

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 20 期 Vol.33 No.20 **2013**

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 33 卷 第 20 期 2013 年 10 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 中小尺度下西北太平洋柔鱼资源丰度的空间变异..... 杨铭霞,陈新军,冯永玖,等 (6427)
- 水分和温度对若尔盖湿地和草甸土壤碳矿化的影响..... 王 丹,吕瑜良,徐 丽,等 (6436)
- 荒漠啮齿动物群落对开垦干扰的响应及其种群生态对策..... 袁 帅,付和平,武晓东,等 (6444)
- 转 Bt 基因棉花对烟粉虱天敌昆虫龟纹瓢虫的影响 周福才,顾爱祥,杨益众,等 (6455)
- 微地形改造的生态环境效应研究进展..... 卫 伟,余 韵,贾福岩,等 (6462)

个体与基础生态

- 丹顶鹤春迁期觅食栖息地多尺度选择——以双台河口保护区为例..... 吴庆明,邹红菲,金洪阳,等 (6470)
- 新疆石河子南山地区表土花粉研究..... 张 卉,张 芸,杨振京,等 (6478)
- 鄱阳湖湿地两种优势植物叶片 C、N、P 动态特征 郑艳明,尧 波,吴 琴,等 (6488)
- 基于高分辨率遥感影像的森林地上生物量估算..... 黄金龙,居为民,郑 光,等 (6497)
- 异质性光照下匍匐茎草本狗牙根克隆整合的耗益..... 陶应时,洪胜春,廖咏梅,等 (6509)
- 湘潭锰矿废弃地栎树人工林微量元素生物循环..... 罗赵慧,田大伦,田红灯,等 (6517)
- 接种彩色豆马勃对模拟酸沉降下马尾松幼苗生物量的影响 陈 展,王 琳,尚 鹤 (6526)
- 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响 陈心想,何绪生,耿增超,等 (6534)
- 延河流域植物功能性状变异来源分析 张 莉,温仲明,苗连朋 (6543)
- 榆紫叶甲赤眼蜂基础生物学特性及其实验种群生命表..... 王秀梅,臧连生,林宝庆,等 (6553)
- 几种生态因子对拟目乌贼胚胎发育的影响 彭瑞冰,蒋霞敏,于曙光,等 (6560)

种群、群落和生态系统

- 海南铜鼓岭灌木林稀疏规律..... 周 威,龙 成,杨小波,等 (6569)
- 青海三江源区果洛藏族自治州草地退化成因分析..... 赵志平,吴晓蕾,李 果,等 (6577)
- 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物基质质量的影响..... 肖银龙,涂利华,胡庭兴,等 (6587)
- 基于光合色素的钦州湾平水期浮游植物群落结构研究 蓝文陆,黎明民,李天深 (6595)
- 基于功能性状的常绿阔叶植物防火性能评价..... 李修鹏,杨晓东,余树全,等 (6604)
- 北京西山地区大山雀与其它鸟类种群间联结分析..... 董大颖,范宗骥,李扎西姐,等 (6614)
- 被动式电子标签用于花鼠种群动态研究的可行性 杨 慧,马建章,戎 可 (6634)

景观、区域和全球生态

- 华北冬小麦降水亏缺变化特征及气候影响因素分析..... 刘 勤,梅旭荣,严昌荣,等 (6643)
- 基于 FAHP-TOPSIS 法的我国省域低碳发展水平评价 胡林林,贾俊松,毛端谦,等 (6652)
- 河漫滩湿地生态阈值——以二卡自然保护区为例..... 胡春明,刘 平,张利田,等 (6662)
- 应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响 刘 雷,安韶山,黄华伟 (6670)
- 不同人为干扰下纳帕海湖滨湿地植被及土壤退化特征..... 唐明艳,杨永兴 (6681)

资源与产业生态

近 10 年北京极端高温天气条件下的地表温度变化及其对城市化的响应 李晓萌,孙永华,孟 丹,等 (6694)

三峡库区小江库湾鱼类食物网的稳定 C、N 同位素分析 李 斌,徐丹丹,王志坚,等 (6704)

研究简报

北京奥林匹克森林公园绿地碳交换动态及其环境控制因子..... 陈文婧,李春义,何桂梅,等 (6712)

植被恢复对洪雅县近 15 年景观格局的影响 王 鹏,李贤伟,赵安玖,等 (6721)

高盐下条斑紫菜光合特性和 S-腺苷甲硫氨酸合成酶基因表达的变化 ... 周向红,易乐飞,徐军田,等 (6730)

学术信息与动态

生态系统服务研究进展——2013 年第 11 届国际生态学大会 (INTECOL Congress) 会议述评 房学宁,赵文武 (6736)

生态系统服务评估——2013 年第 6 届生态系统服务伙伴国际学术年会述评 巩 杰,岳天祥 (6741)

回顾过去,引领未来——2013 年第 5 届国际生态恢复学会大会 (SER 2013) 简介..... 彭少麟,陈宝明,周 婷 (6744)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 320 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 33 * 2013-10



封面图说: 荒漠旱獭——旱獭属啮齿目、松鼠科、旱獭属,是松鼠科中体型最大的一种。旱獭多栖息于平原、山地和荒漠草原地带,集群穴居,挖掘能力甚强,洞道深而复杂,多挖在岩石坡和沟谷灌丛下,从洞中推出的大量沙石堆在洞口附近,形成旱獭丘。荒漠啮齿动物是荒漠生态系统的重要成分,农业开垦对功能相对脆弱的荒漠生态系统的干扰极大,往往导致栖息地破碎化,对动植物种产生强烈影响,啮齿动物受到开垦干扰后对环境的响应及其群落的生态对策,是荒漠生态系统生物多样性及其功能维持稳定的重要基础。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201301070053

陈文婧, 李春义, 何桂梅, 王小平, 查天山, 贾昕. 北京奥林匹克森林公园绿地碳交换动态及其环境控制因子. 生态学报, 2013, 33(20): 6712-6720.
Chen W J, Li C Y, He G M, Wang X P, Zha T S, Jia X. Dynamics of CO₂ exchange and its environmental controls in an urban green-land ecosystem in Beijing Olympic Forest Park. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(20): 6712-6720.

北京奥林匹克森林公园绿地碳交换动态 及其环境控制因子

陈文婧¹, 李春义¹, 何桂梅^{2,3}, 王小平^{2,3}, 查天山^{1,3}, 贾昕^{1,*}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市林业碳汇工作办公室, 北京 100013;

3. 中关村绿色碳汇研究院, 北京 100083)

摘要:随着城市化进程的推进,城市公园绿地的面积也在不断地增加。在碳循环与气候变化研究中,以人工植被为主要存在形态的城市绿地生态系统,其潜在的碳汇功能亦不容忽视。基于涡度相关技术,于 2011 年 12 月 1 日至 2012 年 11 月 30 日对北京奥林匹克森林公园城市绿地生态系统进行了碳通量观测,以探讨城市绿地生态系统碳交换及其与环境因子的关系及其源/汇属性和强度。研究发现:奥林匹克森林公园绿地年总生态系统生产力(GEP)、生态系统呼吸(Re)、生态系统净生产力(NEP)具有明显的季节变化,生长季(4 月—11 月)以吸收二氧化碳(CO₂)为主,非生长季以释放 CO₂ 为主。 Re 随空气温度(T_a)呈指数增加,温度敏感性系数(Q_{10})为 2.5;GEP 也随 T_a 的升高而增加;GEP 与 Re 对 T_a 的响应差异决定着 NEP 与 T_a 的关系:当 $T_a < 10.0$ °C 时,NEP 随 T_a 升高而下降;当 $T_a > 10.0$ °C 时,NEP 随 T_a 升高而增加。在生长季各月,日总 GEP 随日光合有效辐射(PAR)的升高而增加,生态系统光合作用表观光量子效率(α)和平均最大光合速率(A_{max})也表现出明显的季节变化,最大值出现在 7 月,分别为 $0.083 \mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$ 和 $29.46 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,最小值出现在 11 月,分别为 $0.017 \mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$ 和 $4.16 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。奥林匹克森林公园绿地全年 GEP、 Re 、NEP 的年总量分别为 1192、1028、164 g C/m²。该研究结果可用于估算、模拟预测相似城市生态系统在气候变化背景下生态系统净碳交换,可作为城市绿地生态系统管理与应对气候变化的重要理论基础。

关键词:城市绿地;碳通量;涡度协方差;生态系统生产力;生态系统呼吸

Dynamics of CO₂ exchange and its environmental controls in an urban green-land ecosystem in Beijing Olympic Forest Park

CHEN Wenjing¹, LI Chunyi¹, HE Guimei^{2,3}, WANG Xiaoping^{2,3}, ZHA Tianshan^{1,3}, JIA Xin^{1,*}

¹ School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Beijing Forestry Carbon Administration, Beijing 100013, China

³ Chinese Institute of Green Carbon, Beijing 100083, China

Abstract: The area of urban forests and green-land is expanding dramatically across China in order to face rapid urbanization. Urban green-land ecosystems with plantations as their main vegetation type, have the great potential to sequester atmospheric carbon. Continuous measurements of CO₂ flux were made using eddy covariance technique from December 2011 to November 2012 in a mixed forest in Beijing Olympic Forest Park to quantify the seasonal dynamics of net ecosystem CO₂ exchange (NEE) and its responses to environmental factors. Gross ecosystem productivity (GEP), ecosystem respiration (Re), and net ecosystem productivity (NEP = -NEE) showed strong seasonal pattern, with CO₂

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2008BAD95B07)

收稿日期:2013-01-07; 修订日期:2013-08-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xinjia@bjfu.edu.cn

uptake dominating during the growing season from April to November, and a respiratory release of CO_2 dominating during the non-growing season. The carbon flux was influenced by photosynthetically active radiation (PAR), water vapor pressure deficit (VPD) and air temperature (T_a). In growing season, daytime net ecosystem carbon exchange (NEE_{day}) increased with increasing PAR. The ecosystem quantum yield (α) and maximum photosynthesis (A_{max}) showed an apparent seasonal pattern, both peaking in July. VPD also affected NEE through its direct effect on photosynthesis. NEE increased with the increasing PAR up to a threshold of $1200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, then decreased with increasing PAR above this threshold. GEP, R_e and NEP were all influenced by T_a , but responded differently. R_e increased exponentially with air temperature (T_a), with the temperature sensitivity (Q_{10}) being 2.5. GEP also increased with T_a . This differential response of GEP and R_e determined the relationship between NEP and T_a . NEP decreased with increasing T_a when $T_a < 10.0^\circ\text{C}$, but increased when $T_a > 10.0^\circ\text{C}$. NEE_{day} increased with PAR. The ecosystem quantum yield (α) and maximum photosynthesis (A_{max}) showed an apparent seasonal pattern, both peaking in July with the value of $0.083 \mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$ and $29.46 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively, and reaching a minimum in November with the value of $0.017 \mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$ and $4.16 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. The predicted annual totals of GEP, R_e and NEP were 1192, 1028 and $164 \text{ g C}/\text{m}^2$, respectively. The present results could contribute to the carbon budget of urban ecosystems, and help make carbon-oriented management strategies for sustainable urban development under global climate change.

Key Words: urban green-land; CO_2 flux; eddy covariance; ecosystem productivity; ecosystem respiration

近 20 年来,我国森林碳(C)储量增加了约 0.4 Pg C , 年增加 $0.011 - 0.035 \text{ Pg C}^{[1]}$ 。人工造林面积的不断扩大对森林碳储量的增加起着重要贡献。目前,我国人工林占全球人工林面积的近 $1/3$; 年增量占全球的 $53.2\%^{[2]}$ 。随着城市化进程的推进,城市森林公园的面积也在不断增加,城市绿地/人工林作为城市生态的理想“调节器”,深刻影响着城市的生态环境^[3]。在碳循环与气候变化研究中,以人工林植被为主要存在形态的城市绿地作为重要的碳平衡组分,对减轻气候变化的影响发挥着重要作用,其潜在的碳汇功能(或碳固持)不可低估^[4]。

城市由于受特殊的下垫面、建筑物及人类活动的影响,表现出高温、高大气二氧化碳(CO_2)浓度、高氮沉降以及高气溶胶浓度等环境特征^[5],城市中植被的性质和特征也与自然植被有很大不同^[6]。作为城市绿化美化、改善生态环境的重要载体的城市绿地生态系统,其丰富的林种因人工管理、热岛效应和相对较高的氮沉降等可能使单株树木的生长速度高于野外^[7];同时,城市中较高的气溶胶浓度,削弱了地面接收的太阳辐射,但增加了散射辐射的比例,而大气悬浮气溶胶粒子直接吸收短波辐射使低层大气中上部增温^[8],使不同植物净光合速率、蒸腾速率和气孔导度发生不同程度的增加或减少,造成城市单位面积碳固持能力增加或降低^[9]。近年的一些研究认为,城市的特征性环境可作为研究生态系统对全球气候变化的响应和预测未来生态系统的变化趋势的“自然大实验场”^[10-11]。然而,这一方法仍处于前期的讨论阶段,相关的研究也仅限于一些有关城市热岛和城市污染等碳源方面的报道,对城市绿地生态系统碳汇功能及与全球变化相关的研究仍相对薄弱。通过对城市绿地生态系统碳汇功能的量化研究,可以评估并预测其在减少大气 CO_2 中的潜在作用^[12]。欧美国家对城市绿地生态系统碳固持功能已有大量研究^[13-15],近年来许多发展中国家对城市绿地生态系统碳固持功能也越来越重视^[16-18]。对城市绿地生态系统碳交换规律及其环境控制因素的理解和认识对我国陆地生态系统碳循环和气候变化研究具有重要的理论和实践意义^[19]。

涡度协方差法已成为目前直接测定植被与大气间的碳水交换,认识和理解生态系统碳源/汇属性动态的最可靠方法之一^[20],广泛应用于估算从局域到景观尺度的物质与能量收支^[21]。涡度相关系统通过对风速、温度、水汽(H_2O)和 CO_2 脉动值的观测,可实现对城市绿地生态系统的碳-水-能量通量的监测,不但有助于分析城市绿地与大气间 CO_2 交换的规律及其环境控制因素,而且可以评价涡度协方差法在城市绿地生态系统研究中的适用性。然而已有的涡度通量研究主要集中在森林、农田和草地等生态系统,利用该技术对城市绿地

生态系统物质与能量交换的连续观测仍不多见^[22]。通过探索城市绿地生态系统对气候变化的响应,利用碳通量数据,可预测气候变化背景下城市绿地生态系统碳汇功能,为反演生态系统对气候和环境变化的响应关键碳循环参数提供科学依据。本研究运用涡度协方差法对北京奥林匹克公园典型绿地生态系统进行了全年连续监测,分析了(1)总生态系统生产力(GEP),生态系统呼吸(R_e)和生态系统净生产力(NEP)的季节动态;(2)环境因素对碳交换各组分的作用;(3)全年碳源/汇属性及强度。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

研究区位于北京奥林匹克森林公园北园(40°01'N, 116°23'E, 海拔 51 m), 占地 680 hm², 植被覆盖率达 90% 以上, 是亚洲最大的城市森林公园。该区域为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均温 14.0 °C (北京市气象局, 2007 年), 1 月均温 -5.8 °C, 极端最低 -27.4 °C, 7 月均温 25.6 °C, 极端最高 42.0 °C, 年均降雨量约 600 mm, 全年无霜期 180—200d。降水季节分配不均, 全年降水的 80% 集中在 6、7、8 三个月, 7、8 月暴雨和强对流天气较频繁。土壤类型主要为潮褐土, 土壤容重为 1.62 g/cm³, 土壤孔隙度约为 40.30%。通量塔足迹内主要植被为人工营造的乔灌木复层景观林, 乔木主要为油松 (*Pinus tabulaeformis*), 侧柏 (*Platycladus orientalis*), 国槐 (*Sophora japonica*), 白蜡 (*Fraxinus chinensis*) 和银杏 (*Ginkgo biloba*), 林分密度约为 210 株/hm², 平均树高 7.7 m, 胸径 20.6 cm; 灌木树种主要为山桃 (*Prunus davidiana*) 和榆叶梅 (*Amygdalus triloba*), 丛生灌木主要为红瑞木 (*Swida alba* Opiz), 丁香 (*Syzygium aromaticum*), 林分密度约为 351 株/hm², 平均树高 2.8 m, 平均基径 72.0 cm; 地被植物主要为鸢尾 (*Iris tectorum*) 和石竹 (*Dianthus chinensis*)。

1.2 研究方法

涡度通量观测仪器安装高度为 11.5 m, 包括三维超声风速仪 (CSAT3, Campbell Scientific Ltd, USA) 和 CO₂/H₂O 红外气体分析仪 (EC155, Campbell Scientific Ltd, USA)。净辐射仪 (CNR-4, Kipp & Zonen Inc., Netherlands) 及光量子传感器 (PARLITE, Kipp & Zonen Inc., Netherlands) 均安装在 12 m 处; 两个翻斗式雨量筒 (TE525, Campbell Scientific Ltd, USA) 分别安装在距离通量塔基础 2 m 和 5 m 处迎风向的位置; 5 个空气温湿度传感器 (HMP45C, Campbell Scientific Ltd, USA) 分别安装在 1.5、5、8、10 m 和 12 m 高度; 土壤温度传感器 (Campbell-109, Campbell Scientific Ltd, USA) 及土壤含水量传感器 (CS616, Campbell Scientific Ltd, USA) 分 5 个方向布设在塔周边 10—15 m 处, 其中 4 个点安装在 10 cm 深度, 一个点安装在 30 cm 深度; 土壤热通量板 (HFP01, Campbell Scientific Ltd, USA) 分 4 个方向安装在 10 cm 深度。数据采集器 (CR3000, Campbell Scientific Ltd, USA) 以 10Hz 频率记录涡度协方差系统的数据, 对于微气象系统记录 30 min 平均值 (扫描频率 0.1 Hz)。

1.3 数据处理与数据分析

本研究所用数据从 2011 年 12 月 1 日至 2012 年 11 月 30 日, 期间由于仪器故障、停电等造成 16.7% 涡度数据缺失。对 10 Hz 数据进行了校正和质量控制, 包括剔除野点^[23]、二次坐标轴旋转^[24]、去除传感器延时影响^[25]、频率响应校正^[26]和 WPL 校正^[27]等。用校正过的 10 Hz 数据计算半小时通量, 然后利用 3 倍标准差法剔除野点。生态系统净碳交换 (NEE) 被定义为公式 (1)^[28]:

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

式中, F_c 是通量观测塔在植被上部所观测到的 CO₂ 通量, F_s 是涡度相关系统安装高度下冠层内储存通量, V_c 是垂直和水平平流效应。在地势平坦, 植被类型空间分布均匀的植被下垫面, V_c 可忽略不计。对于较高的植被冠层而言, 观测高度以下的 F_s 变化常常不为零, 因此, 需要对 F_s 进行计算^[29]:

$$F_s = \frac{\Delta C(Z)}{\Delta t} \Delta Z \quad (2)$$

式中, $\Delta C(Z)$ 为观测高度处的 CO₂ 浓度变化 (μmol/m³), Δt 为采样周期 (s), ΔZ 为观测高度 (m)。

对夜间 NEE (NEE_{night}) 数据进行摩擦风速 (u_*) 筛选, 剔除 $u_* < 0.15$ m/s 的数据。筛选后得到有效数据占

总数据比例约为 53%。通过通量贡献分析(足迹分析)^[30],得出 90%通量足迹为上风向 150 m 范围内,在 100 m 的 footprint 贡献为 70%,而通量贡献的峰值则出现在 50 m 处。

对于仪器故障、停电和数据质量控制等造成的缺失数据用如下方法进行插补:(1) 小于 2 h 的缺失数据用线性内插法插补;(2) 大于 2 h 的缺失数据采用非线性回归法进行插补^[31]。对于生长季白天光合有效辐射(PAR)大于 $3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[32] 的涡度数据插补采用如下光响应模型^[33]:

$$\text{NEE}_{\text{day}} = \frac{\alpha \times \text{PAR} \times A_{\text{max}}}{\alpha \times \text{PAR} \times A_{\text{max}} - R_d} - R_d \quad (3)$$

式中, NEE_{day} 是白天的生态系统净碳交换量 ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), α 为生态系统表观光量子效率 ($\mu\text{mol CO}_2 / \mu\text{mol}$ 光子), PAR 为光合有效辐射 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), A_{max} 为生态系统最大光合速率 ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), R_d 为白天平均生态系统呼吸速率 ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。考虑到植物的物候和光合参数 (α , A_{max}) 的季节变化,采用公式(3)按月对数据进行拟合和插补。

预分析发现:冬季和夏季温度变化范围较窄, $\text{NEE}_{\text{night}}$ 对空气温度 (T_a) 的回归效果不佳 ($R^2 < 0.2$, $P > 0.05$), 而春季和秋季 $\text{NEE}_{\text{night}}$ 与 T_a 的反应相似。因此,在插补夜间数据时全年采用单一函数(公式 4)对夜间日平均 T_a 与 $\text{NEE}_{\text{night}}$ 进行拟合^[34]。

$$\text{NEE}_{\text{night}} = R_0 \cdot Q_{10}^{T_a/10} \quad (4)$$

式中, R_0 为当 T_a 为 0 °C 时的呼吸速率; Q_{10} 为温度增加 10 °C 时呼吸速率的相对增加量(i.e., 温度敏感性)。再将公式(4)获得的呼吸参数 (R_0 , Q_{10}) 外推到白天获得白天生态系统呼吸的日变化。

因此净生态系统生产力(NEP)为:

$$\text{NEP} = -\text{NEE} = \text{GEP} - R_e \quad (5)$$

本文中的 NEE 和 R_e 正值表示生态系统向大气中放出 CO_2 , NEP 和 GEP 正值则表示生态系统从大气中吸收 CO_2 。通过回归分析生态系统碳交换及其组分与环境变量之间的关系。数据统计分析与作图均采用 Matlab (Version 7.12.0., The MathWorks, Natick, MA, USA) 完成。

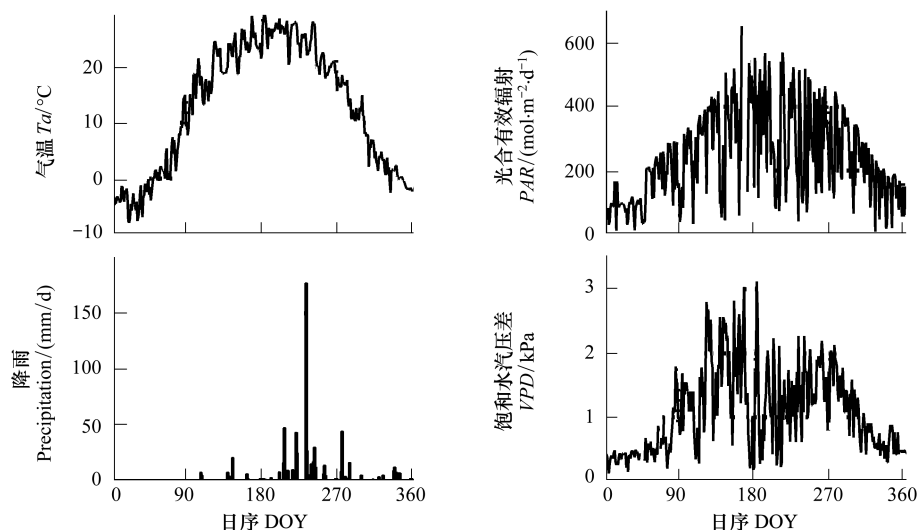


图 1 奥林匹克森林公园日平均气温 (T_a)、日累积光和有效辐射 (PAR)、日降雨量 (precipitation) 和饱和水汽压差 (VPD) 季节动态

Fig.1 Mean daily air temperature (T_a), integrated daily photosynthetically active radiation (PAR), precipitation and daily mean vapour pressure deficit (VPD)

2 结果与分析

2.1 环境因子的季节变化

生态系统碳交换通常受温度、光合有效辐射、湿度、风速和下垫面特征等因素的影响。在本研究数据时间

段内北京奥林匹克森林公园最高气温(T_a)发生在7月2日(29.6℃),最低气温发生在1月22日(-7.9℃),月平均气温从3月到11月均大于0℃(图1)。光合有效辐射(PAR)的季节趋势为单峰型,最大日总量出现在6月,为569.19 mol·m⁻²·d⁻¹(图1)。年降雨总量716.00 mm,其中2012年7月21日发生61年一遇的特大暴雨,日降雨量达到176.85 mm(图1)。饱和水汽压差(VPD)变化范围为0.15—2.81 Kpa(图1),呈明显季节变化,总体表现为夏季高、冬季低。

2.2 生态系统的 GEP、 R_e 及 NEP 的年总量和季节动态

2012年观测点年总生态系统生产(GEP)、生态系统呼吸(R_e)、生态系统净生产力(NEP)的年总量分别为1192、1028、164 g C/m²。在城市绿地植被中,乔木的储碳能力是整个城市绿地中储碳的主要部分,且相同数量的老树要比幼树对碳储存的贡献高很多^[35]。与乔木相比,草本植物固定下来的大部分碳并不能长期积累;灌丛由于修剪受到严格的形体控制,其径向增粗并不明显,因而其固碳量随着时间的增长也不大。在奥林匹克森林公园中,由于多数植被为人工建设,历史遗留较少,因而大树的比例很低。因此,奥林匹克森林公园这个年轻公园的植被年净碳吸收量6.04 tCO₂/hm²小于北京海淀公园绿地8.76 tCO₂/hm²^[3]。而Jo^[36]对韩国Chuncheon, Kangleung和Seoul 3个城市的绿地碳通量进行了调查结果表明,在不考虑草地与土壤的碳通量的情况下,木本植物年净碳吸收量为5.87—14.33 tCO₂/hm²。与其他林地碳通量观测结果相比较,美国密执安大学生物站的年NEP在2.93—6.23 tCO₂/hm²之间^[37],美国哈佛林地的年NEP是7.33 tCO₂/hm²^[38]。由于引起碳吸收能力不同的原因仍存在很多的不确定性,不同年际之间环境因素对碳交换各组分控制作用亦存在差异,导致本研究结果与以上研究结果相比相当,但显著小于野外年轻的森林44.6 tCO₂/hm²^[39]。因此,必须进一步发展针对城市植被的碳循环研究方法以更准确地估算城市地区植被的碳吸收和碳固持^[40]。

2.3 温度对生态系统碳交换的影响

日平均NEE_{night}随 T_a 的增加呈指数增长(图3), Q_{10} 为2.5, R_0 为0.55 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹, T_a 可解释73%的NEE_{night}变异。本研究得到的 Q_{10} 值与其它温带地区的研究结果接近,比如郑泽梅等^[41]对长白山温带混交林的研究发现林冠下层夜间CO₂通量随温度呈指数增长, Q_{10} 为2.7,高于在模拟呼吸时通常作为默认值的2.0^[42]。

温度除了影响生态系统呼吸,还通过影响光合作用来影响生态系统的CO₂交换(图3)。随着季节的变化,春季GEP随着 T_a 的升高逐渐增加,随后在夏季达到最高,随着秋季 T_a 的降低,GEP也开始降低。许多研究发现,GEP随温度呈抛物线变化趋势^[43],在温度上升到一个最适温度(GEP达到最大值时的温度)后,GEP不再继续升高,而是随着 T_a 的升高而降低,说明当 T_a 升高到一定程度时(即超过临界的最适温度),对GEP会产生抑制作用。但在本研究中, T_a 对GEP的影响不存在最适温度,即当 T_a 达到最高温度时,也未对GEP产生抑制作用,植物对 T_a 具有一定的适应性。

奥林匹克森林公园绿地净生态系统交换在气温小于10℃时,整个生态系统以呼吸作用为主,此时公园绿地处于非生长季, R_e 随温度的升高而增强,导致日总NEE随温度增大(图3)。气温大于10℃植被进入生长季,光合作用随温度增加比呼吸快,日总NEE随着温度的增加发生由正到负的变化,表现为净吸收大气CO₂,30℃时表现为最大吸收(NEE=-4.01 g C·m⁻²·d⁻¹)。该结果与Niu^[43]对20个中高纬度通量站点的研究结果不尽相同,本研究结果仅与该研究中的两个落叶阔叶林站点(US-UMB站及DE-Hai站)的NEE与 T_a 的关系一

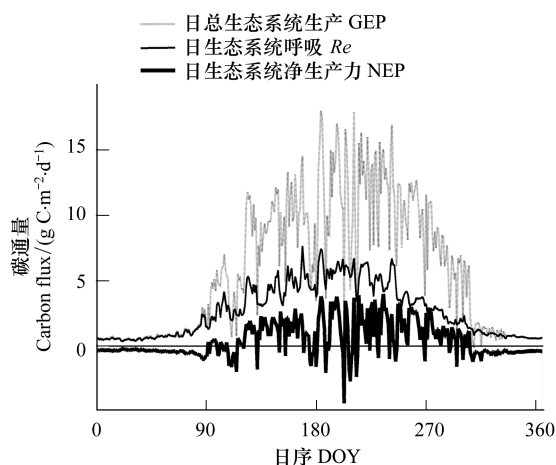


图2 2011年12月—2012年11月,日总生态系统生产(GEP)、日生态系统呼吸(R_e)和日生态系统净生产力(NEP)
Fig.2 Daily gross ecosystem productivity (GEP), daily ecosystem respiration (R_e) and daily net ecosystem productivity (NEP) from December, 2011 to November, 2012

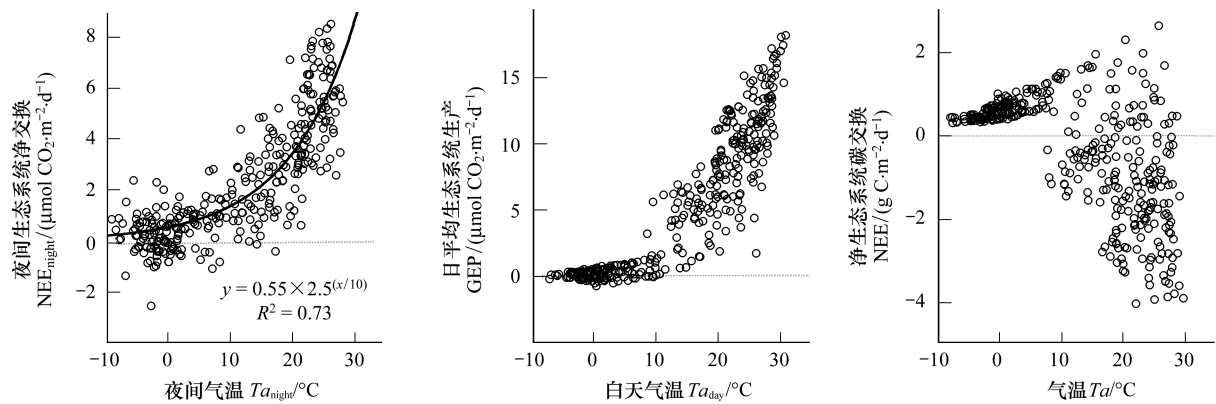


图3 夜间生态系统净交换(NEE_{night})、日平均生态系统生产(GEP)、净生态系统碳交换(NEE)分别与同期空气温度的关系

Fig.3 Relationship between nighttime net ecosystem exchange (NEE_{night}), daily mean gross ecosystem productivity (GEP), net ecosystem exchange (NEE) and the corresponding period air temperature, respectively

致,而其它 18 个站点的日总 NEE 均先随 T_a 的增加而增加,当 T_a 达到最适温度(即日总 NEE 最大吸收的峰值时)后,随着 T_a 的继续增加,日总 NEE 开始减少与降低,日总 NEE 随 T_a 呈抛物线变化趋势。

表 1 白天生态系统净碳交换(NEE)与光合有效辐射(PAR) 之间的相关参数比较

Table 1 Comparison of parameters for the relationship between daytime net ecosystem CO_2 exchange (NEE) and photosynthetically active radiation (PAR)

月份 Month/月	光合作用表观光量子效率 Ecosystem quantum yield (α) /($\mu mol\ CO_2/\mu mol\ PAR$)	最大光合速率 Maximum photosynthesis (A_{max}) /($\mu mol\ \cdot\ m^{-2}\ \cdot\ s^{-1}$)	呼吸速率 Respiration rate R_d /($\mu mol\ \cdot\ m^{-2}\ \cdot\ s^{-1}$)
4	0.012	9.91	2.77
5	0.048	16.76	4.18
6	0.069	18.33	5.14
7	0.083	29.46	8.16
8	0.075	27.85	6.86
9	0.035	24.21	3.04
10	0.019	24.09	1.90
11	0.011	4.16	1.63

2.4 光合有效辐射与白天净生态系统交换的关系

在生长季,白天净生态系统碳交换主要受 PAR 调控。生长季各月 PAR 与对应的白天净生态系统碳交换(NEE_{day})关系显著(图4,表1)。光合作用随着 PAR 的增大而逐渐增强, NEE 负值也随之增大,随着生态系统对 CO_2 的吸收量增大的趋势,系统的碳汇能力也逐渐增大,白天最大光合速率(A_{max})和平均白天生态系统呼吸速率(R_d)均在 7 月最大,与光和有效辐射表现出相同的季节变化趋势(表1)。6—8 月的生态系统光合作用表观光量子效率 α 为 0.068 — 0.083,平均值为 0.075,该结果比 Ruimy^[44]报道的一般针叶林的 0.024 以及阔叶森林的 0.037 高,比 Havard 中纬度森林的 0.04^[45]、丹麦山毛榉森林的 0.06^[46] 以及华北平原冬小麦农田生态系统的 0.068 也高^[47]。由于城市中较高的气溶胶浓度削弱了地面接收的太阳辐射,减弱了植物的光合作用,但其散射辐射的比例很大,本研究结果与很多研究者认为的光合利用效率的强度在散射辐射条件中是直射辐射中的两倍,碳收支对散射辐射变化的敏感度高于对直射辐射变化的敏感度的结论相吻合^[48]。

3 结论

生态系统的碳循环已经成为全球研究的热点,而城市地区碳循环数据的缺乏则成为研究区域乃至全球碳循环的瓶颈^[49]。对城市公园绿地 CO_2 通量的长期连续观测,有助于分析城市绿地生态系统光合生产和呼

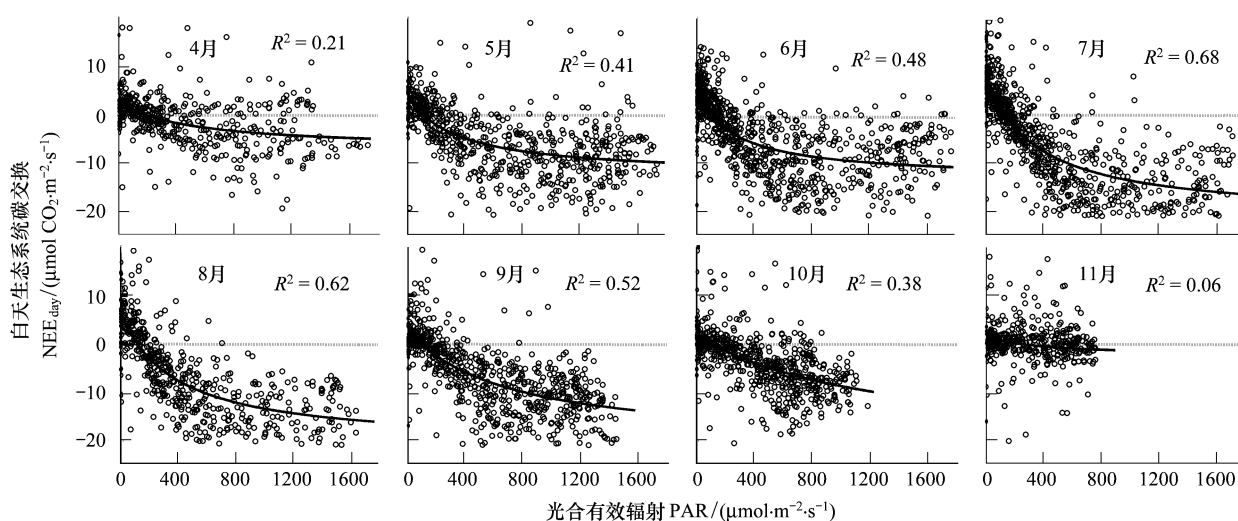


图4 2012年生长季各月运用直角双曲线模型(公式3)拟合的白天生态系统碳交换(NEE_{day})和光合有效辐射(PAR)的关系

Fig.4 Relationship between daytime NEE and photosynthetically active radiation (PAR) using rectangular hyperbolic model (Formula 3) for each month during the growing season in 2012

吸的动态变化,了解绿地的碳收支状况及其固碳能力。本文通过对奥林匹克森林公园绿地2011年12月2012年11月的通量观测数据进行处理与缺失值插补,并通过与同期空气温度、太阳辐射等气象数据的相关性分析,定量研究了奥林匹克森林公园绿地 CO_2 通量的季节变化以及影响因子,评价了绿地的固碳能力。

研究发现:(1)奥林匹克森林公园绿地年总生态系统生产(GEP)、生态系统呼吸(Re)、年生态系统净生产力(NEP)在2012年内具有明显的季节变化,植物生长季4月—11月份以吸收 CO_2 为主,非生长季以释放 CO_2 为主。(2) Re 随温度(T_a)呈指数增加,温度敏感系数(Q_{10})为2.5;GEP也随 T_a 的升高而增加;GEP与 Re 对温度的响应差异决定着NEP与 T_a 的关系:当 $T_a < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,NEP随 T_a 升高而下降;当 $T_a > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,NEP随 T_a 升高而增加。(3)在生长季各月,日总GEP随日光合有效辐射(PAR)的升高而增加,生态系统光合作用表观光量子效率(α)和平均最大光合速率(A_{max})也表现出明显的季节变化,最大值出现在7月,分别为 $0.083\text{ }\mu\text{mol } CO_2/\mu\text{mol PAR}$ 和 $29.46\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,最小值出现在11月,分别为 $0.017\text{ }\mu\text{mol } CO_2/\mu\text{mol PAR}$ 和 $4.16\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。(4)奥林匹克森林公园绿地全年GEP、 Re 、NEP的年总量分别为1192、1028、164 g C/m²。由于城市绿地生态系统在群落组成结构、气候条件和干扰历史等方面的差异,本研究结果在区域尺度的空间代表性有限。未来研究需要结合多个监测站点的数据,通过数据整合与模型参数化实现从生态系统水平到区域的扩展,从而实现未来气候变化情境下精确预测城市绿地对区域碳收支的贡献。

致谢:唐祥和王奔对涡度通量监测设备维护与运行、数据整理与分析提供帮助。

References:

- [1] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S, Ci L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 291 (5525): 2320-2322.
- [2] Tong X J, Zhang J S, Meng P, Huang H, Guo L, Yin C J, Cao J. Characteristics of net carbon exchange over a mixed plantation in a hilly area of the north China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(3): 37-43.
- [3] Li X, Sun R, Li Y, Wang X X, Xie G 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.
- [4] Millward A A, Sabir S. Benefits of a forested urban park: What is the value of Allan Gardens to the city of Toronto, Canada? *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(3): 177-188.
- [5] George K, Ziska L H, Bunce J A, Quebedeaux B. Elevated atmospheric CO_2 concentration and temperature across an urban-rural transect. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(35): 7654-7665.
- [6] Wen J S, Ge Y, Jiao L, Deng Z P, Peng C H, Chang J. Does urban land use decrease carbon sequestration? -A case study in Taizhou, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6): 651-660.

- [7] Green D M, Olesyszyn M. Enzyme activities and carbon dioxide flux in a Sonoran Desert urban ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 2002-2008.
- [8] Wang H X, Huang J G, Chen C H. The influences of urban aerosols on solar radiation and their reflection in urban boundary layer temperature variation. *Acta Meteorologica Sinica*, 1993, 51(4): 457-464.
- [9] Shi F S, Wu N, Wu Y, Wang Q. Effect of simulated temperature enhancement on growth and photosynthesis of *Deschampsia caespitosa* and *Thlaspi arvense* in Northwestern Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2009, 15(6): 750-755.
- [10] Shen W J, Wu J G, Grimm N B, Hope D. Effects of urbanization-induced environmental changes on ecosystem functioning in the Phoenix metropolitan region, USA. *Ecosystems*, 2008, 11(1): 138-155.
- [11] Zhao D H, Ouyang Y, Qi J G, Fan Y M, An S Q. Near-surface atmospheric properties along an urban center-suburban-urban forest gradient in summer in Nanjing City. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6654-6663.
- [12] Nowak D J, Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 381-389.
- [13] McHale M R, McPherson E G, Burke I C. The potential of urban tree plantings to be cost effective in carbon credit markets. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2007, 6(1): 49-60.
- [14] McHale M R, Burke I C, Lefsky M A, Peper P J, McPherson E G. Urban forest biomass estimates: is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees? *Urban Ecosystems*, 2009, 12(1): 95-113.
- [15] Escobedo F, Varela F, Zhao M, Wagner J E, Zipperer W. Analyzing the efficacy of subtropical urban forests in offsetting carbon emissions from cities. *Environmental Science and Policy*, 2010, 13(15): 362-372.
- [16] Yang J, McBride J, Zhou J J, Shen Z Y. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2005, 3(2): 65-78.
- [17] Stoffberg G H, van Rooyen M W, van der Linde M J, Groeneveld H T. Carbon sequestration estimates of indigenous street trees in the City of Tshwane South Africa. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2010, 9(1): 9-14.
- [18] 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.
- [19] Liu C F, Li X. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2011, 11(2): 121-128.
- [20] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 479-492.
- [21] Papale D, Reichstein M, Aubinet M, Canfora E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T, Yakir D. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 2006, 3(4): 571-583.
- [22] Wang X X, Zhu Q J, Chen S H, Liu X, Hu Y M. Remote sensing retrieval of water and heat fluxes over urban green space and experimental validation. *Areal Research and Development*, 2010, 29(3): 63-66.
- [23] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, 14(3): 512-526.
- [24] Nakai M, Kashiwazaki N, Takizawa A, Maedomari N, Ozawa M, Noguchi J, Kaneko H, Shino M, Kikuchi K. Morphologic changes in boar sperm nuclei with reduced disulfide bonds in electro stimulated porcine oocytes. *Reproduction*, 2006, 131(3): 603-611.
- [25] Fan S M, Wofsy S C, Bakwin P S, Jacob D J, Fitzjarrald D R. Atmosphere-biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the central Amazon forest. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(16): 851-864.
- [26] Moncrieff J B, Massheder J M, De Bruin H, Elberse J, Friborg T, Heusinkveld B, Kabat P, Scott S, Soegaard H, Verhoef A. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *Journal of Hydrology*, 1997, 188-189: 589-611.
- [27] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [28] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, Rannik Ü, Moncrieff J, Foken T, Kowalski A S, Martin P H, Berbigier P, Bernhofer C, Clement R, Elbers J, Granier A, Grünwald T, Morgenstern K, Pilegaard K, Rebmann C, Snijders W, Valentini R, Vesala T. Estimates of the annual net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 113-175.
- [29] Li C, He H L, Liu M, Su W, Fu Y L, Zhang L M, Wen X F, Yu G R. The design and application of CO₂ flux data processing system at ChinaFLUX. *Gen-Information Science*, 2008, 18(5): 557-565.
- [30] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 159-183.
- [31] Fange E, Baldocchi 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 exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [32] Zha T S, Xing Z S, Wang K Y, Kellomäki S, Barr A G. Total and component carbon fluxes of a scots pine ecosystem from chamber measurements and eddy covariance. *Annals of Botany*, 2007, 99(2): 345-353.
- [33] Moren A S, Lindroth A. CO₂ exchange at the floor of a boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101(1): 1-14.
- [34] Zha T S, Kellomäki S, Wang K Y, Rouvinen I. Carbon sequestration and ecosystem respiration for 4 years in a Scots pine forest. *Global Change Biology*, 2004, 10(9): 1492-1503.

- [35] Giardina C P, Harmon M E, Heath L S, Houghton R A, Jackson R B, Morrison J F, Murray B C, Pataki D E, Skog K E. A synthesis of current knowledge on forests and carbon storage in the United States. *Ecological Applications*, 2011, 21(6): 1902-1924.
- [36] Jo H K. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64(2): 115-126.
- [37] Schmid H P, Su H B, Vogel C S, Curtis P S. Ecosystem atmosphere exchange of carbon dioxide over a mixed hardwood forest in northern lower Michigan. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D14): 4417.
- [38] Barford C C, Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, Pyle E H, Urbanski S P, Huttyra L, Saleska S R, Fitzjarrald D, Moore K. Factors controlling long-and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 2001, 294(5547): 1688-1691.
- [39] Zhang J, Ge Y, Chang J, Jiang B, Jiang H, Peng C H, Zhu J R, Yuan W G, Qi L Z, Yu S Q. Carbon storage by ecological service forests in Zhejiang Province, subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 2007, 245(1/3): 64-75.
- [40] Jo H K, McPherson E G. Carbon Storage and Flux in Urban Residential Greenspace. *Journal of Environmental Management*, 1995, 45(2): 109-133.
- [41] Zheng Z M, Zhang M, Wen X F, Sun X M, Yu G R, Zhang L M, Han S J, Wu J B. Contributions of below-canopy CO₂ fluxes to ecosystem carbon budget of a temperate mixed forest in Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 1-8.
- [42] Goulden M L, Daube B C, Fan S M, Sutton D J, Bazzaz A, Munger J W, Wofsy S C. Gross CO₂ uptake by a black spruce forest. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 28987-28996.
- [43] Niu S L, Luo Q, Fei S F, Montagnani L, Bohrer G, Janssens I A, Gielen B, Rambal S, Moors E, Matteucci G. Seasonal hysteresis of net ecosystem exchange in response to temperature change: patterns and causes. *Global Change Biology*, 2011, 17(10): 3102-3114.
- [44] Ruim A, Jarvis P G, Baldocchi D D, Saugier B. CO₂ fluxes over plant canopies and solar radiation, A review. *Advances in Ecological Research*, 1996, 26: 1-68.
- [45] 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 CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 1993, 260(5112): 1314-1317.
- [46] Pilegaard K, Hummelsho J, Jensen N O, Chen Z. Two years of continuous CO₂ eddy-flux measurements over a Danish beech forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 29-41.
- [47] Wang J L, Wen X F, Sun X M, Wang Y Y. Asymmetry characteristic on the diurnal changes of CO₂ and H₂O fluxes at full heading time of winter-wheat in north China. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, 24(5): 159-163.
- [48] Gu L H, Baldocchi D, Verma S B, Black T A, Vesala T, Falge E M, Dowty P R. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D6): ACL 2-1-ACL 2-23.
- [49] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1014.

参考文献:

- [2] 同小娟, 张劲松, 孟平, 黄辉, 国琳, 尹昌君, 高峻. 华北低丘山地人工混交林净生态系统碳交换的变化特征. *林业科学*, 2010, 46(3): 37-43.
- [3] 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.
- [6] 温家石, 葛滢, 焦荔, 邓志平, 彭长辉, 常杰. 城市土地利用是否会降低区域碳吸收能力? —台州市案例研究. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 651-660.
- [8] 王海嘯, 黄建国, 陈长和. 城市气溶胶对太阳辐射的影响及其在边界层温度变化中的反映. *气象学报*, 1993, 51(4): 457-464.
- [9] 石福孙, 吴宁, 吴彦, 王乾. 模拟增温对川西北高寒草甸两种典型植物生长和光合特征的影响. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(6): 750-755.
- [11] 赵德华, 欧阳琰, 齐家国, 范亚民, 安树青. 夏季南京市中心-郊区-城市森林梯度上的近地层大气特征. *生态学报*, 2009, 29(12): 6654-6663.
- [22] 王修信, 朱启疆, 陈声海, 刘馨, 胡玉梅. 城市绿地水热通量的遥感反演与实验验证. *地域研究与开发*, 2010, 29(3): 63-66.
- [29] 李春, 何洪林, 刘敏, 苏文, 伏玉玲, 张雷明, 温学发, 于贵瑞. ChinaFLUX CO₂ 通量数据处理系统与应用. *地球信息科学*, 2008, 10(5): 557-565.
- [41] 郑泽梅, 张弥, 温学发, 孙晓敏, 于贵瑞, 张雷明, 韩士杰, 吴家兵. 长白山温带混交林林冠下层 CO₂ 通量对生态系统碳收支的贡献. *生态学报*, 2009, 29(1): 1-8.
- [47] 王建林, 温学发, 孙晓敏, 王玉英. 华北平原冬小麦生态系统齐穗期水碳通量日变化的非对称响应. *华北农学报*, 2009, 24(5): 159-163.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.20 Oct., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatial variability of small and medium scales' resource abundance of *Ommastrephes bartramii* in Northwest Pacific YANG Mingxia, CHEN Xinjun, FENG Yongjiu, et al (6427)
- The effect of moisture and temperature on soil C mineralization in wetland and steppe of the Zoige region, China WANG Dan, LV Yuliang, XU Li, et al (6436)
- Response and population bionomic strategies of desert rodent communities towards disturbance of cultivation YUAN Shuai, FU Heping, WU Xiaodong, et al (6444)
- Effects of Bt-cotton on *Propylea japonica*, an Enemy Insect of *Bemisia tabaci* (Gennadius) ZHOU Fucui, GU Aixiang, YANG Yizhong, et al (6455)
- Research progress in the ecological effects of micro-landform modification WEI Wei, YU Yun, JIA Fuyan, et al (6462)

Autecology & Fundamentals

- A multi-scale feeding habitat selection of Red-crowned crane during spring migration at the Shuangtaihekou Nature Reserve, Liaoning Province, China WU Qingming, ZOU Hongfei, JIN Hongyang, et al (6470)
- Surface pollen research of Nanshan region, Shihezi City in Xinjiang ZHANG Hui, ZHANG Yun, YANG Zhenjing, et al (6478)
- Dynamics of leaf carbon, nitrogen and phosphorus of two dominant species in a Poyang Lake wetland ZHENG Yanming, YAO Bo, WU Qin, et al (6488)
- Estimation of forest aboveground biomass using high spatial resolution remote sensing imagery HUANG Jinlong, JU Weimin, ZHENG Guang, et al (6497)
- Cost-benefits of the clonal integration of *Cynodon dactylon*, a stolon herbaceous plant, under heterogeneous lighting condition TAO Yingshi, HONG Shengchun, LIAO Yongmei, et al (6509)
- Biological cycling of *Koeleria paniculata* plantation microelements in Xiangtan Manganese Mine wasteland LUO Zhaohui, TIAN Dalun, TIAN Hongdeng, et al (6517)
- Effects of ectomycorrhizal fungi (*tinctorius* (Pers.) Coker & Couch) on the biomass of masson pine (*Pinus massoniana*) seedlings under simulated acid rain CHEN Zhan, WANG Lin, SHANG He (6526)
- Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield CHEN Xinxiang, HE Xusheng, GENG Zengchao, et al (6534)
- Source of variation of plant functional traits in the Yanhe river watershed: the influence of environment and phylogenetic background ZHANG Li, WEN Zhongming, MIAO Lianpeng (6543)
- The general biology and experimental population life table about *Asynacta ambrostomae* WANG Xiumei, ZANG Liansheng, LIN Baoqing, et al (6553)
- Effect of several ecological factors on embryonic development of *Sepia lycidas* PENG Ruibing, JIANG Xiamin, YU Shuguang, et al (6560)

Population, Community and Ecosystem

- The thinning regular of the the shrubbery at Tongguling National Nature Reserve on Hainan Island, China ZHOU Wei, LONG Cheng, YANG Xiaobo, et al (6569)
- The cause of grassland degradation in Golog Tibetan Autonomous Prefecture in the Three Rivers Headwaters Region of Qinghai Province ZHAO Zhiping, WU Xiaopu, LI Guo, et al (6577)
- Effects of simulated nitrogen deposition on substrate quality of litterfall in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China XIAO Yinlong, TU Lihua, HU Tingxing, et al (6587)
- Phytoplankton community structure based on pigment composition in Qinzhou bay during average water period LAN Wenlu, LI Mingmin, LI Tianshen (6595)
- Functional trait-based evaluation of plant fireproofing capability for subtropical evergreen broad-leaved woody plants LI Xiupeng, YANG Xiaodong, YU Shuquan, et al (6604)
- Interspecific associations between *Parus major* and other bird communities in Beijing Xishan region DONG Daying, FAN Zhongji, LI Zhaxijie, et al (6614)

- Feasibility analysis of passive integrated transponders in population ecology studies of Siberian chipmunk
..... YANG Hui, MA Jianzhang, RONG Ke (6634)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Dynamic variation of water deficit of winter wheat and its possible climatic factors in Northern China
..... LIU Qin, MEI Xurong, YAN Changrong, et al (6643)
- Study on the levels' evaluation of provincial low-carbon development in China based on the FAHP-TOPSIS method
..... HU Linlin, JIA Junsong, MAO Duanqian, et al (6652)
- An investigation of the safety threshold of a floodplain wetland: a case study of the Er-Ka Nature Reserve, China
..... HU Chunming, LIU Ping, ZHANG Litian, et al (6662)
- Application of le bissonnais method to study soil aggregate stability under different vegetaion on the loess plateau
..... LIU Lei, AN Shaoshan, Huang Huawei (6670)
- Analysis of vegetation and soil degradation characteristics under different human disturbance in lakeside wetland, Napahai
..... TANG Mingyan, YANG Yongxing (6681)

Resource and Industrial Ecology

- Changes of land surface temperature and its response to urbanization under the extreme high-temperature background in recent
ten years of Beijing LI Xiaomeng, SUN Yonghua, MENG Dan, et al (6694)
- Stable isotope (^{13}C and ^{15}N) analysis of fish food web of the Xiaojiang Bay in Three Gorges Reservoir
..... LI Bin, XU Dandan, WANG Zhijian, et al (6704)

Research Notes

- Dynamics of CO_2 exchange and its environmental controls in an urban green-land ecosystem in Beijing Olympic Forest Park
..... CHEN Wenjing, LI Chunyi, HE Guimei, et al (6712)
- Effects of vegetation restoration on landscape pattern of Hongya Country in recent 15 years
..... WANG Peng, LI Xianwei, ZHAO Anjiu, et al (6721)
- Photosynthetic characteristics and SAMS gene expression in the red alga *Porphyra yezoensis* Ueda under high salinity
..... ZHOU Xianghong, YI Lefei, XU Juntian, et al (6730)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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

本期责任副主编 宋金明

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 33 卷 第 20 期 (2013 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 20 (October, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.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

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元