

荷木树干 CO₂ 释放通量与木质部液流和 CO₂ 浓度的关系*

朱丽薇^{1,2} 赵平^{1**} 蔡锡安¹ 曾小平¹ 邹绿柳^{1,2}

(¹ 中国科学院华南植物园, 广州 510650; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 采用红外气体分析仪, 于2008年10月17—19日连续3个昼夜原位监测了荷木的树干 CO₂ 释放通量、树干温度、木质部液流密度和 CO₂ 浓度。结果表明: 树干 CO₂ 释放通量(E_A)日变化呈 S 形曲线, 不同径级间差异显著。 E_A 与树干温度呈显著幂函数关系($0.24 < R^2 < 0.78$)。晚上的温度系数(b)、回归系数(R^2)高于白天。 Q_{10} 值在 2.01 ~ 2.79。 E_A 与木质部 CO₂ 浓度显著相关, 三次曲线拟合度最好, R^2 达到 0.48。在排除树干温度影响的条件下, E_A 与液流密度显著负相关($r = -0.462$)。仅用温度估算树干 CO₂ 释放通量必然产生误差, 应考虑液流对树干 CO₂ 释放通量的影响。

关键词 树干 CO₂ 释放通量; 树干温度; 液流密度; 木质部 CO₂ 浓度; Q_{10} ; 荷木

中图分类号 Q945 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2009)11-2227-06

***Schima superba* stem CO₂ efflux and its relations to xylem sap flux density and xylem CO₂ concentration.** ZHU Li-wei^{1,2}, ZHAO Ping¹, CAI Xi-an¹, ZENG Xiao-ping¹, ZOU Lu-liu^{1,2} (¹South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Chinese Journal of Ecology* 2009 28(11) 2227-2232.

Abstract : By using a Li-820 infra-red CO₂ gas analyzer, an in situ measurement of *Schima superba* stem CO₂ efflux was conducted for three consecutive days from 17 to 19 October 2008. In the meantime, the stem temperature, xylem sap efflux density, and xylem CO₂ concentration were measured. The stem CO₂ efflux had a diurnal variation of "S" pattern, and differed significantly with stem diameter. There was a significant exponential relationship between stem CO₂ efflux and stem temperature ($0.24 < R^2 < 0.78$). The temperature coefficient (b) and regression coefficient (R^2) were higher at nighttime than at daytime, and the Q_{10} value ranged from 2.01 to 2.79. The stem CO₂ efflux correlated significantly with the xylem CO₂ concentration, and the best regression curve was cubic ($R^2 = 0.48$). Excluding the effects of stem temperature, the stem CO₂ efflux showed a significant negative correlation with xylem sap flux density ($r = -0.462$). Therefore, only using simple temperature function to estimate stem CO₂ efflux would yield a significant error, and xylem sap flux should be taken into consideration in the stem CO₂ efflux estimation.

Key words : stem CO₂ efflux; stem temperature; xylem sap flux density; xylem CO₂ concentration; Q_{10} ; *Schima superba*.

自然和人为因素引起全球气候变暖, 导致许多极端自然灾害频繁发生, 如2008年我国南方的雨雪灾害和2009年初北方出现的干旱天气。世界气候

研究计划明确指出, 一旦大气 CO₂ 浓度加倍, 全球平均气温可能上升 1.5 °C ~ 4.5 °C (王雪臣等, 2004)。森林生态系统通过光合和呼吸作用与大气之间进行 CO₂ 交换, 在全球 C 循环中发挥重要作用。森林 CO₂ 通量主要由呼吸而非绿色组织的总光合决定的 (Valentini *et al.*, 2000), 其中树干呼吸

* 国家自然科学基金项目(30770328, 30871998)和广东省自然科学基金资助项目(07006917)。

** 通讯作者 E-mail: zhaoping@scib.ac.cn

收稿日期: 2009-04-01 接受日期: 2009-07-18

占森林生态系统自养总呼吸的 5% ~ 42%(Waring & Schlesinger,1985 ;Lavigne & Ryan ,1997 ;Damesin *et al.* 2002)。然而 ,由于人们对树干呼吸生理机制的理解不足 ,影响了木质组织呼吸的准确测量 (Bowman *et al.* 2005)。

由于呼吸是酶促反应 ,温度是影响呼吸变化最主要的因素 ,Levy 和 Jarvis(1998)指出 ,树干呼吸与温度之间存在指数关系。但许多研究发现 ,在晴朗天气测得的所谓树干呼吸速率比利用指数方程预测的值小 25% ~ 50% ,相同温度下白天的树干呼吸速率要比晚上低(Lavigne ,1987 ;Maier & Clinton , 2006) ,说明树干呼吸速率除了受温度的影响外 ,还受许多其他的内外因素影响 ,如湿度、大气 CO₂ 浓度、土壤养分、树龄和林木含氮量(马玉娥等 , 2007)。Edwards 和 McLaughlin(1978) 指出 ,树干呼吸与温度的变化不一致主要是与基质浓度和水分状况有关的生理代谢格局引起的。Maier 和 Clinton (2006)发现 ,晚上液流密度几乎为零的时候 ,树干呼吸速率与树干温度有很显著的相关性 ,R² 达到 0.9 ~ 0.96 ,树干呼吸实测值与利用温度估测的呼吸有很好的-一致性 ;而白天树干液流活动明显的情况下 ,树干呼吸理论值比实测值高。Levy 等(1999)指出液流与树干呼吸之间存在正相关关系 ,对呼吸的影响可以占呼吸速率高峰值的 12%。Saveyn 等 (2008)研究发现树干呼吸与木质部液流中溶解的 CO₂ 正相关 ,认为呼吸产生的部分 CO₂ 随液流的向上运输 ,共同改变树干呼吸。有关研究显示 ,形成层附近木质部的 CO₂ 浓度明显高于周围空气的 CO₂ 浓度 ,甚至可高达 3 个数量级 ,这部分 CO₂ 比较容易溶解于木质部的液流 ,并随液流向树干上部运输 (Saveyn *et al.* 2008)。由此可见 ,现行的气室气体交换法测定的所谓树干呼吸实际上只是总呼吸的一部分 ,即树干 CO₂ 释放通量。我国学者由早先的离体到现在的原位测定 ,分析了不同树种的树干呼吸特征 ,提出了湿度、生长状况和水分条件等是影响树干呼吸与温度之间关系的观点(姜丽芬等 ,2003 ; Wang *et al.* 2003) ,但对于树干呼吸与液流密度之间是否存在联系 ,并没有相关报道。

本研究利用红外气体分析仪(IRGA)-气室气体交换系统对华南地区常见树种荷木的树干 CO₂ 释放通量进行原位监测 ,同步测量木质部 CO₂ 浓度、树干温度和液流密度 ,探讨树干 CO₂ 释放通量与液

流密度和木质部 CO₂ 浓度的关系 ,完善树干呼吸的相关理论 ,对正确认识树干呼吸的生理生态机理、准确测定森林生态系统 CO₂ 排放和碳收支平衡 ,具有重要的理论意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

实验在广州华南植物园小青山生态观测场(23° 8'N ,113°17'E)进行 ,该地位于亚热带 ,属海洋性气候 ,高温多雨 ,年均气温 21.4 ℃ ~ 21.9 ℃ ,最高温出现于 7—8 月 ,最低温在 1 月 ,年降水量在 1612 ~ 1909 mm ,最多雨在 5—6 月 ,最少雨在 11 月至翌年 1 月 ,4—9 月为湿润季节 ,降水量占年降水量的 80% 以上。实验样地是生长在一个缓坡上、由当地常见乡土树种荷木(*Schima superba*)组成的人工林 ,该林于 20 世纪 80 年代中期人工栽种 ,生长良好。

1.2 研究方法

1.2.1 树干液流密度的测定 选择不同胸径的 3 棵样树(树形特征如表 1) ,于树干北面胸高处(约 1.3 m)将一对 Granier 探针上下相隔约 15 cm 垂直插入边材 ,探针与 DL2e 数据采集仪连接 ,自动记录液流密度值 ,采用美国 Duke 大学环境学院植物生理生态实验室开发的 Basliner 3.0 应用软件 ,计算瞬时液流密度值(赵平等 2006)。

1.2.2 树干 CO₂ 释放通量的测定 利用红外 CO₂ 分析仪(Li-820)和自制的 10 cm × 10 cm 气室测量树干 CO₂ 交换通量 ,测量位置在 Granier 热消散探针上方 ,距离地面高度约 1.5 m 处。气室内两侧设有 2 个开有一排小洞的金属管 ,保持气室内气体均匀 ,金属管与 PVC 管连接形成一个通路 ,2 个 PVC 管中间连接橡胶导气管 ,分别与分析仪和缓冲瓶相连。缓冲瓶保持进气口气体的稳定 ,代表测定时刻大气 CO₂ 浓度。流经气室的空气流速控制在 1 L · min⁻¹。测量前清除所测部位的附生物 ,用橡皮泥密封气室与树干的接触缝。于 2008 年 10 月 17—19 日 3 个昼夜 ,每隔 1 h 测定 1 次。

表 1 样树树形特征
Tab.1 Tree form features of sample trees

树号	胸径 (cm)	树高 (m)	冠幅 (m ²)	树皮厚度 (cm)
1	13.3	9.5	15.78	0.30
2	22.0	11.4	25.14	0.55
3	17.5	8.8	18.68	0.93

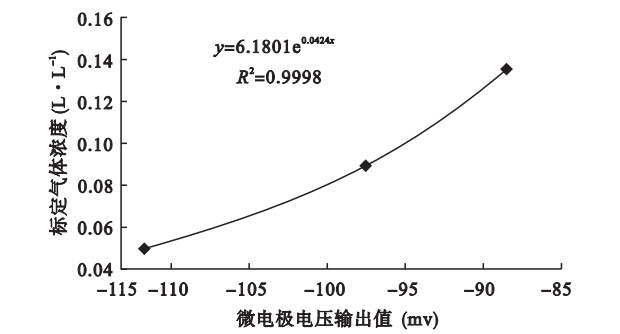


图1 CO₂ 微电极标定曲线
Fig.1 Typical calibration curve for CO₂ microelectrode derived from measurements at 25 °C

1.2.3 树干温度测量 在树干钻约 2 cm 的孔,插入铜镍热敏电偶,与数据采集器连接,自动记录树干温度值。

1.2.4 木质部 CO₂ 浓度的测量 于铜镍热敏电偶的附近钻取深约 2 cm,直径为 3 mm 的小孔,将医用 CO₂ 微电极(Model MI-720 ;Microeletrodes Inc. ,Bedford ,NH ,USA)插入孔内,外面用橡皮泥密封(McGuire & Teskey ,2002)。该微电极测得的 CO₂ 浓度是直接与液流接触的气态 CO₂ 浓度,电极输出的信号由 DL2e 数据采集仪记录。野外试验前,利用 5%、10% 和 15% 的标准气体,在 25 °C 下进行标定。图 1 是其中一个微电极的标定曲线。

1.2.5 树干 CO₂ 释放通量(E_A , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)的计算:

$$E_A = \frac{[\text{CO}_2]_a - [\text{CO}_2]_s}{22.4 \times 6 \times A} \times V_a \times \frac{K_o}{K_o + T} \times \frac{P}{P_o}$$
式中 $[\text{CO}_2]_a$ 为进入气室前的对照空气 CO₂ 浓度 ($\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$) ; $[\text{CO}_2]_s$ 为流经气室的样气 CO₂ 浓度 ($\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$) ; A 为气室覆盖树干面积 (m^2) ; V_a 为流经气室的空气流速 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$) ; K_o 为绝对物理温度 (273 °C) ; T 为气室温度 (°C) ; P 为测试样地的气压值 (P_a) ; P_o 为标准大气压值 (P_a) 。用下列方程拟合树干 CO₂ 释放通量与树干温度之间的关系:

$$E_A = ae^{bT}$$
式中 E_A 为树干 CO₂ 释放通量 ; T 为树干温度 ; a 为当树干温度为零时的树干 CO₂ 释放通量 ; b 为温度系数。

Q_{10} 用下列公式计算(b 为上式中的常数) :
$$Q_{10} = e^{10b}$$

1.2.6 统计分析 分别采用 SPSS 16.0 和 Excel 进行数据分析和绘图。对荷木不同径级 E_A 之间的差

异性检验采用多重方差分析(LSD) ;变量之间的相关性分析采用 Bivariate 方法 ; E_A 与树干温度之间的回归分析采用指数模型方法。

2 结果与分析

2.1 树干 CO₂ 释放通量日变化

如图 2 所示,树干 CO₂ 释放通量(E_A)日变化明显,并随胸径的增加而增加。曾小平等(2000)离体测量马占相思的木质器官呼吸速率,指出树干 CO₂ 释放通量与胸径的平方呈正相关关系,与本研究的测定一致。由表 2 可知,荷木不同径级 E_A 之间差异显著($P < 0.01$)。小径级 E_A 最大值比大径级约小 49.1%。根据已建立的荷木胸径与边材面积的关系式,求出 3 棵样树的边材面积分别为 $A_{S1} = 0.012 \text{ m}^2$, $A_{S2} = 0.032 \text{ m}^2$, $A_{S3} = 0.020 \text{ m}^2$,边材面积越大, E_A 相应增加。因为胸径越大,边材占体积越大,维持代谢和合成新物质所需要的能量增加,生长呼吸和维持呼吸均会增强,较大胸径树木的总 E_A 要比小胸径的高。树干和大枝的呼吸主要发生在新韧皮部和近形成层的木质部,积累在导管和管胞中的 CO₂ 以扩散的方式通过树皮与大气进行交换(汪振儒等, 1985)。树皮对 CO₂ 的渗透性也可以解释不同个体之间 E_A 的差异(Sprugel ,1990 ;Cernusak & Marshall 2000)。树皮的细胞空隙通常经皮孔与外界的空气相连通,不同径级的皮孔数量不同会导致 E_A 的差异。

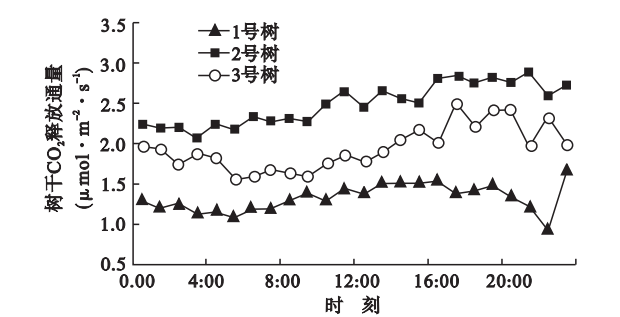


图2 树干 CO₂ 释放通量昼夜变化
Fig.2 Diurnal change of stem CO₂ efflux

表 2 树干 CO₂ 释放通量特征值
Tab.2 Stem CO₂ efflux characteristics

树号	R^2	b	Q_{10}	E_A
1	0.237	0.07	2.01	1.324a
2	0.781	0.095	2.79	2.488b
3	0.693	0.097	2.58	1.872c

不同字母表示经检验在 5% 水平上差异显著。

表 3 昼夜不同时段树干 CO₂ 释放通量特征值
Tab.3 Stem CO₂ efflux characteristics at different time periods in a day

时间	样树 1			样树 2			样树 3		
	<i>b</i>	<i>Q</i> ₁₀	<i>R</i> ²	<i>b</i>	<i>Q</i> ₁₀	<i>R</i> ²	<i>b</i>	<i>Q</i> ₁₀	<i>R</i> ²
7 :00—17 :00	0.056	1.745	0.237	0.075	2.109	0.646	0.083	2.291	0.816
18 :00—6 :00	0.109	2.96	0.284	0.105	2.869	0.875	0.092	2.507	0.673

2.2 树干 CO₂ 释放通量与树干温度的关系

树干温度与 E_A 日变化均呈 S 形曲线(图 3),与王森等(2005)测得的长白山地区红松树干呼吸日变化曲线相似。树干温度和 E_A 分别于 8 :00 和 9 :00 开始上升,二者之间有 1 h 的时滞。 E_A 的最大与最小值分别在 17 :00 和 9 :00 左右出现,而树干温度的最大与最小值则分别出现在 19 :00 和 8 :00 左右。相关性分析显示 E_A 与树干温度统计上极显著相关($P<0.01$)。回归分析发现,样树 1 和 2 的回归系数晚上高于白天,即晚上树干温度对 E_A 变化量的解释度较高,样树 3 的回归系数则略有不同(表 3)。晚上的树干液流密度基本上趋于零(图 4),日间树液活动将溶解于木质部的 CO₂ 输送到树干上方,降低了木质部 CO₂ 浓度,致使气态 CO₂ 向外界大气的扩散减少,所以白天液流活动影响对 E_A 的测量。

通常 Q_{10} (温度每升高 10℃ 呼吸速率升高的数

值)反映呼吸对温度的敏感性。表 2 为 3 棵样树的 E_A 特征值,其中 Q_{10} 在 2.01 ~ 2.79,比通常认为的 $Q_{10}=2$ 高。王森等(2008)采用土壤呼吸气室原位测定长白山红松针阔叶混交林主要树种红松、蒙古栎、水曲柳和紫椴的树干呼吸, Q_{10} 位于 2.24 ~ 2.91;严玉平等(2008)采用红外气体分析仪原位监测西双版纳热带季节雨林树干呼吸,所得 Q_{10} 位于 1.90 ~ 3.03;Amthor(1984)研究得出 Q_{10} 在 1.6 ~ 3.0, Ryan(1991)认为木本植物的 Q_{10} 可能更高些。本研究荷木 E_A 的温度系数低于针阔叶林,但还是在热带季节雨林的温度系数范围内。

2.3 树干 CO₂ 释放通量与木质部 CO₂ 浓度的关系

木质部 CO₂ 浓度在 1% ~ 20% 变化,日变化呈单峰曲线(图 5a),最大值出现在 14 :00 时, E_A 最大值出现在 17 :00,峰值出现的时刻要晚于木质部 CO₂ 浓度。14 :00 后木质部 CO₂ 浓度开始下降,21 :00 时后浓度非常低,这段时间 E_A 缓慢上升。相关性分析显示 E_A 与木质部 CO₂ 浓度统计上显著相关($P<0.05$)。三次曲线拟合度最高, $R^2=0.46$;其次为二次曲线, $R^2=0.37$;幂函数也有较高的拟合度, $R^2=0.34$ (图 5b)。

2.4 树干 CO₂ 释放通量与液流密度的关系

E_A 在 9 :00 开始升高,到 17 :00 达到最大值,而液流密度 11 :00 达到最大值,之后开始下降(图 4)。相关分析显示 E_A 与液流密度之间统计上不存在显著相关性($P=0.77>0.05$),但排除树干温度的影响, E_A 与液流密度的相关系数达到 -0.462 ($P=0.026<0.05$) ,二者之间统计上显著负相关。将 1 d 时间分成 2 段,计算各样树的 E_A 特征值。在 18 :00—6 :00 时段,树干液流基本停止,呼吸的特征系数 b 、温度系数 Q_{10} 均比白天高(表 3)。 Q_{10} 大说明呼吸对温度敏感,即温度变化导致呼吸较大的改变, E_A 明显受树干温度的影响,在 7 :00—17 :00 时间段内,由于液流的存在,树干呼吸产生的 CO₂ 并未全部释放到周围的大气中,部分经由液流向上输送(McGuire & Teskey, 2004), E_A 对树干温度的敏感性下降。因此液流活动明显影响了 E_A 与树干温度之间的关系。

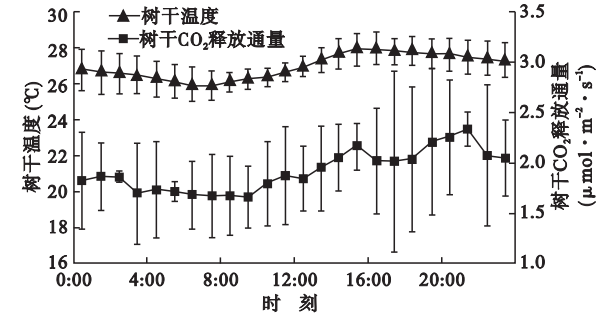


图 3 荷木树干 CO₂ 释放通量与树干温度昼夜变化
Fig.3 Diurnal changes of stem CO₂ efflux and stem temperature for *Schima superba*

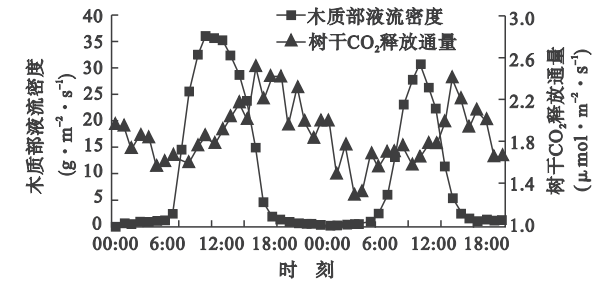


图 4 荷木树干液流密度与树干 CO₂ 释放通量昼夜变化
Fig.4 Diurnal changes of xylem sap flux density and stem CO₂ efflux for *Schima superba*

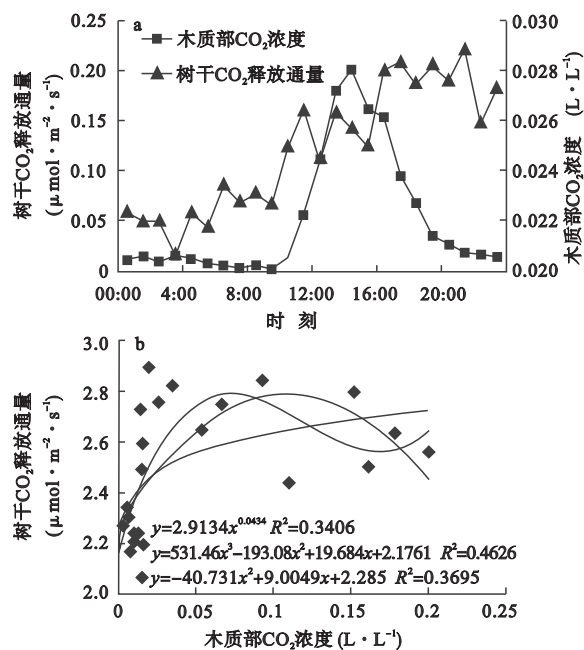


图5 树干 CO₂ 释放通量与木质部 CO₂ 浓度的关系

Fig. 5 Relationship between stem CO₂ efflux and xylem CO₂ concentration

a 为昼夜变化 b 为拟合曲线。

3 讨论

本研究所测样树的 E_A 随胸高直径的增加而上升,与王森等(2005)对长白山地区红松树干呼吸与径级的观测结果相似,他们认为较大径级的红松树干用于维持生命活动所需的呼吸比例高于小径级红松。本研究的荷木人工林种植于20世纪80年代,目前还处在生长期,胸径越大,具生活能力的细胞数目越多,代谢水平也较高,所以树干呼吸强度较大。不同胸径树木的温度系数不同,不能简单的利用 $Q_{10} = 2$ 计算树干呼吸,以免对个体树木呼吸速率的估算产生偏差,影响森林碳收支的估测。

本实验在国内首次采用 CO₂ 微电极技术测定木质部 CO₂ 浓度,能够进行连续数天的动态监测。木质部内气态 CO₂ 浓度比大气的 CO₂ 浓度高 10 ~ 30 倍(Eklund, 1990),有研究指出木质部气态 CO₂ 浓度在 2% ~ 26% (Hari, 1991; Levy *et al.*, 1999),气体向外界大气扩散需要克服树皮和木质部的阻碍(Teskey & McGuire, 2007),高的浓度梯度利于气体扩散。荷木木质部 CO₂ 浓度在 1% ~ 20%,这与以往研究基本相符。

利用气室测得的 E_A 与树干温度的变化存在不一致性,国外学者对其中的原因进行了相关研究。

Teskey 和 McGuire(2002)指出 E_A 与木质部 CO₂ 浓度线性相关;树干和枝呼吸的部分 CO₂ 是液流中 CO₂ 向外扩散的副产品。Gansert 和 Burgdorf(2005)研究了成熟欧洲白桦木质部液流对 E_A 的影响,发现二者呈负相关,因此 E_A 不能简单地等同于树干呼吸速率。但是, Maier 和 Clinton(2006)发现液流密度和树干 CO₂ 释放通量之间并没有因果关系,当液流密度为零时, E_A 与树干温度之间的时滞效应并没有发生改变;他们认为当时的 E_A 主要受形成层和韧皮部组织呼吸的影响。Saveyn 等(2008)在不同天气条件下测定3年生美洲黑杨的 E_A , 树干温度、木质部液流密度和 CO₂ 浓度,指出液流的流动分别解释晴朗天气树干呼吸的 9% ~ 18% 和雨天的 3% ~ 7%;木质部 CO₂ 浓度与 E_A 正相关。本研究发现,木质部液流密度与 E_A 之间存在负相关关系,液流越大 E_A 越小。白天,由于液流活动,将树干呼吸产生并溶解于液流的部分 CO₂ 输送到树干的上部,使测得的 E_A 下降。由于溶解于木质部液流中 CO₂ 的运输和向外扩散,在树干不同位置测定的所谓呼吸速率或者被低估,或者被高估(McGuire & Teskey, 2002)。本研究发现,尽管木质部 CO₂ 浓度与液流密度的变化曲线相似,但前者的变化滞后于后者,这可能是溶解在液流中的 CO₂ 扩散时受到细胞壁的阻碍,使木质部 CO₂ 浓度的升高出现在液流密度明显上升之后,而木质部中气态 CO₂ 扩散到周围大气需要克服树皮和形成层的阻碍,当 E_A 开始升高时液流密度已经出现下降。

为了进一步确定树干 CO₂ 释放通量、木质部液流密度和 CO₂ 浓度之间的关系,还需要在更大的时间尺度和空间尺度上做进一步的研究。

参考文献

- 姜丽芬,石福臣,祖元刚,等. 2003. 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, 23(3): 296-301.
- 马玉娥,项文化,雷丕锋. 2007. 林木树干呼吸变化及其影响因素研究进展. 植物生态学报, 31(3): 403-412.
- 王森,姬兰柱,李秋荣,等. 2005. 长白山地区红松树干呼吸的研究. 应用生态学报, 16(1): 7-13.
- 王森,武耀祥,武静莲. 2008. 长白山红松针阔叶混交林主要树种树干呼吸速率. 应用生态学报, 19(5): 956-960.
- 王雪臣,徐影,毛留喜. 2004. 气候变化的科学背景研究. 中国软科学, (1): 105-108.
- 严玉平,沙丽清,曹敏. 2008. 西双版纳热带季节雨林优势树种树干呼吸特征. 植物生态学报, 32(1): 23-30.

- 曾小平, 彭少麟, 赵平. 2000. 广东南亚热带马占相思林呼吸量的测定. 植物生态学报, **24**(4): 69–73.
- 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 2006. 马占相思(*Acacia mangium*)树干液流密度和整树蒸腾的个体差异. 植物生态学报, **26**(12): 655–665.
- 克累默尔 PJ, 考兹洛夫斯基 TT (汪振儒译). 1985. 木本植物生理学. 北京: 中国林业出版社.
- Amthor JS. 1984. The role of maintenance respiration in plant growth. *Plant, Cell and Environment*, **7**: 561–569.
- Bowman WP, Barbour MM, Turnbull MH, et al. 2005. Sap flow rates and sapwood density are critical factors in within- and between-tree variation in CO₂ efflux from stems of mature *Dacrydium cupressinum* trees. *New Phytologist*, **167**: 815–828.
- Cernusak LA, Marshall JD. 2000. Photosynthetic refixation in branches of western white pine. *Functional Ecology*, **14**: 300–311.
- Damesin C, Ceschia E, Le Goff N, et al. 2002. Stem and branch respiration of beech: From tree measurements to estimations at the stand level. *New Phytologist*, **153**: 159–172.
- Edwards NT, McLaughlin SB. 1978. Temperature-independent diel variations of respiration rates in *Quercus alba* and *Liriodendron tulipifera*. *Oikos*, **31**: 200–206.
- Eklund L. 1990. Endogenous levels of oxygen, carbon dioxide, and ethylene in stems of Norway spruce trees during one growing season. *Trees*, **4**: 150–154.
- Gansert D, Burgdorf M. 2005. Effects of xylem sap flow on carbon dioxide efflux from stems of birch (*Betula pendula* Roth). *Flora*, **200**: 444–455.
- Hari P, Nygren P, Korpilathi E. 1991. Internal circulation of carbon within a tree. *Canadian Journal of Forest Research*, **21**: 514–515.
- Lavigne MB, Ryan MG. 1997. Growth and maintenance respiration rates of aspen, black spruce and jack pine stems at northern and southern BOREAS sites. *Tree Physiology*, **17**: 543–551.
- Lavigne MB. 1987. Differences in stem respiration responses to temperature between balsam fir trees in thinned and unthinned stands. *Tree Physiology*, **3**: 225–233.
- Levy PE, Jarvis PG. 1998. Stem CO₂ fluxes in two Sahelian shrub species (*Guiera senegalensis* and *Combretum micranthum*). *Functional Ecology*, **12**: 107–116.
- Levy PE, Meir P, Allen SJ, et al. 1999. The effect of aqueous transport of CO₂ in xylem sap on gas exchange in woody plants. *Tree Physiology*, **19**: 53–58.
- Maier CA, Clinton BD. 2006. Relationship between stem CO₂ efflux, stem sap velocity and xylem CO₂ concentration in young loblolly pine trees. *Plant, Cell and Environment*, **29**: 1471–1483.
- McGuire MA, Teskey RO. 2002. Microelectrode technique for in situ measurement of carbon dioxide concentrations in xylem sap of trees. *Tree Physiology*, **22**: 807–811.
- McGuire MA, Teskey RO. 2004. Estimating stem respiration in trees by a mass balance approach that accounts for internal and external fluxes of CO₂. *Tree Physiology*, **24**: 571–578.
- Ryan MG. 1991. The effects of climate change on plant respiration. *Ecological Applications*, **1**: 157–167.
- Saveyn A, Steppe K, McGuire MA, et al. 2008. Stem respiration and carbon dioxide efflux of young *Populus deltoids* trees in relation to temperature and xylem carbon dioxide concentration. *Oecologia*, **154**: 637–649.
- Sprugel DG. 1990. Components of woody-tissue respiration in young *Abies amabilis* (Dougl.) Forbes trees. *Trees*, **4**: 88–98.
- Teskey RO, McGuire MA. 2002. Carbon dioxide transport in xylem causes errors in estimation of rates of respiration in stems and branches of trees. *Plant, Cell and Environment*, **25**: 1571–1577.
- Teskey RO, McGuire MA. 2007. Measurement of stem respiration of sycamore (*Platanus occidentalis* L.) trees involves internal and external fluxes of CO₂ and possible transport of CO₂ from roots. *Plant, Cell and Environment*, **30**: 570–579.
- Valentini R, Matteucci G, Dolman AJ, et al. 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, **404**: 861–865.
- Wang WJ, Yang FJ, Zu YG, et al. 2003. Stem respiration of a larch (*Larix gmelini*) plantation in Northeast China. *Acta Botanica Sinica*, **45**: 1387–1397.
- Waring RH, Schlesinger WH. 1985. Forest Ecosystems: Concepts and Management. New York: Academic Press.

作者简介 朱丽薇, 女, 1983年, 硕士研究生。主要从事生态系统生理学研究。E-mail: zhuliwei1209@scbg.ac.cn
责任编辑 王伟
