

鼎湖山针阔叶混交林冠层下方 CO₂ 通量及其环境响应

王春林^{1,2}, 周国逸^{1,*}, 王 旭¹, 唐旭利¹, 周传艳¹, 于贵瑞³

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650 2. 广东省气候中心, 广州 510080 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 精确估算典型森林生态系统冠层下方 CO₂ 通量 (Fcb) 对验证陆地生态系统碳平衡模型具有重要意义。采用开路涡度相关法对鼎湖山针阔叶混交林 Fcb 进行定位测定, 根据 1 周年数据分析 Fcb 及其对环境要素的响应特征, 结果表明: (1) 白天 Fcb 呈下降趋势表明地表植被全年具有光合能力, 但总体上地表植被和土壤表现为 CO₂ 排放源; (2) Van't Hoff 方程、Arrhenius 方程和 Lloyd-Taylor 方程均可以较好反映土壤温度 (T_s) 与 Fcb 的关系, 其中仅 Lloyd-Taylor 方程能够反映温度因子敏感性指标 Q_{10} 随温度的变异性特征; (3) Lloyd-Taylor 方程模拟的 Fcb 完全由 T_s 控制, 而连乘模型由 T_s 和土壤水分 (M_s) 控制, 可以反映水热条件的综合影响, 对 Fcb 具有更强的拟合能力; (4) 在 M_s 较大时连乘模型对 Fcb 的估算高于 Lloyd-Taylor 方程, 反之在干旱时段连乘模型模拟结果低于 Lloyd-Taylor 方程, 表明当存在水分胁迫时, M_s 可以成为影响 Fcb 的主导因子; (5) 2003 年鼎湖山针阔叶混交林 Fcb 总量 (787.4 ± 296.8 gCm⁻²a⁻¹) 比静态箱-气相色谱法测得的土壤呼吸偏低 17%。与箱式法相比, 涡度相关法通量测定结果普遍存在偏低估算现象。

关键词 鼎湖山, 冠层下方, CO₂ 通量, 涡度相关

文章编号: 1000-0933 (2007) 03-0846-09 中图分类号: X511 文献标识码: A

Below-canopy CO₂ flux and its environmental response characteristics in a coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan, China

WANG Chun-Lin^{1,2}, ZHOU Guo-Yi^{1,*}, WANG Xu¹, TANG Xu-Li¹, ZHOU Chuan-Yan¹, YU Gui-Rui³

1 South China Botanical Garden, CAS, Guangzhou 510650, China

2 Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080, China

3 Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (3) 0846 ~ 0854.

Abstract: Accurate estimation of below-canopy CO₂ flux (Fcb) in typical forest ecosystems is of great importance to validate terrestrial carbon balance models. Continuous eddy covariance measurements of Fcb were conducted in a coniferous and broad-leaved mixed forest located in Dinghushan Nature Reserve of south China. Using a year-round data, Fcb dynamics and its environmental response were analyzed, results mainly showed that: (1) Fcb decreased during daytime which indicated that understory of the forest continued photosynthesis throughout the year, however, understory and soil acted as CO₂ source as a whole. (2) Using soil temperature (T_s) as a dependent variable, all of Van't Hoff equation,

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2002CB412501); 中国科学院知识创新工程资助项目 (KZCX1-SW-01-01A); 中国科学院重要方向资助项目 (KSCX2-SW-120); 广东省自然科学基金重点资助项目 (010567)

收稿日期: 2006-06-22; 修订日期: 2007-01-13

作者简介: 王春林 (1970 ~), 男, 江苏人, 博士, 主要从事生态系统生态学与农业气象学研究. E-mail: wangcl@grmc.gov.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gyzhou@scib.ac.cn

致谢: 本通量站涡度相关通量观测维护以及资料采集、处理, 得到黄忠良研究员和孟泽的大力支持, 在此表示衷心感谢。

Foundation item: This work was financially supported by National Key fundamental research development layout project (No. 2002CB412501); two knowledge innovation funds of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-01-01A and KSCX2-SW-120); Natural Science Foundation of Guangdong Province (010567)

Received date: 2006-06-22; **Accepted date:** 2007-01-13

Biography: WANG Chun-Lin, Ph. D., mainly engaged in ecosystem ecology and agrometeorology. E-mail: wangcl@grmc.gov.cn

Arrhenius equation and Lyold-Talor equation can explain a considerable variation of Fcb , Among those three equations Lyold-Talor equation is the best to reflect the relationship between soil respiration and temperature for its ability in revealing the variation of Q_{10} with temperature ; (3) Fcb derived from Lloyd-Talor equation is utterly determined by T_s , while Fcb derived from the multiplicative model is driven by T_s and soil moisture (M_s). The multiplicative model can reflect the synthetic effect of T_s and M_s , therefore it explains more Fcb variations than Lyold-Talor equation does ; (4) Fcb derived from multiplicative model was higher than that from Lloyd-Talor equation when M_s was relatively high , on the contrary , Fcb derived from multiplicative model was lower than that from Lloyd-Talor equation when M_s was low , indicating that M_s might be a main factor affecting Fcb when the ecosystem is stressed by low-moisture. (5) Annual Fcb of the forest in 2003 was estimated as $787.4 \pm 296.8 \text{ gCm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, which was 17% lower than soil respiration measured by statistic chamber method. CO₂ flux measured by eddy covariance is often underestimated , further study therefore calls for emphasis on methods quantifying Fcb components of respiration of soil , as well as respiration and photosynthesis of understory vegetations.

Key Words : Dinghushan ; below-canopy ; CO₂ flux ; eddy covariance

森林是陆地上面积最大的生态系统 , 充分认识森林生态系统碳源汇功能及其对环境要素的响应特征 , 对评价陆地生态系统碳收支及其变化具有重要意义^[1]。自 20 世纪 70 年代以来有关森林生态系统 CO₂ 通量观测研究就在世界各地展开 , 国内相关研究主要集中在温带森林^[2]、中亚热带木本群落^[3]以及热带亚热带森林^[4~9] , 其中对鼎湖山森林的研究主要集中在土壤呼吸方面 , 方法上以箱式法^[7,8]和碱吸收法^[9]为主。近十多年来 , 基于涡度相关原理的通量观测技术和方法 , 在陆地生态系统 CO₂ 和水热通量测定中得到了广泛应用^[10,11] , 已经成为全球通量观测网络 (FLUXNET) 中的标准观测方法^[12]。国内自 2002 年中国陆地生态系统通量观测网络 (ChinaFLUX) 建立以来 , 基于涡度相关法对森林生态系统碳通量的定位测定研究才开始起步。

冠层下方 CO₂ 通量 (Fcb) 是冠层下缘-地表植被这一界面上的 CO₂ 通量 , 由土壤呼吸、地表下层植被的呼吸作用和光合作用共同组成 , 理解典型森林生态系统 Fcb 动态及其对环境要素的响应特征 , 对验证陆地生态系统碳平衡模型具有重要意义。ChinaFLUX 中 4 个森林站均设有 Fcb 观测 , 但目前关于 Fcb 观测报道尚不多见。本文旨在根据鼎湖山针阔叶混交林 1 周年 Fcb 连续观测数据 , 分析 Fcb 动态及其对环境要素的响应特征 , 验证复杂地形条件下涡度相关法 Fcb 测定的可靠性 , 为生态系统碳平衡模型的建立与验证提供有效数据^[1,13]。

1 研究地概况

鼎湖山自然保护区 (Dinghushan Nature Reserve , DNR) 位于广东省中西部 , 受季风湿润气候影响 , 光、热、水资源丰富且准同步。年太阳辐射约 $4665 \text{ MJm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 年平均日照时数为 1433h , 年平均气温 21.0℃ , 最冷月为 1 月份 , 平均气温 12.0℃ , 最热月为 7 月份 , 平均气温 28.0℃ , 年均降水量 1956mm , 其中 76% 集中在 4 ~ 9 月份的汛期。通量观测塔安装在 DNR 核心区的针阔叶混交林样地内 (23°10'24"N , 112°32'10"E) , 海拔高度 240m , 坡度约 10° , 坡向东偏南。主风方向东北面比较开阔。优势树种为荷树 (*Schima superba*)、锥栗 (*Castanopsis chinensis*) 和马尾松 (*Pinus massoniana*) , 树龄约为 100a , 树高约 17m , 群落结构可分成 4 层 : 乔木 2 层 , 灌木 1 层 , 草本及苗木 1 层。土壤为砂质壤土 , 土层厚度 30 ~ 60cm , 地面枯枝落叶层盖度 80% ~ 90% , 厚度 1 ~ 3cm , pH 值为 3.86。

2 研究方法

2.1 通量观测及处理

涡度相关系统 (Open Path Eddy Covariance , OPEC) 安装高度 2m , 采用三维超声风温仪 (CSAT3 , Campbell Scientific Inc. , USA (CSI)) 测量三维风速 , 采用细线热电偶 (FW05 , CSI) 测量温度脉动 , 采用开路 CO₂/H₂O 红外气体分析仪 (IRGA) (Li-7500 , LiCor Inc , USA) 测量 CO₂/H₂O 浓度脉动。采样频率为 10Hz , 通过数据采集器 (CR5000 , CSI) 自动存储 10Hz 原始数据 , 在线进行虚温订正^[14]和空气密度脉动订正^[15]后 , 并存储 30min

的 F_{cb} 。对离线数据采用二次坐标旋转^[16]进行地形和仪器倾斜影响订正,并对 F_{cb} 进行如下质量控制,剔除符合如下任意条件的记录:(1)有降水;(2) CO_2 、水汽浓度超过仪器量程范围;(3)湍流不充分($u^* < 0.05\text{m/s}$);(4)有效样本少于 15000;(5)异常突出的数据。一般 u^* 订正阈值取 $0.15 \sim 0.2\text{m/s}$,对本站数据分析表明,当 u^* 大于 0.05m/s 时夜间 F_{cb} 随风速变化不明显,而有效样本数大幅度下降,为避免样本数太少带来新的不确定性,故而取 u^* 阈值为 0.05m/s 。此外,由于局地地形影响,冠层下方存在明显的类似山谷风的风向日变化,且发现 F_{cb} 在南风方向上普遍偏低,为避免地形因素导致对 F_{cb} 系统性偏低估算,剔除风向在 $120 \sim 200^\circ$ 之间的数据。

气温、土壤温度、土壤水分等常规气象观测(Routine Meteorology, RMET)采样频率为 0.5Hz ,通过 4 个数据采集器(CR23X-TD/CR10X-TD, CSI)在线计算并存储 30min 统计数据。本文资料时段为 2003-4-13 ~ 2004-6-10。

2.2 呼吸估算模型

温度条件常常被认为是控制生态系统呼吸的首要环境因子。生态系统呼吸(R_{eco})对温度的响应特征有多种描述,研究中广泛使用的有 Van 't Hoff 方程(式 1)、Arrhenius 方程(式 2)、Lloyd-Taylor 方程(式 3)和简单的指数方程(式 4)^[17]:

$$R_{eco} = R_{eco\ ref} \exp(B(T_m - T_{ref})), \tag{1}$$

$$R_{eco} = R_{eco\ ref} \exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_m}\right)\right) \tag{2}$$

$$R_{eco} = R_{eco\ ref} \exp\left(E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_m - T_0}\right)\right), \tag{3}$$

$$R_{eco} = a \exp(bT_m), \tag{4}$$

式(1)~(3)中 $R_{eco\ ref}$ 是参考温度(T_{ref})下的生态系统呼吸。 $T_{eco\ ref}$ 和式(1)中 B 、式(2)中的活化能 E_a (J/mol)、式(3)中的 T_0 ,以及式(4)中的参数 a 和 b 均是试验常数; T_m 为实测土壤温度(K)。 R 为气体常数 ($8.134\text{ J/K}^{-1}\text{mol}^{-1}$), E_0 取 309K 。

水分条件(特别是土壤水分)是控制生态系统呼吸的另一个重要环境要素。土壤水分(M_s)常常与温度因子一起作为驱动变量,建立耦合的 R_{eco} 估算模型。目前常用的耦合方式有连乘形式和 Q_{10} 模型 2 种。本文采用连乘形式的呼吸模型^[18],简称连乘模型,其形式为:

$$R_{eco} = R_{eco\ ref} \exp\left(E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_m - T_0}\right)\right) \cdot \exp(cM_s + dM_s^2) \tag{5}$$

式(5)中 R_{eco} 的温度响应函数即为 Lloyd-Taylor 方程,土壤水分响应函数为 M_s 的二次指数方程。式(5)中 T_{ref} 取 283.16K ,待拟合参数有 $R_{eco\ ref}$ 、 T_0 、 c 和 d ,驱动因子为 T_m 和 M_s 。

3 结果分析

3.1 F_{cb} 日变化

F_{cb} 全天以大于 0 为主,表明地表植被和土壤总体上表现为 CO_2 排放源(图 1)。白天从日出开始由于地表植被光合吸收, CO_2 浓度逐渐下降, F_{cb} 也呈下降趋势,表明地表植被在白天对 CO_2 的光合吸收强度大于由于气温上升导致土壤和地表植被呼吸的增加量。 F_{cb} 日变化幅度夏季大于冬季,表明夏季地表植被具有更强的光合吸收能力。涡度相关法通量观测是基于地表均一性假设的,上述分析表明在鼎湖山比较复杂的地形条件下,涡度相关系统对近地面 CO_2 通量日变化动态仍然具有监测能力。

3.2 F_{cb} 对温度因子的响应特征

为避开光合作用的干扰,选择夜间($PAR < 1$)资料考察 F_{cb} 与环境因子的关系。不同的气温因子均与 F_{cb} 具有显著的相关性(表 1),其中土壤温度与 F_{cb} 的关系更强。从拟合方程的解释方差 R^2 看,地表植被温度比其上方的气温与 F_{cb} 的相关性强,反应出地表植被呼吸作用对 F_{cb} 有直接贡献。在 $0 \sim 20\text{cm}$ 之间,土壤温度与 F_{cb} 的相关性随观测深度加大而增加,在 20cm 处达到最大。

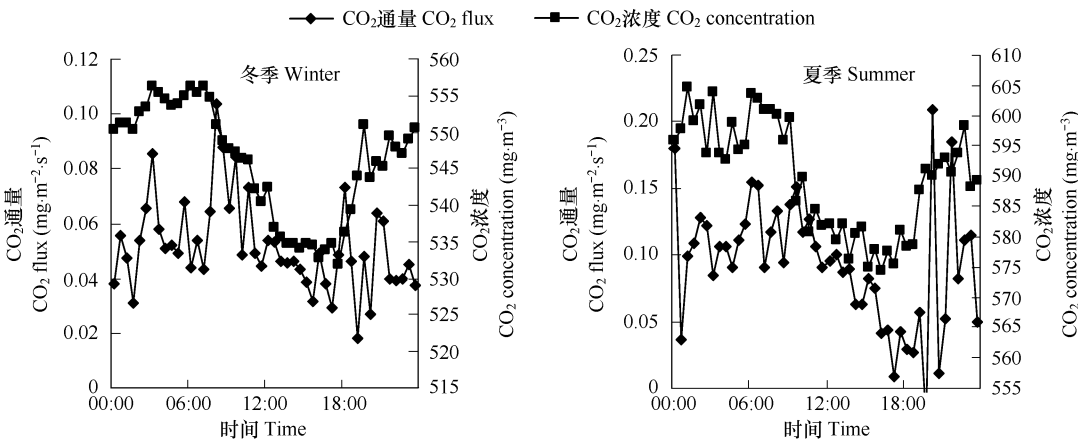


图 1 冠层下方 CO₂ 通量日变化

Fig. 1 Daily variation of below-canopy CO₂ flux

冬季为 2003 年 10 月 ~ 2004 年 3 月平均 ; 夏季为 2003 年 4 ~ 9 月平均 Winter data shown were averaged over October 2003 to March 2004 , Summer data shown were averaged over April to September 2004

表 1 土壤呼吸与不同温度因子不同方程的拟合结果 (n = 2137)

Table 1 Relationship between soil respiration and soil temperature measured at different depth fitted with Van ' Hoff equation , Arrhenius equation and Lloyd-Talor equation respectively (n = 2137)

		Reco _{ref} (283.16K)	$B/Ea/T_0$	Q_{10}			R^2
				10℃	20℃	30℃	
Van't Hoff 方程	4m 气温 Air temperature at 4m	0.0467	0.0486	1.63	1.63	1.63	0.014
	0.5m 植被温度 Canopy temperature at 0.5m	0.0442	0.0549	1.73	1.73	1.73	0.017
	0cm 土温 Soil temperature at 0cm	0.0271	0.0971	2.64	2.64	2.64	0.032
	5cm 土温 Soil temperature at 5cm	0.0262	0.0996	2.71	2.71	2.71	0.032
Van't Hoff equation	10cm 土温 Soil temperature at 10cm	0.0243	0.1052	2.86	2.86	2.86	0.034
	15cm 土温 Soil temperature at 15cm	0.0230	0.1096	2.99	2.99	2.99	0.035
	20cm 土温 20cm Soil temperature at 20cm	0.0220	0.1133	3.10	3.10	3.10	0.035
	40cm 土温 40cm Soil temperature at 40cm	0.0192	0.1240	3.46	3.46	3.46	0.034
Arrhenius 方程	4m 气温 Air temperature at 4m	0.0465	33399	1.64	1.59	1.54	0.014
	0.5m 植被温度 Canopy temperature at 0.5m	0.0439	37776	1.75	1.69	1.63	0.017
	0cm 土温 Soil temperature at 0cm	0.0263	67898	2.73	2.56	2.41	0.032
	5cm 土温 Soil temperature at 5cm	0.0254	69626	2.80	2.62	2.46	0.032
Arrhenius equation	10cm 土温 Soil temperature at 10cm	0.0235	73671	2.98	2.77	2.60	0.034
	15cm 土温 Soil temperature at 15cm	0.0222	76743	3.12	2.89	2.70	0.035
	20cm 土温 20cm Soil temperature at 20cm	0.0212	79363	3.24	3.00	2.79	0.035
	40cm 土温 40cm Soil temperature at 40cm	0.0184	86896	3.62	3.33	3.08	0.034
Lloyd-Talor 方程	4m 气温 Air temperature at 4m	0.0460	210.5	1.67	1.50	1.38	0.014
	0.5m 植被温度 Canopy temperature at 0.5m	0.0433	215.3	1.79	1.57	1.43	0.017
	0cm 土温 Soil temperature at 0cm	0.0228	236.5	3.22	2.27	1.83	0.032
	5cm 土温 Soil temperature at 5cm	0.0218	237.3	3.34	2.32	1.86	0.032
Lloyd-Talor equation	10cm 土温 Soil temperature at 10cm	0.0197	239.0	3.64	2.43	1.91	0.034
	15cm 土温 Soil temperature at 15cm	0.0183	240.2	3.89	2.53	1.96	0.035
	20cm 土温 20cm Soil temperature at 20cm	0.0171	241.1	4.10	2.60	2.00	0.035
	40cm 土温 40cm Soil temperature at 40cm	0.0142	243.5	4.80	2.84	2.10	0.034

Q₁₀为适宜范围内温度升高 10℃ 生态系统呼吸相对增加量 ,通常作为评价生态系统呼吸对温度敏感性指标。Van ' t Hoff 方程的 Q₁₀不随温度变化而变化 ,而 Arrhenius 方程和 Lloyd-Talor 方程的 Q₁₀随温度升高而减小 ,尤其是基于 Lloyd-Talor 方程的 Q₁₀对温度更加敏感 ,20℃ 时 Q₁₀为 2.32 ,30℃ 时 Q₁₀为 1.86 ,这与于贵瑞等^[9]的研究结果是一致的 ,表明 Lloyd-Talor 方程比其它 2 个方程能够更好地描述 Fcb 对温度的响应。

采用指数方程 (式 4) 分别拟合冬季和夏季夜间 Fcb 与 5cm 土壤温度的关系 (图 2), Q_{10} 冬季为 2.7, 夏季为 1.08, 表明 Fcb 对温度因子的敏感性随温度升高而降低, 与上面 Lloyd-Talor 方程得到的结果一致。

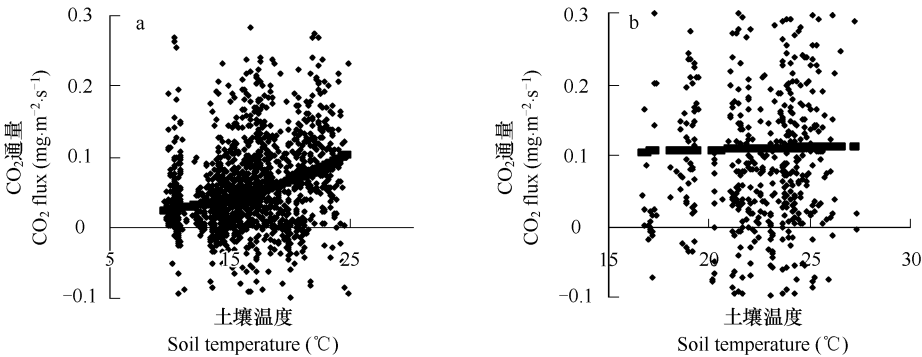


图2 冬季 (a)和夏季 (b)分别拟合的冠层下方夜间 CO₂ 通量 (y) 与 5cm 土壤温度 (x) 的关系

Fig.2 Relationship between nighttime below-canopy CO₂ flux (y) and soil temperature of 5cm depth (x) for winter (a) and summer (b) respectively

冬季 (10 ~ 3 月), 曲线方程: $y = 0.00887\exp(0.0987x)$, $n = 1592$, $R^2 = 0.023$, $Q_{10} = 2.7$; 夏季 (4 ~ 9 月), 曲线方程: $y = 0.0927\exp(0.0069x)$, $n = 545$, $R^2 = 0.0004$, $Q_{10} = 1.08$ (a) the fitted curve for winter (October 2003 to March 2004): $y = 0.00887\exp(0.0987x)$, $n = 1592$, $R^2 = 0.023$, $Q_{10} = 2.7$; (b) the fitted curve for summer (April to September 2004): $y = 0.0927\exp(0.0069x)$, $n = 545$, $R^2 = 0.0004$, $Q_{10} = 1.08$)

为减少随机误差, 分别计算逐日和逐月夜间平均土壤温度和 Fcb, 建立指数形式呼吸方程 (图 3), 解释方差 R^2 均高于表 1 中采用 30min 数据拟合结果, 表明平均处理可以显著减少涡度相关测定通量数据的变异性^[20]。逐日和逐月平均后拟合的指数方程的 Q_{10} 分别为 3.0 和 3.14, 而表 1 中以 5cm 土壤温度作为驱动变量的 Van 't Hof 方程的 Q_{10} 为 2.71, 可见 Q_{10} 一般随平均时间延长而增加。

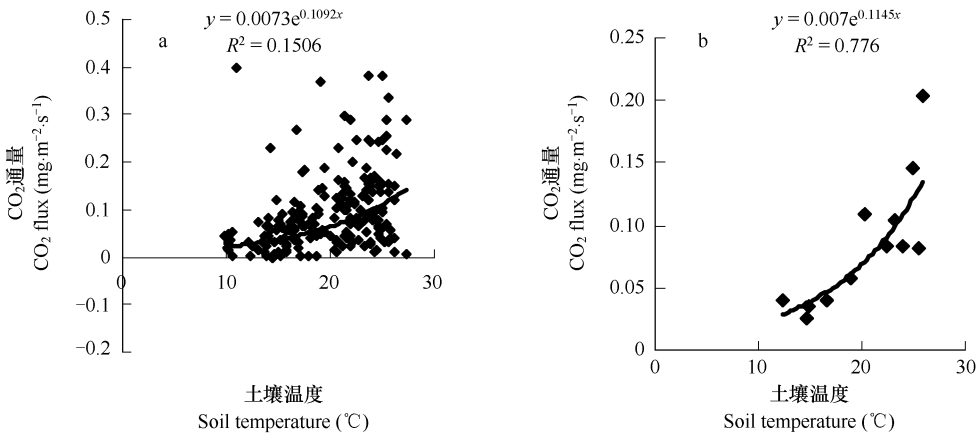


图3 逐日 (a)和逐月 (b)平均的夜间冠层下方 CO₂ 通量 (y) 与 5cm 土壤温度 (x) 的关系

Fig.3 Relationship between nighttime below-canopy CO₂ flux (y) and soil temperature at 5cm depth (x) at daily (a) and monthly steps respectively (a) 逐日: 曲线方程为 $y = 0.0073\exp(0.1092x)$, $n = 211$, $R^2 = 0.1506$, $Q_{10} = 3.0$; (b) 逐月: 曲线方程为 $y = 0.007\exp(0.1145x)$, $n = 12$, $R^2 = 0.776$, $Q_{10} = 3.14$ (a) fitted model: $y = 0.0073\exp(0.1092x)$, $n = 211$, $R^2 = 0.1506$, $Q_{10} = 3.0$; (b) fitted model: $y = 0.007\exp(0.1145x)$, $n = 12$, $R^2 = 0.776$, $Q_{10} = 3.14$)

3.3 Fcb 对土壤水分的响应特征

2003 ~ 2004 年鼎湖山针阔叶混交林 5cm 土壤含水量日平均值为 $(0.21 \pm 0.05) \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 其间冬季 (10 ~ 翌年 3 月份) 持续低于 $0.15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 最低达 $0.12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (图 4)。采用温度-水分连乘形式耦合的呼吸模型, 以 5cm 土壤温度 (T_s) 和土壤水分 (M_s) 作为驱动变量拟合得到:

$$F_{cb}=0.0193\exp\left(309\cdot\left(\frac{1}{283.16-225.9}-\frac{1}{(T_s+273.16)-225.9}\right)\right)\cdot\exp(0.899M_s+8.158M_s^2)$$
$$R^2=0.039\quad n=2137$$

(7)

式 (7) 中 M_s 的系数均为正号, 且解释方差 R^2 大于表 1 中仅以土壤温度作为驱动变量拟合结果, 表明引进水分因子有助于提高对 F_{cb} 的拟合率。

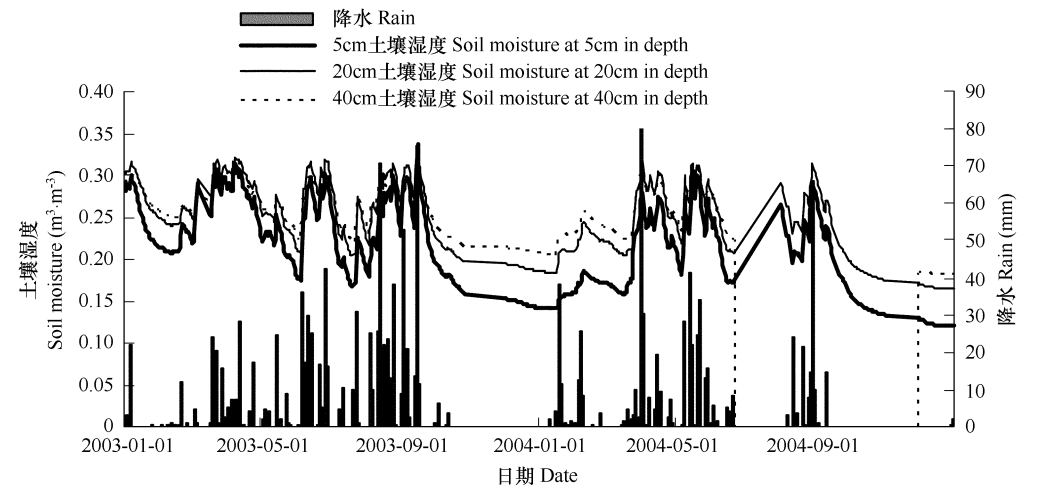


图4 2003~2004年逐日平均5cm、20cm和40cm深度土壤含水量与日降水量的年变化
Fig. 4 Annual variation of daily mean soil moisture at 5cm, 20cm and 40cm in depth and rain from 2003 to 2004

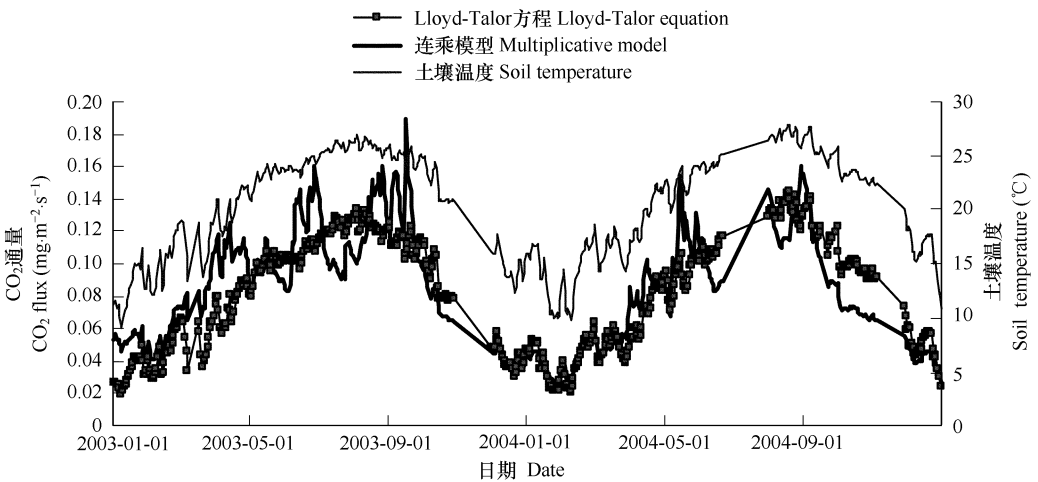


图5 基于Lloyd-Talor方程和连乘模型模拟的2003~2004年逐日平均冠层下方CO₂通量
Fig. 5 Annual variations of daily mean below-canopy CO₂ flux simulated by Lloyd-Talor equation and multiplicative model respectively

分别采用 Lloyd-Talor 方程和连乘模型模拟的 2003~2004 年 F_{cb} 具有一致的年变化趋势 (图 5), 且与气温一致, 夏季高于冬季。其中连乘模型的结果对 M_s 变化比较敏感, 具有较大的日间变异, 在 M_s 较大时模拟结果高于 Lloyd-Talor 方程模拟的 F_{cb} , 反之在干旱时段连乘模型模拟的 F_{cb} 低于 Lloyd-Talor 方程, 在 M_s 和 T_s 均较高的夏季更为明显。总之, 仅以 T_s 为驱动变量的 Lloyd-Talor 方程模拟结果完全由 T_s 控制, 而连乘模型由 T_s 和 M_s 控制, 可以反映水热条件的综合影响, 具有更强的拟合能力。

3.4 F_{cb} 年总量估算

2003 和 2004 年均属于高温少雨年份, 年降水分别比多年平均偏少 25.1% 和 17.4%, 年平均气温分别比常年平均高 0.6℃ 和 0.3℃。2003 年平均 F_{cb} 连乘模型估算结果 (0.092 ± 0.024) $\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 略高于

Lloyd-Talor 方程 (0.082 ± 0.037) $\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (表 2), 而 2004 年平均 F_{cb} 连乘模型估算结果 (0.075 ± 0.034) $\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 略低于 Lloyd-Talor 方程 (0.077 ± 0.034) $\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)。2 个模型模拟结果对比关系取决于 M_s , 在 M_s 较高年份, 连乘模型模拟的 F_{cb} 高于 Lloyd-Talor 方程, 反之在 M_s 较低的年份, 连乘模型模拟的 F_{cb} 低于 Lloyd-Talor 方程, 表明对受到干旱胁迫的生态系统而言, 水分条件可能成为影响 F_{cb} 的主导因素, 这与于贵瑞等^[9]的分析是一致的。2003 年的 F_{cb} 高于 2004 年, 是因为 2003 年 T_s 和 M_s 均高于 2004 年。

表 2 基于 Lloyd-Talor 方程和连乘模型对 2003 ~ 2004 年年平均呼吸强度的估算					
Table 2 Annual respiration of 2003 ~ 2004 estimated by Lloyd-Talor equation and Multiplicative model respectively					
年份 Year	模型 Model	平均强度 Average respiration ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	呼吸总量 Accumulated respiration ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	土壤温度 Soil temperature ($^{\circ}\text{C}$)	土壤湿度 Soil moisture ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
2003	Lloyd-Talor 方程 Lloyd-Talor equation	0.082 ± 0.037	708.6 ± 290.2	20.6 ± 4.8	0.230 ± 0.048
	连乘模型 Multiplicative model	0.092 ± 0.024	787.4 ± 296.8		
2004	Lloyd-Talor 方程 Lloyd-Talor equation	0.077 ± 0.034	663.4 ± 295.9	19.9 ± 4.9	0.189 ± 0.050
	连乘模型 Multiplicative model	0.075 ± 0.034	643.5 ± 292.2		

表 3 不同地区森林地表 CO ₂ 通量值的比较					
Table 3 Comparison of the below-canopy CO ₂ flux in different forest ecosystems					
地点 Location	植被 Vegetation	观测时段 Period	方法 Method	Soil respiration ($\text{mg} \cdot \text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	文献来源 Reference
鼎湖山 Dinghushan	针阔叶混交林 Mixed forest	1 a (2003) (2003)	EC	0.092	本文 this paper
鼎湖山 Dinghushan	针阔叶混交林 Mixed forest	1 a (2003) (2003)	箱式法 Static Chamber	0.111	[7 8]
鼎湖山 Dinghushan	常绿阔叶林 Evergreen forest	1 a (2003) (2003)	箱式法 Static Chamber	0.132	[7]
鼎湖山 Dinghushan	常绿阔叶林 Evergreen forest	1 a (2003) (2003)	碱吸收法 alkali-lime absorption	0.13	[9]
鼎湖山 Dinghushan	松林 Pine forest	1 a (2003) (2003)	箱式法 Static Chamber	0.070	[7]
西双版纳 Xishuangbannan	热带季雨林 Tropical rain forest	1 a (2003) (2003)	箱式法 Static Chamber	0.169	[6]
夏威夷 Hawaii	常绿阔叶林 Evergreen forest	1 a	箱式法 Static Chamber	0.084	[21] [7 8]

与以往对鼎湖山针阔叶混交林土壤呼吸观测相比, 连乘模型计算的 2003 年 F_{cb} 比箱式法同期观测结果^[8]偏低约 17% (表 2), 但介于常绿阔叶林^[7 9]和针叶林^[7]估算值之间, 表明涡度相关法测量的 F_{cb} 与传统的箱式法^[7 8]和碱吸收法^[9]具有可比性。与国内外相关研究相比, 本文估算的鼎湖山混交林 F_{cb} 介于热带季雨林^[6]和北方阔叶林^[21]之间 (表 3), 符合生态系统呼吸强度随纬度和林型变化规律。

4 讨论与结论

- (1) 与温带松林^[22]地表植被仅在生长季存在光合作用不同, 鼎湖山混交林地表植被全年均具有光合能力。鼎湖山混交林 F_{cb} 全年大于 0, 表明地表植被和土壤总体上表现为 CO_2 排放源。
- (2) 不同温度因子和土壤水分因子与 F_{cb} 之间均具有较好相关性。土壤温度与 F_{cb} 相关性最好的深度不是通常认为的土壤微生物活动频繁的 5cm 深度, 而是在 20cm 深度, 反应出呼吸过程与水热条件之间存在着复杂的非线性关系。
- (3) Van 't Hoff 方程、Arrhenius 方程和 Lloyd-Talor 方程均可以较好反应土壤温度与 F_{cb} 的关系, 其中

Lloyd-Talor 方程能描述 Fcb 对温度敏感性指标 Q_{10} 随温度的变异性特征。在比较不同站点之间的 Q_{10} 时 , 需要注意所采用的呼吸模型、温度测量位置、温度范围以及资料的平均时间等是否一致。

(4) Lloyd-Talor 方程模拟的 Fcb 完全由土壤温度控制 , 而连乘模型由土壤温度和土壤水分控制 , 可以反映水热条件对 Fcb 的综合影响 , 因而具有更强的拟合能力。在土壤水分较高时连乘模型对 Fcb 的估算高于 Lloyd-Talor 方程 , 反之在干旱时段连乘模型模拟结果低于 Lloyd-Talor 方程 , 表明当生态系统存在水分胁迫时 , 土壤水分可以成为影响 Fcb 的主导因子。有研究^[23]认为连乘模型可能会过高估计生态系统呼吸对温度的响应 , 特别是在干旱条件下^[9] , 也可能系统性低估生态系统呼吸对水分条件的响应能力。但从鼎湖山情况看 , 连乘模型比 Lloyd-Talor 方程可以更好地模拟 Fcb 动态 , 考虑水分因子对避免夏季 Fcb 系统性低估具有意义。

(5) 2003 年 Fcb 平均为 $(0.092 \pm 0.024) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 比静态箱-气相色谱法测得的土壤呼吸偏低 17% , 介于鼎湖山常绿阔叶林和针叶林之间 , 符合呼吸强度随林型变化规律 , 表明涡度相关测量的 Fcb 与传统箱式法和碱吸收法具有可比性。与箱式法相比 , 涡度相关法通量测定结果普遍存在偏低估算现象 , 因此如何量化土壤呼吸和地表植被呼吸、光合作用各分量对 Fcb 的贡献 , 值得进一步研究。

References :

[1] Yu G R , Zhang L M , Sun X M , *et al.* Advances in carbon flux observation and research in Asia. Science in China Ser D. Earth Sciences , 2004 , 34 (supp II) : 15 — 29.

[2] Liu S H , Fang J Y , Makoto K. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing , China. Acta Phytoecologica Sinica , 1998 , 22 (2) : 119 — 126.

[3] Huang C C , Ge Y , Chang J , *et al.* Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid subtropical zone , China. Acta Ecologica Sinica , 1999 , 19 (3) : 324 — 328.

[4] Wu Z M , Zeng Q B , Li Y D , *et al.* A preliminary research on the carbon storage and CO₂ release of the tropical forest soils in Jianfengling , Hainan Island , China. Acta Phytoecologica Sinica , 1997 , 21 (5) : 416 — 423.

[5] Luo S S , Chen B F , Li Y D. Litter and soil respiration in a tropical mountain rain forest in Jianfengling , Hainan Island. Acta Ecologica Sinica , 2001 , 21 (12) : 2013 — 2016.

[6] Sha L Q , Zheng Z , Tang J W , *et al.* Soil respiration in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna , SW China. 2004 , Science in China Ser D. Earth Sciences , 34 (Supp. II) : 167 — 174.

[7] Zhou C Y , Zhou G Y , Wang Y H , *et al.* CO₂ efflux from different forest soils and impact factors in Dinghu Mountain , China. 2004 , Science in China Ser D. Earth Sciences , 34 (supp. II) : 175 — 182.

[8] Zhou C Y , Zhang D Q , Qang Y S , *et al.* Diurnal variations of fluxes of the greenhouse gases from a coniferous and broad-leaved mixed forest soil in Dinghushan , Acta Ecologica Sinica 2004 , 24 (8) : 17381 — 741.

[9] Yi Z G , Yi W M , Zhou G Y , *et al.* Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve. Acata Ecologica Sinica , 2003 , 23 (8) : 1673 — 1678.

[10] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rate of ecosystem : past , present and future. Global Change Biol , 2003 , 9 : 479 — 492.

[11] Valentini R , Angelis P D , Matteucci G , *et al.* Seasonal net carbon exchange of a beech forest with the atmosphere. Global Change Biology , 1996 , 2 : 197 — 207.

[12] Baldocchi D D , Falge E , Gu L H , *et al.* FLUXNET : a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide , water vapor , and energy flux densities. Bull Am Meteorol Soc , 2001 , 82 (11) : 2415 — 2434.

[13] Law B E , Falge E , Gu L , *et al.* Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. Agricultural and Forest Meteorology , 2002 , 113 : 97 — 120.

[14] Schotanus P H , Nieuwstadt F T M , de Bruin H A R. Temperature measurements with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. Boundary-Layer Meteorol , 1983 , 26 , 81 — 93.

[15] Webb E K , Pearman G I , Leuning R. Correction of flux measure ments for density effects due to heat and water vapour transfer. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society , 1980 , 106 : 85 — 100.

[16] Wilczak J M , Oncley S P , Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. Boundary-Layer Meteorol , 2001 , 99 (1) : 127 — 150.

[17] Falge E , Baldocchi D D , Olson R J , *et al.* Gapfilling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. Agric. For. Meteorol ,

2001 ,107 ,43 —69.

[18] Fang C ,Moncrieff J B. A model for soil CO₂ production and transport I :model development. *Agriculture and Forest Meteorology* ,1999 ,95 :225 —236.

[19] Yu G R ,Wen X F ,Li Q K ,*et al.* Seasonal patterns and environmental control of ecosystem respiration in subtropical and temperate forests in China. 2004 ,*Science in China Ser D. Earth Sciences* ,34 (Supp II) :2004 84 —94.

[20] Griffis T J ,Black T A ,Morgenstern K ,*et al.* Ecophysiological controls on the carbon balances of three southern boreal forests. *Agriculture and Forest Meteorology* ,2003 ,117 :53 —71.

[21] Townsend A R ,Vitousek P M ,Trumbore S E. Soil organic matter dynamics along gradients in temperature and land use on the island of Hawaii. *Ecology* ,1995 ,76 :721 —733.

[22] Law B E ,Baldocchi D D ,Anthoni P M. Below-canopy and soil CO₂ Fluxes in a ponderosa pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology* ,1999 ,94 ,171 —188.

[23] Reichstein M ,Tenhunen J D ,Roupsard O ,*et al.* Ecosystem respiration in two Mediterranean evergreen Holm Oak forests :drought effects and decomposition dynamics. *Functional Ecology* ,2002 ,16 :27 —39.

参考文献：

[1] 于贵瑞 ,张雷明 ,孙晓敏 ,等. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展. *中国科学 (D 辑)* ,34 (增刊 II) :2004. 15 ~29.

[2] 刘绍辉 ,方精云 ,清田一信. 北京山地温带森林的土壤呼吸. *植物生态学报* ,1998 22 (2) :119 ~126.

[3] 黄承才 ,葛滢 ,常杰 ,等. 中亚热带东部 3 种主要木本群落土壤呼吸的研究. *生态学报* ,1999 ,19 (3) :324 ~328.

[4] 吴仲民 ,曾庆波 ,李意德 ,等. 尖峰岭热带森林土壤 C 储量和 CO₂ 排放量的初步研究. *植物生态学报* ,1997 21 (5) :416 ~423.

[5] 骆士寿 ,陈步峰 ,李意德. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究. *生态学报* 2001 21 (12) :2013 ~2016.

[6] 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. *中国科学 (D 辑)* ,34 (增刊 II) :2004. 167 ~174.

[7] 周存宇 ,周国逸 ,王迎红 ,等. 鼎湖山森林地表 CO₂ 通量及其影响因子的研究. *中国科学 (D 辑)* ,34 (增刊 II) :2004. 175 ~182.

[8] 周存宇 ,张德强 ,王跃思 ,周国逸 ,刘世忠 ,唐旭利. 鼎湖山针阔叶混交林地表温室气体排放的日变化. *生态学报* 2004 24 (8) :1738 ~1741.

[9] 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的研究. *生态学报* ,2003 23 (8) :1673 ~1678.

[19] 于贵瑞 ,温学发 ,李庆康 ,张雷明 ,任传友 ,刘允芬 ,关德新. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学 (D 辑)* ,34 (增刊 II) :2004. 84 ~94.