

珠三角城市绿地 CO₂ 通量的环境响应特征*

孙春健^{1,2,*} 申双和¹ 王春林^{1,2} 张锦标³ 任 倩²

(¹南京信息工程大学, 南京 210044; ²广东省气候中心, 广州 510080; ³东莞市气象局, 广东东莞 523086)

摘 要 城市绿地的净生态系统 CO₂ 交换量 (*NEE*) 受多种环境因素控制, 定量分析 *NEE* 的环境响应机制对评估绿地生态系统固碳效益、优化城市绿地布局有重要意义。本文应用 2009、2010 年位于东莞市植物园内的涡度相关 CO₂ 通量定位观测资料, 分析了光合有效辐射 (*PAR*)、土壤温度 (*T_s*)、饱和水汽压差 (*VPD*)、降水及周边不同下垫面类型对 *NEE* 的影响。结果表明: *NEE* 绝对值随 *PAR* 的升高而增加, *PAR* 超过光饱和点 (约为 1500 μmol photons · m⁻² · s⁻¹) 后, *NEE* 绝对值呈回落趋势; 生态系统呼吸 (*R_{eco}*) 随 *T_s* 升高而增加, 在温度较低时, *R_{eco}* 对 *T_s* 的敏感性较强 (10 °C 时, Lloyd-Taylor 方程的 *Q₁₀* = 1.8), 随着温度升高, 敏感性下降 (30 °C 时, *Q₁₀* = 1.43); *VPD* 通过影响植物气孔导度对 CO₂ 交换产生作用, 相同温度下, 随着 *VPD* 升高, 气孔导度增大, 呼吸释放与光合固定的 CO₂ 量均增加; 降水能增加土壤湿度进而使 *R_{eco}* 增大, 25 °C 时, 降水后的 *R_{eco}* 比降水前增加 15.8%; 测站东北和西南方的绿地范围较大, 当东北和西南部是主要贡献区时, *NEE* 绝对值较大, 表明增加城市绿地能有效提高城市固碳效益。

关键词 城市绿地; CO₂ 交换; 涡度相关; 气象要素; 环境影响

中图分类号 Q146 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)1-0138-07

Environmental response characteristics of CO₂ flux above urban green space in Pearl River Delta. SUN Chun-jian^{1,2,*}, SHEN Shuang-he¹, WANG Chun-lin^{1,2}, ZHANG Jin-biao³, REN Qian² (¹Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; ²Climate Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China; ³Meteorological Bureau of Dongguan, Dongguan 523086, Guangdong, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31** (1): 138–144.

Abstract: The net ecosystem exchange (*NEE*) of CO₂ above urban green space is controlled by various environmental factors. To quantitatively analyze the environmental response of the *NEE* can provide valuable basis for the evaluation of carbon fixation effect of green space ecosystem and the optimization of urban green space distribution. Based on the CO₂ flux data of Dongguan Botanical Garden in 2009 and 2010 measured by eddy-covariance method, this paper analyzed the relationships between the *NEE* and the environmental factors (photosynthetic active radiation (*PAR*), soil temperature (*T_s*), saturation vapor pressure differential (*VPD*), precipitation, and land cover distribution). The results showed that the absolute value of *NEE* increased with increasing *PAR* when the *PAR* was less than the light saturation point (1500 μmol photons · m⁻² · s⁻¹), but presented a decreasing trend when the *PAR* was higher than the light saturation point. The ecosystem respiration (*R_{eco}*) increased with rising *T_s*, and was more sensitive to the *T_s* when the temperature was low (the *Q₁₀* of Lloyd-Taylor equation was 1.8 at 10 °C), compared with that at high temperature (*Q₁₀* was 1.43 at 30 °C). The *VPD* could act on CO₂ exchange by affecting plant stomata conductance. When the *VPD* rose, both the CO₂ release and the CO₂ fixation increased. Precipitation had significant effect on the *R_{eco}* through increasing soil moisture content. After precipitation, the *R_{eco}* at 25 °C was 15.8% higher than that before precipitation. There was a wider green space in northeast and southwest directions around the observation station. When

* 广东省科技计划项目 (2010A030200011) 和广东省自然科学基金项目 (S2011010004771) 资助。

** 通讯作者 E-mail: sczero@yeah.net

收稿日期: 2011-07-15 接受日期: 2011-10-26

these directions were the main contribution areas, the absolute value of *NEE* was larger, indicating that increasing urban green space could improve urban carbon fixation effect.

Key words: urban green space; CO₂ exchange; eddy-covariance; meteorological element; environmental effect.

大气中 CO₂ 等温室气体持续增加所引发的以全球变暖为主要特征的气候变化,已成为人类可持续发展所面临的最严峻挑战之一。研究陆地与大气系统之间的 CO₂ 交换量,评价区域碳循环和碳源汇状况,进而为应对气候变化提供决策方案,是目前正在实施的一系列大型国际研究计划的核心任务之一 (Steffen *et al.*, 1998; Law *et al.*, 2002)。欧美、日本等国家率先进行了陆地生态系统的 CO₂ 通量观测研究,建立了全球通量网络 (FLUXNET) (Baldocchi *et al.*, 2001),中国自 2002 年建成中国通量网 (ChinaFlux) (于贵瑞等, 2006) 以来,陆续对森林、草地和农田等生态系统 (关德新等, 2004; 刘允芬等, 2004; 于贵瑞等, 2004; 齐玉春等, 2005; 赵晓松等, 2006) 的碳交换情况开展了广泛的研究,但目前针对城市绿地生态系统的碳通量研究相对较少 (王修信等, 2007; 梅雪英等, 2010)。城市是人为碳排放最集中的区域,绿地对从城市源头上减轻碳排放发挥着积极的作用。通过分析气象和环境条件对 CO₂ 交换量的影响,掌握城市绿地 CO₂ 交换量的控制因素,能够为城市绿地的碳交换研究提供依据。

本文应用 2009、2010 年东莞植物园的涡度相关法 CO₂ 通量数据,分析了光合有效辐射 (*PAR*)、土壤温度 (*T_s*)、饱和水汽压差 (*VPD*) 及降水对 CO₂ 交换的影响,并讨论了周边不同下垫面类型对净生态系统 CO₂ 交换量 (*NEE*) 的影响,对评估城市绿地生态系统的固碳效益、优化绿地布局具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 观测地概况

观测站位于东莞植物园的气象台观测场中,地理位置为 22°57'58"E, 113°44'20"N, 海拔高度 40 m。测站属亚热带季风气候,年平均气温为 22.7 °C,最冷月为 1 月,最热为 7 月;年平均日照时数为 1873.7 h,一年中 2—3 月日照最少,7—8 月日照最多;受季风和台风影响,近 80% 降水集中在 4—9 月,年平均降水量为 1819.9 mm;盛行风向为东南风,其中东风约占 29.2%,东南风占 11.4%,南风占 21.2%。东莞植物园占地面积约 460 hm²,园内植

物以果树 (荔枝 *Chinensis sonner*、龙眼 *Dimocarpus longan* 等)、园林植物 (小叶榄仁 *Terminalia mantaly*、假苹婆 *Sterculia lanceolata*、秋枫 *Bischofia javanica* 等) 和草坪为主,冠层高度约为 10 m。

1.2 数据采集与处理

通量塔高 20 m 分为 4 层 (2、4、10、20 m),其中开路涡度相关系统位于 4 和 20 m 高度,涡度相关系统由三维超声风温仪 (CSAT3, Campbell, USA) 和开路 CO₂/H₂O 分析仪 (Li-7500, LiCor Inc., USA) 组成,数据采集器自动存储 10 Hz 的原始数据,并依据涡度相关原理 (Baldocchi & Vogel, 1996) 在线计算和存储 30 min 平均资料。4 层常规气象观测包括:温湿度 (HMP45C, Vaisala, Finland), 风速 (010C, MetOne, USA), 辐射 (CNR1, Campbell, USA) 和光合有效辐射 (PAR-LITE, Kipp & Zonen, Holland) 等。5 cm 土壤温度采样频率为 1 Hz,数据采集器自动计算并存储 1 h 平均的土壤温度数据。

本文以 2009、2010 年 20 m 高度处,生态系统与大气界面的 CO₂ 交换量为研究对象,分析环境因素对城市绿地生态系统碳交换的影响。通量资料在线计算过程中自动进行了虚温订正和空气密度变化订正 (WPL 订正) (Webb *et al.*, 1980; Schotanus *et al.*, 1983)。采用二维坐标转换 (Wilczak *et al.*, 2001),经坐标转换后的通量数据比原数据减小不足 1%,可忽略。由于涡度相关原理和仪器设备的局限性等问题,需对通量数据进行质量控制,剔除符合以下任意一条的 30 min 数据: (1) 有降水时; (2) 湍流不充分时 (摩擦速度 $u^* < 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); (3) 超过仪器量程及合理范围的数据: CO₂ 通量有效范围为 (-2.0 ~ 2.0) mg CO₂ · m⁻² · s⁻¹, CO₂ 浓度有效范围为 (500 ~ 800) mg CO₂ · m⁻³, 水汽浓度有效范围为 (0 ~ 40) g · m⁻³; (4) 有效样本数量不足 1500; (5) 异常突出的数据 (测得的通量值与其相邻 5 点平均值之差的绝对值大于这 5 点方差 3 倍的数据)。其中 2009 年 5 月缺测。

1.3 计算方法

在生态系统中,植物光合作用吸收的 CO₂ (*GPP*)、冠层大气储存 CO₂ 的变化量 (F_c , F_s) 及生

物与非生物呼吸释放 CO_2 (R_{eco}) 共同引起了净生态系统 CO_2 交换量 (NEE) 的变化 (Paw *et al.*, 2000; Massman & Lee, 2002), 方程如下:

$$NEE = F_c + F_s \quad (1)$$

$$NEE = -(GPP - R_{\text{eco}}) \quad (2)$$

式中, F_c 为生态系统与大气界面上 CO_2 通量的观测值, F_s 为观测高度以下 CO_2 储存量的变化, GPP 为生态系统初级生产力, R_{eco} 为生态系统呼吸量。在 NEE 计算过程中假设垂直湍流充分, 水平平流通量和平流通量可忽略不计 (Wofsy *et al.*, 1993; Law *et al.*, 1999)。

存储量 F_s 采用单层 CO_2 浓度变化 (Aubinet *et al.*, 2001; Pilegaard *et al.*, 2001) 计算:

$$F_s = \Delta C(z) / \Delta t \cdot \Delta z \quad (3)$$

式中: $\Delta C(z)$ 为高度 z 处 CO_2 浓度变化量 ($[\text{CO}_2]_t - [\text{CO}_2]_{(t-\Delta t)}$), Δt 为时间步长 30 min, Δz 为设备离地面高度 20 m。考虑到筛选的数据是在湍流充分 ($u^* > 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的情况之下, 因此需使 F_s 项 $< 0.3 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 并剔除 $30 \text{ min} \Delta C(z) > 20 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$ 的值, 以减少异常突出的数据。

NEE 与光合有效辐射 (PAR) 的关系采用 Michaelis-Menten 模型 (Goulden *et al.*, 1997; Falge *et al.*, 2001) 拟合:

$$NEE = -\frac{\alpha \cdot PAR \cdot P_{\text{max}}}{\alpha \cdot PAR + P_{\text{max}}} + R_{\text{eco}} \quad (4)$$

式中: NEE 为白天生态系统净 CO_2 交换量; α 为表观初始光能利用率, 单位为 $\text{mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{ photons}$; P_{max} 为光饱和时生态系统同化 CO_2 的能力, 单位为 $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; PAR 为采用光量子计量的光合有效辐射, 单位为 $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; R_{eco} 为白天生态系统呼吸速率。

生态系统呼吸 R_{eco} 模型采用: 指数方程 (5)、Arrhenius 方程 (6) 和 Lloyd-Taylor 方程 (7) (Lloyd & Taylor, 1994; Mahli *et al.*, 1999; Fang & Moncrieff, 2001) 计算:

$$R_{\text{eco}} = \alpha \exp(b \cdot T_s) \quad (5)$$

$$R_{\text{eco}} = R_{\text{eco,ref}} \exp\left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_s}\right)\right) \quad (6)$$

$$R_{\text{eco}} = R_{\text{eco,ref}} \exp\left(E_0 \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (7)$$

式中: $R_{\text{eco,ref}}$ 为参考温度 T_{ref} (取 283.16 K) 时的生态系统呼吸, T_s 是测得的土壤开氏温度, R ($8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) 为气体常数, E_0 (309 K) 为常数, 需

要拟合的参数为 $a, b, R_{\text{eco,ref}}$, 活化能 E_a , 温度试验常数 T_0 。

2 CO_2 交换量的环境响应

2.1 光合有效辐射对白天净生态系统交换量的影响

将 2009 和 2010 年的白天净生态系统交换量与光合有效辐射按照 12—2 月、3—5 月、6—8 月和 9—11 月分季拟合 Michaelis-Menten 方程 (图 1), 分析光照条件对 NEE 的影响。随着 PAR 增加, 各月的 NEE 都呈增加态势, 且随着夏季光照的增强, 数据集的区域向右移动, 光饱和点也升高。12 月—翌年 2 月光照较弱, 光饱和点约为 $1000 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 6—11 月光照较强, 光饱和点约为 $1500 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与园内大量种植的荔枝光饱和点 $1560 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 相近, 与同属于亚热带的鼎湖山针阔叶林 ($1500 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (王春林等, 2006) 和千烟洲针叶林 ($1600 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (刘允芬等, 2004) 的光饱和点也较为接近。在光照充足的 6—8 月, 当 PAR 超过光饱和点后, NEE 在 PAR 较强区段的分散程度增加, 曲线呈回落趋势, 这是因为超过光饱和点后, 光合量不再增加, 呼吸量随温度升高而增加的作用更明显, 使得 NEE 降低。夏半年的温度较高, 由于呼吸增大, 光补偿点相比冬半年大, 12 月—翌年 2 月的光补偿点较低, 约为 $150 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 6—8 月光补偿点较高, 约为 $220 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2 温度对生态系统呼吸的影响

选择夜间 $PAR < 1$ 的资料, 并对 2 年的 CO_2 通量数据逐日取平均, 剔除当天样本数 < 3 的数据, 采用指数方程拟合 2009、2010 年的日平均呼吸量 (R_{eco}) 与 5 cm 土壤温度 (T_s) 的关系。如图 2, 随着 T_s 的升高, R_{eco} 增加, 且增速加快。由于指数方程的温度的敏感性因子 Q_{10} (Fierer *et al.*, 2005) 是恒定的 (1.48), 为比较 R_{eco} 对 T_s 的敏感性, 另外采用 Arrhenius 模型 (6) 和 Lloyd-Taylor 模型 (7) 拟合 R_{eco} 与 T_s 方程:

$$R_{\text{eco}} = 0.093 \exp\left(3400 \left(\frac{1}{283.16} - \frac{1}{T_s + 273.16}\right)\right)$$

$$R_{\text{eco}} = 0.09 \exp\left(309 \left(\frac{1}{77.8} - \frac{1}{T_s + 67.8}\right)\right)$$

2 个方程的温度敏感性因子 Q_{10} 均在低温时较大 (T_s 为 10、20、30℃ 对应的 Q_{10} 分别为 1.55、1.49、1.45 和 1.80、1.57、1.43), 表明 R_{eco} 对 T_s 有较强的

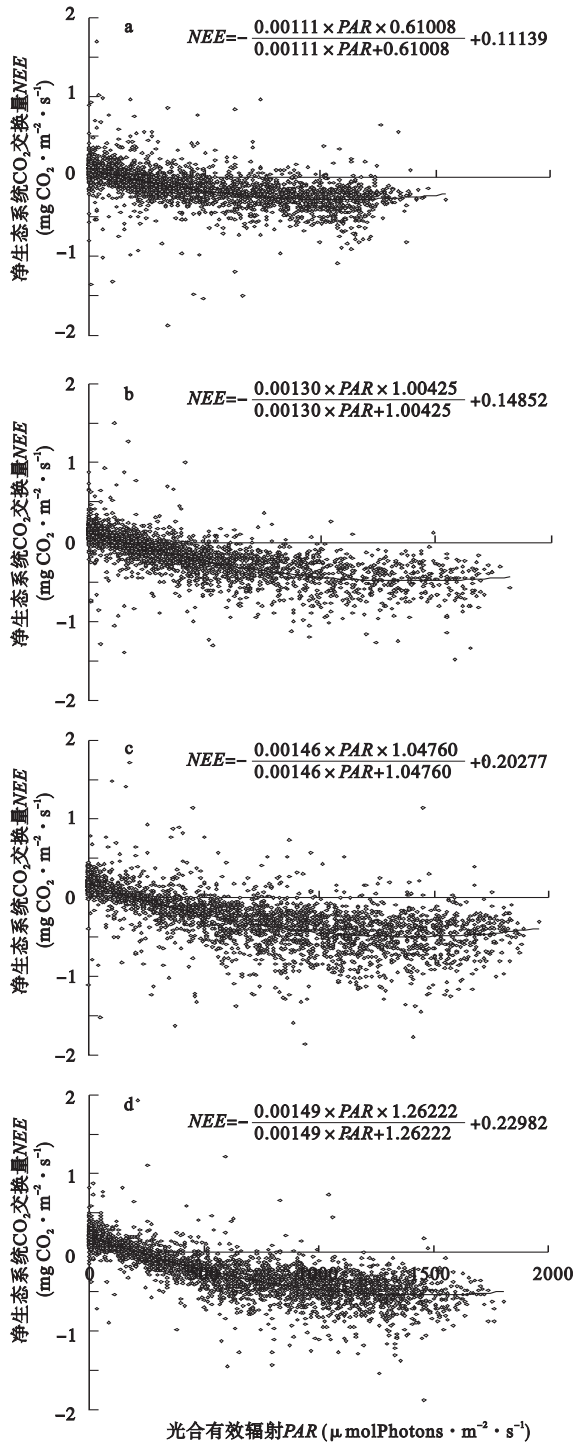


图1 2009、2010 年 12—2 (a)、3—5 (b)、6—8 (c) 和 9—11 (d) 月的光合有效辐射 PAR 与净生态系统 CO₂ 交换量 NEE 关系曲线
Fig. 1 Relation between photosynthetic active radiation and net ecosystem CO₂ exchange of Dec. to Feb. (a), Mar. to May (b), Jun. to Aug. (c) and Sep. to Nov. (d) in 2009 and 2010

敏感性,且敏感性随 T_s 的升高而下降,由 Lloyd-Taylor 方程拟合的呼吸比 Arrhenius 方程对温度更敏

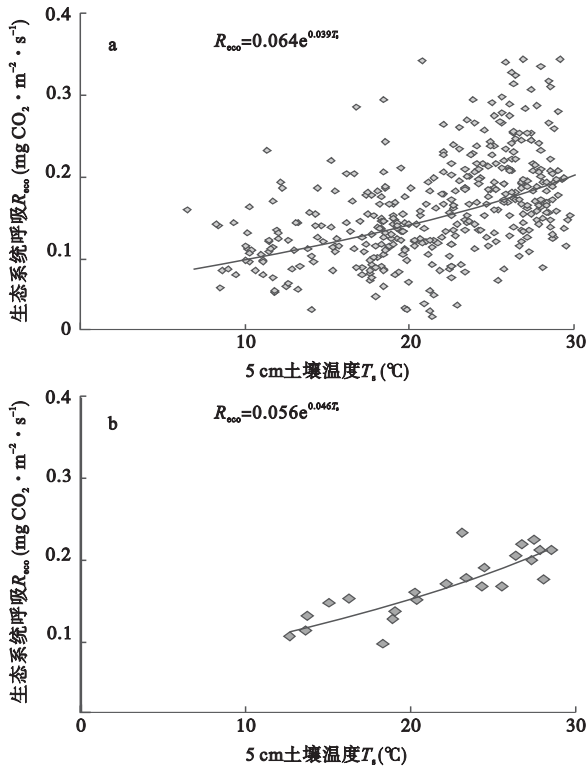


图2 日平均 (a) 和月平均 (b) 的生态系统呼吸与 5 cm 土壤温度指数曲线
Fig. 2 Daily (a) and monthly (b) average exponential curve and scatter diagram between ecosystem respiration and soil temperature at 5 cm

感。采用月平均数据拟合的指数方程比日平均方程的相关性高,其 Q₁₀ 为 1.58 大于日平均的 1.48,可见适当的平均处理能够提高拟合方程的准确性。

2.3 饱和水汽压差对 CO₂ 交换量的影响

植物在进行光合与呼吸作用时,CO₂ 的吸收和释放都是通过叶片的气孔完成的,而饱和水汽压差 (VPD) 是影响气孔导度的主要因素 (赵平等, 2007),因此对 CO₂ 交换也有一定影响。

选取温度在 25℃ 以上 2009、2010 年的白天 CO₂ 通量数据,以减小温度变化的影响,将数据按 VPD 分为 (VPD < 10 hPa, 10 hPa < VPD < 15 hPa, 15 hPa < VPD < 20 hPa, VPD > 20 hPa) 4 组 (图 3a)。当 PAR < 200 μmol photons · m⁻² · s⁻¹ 时,VPD 越大,NEE 正向增加,说明光照不足时,随 VPD 升高,呼吸增加;当 PAR > 500 μmol photons · m⁻² · s⁻¹ 后,随着 VPD 的升高,NEE 负向增大,光合固碳量增多;VPD > 20 hPa 时对应的曲线相比 15 hPa < VPD < 20 hPa 时的曲线略微向上移动,这可能是由于 VPD 较大时对应的温度较高,呼吸增加,使 NEE 绝对值减小。表明在 PAR 充足时,VPD 越大,植物的气孔导度越高,吸收 CO₂

的能力越强。

取 2009、2010 年夜间的 CO₂ 通量数据,按 VPD 分为(VPD<3 hPa,3 hPa <VPD<6 hPa,6 hPa <VPD<9 hPa,9 hPa<VPD<12 hPa)4 组,分析不同 VPD 条件下 R_{eco} 随 T_s 的变化(图 3b)。由于 VPD 随温度升高而增加,温度低于 10℃ 时,对应的高 VPD 数据较少,因此比较低温区段时,排除 9 hPa<VPD<12 hPa 和 6 hPa<VPD<9 hPa 的情况,得到低温条件下,3 hPa<VPD<6 hPa 时的呼吸量比 VPD<3 hPa 时大;高温条件下的低 VPD 数据较少,在比较温度高于 20℃ 的曲线时排除 VPD<3 hPa 的情况,同温度下,9 hPa<VPD<12 hPa 所对应的 R_{eco} 最大,3 hPa<VPD<6 hPa 对应 R_{eco} 最小。表明 R_{eco} 也随 VPD 的升高而增加。

2.4 降水对生态系统呼吸的影响

降水后,空气与土壤湿度大幅增加,植物与土壤微生物的生命活动加快(Lee *et al.* , 2002),因此降水前后的生态系统呼吸也有一定差别。为分析降水对 R_{eco} 的影响,选取 2009、2010 年降水前 5 d(降水前连续 10 d 以上没有发生过降水现象)的呼吸数据

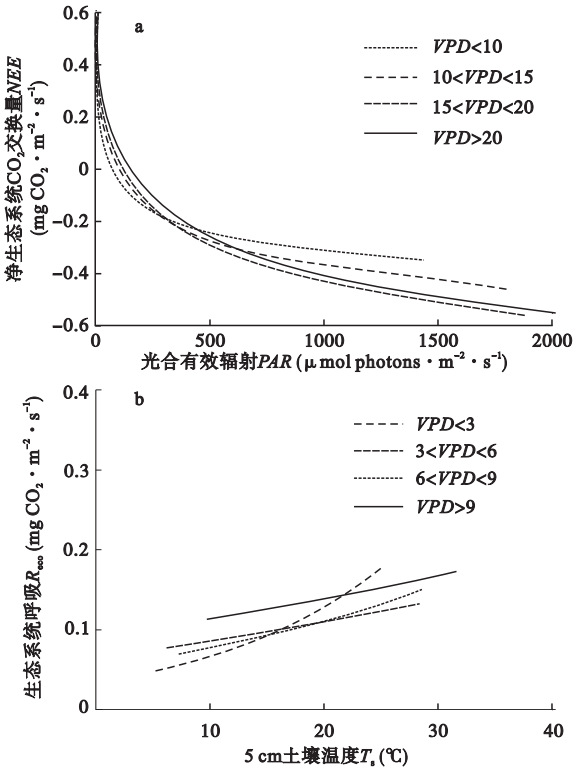


图 3 不同 VPD 条件下的净生态系统交换量与光合有效辐射曲线(a)及生态系统呼吸与 5 cm 土壤温度曲线(b)
Fig. 3 Relation curve between net ecosystem CO₂ exchange and photosynthetic active radiation (a), and exponential curve between ecosystem respiration and soil temperature at 5 cm (b) at different saturation vapor pressure differential conditions

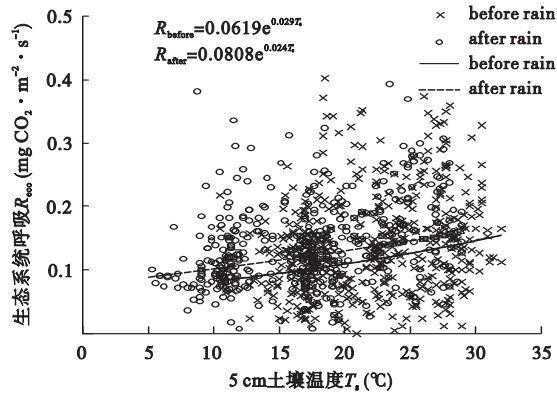


图 4 降水前后的生态系统呼吸
Fig. 4 Ecosystem respiration before and after rain

和降水过程结束后 5 d 的数据,分别拟合指数方程,对比降水过程前后 R_{eco} 的差异(图 4)。在相同温度下,降水后的 R_{eco} 比降水前明显升高,温度为 25℃ 时,降水后的 R_{eco} 比降水前增加了约 15.8%。表明雨后的高湿度条件会使 R_{eco} 产生较大增加。

3 讨论

除上述主要环境因素外,测站周边不同类型下垫面的分布对 CO₂ 交换也有影响。为研究测站周围城区和绿地布局对 CO₂ 交换的作用,采用对比不同风向条件下 CO₂ 交换量的方法。取 2009、2010 夏半年(6—10 月)的 CO₂ 通量资料,以减小季节变化的影响,按风向(风速>1 m·s⁻¹)划分为:337.5°~22.5°、22.5°~67.5°、67.5°~112.5°、112.5°~157.5°、157.5°~202.5°、202.5°~247.5°、247.5°~292.5°和 292.5°~337.5°共 8 个方向。将白天 CO₂ 交换量分别拟合 Michaelis-Menten 方程,分析白天的 CO₂ 交换量受城区布局影响(图 5)。PAR 为 1000 μmol photons·m⁻²·s⁻¹ 时,东北风(22.5°~67.5°)条件下的 NEE 绝对值最大,偏南风(157.5°~202.5°,202.5°~247.5°)条件下次之,偏东风(67.5°~112.5°,112.5°~157.5°)条件下再次,西北风(247.5°~292.5°,292.5°~337.5°,337.5°~22.5°)情况下 NEE 最小。表明 CO₂ 交换与绿地和城区的分布密切相关,通量站东北和南方的绿地范围相对较大,因此东北和南部为贡献区时,固定的 CO₂ 较多,表现为拟合曲线的 NEE 绝对值较大;距离观测站最近的城区分布在东部(距离约 0.8 km)和西北部(约 1.2 km),受城市碳源影响,当这 2 个区域为贡献区时,释放到大气 CO₂ 较多,表现为曲线的 NEE 绝对值较小。

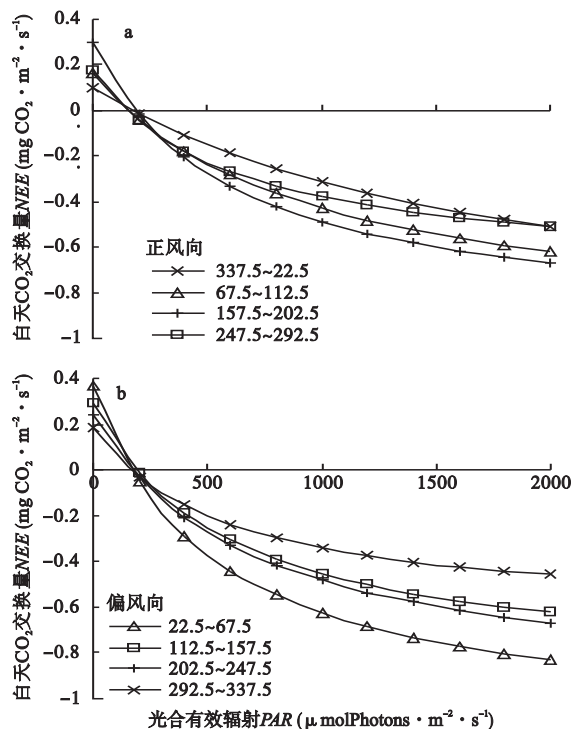


图5 白天 CO₂ 交换量受城市不同下垫面分布的影响
Fig. 5 The impact of different urban land use and distribution on CO₂ exchange in the daytime

采用相同的划分方法,利用夜间的 CO₂ 通量资料拟合 R_{eco} 、 T_s 指数方程,分析夜间的 CO₂ 交换量受城区和绿地布局的影响。风向为 337.5°~22.5°、22.5°~67.5°和 67.5°~112.5°时,风速>1 m·s⁻¹的数据较少排除。如图 6, T_s 为 20℃ 时,偏东南风(112.5°~157.5°,157.5°~202.5°)条件下的 R_{eco} 较大,西南风(202.5°~247.5°)时 R_{eco} 次之,偏西北风(247.5°~292.5°,292.5°~337.5°)时的 R_{eco} 最小。由于夜间的风速减小,通量塔的空间代表性也随之缩小,东部的城区由于距离较近,受其影响,东南部为贡献区时释放到大气 CO₂ 较多,表现为曲线的 R_{eco} 较大,而西北方城区相对较远且西北部的绿地范围较小,当其作为贡献区时释放到大气 CO₂ 较少,表现为曲线的 R_{eco} 较小。

4 结论

NEE 绝对值随 PAR 的升高而增大, PAR 超过光饱和点后, NEE 的分散增加,曲线呈回落趋势。12—2 月的光饱和点约为 1000 $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光补偿点约为 150 $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,6—11 月的光饱和点约为 1500 $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光补偿点约为 220 $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

R_{eco} 随 T_s 的升高而增加。Lloyd-Taylor 方程和

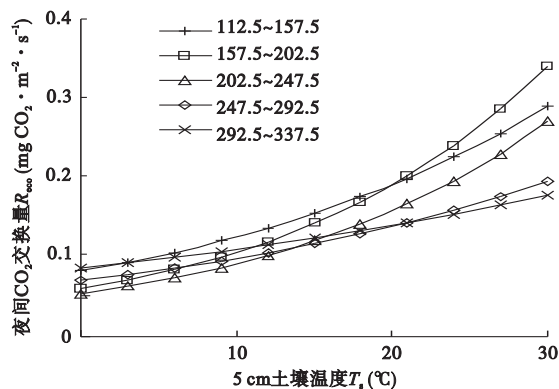


图6 夜间 CO₂ 交换量受城市不同下垫面分布的影响
Fig. 6 The impact of different urban land use and distribution on CO₂ exchange at night

Arrhenius 方程的 Q_{10} 均在低温时较大,反映出低温时 R_{eco} 对 T_s 的敏感性较强,且敏感性随 T_s 的升高而下降,采用月平均数据的指数方程比日平均方程的拟合结果对温度更敏感。

VPD 通过影响植物气孔导度,影响 CO₂ 的吸收和释放。 $PAR>500$ 后, VPD 越高,植物的气孔导度高,吸收 CO₂ 的能力强,但 VPD 过高时,相应的温度也较高,使固碳量下降。呼吸量也随 VPD 升高而增大。

相同温度下,降水后的呼吸量比降水前明显升高,温度为 25℃ 时,降水后的呼吸量比降水前增加了 15.8%。

测站周边不同类型下垫面的分布会影响 CO₂ 交换,比较 6—10 月不同风向的 CO₂ 交换量,由于通量站东北和南方的绿地范围相对较大,东北和南部为贡献区时,固定的 CO₂ 较多,而受东部与西北部城市碳源影响,当这两个区域为贡献区时,释放到大气 CO₂ 较多。

参考文献

- 关德新, 吴家兵, 于贵瑞, 等. 2004. 气象条件对长白山阔叶红松林 CO₂ 通量的影响. 中国科学 D 辑(地球科学), **34**(supp. II): 103–108.
- 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 等. 2004. 千烟洲人工针叶林 CO₂ 通量季节变化及其环境因子的影响. 中国科学 D 辑(地球科学), **34**(supp. II): 109–117.
- 梅雪英, 史利江, 张卫国, 等. 2010. 上海城市草坪 CO₂ 排放通量特征及其影响因子. 长江流域资源与环境, **20**(4): 433–438.
- 齐玉春, 董云社, 刘纪远, 等. 2005. 内蒙古半干旱草原 CO₂ 排放通量日变化特征及环境因子的贡献. 中国科学 D 辑(地球科学), **35**(6): 493–501.

- 王春林, 于贵瑞, 周国逸, 等. 2006. 鼎湖山常绿针阔叶混交林 CO₂ 通量估算. 中国科学 D 辑(地球科学), **36** (supp. I): 119–129.
- 王修信, 朱启疆, 陈声海, 等. 2007. 城市公园绿地水、热与 CO₂ 通量观测与分析. 生态学报, **27**(8): 3232–3239.
- 于贵瑞, 伏玉玲, 孙晓敏, 等. 2006. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的研究进展及其发展思路. 中国科学 D 辑(地球科学), **36**(supp. I): 1–21.
- 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 2004. 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(地球科学), **34**(supp. II): 84–94.
- 赵平, 刘惠, 孙谷畴. 2007. 4种植物气孔对水汽压亏缺敏感度的种间差异. 中山大学学报(自然科学版), **46**(4): 63–67.
- 赵晓松, 关德新, 吴家兵, 等. 2006. 长白山阔叶红松林 CO₂ 通量与温度的关系. 生态学报, **26**(4): 1088–1095.
- Aubinet M, Chermanne B, Vandenhaute M, *et al.* 2001. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. *Agricultural and Forest Meteorology*, **108**: 293–315.
- Baldocchi DD, Falge E, Gu L, *et al.* 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **82**: 2415–2434.
- Baldocchi DD, Vogel CA. 1996. Energy and CO₂ flux densities above and below a temperate broad-leaved forest and a boreal pine forest. *Tree Physiology*, **16**: 5–16.
- Falge E, Baldocchi DD, Olson R, *et al.* 2001. Gap-filling strategies for long-term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*, **107**: 71–77.
- Fang C, Moncrieff JB. 2001. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, **33**: 155–165.
- Fierer N, Craine JM, Mclauchlan K, *et al.* 2005. Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition. *Ecology*, **86**: 320–326.
- Goulden ML, Daube BC, Fan SM, *et al.* 1997. Physiological responses of a black spruce forest to weather. *Journal of Geophysical Research*, **102**: 28987–28996.
- Law BE, Baldocchi DD, Anthoni PM. 1999. Below-canopy and soil CO₂ fluxes in a ponderosa pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **94**: 171–188.
- Law BE, Falge E, Gu L, *et al.* 2002. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, **113**: 97–120.
- Lee MS, Nakane K, Nakatsubo T. 2002. Effects of rain fall events on soil CO₂ flux in a cool temperature deciduous broadleaved forest. *Ecological Research*, **17**: 401–409.
- Lloyd J, Taylor JA. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, **8**: 315–323.
- Mahli Y, Baldocchi DD, Jarvis PG, *et al.* 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment*, **22**: 715–740.
- Massman WJ, Lee X. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, **113**: 121–144.
- Paw UKT, Baldocchi DD, Meyers TP, *et al.* 2000. Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, **97**: 487–511.
- Pilegaard K, Hummelshøj P, Jensen NO, *et al.* 2001. Two years of continuous CO₂ eddy-flux measurements over a Danish beech forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **107**: 29–41.
- Schotanus P, Nieuwstadt FTM, Bruin HAR. 1983. Temperature measurements with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, **26**: 81–93.
- Steffen W, Noble I, Canadell J, *et al.* 1998. The terrestrial carbon cycle: Implications for Kyoto protocol. *Science*, **280**: 1393–1394.
- Webb EK, Pearman GI, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **106**: 85–100.
- Wilczak JM, Oncley SP, Stage SA. 2001. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, **99**: 127–150.
- Wofsy SC, Goulden ML, Munger JW, *et al.* 1993. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, **260**: 1314–1317.

作者简介 孙春健,男,1986年生,硕士研究生,主要从应用气象学研究。E-mail: sczero@yeah.net
责任编辑 李凤芹
