

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

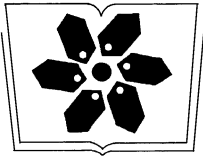
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第4期 Vol.32 No.4 **2012**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 4 期      2012 年 2 月      (半月刊)

## 目 次

固垦对南汇东滩湿地大型底栖动物的影响·····	马长安,徐霖林,田伟,等	(1007)
基于 ArcView-WOE 的下辽河平原地下水生态系统健康评价·····	孙才志,杨磊	(1016)
京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征·····	侯勇,高志岭,马文奇,等	(1028)
不同辐射条件下苹果叶片净光合速率模拟·····	高照全,冯社章,张显川,等	(1037)
藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应·····	宋春桥,游松财,柯灵红,等	(1045)
祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应·····	唐振兴,何志斌,刘鹄	(1056)
祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素·····	田风霞,赵传燕,冯兆东,等	(1066)
呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应·····	尚建勋,时忠杰,高吉喜,等	(1077)
结合激光雷达分析上海地区一次连续浮尘天气过程·····	马井会,顾松强,陈敏,等	(1085)
福建中部近海浮游动物数量分布与水团变化的关系·····	田丰歌,徐兆礼	(1097)
香港巨牡蛎和长牡蛎幼虫及稚贝的表型性状·····	张跃环,王昭萍,闫喜武,等	(1105)
东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争特征·····	李慧,王江涛	(1115)
起始生物量比对 3 种海洋微藻种间竞争的影响·····	魏杰,赵文,杨为东,等	(1124)
不同磷条件下塔玛亚历山大藻氮的生态幅·····	文世勇,宋琍琍,龙华,等	(1133)
秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应·····	陈书军,陈存根,邹伯才,等	(1142)
伊犁河谷北坡垂直分布格局及其与环境的关系——一种特殊的双峰分布格局·····	田中平,庄丽,李建贵	(1151)
濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较·····	石松利,王迎春,周红兵,等	(1163)
干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草抗氧化特性·····	单长卷,韩蕊莲,梁宗锁	(1174)
施加角担子菌 B6 对连作西瓜土壤微环境和西瓜生长的影响·····	肖逸,王兴祥,王宏伟,等	(1185)
内蒙古典型草原区芨芨草群落适生境·····	张翼飞,王炜,梁存柱,等	(1193)
盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系·····	管孝艳,王少丽,高占义,等	(1202)
黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性·····	刘春利,胡伟,贾宏福,等	(1211)
松嫩平原玉米带农田土壤氮密度时空格局·····	张春华,王宗明,居为民,等	(1220)
小麦冬性强弱评价体系的建立·····	王鹏,张春庆,陈化榜,等	(1230)
唐家河自然保护区高山姬鼠和中华姬鼠夏季生境选择的比较·····	黎运喜,张泽钧,孙宜然,等	(1241)
西花蓟马在 6 种蔬菜寄主上的实验种群生命表·····	曹宇,鄧军锐,孔译贤	(1249)
同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类不同组织 N 同位素转化率的影响·····	曾庆飞,谷孝鸿,毛志刚,等	(1257)
基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别·····	许文雯,孙翔,朱晓东,等	(1264)
珠三角城市绿地 CO <sub>2</sub> 通量的季节特征·····	孙春健,王春林,申双和,等	(1273)
污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例·····	吴以中,朱沁园,刘宁,等	(1283)
<b>专论与综述</b>		
湿地退化研究进展·····	韩大勇,杨永兴,杨杨,等	(1293)
绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评·····	杨荣,苏永中,王雪峰	(1308)
<b>问题讨论</b>		
抗辐射菌 <i>Deinococcus radiodurans</i> 的多样性·····	屠振力,方俐晶,王家刚	(1318)
平茬措施对柠条生理特征及土壤水分的影响·····	杨永胜,卜崇峰,高国雄	(1327)
<b>研究简报</b>		
祁连山典型灌丛降雨截留特征·····	刘章文,陈仁升,宋耀选,等	(1337)
野生鸭儿芹种子休眠特性及破除方法·····	喻梅,周守标,吴晓艳,等	(1347)



**封面图说:** 遗鸥群飞来——遗鸥意即“遗落之鸥”(几乎是最后才发现的新鸥种,因此得名)。1931年,瑞典动物学家隆伯格撰文记述在中国额济纳采到了标本。1987年,中国的鸟类学家在鄂尔多斯的桃力庙获得了一对遗鸥的标本。1990年春夏之交,发现了湖心各岛上大量的遗鸥种群。近年来的每年夏季,大约全球 90% 以上的遗鸥都会到陕西省神木县境内的沙漠淡水湖-红碱淖上聚集。遗鸥——国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

**彩图提供:** 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201012281864

孙春健, 王春林, 申双和, 张锦标. 珠三角城市绿地 CO<sub>2</sub> 通量的季节特征. 生态学报, 2012, 32(4): 1273-1282.

Sun C J, Wang C L, Shen S H, Zhang J B. Seasonal characteristics of CO<sub>2</sub> fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1273-1282.

## 珠三角城市绿地 CO<sub>2</sub> 通量的季节特征

孙春健<sup>1, 2, \*</sup>, 王春林<sup>1, 2</sup>, 申双和<sup>1</sup>, 张锦标<sup>3</sup>

(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, 东莞 523086)

**摘要:** 城市绿地是城市碳循环的重要组成部分, 利用长期定位观测资料估算珠三角典型城市绿地的 CO<sub>2</sub> 通量, 可以为应对气候变化、评价区域碳源汇提供参考。应用 2009、2010 年, 东莞市植物园内的涡度相关法 CO<sub>2</sub> 通量定位观测资料, 分析了净生态系统交换量 (*NEE*) 的年变化及其与气象要素的关系, 结果表明: (1) 年平均 *NEE* 总量为  $-104.2 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 表明城市绿地生态系统具有固碳能力。 (2) *NEE* 随光温条件变化呈现明显的季节动态, 12 至 3 月表现为碳源, 其他月份表现为碳汇。 (3) 根据白天 *NEE* 与光合有效辐射 (*PAR*) 逐月拟合 Michaelis-Menten 方程, 得到年平均表观初始光能利用率 ( $\alpha$ ) 为  $(0.00134 \pm 0.00035) \text{ mgCO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1}$  光子, 年平均光饱和和生态系统生产力 ( $P_{\text{max}}$ ) 为  $(1.006 \pm 0.283) \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 (4) 利用夜间呼吸 ( $R_{\text{eco}}$ ) 与 5 cm 土壤温度 ( $T_s$ ) 拟合指数方程, 得到年平均  $R_{\text{eco}}$  总量为  $1378.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。 (5) *NEE* 与 *PAR*、气温 ( $T_a$ ) 和饱和水汽压差 (*VPD*) 的相关性分析显示, *NEE* 与 *PAR* 偏相关系数的绝对值大于  $T_a$  和 *VPD*, 表明 *PAR* 对 *NEE* 的影响最大。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 通量; 城市绿地; 涡度相关; 固碳

## Seasonal characteristics of CO<sub>2</sub> fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China

SUN Chunjian<sup>1, 2, \*</sup>, WANG Chunlin<sup>1, 2</sup>, SHEN Shuanghe<sup>1</sup>, ZHANG Jinbiao<sup>3</sup>

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Climate Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China

3 Meteorological Bureau of Dongguan, Dongguan 523086, China

**Abstract:** Urban green space plays a significant role on carbon cycling in urban areas. Accurate estimation of CO<sub>2</sub> fluxes above urban green space using the long-term field observation method provides critical information about climate change reactions and regional carbon sequestration evaluations. Continuous eddy-covariance measurements of CO<sub>2</sub> fluxes were conducted to analyze the carbon exchange status in 2009 and 2010. The analyses included daily variations in the CO<sub>2</sub> fluxes during different seasons, annual variations in light response parameters, including apparent light use efficiency ( $\alpha$ ) and maximum photosynthetic productivity ( $P_{\text{max}}$ ). Annual variations in the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (*NEE*) and the ecosystem respiration ( $R_{\text{eco}}$ ) were also studied.

A tower located in the botanical garden of Dongguan with 4 levels and a total height of 20 m was used for the measurements. The CO<sub>2</sub> flux at a height of 20 m was analyzed to study the CO<sub>2</sub> exchange between an urban green space and the atmosphere interface. According to the eddy-covariance method and the detection limits of the instrument, abnormal data were removed to ensure accuracy. The daytime *NEE* and the photosynthetic active radiation (*PAR*) were used to

基金项目: 广东省科技计划项目(2010A030200011); 广东省自然科学基金项目(S2011010004771)

收稿日期: 2010-12-28; 修订日期: 2011-10-31

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sczero@yeah.net

formulate the Michaelis-Menten model as the gap-filling model during the daytime, while the night respiration ( $R_{eco}$ ) and soil temperature at 5 cm depth ( $T_s$ ) were used to calculate the exponential equation as the gap-filling model at night.

The major results were: (1) the  $NEE$  was  $-91.9 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  in 2009 and  $-116.5 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  in 2010, indicating that urban green space was a net carbon sink. The  $NEE$  varied seasonally with environmental factors. Urban green space was a carbon source from December-March and a carbon sink from April - November each year. (2) The daily total  $\text{CO}_2$  flux ( $F_c$ ) was negative during the winter, but positive during the other seasons.  $\text{CO}_2$  storage ( $F_s$ ) occupied a larger proportion during winter than during the other seasons. Daily  $\text{CO}_2$  concentrations ( $C_c$ ) were highest before sunrise and lowest after sunset.  $C_c$  was highest in the winter and lowest in the summer. (3) The annual average  $\alpha$  was  $(0.00134\pm 0.00035) \text{ mgCO}_2\cdot\mu\text{mol}^{-1}$  Photons and  $P_{max}$  was  $(1.006\pm 0.283) \text{ mgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . (4) The annual  $R_{eco}$  was  $1370.4 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  in 2009 and  $1384.8 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  in 2010.  $R_{eco}$  varied with changes in the soil temperature during the year. The simulated  $R_{eco}$  during the night was less than the daytime result produced by the Michaelis-Menten model at the same temperature. (5) Because the urban green space was a mixture of forest and grassland, the  $NEE$  of the urban green space was smaller than that of a forest ecosystem, but larger than a grassland ecosystem. Compared with other urban green spaces, the  $NEE$  in Dongguan was lower than northern urban forests due to the high  $R_{eco}$  caused by high temperatures. (6) Correlation analyses between the  $NEE$  and meteorological factors like the  $PAR$ , air temperature ( $T_a$ ) and saturation vapor pressure differential ( $VPD$ ) were performed. The partial correlation coefficient of the  $PAR$  was larger than the others, indicating that the  $PAR$  was the most important factor to the  $NEE$ . The partial correlation coefficient of  $T_a$  was negative during the winter and positive during the summer. The partial correlation coefficient of  $VPD$  was positive year-round and was higher under high  $VPD$  conditions.

**Key Words:**  $\text{CO}_2$  fluxes; urban green space; eddy-covariance; carbon sequestration

珠三角是全国经济最活跃的地区之一,随着城市群规模的扩张和工商业的增长,城市环境也面临着严峻的挑战,如城市热岛、空气污染、灰霾严重等问题。绿地植物能够通过光合作用与蒸腾作用在城市中发挥释氧、固碳、降温、增湿、吸收有害气体及降尘、减噪等多重生态效应,可以大幅改善城市环境。城市绿地生态系统与大气系统之间的  $\text{CO}_2$  交换量是评价城市气候变化、碳循环和碳源汇状况的重要指标。随着涡度相关技术和设备的发展,国内外已开展了广泛的通量研究<sup>[1-3]</sup>。广州、东莞、肇庆及港澳等地也先后建成  $\text{CO}_2$  通量定位观测站,为开展珠三角地区的碳源汇定量评估研究提供了条件。

目前,城市绿地生态环境效益评估的研究主要集中在净化空气<sup>[4]</sup>、降温效应<sup>[5-6]</sup>等领域,对绿地固碳效益<sup>[6]</sup>进行长期定位观测分析的研究仍不多见。本文应用 2009、2010 年东莞植物园内的  $\text{CO}_2$  通量定位观测数据,估算净生态系统  $\text{CO}_2$  交换量( $NEE$ )并分析其季节特征,从固碳的角度量化分析了城市绿地的生态效益,可以为进一步基于模型方法开展珠三角区域碳源汇评估,应对气候变化,发展环境外交提供参考,具有明显的科学意义和现实意义。

## 1 资料与方法

### 1.1 观测地概况

通量观测塔位于东莞市植物园内的气象台观测场中,东经  $113^\circ 44' 20''$ ,北纬  $22^\circ 57' 58''$ ,海拔高度 40 m。观测站地处南亚热带季风气候区,具有光照充足、热量丰富、气候温暖、雨量充沛、干湿季明显的特点。年平均气温为  $22.7^\circ\text{C}$ ,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;年平均降水量为 1819.9 mm,其中 4—9 月为降水集中期,累积雨量占全年的 80%;测站的盛行风向为东南风,其中东风约占全年风向的 29.2%,东南风占 11.4%,南风占 21.2%。

东莞植物园占地面积  $467\text{hm}^2$ ,园区属低丘地貌,最高峰水濂山海拔 380 m,约有植物 1568 种,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* Cav, 秋枫 *Bischofia javanica* 等)和草坪为主,由乔灌木植物构成了典型的公园绿地,冠层的平均高度

约 10 m,其中荔枝的种植面积相对较大。

## 1.2 资料获取与处理

观测塔高 20 m,装有 2 层开路涡度相关法(OPEC)CO<sub>2</sub>、水热通量观测系统以及 4 层常规气象观测系统(RMET)。其中,2 层 OPEC 系统的安装高度分别为 4 m 和 20 m,位于塔的东侧,系统由三维超声风温仪(CSAT3, Campbell, USA)和开路 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪(Li-7500, LiCorInc, USA)组成,数据采集器自动存储 10 Hz 的原始数据,并且依据涡度相关原理<sup>[7]</sup>在线计算存储 30min 平均的 CO<sub>2</sub>通量( $F_c$ )、潜热通量( $LE$ )和显热通量( $H$ )等资料。 $F_c$ 、 $LE$  和  $H$  的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<sup>[8-9]</sup>(WPL 订正)。本文采用二维坐标转换<sup>[10]</sup>使 X 轴平行于气流方向并使垂直方向的风速为 0,经坐标转换后的通量数据比原数据减小不到 1%,可忽略不计。

根据涡度相关原理和仪器设备的局限性等问题,对通量资料进行统计分析,筛掉异常值及不合理的数据,剔除符合以下任意一条的 30min 记录:(1)有降水时;(2)湍流不充分时(摩擦速度  $u^* < 0.2$  m/s);(3)超过仪器量程及合理范围的数据:CO<sub>2</sub>通量有效范围为 -2.0—2.0 mgCO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,CO<sub>2</sub>浓度有效范围为 500—800 mgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>,水汽浓度有效范围为 0—40 g/m<sup>3</sup>;(4)有效样本数量不足 1500;(5)异常突出的数据(设备测得的 CO<sub>2</sub>通量与其相临 5 点平均值之差的绝对值大于这 5 点方差 3 倍的数据)。本文主要应用 20 m 高度的通量数据,研究绿地生态系统与大气界面的 CO<sub>2</sub>交换情况。2009 年 5 月由于通量设备维修缺测。

常规气象观测系统包括:4 层温湿度传感器(HMP45C, Vaisala, Finland)和风速传感器(010C, MetOne, USA),安装高度分别为 2、4、10、20 m;辐射(CNR1, Campbell, USA)和光合有效辐射传感器(PAR-LITE, Kipp&Zonen, Holland)位于 4 m 处塔的南侧;8 层土壤温度传感器,深度为:5、10、15、20、40、80、160、320 cm,本文应用 5 cm 土壤温度。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,其他资料采样频率均为 0.5 Hz,存储为 30 min 平均的常规气象数据。

## 1.3 碳通量计算

净生态系统 CO<sub>2</sub>交换量( $NEE$ )是由生态系统中植物光合作用吸收的 CO<sub>2</sub>( $GPP$ )、冠层大气储存 CO<sub>2</sub>的变化( $F_c$ ,  $F_s$ )以及生物与非生物呼吸释放的 CO<sub>2</sub>( $R_{eco}$ )所共同引起的生态系统 CO<sub>2</sub>累积量的变化值<sup>[11-12]</sup>,可用下述方程描述:

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

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

式中, $F_c$ 为生态系统与大气界面上 CO<sub>2</sub>通量的观测值, $F_s$ 为观测高度以下 CO<sub>2</sub>储存量的变化。 $NEE$ 、 $F_c$  和  $F_s$  为正值时,表示生态系统释放 CO<sub>2</sub>,为负值时表示生态系统吸收 CO<sub>2</sub>。 $GPP$  为生态系统初级生产力, $R_{eco}$  为生态系统呼吸量, $GPP$  和  $R_{eco}$  恒为正值。在  $NEE$  计算的过程中假设垂直湍流充分<sup>[13-14]</sup>,水平湍流通量和平流通量可忽略不计。

研究表明,采用单层 CO<sub>2</sub>浓度变化方法计算的  $F_s$  与全剖面 CO<sub>2</sub>浓度测量法得到的结果基本相等<sup>[15-16]</sup>,且对全年  $NEE$  的影响较小,采用单层 CO<sub>2</sub>浓度变化计算  $F_s$  的方法如下:

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

式中, $\Delta C(z)$ 为高度  $z$  处 CO<sub>2</sub>浓度变化量 $[CO_2]_t - [CO_2]_{(t-\Delta t)}$ , $\Delta t$ 为时间步长 30 min, $\Delta z$ 为设备离地面高度 20 m。当摩擦速度  $u^*$  较小时,垂直方向湍流微弱,大部分 CO<sub>2</sub>被储存在空气中, $F_s$ 较大;而当  $u^*$  较大时,垂直湍流旺盛,CO<sub>2</sub>的交换量增加, $F_c$ 较大。考虑到筛选的数据是在湍流充分(摩擦速度  $u^* > 0.2$  m/s)的情况下,因此控制  $F_s$ 项小于 0.3 mgCO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,并剔除 30 min 间隔 CO<sub>2</sub>浓度差 $|[CO_2]_t - [CO_2]_{(t-\Delta t)}| > 20$  mgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 的值,以减少异常突出的数据。

## 1.4 通量数据插补

由于仪器故障、涡度相关系统限制和天气因素影响等造成的缺测、异常值及不合理数据需要插补修正。对于白天数据,采用 Michaelis-Menten 经验模型<sup>[17-22]</sup>拟合  $NEE$  与光合有效辐射( $PAR$ )的关系:

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

式中,  $NEE$  为白天的生态系统净  $\text{CO}_2$  交换量, 选取  $PAR > 1.0 \mu\text{mol 光子} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 式(1)的计算结果;  $\alpha$  为表观初始光能利用率, 单位为  $\text{mgCO}_2 / \mu\text{mol 光子}$ ;  $P_{\max}$  为光饱和时的生态系统生产力, 单位为  $\text{mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $PAR$  为采用光量子计量的光合有效辐射, 单位为  $\mu\text{mol 光子} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $R_{\text{eco}}$  为白天生态系统呼吸速率, 单位为  $\text{mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

夜间的净生态系统  $\text{CO}_2$  交换量  $NEE$  等同于生态系统呼吸量  $R_{\text{eco}}$ 。生态系统呼吸产生于土壤微生物与植被的新陈代谢过程中, 与土壤温度密切相关, 并符合指数关系<sup>[23-25]</sup>, 于是利用夜间生态系统呼吸  $R_{\text{eco}}$  与土壤温度拟合指数方程, 插补夜间缺测的资料:

$$R_{\text{eco}} = a \exp(bT_s) \quad (5)$$

式中,  $R_{\text{eco}}$  为生态系统呼吸量, 选取  $PAR < 1.0 \mu\text{mol 光子} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 由式(1)计算的  $NEE$ ;  $T_s$  为 5 cm 的土壤温度;  $a$ 、 $b$  为待拟合的参数。

## 2 结果与分析

### 2.1 常规气象条件

东莞为亚热带季风气候, 光、温、水等条件随季节同步变化(图1)。受季风与台风的影响, 降水主要集中在4—9月, 2009年降水量为1894 mm, 2010年降水量为2173 mm, 比2009年多15%, 水分条件充沛; 2009、2010全年的光合有效辐射总量分别为9089.9和7975.9  $\text{mol 光子} / \text{m}^2$ , 2010年由于阴雨较多, 相比2009年减少了12%, 夏季光合有效辐射最高为48  $\text{光子} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 冬季平均为16.6  $\text{光子} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 光照条件充足; 2009年平均气温为22.8  $^{\circ}\text{C}$ , 平均地温23.3  $^{\circ}\text{C}$ , 2010年平均气温为22.6  $^{\circ}\text{C}$ , 平均地温22.9  $^{\circ}\text{C}$ , 热量条件充裕, 地温的

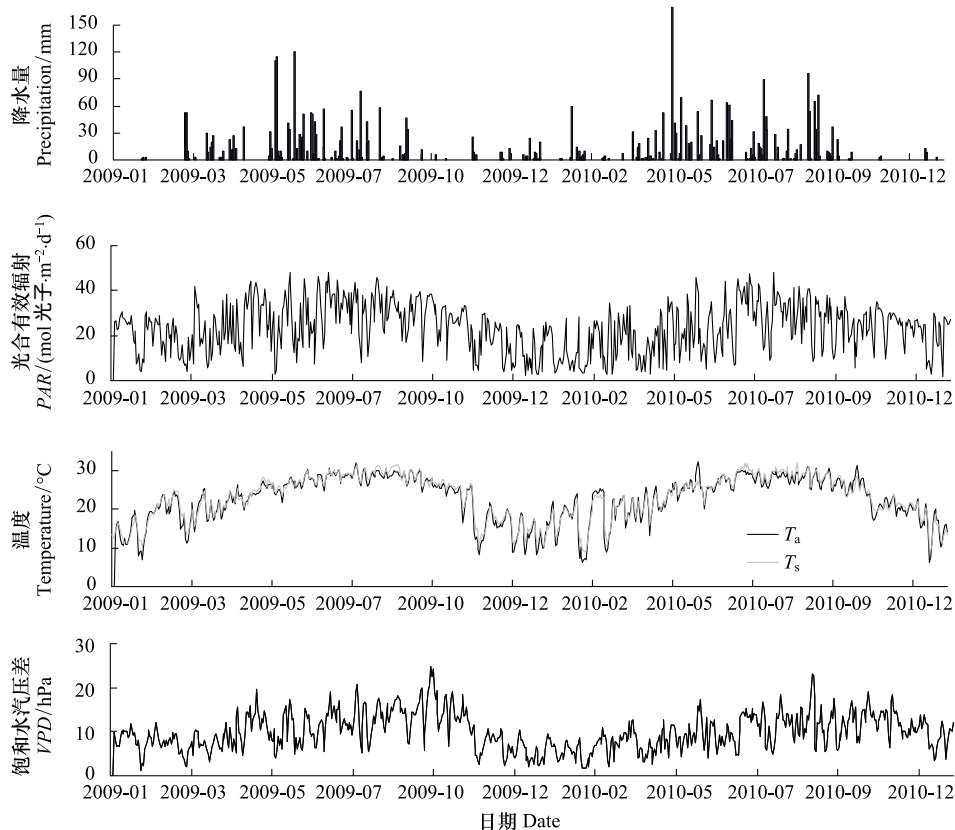


图1 2009、2010年东莞逐日气象要素

Fig. 1 Daily meteorological factors of Dongguan, China in 2009 and 2010

变化与气温变化相比存在一定的滞后性;饱和水汽压差在夏半年较高,冬半年相对较低,2009、2010年的平均饱和水汽压差分别为 10.3 hPa 和 9.5 hPa,气候较为湿润。

## 1.2 CO<sub>2</sub>通量日变化特征

生态系统冠层中的 CO<sub>2</sub>浓度( $C_c$ )受植物的光合作用以及植物与土壤的呼吸作用共同影响。夜间,植物与土壤的呼吸作用释放 CO<sub>2</sub>,冠层下方 CO<sub>2</sub>浓度高于上方大气中的浓度,存储量增加,通过湍流交换作用,CO<sub>2</sub>向上传输, $F_c$ 和  $F_s$ 均为正值,生态系统表现为碳源;白天植物光合作用吸收 CO<sub>2</sub>的强度大于呼吸释放强度,冠层内 CO<sub>2</sub>浓度下降,存储量下降,经过湍流交换,CO<sub>2</sub>由冠层上方大气向下传输, $F_c$ 和  $F_s$ 均为负值,生态系统表现为碳汇。受  $PAR$ 、 $T_a$ 、 $T_s$ 和降水等环境因子日变化、年变化的影响, $F_c$ 、 $F_s$ 、 $C_c$ 均有明显的日动态和季节动态特征。

对 2009、2010 年 1、4、7、10 月的  $F_c$ 、 $F_s$ 和  $C_c$ 取全月平均(图 2),研究其不同季节代表月份的平均日变化。1 月由于日照时间较短,CO<sub>2</sub>通量为负值的区间相对较小,从 10:00 到 17:00  $F_c$ 为负值,此时绿地吸收 CO<sub>2</sub>,从 18:00 到翌日 9:00  $F_c$ 转为正值,绿地释放 CO<sub>2</sub>;1 月的平均  $F_c$ 为  $0.01 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,表明冬季的绿地是碳源。4、7、10 月随着日照时数的增加,CO<sub>2</sub>通量为负值的区间增大,且负向的振幅较 1 月增大,表明固碳量相对增加;4、7、10 月的平均  $F_c$ 分别为  $-0.022$ 、 $-0.041$ 、 $-0.023 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,表明在春夏秋季,绿地生态系统均为碳汇。由于温度的升高,7、10 月夜间曲线表现的呼吸量相比 1、4 月增多。

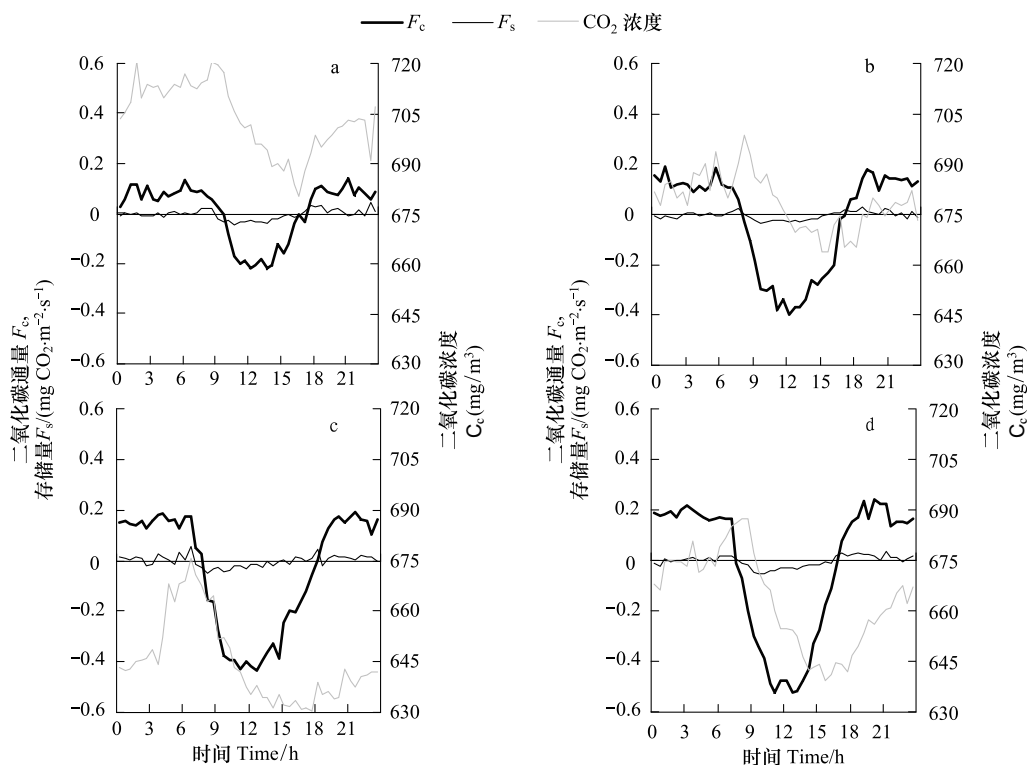


图 2 2009、2010 年 1 月(a)、4 月(b)、7 月(c)、10 月(d)东莞通量站 CO<sub>2</sub>通量、CO<sub>2</sub>存储量和 CO<sub>2</sub>浓度的日变化

Fig. 2 Daily variations of CO<sub>2</sub> flux, CO<sub>2</sub> storage and CO<sub>2</sub> concentration at Dongguan flux station, China in Jan. (a), April (b), July (c) and Oct. (d) of 2009 and 2010

$F_s$ 的日变化情况与  $F_c$ 的日动态相近,但变化幅度比  $F_c$ 小很多。1、4、7、10 月的平均  $F_s$ 分别为  $-0.004$ 、 $-0.0045$ 、 $-0.0023$ 、 $-0.0033 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,各月的  $|F_s|/|F_c|$ 分别为 0.39、0.21、0.05、0.15,其中 1 月  $F_s$ 所占的比重最大,约占  $NEE$  的 28%,因此在  $NEE$  计算中需考虑  $F_s$ 的部分。

$C_c$ 的日变化与光合及呼吸密切相关,一天中 CO<sub>2</sub>浓度的最高值出现在日出后,最低值出现在日落前。1、4、7、10 月的平均 CO<sub>2</sub>浓度分别为 703.6、678.6、645、663.3  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,表明  $C_c$ 夏季最低,冬季最高,春季和秋季

相近。

### 2.3 $NEE$ 光响应特征的季节动态

$NEE$  与  $PAR$  的关系存在明显的季节变化,对比夏季与冬季 Machaelis-Menten 方程的拟合结果(图 3),夏季的光合能力显著高于冬季,随着  $PAR$  的增大, $NEE$  增加,当  $PAR$  增大一定程度时,夏季大约  $1500 \mu\text{mol}$  光子  $\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,达到光饱和,冬季的光饱和点较低,约为  $1000 \mu\text{mol}$  光子  $\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。夏季绿地生态系统在达到光饱和后, $NEE$  变得分散<sup>[23]</sup>,并有降低趋势,这应与光饱和时的温度较高有关,由于光合量不再增加,呼吸量随温度升高的影响相对变得突出。

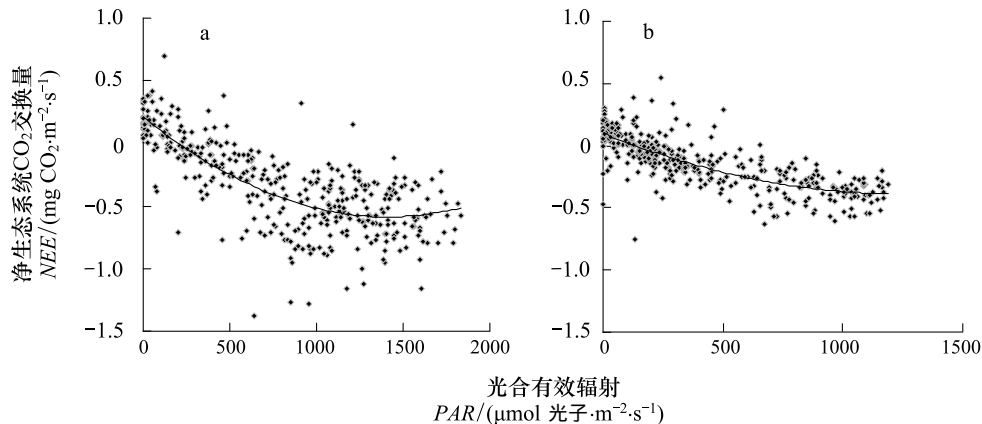


图 3 净生态系统  $\text{CO}_2$  交换量( $NEE$ )与光合有效辐射( $PAR$ )关系曲线(Machaelis-Menten 方程拟合)

Fig. 3 Relation curve between net ecosystem  $\text{CO}_2$  exchange ( $NEE$ ) and photosynthetic active radiation ( $PAR$ ) by Machaelis-Menten model

a: 2009 年 8 月曲线参数:  $\alpha = 0.00171$ ,  $P_{\max} = 1.27022$ ,  $R_{\text{eco}} = 0.24466$ ,  $n = 479$ ,  $R^2 = 0.582$ ; b: 2009 年 12 月曲线参数:  $\alpha = 0.00094$ ,  $P_{\max} = 0.96519$ ,  $R_{\text{eco}} = 0.10822$ ,  $n = 477$ ,  $R^2 = 0.608$

Machaelis-Menten 方程拟合的光响应参数年变化情况如图 4。2009、2010 年的表观初始光能利用率  $\alpha$  平均值为  $(0.00134 \pm 0.00035) \text{ mgCO}_2/\mu\text{mol}$  光子,较低值出现在 12 至 1 月,较高值在 8 到 10 月。2009、2010 年的光饱和时生态系统生产力  $P_{\max}$  平均值为  $(1.006 \pm 0.283) \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,较低值在 1 到 2 月,其他月份相对较高。2009、2010 年的平均生态系统呼吸速率  $R_{\text{eco}}$  为  $(0.175 \pm 0.063) \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,较低值出现在 1 到 3 月,较高值出现在 8 到 10 月,与土壤温度的年变化同步。

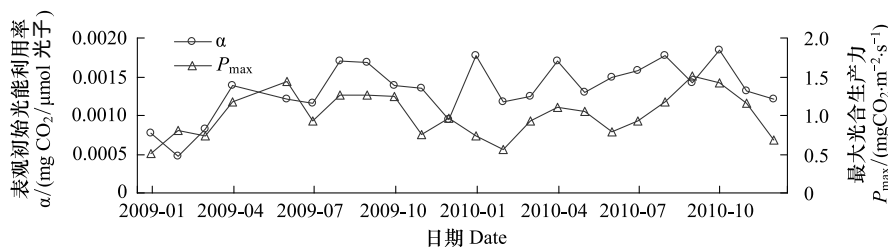


图 4 2009、2010 年表观初始光能利用率( $\alpha$ )和最大光合生产力( $P_{\max}$ )的年变化

Fig. 4 Annual variations of apparent light use efficiency ( $\alpha$ ) and maximum photosynthetic productivity ( $P_{\max}$ ) in 2009 and 2010

### 2.4 夜间与白天拟合呼吸对比

将 2009、2010 年月平均的夜间  $\text{CO}_2$  交换量和 Machaelis-Menten 方程所得的逐月白天呼吸分别与  $5 \text{ cm}$  土壤温度拟合指数方程(图 5)。对比夜间与白天的呼吸曲线, $R_{\text{eco}}$  均随  $T_s$  的升高而增加,相同温度下,夜间的  $R_{\text{eco}}$  都低于白天,且随温度升高 2 者的差别增加,这可能与夜间的湍流发展较弱,达到观测高度的  $\text{CO}_2$  交换量比湍流充分的白天稍小有关。总体上,夜间与白天  $R_{\text{eco}}$  的拟合结果差别较小,且夜间方程采用实际观测数据,



与土壤温度相关性更好(夜间相关系数为 0.59 大于白天 0.45),因此在全年  $R_{eco}$  计算中采用了夜间数据拟合指数方程。

### 2.5 城市绿地生态系统 $NEE$ 、 $R_{eco}$ 、 $GPP$ 的年变化

城市绿地生态系统的  $NEE$ 、 $R_{eco}$  有着显著的季节变化(图 6)。2009、2010 年的月平均  $NEE$  分别为  $(-7.7 \pm 29.6) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 、 $(-9.7 \pm 29.7) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ , 4 到 11 月  $NEE$  为负值,其中 8 至 10 月绿地的固碳能力最强,12 到 3 月  $NEE$  为正值,其中 1、2 月固碳最弱。2009、2010 年的月平均  $R_{eco}$  分别为  $(114.2 \pm 27.6) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 、 $(115.4 \pm 18.5) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ , 2a 的  $R_{eco}$  均从 1 月开始增大,8 月达到最大值后逐渐减小,与土壤温度  $T_s$  的年变化呈正相关。 $NEE$  与  $R_{eco}$  的年变化趋势较为一致,表明在光热条件较好的夏半年,绿地生态系统碳的释放量与吸收量都较大,而在较冷的冬半年,两者均减小。2009、2010 年的月平均  $GPP$  分别为  $(121.9 \pm 53.3) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 、 $(125.1 \pm 44.9) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 。2a 的  $NEE$  总量分别为  $-91.9 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $-116.5 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 表明城市绿地生态系统能够发挥碳汇作用。

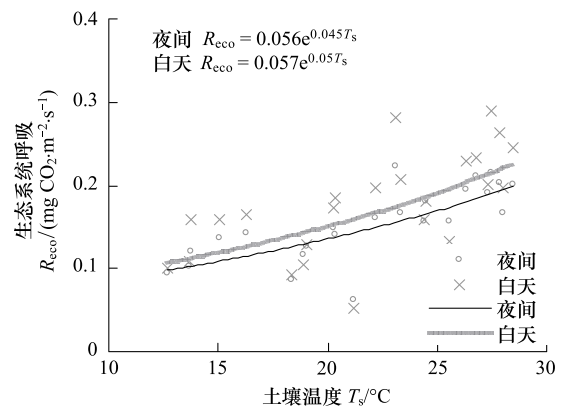


图 5 夜间、白天的月平均呼吸与 5 cm 土壤温度指数曲线  
Fig. 5 Exponential curves between monthly mean respiration ( $R_{eco}$ ) and 5 cm soil temperature ( $T_s$ ) at night and day

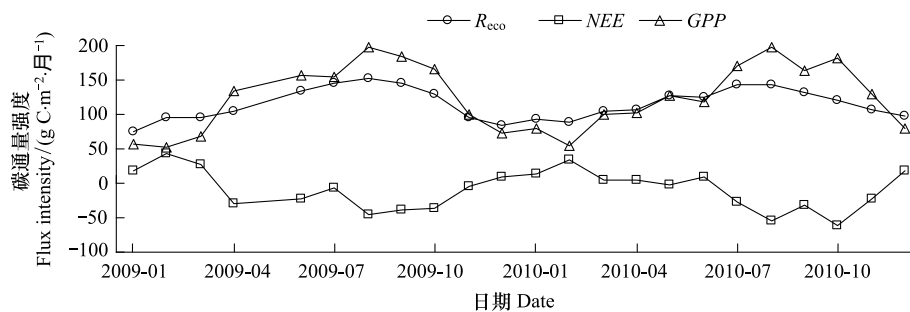


图 6 2009、2010 年各月的  $NEE$ 、 $R_{eco}$  和  $GPP$  累积量

Fig. 6 Monthly total of  $NEE$ ,  $R_{eco}$  and  $GPP$  in 2009 and 2010

### 3 讨论

将各生态系统的全年碳收支量进行对比(表 1),绿地生态系统 2009、2010 年  $NEE$  的平均值为  $-104.2 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 与同属于亚热带的鼎湖山针阔叶混交林<sup>[24]</sup>和千烟洲人工针叶林<sup>[23]</sup>等森林生态系统相比,年固碳量小很多;与青藏高原草甸<sup>[25]</sup>和三江源人工草地<sup>[26]</sup>等草原生态系统相比,绿地生态系统的年固碳量稍高;与同为城市绿地生态系统的沈阳城市森林<sup>[27]</sup>、北京海淀公园<sup>[28]</sup>、杭州城市林地<sup>[29]</sup>相比,珠三角绿地年固碳量略少,与美国亚特兰大、巴尔的摩<sup>[30]</sup>、萨克拉门托<sup>[31]</sup>的城市林地  $NEE$  较为接近。说明珠三角城市绿地有一定固碳能力,但由于绿地的林木密度低于森林生态系统,固碳量比森林低,但高于草地;而且因地处亚热带地区,珠三角城市绿地的年呼吸量较大(2a 的平均呼吸量为  $1378.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),导致年固碳量相比昼夜温差大、呼吸量小的北方城市绿地少一些。此外,城市绿地的固碳量不大,可能与处于东莞城区,受城市碳排放影响有关。

为分析  $NEE$  与气象条件的关系,分别将  $NEE$  与  $PAR$ 、 $T_a$ 、 $VPD$  逐月进行偏相关分析(图 7)。其中,  $NEE$  与  $PAR$  的偏相关性最强,表现为偏相关系数的绝对值较大,其年变化情况与  $P_{max}$  的年变化较为相近,在  $P_{max}$  大的时候偏相关系数的绝对值也大,而  $P_{max}$  小的时候其绝对值也小,由于  $P_{max}$  与植物的光合作用有关,植物在光强适当且阴雨较少的春秋季节光合较强,  $P_{max}$  较大,  $NEE$  与  $PAR$  的偏相关系数绝对值在春秋季节也相对较大。

$NEE$  与  $T_a$  的偏相关系数年变幅较大,夏半年多为负值,而冬半年转为正值,表明  $T_a$  对  $NEE$  的影响包括 2 方面,在光合能力较强的夏半年  $T_a$  对光合作用的影响大于呼吸,表现为较高的温度促进光合作用,而在光合较弱的冬半年  $T_a$  对呼吸作用的影响大于光合,表现为温度升高使呼吸增加; $NEE$  与  $VPD$  的偏相关系数全年大多为正,说明  $VPD$  对呼吸作用的影响大于光合作用,其年变化情况与  $VPD$  的高低有关,表现为随  $VPD$  升高的偏相关性增强,而随  $VPD$  降低偏相关性减弱,这应与  $VPD$  越高,气孔导度越大,植物的  $CO_2$  交换越活跃有关。

表 1 各生态系统全年  $NEE$  总量与珠三角城市绿地对比

Table 1 The comparison of annual  $NEE$  between urban green spaces in Pearl River Delta and other ecosystems

地点 Location	植被类型 Vegetation form	净生态系统交换量 $NEE/(gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1})$	文献 References	地点 Location	植被类型 Vegetation form	净生态系统交换量 $NEE/(gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1})$	文献 References
千烟洲	人工针叶林	-645	[23]	杭州	城市林地	-166	[29]
鼎湖山	针阔叶林混交林	-563	[24]	亚特兰大	城市林地	-123	[30]
海北	高原草甸	-63.1	[25]	巴尔的摩	城市林地	-71	[30]
三江源	人工草地	-30.3	[26]	萨克拉门托	城市林地	-85	[31]
沈阳	城市林地	-284	[27]	东莞	城市绿地	-104.2	本文
北京	城市公园	-238.8	[28]				

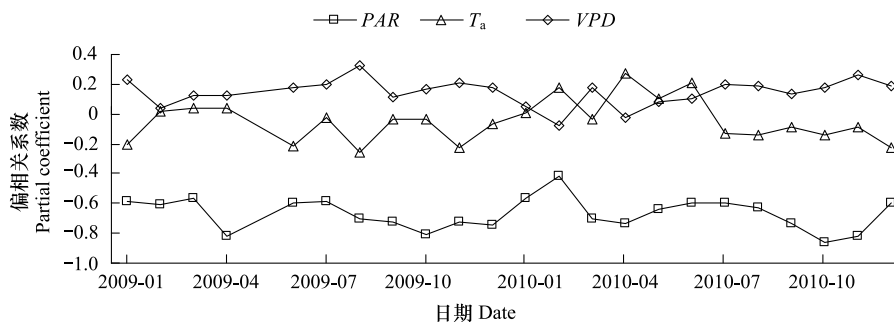


图 7  $NEE$  与  $PAR$ 、 $T_a$ 、 $VPD$  的偏相关系数年变化

Fig. 7 Annual variations of partial correlation coefficients among  $NEE$  and  $PAR$ ,  $T_a$ ,  $VPD$

#### 4 结论

本文应用 2009、2010 年东莞植物园绿地  $CO_2$  通量的连续定位观测资料,分析了城市绿地生态系统的碳交换量及其季节变化特征,主要结论如下:

(1) 绿地生态系统的  $F_c$  有明显的日变化和季节变化,冬季绿地表现为碳源,春夏秋季均表现为碳汇;2009、2010 年的  $NEE$  总量分别为  $-91.9 gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$  和  $-116.5 gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ ,表明城市绿地生态系统起碳汇作用。

(2)  $NEE$  的光响应参数表观初始光能利用率  $\alpha$  平均值为  $(0.00134 \pm 0.00035) mgCO_2 \cdot \mu mol^{-1}$  光子,光饱和时的生态系统生产量  $P_{max}$  平均值为  $(1.006 \pm 0.283) mgCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。通过观测得到的夜间呼吸稍低于 Michaelis-Menten 方程拟合的白天呼吸,但差别较小。

(3)  $NEE$  与  $PAR$  的偏相关性最强,表明  $PAR$  通过光合作用对  $NEE$  的影响最大; $NEE$  与  $T_a$  的偏相关系数年变幅较大,夏半年为负值,表现为温度对光合作用的影响,冬半年为正值,表现为温度对呼吸的影响; $NEE$  与  $VPD$  的偏相关系数全年大多为正,相关性随  $VPD$  的升高而增强。

#### References:

- [1] Baldocchi D D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw K T, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T,

- Wilson K, Wofsy S. 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*, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [ 2 ] Yu G R, Zhang L M, Sun Y M, Zhang Z Q, Fu Y L. Asian regional terrestrial ecosystem carbon flux observation and research progress. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 34(Supp II): 15-29.
- [ 3 ] Shen Y, Liu Y F, Wang Y. Advances in applying the eddy-covariance technique to calculate heat, moisture and CO<sub>2</sub> flux. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 28(4): 559-565.
- [ 4 ] Guan D S, Liu Q H, Mo D L. The role of Guangzhou urban vegetation in removing atmospheric sulfur. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1999, 38(2): 109-113.
- [ 5 ] Ma X M, Zhang Y J, Huang H. A quantitative study of the relationship between urban vegetation and urban heat island. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2005, 65(3): 10-14.
- [ 6 ] Wang X X, Zhu Q J, Chen S H, Sun R, Yang S T, Hu Y M, Liu X, Gao F F. Analysis of water, heat and CO<sub>2</sub> fluxes on urban green space. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3232-3239.
- [ 7 ] Baldocchi D D, Vogel C A. Energy and CO<sub>2</sub> flux densities above and below a temperate broad-leaved forest and a boreal pine forest. *Tree Physiology*, 1996, 16(1): 5-16.
- [ 8 ] Schotanus P, Nieuwstadt F T M, Bruin H A R. Temperature measurements with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary Layer Meteorology*, 1983, 26(1): 81-93.
- [ 9 ] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurement for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [ 10 ] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127-150.
- [ 11 ] Paw U K T, Baldocchi D D, Meyers T P, Wilson K B. Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Boundary Layer Meteorology*, 2000, 97(3): 487-511.
- [ 12 ] Massman W J, Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1): 121-144.
- [ 13 ] Law B E, Baldocchi D D, Anthoni P M. Below-canopy and soil CO<sub>2</sub> fluxes in a ponderosa pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 94(3/4): 171-188.
- [ 14 ] Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, Fan S M, Bakwin P S, Daube B C, Bassow S L, Bazzaz F A. Net exchange of CO<sub>2</sub> in a mid-latitude forest. *Science*, 1993, 260(5512): 1314-1317.
- [ 15 ] Pilegaard K, Hummelshøj P, Jensen N O, Chen Z. Two years of continuous CO<sub>2</sub> eddy-flux measurements over a Danish beech forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 29-41.
- [ 16 ] Aubinet M, Chermanne B, Vandenhaute M, Longdoz B, Yernaux M, Laitat E. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(4): 293-315.
- [ 17 ] Goulden M L, Daube B C, Fan S M, Sutton D J, Bazzaz A, Munger J W, Wofsy S C. Physiological responses of a black spruce forest to weather. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(4): 28987-28996.
- [ 18 ] Falge E, Baldocchi D D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap-filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem ex-change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [ 19 ] Falge E, Baldocchi D D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap-filling strategies for long-term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 71-77.
- [ 20 ] Song X, Liu Y F, Xu X F, Yu G R, Wen X F. Comparison study on carbon dioxide, water and heat fluxes of the forest ecosystem in red earth hilly zone over winter and spring. *Resource Science*, 2004, 26(3): 97-104.
- [ 21 ] Greco S, Baldocchi D D. Seasonal variations of CO<sub>2</sub> and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 183-197.
- [ 22 ] Lee X H, Fuentes J D, Staebler R M, Neumann H H. Long-term observation of the atmospheric exchange of CO<sub>2</sub> with a temperate deciduous forest in southern Ontario, Canada. *Journal of geophysical research*, 1999, 104(13): 15975-15984.
- [ 23 ] Liu Y F, Song X, Sun X M, Wen X F, Chen Y R. CO<sub>2</sub> flux seasonal variations of coniferous forest in Qianyanzhou and its affection on environmental factors. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 34(Supp II): 109-117.

- [24] Wang C L, Yu G R, Zhou Y G, Yan J H, Zhang L M, Wang X, Sun X M. Estimation of CO<sub>2</sub> flux on Dinghu Mountain evergreen broad-leaved mixed forest. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 36(Supp I): 119-129.
- [25] Li Y N, Sun X M, Zhao Q X, Zhao L, Xu S X, Gu S, Zhang F W, Yu G R. Seasonal variations of CO<sub>2</sub> exchange value and environmental controlling factor on *Potentilla fruticosa* thickets meadow ecosystem in Tibet Plateau. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 36(Supp I): 163-173.
- [26] Wu L B, Gu S, Zhao L, Xu S X, Zhou H K, Feng C, Xu W X, Li Y N, Zhao X Q, Tang Y H. Variation in net CO<sub>2</sub> exchange, gross primary production and its affecting factors in the planted pasture ecosystem in Sanjiangyuan Region of the Qinghai-Tibetan Plateau of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(7): 770-780.
- [27] Liu C F, Li X M. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2011, Article in Press from Science Direct.
- [28] Li X, Sun R, Li Y, Wang X X, Xie D H, Yan X D, Zhu Q J. Carbon dioxide fluxes on green space in Haidian Park, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6715-6725.
- [29] Zhao M, Kong, Z H, Escobedo F J, Gao J. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(4): 807-813.
- [30] Nowak D J, Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 381-389.
- [31] McPherson E G. Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture*, 1998, 24(4): 215-223.

#### 参考文献:

- [2] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 李正泉, 伏玉玲. 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: 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 15-29.
- [3] 沈艳, 刘允芬, 王堰. 应用涡动相关法计算水热、CO<sub>2</sub>通量的国内外进展概况. *南京气象学院学报*, 2005, 28(4): 559-565.
- [4] 管东生, 刘秋海, 莫大伦. 广州城市建成区绿地对大气二氧化硫的净化作用. *中山大学学报: 自然科学版*, 1999, 38(2): 109-113.
- [5] 马雪梅, 张友静, 黄浩. 城市热场与绿地景观相关性定量分析. *国土资源遥感*, 2005, 65(3): 10-14.
- [6] 王修信, 朱启疆, 陈声海, 孙睿, 杨胜天, 胡玉梅, 刘馨, 高凤飞. 城市公园绿地水、热与 CO<sub>2</sub>通量观测与分析. *生态学报*, 2007, 27(8): 3232-3239.
- [23] 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 温学发, 陈永瑞. 千烟洲人工针叶林 CO<sub>2</sub>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*, 2004, 34(增刊 II): 109-117.
- [24] 王春林, 于贵瑞, 周国逸, 闫俊华, 张雷明, 王旭, 孙晓敏. 鼎湖山常绿阔叶混交林 CO<sub>2</sub>通量估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(增刊 I): 119-129.
- [25] 李英年, 孙晓敏, 赵新全, 赵亮, 徐世晓, 古松, 张法伟, 于贵瑞. 青藏高原金露梅灌丛草甸净生态系统 CO<sub>2</sub>交换量的季节变异及其环境控制机制. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(增刊 I): 163-173.
- [26] 吴力博, 古松, 赵亮, 徐世晓, 周华坤, 冯超, 徐维新, 李英年, 赵新全, 唐艳鸿. 三江源地区人工草地的生态系统 CO<sub>2</sub>净交换、总初级生产力及其影响因子. *植物生态学报*, 2010, 34(7): 770-780.
- [28] 李霞, 孙睿, 李远, 王修信, 谢东辉, 严晓丹, 朱启疆. 北京海淀公园绿地二氧化碳通量. *生态学报*, 2010, 30(24): 6715-6725.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 4 February, 2012 (Semimonthly)  
CONTENTS

The influence of a reclamation project on the macrobenthos of an East Nanhui tidal flat ..... MA Changan, XU Linlin, TIAN Wei, et al (1007)

Ecological health assessment of groundwater in the lower Liaohe River Plain using an ArcView-WOE technique ..... SUN Caizhi, YANG Lei (1016)

Nitrogen flows in intensive “crop-livestock” production systems typically for the peri-urban area of Beijing ..... HOU Yong, GAO Zhiling, MA Wenqi, et al (1028)

The simulation of leaf net photosynthetic rates in different radiation in apple canopy ..... GAO Zhaoquan, FENG Shezhang, ZHANG Xianchuan, et al (1037)

Phenological variation of typical vegetation types in northern Tibet and its response to climate changes ..... SONG Chunqiao, YOU Songcai, KE Linghong, et al (1045)

Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors ..... TANG Zhenxing, HE Zhibin, LIU Hu (1056)

Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains ..... TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (1066)

Response of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate change in Hulunbuir sand land, China ..... SHANG Jianxun, SHI Zhongjie, GAO Jixi, et al (1077)

Analysis of a dust case using lidar in Shanghai ..... MA Jinghui, GU Songqiang, CHEN Min, et al (1085)

Relating the distribution of zooplankton abundance in the coastal waters of central Fujian Province to the seasonal variation of water masses ..... TIAN Fengge, XU Zhaoli (1097)

Phenotypic traits of both larvae and juvenile *Crasstrea hongkongensis* and *C. gigas* ..... ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (1105)

Inter-specific competition between *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* ..... LI Hui, WANG Jiangtao (1115)

Effects of initial biomass ratio on the interspecific competition outcome between three marine microalgae species ..... WEI Jie, ZHAO Wen, YANG Weidong, et al (1124)

On the ecological amplitude of nitrate of *Alexandrium tamarense* at different initial phosphate concentrations in laboratory cultures ..... WEN Shiyong, SONG Lili, LONG Hua, et al (1133)

Time lag effects and rainfall redistribution traits of the canopy of natural secondary *Pinus tabulaeformis* on precipitation in the Qinling Mountains, China ..... CHEN Shujun, CHEN Cungen, ZOU Bocai, et al (1142)

The vertical distribution of vegetation patterns and its relationship with environment factors at the northern slope of Ili River Valley: a bimodal distribution pattern ..... TIAN Zhongping, ZHUANG Li, LI Jianguo (1151)

Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. and the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. .... SHI Songli, WANG Yingchun, ZHOU Hongbing, et al (1163)

Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress ..... SHAN Changjuan, HAN Ruilian, LIANG Zongsuo (1174)

The effects of the addition of *Ceratobasidium stevensii* B6 and its growth on the soil microflora at a continuously cropped water-melon (*Citrullus lanatus*) site in China ..... XIAO Yi, WANG Xingxiang, WANG Hongwei, et al (1185)

Suitable habitat for the *Achnatherum splendens* community in typical steppe region of Inner Mongolia ..... ZHANG Yifei, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1193)

Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district ..... GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al (1202)

Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity on a slope of the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau ..... LIU Chunli, HU Wei, JIA Hongfu, et al (1211)

Spatial and temporal variations of total nitrogen density in agricultural soils of the Songnen Plain Maize Belt ..... ZHANG Chunhua, WANG Zongming, JU Weimin, et al (1220)

The evaluation system of strength of winteriness in wheat ..... WANG Peng, ZHANG Chunqing, CHEN Huabang, et al (1230)

A comparison of summer habitats selected by sympatric *Apodemus chevrieri* and *Apodemus draco* in Tiangjiahe Nature Reserve, China ..... LI Yunxi, ZHANG Zejun, SUN Yiran, et al (1241)

Life tables for experimental populations of *Frankliniella occidentalis* on 6 vegetable host plants ..... CAO Yu, ZHI Junrui, KONG Yixian (1249)

Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach ..... ZENG Qingfei, GU Xiaohong, MAO Zhigang, et al (1257)

Recognition of important ecological nodes based on ecological networks analysis: A case study of urban district of Nanjing ..... XU Wenwen, SUN Xiang, ZHU Xiaodong, et al (1264)

Seasonal characteristics of CO<sub>2</sub> fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China ..... SUN Chunjian, WANG Chunlin, SHEN Shuanghe, et al (1273)

Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of TuoCheng County ..... WU Yizhong, ZHU Qinyuan, LIU Ning, LU Genfa, DAI Mingzhoet al (1283)

**Review and Monograph**

Recent advances in wetland degradation research ..... HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, LI Ke (1293)

A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis ..... YANG Rong, SU Yongzhong, WANG Xuefeng (1308)

**Discussion**

The diversity of the radio-resistant bacteria *Deinococcus radiodurans* ..... TU Zhenli, FANG Lijing, WANG Jiagang (1318)

Effect of pruning measure on physiology character and soil waters of *Caragana korshinskii* ..... YANG Yongsheng, BU Chongfeng, GAO Guoxiong (1327)

**Scientific Note**

Characteristics of rainfall interception for four typical shrubs in Qilian Mountain ..... LIU Zhangwen, CHEN Rensheng, SONG Yaoxuan, et al (1337)

Dormancy break approaches and property of dormant seeds of wild *Cryptotaenia japonica* ..... YU Mei, ZHOU Shoubiao, WU Xiaoyan, et al (1347)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 4 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 4 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@esp.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@esp.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元