

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

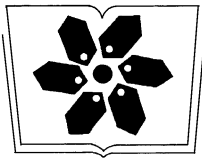
中国生态学会2011年学术年会专辑



第31卷 第19期 Vol.31 No.19 **2011**

中国生态学会
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 31 卷 第 19 期

2011 年 10 月 (半月刊)

目 次

卷首语	本刊编辑部 (I)
我国生态学研究及其对社会发展的贡献	李文华 (5421)
生态学的现任务——要在混乱和创新中前进	蒋有绪 (5429)
发展的生态观:弹性思维	彭少麟 (5433)
中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展	刘世荣,王 晖,栾军伟 (5437)
区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展	于贵瑞,方华军,伏玉玲,等 (5449)
流域尺度上的景观格局与河流水质关系研究进展	刘丽娟,李小玉,何兴元 (5460)
中国珍稀濒危孑遗植物珙桐种群的保护	陈 艳,苏智先 (5466)
水资源投入产出方法研究进展	肖 强,胡 聃,郭 振,等 (5475)
我国害鼠不育控制研究进展	刘汉武,王荣欣,张凤琴,等 (5484)
基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究	李辉霞,刘国华,傅伯杰 (5495)
毛乌素沙地克隆植物对风蚀坑的修复	叶学华,董 鸣 (5505)
近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征	王麒麟,范晓辉,王孟本 (5512)
森林资源可持续状况评价方法	崔国发,邢韶华,姬文元,等 (5524)
黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响——景观水平与多尺度比较	王计平,杨 磊,卫 伟,等 (5531)
未来 10 年黄土高原气候变化对农业和生态环境的影响	俄有浩,施 茜,马玉平,等 (5542)
山东近海生态资本价值评估——近海生物资源现存量价值	杜国英,陈 尚,夏 涛,等 (5553)
山东近海生态资本价值评估——供给服务价值	王 敏,陈 尚,夏 涛,等 (5561)
特大冰冻灾害后大明山常绿阔叶林结构及物种多样性动态	朱宏光,李燕群,温远光,等 (5571)
低磷和干旱胁迫对大豆植株干物质积累及磷效率的影响	乔振江,蔡昆争,骆世明 (5578)
中国环保模范城市生态效率评价	尹 科,王如松,姚 亮,等 (5588)
污染足迹及其在区域水污染压力评估中的应用——以太湖流域上游湖州市为例	焦雯珺,闵庆文,成升魁,等 (5599)
近二十年来上海不同城市空间尺度绿地的生态效益	凌焕然,王 伟,樊正球,等 (5607)
城市社区尺度的生态交通评价指标	戴 欣,周传斌,王如松,等 (5616)
城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变——以常州市为例	李 锋,叶亚平,宋博文,等 (5623)
中国居民消费隐含的碳排放量变化的驱动因素	姚 亮,刘晶茹,王如松 (5632)
煤矿固废资源化利用的生态效率与碳减排——以淮北市为例	张海涛,王如松,胡 聃,等 (5638)
城市遮阴环境变化对大叶黄杨光合过程的影响	于盈盈,胡 聃,郭二辉,等 (5646)
广东永汉传统农村的聚落生态观	姜雪婷,严力蛟,后德仟 (5654)
长江三峡库区昆虫丰富度的海拔梯度格局——气候、土地覆盖及采样效应的影响	刘 晔,沈泽昊 (5663)
东南太平洋智利竹筴鱼资源和渔场的时空变化	化成君,张 衡,樊 伟 (5676)
豚草入侵对中小型土壤动物群落结构特征的影响	谢俊芳,全国明,章家恩,等 (5682)

我国烟粉虱早春发生与秋季消退·····	陈春丽, 鄧军锐, 戈 峰, 等 (5691)
变叶海棠及其伴生植物峨眉小檗的水分利用策略 ·····	徐 庆, 王海英, 刘世荣 (5702)
杉木人工林不同深度土壤 CO ₂ 通量·····	王 超, 黄群斌, 杨智杰, 等 (5711)
不同浓度下四种除草剂对福寿螺和坑螺的生态毒理效应·····	赵 兰, 骆世明, 黎华寿, 等 (5720)
短期寒潮天气对福州市绿地土壤呼吸及组分的影响·····	李熙波, 曾文静, 李金全, 等 (5728)
黄土丘陵沟壑区景观格局对流域侵蚀产沙过程的影响——斑块类型水平·····	王计平, 杨 磊, 卫 伟, 等 (5739)
气候变化对物种分布影响模拟中的不确定性组分分割与制图——以油松为例·····	张 雷, 刘世荣, 孙鹏森, 等 (5749)
北亚热带马尾松年轮宽度与 NDVI 的关系 ·····	王瑞丽, 程瑞梅, 肖文发, 等 (5762)
物种组成对高寒草甸植被冠层降雨截留容量的影响·····	余开亮, 陈 宁, 余四胜, 等 (5771)
若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能 ·····	熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 等 (5780)
桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性·····	刘淑娟, 张 伟, 王克林, 等 (5789)
利用混合模型分析地域对国内马尾松生物量的影响 ·····	符利勇, 曾伟生, 唐守正 (5797)
火烧对黔中喀斯特山地马尾松林土壤理化性质的影响·····	张 喜, 朱 军, 崔迎春, 等 (5809)
不同培育时间侧柏种基盘苗根系生长和分布·····	杨喜田, 董娜琳, 闫东锋, 等 (5818)
Cd ²⁺ 与 CTAB 复合污染对枫香幼苗生长与生理生化特征的影响 ·····	章 芹, 薛建辉, 刘成刚 (5824)
3 种入侵植物叶片挥发物对早稻幼苗根的影响 ·····	张凤娟, 徐兴友, 郭艾英, 等 (5832)
米槠-木荷林优势种群的年龄结构及其更新策略 ·····	宋 坤, 孙 文, 达良俊 (5839)
褐菖鲉肝 CYP 1A 作为生物标志物监测厦门海域石油污染状况 ·····	张玉生, 郑榕辉, 陈清福 (5851)
基于输入-输出流分析的生态网络 φ 模式能流、 ρ 模式能流测度方法 ·····	李中才, 席旭东, 高 勤, 等 (5860)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 444 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 50 * 2011-10



封面图说: 胡杨是我国西北干旱沙漠地区原生的极其难得的高大乔木, 树高 15—30 米, 能忍受荒漠中的干旱环境, 对盐碱有极强的忍耐力。为适应干旱气候一树多态叶, 因此胡杨又称“异叶杨”。它对于稳定荒漠河流地带的生态平衡, 防风固沙, 调节绿洲气候和形成肥沃的森林土壤具有十分重要的作用。秋天的胡杨林一片金光灿烂。

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

李熙波, 曾文静, 李金全, 黄向华, 钟美芳, 杨玉盛. 短期寒潮天气对福州市绿地土壤呼吸及组分的影响. 生态学报, 2011, 31 (19): 5728-5738.

Li X B, Zeng W J, Li J Q, Huang X H, Zhong X F, Yang Y S. Effects of short-term cold-air outbreak on soil respiration and its components of subtropical urban green spaces. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (19): 5728-5738.

短期寒潮天气对福州市绿地土壤呼吸及组分的影响

李熙波^{1, 2}, 曾文静^{1, 2}, 李金全^{1, 2}, 黄向华^{1, 2}, 钟美芳^{1, 2}, 杨玉盛^{1, 2, *}

(1. 湿润亚热带山地生态省部共建国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要:城市生态系统土壤呼吸在区域乃至国家尺度上的碳预算与碳循环中都具有重要地位, 研究突发天气下城市生态系统土壤呼吸及其组分的变化对准确估算城市土壤碳排放具有重要意义。以亚热带城市草坪(沟叶结缕草, *Zoysia matrella*)和片林(南洋杉, *Araucaria heterophylla*)为研究对象, 于2011年2月10日至19日通过监测一次突发短期降温天气前后土壤呼吸及其组分(微生物呼吸和根系呼吸)的动态变化, 探讨了短期低温天气对城市生态系统土壤呼吸的影响。结果表明:在突发寒潮天气发生后, 片林和草坪的土壤温度均显著降低, 降温幅度最大分别达7.4℃和5.5℃, 二者的土壤呼吸均因降温而骤降, 降低比例分别高达79.4%和71.2%。但土壤呼吸及组分也随期间的降水事件而呈现出明显波动。整个观测期间片林土壤呼吸、微生物呼吸与根系呼吸的日均值分别2.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、0.76 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和1.78 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 而在草坪中三者分别为1.07 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、0.83 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和0.24 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。土壤温度是控制降温过程中城市绿地土壤呼吸及其组分的关键限制因子并与之呈指数正相关关系, 但由于冠层结构简单、耐寒性较低, 草坪对温度变化的响应更加敏感。在短期降温中草坪土壤呼吸、微生物呼吸与根系呼吸的 Q_{10} 值明显提高, 分别高达4.18、8.17和18.17。受降水与降温的共同影响, 草坪与片林各土壤呼吸类型同时受土壤温度、土壤含水量与降水量的控制, 由这3个因子构成的多元回归模型可以较好地拟合各呼吸类型的日均值变化($R^2 > 0.55$)。

关键词:寒潮; 土壤呼吸; 微生物呼吸; 根系呼吸; 城市片林; 城市草坪

Effects of short-term cold-air outbreak on soil respiration and its components of subtropical urban green spaces

LI Xibo^{1, 2}, ZENG Wenjing^{1, 2}, LI Jinqian^{1, 2}, HUANG Xianghua^{1, 2}, ZHONG Xianfang^{1, 2}, YANG Yusheng^{1, 2, *}

1 Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Soil respiration (R_s) from urban ecosystem plays a significant role in local and national carbon budget and cycling. Soil respiration under weather break as an important component of annual carbon balance, may have different mechanism responding to environment factors compared with that under normal weather condition. Therefore, quantifying soil respiration under weather break and determining its key environment factors are crucial for both understanding the belowground carbon balance and building carbon cycling model. However, little information about soil respiration under weather break among different ecosystems is available. Specifically, the data about soil respiration from urban ecosystem is scarce, although urban ecosystem had become a major settlement of human and previous studies have highlighted that urban ecosystem exhibited a high rate of soil respiration. In this study, soil respiration and its components in response to a weather break, cold-air outbreak, were investigated by LI-COR-8100-103 system in two typical urban green spaces, a woodland (*Araucaria heterophylla*) and a turfgrass (*Zoysia matrella*), in the Minjiang Riverside Park of Fuzhou City (26°03' N, 119°

基金项目:国家自然科学基金项目(31000321)

收稿日期:2011-06-19; **修订日期:**2011-07-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: geoyys@fjnu.edu.cn

15' E), Fujian Province, China, during the middle February in 2011. The two components of soil respiration, microbial (R_h) and root respiration (R_r), were partitioned by trench method. In both ecosystems, cold-air outbreak significantly decreased soil temperature, and inhibited R_s and its components. The degree of decrease of soil temperature in woodland and turfgrass were 7.4°C and 5.5°C, respectively. And soil respiration of woodland and turfgrass dropped by 79.4% and 71.2%, respectively. However, with the accompanying precipitation, these soil CO₂ fluxes also showed great fluctuation. In woodland, the daily mean value of R_s , R_h and R_r were 2.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 0.76 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and 1.78 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively, while those from turfgrass was 1.07 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 0.83 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and 0.24 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. The variations of these fluxes were driven by soil temperature and exhibited an exponential relationship with it. The changes of soil CO₂ fluxes in turfgrass were more sensitive to soil temperature, due to the relatively simple canopy structure and lower chilling-tolerance. The temperature sensitivity, namely the Q_{10} value, of R_s , R_h and R_r of turfgrass was all stimulated by cold-air outbreak, up to 4.18, 8.17 and 18.17, respectively. On the other hand, these soil CO₂ fluxes were also influenced by soil moisture and precipitation. In turfgrass, R_s , R_h and R_r all showed a negative linear relationship with soil moisture or precipitation ($R^2 \geq 0.45$, $P < 0.05$), while there was a quadratic function relationship between R_h and soil moisture in woodland. This difference may result from the relatively high soil moisture in turfgrass due to irrigation management before measurement. However, any factor alone could not predict these fluxes very well. Multiple regression equation containing soil temperature, soil moisture and precipitation was, however, more predictive for these fluxes than any single-factor equation, suggesting that these soil CO₂ fluxes were simultaneously affected these combined factors during this period. Our this work was a preparatory study of winter soil repartition research on urban ecosystem. For a better understanding of belowground carbon cycling and a comprehensive assessment of soil carbon budget of urban ecosystem, further research is needed of simultaneous measurement of gross canopy CO₂ uptake rate, as well as the different response of soil CO₂ fluxes to environment factors between weather break and normal weather should be taken into account in building carbon cycling model of urban ecosystems.

Key Words: cold-air outbreak; soil respiration; microbial respiration; root respiration; urban woodland; urban turfgrass

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环中的关键过程,其每年向大气释放的 CO₂ 高达 68—80 Pg,是全球化石燃料燃烧 CO₂ 释放量的 10 倍以上^[1-2],微小的变化也会对大气 CO₂ 浓度和全球碳过程产生巨大影响。因此,准确估算不同生态系统土壤呼吸并深入探讨控制机理对预测未来大气 CO₂ 浓度与气候变化都具有重要意义。然而,长期以来土壤呼吸的研究一直集中在森林、草地和农林生态系统中^[3-5],对城市植被的研究则少有关关注^[6],尽管当前城市已成为人类的主要居住区,城市人工植被面积不断扩张^[7],并有报道表明城市植被具有非常高的土壤呼吸速率,在区域乃至国家尺度上的碳平衡与碳循环中都具有重要地位^[6, 8-9]。深入研究城市植被土壤呼吸不仅有助于准确制定城市碳预算,也有助于评估城市碳循环对未来气候变化的响应与反馈。

当前,受气候变化的影响全球突发天气事件频发^[10],对植被^[11]、土壤^[12]以至于土壤呼吸都造成了显著影响^[13-14]。然而目前对土壤呼吸的研究的时间频率多数为每月 1 次或每月 2 次,然后利用各研究地所获得的经验模型来拟合土壤呼吸的季节动态或估算其年排放量^[9, 15],但这种观测频度难以捕捉到一些快速变化的突发天气事件中土壤呼吸的变化,在构建机理模型时也就难以反映这些短期的突发天气对土壤呼吸的影响,从而很可能高估或低估了土壤呼吸的年通量^[14]。所以,开展突发天气下土壤呼吸的高频观测,不仅有助于降低土壤呼吸估算中的不确定性,也有助于完整揭示土壤呼吸影响机制与构建碳循环模型。对此,本研究以福州市片林(南洋杉, *Araucaria heterophylla*)与草坪(沟叶结缕草, *Zoysia matrella*)为研究对象,针对冬季一次短期突发寒潮的天气过程,采用根系排除法和红外气体分析法观测土壤呼吸及其各组分的动态变化,以期阐明短期突发降温天气对城市生态系统土壤呼吸及其各组分的影响,揭示各呼吸通量主要调控因子,为深入认识城市生态系统地下碳过程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建省福州市江滨公园南园内,试验地自然概况、马尼拉草坪和南洋杉片林的人工管理措施、土壤性状等参见文献^[16-17]。与2007年相比^[17],2011年南洋杉样地的林分郁闭度明显增加(>0.9),林下草本基本消失,草本盖度仅为5%左右。

1.2 试验设置与观测方法

1.2.1 试验设置

本研究在毗邻分布的南洋杉与草坪样地内分别设置10 m×15 m样方与10 m×10 m样方各5个,进行土壤呼吸及根系呼吸观测。

1.2.2 土壤呼吸观测

土壤总呼吸速率(R_s)采用LI-8100土壤碳通量自动测量系统(Lincoln, USA)进行测定,每块样地随机布设3个土壤圈,布设方式同文献^[16]。在寒潮降温发生初期(2011年2月10日16:00时至12日16:00时), R_s 每2 h观测1次,连续48 h,每次观测采用两套经校正的LI-8100同步进行观测,以确保所有样点在2 h内全部观测完毕。随后,每日观测1次,时间为16:00时—18:00时。根据前期(2007—2008年)观测结果,片林与草坪土壤呼吸及其各组分日均值与7:00—9:00时的观测值和16:00—18:00时的观测值均没有显著差异,由于寒潮降温恰巧于2月10日16:00时发生,因此选取16:00—18:00时时段观测结果代替日均值进行数据分析。土壤呼吸日均值的观测直至降温结束并且于气温稳定后才停止(2月19日)。

在观测 R_s 的同时,以时域反射仪(TDR-300)测定0—12 cm土层的含水量;5 cm土壤温度则采用LI-8100自带温度探针测定。大气温度及降水量由试验地内便携式气象站(1.5 m)同步观测。

1.2.3 根系呼吸与微生物呼吸观测

采用壕沟法观测根系呼吸(R_r)^[18]。2010年8月在每块样方内随机设置3个小隔离样方,在小样方外挖壕沟并布设双层尼龙网隔离根系。其中,在片林内隔离样方大小为100 cm×50 cm,深度为60 cm(根系主要分布深度以下);草坪隔离小样方规格为50 cm×50 cm,深度为40 cm。在每个小隔离样方内中央安放一个土壤圈,方法同前,所观测的呼吸速率即为土壤微生物(R_h)呼吸。观测时间与土壤呼吸同步,即距隔离样方布设5个月后开始观测。 R_r 即为 R_s 与 R_h 之差。

1.3 数据处理

所有统计分析采用SPSS 13.0进行,显著性水平均为 $\alpha=0.05$ 。根据SPSS曲线估计结果,土壤呼吸及其组分与土壤温度的相关性使用指数函数拟合、与土壤含水量和降水量的相关性采用二次函数拟合或一次线性函数拟合。不同数据组之间的差异采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)进行。所有图形采用Origin 8.0软件绘制。

2 结果与分析

2.1 短期降温过程及环境因子的变化

2011年2月10日,福州市受强冷空气影响出现寒潮天气。根据自动气象站监测结果,在寒潮降温来临前尽管出现一定幅度的降温,但日平均气温基本在15℃以上,以晴天为主,并且未发生降水事件(图1)。从2011年2月10日16:00时起24 h内,气温由17.3℃骤降至7.3℃,降幅达10.0℃,并伴随有降水(图2a)。之后,气温仍缓慢降低直至2月12日清晨气温才开始稍有回升,但12日的最高气温(出现在14:00时)也仅

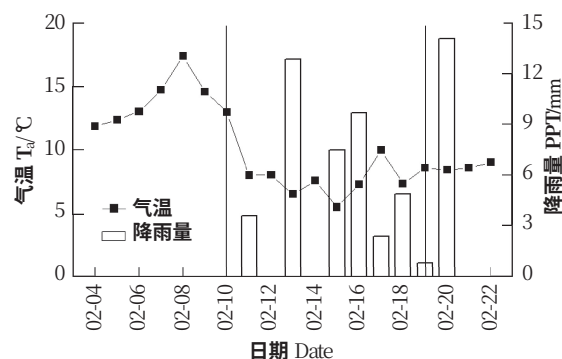


图1 2011年2月4日—22日江滨公园的气温和降雨量的变化

Fig. 1 Variations of air temperature (T_a) and precipitation (PPT) in Riverside Park during February 4—22, 2011

* 灰色竖线表示观测起止日期

为 12.2℃。受气温骤降的影响片林与草坪的土壤温度也迅速降低,整体变化趋势与气温基本一致,但草坪土温在整个降温过程中均高于片林,其在 2 月 12 日的回升过程也较片林明显(图 2b)。草坪和片林土壤含水量在 2 月 11 日夜间降水后略有升高,而草坪由于降雨前受人为浇水保养的影响土壤含水量至开始观测时就高达 30%,随后尽管由于有天然降水而停止人为浇水保养,但在整个观测过程中草坪土壤含水量也一直维持在 30% 左右(图 2c)。

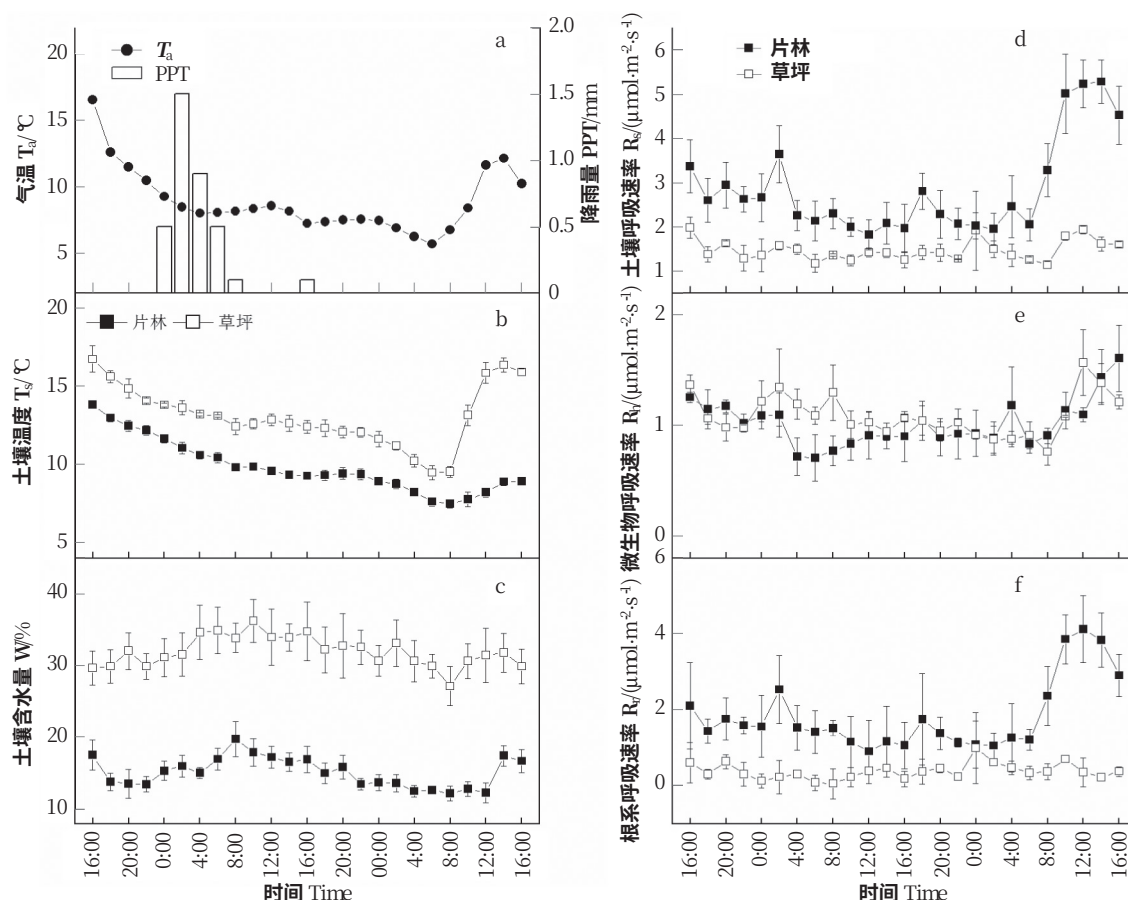


图2 寒潮来临最初的 48 h 内(2011 年 2 月 10 日 16:00 时—2 月 12 日 16:00 时)气温(T_a)、降水量(PPT)、土壤温度(T_s)、土壤含水量(W)、土壤呼吸(R_s)、微生物呼吸(R_h)、根系呼吸(R_r)的变化

Fig. 2 The variations of air temperature (T_a), precipitation (PPT), soil temperature (T_s), soil humidity (W), soil respiration (R_s), microbial respiration (R_h) and root respiration (R_r) in the first 48 hours of cold-air outbreak (from February 10, 16:00 时 to February 12, 16:00 时 in 2011)

在日尺度上,草坪土壤温度也高于片林,但都与气温的变化趋势相同,二者土温最低值均出现于 2 月 15 日,分别为 11.3℃ 和 6.5℃,与 2 月 10 日相比,草坪和片林土壤温度的降温幅度分别达 5.5℃ 和 7.4℃(图 3a)。之后随气温的回升而逐渐升高。草坪和片林土壤含水量受降水影响均的明显上升,特别是 2 月 13 日发生的 12.9 mm 的降水造成二者土壤含水量明显增加,分别比前一日的高出 47% 和 77% ($P < 0.01$),并且草坪含水量始终高于片林(图 3b)。在整个观测期内总降雨量为 55.2 mm。

2.2 降温最初 48 h 内土壤呼吸及其组分的动态

寒潮抵达的最初 48 h 内,草坪与片林 R_s 动态对短期降温天气的响应不同。草坪 R_s 在降温最初的 2 h 后便迅速降低,并稳定在 $1.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右波动,直到 12 日清晨才随温度回升逐渐略有升高(图 2d)。而片林 R_s 明显高于草坪,并且在降水以及后期回温过程的变化幅度较大,尤其是 12 日清晨随温度回升有明显的增加(图 2d)。在整个 48 h 的连续观测过程中,草坪 R_s 的变化幅度明显低于片林,二者的变化范围分别在

1.14—1.98 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 与 1.81—5.28 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间。

草坪与片林 R_h 之间在寒潮抵达最初的 48 h 内的动态曲线十分接近, 除少数几个时段外, 二者没有显著差异 ($P>0.05$), 二者的波动范围在 0.5—1.7 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间 (图 2e)。然而, 二者 R_t 的动态曲线却明显不同。草坪 R_t 在整个观测过程中均维持在 0.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 上下变化, 对期间的降水与 12 日的升温过程均没有明显的响应 (图 2f), 而片林 R_t 的动态曲线与其 R_s 的趋势基本一致, 也呈现出较大波动 (图 2f)。

2.3 降温前后土壤呼吸及其组分的日均值动态

受降温与降水的影响, 草坪与片林 R_s 日均值均呈现出明显的动态规律, 表现为 2 月 10 日寒潮抵临时, R_s 迅速降低 (图 3a, 图 3d), 在 11 日与 13 日的降水的当日受到明显抑制, 但却在次日急增, 甚至掩盖了同期降温的影响 (图 3b, 图 3d)。然而, 后续接连发生的几次降水却使 R_s 受到抑制, 尽管此时温度已逐步回升, 但影响有限。整个观测过程中, 草坪和片林 R_s 日均值分别为 1.07 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 2.54 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。其中, 草坪 R_s 最大值 (1.98 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 出现在寒潮来临前 (2 月 10 日), 最小值 (0.61 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 出现在土温较低的 16 日; 而片林 R_s 的峰值 (5.01 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 出现在 2 月 14 日, 即 13 日 12.9 mm 降水后的第二天, 而最低值 (1.03 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 出现在 13 日当天 (图 3b, 图 3d), 尽管此时土壤温度仍逐渐降低 (图 3a)。整个降温过程中, 草坪与片林土壤呼吸降低比例 ($= (\text{最大值}-\text{最小值})/\text{最大值}$) 均超过 70%, 分别达 71.2% 和 79.4%。

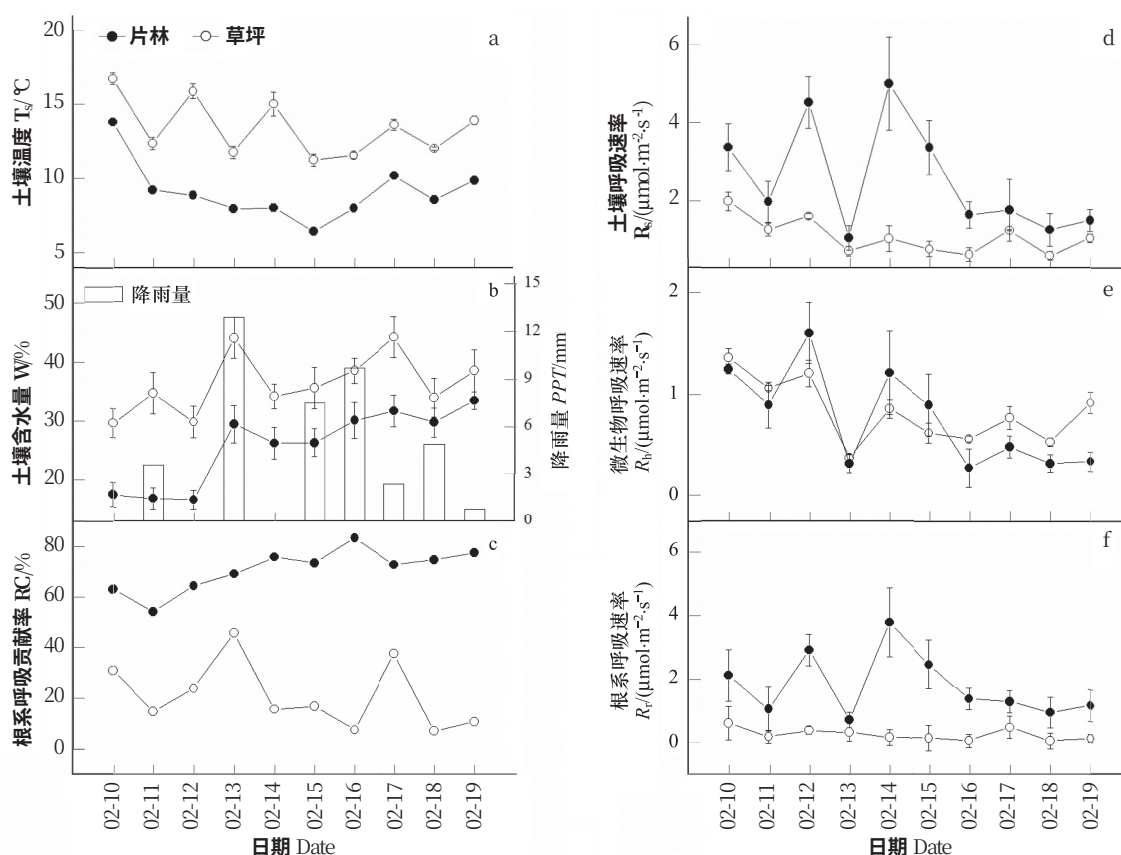


图3 寒潮抵临后 10 d 内 (2011 年 2 月 10 日—2 月 19 日) 日降水量 (PPT) 与气温 (T_a)、空气湿度 (RH)、土壤温度 (T_s)、土壤含水量 (W)、土壤呼吸 (R_s)、异养呼吸 (R_h)、根系呼吸 (R_t) 日均值的变化

Fig. 3 The variations of daily precipitation (PPT), air temperature (T_a), air humidity (RH), soil temperature (T_s), soil humidity (W), soil respiration (R_s), microbial respiration (R_h) and root respiration (R_t) in the first 10 d after cold-air outbreak arriving (from February 10 to February 12, in 2011)

草坪与片林 R_h 日均值动态均与土壤呼吸的相似, 并且在降温期间 (16 日前) 二者日均值之间没有明显差

异($P>0.05$),但在后期回温过程中(15 日后)草坪 R_h 显著高于片林($P<0.05$) (图 3e)。与 R_h 的动态特征相比,草坪与片林 R_t 日均值的变化规律明显不同。片林 R_t 日均值的动态与 R_s 的变化大致相同,变化范围在 $0.71\text{—}3.79\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,而草坪 R_t 一直维持在较低水平,在 $0.04\text{—}0.61\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间波动,除 11 日与 13 日外,均显著低于片林 R_t ($P<0.05$) (图 3f)。此外值得注意的是,在整个观测过程中片林根系呼吸对土壤总呼吸的贡献率(RC)均高于 50%,并呈逐渐上升趋势与土壤含水量的逐步升高基本一致,而草坪 RC 明显低于片林,并且未呈现出明显的变化规律(图 3b、图 3c)。

2.4 土壤呼吸及其组分与各环境因子之间的关系

在降温初期的 48 h 内,除草坪 R_t ,草坪与片林其余各土壤呼吸项目与土壤温度均呈指数正相关关系($P<0.05$),但在日尺度上,仅草坪土壤呼吸及其各个组分均与土壤温度呈指数正相关($P<0.05$) (表 1)。根据这些土壤温度的指数模型可求得各呼吸类型的温度敏感性(Q_{10}),结果表明,在小时尺度上片林与草坪各呼吸速率的 Q_{10} 值在 1.5—2.3 之间,其中片林 R_t 的 Q_{10} 值最高。在日尺度上,草坪各呼吸速率 Q_{10} 值明显上升,其中 R_t 的 Q_{10} 值甚至高达 18.17。然而整体上,不论是在小时还是在日尺度,土壤温度对各呼吸速率的解释程度均不高,在各指数模型中 R^2 最高也仅为 0.67,表明还很存在其它的影响因素。

表 1 土壤呼吸(R_s)、微生物呼吸(R_h)以及根系呼吸(R_t)与土壤温度(T_s)的关系

时间尺度 Time scale	绿地类型 Green land type	土壤呼吸类型 Soil respiration type	回归方程 Regression model	温度敏感性 Q_{10}	决定系数 R^2	概率 P	样本数 n
小时尺度 Hour scale	草坪 Lawn	R_s	$R_s = 0.838 \times e^{0.041 \times T_s}$	1.51	0.26	<0.01	25
		R_h	$R_h = 0.455 \times e^{0.066 \times T_s}$	1.93	0.56	<0.01	25
		R_t	$R_t = 0.800 \times e^{0.082 \times T_s}$	2.27	0.21	<0.05	25
	片林 Woodland	R_s	$R_s = 1.451 \times e^{0.069 \times T_s}$	1.99	0.25	<0.01	25
		R_h	$R_h = 0.654 \times e^{0.048 \times T_s}$	1.61	0.33	<0.01	25
日尺度 Day scale	草坪 Lawn	R_s	$R_s = 0.132 \times e^{0.143 \times T_s}$	4.18	0.61	<0.01	10
		R_h	$R_h = 0.050 \times e^{0.210 \times T_s}$	8.17	0.67	<0.01	10
		R_t	$R_t = 0.004 \times e^{0.290 \times T_s}$	18.17	0.38	<0.05	10

进一步对土壤含水量与土壤呼吸及其组分进行回归分析发现,在日尺度上,草坪 R_s 与土壤含水量呈现为线性负相关关系($P<0.05$),而片林 R_h 在日尺度上与含水量却呈现出二次函数关系($P<0.05$)。此外,在日尺度上,草坪 R_s 和 R_h 还与降水量具有显著线性负相关关系($P<0.05$)。

多因素回归分析表明,由土壤温度、土壤含水量与降水量构成的多因素模型除了在小时尺度上无法拟合草坪 R_t 外($P>0.05$),对于其余各土壤呼吸类型均可通过 $P<0.05$ 的显著性检验(表 3),并且拟合效果均高于单因素模型(表 1,表 2,表 3),说明在此次短期降温天气过程中草坪与片林各土壤呼吸类型同时受土壤温度、土壤含水量与降水量的共同控制。

表 2 土壤呼吸(R_s)、微生物呼吸(R_h)以及根系呼吸(R_t)与土壤含水量(W)和降水量(PPT)的关系

时间尺度 Time scale	绿地类型 Green land type	土壤呼吸类型 Soil respiration type	回归方程 Regression model	决定系数 R^2	概率 P	样本数 n
日尺度 Day scale	草坪 Lawn	R_s	$R_s = 2.652 - 0.046 \times W$	0.46	<0.05	10
		R_h	$R_h = 1.174 - 0.052 \times PPT$	0.45	<0.05	10
		R_t	$R_t = 1.274 - 0.078 \times PPT$	0.56	<0.05	10
	森林 Woodland	R_h	$R_h = 0.802 - 0.072 \times W - 0.003 \times W^2$	0.69	<0.05	10

表 3 土壤呼吸(R_s)、微生物呼吸(R_h)以及根系呼吸(R_r)与土壤含水量(T_s)、土壤含水量(W)和降水量(PPT)的多元逐步回归结果

Table 3 Stepwise regression of soil respiration (R_s), microbial respiration(R_h) and root respiration(R_r) against soil temperature (T_s), soil moisture (W) and precipitation (PPT)

时间尺度 Time scale	绿地类型 Green land type	土壤呼吸类型 Soil respiration type	回归方程 Regression model	决定系数 R^2	概率 P	样本数 n
小时尺度 Hour scale	草坪 Lawn	$\ln R_s$	$\ln R_s = 0.305 + 0.041 \times T_s - 0.015 \times W - 0.024 \times PPT$	0.31	<0.05	25
		$\ln R_h$	$\ln R_h = -1.038 + 0.064 \times T_s - 0.008 \times W - 0.14 \times PPT$	0.69	<0.01	25
		$\ln R_s$	$\ln R_s = 0.952 + 0.079 \times T_s - 0.046 \times W + 0.136 \times PPT$	0.34	<0.05	25
		$\ln R_h$	$\ln R_h = -0.131 + 0.051 \times T_s - 0.021 \times W - 0.049 \times PPT$	0.39	<0.05	25
		$\ln R_r$	$\ln R_r = 0.458 + 0.095 \times T_s - 0.055 \times W - 0.25 \times PPT$	0.30	<0.05	25
日尺度 Day scale	草坪 Lawn	$\ln R_s$	$\ln R_s = 3.722 - 0.168 \times T_s - 0.041 \times W - 0.085 \times PPT$	0.71	<0.05	10
		$\ln R_h$	$\ln R_h = 2.831 - 0.114 \times T_s - 0.075 \times W - 0.076 \times PPT$	0.84	<0.01	10
		$\ln R_r$	$\ln R_r = 3.137 - 0.194 \times T_s - 0.022 \times W - 0.093 \times PPT$	0.62	<0.05	10
	片林 Woodland	$\ln R_s$	$\ln R_s = -0.839 - 0.107 \times T_s - 0.019 \times W - 0.004 \times PPT$	0.67	<0.05	10
		$\ln R_h$	$\ln R_h = -1.434 + 0.098 \times T_s - 0.006 \times W - 0.063 \times PPT$	0.77	<0.05	10
		$\ln R_r$	$\ln R_r = -12.087 + 0.558 \times T_s - 0.068 \times W - 0.087 \times PPT$	0.58	<0.05	10

3 讨论

3.1 冬季短期降温期间土壤呼吸及其组分的碳排放

在冬季,由于植物生理活动因低温影响受到很大限制,一般认为此时土壤呼吸通常主要由微生物呼吸构成^[18-19]。然而在本研究中,整个观测期内片林土壤呼吸的日平均速率为 $2.54 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其中根系呼吸占比高达 71%,速率达 $1.78 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,高于相同气候带下人工林与天然林的冬季观测结果,也比热带季雨林和橡胶林的冬季根系呼吸速率高(表 4)。这种差异主要是由于公园绿地在观测期内水分条件较好。以三明格氏栲保护区的研究为例,观测期冬季月平均降水量不足 100 mm,其中 2 月份降水量甚至低于 50 mm,从而可能对植物产生干旱胁迫^[18]。然而在本研究中,在短短 10 d 内降水量就超过 50 mm,虽然 2 月 15 日后持续的降水造成片林土壤呼吸及其组分速率的降低,但前期水分条件的改善明显造成片林土壤呼吸及其组分激增(图 3)。

表 4 不同生态系统冬季土壤呼吸及其组分的比较

Table 4 Comparison of soil respiration and its components of different ecosystem

生态系统 Type of ecosystems	气温 T_a /°C	土壤呼吸 R_s /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	微生物呼吸 R_h /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	根系呼吸 R_r /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	参考文献 Reference
亚热带格氏栲天然林 Subtropical native <i>Castanopsis kawakamii</i> forest	5—15	2.44	1.44	1.00	[18]
亚热带格氏栲人工林 Subtropical <i>Castanopsis kawakamii</i> plantation	5—15	0.93	0.60	0.33	[18]
亚热带杉木人工林 Subtropical Chinese fir plantation	5—15	0.92	0.81	0.11	[18]
亚热带水杉人工林 Subtropical water fir plantation	0—5	1.14	1.10	0.06	[19]
亚热带杨树林 Subtropical poplar plantation	0—5	1.28	1.05	0.15	[19]
热带季雨林 Tropical rain forest	14—16	0.89	0.51	0.16	[20]
热带橡胶林 Tropical rubber forest	14—16	1.41	0.40	0.48	[20]
城市片林 Urban woodland	5—10	2.54	0.76	1.78	本研究
城市草坪 Urban turfgrass	5—10	1.07	0.83	0.24	本研究

有关天然草地与森林的对比研究表明,草地的土壤呼吸速率要比毗邻的森林高^[21-23]。Raich 和

Tufekcioglu 对全球不同植被群落的土壤呼吸数据进行归纳也发现,草原比森林具有更高的土壤呼吸数率,并认为这可能是由于草类植物比森林将更高比例的光合产物分配到地下中^[4]。草坪前期的研究也发现草坪土壤呼吸的年通量明显高于相同气候带下的其他植被生态系统^[16]。但在本研究中,与片林相比,草坪土壤呼吸平均日排放速率明显较低仅为 $1.07 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,也低于上海黑麦草草坪冬季的土壤呼吸均值 ($1.90 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^[24]。草坪根系呼吸在短期降温中受到极大程度的抑制是造成其土壤呼吸速率偏低的主要原因。与片林相比,草坪根系呼吸速率日均值为 $0.24 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,仅为片林根系呼吸速率的 13%,而二者微生物呼吸却十分接近。这主要是因为沟叶结缕草为暖季型草种,适宜生长温度为 $26\text{—}36^{\circ}\text{C}$,尽管此次降温过程中没有发生大面积死亡枯萎现象,但低温仍会造成其根系活力的大幅降低^[25]。

3.2 短期降温中温度和水分变化对土壤呼吸及其组分的影响

温度和水分条件被广泛认为是影响土壤呼吸及其组分的关键因素^[3, 26-27]。本研究发现,在降温过程中土壤温度是城市绿地土壤呼吸及其组分的关键限制因子,但对不同绿地类型或不同呼吸组分的影响不同。一方面,在日尺度上土壤温度的指数模型只适用于草坪土壤呼吸及其组分 ($P < 0.05$) 而无法拟合片林的各呼吸速率 ($P > 0.05$),表明温度对草坪土壤呼吸的影响要大于对森林的。这主要是由于草坪植物低矮、结构简单,与高大的和垂直结构相对复杂的森林生态系统相比,土壤呼吸速率更容易受到外界环境变化的影响^[21, 28-29]。另一方面,短期降温明显提高了草坪土壤呼吸及其组分的 Q_{10} 值,与前期 2008 年冬季的观测结果相比 ($Q_{10} = 1.91$),此次降温过程土壤呼吸的 Q_{10} 值 (4.18) 升高了近 1.2 倍。冬季 Q_{10} 值升高的现象在森林、草地以及农田生态系统中也有发现^[29-30]。其部分原因是由于土壤呼吸存在温度适应性, Q_{10} 值随温度的升高而降低,即低温时土壤呼吸的 Q_{10} 值更高,对温度变化的响应更加敏感^[31-32]。另外,本研究中暖季型草种的植物生理过程对低温的快速响应也可能是造成草坪根系呼吸 Q_{10} 值较高的原因。短期降温后日均气温从 13.0°C 左右在几天迅速降低到 5.5°C ,而沟叶结缕草在温度低于 10°C 就有可能进入休眠状态^[25],低温的骤然发生很可能使其进入低温休克状态,从而极大地限制了植物的生理代谢活动。

一般认为土壤水分对土壤呼吸及其组分的影响取决于水分含量变化前的土壤含水量情况:当土壤自身含水量较低时,土壤呼吸及其组分通常随水分含量的增加而增加;而当土壤自身含水量较高时,水分含量的增加则会抑制呼吸作用^[33-34]。本研究中,草坪土壤呼吸或其组分与水分因子(土壤含水量或降雨量)均呈现为线性负相关关系,而在片林中却表现为二次函数关系(表 2),主要原因很可能就是由于二者在降水前土壤含水量的差异造成的。在降雨发生前,草坪由于有人工浇水保养,土壤含水量在 30% 左右,而在片林中仅为 15% 左右(图 3b)。Ruehr 等在北欧森林的模拟降水研究中发现,在旱季的降水可以使土壤呼吸增加 3 倍,而在雨季降水却可以使土壤呼吸降低至少 50%^[14]。然而,在整个观测期内,由于同时受降温与降水的影响,草坪与片林大部分土壤呼吸类型均同时受土壤温度、土壤含水量与降水量的控制,三者构成的多因素回归模型对各呼吸的拟合效果均优于单因素模型(表 3)。但是多因素回归模型在小时尺度上对土壤呼吸及其组分的拟合效果仍不理想,仅草坪微生物呼吸拟合方程的 R^2 超过 0.5,其余均在 0.35 左右。这可能是由于在小时尺度上土壤呼吸或其组分对温度的响应存在时滞现象^[35-36],但目前对土壤呼吸与温度时滞现象的研究还存在争议^[37]。有的研究表明这种时滞现象可能主要与植物的光合作用有关^[38],但也有研究认为时滞现象主要是受土壤水分和温度控制的^[39-40]。由此可见,在未来针对短期突发天气下土壤呼吸的研究中,需要加强土壤呼吸及各组分与冠层光合作用以及各环境因子的同步高频观测,才能增进对土壤呼吸调控机理的理解,从而为构建完整的地下碳循环模型提供科学依据。

4 结论

综上,本文得到以下几个结论:1)在短期降温天气发生后,草坪和片林的土壤温度均显著降低,降温幅度最大分别达 5.5°C 和 7.4°C ,并伴随降雨发生,降水总量达 55.2 mm,从而导致二者土壤含水量不断升高,而整个观测期内草坪土壤温度和土壤含水量均高于片林。2)草坪和片林的土壤呼吸及其组分基本随温度降低而均逐渐降低,二者土壤呼吸降低比例均超过 70%,分别达 71.2% 和 79.4%。但也随降水而呈现巨大波动。片

林土壤呼吸的变化幅度高于草坪,主要是由二者根系呼吸的差异造成的。整个观测期间草坪与片林土壤呼吸日均值分别为 $1.07 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.54 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,其中片林根系呼吸对土壤呼吸的贡献率高达 71%,而在草坪中这一比率仅为 22%。3) 土壤温度是控制此次短期降温天气过程中片林和草坪土壤呼吸及其组分的关键限制因子并与之呈指数正相关关系;由于草坪植物的耐寒性较低以及相对简单的冠层结构,土壤呼吸对温度变化的响应更为敏感。草坪土壤呼吸、微生物呼吸与根系呼吸的 Q_{10} 值在降温中明显提高,分别高达 4.18、8.17 和 18.17。4) 由于降水前草坪土壤含水量较高,在寒潮中草坪土壤呼吸或其组分与水分因子(土壤含水量或降雨量)均呈现为线性负相关关系,而在片林中却表现为二次函数关系。5) 草坪与片林各土壤呼吸类型同时受土壤温度、土壤含水量与降水量的控制,由这 3 个因子构成的多元回归模型可以较好地拟合各呼吸类型的日均值变化($R^2>0.55$)。

致谢:本研究得到福州市闽江江滨公园管理处的领导和职工的大力支持,高人教授、陈光水教授与杨智杰老师在论文撰写中给予指导和帮助,特此致谢。

References:

- [1] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon-dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 23-36.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [3] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81-99.
- [4] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [5] Zhang D Q, Shi P L, Zhang X Z. Some advance in the main factors controlling soil respiration. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(7): 778-785.
- [6] Pouyat R, Groffman R, Yesilonis I, Hernandez L. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution*, 2002, 116(Supplement 1): S107-S118.
- [7] United Nations. *World Urbanization Prospects: The 2009 Revision Highlights*. New York: Population Division, Department of Economic and Social Affairs/Population Division, United Nations, 2010.
- [8] 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.
- [9] Kaye J P, McCulley R L, Burke I C. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems. *Global Change Biology*, 2005, 11(4): 575-587.
- [10] Chen H B, Fan X H. Some extreme events of weather, climate and related phenomena in 2009. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(3): 322-336.
- [11] Ma Z Q, Wang H M, Wang S Q, Li Q K, Wang Y D, Wang H Q. Impact of a severe ice storm on subtropical plantations at Qianyanzhou, Jiangxi, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(2): 204-212.
- [12] Chen F X, Xu S K, Xue L, Chen H Y, Feng H F, Fu J D. Effect of ice-snow damage on soil characteristics in a *Cunninghamia lanceolata* stand. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(20): 5466-5474.
- [13] Shi W Y, Tatenno R, Zhang J G, Wang Y L, Yamanaka N, Du S. Response of soil respiration to precipitation during the dry season in two typical forest stands in the forest-grassland transition zone of the Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 854-863.
- [14] Ruehr N K, Knohl A, Buchmann N. Environmental variables controlling soil respiration on diurnal, seasonal and annual time-scales in a mixed mountain forest in Switzerland. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 153-170.
- [15] Knohl A, Soe A R B, Kutsch W L, Göeckede M, Buchmann N. Representative estimates of soil and ecosystem respiration in an old beech forest. *Plant and Soil*, 2008, 302(1/2): 189-202.
- [16] Li X B, Yang Y S, Zeng H D, Xie J S, Chen G S, Zhu N, Ma S G. Soil respiration of *Zoysia matrella* turfgrass in subtropics. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2096-2105.
- [17] Zeng H D, Du Z X, Yang Y S, Li X B, Zhang Y C, Yang Z F. Effects of land cover change on soil organic carbon and light fraction organic carbon at river banks of Fuzhou urban area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(3): 701-706.
- [18] Chen G S, Yang Y S, Wang X G, Xie J S, Gao R and Li Z. Root respiration in a natural forest and two plantations in subtropical China: seasonal dynamics and controlling factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1941-1947.

- [19] Zhang J C, Kong Y G, Wang Y H, Yang C Q, Hu D M. Components separation of soil respiration in two typical shelter forestlands in silting coastal area, Northern Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3144-3154.
- [20] Lu H Z, Sha L Q, Wang J, Hu W Y, Wu B X. Seasonal variation of soil respiration and its components in tropical rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(10): 2315-2322.
- [21] Qi L B, Fan J, Shao M A, Wang W Z. Seasonal changes in soil respiration under different land use patterns in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5428-5436.
- [22] Livesley S J, Kiese R, Miehe P, Weston C J, Butterbach-Bahl K, Arndt S K. Soil-atmosphere exchange of greenhouse gases in a *Eucalyptus marginata* woodland, a clover-grass pasture, and *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 425-440.
- [23] Bahn M, Reichstein M, Davidson E A, Grünzweig J, Jung M, Carbone M S, Epron D, Misson L, Nouvellon Y, Rouspard O, Savage K, Trumbore S E, Gimeno C, Curiel Yuste J, Tang J, Vargas R, Janssens I A. Soil respiration at mean annual temperature predicts annual total across vegetation types and biomes. *Biogeosciences*, 2010, 7(7): 2147-2157.
- [24] Sun Q, Fang H L, Liu M D, Liang J, Hao R J. The winter soil respiration characteristics and its influencing factors on typical urban plant community in Shanghai. *Journal Of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2009, 27(3): 231-234.
- [25] Zhang W F, Chen P, Ji C D. Effect of low temperature stress on some turf-grasses in Guangzhou, China. *Pratacultural Science*, 2006, 23(8): 85-88.
- [26] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, Wang Y H. Affecting factors of soil microorganism and root respiration. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1547-1552.
- [27] Wang W, Fang J Y. Soil respiration and human effects on global grasslands. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(1/2): 20-28.
- [28] Liu H, Zhao P, Lin Y B, Rao X Q. Soil respiration under different land-use types in a hilly area of south China. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2021-2027.
- [29] Wang Q, Fan Z P, Wang M G, Zhang X H, Sun X K, Zeng D H. Effects of freezing-thawing cycle on soil respiration under different land-use patterns in Keerqin Sandy Lands. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(7): 1333-1339.
- [30] Schindlbacher A, Zechmeister-Boltenstern S, Glatzel G, Jandl R. Winter soil respiration from an Austrian mountain forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146(3/4): 205-215.
- [31] Atkin O K, Tjoelker M G. Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *Trends in Plant Science*, 2003, 8(7): 343-351.
- [32] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413(6856): 622-625.
- [33] Zhou P, Liu G B, Xue S. Review of soil respiration and the impact factors on grassland ecosystem. *Acta Pratacul Turae Sinica*, 2009, 18(2): 184-193.
- [34] Bowden R D, Newkirk K M, Rullo G M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(12): 1591-1597.
- [35] Carbone M S, Winston G C, Trumbore S E. Soil respiration in perennial grass and shrub ecosystems: linking environmental controls with plant and microbial sources on seasonal and diel timescales. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(G2): G02022, doi: 10.1029/2007JG000611.
- [36] Phillips S C, Varner R K, Froking S, Munger J W, Bubier J L, Wofsy S C, Crill P M. Interannual, seasonal, and diel variation in soil respiration relative to ecosystem respiration at a wetland to upland slope at Harvard Forest. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: G02019, doi: 10.1029/2008JG000858.
- [37] Phillips C L, Nickerson N, Risk D, Bond B J. Interpreting diel hysteresis between soil respiration and temperature. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 515-527.
- [38] Tang J W, Baldocchi D D, Xu L K. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale. *Global Change Biology*, 2005, 11(8): 1298-1304.
- [39] Riveros-Iregui D A, Emanuel R E, Muth D J, McGlynn B L, Epstein H E, Welsch D L, Pacific V J, Wraith J M. Diurnal hysteresis between soil CO₂ and soil temperature is controlled by soil water content. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L17404, doi: 10.1029/2007GL030938.
- [40] Riveros-Iregui D A, McGlynn B L, Epstein H E, Welsch D L. Interpretation and evaluation of combined measurement techniques for soil CO₂ efflux: discrete surface chambers and continuous soil CO₂ concentration probes. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: G04027, doi: 10.1029/2008JG000811.

参考文献:

- [5] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 778-785.

- [10] 陈洪滨, 范学花. 2009 年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾. 气候与环境研究, 2010, 15(3): 322-336.
- [11] 马泽清, 王辉民, 王绍强, 李庆康, 王义东, 汪宏清. 雨雪冰冻灾害对中亚热带人工林的影响——以江西省千烟洲为例. 植物生态学报, 2010, 34(2): 204-212.
- [12] 陈凤霞, 许松葵, 薛立, 陈红跃, 冯慧芳, 傅静丹. 冰雪灾害对杉木林土壤特性的影响. 生态学报, 2010, 30(20): 5466-5474.
- [16] 李熙波, 杨玉盛, 曾宏达, 谢锦升, 陈光水, 朱宁, 马书国. 亚热带沟叶结缕草草坪土壤呼吸. 生态学报, 2011, 31(8): 2096-2105.
- [17] 曾宏达, 杜紫贤, 杨玉盛, 李熙波, 张雅纯, 杨志峰. 城市沿江土地覆被变化对土壤有机碳和轻组有机碳的影响. 应用生态学报, 2010, 21(3): 701-706.
- [18] 陈光水, 杨玉盛, 王小国, 谢锦升, 高人, 李震. 格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态及影响因素. 生态学报, 2005, 25(8): 1941-1947.
- [19] 张金池, 孔雨光, 王因花, 杨传强, 胡丁猛. 苏北淤泥质海岸典型防护林地土壤呼吸组分分离. 生态学报, 2010, 30(12): 3144-3154.
- [20] 卢华正, 沙丽清, 王君, 胡文艳, 吴兵霞. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸的季节变化. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2315-2322.
- [21] 齐丽彬, 樊军, 邵明安, 王万忠. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同土地利用类型土壤呼吸季节变化及其环境驱动. 生态学报, 2008, 28(11): 5428-5436.
- [24] 孙倩, 方海兰, 刘鸣达, 梁晶, 郝瑞军. 上海典型植物群落冬季土壤呼吸特征及其影响因子. 上海交通大学学报(农业科学版), 2009, 27(3): 231-234.
- [25] 张伟锋, 陈平, 姬承东. 广州地区几种草坪草低温胁迫效应研究. 草业科学, 2006, 23(8): 85-88.
- [26] 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 王玉辉. 土壤微生物与根系呼吸作用影响因子分析. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1547-1552.
- [28] 刘惠, 赵平, 林永标, 饶兴权. 华南丘陵区不同土地利用方式下土壤呼吸. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2021-2027.
- [29] 王琼, 范志平, 王满贵, 张新厚, 孙学凯, 曾德慧. 冻融交替对科尔沁沙地不同土地利用方式土壤呼吸的影响. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1333-1339.
- [33] 周萍, 刘国彬, 薛蕙. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展. 草业学报, 2009, 18(2): 184-193.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 19 October, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Ecology research and its effects on social development in China	LI Wenhua (5421)
The current mission of ecology-advancing under the situation of chaos and innovation	JIANG Youxu (5429)
Resilience thinking: development of ecological concept	PENG Shaolin (5433)
A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China	LIU Shirong, WANG Hui, LUAN Junwei (5437)
Research on carbon budget and carbon cycle of terrestrial ecosystems in regional scale: a review	YU Guirui, FANG Huajun, FU Yuling, et al (5449)
Advances in the studying of the relationship between landscape pattern and river water quality at the watershed scale	LIU Lijuan, LI Xiaoyu, HE Xingyuan (5460)
Research on the protection of <i>Davidia involucrata</i> populations, a rare and endangered plant endemic to China	CHEN Yan, SU Zhixian (5466)
Progress on water resources input-output analysis	XIAO Qiang, HU Dan, GUO Zhen, et al (5475)
Research advances of contraception control of rodent pest in China ...	LIU Hanwu, WANG Rongxin, ZHANG Fengqin, et al (5484)
Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region	LI Huixia, LIU Guohua, FU Bojie (5495)
Remediation of blowout pits by clonal plants in Mu Us Sandland	YE Xuehua, DONG Ming (5505)
Precipitation trends during 1961—2010 in the Loess Plateau region of China	WANG Qixiang, FAN Xiaohui, WANG Mengben (5512)
An evaluation method for forest resources sustainability	CUI Guofa, XING Shaohua, JI Wenyuan, et al (5524)
Effects of landscape patterns on soil and water loss in the hilly area of loess plateau in China: landscape-level and comparison at multiscale	WANG Jiping, YANG Lei, WEI Wei, et al (5531)
The impacts of future climatic change on agricultures and eco-environment of Loess Plateau in next decade	E Youhao, SHI Qian, MA Yuping, et al (5542)
Valuation of ecological capital in Shandong coastal waters: standing stock value of biological resources	DU Guoying, CHEN Shang, XIA Tao, et al (5553)
Valuation of ecological capital in Shandong coastal waters: provisioning service value	WANG Min, CHEN Shang, XIA Tao, et al (5561)
The dynamics of the structure and plant species diversity of evergreen broadleaved forests in Damingshan National Nature Reserve after a severe ice storm damage in 2008, China	ZHU Hongguang, LI Yanqun, WEN Yuanguang, et al (5571)
Interactive effects of low phosphorus and drought stress on dry matter accumulation and phosphorus efficiency of soybean plants	QIAO Zhenjiang, CAI Kunzheng, LUO Shiming (5578)
The eco-efficiency evaluation of the model city for environmental protection in China	YIN Ke, WANG Rusong, YAO Liang, et al (5588)
Pollution footprint and its application in regional water pollution pressure assessment: a case study of Huzhou City in the upstream of Taihu Lake Watershed	JIAO Wenjun, MIN Qingwen, CHENG Shengkui, et al (5599)
Ecological effect of green space of Shanghai in different spatial scales in past 20 years	LING Huanran, WANG Wei, FAN Zhengqiu, et al (5607)
Assessing indicators of eco-mobility in the scale of urban communities ...	DAI Xin, ZHOU Chuanbin, WANG Rusong, et al (5616)
Spatial structure of urban ecological land and its dynamic development of ecosystem services: a case study in Changzhou City, China	LI Feng, YE Yaping, SONG Bowen, et al (5623)
The carbon emissions embodied in Chinese household consumption by the driving factors	YAO Liang, LIU Jingru, WANG Rusong (5632)
The research on eco-efficiency and carbon reduction of recycling coal mining solid wastes: a case study of Huabei City, China	ZHANG Haitao, WANG Rusong, HU Dan, et al (5638)
Effects of urban shading on photosynthesis of <i>Euonymus japonicas</i>	YU Yingying, HU Dan, GUO Erhui, et al (5646)

Ecological view of traditional rural settlements: a case study in Yongnan of Guangdong Province	JIANG Xueting, YAN Lijiao, HOU Deqian (5654)
The altitudinal pattern of insect species richness in the Three Gorge Reservoir Region of the Yangtze River: effects of land cover, climate and sampling effort	LIU Ye, SHEN Zehao (5663)
Spatial-temporal patterns of fishing grounds and resource of Chilean jack mackerel (<i>Trachurus murphyi</i>) in the Southeast Pacific Ocean	HUA Chengjun, ZHANG Heng, FAN Wei (5676)
Impacts of <i>Ambrosia artemisiifolia</i> invasion on community structure of soil meso- and micro- fauna	XIE Junfang, QUAN Guoming, ZHANG Jiaen, et al (5682)
Appearance in spring and disappearance in autumn of <i>Bemisia tabaci</i> in China	CHEN Chunli, ZHI Junrui, GE Feng, et al (5691)
Water use strategies of <i>Malus toringoides</i> and its accompanying plant species <i>Berberis aemulans</i>	XU Qing, WANG Haiying, LIU Shirong (5702)
Analysis of vertical profiles of soil CO ₂ efflux in Chinese fir plantation	WANG Chao, HUANG Qunbin, YANG Zhijie, et al (5711)
Eco-toxicological effects of four herbicides on typical aquatic snail <i>Pomacea canaliculata</i> and <i>Crown conchs</i>	ZHAO Lan, LUO Shiming, LI Huashou, et al (5720)
Effects of short-term cold-air outbreak on soil respiration and its components of subtropical urban green spaces	LI Xibo, ZENG Wenjing, LI Jinqian, et al (5728)
Effects of landscape pattern on watershed soil erosion and sediment delivery in hilly and gully region of the Loess Plateau of China: patch class-level	WANG Jiping, YANG Lei, WEI Wei, et al (5739)
Partitioning and mapping the sources of variations in the ensemble forecasting of species distribution under climate change: a case study of <i>Pinus tabulaeformis</i>	ZHANG Lei, LIU Shirong, SUN Pengsen, et al (5749)
Relationship between masson pine tree-ring width and NDVI in North Subtropical Region	WANG Ruili, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (5762)
Effects of species composition on canopy rainfall storage capacity in an alpine meadow, China	YU Kailiang, CHEN Ning, YU Sisheng, et al (5771)
Dynamics of soil water conservation during the degradation process of the Zoigê Alpine Wetland	XIONG Yuanqing, WU Pengfei, ZHANG Hongzhi, et al (5780)
Soil urease activity during different vegetation successions in karst peak-cluster depression area of northwest Guangxi, China	LIU Shujuan, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (5789)
Analysis the effect of region impacting on the biomass of domestic Masson pine using mixed model	FU Liyong, ZENG Weisheng, TANG Shouzheng (5797)
Influence of fire on a <i>Pinus massoniana</i> soil in a karst mountain area at the center of Guizhou Province, China	ZHANG Xi, ZHU Jun, CUI Yingchun, et al (5809)
The growth and distribution of <i>Platykladus orientalis</i> Seed-base seedling root in different culture periods	YANG Xitian, DONG Nalin, YAN Dongfeng, et al (5818)
Effects of complex pollution of CTAB and Cd ²⁺ on the growth of Chinese sweetgum seedlings	ZHANG Qin, XUE Jianhui, LIU Chenggang (5824)
The influence of volatiles of three invasive plants on the roots of upland rice seedlings	ZHANG Fengjuan, XU Xingyou, GUO Aiying, et al (5832)
Age structure and regeneration strategy of the dominant species in a <i>Castanopsis carlesii</i> - <i>Schima superba</i> forest	SONG Kun, SUN Wen, DA Liangjun (5839)
A study on application of hepatic microsomal CYP1A biomarkers from <i>Sebastiscus marmoratus</i> to monitoring oil pollution in Xiamen waters	ZHANG Yusheng, ZHENG Ronghui, CHEN Qingfu (5851)
The method of measuring energy flow ϕ and p in ecological networks by input-output flow analysis	LI Zhongcai, XI Xudong, GAO Qin, et al (5860)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 19 期 (2011 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 19 2011

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@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.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