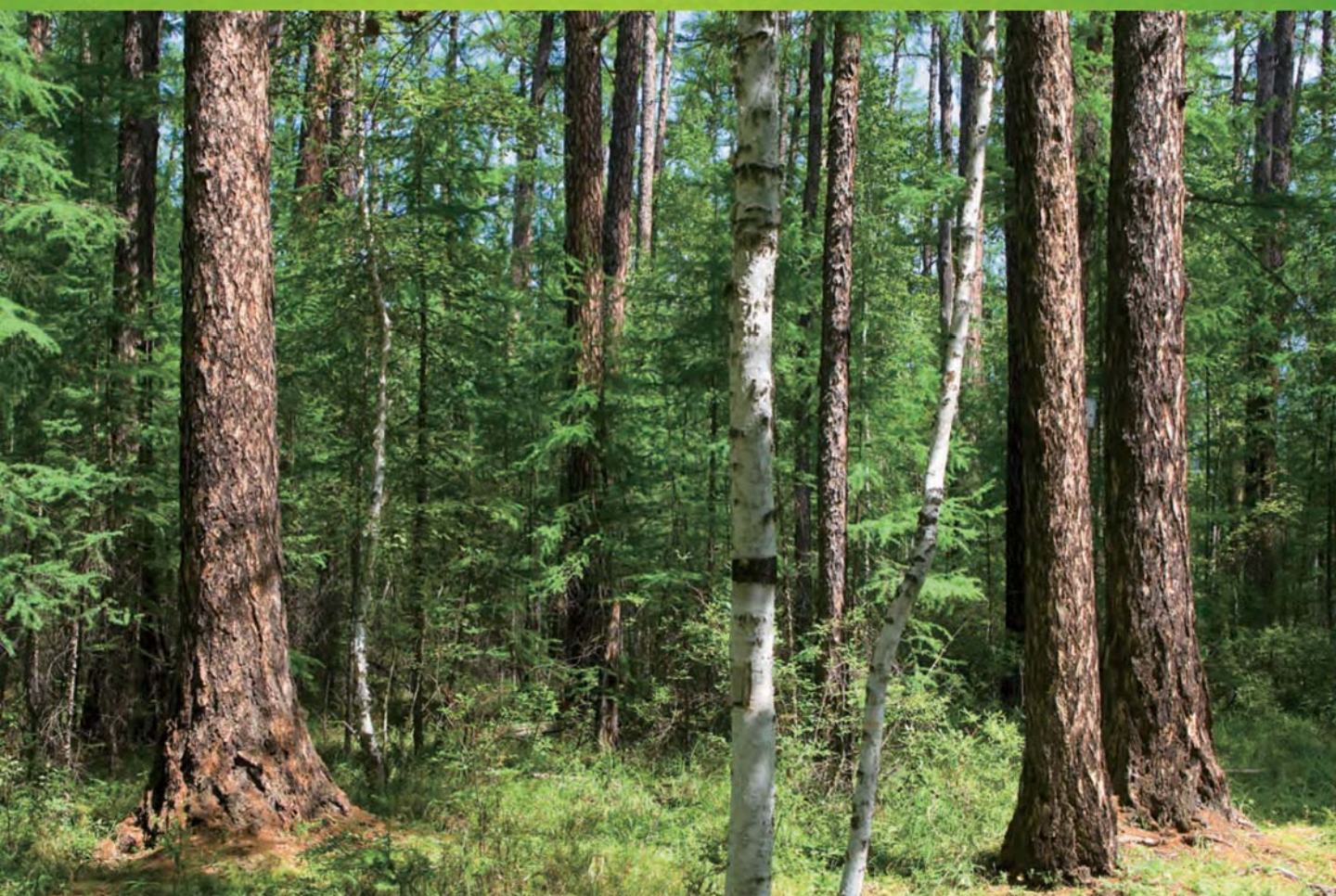


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第23期 Vol.33 No.23 **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 23 期 2013 年 12 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 基于树干液流技术的北京市刺槐冠层吸收臭氧特征研究..... 王 华, 欧阳志云, 任玉芬, 等 (7323)
- 三疣梭子蟹增殖过程对野生种群的遗传影响——以海州湾为例..... 董志国, 李晓英, 张庆起, 等 (7332)
- 土壤盐分对三角叶滨藜抗旱性能的影响..... 谭永芹, 柏新富, 侯玉平, 等 (7340)
- 南美斑潜蝇为害对黄瓜体内 4 种防御酶活性的影响..... 孙兴华, 周晓榕, 庞保平, 等 (7348)

个体与基础生态

- 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物养分输入量的早期影响..... 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 等 (7355)
- 茎瘤芥不同生长期植株营养特性及其与产量的关系..... 赵 欢, 李会合, 吕慧峰, 等 (7364)
- 雷竹覆盖物分解速率及其硅含量的变化..... 黄张婷, 张 艳, 宋照亮, 等 (7373)
- 渍水对油菜苗期生长及生理特性的影响..... 张树杰, 廖 星, 胡小加, 等 (7382)
- 广西扶绥黑叶猴的主要食源植物及其粗蛋白含量..... 李友邦, 丁 平, 黄乘明, 等 (7390)
- 氮素营养水平对膜下滴灌玉米穗位叶光合及氮代谢酶活性的影响..... 谷 岩, 胡文河, 徐百军, 等 (7399)
- PFOS 对斑马鱼胚胎及仔鱼的生态毒理效应 夏继刚, 牛翠娟, 孙麓垠 (7408)
- 浒苔干粉末提取物对东海原甲藻和中肋骨条藻的克生作用..... 韩秀荣, 高 嵩, 侯俊妮, 等 (7417)
- 基于柑橘木虱 CO I 基因的捕食性天敌捕食作用评估 孟 翔, 欧阳革成, Xia Yulu, 等 (7430)
- 健康和虫害的红松挥发物对赤松梢斑螟及其寄生蜂寄主选择行为的影响.....
..... 王 琪, 严善春, 严俊鑫, 等 (7437)

种群、群落和生态系统

- 小麦蚕豆间作对蚕豆根际微生物群落功能多样性的影响及其与蚕豆枯萎病发生的关系.....
..... 董 艳, 董 坤, 汤 利, 等 (7445)
- 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征..... 于 扬, 杜 虎, 宋同清, 等 (7455)
- 黄土高原人工苜蓿草地固碳效应评估..... 李文静, 王 振, 韩清芳, 等 (7467)

景观、区域和全球生态

- 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响..... 李轶冰, 逢焕成, 杨 雪, 等 (7478)
- 三峡库区典型农林流域景观格局对径流和泥沙输出的影响..... 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等 (7487)
- 基于 BP 神经网络与 ETM+ 遥感数据的盐城滨海自然湿地覆被分类..... 肖锦成, 欧维新, 符海月 (7496)
- 寒温带针叶林土壤 CH₄ 吸收对模拟大气氮沉降增加的初期响应..... 高文龙, 程淑兰, 方华军, 等 (7505)
- 寒温带针叶林土壤呼吸作用的时空特征..... 贾丙瑞, 周广胜, 蒋延玲, 等 (7516)

黄土高原小麦田土壤呼吸季节和年际变化..... 周小平,王效科,张红星,等 (7525)

不同排放源周边大气环境中 NH₃ 浓度动态..... 刘杰云,况福虹,唐傲寒,等 (7537)

施加秸秆和蚯蚓活动对麦田 N₂O 排放的影响 罗天相,胡 锋,李辉信 (7545)

资源与产业生态

基于水声学方法的天目湖鱼类资源捕捞与放流的生态监测..... 孙明波,谷孝鸿,曾庆飞,等 (7553)

应用支持向量机评价太湖富营养化状态..... 张成成,沈爱春,张晓晴,等 (7563)

研究简报

亚热带 4 种森林凋落物量及其动态特征 徐旺明,闫文德,李洁冰,等 (7570)

青蒿素对蔬菜种子发芽和幼苗生长的化感效应 白 祯,黄 玥,黄建国 (7576)

NO 参与 AM 真菌与烟草共生过程 王 玮,赵方贵,侯丽霞,等 (7583)

基于核密度估计的动物生境适宜度制图方法..... 张桂铭,朱阿兴,杨胜天,等 (7590)

施氮方式对转基因棉花 Bt 蛋白含量及产量的影响 马宗斌,刘桂珍,严根土,等 (7601)

学术信息与动态

未来地球——全球可持续性研究计划..... 刘源鑫,赵文武 (7610)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 292 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 33 * 2013-12



封面图说: 兴安落叶松林景观——中国的寒温带针叶林属于东西伯利亚森林向南的延伸部分,它是大兴安岭北部一带的地带性植被类型,一般可分为落叶针叶林和常绿针叶林两类。兴安落叶松林景观地下部分为棕色森林土,中上部为灰化棕色针叶林土,均呈酸性反应。随着全球气候持续变暖,寒温带针叶林生态系统潜在的巨大碳库将可能成为大气 CO₂ 的重要来源,研究表明,温度是寒温带针叶林生态系统土壤呼吸作用的主要调控因子,对温度的敏感性随纬度升高而增加,根系和凋落物与土壤呼吸作用表现出相似的空间变异性。

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/stxb201208261205

王华, 欧阳志云, 任玉芬, 张红星, 王效科, 郜世奇, 关云飞, 高付元. 基于树干液流技术的北京市刺槐冠层吸收臭氧特征研究. 生态学报, 2013, 33(23): 7323-7331.

Wang H, Ouyang Z Y, Ren Y F, Zhang H X, Wang X K, Hao S Q, Guan Y F, Gao F Y. Ozone uptake at the canopy level in *Robinia pseudoacacia* in Beijing based on sap flow measurements. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7323-7331.

基于树干液流技术的北京市刺槐冠层吸收臭氧特征研究

王 华^{1,2}, 欧阳志云^{1,*}, 任玉芬¹, 张红星¹, 王效科¹, 郜世奇³, 关云飞³, 高付元³

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093; 3. 北京教学植物园, 北京 100061)

摘要: 全球范围内加速的城市化导致空气质量严重退化。随着北京市建设范围不断扩大和机动车辆数量迅猛增长, 空气污染日益严重。浓度不断增加的近地层臭氧作为影响全球气候变化的重要因素和危害人类健康、动植物生长的二次污染物, 受到广泛关注。城市树木能够有效地去除大气污染物, 进而提高空气质量。目前已有许多研究关于区域尺度上城市树木吸收臭氧, 然而, 冠层尺度上城市树木吸收臭氧特征少有研究。因此, 基于树干液流技术, 结合天气变化和大气臭氧浓度分析, 研究夏秋季节北京市典型绿化树种刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 整树冠层吸收臭氧特征及环境影响因素。结果表明, 在日尺度上, 刺槐吸收臭氧速率变化呈单峰曲线, 于 15:00 左右达到峰值; 夏季峰值范围较宽, 秋季峰值范围较窄; 中午前后累积吸收臭氧量增加最明显。在季节尺度上, 夏季刺槐吸收臭氧速率高于秋季; 夏季累积吸收臭氧量显著增加, 秋季略有增加。刺槐吸收臭氧的时间变化规律取决于大气臭氧浓度和冠层对臭氧的导度。臭氧浓度日变化和季节变化明显, 导致刺槐吸收臭氧速率时间变化格局与之接近。在一定的臭氧浓度下, 刺槐吸收臭氧速率的变化主要由冠层对臭氧的导度调控, 进而受水汽压亏缺和总辐射的影响。随着水汽压亏缺降低, 刺槐冠层对臭氧的导度明显下降; 总辐射大于 600 W/m², 冠层对臭氧的导度迅速下降。研究树种刺槐单位冠层投影面积上年吸收臭氧量约为 0.16 g/m², 明显低于基于模型得到的结果, 表明评估森林受臭氧危害的风险应考虑树种冠层臭氧通量。

关键词: 城市树木; 液流; 吸收臭氧; 冠层导度

Ozone uptake at the canopy level in *Robinia pseudoacacia* in Beijing based on sap flow measurements

WANG Hua^{1,2}, OUYANG Zhiyun^{1,*}, REN Yufen¹, ZHANG Hongxing¹, WANG Xiaoke¹, HAO Shiqi³, GUAN Yunfei³, GAO Fuyuan³

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Institute of Forestry and Pomology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China

3 Beijing Teaching Botanical Garden, Beijing 100061, China

Abstract: The accelerating global urbanization caused severe air pollutions. In Beijing, the air pollution has been exacerbated due to the wide-spread construction activities and increasing number of vehicles. The increasing concentration of ozone (O₃) in the troposphere has been recognized as a source of air pollution, due to its adverse effects on human health and plant and animal growth, and its contribution to global climate change. O₃ is known to impact forest trees in many ways including morphological and histological injuries, decreasing photosynthesis, increasing respiration, and alteration of carbon

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41030744, 31170424); 城市与区域生态国家重点实验室科研专项资助项目 (SKLURE2008-1)

收稿日期: 2012-08-26; **修订日期:** 2013-02-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

allocation and water balance. Considerable researches have been conducted to investigate ozone uptake by urban forests at the regional scale. On the other hand, trees are able to improve urban air quality by taking up and removing gaseous pollutants, and the O_3 uptake by urban forests at the regional scale has been extensively studied. However, research on O_3 uptake by urban trees at the canopy scale is rare. The main objectives of this study are: (1) to quantify the whole-tree O_3 uptake by *Robinia pseudoacacia*, one of urban greening tree species in Beijing; and (2) to examine how O_3 flux in *R. pseudoacacia* trees is regulated by the stomata and environmental conditions. In this study, the whole-tree O_3 uptake in *R. pseudoacacia* trees during spring and summer was estimated based on sap flow measurements and the data of micro-climate and ambient O_3 concentration were also collected. The diurnal ozone uptake rate (F_{O_3}) by *R. pseudoacacia* showed a single peak pattern with the maximum rate occurring at around 15:00 pm. The diurnal F_{O_3} showed a narrow peak during summer and a wide peak during autumn. The most obvious increase in accumulated stomatal ozone flux (AFst) occurred around noon time. F_{O_3} showed a seasonal pattern with higher values found in summer than in autumn. The increase in AFst was most obvious in summer than in autumn. The diurnal and seasonal patterns of O_3 uptake were related to the temporal variations of ambient air O_3 concentrations and canopy conductance (G_{O_3}). Ambient air O_3 concentration showed a similar diurnal and seasonal pattern to F_{O_3} . Under a given ambient air O_3 concentrations, the whole-tree F_{O_3} was dependent on canopy conductance, and hereby was further influenced by the vapour pressure deficit (D) and total radiation (R_s). G_{O_3} decreased exponentially with increasing D . High D caused low G_{O_3} , and thus low F_{O_3} in spite of relatively high ambient air O_3 concentrations. On the contrary, G_{O_3} was high under low D conditions, and thus F_{O_3} was high in spite of relatively low ambient air O_3 concentrations. However, F_{O_3} was relatively low under very low D conditions, such as in early mornings, which may be attributed to the weak photosynthesis and small stomatal apertures in the early morning at this time. Moreover, G_{O_3} decreased rapidly with increasing R_s when R_s was higher than 600 W/m^2 . Similarly, ambient air O_3 concentration decreased with increasing R_s when R_s was higher than 800 W/m^2 . Therefore, F_{O_3} exhibited an asymmetric single-peak pattern: F_{O_3} slightly increased with increasing R_s when R_s was below 800 W/m^2 , however, it decreased rapidly with increasing R_s when R_s was higher than 800 W/m^2 . The annual O_3 uptake by *R. pseudoacacia* trees estimated in our study was 0.16 g/m^2 , which was much lower than the values estimated from the Urban Forest Effects Model. This difference suggests the necessity to consider the O_3 uptake flux on canopy level when evaluate the O_3 risks on urban trees.

Key Words: urban trees; sap flow; ozone uptake; canopy conductance

近地层臭氧(O_3)作为影响全球气候变化的重要因素和危害人类健康、动植物生长的二次污染物,受到广泛关注^[1-3]。随着城市化进程的推进,近地层臭氧浓度迅速增加^[4]。树木是城市生态系统的重要组成部分,可通过气孔途径和非气孔途径有效去除大气臭氧,在净化空气方面发挥着重要作用^[5]。其中,通过气孔途径吸收是林木去除臭氧的主要途径,并与臭氧引起林木伤害密切相关^[6]。因此,城市树木吸收臭氧方面的研究已成为目前植物生理生态学和城市生态学研究热点。然而,现有的大部分研究主要集中在天然林吸收臭氧的影响机制^[7-10],城市树木吸收臭氧的环境影响机制研究较少。

叶片尺度和生态系统尺度上森林去除臭氧的研究均有报道,但是冠层尺度上森林去除臭氧的研究很少。树干液流技术已经广泛应用于森林水分利用研究,由于水分蒸腾和吸收臭氧通过气孔行为耦合,故基于树干液流技术能够衡量森林冠层吸收臭氧量,这种方法考虑了边界层的影响,适用于异质性景观和山地景观^[8, 11]。因此,结合城市环境的异质化特征,本研究采用基于树干液流的方法衡量北京市典型绿化树种刺槐冠层吸收臭氧规律。

我国首都北京是世界上面积最大、历史最悠久的城市之一,是现代城市化的典型代表。由于大范围建设和机动车数量迅速增加,臭氧污染问题日趋严峻^[12]。改善空气质量一直是该城市面临的重大难题。本文以北京市典型绿化树种刺槐为研究对象,通过测定树干液流密度,结合环境因子监测,探索冠层尺度上刺槐吸收

臭氧特征及其与环境因子之间的关系。研究结果和方法可为明确环境如何影响树木吸收臭氧功能、空气质量提高、以及城市规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点和研究对象

研究地点位于北京市南二环的北京教学植物园(116°25′37″—116°25′50″ E, 39°52′20″—39°52′28″ N), 占地面积 116,500 m², 周边商业区和住宅区密集, 行人和机动车流量较大。该地区属于温带半湿润大陆性季风气候, 年均气温 11—12 ℃, 年均降水量约为 586 mm, 超过 70% 发生在 6—8 月。

研究对象为北京市典型绿化树种刺槐, 选择健康、生长环境一致的单株作为研究对象, 2009 年样树树形测定结果为: 平均胸径为 (38.43 ± 2.43) cm, 平均树高 (12.87 ± 0.20) m, 平均边材面积为 (129.12 ± 12.11) cm² (表 1)。

表 1 测定树干液流样树的树形特征

Table 1 Characteristics of the sampled trees for sap flow measurements

样树 Sampled trees	胸径 DBH /cm	高度 Height /m	冠层投影面积 A_c / m ²	边材面积 A_s / cm ²	传感器方位 Orientation of sensor	传感器数量和类型 Number and type of sensor
刺槐 1 号 <i>R. pseudoacacia</i> 1	41.55	12.90	78.00	144.82	东南西北	4TDP30
刺槐 2 号 <i>R. pseudoacacia</i> 2	40.10	13.20	85.81	137.25	东南西北	4TDP30
刺槐 3 号 <i>R. pseudoacacia</i> 3	33.65	12.50	51.95	105.30	东南西北	4TDP30

DBH: diameter at breast height, A_c : projected canopy area, A_s : sapwood area, TDP30: thermal dissipation probe at the length of 30 cm

1.2 树形测定

树冠垂直投影面积采用测定东西和南北冠幅, 结合椭圆面积计算公式确定。为避免伤害样树, 于北京教学植物园和北京林业大学鹫峰教学林场选取各个径级的 23 株树木, 采用生长锥钻取木芯, 再用直尺测定边材厚度, 建立边材面积与胸径之间的关系式, 进而反推测定样树边材面积 (图 1)。

1.3 树干液流密度测定

2009 年 7 月 1 日到 2009 年 10 月 31 日采用热消散传感器 (Dynamax, Houston, TX, USA) 连续测定单位边材面积上的瞬时树干液流密度 (J_s , g H₂O cm⁻² s⁻¹)。传感器的工作原理、安装、液流密度计算以及整树蒸腾计算方法参见文献^[13-14]。将传感器馈线与数据采集器 (CR1000 Dynamax, USA) 连接, 组成完整的树干液流测定系统, 每 10 min 进行平均并储存数据, 将笔记本电脑与数据采集器连接, 定期采集数据。

在树干液流密度点的测定值尺度推广到整树尺度的过程中, 忽视树干液流密度的轴向和径向变异, 将引起结果的误差^[15-16]。为明确树干液流密度的轴向变异, Herbst 等建议小树采用 1 个或者 2 个传感器, 大树采用 4 个传感器^[17], 因而, 在每株刺槐样树东南西北面各安装一个传感器。由于刺槐样树边材厚度为 2 cm 左右, 故树干液流密度径向变异不明显, 因而, 采用长度为 30 mm 的传感器。

1.4 环境因素监测

气象站位于北京教学植物园中较为开阔的一块空地上, 避免树木、建筑物和其它障碍物的影响, 同时距离研究对象近。空气温度湿度传感器 (HMP45C, Vaisala Inc., Helsinki, Finland), 风速风向传感器 (034B, Met

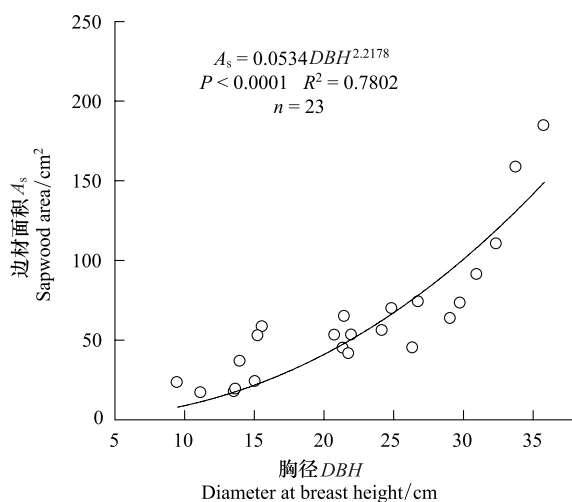


图 1 刺槐边材面积与胸径之间的关系

Fig.1 The relationship between sapwood area (A_s) and diameter at breast height (DBH) for *R. pseudoacacia*

One Instruments, Grants Pass, Oregon, USA)安装在高度为 10 m 的标准桅杆上。日照强度计(CMP-11, Kipp and Zonen, Delft, Netherlands)安装在高度为 1.5 m 的标准桅杆上测定太阳辐射。降雨由雨量计(TE525MM, Campbell Scientific Inc., Logan, UT)在地面以上 2 m 以下高度测定。土壤温度传感器(109, Campbell Scientific Inc., Logan, UT)埋设深度为 10、30、50 cm 和 80 cm。土壤含水量传感器(ECH₂O, Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA)埋设位于研究树木之间,深度为 30 cm。水汽压亏缺是由大气温度和空气相对湿度计算得到^[18]。上述气象和土壤参数监测与树干液流测定同步。

大气臭氧浓度采用 TEI Model 49i 气体分析仪(Thermo Environmental Instruments Inc., Franklin, MA, USA)监测。臭氧监测仪器距离研究对象近,每小时记录一个浓度值。

1.5 冠层导度计算

城市树木冠层开放,通风好,空气动力学粗糙,表明冠层表面与大气之间耦合度强^[19]。因此,研究树种刺槐的整树冠层导度(G_c , mmol H₂O · m⁻² · s⁻¹)计算公式如下^[20]:

$$G_c = (E_c \rho G_v T_a) / D \quad (1)$$

式中, E_c 是冠层蒸腾,将树干液流密度乘以边材面积再除以冠层投影面积得到^[13]; ρ 是水的密度(998 kg/m³); G_v 是水蒸气的通用气体常数(0.462 m³ kPa K⁻¹ kg⁻¹); T_a 是大气温度; D 是水汽压亏缺(kPa)。参考 Granier 等人的建议^[21],基于如下原则选择树干液流密度数据计算冠层导度:1)去除降雨或者降雨以后 2h 的数据,从而避免蒸散和树木蒸腾之间不一致;2)去除总辐射、水汽压亏缺、或者林段蒸腾非常低的数据(小于最大值的 5%),因为在这些条件下计算冠层导度的不确定性较大。

G_c 对水汽压亏缺(D)和总辐射(R_s)的响应规律通过边界线分析得到^[22-23],采用不同 D (步长 0.2 kPa)或者 R_s (步长 50 W/m²)等级下 3 株样树的最大冠层导度。采用如下公式描述 G_c 响应 D 变化^[19]:

$$G_c = -m \ln(D) + b \quad (2)$$

式中,参数 $-m$ 为回归方程斜率,量化了气孔导度响应 D 变化的敏感度;参数 b 为回归方程截距,为 $D=1$ kPa 的参比冠层导度。采用 Sigma-Plot 10.0 软件(Systat Software Inc., San Jose, California)的最小二乘回归确定 m 和 b 。上述 G_c 和 $\ln(D)$ 之间的关系式为各样树之间的比较提供了简便的基准。

1.6 整树冠层吸收臭氧速率计算

叶肉中臭氧浓度近乎为 0^[24],因此,可以根据如下通量公式计算冠层吸收臭氧速率:

$$F_{O_3} = [O_3] G_c 0.613 \quad (3)$$

式中, F_{O_3} 是单位冠层投影面积的冠层吸收臭氧速率,[O_3]是大气臭氧浓度, G_c 是冠层对水蒸气的导度,0.613 是转换系数,代表大气中臭氧和水蒸气扩散系数比^[7, 25]。

2 结果

2.1 刺槐吸收臭氧的日变化规律

夏季晴天天气条件下,大气臭氧浓度随着总辐射增大逐渐上升,于 15:00 左右达到峰值,之后开始下降;刺槐冠层对臭氧的导度上午达到峰值,之后迅速下降;刺槐吸收臭氧速率呈单峰曲线,于 15:00 左右达到最大值,峰值范围较窄,尽管上午冠层对臭氧的导度最高,但由于臭氧浓度很低,故上午刺槐吸收臭氧速率并没有达到最大值;刺槐吸收臭氧累积量不断增加,中午前后增加最明显,夜间随着臭氧浓度降低和气孔关闭,其吸收臭氧累积量变化不大(图 2)。

秋季晴天天气条件下,总辐射和水汽压亏缺明显减少,进而大气臭氧浓度也降低;刺槐冠层对臭氧的导度明显降低,且下午刺槐冠层对臭氧的导度响应水汽压亏缺下降而减少的幅度较小;刺槐吸收臭氧速率呈单峰曲线,峰值范围较宽;刺槐冠层吸收臭氧累积量明显减少,中午前后增加最明显,且从傍晚开始保持较为稳定的状态(图 2)。

2.2 刺槐吸收臭氧的季节变化规律

大气臭氧浓度、刺槐冠层对臭氧的导度、吸收臭氧速率日均值以及吸收臭氧累积量的季节变化规律如图

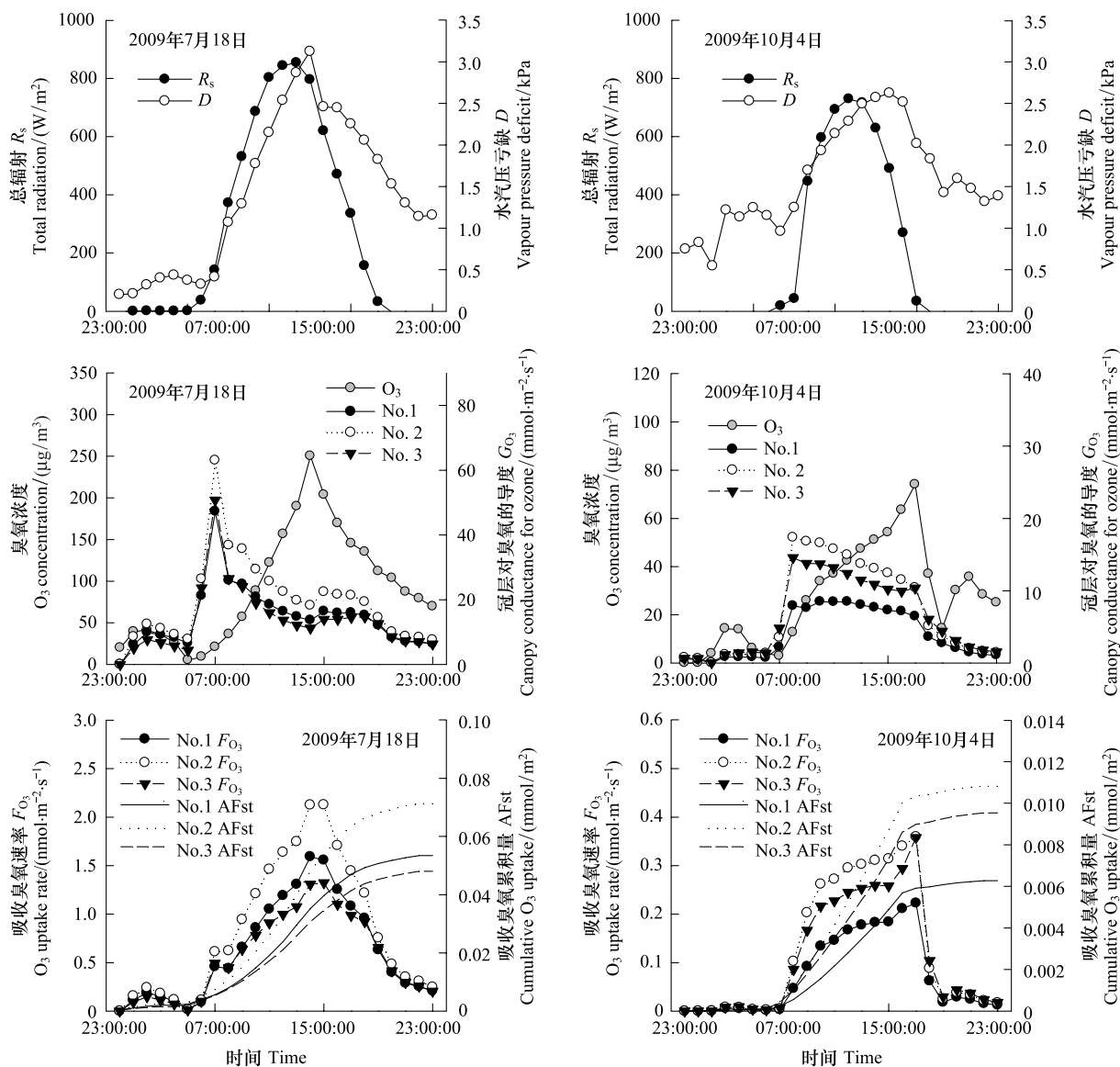


图2 夏(2009年7月18日)秋(2009年10月4日)季节晴天天气下总辐射(R_s)、水汽压亏缺(D)、大气臭氧浓度(O_3)、刺槐冠层对臭氧的导度(G_{O_3})、吸收臭氧速率的日变化(F_{O_3})以及吸收臭氧累积量(AFst)

Fig.2 Diurnal course of total radiation (R_s), vapour pressure deficit (D); ambient O_3 concentration (middle) and canopy conductance for ozone (G_{O_3}); canopy O_3 uptake rate (F_{O_3}) and cumulative O_3 uptake (AFst) in *R.pseudoacacia* on clear days in the summer (18th July 2009, left) and the autumn (4th October 2009, right)

3 所示。臭氧浓度日均值季节变化明显,夏季出现最大值 $146.4 \mu g/m^3$,秋季出现最小值 $1.5 \mu g/m^3$ 。夏秋季刺槐冠层对臭氧的导度和吸收臭氧速率日均值波动较大,阴雨天气条件下冠层对臭氧的导度和吸收臭氧速率较低,而晴天天气条件下冠层对臭氧的导度和吸收臭氧速率较高;然而,从总体趋势上看,刺槐冠层对臭氧的导度和吸收臭氧速率从夏季到秋季逐渐降低,可见,刺槐吸收臭氧速率的日变化与季节变化规律交叠。刺槐吸收臭氧累积量夏季显著增加,秋季略有增加。

2.3 总辐射和水汽压亏缺对刺槐吸收臭氧的影响

刺槐冠层吸收臭氧速率日变化规律与大气臭氧浓度日变化规律相似(图2)。在一定的臭氧浓度下,刺槐冠层吸收臭氧速率的变化主要由冠层对臭氧的导度调控,进而受水汽压亏缺和总辐射影响(图4)。3株刺槐样树冠层对臭氧的导度接近,且对水汽压亏缺和总辐射的响应方式相似(图4)。

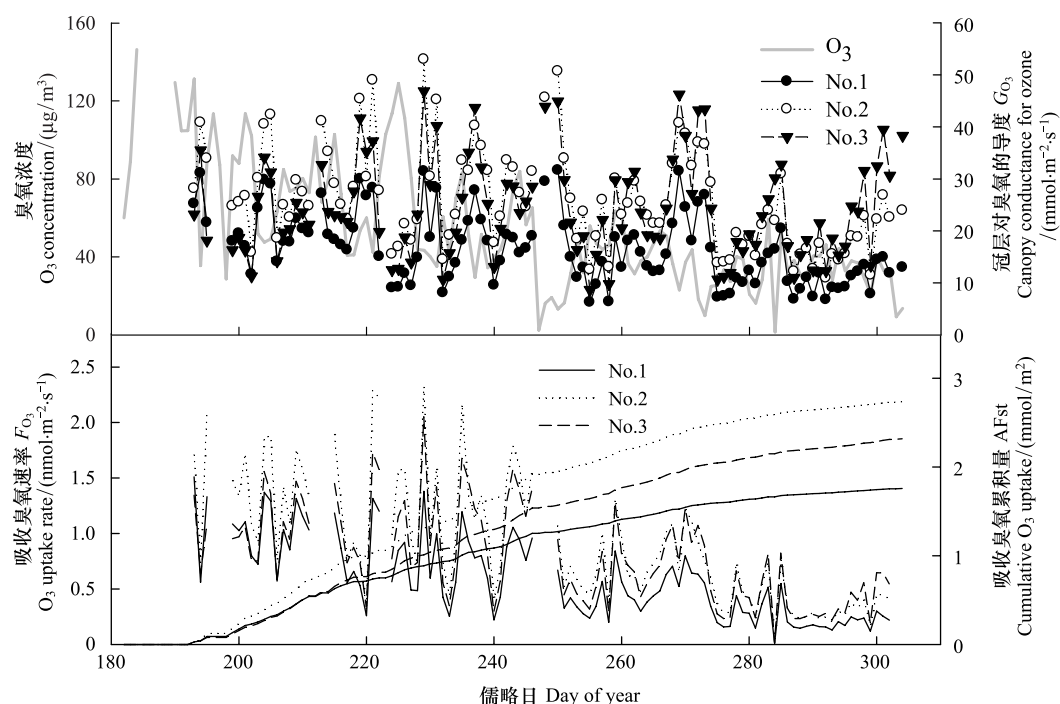


图3 2009年7月1日到2009年10月31日大气臭氧浓度(O_3)、刺槐冠层对臭氧的导度(G_{O_3})、吸收臭氧速率(F_{O_3})的日均值以及吸收臭氧累积量(AFst)的时间变化规律

Fig.3 Temporal changes of daily mean ambient ozone concentration (O_3), canopy conductance for ozone (G_{O_3}), canopy O_3 uptake rate (F_{O_3}), and accumulative O_3 uptake (AFst) of *R.pseudoacacia* trees from 1st July, 2009 to 31th October, 2009

水汽压亏缺较高的条件下,臭氧浓度较高,但刺槐冠层对臭氧的导度降低,进而导致冠层吸收臭氧速率降低;水汽压亏缺较低的条件下,刺槐冠层对臭氧的导度很高,故在臭氧浓度较低的条件下,冠层吸收臭氧速率较高;水汽压亏缺很小的条件下,刺槐冠层吸收臭氧速率略降,可能是由于早晨光合作用较弱,气孔开度较小(图4)。

随着总辐射上升,臭氧浓度增加,当总辐射大于 800 W/m^2 ,臭氧浓度显著降低。当总辐射小于 600 W/m^2 ,刺槐冠层对臭氧的导度变化很小;当总辐射大于 600 W/m^2 ,刺槐冠层对臭氧的导度迅速下降,这个时候气孔可能达到了光饱和。因此,受臭氧浓度和冠层对臭氧的导度的双重影响,刺槐冠层吸收臭氧速率呈不对称单峰格局;当总辐射小于 800 W/m^2 ,随总辐射增强,刺槐冠层吸收臭氧速率略有增加;当总辐射在 800 W/m^2 左右时,冠层吸收臭氧速率达到峰值,之后迅速下降(图4)。

3 讨论

3.1 刺槐整树冠层吸收臭氧特征

北京市典型绿化树种刺槐整树冠层吸收臭氧速率夏季高于秋季,与夏季大气温度、辐射、臭氧浓度等有关,这与高海拔地区成年挪威云杉(*Picea abies*)、瑞士五叶松(*Pinus cembra*)和欧洲落叶松(*Larix decidua*)吸收臭氧速率的季节变化规律一致^[8]。与上述研究不一致,加那利群岛松林吸收臭氧速率季节变化不大,可能是如下原因导致:首先,当空气和土壤干旱时,在浓雾对空气湿度的影响和松林根系能获取土壤深层水分的联合作用下,松林吸收臭氧速率降低不显著^[26, 27]。其次,由于地处低纬度和冷洋流中,该群岛气候季节变化不大。最后,群岛的经济长期以农业为主,大城市很少,故污染源少。

北京市典型绿化树种刺槐单位冠层投影面积上年吸收臭氧量约为 0.16 g/m^2 (例如,3株样树单位冠层投影面积上月均吸收臭氧量 $0.57 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1} \times 6 \text{ 个月} \times 48 \text{ g/mol} \div 1000 = 0.16 \text{ g/m}^2$),明显低于模型得到的结果^[5, 28]。采用城市森林影响模型,Nowak 和 Dwyer^[5]总结美国城市森林年均去除污染量为 9.3 g/m^2 ,变

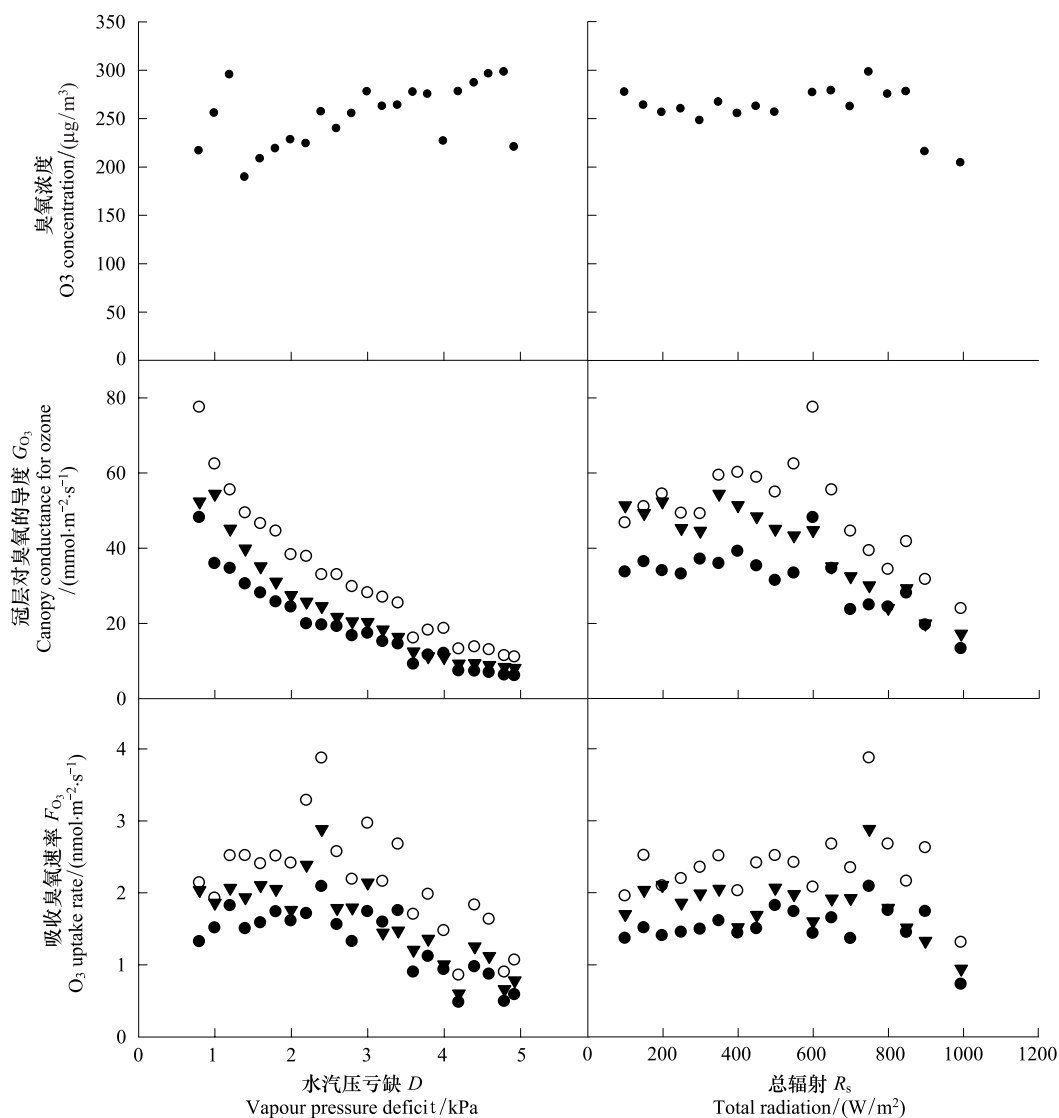


图4 2009年7月1日到2009年10月31日大气臭氧浓度(O_3)、刺槐冠层对臭氧的导度(G_{O_3})、吸收臭氧速率(F_{O_3})对水汽压亏缺(D)和总辐射(R_s)的响应规律

Fig.4 Means of ambient air ozone concentration (O_3), canopy conductance for ozone (G_{O_3}), and canopy O_3 uptake rate (F_{O_3}) in relation to vapour pressure deficit (D) and total radiation (R_s) from 1st July, 2009 to 31th October, 2009

图中符号表示在不同的 D 和 R_s 下 3 株样树冠层对臭氧导度最大值进行边界线分析的结果

化范围为 6.6—12.0 g/m², 臭氧占污染物比率为 31.8%, 因此其去除臭氧量约为 2.96 g/m² (例如, 9.3 g/m² × 31.8% = 2.96 g/m²)。采用同样的模型, 北京城市森林去除污染物量较高 (27.5 g/m²), 臭氧占污染物比率为 20%, 因此其去除臭氧量约为 5.50 g/m² [28]。野外观测数据得到的结果和模型方法得到结果区别较大, 可能是如下原因导致。首先, 基于树干液流的方法确定的是气孔吸收臭氧量, 而模型方法确定的是干沉降值, 包括气孔吸收量和树木非蒸腾表面吸附量。其次, 模型方法得到的结果为森林去除污染物量的粗略估计, 需要在如下几个方面调整参数以提高模型的准确度: 模型产生结果的不确定性分析; 测定树木个体去除污染物以改进模型的假设-树木处于相同层次; 准确模拟大气污染物浓度及其与地点、城市森林的面积和树种组成之间的关系 [28]。再次, 老树较低的水力导度限制其光合速率 [29], 研究对象刺槐树龄超过 100 a, 因而推断其气孔导度明显降低, 进而导致冠层吸收臭氧速率较低。最后, 近年来北京市空气质量逐渐改善, 大气臭氧浓度有所降低。两种方法得到结果的区别表明: 评估森林受臭氧危害的风险应考虑各树种冠层臭氧通量。

3.2 刺槐整树冠层吸收臭氧的环境调控

城市典型绿化树种刺槐整树冠层吸收臭氧特征受臭氧浓度和冠层导度的共同影响。本研究地点臭氧浓度季节变化显著,夏季较高,秋季较低。在一定程度上,这导致了研究树种刺槐冠层吸收臭氧速率的季节变化规律与臭氧浓度的变化规律相似(图3)。在一定的臭氧浓度下,气孔导度是整树吸收臭氧速率的关键限制因子,进而受微气候、树龄、海拔等因素影响^[7, 25]。与上述研究一致,刺槐整树冠层对臭氧的导度主要受水汽压亏缺和总辐射影响(图4)。低辐射条件下刺槐保持一定的吸收臭氧速率,可能由于夜间、凌晨或者阴雨天气条件下气孔保持部分开放。很多研究表明某些植物夜间气孔开放,保持一定速率的蒸腾^[30]。城市环境中较高的空气温度与较低的平均风速,可能诱导植物气孔增大开度。因此,城市环境下刺槐吸收臭氧速率可能高于自然环境下刺槐吸收臭氧速率。

3.3 冠层尺度上城市树木吸收臭氧研究方法

量化树木吸收臭氧的方法包括叶片水平上的气体交换法和冠层尺度上的涡度相关法、模型、基于树干液流的方法。气体交换法测定叶片吸收臭氧量,但是忽视了边界层的影响^[31]。涡度相关技术测定冠层臭氧沉降量,但是无法区分气孔吸收臭氧与树木表面吸附臭氧^[32]。模型则需要根据当地环境以及植被的特点对模型参数化^[33]。基于树干液流的方法考虑了边界层的影响,适用于异质性景观和山地景观^[7]。

由于城市环境突出的异质性特征,如何选择适合的方法研究城市树木吸收臭氧的一个难点。目前,城市林木吸收臭氧速率主要采用整合植被、气象和大气臭氧浓度信息的模型模拟的方法^[28]。此类研究能反映区域尺度上城市树木去除臭氧速率,但是不能反映树木直接吸收臭氧量,也无法进行种间比较。为解决上述问题,根据树木吸收臭氧和蒸腾作用通过气孔行为耦合,提出基于树干液流技术和大气臭氧浓度监测确定城市树木整树吸收臭氧速率方法,为衡量城市林木吸收臭氧及其它痕量气体,以及评价城市树木受臭氧危害的风险等提供了准确可行的方法。

致谢:野外试验获得北京城市生态系统研究站和北京市教学植物园的支持,中国科学院地理科学与资源研究所熊燕梅博士对本文写作给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Karnosky D F, Skelly J M, Percy K E, Chappelka A H. Perspectives regarding 50 years of research on effects of tropospheric ozone air pollution on US forests. *Environmental Pollution*, 2007, 147(3): 489-506.
- [2] Sitch S, Cox P M, Collins W J, Huntingford C. Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. *Nature*, 2007, 448(7155): 791-794.
- [3] Selin N E, Wu S, Nam K M, Reilly J M, Paltsev S, Prinn R G, Webster M D. Global health and economic impacts of future ozone pollution. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 044014.
- [4] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(21): 3431-3442.
- [5] Nowak D J, Dwyer J F. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystem // Kuser J E, ed. *Urban and Community Forestry in the Northeast*. New York: Springer Science and Business Media, 2007: 25-46.
- [6] Landolt W, Keller T. Uptake and effects of air pollutants on woody plants. *Experientia*, 1985, 41(3): 301-309.
- [7] Wieser G, Häslér R, Götz B, Koch W, Havranek W M. Role of climate, crown position, tree age and altitude in calculated ozone flux into needles of *Picea abies* and *Pinus cembra*: a synthesis. *Environmental Pollution*, 2000, 109(3): 415-422.
- [8] Wieser G, Matyssek R, Köstner B, Oberhuber W. Quantifying ozone uptake at the canopy level of spruce, pine and larch trees at the alpine timberline: an approach based on sap flow measurement. *Environmental Pollution*, 2003, 126(1): 5-8.
- [9] Nunn A J, Wieser G, Metzger U, Löw M, Wipfler P, Häberle K, Matyssek R. Exemplifying whole-plant ozone uptake in adult forest trees of contrasting species and site conditions. *Environmental Pollution*, 2007, 146(3): 629-639.
- [10] Braun S, Schindler C, Leuzinger S. Use of sap flow measurements to validate stomatal functions for mature beech (*Fagus sylvatica*) in view of ozone uptake calculations. *Environmental Pollution*, 2010, 158(9): 2954-2963.
- [11] Köstner B, Matyssek R, Heilmeyer H, Clausnitzer F, Nunn A J, Wieser G. Sap flow measurements as a basis for assessing trace-gas exchange of trees. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2008, 203(1): 14-33.

- [12] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(1): 1-42.
- [13] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.
- [14] Zhao P, Rao X Q, Ma L, Cai X A, Zeng X P. Application of Granier's sap flow system in water use of *Acacia mangium* forest. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2005, 13(6): 457-468.
- [15] Delzon S, Sartore M, Granier A, Loustau D. Radial profiles of sap flow with increasing tree size in maritime pine. *Tree Physiology*, 2004, 24(11): 1285-1293.
- [16] Lu P, Müller W J, Chacko E K. Spatial variations in xylem sap flux density in the trunk of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions. *Tree Physiology*, 2000, 20(10): 683-692.
- [17] Herbst M, Roberts J M, Rosier P T W, Taylor M E, Gowing D J. Edge effects and forest water use: a field study in a mixed deciduous woodland. *Forest Ecology and Management*, 2007, 250(3): 176-186.
- [18] Campbell G S, Norman J M. *An Introduction to Environmental Biophysics*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [19] Oren R, Sperry J S, Katul G G, Pataki D E, Ewers B E, Phillips N, Schäfer K V R. Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22(12): 1515-1526.
- [20] Köstner B M M, Schulze E D, Kelliher F M, Hollinger D Y, Byers J N, Hunt J E, McSeveny T M, Meserth R, Weir P L. Transpiration and canopy conductance in a pristine broad-leaved forest of *Nothofagus*: an analysis of xylem sap flow and eddy correlation measurements. *Oecologia*, 1992, 91(3): 350-359.
- [21] Granier A, Loustau D, Bréda N. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science*, 2000, 57(8): 755-765.
- [22] Jarvis P G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1976, 273(927): 593-610.
- [23] Dye P J, Olbrich B W. Estimating transpiration from 6-year-old *Eucalyptus grandis* trees: development of a canopy conductance model and comparison with independent sap flux measurements. *Plant, Cell and Environment*, 1993, 16(1): 45-53.
- [24] Laisk A, Kull O, Moldau H. Ozone concentration in leaf intercellular air spaces is close to zero. *Plant Physiology*, 1989, 90(3): 1163-1167.
- [25] Wieser G, Havranek W M. Environmental control of ozone uptake in *Larix decidua* Mill.: a comparison between different altitudes. *Tree Physiology*, 1995, 15(4): 253-258.
- [26] Luis V C, Jiménez M S, Morales D, Kucera J, Wieser G. Canopy transpiration of a Canary Islands pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135(1/4): 117-123.
- [27] Wieser G, Luis V C, Cuevas E. Quantification of ozone uptake at the stand level in a *Pinus canariensis* forest in Tenerife, Canary Islands: An approach based on sap flow measurements. *Environmental Pollution*, 2006, 140(3): 383-386.
- [28] Yang J, McBride J, Zhou J X, Sun Z Y. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2005, 3(2): 65-78.
- [29] Hubbard R M, Bond B J, Ryan M G. Evidence that hydraulic conductance limits photosynthesis in old *Pinus ponderosa* trees. *Tree Physiology*, 1999, 19(3): 165-172.
- [30] Daley M J, Phillips N G. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest. *Tree Physiology*, 2006, 26(4): 411-419.
- [31] Wieser G, Havranek W M. Ozone uptake in the sun and shade crown of spruce: quantifying the physiological effects of ozone exposure. *Trees*, 1993, 7(4): 227-232.
- [32] Zeller K F, Nikolov N T. Quantifying simultaneous fluxes of ozone, carbon dioxide and water vapor above a subalpine forest ecosystem. *Environmental Pollution*, 2000, 107(1): 1-20.
- [33] Wieser G, Emberson L D. Evaluation of the stomatal conductance formulation in the EMEP ozone deposition model for *Picea abies*. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(15): 2339-2348.

参考文献:

- [14] 赵平, 饶兴权, 马玲, 蔡锡安, 曾小平. Granier 树干液流测定系统在马占相思的水分利用研究中的应用. *热带亚热带植物学报*, 2005, 13(6): 457-468.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.23 Dec., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Ozone uptake at the canopy level in *Robinia pseudoacacia* in Beijing based on sap flow measurements WANG Hua, OUYANG Zhiyun, REN Yufen, et al (7323)
- Genetic impact of swimming crab *Portunus trituberculatus* farming on wild genetic resources in Haizhou Bay DONG Zhiguo, LI Xiaoying, ZHANG Qingqi, et al (7332)
- The effect of soil salinity to improve the drought tolerance of arrowleaf saltbush TAN Yongqin, BAI Xinfu, HOU Yuping, et al (7340)
- Effects of *Liriomyza huidobrensis* infestation on the activities of four defensive enzymes in the leaves of cucumber plants SUN Xinghua, ZHOU Xiaorong, PANG Baoping, et al (7348)

Autecology & Fundamentals

- Early effects of simulated nitrogen deposition on annual nutrient input from litterfall in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China XIAO Yinlong, TU Lihua, HU Tingxing, et al (7355)
- Relationship between nutrient characteristics and yields of tumorous stem mustard at different growth stage ZHAO Huan, LI Huihe, LÜ Huifeng, et al (7364)
- Decomposition rate and silicon dynamic of mulching residue under *Phyllostachys praecox* stands HUANG Zhangting, ZHANG Yan, SONG Zhaoliang, et al (7373)
- Effects of waterlogging on the growth and physiological properties of juvenile oilseed rape ZHANG Shujie, LIAO Xing, HU Xiaojia, et al (7382)
- The crude protein content of main food plants of François' langur (*Trachypithecus francoisi*) in Fusui, Guangxi, China LI Youbang, DING Ping, HUANG Chengming, et al (7390)
- Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics and enzyme activity of nitrogen metabolism in maize under-mulch-drip irrigation GU Yan, HU Wenhe, XU Baijun, et al (7399)
- Ecotoxicological effects of exposure to PFOS on embryo and larva of zabrafish *Danio rerio* XIA Jigang, NIU Cuijuan, SUN Luyin (7408)
- Allelopathic effects of extracts from *Ulva prolifera* powders on the growth of *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* HAN Xiurong, GAO Song, HOU Junni, et al (7417)
- Predation evaluation of *Diaphorina citri*'s (Homoptera: Chermidae) natural enemies using the CO I marker gene MENG Xiang, OUYANG Gecheng, XIA Yulu, et al (7430)
- Effect of volatiles from healthy or worm bored Korean pine on host selective behavior of *Dioryctria sylvestrella* and its parasitoid *Macrocentrus* sp. WANG Qi, YAN Shanchun, YAN Junxin, et al (7437)

Population, Community and Ecosystem

- Relationship between rhizosphere microbial community functional diversity and faba bean fusarium wilt occurrence in wheat and faba bean intercropping system DONG Yan, DONG Kun, TANG Li, et al (7445)
- Characteristics of soil fertility in different ecosystems in depressions between karst hills YU Yang, DU Hu, SONG Tongqing, et al (7455)
- Evaluation on carbon sequestration effects of artificial alfalfa pastures in the Loess Plateau area LI Wenjing, WANG Zhen, HAN Qingfang, et al (7467)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-huai-hai Region LI Yibing, PANG Huancheng, YANG Xue, et al (7478)

- Effects of landscape patterns on runoff and sediment export from typical agroforestry watersheds in the Three Gorges Reservoir area, China HUANG Zhilin, TIAN Yaowu, XIAO Wenfa, et al (7487)
- Land cover classification of Yancheng Coastal Natural Wetlands based on BP neural network and ETM+ remote sensing data XIAO Jincheng, OU Weixin, FU Haiyue (7496)
- Early responses of soil CH₄ uptake to increased atmospheric nitrogen deposition in a cold-temperate coniferous forest GAO Wenlong, CHENG Shulan, FANG Huajun, et al (7505)
- Temporal-spatial characteristics of soil respiration in Chinese boreal forest ecosystem JIA Bingrui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (7516)
- Seasonal and interannual variability in soil respiration in wheat field of the Loess Plateau, China ZHOU Xiaoping, WANG Xiaoke, ZHANG Hongxing, et al (7525)
- Dynamics of atmospheric ammonia concentrations near different emission sources LIU Jieyun, KUANG Fuhong, TANG Aohan, et al (7537)
- Influence of residues and earthworms application on N₂O emissions of winter wheat ... LUO Tianxiang, HU Feng, LI Huixin (7545)
- Resource and Industrial Ecology**
- Ecological monitoring of the fish resources catching and stocking in Lake Tianmu basing on the hydroacoustic method SUN Mingbo, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al (7553)
- Application of support vector machine to evaluate the eutrophication status of Taihu Lake ZHANG Chengcheng, SHEN Aichun, ZHANG Xiaoqing, et al (7563)
- Research Notes**
- Amount and dynamic characteristics of litterfall in four forest types in subtropical China XU Wangming, YAN Wende, LI Jiebing, et al (7570)
- Allelopathic effects of artemisinin on seed germination and seedling growth of vegetables BAI Zhen, HUANG Yue, HUANG Jianguo (7576)
- Nitric oxide participates symbiosis between am fungi and tobacco plants WANG Wei, ZHAO Fanggui, HOU Lixia, et al (7583)
- Mapping wildlife habitat suitability using kernel density estimation ZHANG Guiming, ZHU A'xing, YANG Shengtian, et al (7590)
- Effects of nitrogen fertilizer methods on the content of *Bacillus thuringiensis* insecticidal protein and yield of transgenic cotton MA Zongbin, LIU Guizhen, YAN Gentu, et al (7601)

《生态学报》2014 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,280 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 王德利

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 23 期 (2013 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 23 (December, 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

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元