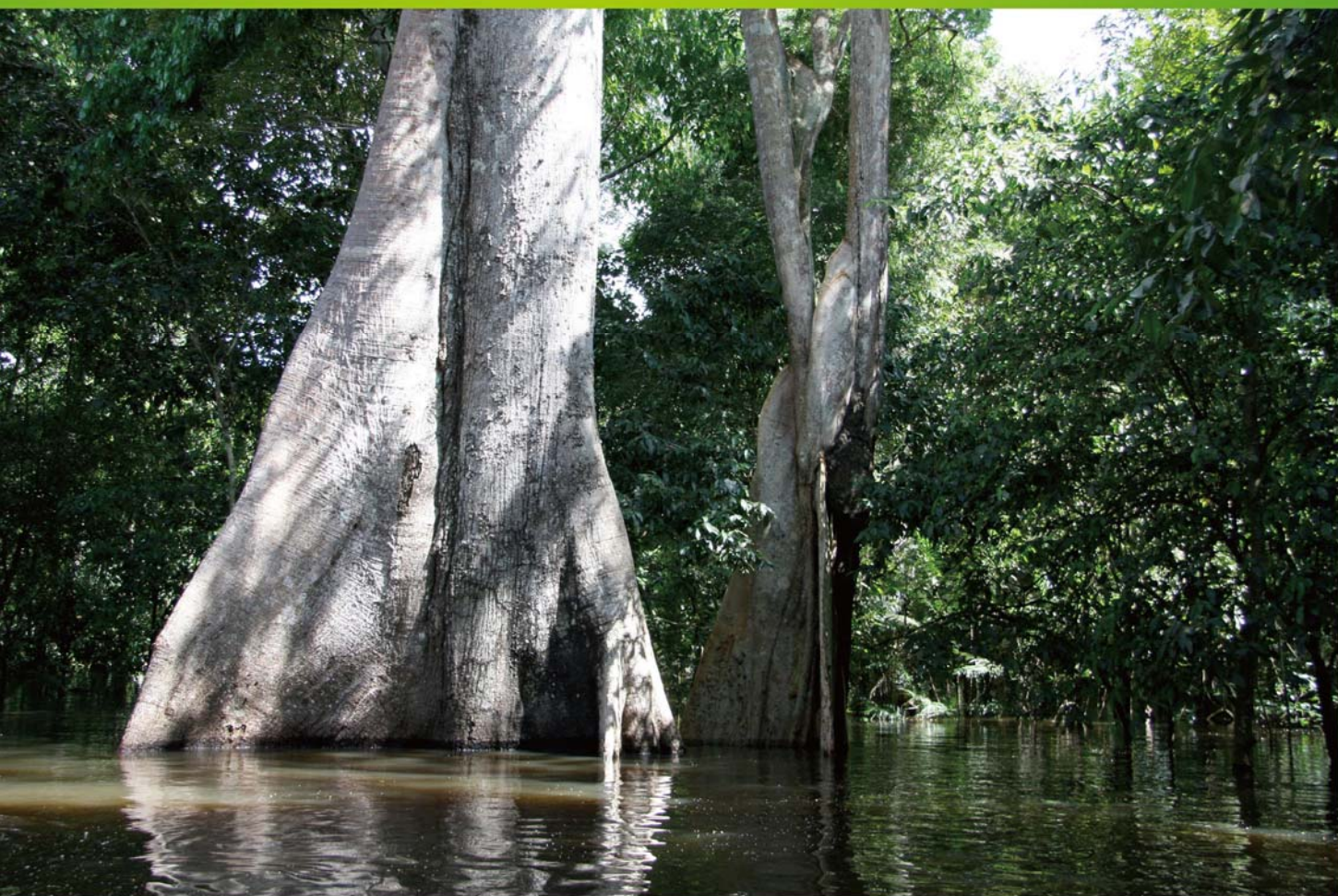


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

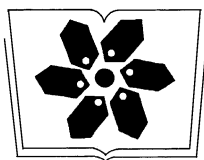
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第8期 Vol.31 No.8 **2011**

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 31 卷 第 8 期

2011 年 4 月 (半月刊)

目 次

塔里木河下游胡杨径向生长与地下水的关系·····	安红燕,徐海量,叶 茂,等 (2053)
冲积平原区高程因子对土壤剖面质地构型的影响——以封丘县为例·····	檀满枝,密术晓,李开丽,等 (2060)
臭氧胁迫对大豆叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响·····	王俊力,王 岩,赵天宏,等 (2068)
重要理化因子对小球藻生长和油脂产量的影响·····	张桂艳,温小斌,梁 芳,等 (2076)
北亚热带马尾松净生产力对气候变化的响应·····	程瑞梅,封晓辉,肖文发,等 (2086)
亚热带沟叶结缕草草坪土壤呼吸·····	李熙波,杨玉盛,曾宏达,等 (2096)
UV-B 辐射对马尾松凋落叶分解和养分释放的影响·····	宋新章,张慧玲,江 洪,等 (2106)
干旱胁迫下内生真菌感染对羽茅的生理生态影响·····	韩 荣,李 夏,任安芝,等 (2115)
蜜环菌对锌的耐性和富集特性·····	朱 林,程显好,李维焕,等 (2124)
干旱荒漠区狭叶锦鸡儿灌丛扩展对策·····	张建华,马成仓,刘志宏,等 (2132)
黄土高原区不同植物凋落物搭配对土壤微生物量碳、氮的影响·····	王春阳,周建斌,夏志敏,等 (2139)
内蒙古典型草原克氏针茅与冰草的生存策略·····	孙 建,刘 苗,李胜功,等 (2148)
荒漠沙柳根围 AM 真菌的空间分布·····	贺学礼,杨 静,赵丽莉 (2159)
开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究·····	董文军,邓艾兴,张 彬,等 (2169)
醉马草免培养内生细菌的多样性·····	张雪兵,史应武,曾 军,等 (2178)
河南生态足迹驱动因素的 Hi_PLS 分析及其发展对策·····	贾俊松 (2188)
禹城市耕地土壤盐分与有机质的指示克里格分析·····	杨奇勇,杨劲松,余世鹏 (2196)
旋覆花提取物对朱砂叶螨的生物活性及酶活性的影响·····	段丹丹,王有年,成 军,等 (2203)
白洋淀湖滨湿地岸边带氨氧化古菌与氨氧化细菌的分布特性·····	叶 磊,祝贵兵,王 雨,等 (2209)
干旱胁迫条件下 6 种喀斯特主要造林树种苗木叶片水势及吸水潜能变化·····	王 丁,姚 健,杨 雪,等 (2216)
桉树人工林物种多样性变化特征·····	刘 平,秦 晶,刘建昌,等 (2227)
海河流域湿地生态系统服务功能价值评价·····	江 波,欧阳志云,苗 鸿,等 (2236)
芦苇在微咸水河口湿地甲烷排放中的作用·····	马安娜,陆健健 (2245)
云南不同土壤铅背景值下大叶茶种群对铅的吸收积累特征及其遗传分化·····	刘声传,段昌群,李振华,等 (2253)
长江口和杭州湾凤鲚胃含物与海洋浮游动物的种类组成比较·····	刘守海,徐兆礼 (2263)
江西大岗山地区 7—9 月降水量的重建与分析·····	乔 磊,王 兵,郭 浩,等 (2272)
山核桃免耕经营的经济效益和生态效益·····	王正加,黄兴召,唐小华,等 (2281)
基于 GIS 的广州市中心城区城市森林可达性分析·····	朱耀军,王 成,贾宝全,等 (2290)
专论与综述	
土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性·····	杨庆朋,徐 明,刘洪升,等 (2301)
植物代谢速率与个体生物量关系研究进展·····	程栋梁,钟全林,林茂兹,等 (2312)
耕地生态补偿实践与研究进展·····	马爱慧,蔡银莺,张安录 (2321)
问题讨论	
元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性·····	刘 洁,李贤伟,纪中华,等 (2331)
研究简报	
中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响·····	胡 坤,喻 华,冯文强,等 (2341)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 296 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-04



封面图说:巴西热带雨林——美丽的巴西北部玛瑙斯热带雨林景观。位于南美洲的亚马逊河是世界上流域最广、流量最大的河流,孕育了世界面积最大的热带雨林,雨林中蕴藏着极丰富的生物资源。

彩图提供:中国科学院生态环境研究中心徐卫华博士 E-mail:xuweihua@rcees.ac.cn

亚热带沟叶结缕草草坪土壤呼吸

李熙波^{1,2}, 杨玉盛^{1,2,*}, 曾宏达^{1,2}, 谢锦升^{1,2}, 陈光水^{1,2}, 朱 宁^{1,2}, 马书国^{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: 随城市化进程加速, 城市草坪生态系统释放 CO₂ 将对区域碳循环产生重要影响。采用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统对亚热带沟叶结缕草草坪 (*Zoysia matrella*) 土壤呼吸进行为期 1a 的定位研究, 结果表明: 草坪土壤呼吸季节动态呈现为单峰曲线, 全年土壤呼吸速率的变化范围在 38.99—368.50 mg C·m⁻²·h⁻¹ 之间, 年通量为 1684 g C·m⁻²·a⁻¹。土壤温度、总生物量、以及二者的交互作用对土壤呼吸季节变化的解释程度接近, 分别为 89%、88% 和 90%, 但仅二者的交互作用进入土壤呼吸的逐步回归方程, 表明草坪土壤呼吸的季节变化主要受土壤温度与总生物量共同驱动。春末修剪草坪对土壤呼吸速率没有显著影响。在秋末无雨时期, 浇水后 1—2d 土壤湿度对土壤呼吸的促进作用可掩盖同期降温的影响, 使土壤呼吸速率显著升高。

关键词: 土壤呼吸; 土壤温度; 生物量; 修剪; 浇水; 草坪

Soil respiration of *Zoysia matrella* turfgrass in subtropics

LI Xibo^{1,2}, YANG Yusheng^{1,2,*}, ZENG Hongda^{1,2}, XIE Jinsheng^{1,2}, CHEN Guangshui^{1,2}, ZHU Ning^{1,2}, MA Shuguo^{1,2}

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

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

Abstract: Soil respiration, the CO₂ efflux from soil, is a major carbon flux between ecosystems and the atmosphere. Identifying soil respiration rates of a variety of ecosystems is a necessary step in understanding of global carbon (C) cycling. However, while soil respiration of many non-urban ecosystems such as forest, grassland, desert and cropland have received much attention, little information is available of soil respiration in urban ecosystems. Specifically, the data about soil respiration from turfgrass cultivation is scarce, despite that this ecosystem is expanding quickly along with a high rate of urbanization and that C releases from turfgrass soil have shown the potential to alter local C cycling process and C budget. In this study, the seasonal variation in soil respiration, measured using LI-8100 automated soil CO₂ flux system, was monitored biweekly for one year (Jan to Dec 2008) in a subtropical *Zoysia matrella* turfgrass in the Minjiang Riverside Park of Fuzhou City (26°03' N, 119°15' E), Fujian Province, China. The effects of clipping and irrigation on soil respiration were also investigated. The results indicated that the seasonal variation in soil respiration characterized a pattern of mono-peak curve and varied from 38.99 to 368.50 mg C·m⁻²·h⁻¹. Despite the fact that soil temperature (T_s), total biomass (TB) and their interaction ($TB \times T_s$) could explain 89%, 88% and 90% of seasonal variation in soil respiration (R_s), respectively. The seasonal change in soil respiration was mainly controlled by the interaction of two factors, as suggested by a multiple stepwise regression model ($\ln(R_s) = 3.248 + 3.05 \times 10^{-5} \times TB \times T_s$, $R^2 = 0.90$, $P < 0.01$). The annual flux from soil respiration in the turfgrass amounted to 1684 g C·m⁻²·a⁻¹, which are higher than other ecosystems in the same climate zone of similar amounts of precipitation. This extremely high value might be caused by human managements, such as irrigation and fertilization in turfgrass. Clipping had no significant effect on soil respiration, soil temperature and soil moisture in late spring. The variations of soil respiration in both clipped plots and un-clipped plots were mainly controlled by soil temperature. In not-raining days of late autumn, soil respiration increased significantly at the first 2 days after

基金项目: 福建省自然科学基金(2007J0346); 福建省教育厅科学基金资助项目(JB07069)

收稿日期: 2010-04-13; 修订日期: 2010-11-04

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

irrigation, indicating the effects of increased soil humidity on soil respiration. Multiple stepwise regression showed that soil respiration in irrigation plots was controlled by both soil moisture (W_{12}) and soil temperature after irrigation ($\ln(R_s) = 3.505 + 0.003 \times T_s \times W_{12}$, $R^2 = 0.93$, $P < 0.01$), but in non-irrigated plots, the rate was only affected by soil temperature ($\ln(R_s) = 2.715 + 0.103 \times T_s$, $R^2 = 0.82$, $P < 0.01$). From the results of this study, we found that the turfgrass ecosystem exhibit a relative high value of soil respiration than other ecosystems in subtropics of China and irrigation played an important role in soil respiration in relatively dry months. Our study was a preparatory step of C cycling research on turfgrass ecosystem. For a comprehensive assessment of C budget of this artificial ecosystem, further investigations on particulate C fluxes, such as gross primary production, ecosystem respiration, heterotrophic respiration and net ecosystem production, are needed, as well as the long-term effect of human management on these fluxes.

Key Words: soil respiration; soil temperature; biomass; clipping; irrigation; turfgrass

土壤呼吸是陆地碳循环的关键环节,其 CO_2 排放量占全球 CO_2 总排放量的 25%^[1]。深入认识不同生态系统土壤呼吸过程对减少全球碳预算的不确定性与预测未来气候变化具有重要意义。长期以来,土壤呼吸的研究主要集中在森林、草地和农田等生态系统中^[2-3],而对城市生态系统的报道十分有限^[4]。然而,在全球城市化加速的背景下,城市景观正在快速向自然和农业生态系统蔓延^[5]。作为城市化进程的一部分,城市草坪面积也随之迅速扩张,美国草坪面积高达本土面积的 2%^[6],其对区域碳循环的影响日益受到关注。已有研究表明,草坪具有很高的土壤呼吸速率^[4,7],在城市碳循环和碳预算中占据重要地位^[8]。因此,研究草坪土壤呼吸不仅有助于了解其在区域碳循环中的作用,还有利于深入认识城市化对陆地生态系统碳循环的影响。

从 20 世纪 90 年末起,在经济快速发展的推动下,我国城市草坪开始急速扩张,沿海内陆各大城市,草坪的铺设一度进入狂热的状态^[9]。目前,尽管国内已经开始对城市的盲目扩张进行反思,但总体上随着城市化建设与社会经济文化的发展,我国草坪面积仍然快速增加^[10]。特别是处于亚热带的东南沿海地区,城市化进程已步入快速发展阶段,温暖湿润的气候和经济快速的发展共同促进该地区城市草坪的绿化进程,但目前亚热带草坪土壤呼吸的研究还鲜见报道。与天然草地相比,城市草坪受到强烈的人为管理措施的影响,尽管研究已经表明,修剪和浇水通过改变土壤微环境进而影响草地的土壤呼吸速率^[11-12],但作为草坪保养的主要人工措施,修剪和浇水对草坪土壤呼吸速率影响与天然草地的研究结果是否相似仍不确定。这也是目前政府间气候变化专门委员会(IPCC)在编制城市碳预算时面临的主要困难之一^[13]。为此,本研究以中国亚热带典型暖季型草坪为研究对象,对草坪生态系统 CO_2 净交换量、总呼吸、土壤呼吸、根系呼吸以及异养呼吸等碳通量进行了定位观测,本文仅分析土壤呼吸的观测结果,并探讨修剪和浇水对土壤呼吸的影响,旨在阐明草坪土壤呼吸的季节动态规律,揭示土壤呼吸的主导因子,为准确和定量地评估草坪碳收支提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建省福州市南江滨公园(26°03'N, 119°15'E),属亚热带季风气候,年平均气温为 19.6 °C,最冷和最热月(1 月和 7 月)的平均气温分别为 10.8 °C 和 28.8 °C。多年平均降水量为 1344 mm。试验地草坪植被为禾本科多年生沟叶结缕草(*Zoysia matrella*),属暖季型草种,地下根茎发达,蔓延迅速,耐贫瘠和践踏,是中国亚热带城市园林绿化广泛采用的草种。草坪由江滨芦苇湿地改造而成,2002 年铺设,样地总面积 3900 m²,建坪年龄为 5a,草坪人为管理措施(施肥、修剪、浇水和除草)主要有:在建坪当年施加基肥,其中 N、P 和 K 的施肥量分别为 85 kg/hm², 51 kg/hm², 和 34 kg/hm²,此后未追肥;每年采用便携式割草机修剪 1—2 次,留茬高度约 5 cm,修剪碎屑直接归还草坪;干旱时进行人工浇水,每次浇水量约 50 mm,全年浇水 10—30 次。草坪土壤为灰潮土,在铺设草坪前曾使用石灰改良,表层土壤(0—20 cm)的基本理化性质见表 1,底层土壤有明显人为扰动迹象,含有一定量的建筑碎屑。

表 1 试验地表层土壤(0—20 cm)基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of top soil (0—20 cm) in experimental field

土层 Soil layer /cm	容重 Bulk density /(g/cm ³)	有机质 Organic matter /(g/kg)	全 N Total N /(g/kg)	全 P Total P /(g/kg)	全 K Total K /(g/kg)	C/N	pH
0—10	0.88 (0.01)	29.59 (0.98)	2.51 (0.14)	0.93 (0.00)	27.96 (0.35)	12.03 (0.27)	7.03 (0.03)
10—20	1.26 (0.02)	14.06 (0.29)	1.27 (0.04)	0.71 (0.00)	25.63 (0.08)	11.10 (0.08)	7.61 (0.03)

括号内的数值为标准误差

1.2 试验设计

2007 年 12 月在公园内选择植物覆盖和生长均一的草坪建立 15 个 3 m×3 m 样方,共设对照(CK)、不修剪处理(UC)和不浇水处理(UI),不修剪处理与不浇水处理均为短期控制试验,在试验期以外,两种处理样方内草坪的管理措施均与对照相同。对照:样方内草坪管理措施按公园日常管理同步进行,其中,2008 年修剪按公园安排,仅在春末(5 月 16 日)进行 1 次;不修剪处理:在对照样方进行修剪时,样方内草坪不进行修剪;不浇水处理:在对照进行浇水时样方内草坪不进行浇水,为排除天然降水干扰,不浇水处理选择在秋末无雨时期进行。每个处理重复 5 次(即相同处理由随机选择的 5 个 3 m×3 m 样方组成)。

1.3 土壤呼吸测定

利用土壤碳通量自动测量系统(LI-8100, Lincoln)测定土壤呼吸。在每次观测的前 1 天,在每个样方内随机布置 3 个 PVC 环(直径 20 cm,高 7 cm,平行地表插入土壤 4 cm),并将环内绿色植物齐地剪除。对照样方土壤呼吸速率的测定时间为 2008 年 1—12 月,每月观测 2 次(上旬末和下旬初),在 7:00 至 19:00 每 2 h 观测 1 次。其中,在奇数月份上旬进行 24 h 观测(7:00 至次日 7:00)。在修剪与浇水措施实施前后分别对不修剪样方、不浇水样方和对照样方进行同步观测,具体观测日期见图 4、图 5,并采用 2 套经过校正的 LI-8100 进行同步观测以保证所有样点在 2 h 内全部观测完毕。另外,根据 2007 年预实验以及 2008 年观测结果,草坪土壤呼吸 7:00—9:00 的观测值与全天均值没有显著差异(未刊数据)。因此,采用该时间段的观测结果代替日均值进行数据分析。

观测呼吸速率的同时,土壤 5 cm 深度的温度通过 LI-8100 自带温度探针测定;0—12 cm 土层的湿度采用时域反射仪(TDR-300)测定。降水量由样地内的移动气象站同步监测。

1.4 生物量观测

在呼吸速率观测样方附近另布设 5 个 3 m×3 m 生物量取样样方,每月测定 1 次,每次取样时,在生物量取样样方内随机布设 3 个 0.2 m×0.2 m 的子样方,将子样方草坪冠层部分齐地剪下,并采集 0—40 cm 土壤样品,分别将地上部分(叶和茎)与地下部分(根系)挑出、洗净,在 80 ℃烘干 72 h 后称重,获取地上生物量、地下生物量和总生物量。

1.5 数据统计分析

土壤呼吸年通量采用相邻两次测定呼吸速率的平均值与相邻观测日的间隔天数相乘后再累加获得。根据数据统计结果, R_s 与土壤温度和总生物量关系最为密切。因此,多元逐步回归分析仅考虑土壤温度与总生物量,先将 R_s 进行自然对数转换,然后对土壤温度、总生物量及其交互作用进行多元逐步回归分析^[14],函数式如下:

$$\ln(R_s) = a + b \times T_s + c \times TB + d \times T_s \times TB \quad (1)$$

式中, T_s 为土壤温度(℃), TB 为总生物量($g \cdot m^{-2}$), a 、 b 、 c 、 d 为待估参数。此外,由于生物量观测频率为 1 次/月,式中 R_s 和 T_s 均采用月均值计算。土壤呼吸与生物量之间的关系,采用各呼吸速率的月均值进行分析。

修剪与浇水试验过程中,土壤温度、土壤湿度及其交互作用对土壤呼吸的影响也采用多元逐步回归分析,函数式如下:

$$\ln(R_s) = a + b \times T_s + c \times W_{12} + d \times T_s \times W_{12} \quad (2)$$

式中, W_{12} 为土壤 0—12 cm 湿度(%), a 、 b 、 c 、 d 为待估参数。

呼吸速率与各因子之间的关系分析与回归方程的拟合均使用 SPSS 10.0 完成, 动态曲线采用 Origin 8.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 草坪土壤呼吸季节变化

由图 1 可以看出, 草坪土壤呼吸季节动态呈单峰型变化, 表现为冬季和春初(1—3 月份)较低, 之后随土温升高和生物量增大呈上升趋势, 于夏季 8 月份达到峰值, 9 月份过后开始迅速下降。全年土壤呼吸速率的变化范围在 $38.99\text{--}368.50\text{ mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间, 变化幅度(最大值减去最小值)为 $329.51\text{ mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 年呼吸总量为 $1684\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。此外, 草坪土壤呼吸速率在 6—9 月份一致维持在相对较高水平, 主要是因为这段时期试验地水热条件较好, 有利于植物根系和土壤微生物活动, 故土壤呼吸速率也较高。生物量和土壤温度的季节变化与土壤呼吸季节动态基本一致, 二者最大值也出现在 8 月份左右(图 1); 土壤湿度的季节变化与温度略有不同, 虽然最低值也出现在冬季, 但最大值出现 5 月上旬的梅雨期, 全年降水量主要集中在春、夏季, 其中 4 月份至 8 月份降水量占全年总降水量(1423.9 mm)的 75%(图 1)。

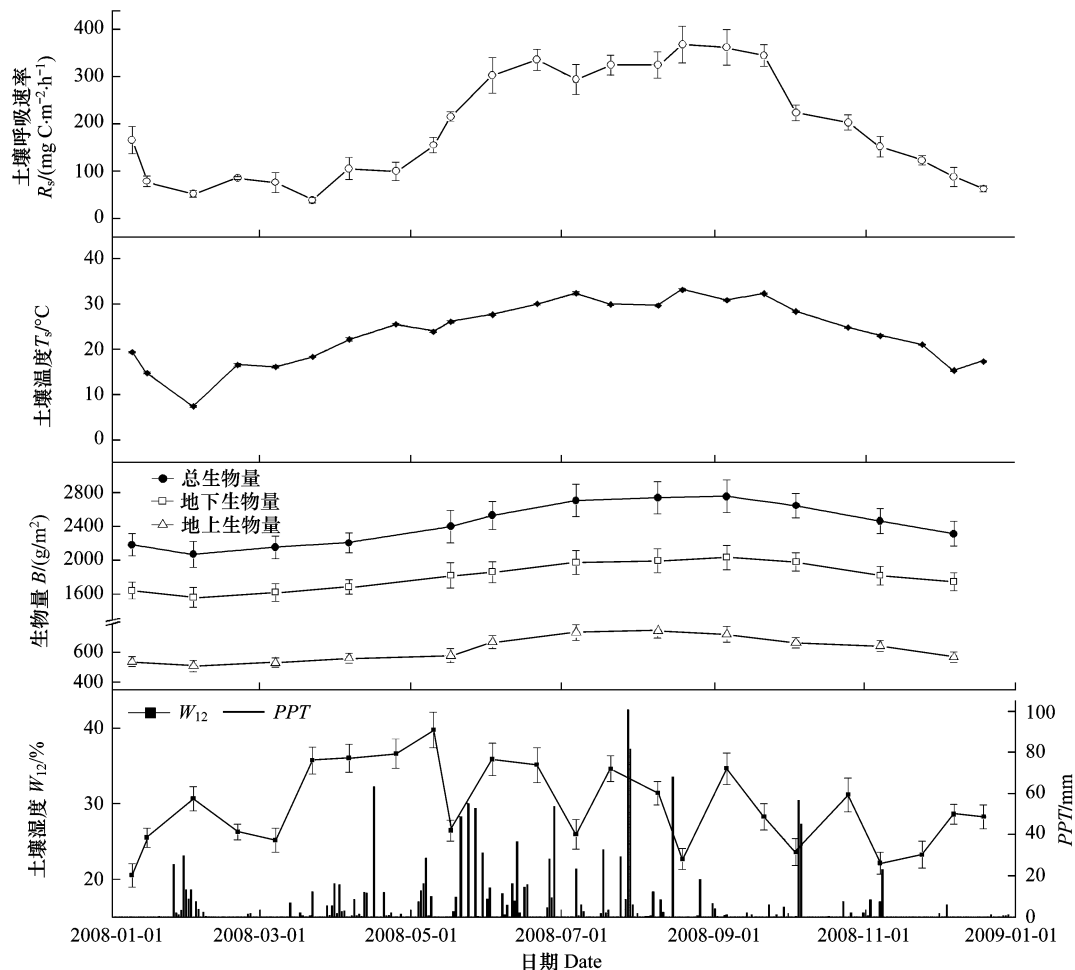


图 1 草坪生态系统土壤呼吸(R_s)、土壤温度(T_s)、生物量(B)、土壤湿度(W_{12})和日降水量(PPT)的季节变化

Fig. 1 The seasonal variations of soil respiration (R_s), soil temperature (T_s), biomass (B), soil humidity (W_{12}) and precipitation (PPT) in turfgrass ecosystem

误差线表示标准误差

2.2 土壤呼吸季节动态的主导因子

试验期内,地上生物量、地下生物量、总生物量以及土壤温度均与土壤呼吸极显著相关($P<0.01$),而土壤湿度与土壤呼吸相关不显著($P=0.54$)(图2,图3)。生物量与土壤温度是影响土壤呼吸的主要因子。生物量变化解释了土壤呼吸变化的80%以上,特别是总生物量可解释土壤呼吸变化的88%(图2)。土壤温度与土壤呼吸呈极显著的对数关系($P<0.01$)(图3),解释了土壤呼吸变化的89%。多元逐步回归分析发现,虽然总生物量与土壤温度的交互作用($TB\times T_s$)对土壤呼吸变异的解释程度为90%(表2),与仅考虑总生物量或土壤温度的单因素回归模型相近(图2,图3),但只有该项进入土壤呼吸的逐步回归方程。

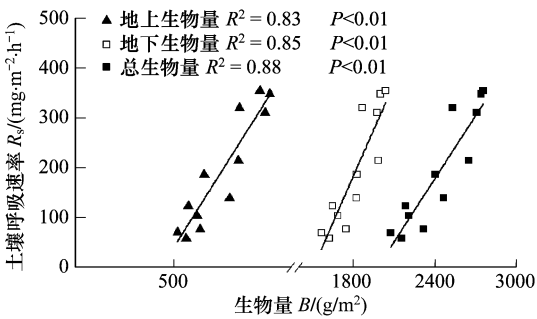


图2 土壤呼吸(R_s)与生物量(B)的关系

Fig. 2 Relationship between soil respiration (R_s) with biomass (B)

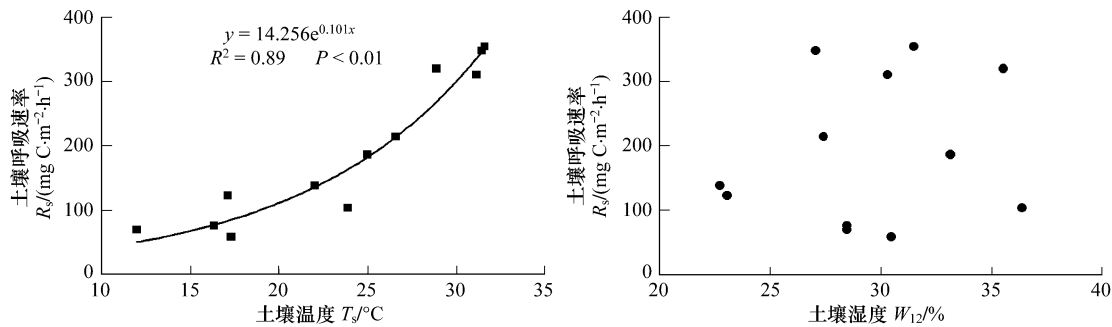


图3 土壤呼吸(R_s)与土壤温度(T_s)和土壤湿度(W_{12})的关系

Fig. 3 Relationship between soil respiration (R_s) with soil temperature (T_s) and soil humidity (W_{12})

表2 土壤呼吸(R_s)与土壤温度(T_s)、总生物量(TB)和交互作用的多元逐步回归结果

Table 2 Stepwise regression of soil respiration (R_s) against soil temperature (T_s), total biomass (TB) and the interactive term					
土壤呼吸速率 Soil respiration rate	回归方程 Regression model	R^2	P	样本数 n	
R_s	$\ln(R_s) = 3.248 + 3.05 \times 10^{-5} \times TB \times T_s$	0.90	<0.01	12	

2.3 修剪对土壤呼吸的影响

由图4可见,春末修剪对草坪土壤呼吸速率没有显著影响($P>0.05$)。修剪后1—18d,不修剪处理的土壤呼吸略高于与对照,但差异不显著($P>0.05$)。整个修剪试验期间,不修剪处理与对照土壤温度和土壤湿度也没有显著差异($P>0.05$)(图4)。两种处理土壤呼吸速率的变化均与土壤温度的变化具有较好的一致性(图4)。在两种处理土壤呼吸速率的逐步回归分析中都只有土壤温度进入回归方程,并且土壤温度对二者土壤呼吸变化的解释程度也十分接近(表3)。

表3 对照样方(CK)和不修剪样方(UC)土壤呼吸(R_s)与土壤温度(T_s)、土壤湿度(W_{12})和交互作用的多元逐步回归结果

Table 3 Stepwise regression of soil respiration (R_s) against soil temperature (T_s), soil humidity (W_{12}) and the interactive term in control plots (CK) and unclipped plots (UC)

处理 Treatment	回归方程 Regression model	R^2	P	样本数 n
CK	$\ln(R_s) = 4.060 + 0.055 \times T_s$	0.62	<0.05	8
UC	$\ln(R_s) = 3.597 + 0.070 \times T_s$	0.57	<0.05	8

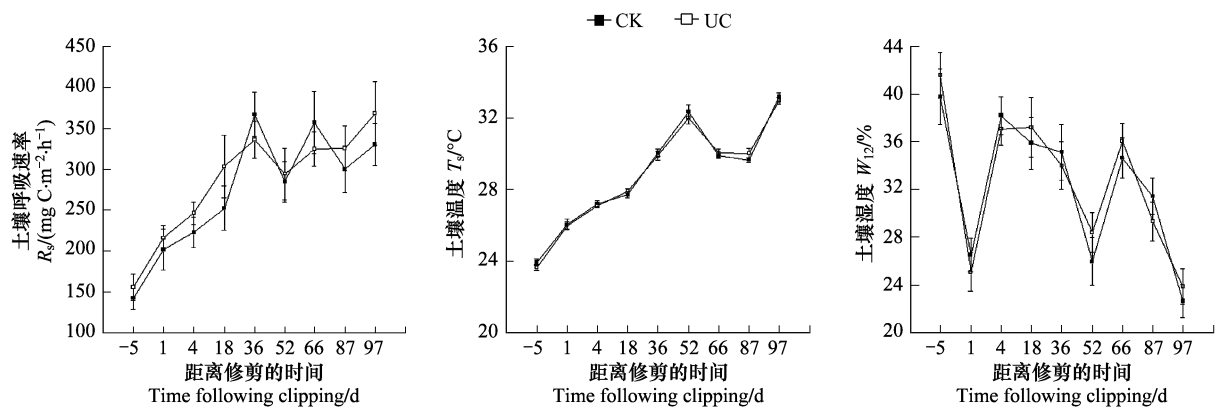


图4 修剪前后对照样方(CK)与不修剪样方(UC)土壤呼吸(R_s)、土壤温度(T_s)和土壤湿度(W_{12})的变化

Fig. 4 Variation of soil respiration (R_s), soil temperature (T_s) and soil humidity (W_{12}) in control plots (CK) and unclipped plots (UC) before and after clipping

2.4 浇水对土壤呼吸的影响

与不浇水处理相比,对照样方土壤呼吸速率在浇水后显著升高($P<0.01$),但浇水后第3天二者则无显著差异($P>0.05$)(图5)。在浇水当天和第2天,对照土壤呼吸分别比不浇水处理高38%和41%。对照样方土壤温度在浇水当天及浇水后第2天显著低于不浇水样方($P<0.01$),此后二者温度无显著差异(图5),而浇水造成对照样方土壤湿度的显著升高($P<0.01$),直到浇水后第4天才无显著差异(图5)。逐步回归分析发现,仅土壤温度进入了不浇水处理土壤呼吸的逐步回归方程。然而在对照样方,土壤温度与土壤湿度的交互作用优先进入了回归方程,解释土壤呼吸93%的变化(表4)。

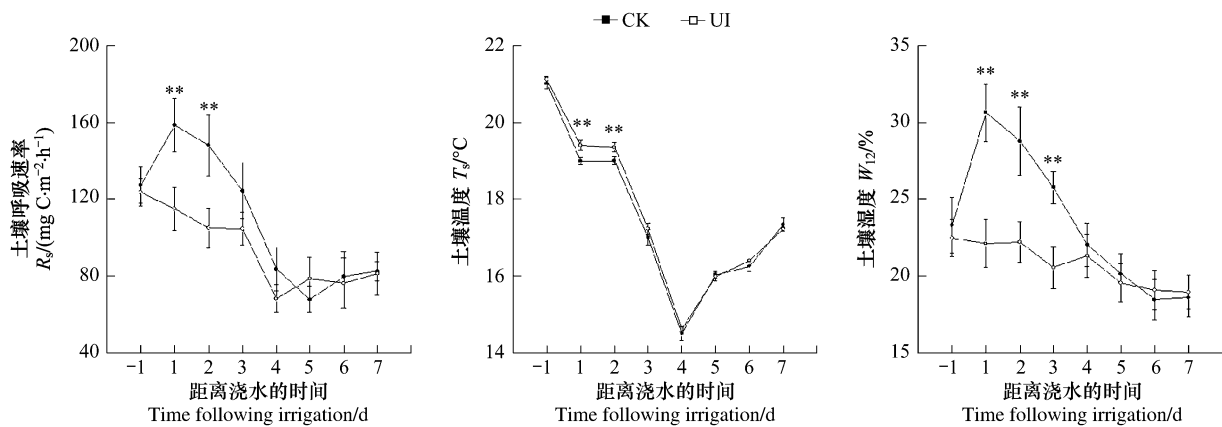


图5 浇水前后对照样方(CK)与不浇水样方(UI)土壤呼吸(R_s)、土壤温度(T_s)和土壤湿度(W_{12})的变化

Fig. 5 Variation of soil respiration (R_s), soil temperature (T_s) and soil humidity (W_{12}) in control plots (CK) and unirrigated plots (UI) before and after irrigation

表4 对照样方(CK)和不浇水样方(UI)土壤呼吸(R_s)与土壤温度(T_s)、土壤湿度(W_{12})和交互作用的多元逐步回归结果

Table 4 Stepwise regression of soil respiration (R_s) against soil temperature (T_s), soil humidity (W_{12}) and the interactive term in control plots (CK) and unirrigated plots (UI)

处理 Treatment	回归方程 Regression model	R^2	P	样本数 n
CK	$\ln(R_s) = 3.505 + 0.003 \times T_s \times W_{12}$	0.93	<0.01	7
UI	$\ln(R_s) = 2.715 + 0.103 \times T_s$	0.82	<0.01	7

3 讨论

3.1 土壤呼吸季节动态及年通量

沟叶结缕草草坪土壤呼吸的季节动态总体呈现为一个单峰曲线,现有为数不多的美国草坪土壤呼吸的研究报道^[7-8]以及亚热带草地的研究结果^[12]与本研究结果相似。草坪土壤呼吸速率日均值的季节变化幅度为 $329.51 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,明显高于我国天然草地类型的变化幅度(表 5)。原因主要是福州市地处亚热带,夏季高温多雨,促进了植物根系的新陈代谢和土壤微生物的活动,使得草坪夏季土壤呼吸速率峰值高达 $368.50 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,远高于上述天然草地的研究结果,但最小值的之间差异又相对较小(表 5)。

全年草坪土壤呼吸通量为 $1684 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,高于全球温带和热带草原土壤呼吸年通量的平均值(分别为 $389.80 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $601.28 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),也高于已报道的全球草地土壤呼吸年通量的上限($1004 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[15],与相同气候带的其他植被生态系统相比也较高,如格氏栲天然林($1374 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[16]、杉木人工林($454 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[16]、红树林湿地($1313 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[17]。草坪土壤呼吸年通量较高主要是由于草坪的管理措施解除了草坪的生长限制,尤其是水分和养分的限制^[8]。但本研究结果低于美国菲尼克斯市草坪($2736 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[7]以及拉里默尔县草坪($2777 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[8]的土壤呼吸年通量,这主要与美国草坪施肥量较大有关。以美国拉里默尔县为例,草坪建坪后每年进行两次施肥,施肥总量为 110 kg N/hm^2 ^[8],比本研究草坪铺设时施加的基肥量还高。

表 5 不同草地生态系统土壤呼吸季节变化幅度的比较

Table 5 Comparison of seasonal range of soil respiration of different grasslands

生态系统 Type of ecosystems	MAT/ ℃	MAP/ mm	$R_{s \text{ min}} /$ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	$R_{s \text{ max}} /$ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	$R_{s \text{ range}} /$ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	参考文献 Reference
贝加尔针茅草原 <i>Stipa baicalensis</i> grassland	-1.4	>450	8.6	259.2	250.6	[18]
羊草草原 <i>Aneurolepidium chinense</i> grassland	-0.3—1	350—450	-4.3	142.6	146.9	[18]
大针茅草原 <i>Stipa grandis</i> grassland	-0.3—1	350—450	-25.9	138.2	164.2	[18]
克氏针茅草原 <i>Stipa krylovii</i> grassland	1—2	250—350	-4.3	43.2	47.5	[18]
亚高山草地 sub-alpine grassland	0.5	435	13.39	301.54	288.14	[19]
高寒矮蒿草甸 <i>Kobresia humilis</i> alpine meadow	-1.9	618	13.0	194.4	181.4	[20]
草坪 <i>Zoysia matrella</i> turfgrass	19.6	1344	38.88	368.50	329.62	本研究

MAT: 年平均气温 Annual mean of air temperature; MAP: 年平均降水量 Annual mean of precipitation; $R_{s \text{ min}}$: 土壤呼吸季节变化的最小值 The minimum of seasonal range of soil respiration; $R_{s \text{ max}}$: 土壤呼吸季节变化的最大值 The maximum of seasonal range of soil respiration; $R_{s \text{ range}}$: 土壤呼吸的季节变化幅度 The seasonal range of soil respiration

3.2 生物量和土壤温度共同驱动土壤呼吸的季节变化

植物的生长可以通过影响根系呼吸、凋落物数量和质量以及土壤微环境等,从而影响土壤呼吸^[21],而植物生长自身也与气候因子密切相关^[22]使得植物因子和气候因子(特别是温度和水分)对土壤呼吸的影响具有明显的交互作用^[23]。本研究中,草坪土壤呼吸的季节变化的绝大部分(90%)可以由土壤温度与总生物量共同解释,尽管与两个因素单独对土壤呼吸变化的解释程度(88%—89%)接近,但在逐步回归分析中,仅二者的交互作用进入了土壤呼吸的回归方程。这说明草坪土壤呼吸的季节变化主要受土壤温度与植物生长共同驱动,并且草坪植物的生长与温度紧密相关。韩广轩等在中亚热带水稻田的研究也发现,地下生物量与土壤温度的交互作用控制着土壤呼吸的季节变化^[24]。但目前对于植物因子和气候因子对土壤呼吸的交互影响还存在争议。Raich 和 Tufekcioglu 通过分析全球不同植被群落的土壤呼吸数据发现,植被初级净生产力与土壤呼吸显著相关,认为这种相关关系是由植物因子与气候因子之间的相关性引起的^[21]。而 Valentini 等^[25]和 Janssens 等^[26]认为,植被生产力对土壤呼吸存在直接影响并且比气候因子的影响更为重要。另外,也有研究认为植物因子和气候因子对土壤呼吸的影响同等重要,呈现为一种紧密耦合的交互作用^[27]。由此可见,尽管研究者已经认识到土壤呼吸受植物因子与气候因子共同影响,但是关于二者交互作用对土壤呼吸的影响机制还缺乏深入理解。因此,还需加强土壤呼吸与植物因子、气候因子的长期同步定位观测,从而增进各因子对土

壤呼吸影响机理的理解,为构建土壤呼吸的机理模型提供科学依据。

3.3 修剪和浇水对土壤呼吸的影响

本研究表明,修剪对草坪土壤呼吸速率在短期内(3个月)无显著影响,这与美国高草草原^[11]、柳枝稷草地^[28]和明尼苏达州混合草原^[29]在修剪后土壤呼吸出现明显下降的结果不同,这可能与修剪后草屑是否归还有关。上述研究认为,修剪造成土壤速率降低的主要原因是,修剪后冠层的光合产物减少进而导致土壤根系呼吸降低^[11, 28-29]。然而,在归还草屑的修剪模式下,草屑归还后的分解过程会使土壤微生物量在短期内显著增加^[30],并增强土壤几丁质酶、木质素酶和葡萄糖苷酶等的活性^[31],从而对土壤呼吸速率起到补偿。此外,修剪措施会刺激根系生长,造成根系呼吸一定程度的增加^[32]。美国俄克拉荷马州 C₄ 草原在归还草屑的修剪模式下也发现与本研究相似的现象,修剪对土壤呼吸速率在短期内无明显影响^[33]。

在秋末无雨时期,浇水当天与第2天对照样方土壤呼吸速率比不浇水样方明显升高约40%,至浇水后第3天开始二者则无显著差异,并且浇水试验期间恰巧遇到强降温天气,从浇水前1天至浇水后第3天,土壤温度降低了约5℃。这表明,土壤湿度增加对土壤呼吸的促进作用掩盖了同期降温的影响。浇水后,土壤水分下渗可置换出土壤孔隙中 CO₂ 气体^[34],并导致根系^[35]和微生物的活性增加^[36],从而引起土壤呼吸速率升高。在热带草原^[37]和亚热带草原^[12]也有观测到土壤呼吸对水分突增的脉冲响应。而在亚马逊热带湿润草原却发现在突发大降雨后土壤呼吸却受明显的抑制^[38]。这主要与土壤水分增加前土壤自身湿度高低有关。张丽华等在荒漠群落的人工模拟降水试验得出,5 mm 降水处理后土壤呼吸速率出现明显下降,而2.5 mm 处理的呼吸速率下降不明显^[39]。周萍等认为在特定范围内土壤湿度对土壤呼吸速率才具有促进作用,当接近田间持水量时,土壤呼吸最高,而土壤湿度过高或过低都会造成土壤呼吸速率降低^[40]。因此,浇水前土壤自身湿度的高低与浇水量的多少都会影响土壤呼吸对浇水的响应过程,今后研究中应进一步探讨草坪土壤呼吸在不同土壤水分条件和浇水量下对浇水的响应差异,从而更准确地探索浇水对草坪碳输出和碳平衡的影响机制。

4 小结

全年沟叶结缕草草坪土壤呼吸的季节动态呈单峰型变化,表现为冬季和春初(1—3月份)较低,夏季和秋初较高(6—9月份),最大值出现在8月份,全年土壤呼吸速率的变化范围在38.99—368.50 mg C·m⁻²·h⁻¹之间,年呼吸总量为1684 g C·m⁻²·a⁻¹。土壤温度、总生物量、以及二者的交互作用对土壤呼吸季节变化的解释程度接近,分别为89%、88%和90%,但仅二者的交互作用进入土壤呼吸的逐步回归方程,表明草坪土壤呼吸的季节变化主要受土壤温度与植物生长共同驱动。春末修剪措施对土壤呼吸速率没有显著影响。在秋末无雨时期,浇水措施可显著提高土壤呼吸速率,浇水后1—2d 土壤湿度增加对土壤呼吸的促进作用掩盖了同期降温的影响。

致谢:本研究得到福州市闽江南江滨公园管理处的大力协作和支持,同时感谢高人教授、方长明教授及张耀启教授在论文撰写中给予的指导和帮助。

References:

- [1] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11): 1625-1635.
- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81-99.
- [3] 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.
- [4] Pouyat R, Groffman R, Yesilonis I, Hernandez L. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution*, 2002, 116 (Supplement 1): 107-118.
- [5] Zheng X Y, Jia T F, Ni S C. A quantitative study on human eco-processes in the regional urbanization based on land use and cover change: a case study of a typical urbanization sample zone in Shanghai. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 260-269.
- [6] Milesi C, Running S W, Elvidge D C, Dietz J B, Tuttle B T, Nemani R R. Mapping and modeling the biogeochemical cycling of turfgrasses in the

- United States. *Environmental Management*, 2005, 36(3): 426-438.
- [7] Green D M, Olesyszyn M. Enzyme activities and carbon dioxide flux in a Sonoran Desert urban ecosystem. *Soil Science Society of America*, 2002, 66(6): 2002-2008.
- [8] 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.
- [9] Han L B. Chinese turf industry form crazy to rational. *China Flowers & Horticulture*, 2005, 10(5): 32-33.
- [10] Ren J Z. Lawn industry, a great course of the people, by the people and for the people in our country: A presentation in VII national congress and XI symposium of the lawn professional committee of chinese grassland society. *Acta Agrestia Sinica*. 2008, 16(6): 545-546.
- [11] Bremer D J, Ham J M, Owensby C E, Knapp A K. Responses of soil respiration to clipping and grazing in a tallgrass prairie. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(6): 1539-1548.
- [12] McCulley R L, Boutton T W, Archer S R. Soil respiration in a subtropical savanna parkland: response to water additions. *Soil Science Society of America*, 2007, 71(3): 1-9.
- [13] IPCC, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories in Agriculture, Forestry and Other Land Use, 2006.
- [14] Wang C K, Bond-Lamberty B, Gower S T. Soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce fire chronosequence. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 108(D3), doi: 10.1029/2001JD000861.
- [15] Wang W, Fang J Y. Soil respiration and human effects on global grasslands. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(1/2): 20-28.
- [16] Yang Y S, Chen G S, Wang X G, Xie J S, Gao R, Li Z, Jin Z. Response of soil CO₂ efflux to forest conversion in subtropical zone of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1684-1690.
- [17] Kang W X, Zhao Z H, Tian D L, He J N, Deng X W. CO₂ exchanges between mangrove- and shoal wetland ecosystems and atmosphere in Guangzhou. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12): 2605-2610.
- [18] Dong Y S, Qi Y C, Liu J Y, Geng Y B, Domroes M, Yang X H, Liu L X. The soil respiration Characteristics of 4 grasslands under different amounts of precipitation. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(5): 473-480.
- [19] Chang Z Q, Shi Z M, Feng Q, Su Y H. Temporal variation of soil respiration on sloping pasture of Heihe River bas in and effects of temperature and soil moisture on it. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1603-1606.
- [20] Zhang J X, Cao G M, Zhou D W, Hu Q W, Zhao X Q. The carbon storage and carbon cycle among the atmosphere, soil, vegetation and animal in the Kobresia humilis alpine meadow ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 627-634.
- [21] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [22] Zhang C Q, Yang C. Simulation and correlatlon analysls of meteorogogcal factors and growing dynamic of plants in growing season. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2009, 30(1): 91-96.
- [23] Reichstein M, Rey A, Freibauer A, Tenhunen J, Valentini R, Banza J, Casals P, Cheng Y, Grunzweig J M, Irvine J. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4), 1104, doi:10.1029/2003GB002035.
- [24] Han G X, Zhu B, Jiang C S. Soil respiration and its controlling factors in rice fields in the hill region of the central Sichuan basin. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(3): 450-456.
- [25] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, Schulze E D, Rebmann C, Moors E J, Granier A, Gross P, Jensen N O, Pilegaard K, Lindroth A, Grelle A, Bernhofer C, Grünwald T, Aubinet M, Ceulemans R, Kowalski A S, Vesala T, Rannik Ü, Berbigier P, Loustau D, Guömundsson J, Thorgeirsson H, Ibrom A, Morgenstern K, Clement R, Moncrieff J, Montagnani L, Minerbi S, Jarvis P G. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, 404: 861-865, doi:10.1038/35009084.
- [26] Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G, Kowalski A S, Buchmann N, Epron D, Pilegaard K, Kutsch W, Longdoz B, Gruenwald T, Montagnani L, Dore S, Rebmann C, Moors E J, Grelle A, Rannik U, Morgenstern K, Oltchev S, Clement R, Gumundsson J, Minerbi S, Berbigier P, Ibrom A, Moncrieff J, Aubinet M, Bernhofer C, Jensen N O, Vesala T, Granier A, Schulze E, Lindroth A, Dolman A J, Jarvis P G, Ceulemans R, Valentini R. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 269-278.
- [27] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biolosy*, 2003, 9(6): 911-918.
- [28] Ma Z, Wood C W, Bransby D I. Carbon dynamics subsequent to establishment of switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, 2000, 18(2): 93-104.
- [29] Craine F M, Wedin D A. Determinants of growing season soil CO₂ flux in a Minnesota grassland. *Biogeochemistry*, 2002, 59(3): 303-313.
- [30] Shi W, Muruganandam S, Bowman D. Soil microbial biomass and nitrogen dynamics in a turfgrass chronosequence: A short-term response to turfgrass clipping addition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(8): 2032-2042.
- [31] Yao H, Bowman D, Rufty T, Shi W. Interactions between N fertilization, grass clipping addition and pH in turf ecosystems: Implications for soil

enzyme activities and organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1425-1432.

- [32] Wan S, Hui D, Wallace L, Luo Y. Direct and indirect warming effects on ecosystem carbon processes in a tallgrass prairie. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19, GB2014, doi: 10.1029/2004GB002315.
- [33] Zhou X H, Wan S Q, Luo Y Q. Source components and interannual variability of soil CO₂ efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, 2007, 13 (4): 761-775.
- [34] Smart D R, Peñuelas J. Short-term CO₂ emissions from planted soil subject to elevated CO₂ and simulated precipitation. *Applied Soil Ecology*, 2005, 28(3): 247-257.
- [35] Bouma T J, Nielsen K L, Eissenstat D M. Estimating respiration of root s in soil: Interactions with soil CO₂, soil temperature and soil water content. *Plant and Soil*, 1997, 195(2): 221-232.
- [36] Gullledge J, Schimel J P. Moisture control over atmospheric CH₄ consumption and CO₂ production in diverse Alaskan soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(8): 1127-1132.
- [37] Vasconcelos S S, Zarin D J, Capanu M, Littell R, Davidson E A, Ishida F Y, Santos E B, Araújo M M, Arag o D V, Rangel-Vasconcelos L G T, Oliveira F D A, McDowell W H, Carvalho C J R. Moisture and substrate availability constrain soil trace gas fluxes in an eastern Amazonian regrowth forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18, GB2009, doi:10.1029/2003GB002210.
- [38] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, Ackerman I L, Carvalho J E M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biochemistry*, 2000, 48(1): 53-69.
- [39] Zhang L H, Chen Y N, Li W H, Zhao R F, Hua Y H. Responses of soil respiration to artificial rainfall in two desert communities in Junngar Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 2819-2826.
- [40] 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.

参考文献:

- [3] 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.
- [5] 郑辛酉, 贾铁飞, 倪少春. 基于区域城市化 LUCC 的人类生态过程定量研究——以上海市区典型城市化样带为例. *生态学报*, 2007, 27(1): 260-269.
- [9] 韩烈保. 中国草坪业从狂热进入理性. *中国花卉园艺*, 2005, 10(5): 32-33.
- [10] 任继周. 草坪业是我国全民共有、全民共建、全民共享的伟大事业——在中国草学会草坪专业委员会第七届全国代表大会暨十一届学术研讨会上的发言. *草地学报*, 2008, 16(6): 545-546.
- [16] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 谢锦升, 高人, 李震, 金钊. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响. *生态学报*, 2005, 25(7): 1684-1690.
- [17] 康文星, 赵仲辉, 田大伦, 何介南, 邓湘雯. 广州市红树林和滩涂湿地生态系统与大气二氧化碳交换. *应用生态学报*, 2008, 19(12): 2605-2610.
- [18] 董云社, 齐玉春, 刘纪远, 耿元波, Domroes M, 杨小红, 刘立新. 不同降水强度 4 种草地群落土壤呼吸通量变化特征. *科学通报*, 2005, 50(5): 473-480.
- [19] 常宗强, 史作民, 冯起, 苏永红. 黑河流域山区牧坡草地土壤呼吸的时间变化及水热因子影响. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1603-1606.
- [20] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 胡启武, 赵新全. 高寒矮嵩草草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环. *生态学报*, 2003, 23(4): 627-634.
- [22] 张彩琴, 杨持. 生长季内草原植物生长动态与气象因子的相关分析及其模拟研究. *内蒙古农业大学学报自然科学版*, 2009, 30(1): 91-96.
- [24] 韩广轩, 朱波, 江长胜. 川中丘陵区水稻田土壤呼吸及其影响因素. *植物生态学报*, 2006, 30(3): 450-456.
- [39] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 赵锐锋, 花永辉. 准噶尔盆地两种荒漠群落土壤呼吸速率对人工降水的响应. *生态学报*, 2009, 29(6): 2819-2826.
- [40] 周萍, 刘国彬, 薛莲. 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. 8 April, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

The relationship between <i>Populus euphratica</i> 's radial increment and groundwater level at the lower reach of Tarim River	AN Hongyan, XU Hailiang, YE Mao, et al (2053)
Influence of elevation factor on soil profile texture configuration: a case study of the alluvial plain of Fengqiu County	TAN Manzhi, MI Shuxiao, LI Kaili, et al (2060)
Effects of ozone on AsA-GSH cycle in soybean leaves	WANG Junli, WANG Yan, ZHAO Tianhong, et al (2068)
The effects of physical and chemical factors on the growth and lipid production of <i>Chlorella</i>	ZHANG Guiyan, WEN Xiaobin, LIANG Fang, et al (2076)
Response of net productivity of masson pine plantation to climate change in North Subtropical Region	CHENG Ruimei, FENG Xiaohui, XIAO Wenfa, et al (2086)
Soil respiration of <i>Zoysia matrella</i> turfgrass in subtropics	LI Xibo, YANG Yusheng, ZENG Hongda, et al (2096)
Effect of UV-B radiation on the leaf litter decomposition and nutrient release of <i>Pinus massoniana</i>	SONG Xinzhang, ZHANG Huiling, JIANG Hong, et al (2106)
Physiological ecological effect of endophyte infection on <i>Achnatherum sibiricum</i> under drought stress	HAN Rong, LI Xia, REN Anzhi, et al (2115)
Zinc Tolerance and Accumulation Characteristics of <i>Armillaria mellea</i>	ZHU Lin, CHENG Xianhao, LI Weihuan, et al (2124)
Expansion strategies of <i>Caragana stenophylla</i> in the arid desert region	ZHANG Jianhua, MA Chengchang, LIU Zhihong, et al (2132)
Effects of mixed plant residues from the Loess Plateau on microbial biomass carbon and nitrogen in soil	WANG Chunyang, ZHOU Jianbin, XIA Zhimin, et al (2139)
Survival strategy of <i>Stipa krylovii</i> and <i>Agropyron cristatum</i> in typical steppe of Inner Mongolia	SUN Jian, LIU Miao, LI Shengcong, et al (2148)
Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in <i>Salix psammophila</i> root-zone soil in Inner Mongolia desert	HE Xueli, YANG Jing, ZHAO Lili (2159)
An experimental study on the the effects of different diurnal warming regimes on single cropping rice with Free Air Temperature Increased (FATI) facility	DONG Wenjun, DENG Aixin, ZHANG Bin, et al (2169)
Endophytic bacterial diversity in <i>Achnatherum inebrians</i> by culture-independent approach	ZHANG Xuebing, SHI Yingwu, ZENG Jun, et al (2178)
Hierarchical Partial Least Squares (Hi_PLS) model analysis of the driving factors of Henan's Ecological Footprint (EF) and its development strategy	JIA Junsong (2188)
Evaluation on spatial distribution of soil salinity and soil organic matter by indicator Kriging in Yucheng City	YANG Qiyong, YANG Jinsong, YU Shipeng (2196)
The toxicity of lupeol of <i>Inula britannica</i> on <i>Tetranychus cinnabarinus</i> and its effects on mite enzyme activity	DUAN Dandan, WANG Younian, CHENG Jun, et al (2203)
Abundance and biodiversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in littoral wetland of Baiyangdian Lake, North China	YE Lei, ZHU Guibing, WANG Yu, et al (2209)
Changes of leaf water potential and water absorption potential capacities of six kinds of seedlings in Karst mount area under different drought stress intensities: Taking six forestation seedlings in karst Mountainous region for example	WANG Ding, YAO Jian, YANG Xue, et al (2216)
Comparison of structure and species diversity of <i>Eucalyptus</i> community	LIU Ping, QIN Jing, LIU Jianchang, et al (2227)
Ecosystem services valuation of the Haihe River basin wetlands	JIANG Bo, OUYANG Zhiyun, MIAO Hong, et al (2236)
Effects of <i>Phragmites australis</i> on methane emission from a brackish estuarine wetland	MA Anna, LU Jianjian (2245)
Genetic differentiation and the characteristics of uptake and accumulation of lead among <i>Camellia sinensis</i> populations under different background lead concentrations of soils in Yunnan, China	LIU Shengchuan, DUAN Changqun, LI Zhenhua, et al (2253)
Comparison of zooplankton lists between <i>Coilia mystus</i> food contents and collections from the Yangtze River Estuary & Hangzhou Bay	LIU Shouhai, XU Zhaoli (2263)
Reconstruction and analysis of July-September precipitation in Mt. Dagangshan, China	QIAO Lei, WANG Bing, GUO Hao, et al (2272)
Analysis on economic and ecological benefits of no-tillage management of <i>Carya cathayensis</i>	WANG Zhengjia, HUANG Xingzhao, TANG Xiaohua, et al (2281)
GIS-based analysis of the accessibility of urban forests in the central city of Guangzhou, China	ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (2290)
Review and Monograph	
Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration	YANG Qingpeng, XU Ming, LIU Hongsheng, et al (2301)
The advance of allometric studies on plant metabolic rates and biomass	CHENG Dongliang, ZHONG Quanlin, LIN Maozi, et al (2312)
Practice and the research progress on eco-compensation for cultivated land	MA Aihui, CAI Yinying, ZHANG Anlu (2321)
Discussion	
Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou	LIU Jie, LI Xianwei, JI Zhonghua, et al (2331)
Scientific Note	
Effects of secondary, micro- and beneficial elements on rice growth and cadmium uptake	HU Kun, YU Hua, FENG Wenqiang, et al (2341)

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 8 期 (2011 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 8 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@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 70.00 元