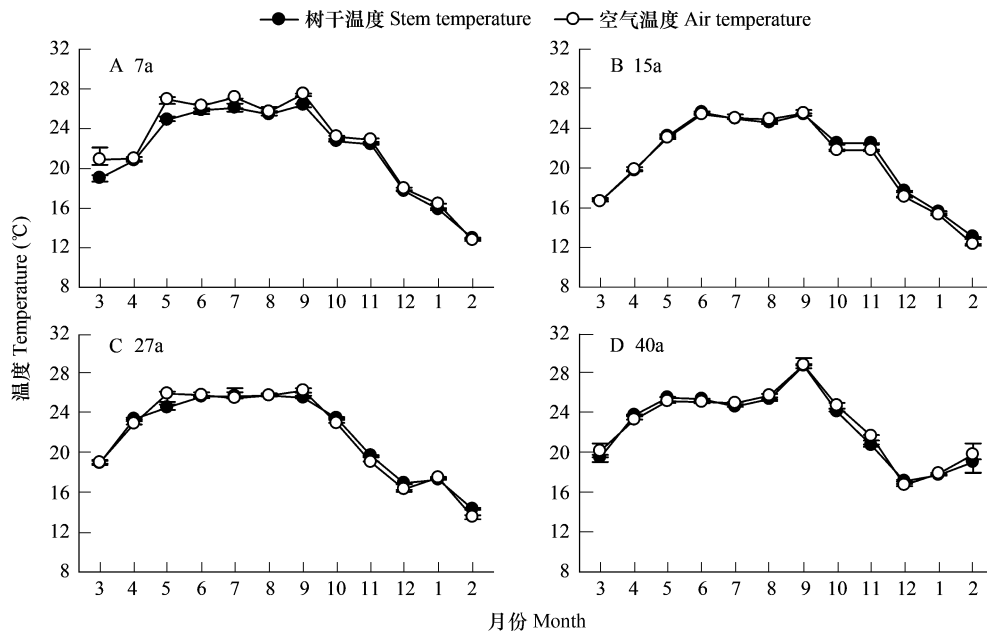


图1 橡胶林树干和空气温度季节动态变化

Fig. 1 Seasonal variations of stems and air temperature in rubber plantations

7a 橡胶林	$T_{\text{stem}} = 0.922T_{\text{air}} + 1.143$	$r^2 = 0.97$
15a 橡胶林	$T_{\text{stem}} = 0.945T_{\text{air}} + 1.323$	$r^2 = 0.99$
27a 橡胶林	$T_{\text{stem}} = 0.899T_{\text{air}} + 2.222$	$r^2 = 0.98$
40a 橡胶林	$T_{\text{stem}} = 0.950T_{\text{air}} + 0.905$	$r^2 = 0.96$

4个橡胶树树干呼吸表现出几乎一致的季节动态模式,都是在9月份最大,2月份最小(图2),只是表现在方向略有所不同。7a树干呼吸1.3 m处北面9月份时最大($(4.098 \pm 0.606) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),2.0 m北面2月最小($(0.718 \pm 0.080) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);15a树树干呼吸2.0 m北面于9月份最大($(8.814 \pm 1.117) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),1.3 m北面2月最小($(1.880 \pm 0.099) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);27a树树干呼吸2.0 m南面9月份最大($(8.175 \pm 0.654) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),2.0 m北面2月份最小($(1.784 \pm 0.672) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);40a树树干呼吸1.3 m南面9月份达最大值($(7.396 \pm 0.205) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),2.0 m北面2月份最小($(1.458 \pm 0.348) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。将两季分开对树干呼吸比较,同龄同部位干季树干呼吸在 $p < 0.01$ 水平上极显著性小于雨季(表1)。

2.2 方向、高度以及割胶对树干呼吸的影响

比较同龄橡胶树的同一高度南北两方向树干呼吸速率,4个年龄段橡胶树南北两方向速率无论是在干季还雨季,都没有显著性差异,即树干呼吸不受方向的影响(表1)。同一年龄树的同一方向不同高度,4个年龄段橡胶树不同高度速率无论是在干季还雨季,都没有显著性差异,即树干呼吸不受高度的影响(表1)。7a橡胶树1.3 m和2.0 m处都没有割胶,而15、27a的树1.3 m为割胶处,只是在监测年份前二三年割胶,树干新周皮已长出,这两个林龄树体两种高度上呼吸无差别则表明树干割胶后一旦新周皮形成后,树干呼吸不受影响。

2.3 年龄对树干呼吸速率的影响

比较同一高度相同方向,不同树龄间树干呼吸有显著性差异(表1)。因为大部分同年龄段树干呼吸无方向 and 高度上差异,分别合并干、雨季各部位和高度树干呼吸速率数据,7a橡胶树干雨季分别都在 $p < 0.01$ 水

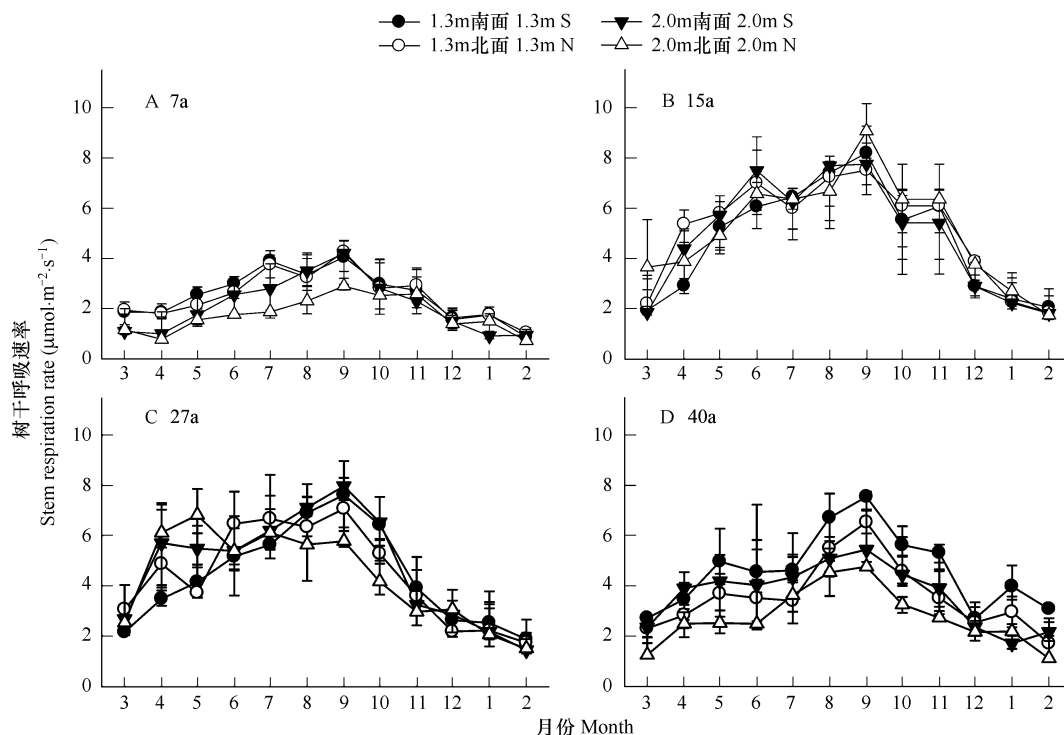


图2 橡胶树不同方位和高度树干呼吸季节动态变化

Fig. 2 Seasonal dynamics of stem respiration in different direction and height

平上显著小于相应的 40a 树干呼吸量, 40a 橡胶树树干呼吸在干季与 27a 树无差异, 而显著小于 15a 树干呼吸, 但 40a 橡胶树在雨季于 $p < 0.01$ 水平上显著小于 15、27a 树, 15、27a 橡胶树树干呼吸同季间无差异 (图 3)。

进一步比较同林龄橡胶树树干呼吸速率 4 个测量部位全年平均值, 发现 15、27a 树干呼吸速率最大 (分别为 (4.989 ± 0.278) , (4.678 ± 0.268) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 它们之间无显著性差异, 两者都在 $p < 0.01$ 水平上显著大于 40a 树 ((3.753 ± 0.205) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。40a 树干呼吸速率在 $p < 0.01$ 水平上显著大于 7a 树 ((2.299 ± 0.129) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

2.4 树干呼吸速率对温度的响应 (Q_{10}) 及橡胶林树干呼吸估算

对不同年龄橡胶树干呼吸速率与树干温度进行相关性分析, 所有速率都与温度有显著性的相关, 进一步回归分析表明, 与其它热带树种一样存在有模拟很好的自然指数回归方程, r^2 在 0.61 ~ 0.97 之间, 大部分 r^2 在 0.80 以上。40a 树干呼吸速率与树干温度的响应相对较小, Q_{10} 在 1.966 ~ 2.413 之间, 15、27a 树则相对较大, 在 2.601 ~ 3.127 之间, 而 7a 树处在中间, 在 2.119 ~ 2.467 (表 2)。

鉴于本文研究尚未确定高位置的树干 (枝) 呼吸特征, 所以本文研究结果还不能准确估算整体森林地上部分木质部分呼吸量, 仅对橡胶树主干 (树干一级分枝以下部分) 呼吸进行估算。经测定, 7、15、27a 和 40a 橡

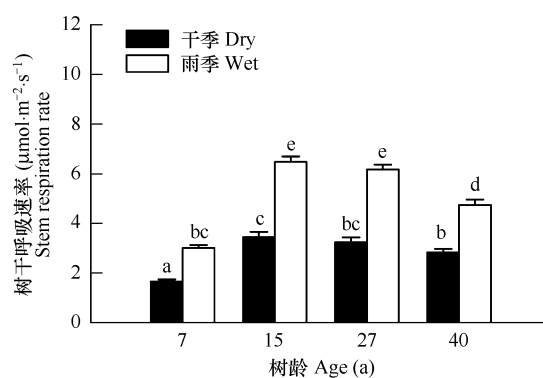


图3 不同年龄橡胶树干雨季平均树干呼吸比较

Fig. 3 Compare of average stem respiration rates among different age rubber tree and between two seasons

柱上方字母不同表示在 $p < 0.05$ 水平上有显著性差异 The different letters on the top of bar showed significant differences at 5% based on LSD

胶树主干高度平均为 4.30、2.58、3.30、4.57 m, 每株平均主干表面积分别为 1.40、2.24、3.84、6.25 $\text{m}^2 \cdot \text{tree}^{-1}$, 结合年龄段树林种植密度, 推算出各树林每公顷主干表面积分别为 873.86、1090.68、1726.51、2376.36 m^2 。根据中国科学院热带生态站气象站 2005 年 3 月 1 日至 2006 年 2 月 28 日气象资料, 利用 4 个年龄段林中气温与树干温度的线性关系(见本节第一部分)估算各林树干温度, 通过树干呼吸与树干温度的指数关系, 结合各树林主干表面积, 估算出 7、15、27a 和 40a 橡胶树主干呼吸分别为 1.74、5.54、7.53、7.59 $\text{t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3 讨论

4 个年龄段橡胶树树干呼吸有着明显的季节性变化规律, 这种现象在已监测大多树种结果一致^[23, 30], 这是因为树干呼吸不仅与气温有关, 树干生长呼吸还与木质部的生长呈显著性正相关^[23, 31, 32]。样地所在地区的雨季是植物主要生长季, 特别在 8、9 月份不仅雨水充沛, 而且气温较高(图 1), 橡胶树生长迅速, 因而用于橡胶生长(木质部形成层活动)的呼吸较大, 叠加周年都具有的维持呼吸, 表现为这一时期总树干呼吸较大。该地区干季的 11、12 月份尽管降雨较小, 但几乎每天都有浓雾, 持续时间长, 几近中午, 大气保持了较高的湿度, 植物仍有一定的生长, 由于大气温度逐渐降低, 生长速度开始减缓, 至 2 月份时温度最低(图 1 A、B、C), 空气和土壤湿度较小, 这个时期橡胶树有一个约 20d 左右的落叶期, 橡胶树生长几乎停滞, 树干呼吸逐步回落, 因而树干呼吸在此月份也最小(图 2 A、B、C)。对 40a 树 2 月份由于监测当天气温偏高(图 1D), 尽管处在落叶期, 其树干呼吸速率并不小于 12、1、3 月份(图 2D), 这是大气温度较高时树木的维持呼吸也较大之故。

由于地处热带这种特殊的地理位置, 太阳高度角大, 树干各方向在一天中总有可能得到阳光照射, 而且受到的光照大部分来自穿过树冠的光斑, 树干温度主要受林中大气影响, 从而树干温度南北两面几乎一致, 这与 24h 监测结果相同^[26], 这一点显然与我国北方森林树干呼吸方向上存在差异显然不同^[23], 其主要原因在于北方森林树干南北面受阳光照射不均, 造成树干在不同方向的温度差异, 导致树木不同方向的生理活动存在差别引起。

所测高度树干呼吸无显著差异, 这与目前其它地区已有的实验结果并不一致^[4, 25]。本研究树干两个高度的差距较小, 所测的高度为 1.3 m 和 2.0 m, 而 Damesin 所测高度分别在 0.5、1.3、6.5 m 和 12.25 m 处^[4], Wang 分别在 1.3 m 和 12.0m 处^[25], 所测树干高度差距大, 树干所处环境相差也大, 造成树干呼吸高度上的差别最大可能就是来自树干温度的不同, 以及距离相差较大的树干(枝)还存在年龄上的差别, 这也影响树干

表 1 不同树龄橡胶树不同季节树干呼吸量

Table 1 Stem respiration of rubber trees with different age and season

树龄 Age (a)	部位 Location	树干呼吸 Stem respiration ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	
		干季 Dry Season	雨季 Wet Season
7	1.3m 南 South	1.836 $\pm$ 0.195 ^a (24)	3.295 $\pm$ 0.220 ^A (24)
	1.3m 北 North	1.828 $\pm$ 0.174 ^a (24)	3.224 $\pm$ 0.241 ^A (24)
	2.0m 南	1.531 $\pm$ 0.205 ^a (24)	3.104 $\pm$ 0.302 ^A (22)
	2.0m 北	1.439 $\pm$ 0.154 ^a (23)	2.448 $\pm$ 0.193 ^A (22)
15	1.3m 南	3.208 $\pm$ 0.359 ^c (18)	6.126 $\pm$ 0.397 ^C (18)
	1.3m 北	3.576 $\pm$ 0.468 ^c (17)	6.517 $\pm$ 0.355 ^C (17)
	2.0m 南	3.237 $\pm$ 0.390 ^c (18)	6.603 $\pm$ 0.521 ^C (18)
	2.0m 北	3.790 $\pm$ 0.482 ^c (18)	6.717 $\pm$ 0.418 ^C (18)
27	1.3m 南	2.93 $\pm$ 0.209 ^c (22)	5.977 $\pm$ 0.310 ^C (24)
	1.3m 北	3.084 $\pm$ 0.271 ^c (23)	6.289 $\pm$ 0.434 ^C (23)
	2.0m 南	3.37 $\pm$ 0.430 ^c (22)	6.652 $\pm$ 0.440 ^C (24)
	2.0m 北	3.339 $\pm$ 0.401 ^c (23)	5.813 $\pm$ 0.353 ^C (24)
40	1.3m 南	3.329 $\pm$ 0.239 ^c (23)	5.701 $\pm$ 0.482 ^C (23)
	1.3m 北	2.782 $\pm$ 0.278 ^{bc} (23)	4.668 $\pm$ 0.395 ^B (23)
	2.0m 南	2.835 $\pm$ 0.276 ^b (23)	4.904 $\pm$ 0.405 ^{BC} (23)
	2.0m 北	2.120 $\pm$ 0.169 ^{ab} (20)	3.724 $\pm$ 0.306 ^B (23)

* 表中同一栏数据上标字母不同表示达到 5% 差异显著水平, $\pm$ 后数据为标准误差, 下文括号内数字为样本数 Values in the same columns that do not contain the same letters are significantly different at the 5% level based on LSD; Standard errors (following $\pm$) and sample number (in parentheses) are listed

(枝)的生理活动。本研究所测树干两个高度的差距小应该是高度不影响树干呼吸的主要原因。

表 2 橡胶树干呼吸速率与温度的响应

Table 2 Temperature responses for stem respiration rate of rubber tree (*Hevea brasiliensis*)

树龄 Age (a)	胸径 DBH (cm)	高度 Height (m)	南(South)					北(North)					总 Q10 Total Q10
			R_t	k	β	Q_{10}	r^2	R_t	k	β	Q_{10}	r^2	
			($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)					($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)					
7	14.5 ± 0.7	1.3	2.049	0.090	0.338	2.462	0.89	2.051	0.082	0.395	2.280	0.83	2.321
		2.0	1.766	0.090	0.295	2.447	0.83	1.535	0.075	0.342	2.119	0.72	
15	23.6 ± 1.3	1.3	3.936	0.098	0.558	2.656	0.92	4.133	0.107	0.485	2.918	0.90	2.784
		2.0	4.034	0.106	0.485	2.883	0.94	4.376	0.099	0.610	2.678	0.93	
27	31.4 ± 0.7	1.3	3.460	0.096	0.511	2.601	0.78	3.769	0.114	0.386	3.127	0.97	2.846
		2.0	3.772	0.108	0.434	2.948	0.94	3.525	0.103	0.448	2.804	0.88	
40	47.6 ± 6.2	1.3	3.707	0.068	0.959	1.966	0.61	2.967	0.071	0.723	2.026	0.66	2.134
		2.0	2.938	0.088	0.505	2.413	0.86	2.262	0.077	0.484	2.162	0.64	
													2.452

树的大小与树龄有关,同一林龄树干胸径相差不大(表 2),树干大小(树龄)能影响树干呼吸速率^[23, 33],因此在本研究中所观测到的年幼及年长的树干呼吸速率要小于生长更为旺盛的中年树,这一现象主要与树干的生理活动有密切关系,生理活动越强,则呼吸速率越大。4 个橡胶林中虽然存在树龄引起呼吸差异,但这些值仍在已测的热带雨林树干呼吸的范围之内($0.1 \sim 5.2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)^[16, 17],15, 27a 树树干呼吸要大于大部分已测热带树种,这可能与橡胶树受人工施肥的影响,因为施肥能显著加大树干呼吸速率^[34]。

大量研究表明树干呼吸的 Q_{10} 范围大部分在 1.0 ~ 3.0 之间^[2, 35, 36],分析比较常绿林木 Q_{10} 值的算数平均数和中位数稍高于落叶树种^[36],热带树种的 Q_{10} 在更小的范围内变化(1.6 ~ 2.38)^[16, 17, 37]。4 个林龄的橡胶树树干呼吸 Q_{10} 值在 1.966 ~ 3.127 范围之间,南北面 Q_{10} 差异不明显,4 个年龄段树干呼吸 Q_{10} 值平均为 2.452 (表 2),高于哥斯达黎加、亚马逊和喀麦隆热带雨林(分别为 2.2, 1.90, 1.65)^[16, 37],在我国北方针叶林(1.96 ~ 3.53)变幅之内^[23 ~ 25]。橡胶树在原产地为常绿树种,但在西双版纳地区则表现为具一个短暂落叶期的树种,其生理活动季节模式类似北方落叶树种,此外,木质组织中含 N 量多少是引起树干维持呼吸差别的主要原因^[2, 38],橡胶生产上在开胶前一个月左右和割胶中期施用化肥(主要为氮磷钾肥),由于养份充足,从而有较大的维持呼吸,而维持呼吸对温度的响应较敏感^[39, 40],即 Q_{10} 值就大。相比其它热带树种,橡胶树具较高的 Q_{10} ,当全球变化引起大气温度升高时,树干呼吸增加幅度较大,可能会导致橡胶林生物量积累下降,生产力减小。

尽管本文对主干呼吸做了估算,但显然无法将所得结果用于推算到所有地上部分木质部呼吸,这是因为利用 Li-820 CO₂ 气体分析仪的方法对小树枝,包括较小年龄的树干(小于 10 cm),以及高位位置的树干呼吸特征研究存在较大困难,这也是本文没有监测较高部位树干和树枝的原因,本文研究结果不能说明高于 2.0 m 以上的树干呼吸,特别是像西双版纳湿性季节雨林,林冠较高,高位位置树干和树枝呼吸特征仍然是值得继续探索的问题。此外,在更大尺度上估算树干呼吸,除了需要有树干呼吸单位表面积的呼吸特征,还需要一个基本参数,即单位林地整个树干表面积,橡胶树与大部热带雨林树种表现为树体高直,树皮光滑,但找出简便可行和准确估算森林树干表面积的方法同样非常重要,这为快速估算整个树干呼吸通量打好基础。对于不像橡胶林林相如此整齐的树林,除了考虑树种的影响,同时还要将年龄等其它因素要加以考虑,这将增加估算的复杂度。

4 小结

由于特殊的地理位置,三叶橡胶树树干呼吸在西双版纳地区表现为南北方向无显著性差异,2.0 m 以下的树干呼吸也没有差异,而树干呼吸呈现有规律的季节模式,这种呼吸特征的发现为在更大尺度上估算该地

区树干呼吸时可以简化数据收集。树龄显著影响树干呼吸,青壮年橡胶树(15, 27a)树干呼吸大于年龄大的树(40a),年幼的树(7a)树干呼吸最小,这种年龄特性是在尺度放大时需要充分考虑的因素。树干呼吸与树干温度呈显著相关性,有良好的自然指数回归关系,表明树干温度直接影响树干呼吸,而树干温度受大气温度影响,所以在一定程度上可以推测全球变化所引起的大气温度上升会增加树干呼吸,当然全球变化也会增加森林生长过程中碳消耗,从而在估算全球变化对森林群落生产力的影响时要考虑树干呼吸。

References:

- [1] Valentini R, De Angelis P, Matteucci G, *et al.* Seasonal net carbon dioxide exchange of a beech forest with the atmosphere. *Global Change Biology*, 1996, 2: 199 – 207.
- [2] Ryan M G. A simple method for estimating gross carbon budgets for vegetation in forest ecosystems. *Tree Physiology*, 1991, 9: 255 – 266.
- [3] Ryan M G, Gower S T, Hubbard R M, *et al.* Woody tissue maintenance respiration of four conifers in contrasting climates. *Oecologia*, 1995, 101: 133 – 140.
- [4] Damesin C, Ceschia E, Le Goff N, *et al.* Stem and branch respiration of beech: from tree measurements to estimations at the stand level. *New Phytologist*, 2002, 153: 159 – 172.
- [5] Granier A, Ceschia E, Damesin C, *et al.* Carbon balance of a young beech forest over a two-year experiment. *Functional Ecology*, 2000, 14: 312 – 325.
- [6] Lavigne M B, Franklin S E, Hunt E R Jr. Estimating stem maintenance respiration rates of dissimilar balsam fir stands. *Tree Physiology*, 1996, 16 (8): 687 – 695.
- [7] Lavigne M B, Ryan M G, Anderson D E. Comparing nocturnal eddy covariance measurements to estimates of ecosystem respiration made by scaling chamber measurements at six coniferous boreal sites. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 28: 977 – 985.
- [8] Law B E, Ryan M G, Anthoni P M. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem. *Global change Biology*, 1999, 5: 169 – 182.
- [9] Ryan M G, Lavigne M B, Gower S T. Annual carbon balance cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystems in relation to species and climate. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 28871 – 28883.
- [10] Ryan M G, Hubbard R M, Pongracic S, *et al.* Foliage, fine-root, woody-tissue and stand respiration in *Pinus radiata* in relation to nutrient status. *Tree Physiology*, 1996, 16: 333 – 343.
- [11] Ryan M G, Waring R H. Maintenance respiration and stand development in a subalpine lodgepole pine forest. *Ecology*, 1992, 73: 2100 – 2108.
- [12] Waring R H, Schlesinger W H. *Forest Ecosystems Concepts and Management*. New York: Academic Press, 1985.
- [13] Xu M, DeBiase T, Qi Y. A simple technique using a horizontally-oriented soil chamber to measure stem respiration. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30: 1555 – 1560.
- [14] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263: 185 – 190.
- [15] Whitmore T C. *Tropical Rain Forests of the Far East*. 2nd edition. Oxford: Clarendon Press, UK, 1984.
- [16] Meir P, Grace J. Scaling relationships for woody tissue respiration in two tropical rain forests. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25: 963 – 973.
- [17] Ryan M G, Hubbard R M, Clark D A, *et al.* Woody-tissue respiration for *Simarouba amara* and *Minquartia guianensis* two tropical wet forest trees with different growth habits. *Oecologia*, 1994, 100: 213 – 220.
- [18] Yoda K. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand III. Community respiration. *Nature and Life in Southeast Asia*, 1967, 5: 83 – 148.
- [19] Edwards N T, Tschaplinski T J, Norby R J. Stem respiration increases in CO₂-enriched sweetgum trees. *New Phytologist*, 2002, 155: 239 – 248.
- [20] Zhu H. The tropical rain forest vegetation in Xishuangbanna. *Tropical Geography*, 1999, 10(3): 233 – 240.
- [21] Jiang A L. Ecological climate and botany plants of Xishuangbanna, Yunnan. *Natural Resource*, 1987, 15(2): 32 – 37.
- [22] Statistical Bureau of Yunnan Province. *Yunnan Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2005.
- [23] Wang M, Ji L Z, Li Q R, *et al.* Stem respiration of *Pinus koraiensis* in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1): 7 – 13.
- [24] Jiang L F, Shi F C, Zu Y G, *et al.* Study on stem respiration of *Larix gmelinii* of different ages and its relationship to environmental factors. *Bulletin of Botanical Research*, 2003, 23(3): 296 – 301.
- [25] Wang W J, Yang F J, Zu Y G, *et al.* Stem Respiration of a Larch (*Larix gmelini*) Plantation in Northeast China. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45 (12): 1387 – 1397.
- [26] Yan Y P, Sha L Q, Cao M. Diurnal Variation of Stem Respiration for 3 Tropical Tree Species in Xishuangbanna. *Journal of Mountain Science*,

- 2006, 24(3): 268—276.
- [27] Wang W J. Methods for the determination of CO₂ flux from non-photosynthetic organs of trees and their influences on the results. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2056—2067.
- [28] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217—227.
- [29] Lavigne M B. Differences in stem respiration responses to temperature between balsam fir trees in thinned and unthinned stands. *Tree Physiology*, 1987, 3: 225—233.
- [30] Wieser G, Bahn M. Seasonal and spatial variation of woody tissue respiration in a *Pinus cembra* tree at the alpine timberline in the central Austrian Alps. *Trees*, 2004, 18: 576—580.
- [31] Lavigne M B, Little C H A, Riding R T. Changes in stem respiration rate during cambial reactivation can be used to refine estimates of growth and maintenance respiration. *New Phytologist*, 2004, 162: 81—93.
- [32] Pruyn M L, Harmon M E, Gartner B L. Stem respiratory potential in six softwood and four hardwood tree species in the central cascades of Oregon. *Oecologia*, 2003, 137: 10—21.
- [33] Yokota T, Hagiwara A. Changes in the relationship between tree size and aboveground respiration in field-grown hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) trees over three years. *Tree Physiology*, 1998, 18: 37—43.
- [34] Maier C A. Stem growth and respiration in loblolly pine plantations differing in soil resource availability. *Tree Physiology*, 2001, 21: 1183—1193.
- [35] Amthor J S. The role of maintenance respiration in plant growth. *Plant Cell and Environment*, 1984, 7: 561—569.
- [36] Wang W J, Wang H M, Zu Y G, *et al.* Characteristics of root, stem, and soil respiration Q_{10} temperature coefficients on forest ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(4): 680—691.
- [37] Levy P E, Jarvis P G. Stem CO₂ fluxes in two Sahelian shrub species (*Guiera senegalensis* and *Combretum micranthum*). *Functional Ecology*, 1998, 12: 107—116.
- [38] Vose J M, Ryan M G. Seasonal respiration of foliage, fine roots, and woody tissues in relation to growth, tissue N, and photosynthesis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 182—193.
- [39] Bosc A, de Grandcourt A, Loustau D. Variability of stem and branch maintenance respiration in a *Pinus pinaster* tree. *Tree Physiology*, 2003, 23(4): 227—236.
- [40] Ryan M G. Growth and maintenance respiration in stems of *Pinus contorta* and *Picea engelmannii*. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20: 48—57.

参考文献:

- [20] 朱华. 西双版纳的热带雨林植被. *热带地理*, 1999, 10(3): 233—240.
- [21] 江爱良. 云南西双版纳的生态气候和植物. *自然资源*, 1987, (2): 32—37.
- [22] 云南省统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2005.
- [23] 王森, 姬兰柱, 李秋荣, 等. 长白山地区红松树干呼吸的研究. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 7—13.
- [24] 姜丽芬, 石福臣, 祖元刚, 等. 不同年龄兴安落叶松树干呼吸及其与环境因子关系的研究. *植物研究*, 2003, 23(3): 296—301.
- [26] 严玉平, 沙丽清, 曹敏. 西双版纳三种树木树干呼吸日变化特征. *山地学报*, 2006, 24(3): 268—276.
- [27] 王文杰. 树木非同化器官 CO₂ 通量的测定方法及其对测定结果的影响. *生态学报*, 2004, 24(9): 2056—2067.
- [36] 王文杰, 王慧梅, 祖元刚, 等. 林木非同化器官与土壤呼吸的温度系数 Q_{10} 值的特征分析. *植物生态学报*, 2005, 29(4): 680—691.