

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 2012

中国生态学学会

中国科学院生态环境研究中心

科学出版社

主办

出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报 (SHENTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 22 期 2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

CO ₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用	牛晓莹, 程凯, 荣茜茜, 等	(6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局	陈军, 王玉辉	(6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析	李敏, 张小洪, 李远伟, 等	(6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性	赵成章, 任珩	(6946)
地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响	刘亚迪, 范少辉, 蔡春菊, 等	(6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量	郝兴华, 洪伟, 吴承祯, 等	(6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系	柯磊, 施晓丽, 邹运鼎, 等	(6972)
大兴安岭林区 10 小时时滞可燃物湿度的模拟	胡天宇, 周广胜, 贾丙瑞	(6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征	李文斌, 李新平	(6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析	唐罗忠, 葛晓敏, 吴麟, 等	(7000)
黄河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系	鱼腾飞, 冯起, 刘蔚, 等	(7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应	梅婷婷, 赵平, 倪广艳, 等	(7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响	于文清, 刘万学, 桂富荣, 等	(7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例	王树东, 张立福, 陈小平, 等	(7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响	杨玉莲, 吴福忠, 杨万勤, 等	(7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响	王唯逍, 刘小军, 田永超, 等	(7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性	曹宇, 徐晔, 王秋玉	(7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响	陈雯, 李涛, 郑荣泉, 等	(7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响	张向前, 黄国勤, 卞新民, 等	(7082)
接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响	张宇亭, 朱敏, 线岩相洼, 等	(7091)
大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系	柯志新, 黄良民, 徐军, 等	(7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化	李大命, 叶琳琳, 于洋, 等	(7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响	杨洪, 黄志勇	(7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究	邱寿丰, 朱远	(7124)
能源活动 CO ₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择	杨喜爱, 崔胜辉, 林剑艺, 等	(7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估	李京梅, 刘铁鹰	(7146)
县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例	王红岩, 高志海, 李增元, 等	(7156)
专论与综述		
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展	李涛, 杜娟, 郝志鹏, 等	(7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述	罗上华, 毛齐正, 马克明, 等	(7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述	董泰锋, 蒙继华, 吴炳方	(7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展	吴明丽, 李叙勇	(7202)
浮游动物化学计量学稳定性特征研究进展	苏强	(7213)
研究简报		
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量	于莹, 张武昌, 张光涛, 等	(7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究	杨锡涛, 周学红, 张伟	(7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响	王意锟, 方升佐, 田野, 等	(7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性	陈永华, 吴晓英, 张珍妮, 等	(7247)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-11		



封面图说: 水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球,第四纪冰期以后,水杉属的其他种类全部灭绝,水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存,成为旷世奇珍,野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水,适应力强,生长极为迅速,其树干通直挺拔,高大秀颀,树冠呈圆锥形,姿态优美,自发现后被人们在中国南方广泛种植,不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物,更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样,为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

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

DOI: 10.5846/stxb201110091478

罗上华,毛齐正,马克明.城市土壤碳循环与碳固持研究综述.生态学报,2012,32(22):7177-7189.

Luo S H, Mao Q Z, Ma K M, Wu J G. A review of carbon cycling and sequestration in urban soils. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7177-7189.

城市土壤碳循环与碳固持研究综述

罗上华¹,毛齐正¹,马克明^{1,*},邬建国^{2,3}

(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. 内蒙古大学中美生态、能源及可持续性科学研究中心,呼和浩特 010021;

3. 美国亚利桑那州立大学生命科学学院和全球可持续性科学研究所, Tempe, AZ, USA)

摘要:城市化过程带来的土地利用变化和环境污染是全球变化的重要方面,城市为人们了解人类与自然复合生态系统对全球变化的影响及其对全球变化的响应过程提供一个独特的“天然实验室”。陆地生态系统碳循环是全球变化研究的热点领域之一,然而,人们对城市在全球碳循环中的作用和影响知之甚少,城市土壤碳循环研究处于起步阶段。介绍了城市土壤的主要特性和碳循环特征,指出强烈的人为作用是其最突出的特点;综述了城市土壤碳库、碳通量和碳固持研究方面取得的进展;探讨了城市化过程中土地利用变化、土壤中生物及土壤管护措施、城市小气候、大气污染沉降和土壤污染等对土壤碳循环的影响;提出未来城市碳循环研究需要开展长期系统监测、深化城市土壤碳循环机制研究、创新研究范式和研究方法、并将研究成果与城市景观规划与设计相结合,提升城市土壤碳管理能力。

关键词:城市土壤; 碳循环; 土壤有机碳; 碳固持

A review of carbon cycling and sequestration in urban soils

LUO Shanghua¹, MAO Qizheng¹, MA Keming^{1,*}, WU Jianguo^{2,3}

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

2 Sino-US Center for Conservation, Energy, and Sustainability Science, Inner Mongolia University, Hohhot, 010021, China

3 School of Life Sciences and Global Institute of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, USA

Abstract: The world urban population and urbanized land areas have increased dramatically in the past several decades. Land use/cover change and environmental pollution due to urbanization represent a major aspect of global change. Cities also provide a unique “natural laboratory” for understanding how socioecological systems affect, and respond to, global change. Carbon cycle in terrestrial ecosystem is one of the key topics in global change research, and urbanization alters carbon cycle as well as other biogeochemical cycles on local, regional, and global scales. However, the role of cities in the global carbon cycle is still poorly understood, and urban soil carbon biogeochemistry is still in its infant stage. In this paper, we review the major properties of urban soils and the dynamic characteristics of carbon cycling in cities, all of which are strongly influenced by anthropogenic impacts. Specifically, we discuss urban soil carbon pools, carbon fluxes and carbon sequestration and various effects on soil biogeochemical cycling of a suite of urbanization-related factors, including land use change, soil organisms, management practices, urban microclimate, atmospheric pollution deposition, and soil pollution. Because of the complex interactive effects of human activity and environmental factors, urban soil carbon pools and fluxes are highly variable in space and time. This spatiotemporal heterogeneity in urban soil carbon dynamics is attributable mainly to parent materials and anthropogenic disturbances, but little is known about the underlying causes and mechanisms. Human activities (e.g., soil mixing, compaction, soil sealing, and importing man-made substrates, and soil

基金项目:“十一五”科技支撑计划项目(2007BAC28B01);城市与区域生态国家重点实验室自主项目

收稿日期:2011-10-09; 修订日期:2012-06-14

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

management practices inputs) directly alter soil carbon stocks and carbon cycling. Urban environmental factors, including urban heat island effect, elevated CO₂ dome, atmospheric deposition of pollutants, soil pollution, and introduction of exotic species, may also affect soil carbon cycling. Existing studies show a wide range of variations in urban soil C densities among cities. Urban soils may have higher or lower soil organic carbon (SOC) stocks, depending on their sources and treatment. It remains unclear whether urbanization increases or decreases soil C pools. Some previous studies show that urban soils accumulate more SOC at a higher rate than agricultural fields or native grasslands, suggesting that urban soils have a high potential for carbon sequestration, especially in urban greenspace where horticulture management practices promote SOC accumulation. But greenhouse gases emissions generated by management practices also can be a significant factor that offsets the C sequestration potential of urban greenspace. To maximize benefits of urban soil carbon sequestration, better soil management practices need to be designed and implemented. Better understanding interactions between natural and anthropogenic components of the urban carbon cycle and the whole spectrum of urban soil carbon pools and fluxes is necessary for develop more appropriate management policies to reduce urban carbon footprints. So we urge for further studies on urban soil carbon biogeochemistry, particularly, in rapidly urbanizing areas of China. Four priority areas for future research are proposed: (1) establishing long-term study sites for monitoring and studying urban soil carbon cycling; (2) focusing on mechanistic studies of urban soil carbon cycling, (3) developing new methods for urban soil ecology; and (4) incorporating urban soil carbon chemistry into urban landscape planning and design to promote urban soil carbon management.

Key Words: urban soils; carbon cycle; soil organic carbon; carbon sequestration

世界上超过 50% 的人口生活在城市,预计 2050 年城市人口将接近全球人口的 70%,且新增城市人口主要在发展中国家,尽管城市用地面积不到陆地总面积的 3%,未来城市用地的扩张速度远高于城市人口增长^[1]。城市化使越来越多的自然用地和农业用地转变为城市,深刻地改变着生态系统的结构和功能,其生态足迹甚至超过城市自身面积的几十至几百倍。城市化在城市、区域乃至全球尺度上对生态系统造成重大影响,也为人们理解社会-自然复合生态系统的生态过程及其对全球变化的响应提供了很好的研究范例^[2-3]。

在陆地乃至全球尺度上,土壤碳库的微小变化显著影响着全球碳循环过程,因此土壤碳循环研究是全球变化研究最受关注的领域之一^[4]。城市化过程引起土壤物化性质和生物特征的改变,对土壤地球化学循环特别是碳循环产生了深刻影响^[5-6]。随着全球变化和城市生态学研究的深入,关于城市土壤碳库及其变化的研究日益受到关注,但是相对于其他陆生生态系统,城市土壤碳循环和碳固持方面的研究还很少^[7-8]。这种由人类活动主导的剧烈环境变化所驱动的土壤环境演化及其生态响应仍是一个尚未系统回答的科学问题,这也是当前全球碳循环研究忽略城市生态系统碳循环的重要原因之一^[9-10]。

有关城市土壤地球化学循环的研究仍处于起步阶段。本文介绍了城市土壤的主要特性和碳循环特点,综述了国内外在城市土壤碳库、土壤碳通量和碳固持研究方面取得的进展,探讨了城市化过程影响土壤碳循环的主要因素,提出了该领域研究的未来发展趋势。

1 城市土壤定义及特征

城市土壤不是严格的分类学术语,它是指出现在城市和城郊地区,直接或间接受到人为影响,原有继承特性得到强度改变的土壤的总称,是一类具有高度时空异质性的人为土壤^[9, 11]。迄今尚未建立广为接受的城市土壤分类体系,2006 年国际土壤学会世界土壤资源参比基础工作组将城市土壤与工矿区土壤一并列为 Technosols 类^[12]。有研究者主张,城市土壤包括城市区域内所有受到人为干扰和未受人为干扰的土壤以及城市附近的人为干扰土壤^[13]。

与自然土壤不同,城市化过程中的人类活动直接或间接的影响土壤的形成和发育,使城市土壤的理化性质、生物特性以及生物地球化学循环等呈现不同的特点^[14]。以碳循环过程为例(图 1),人为活动影响着驱动

碳循环的各个因素,如气候、水文、大气化学、营养物、土地利用等^[6]。直接影响城市土壤碳循环的人为活动包括开发建设过程中对土壤翻动、搬运、压实、覆盖等,也包括绿地管护过程中施肥和灌溉等以及环境污染物的注入;间接影响包括热岛效应、二氧化碳升高、非本地种的引入以及大气中污染物的沉降等^[10, 15]。上述人为作用在不同程度上改变着城市土壤碳库,且人为干扰与自然因素在较长时期内多个因子同时改变、共同作用,对碳的地球化学循环产生复杂的交互影响和累积影响。

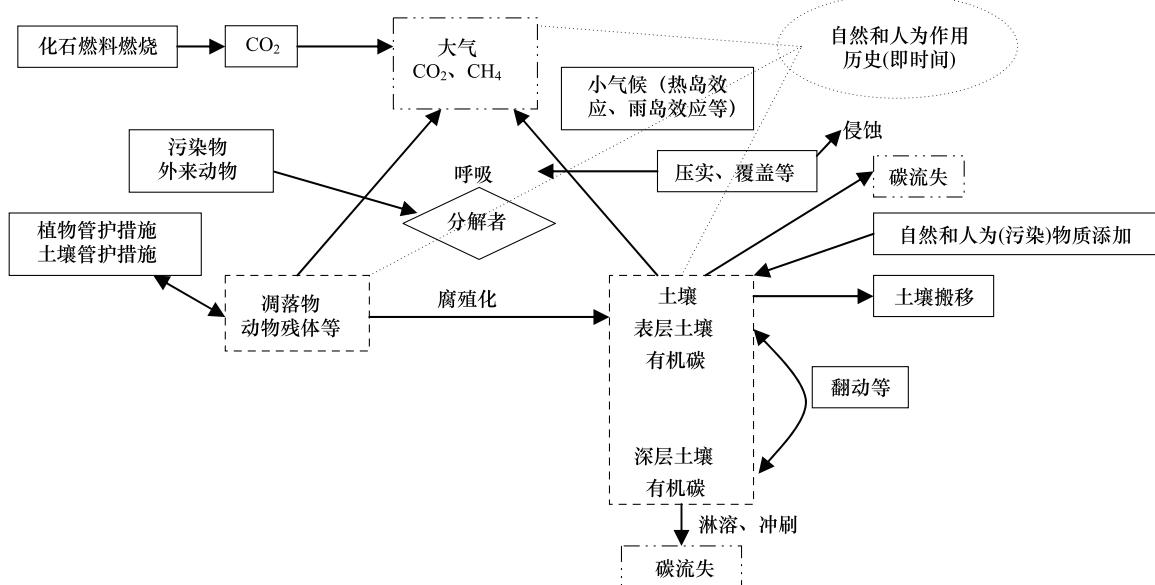


图1 城市土壤有机碳循环及城市化的主要影响(修改自文献^[10])

Fig. 1 Soil organic carbon dynamics and main effects of urbanization (Modified from^[10])

2 城市土壤碳库、碳通量和碳固持研究进展

2.1 城市土壤碳库

城市土壤中有机碳含量比农业土壤和一些自然土壤中的有机碳含量高,是城市生态系统碳循环中重要的碳库之一。美国城市土壤有机碳密度约为 $(7.7 \pm 0.2) \text{ kg/m}^2$,城市草坪土壤有机碳含量甚至比美国部分森林的土壤高^[16]。而 Churkina^[17]估算美国包括城市及郊区在内的人类住区中土壤有机碳密度约为 23—42 kg/m²,高于典型热带雨林,其总的碳贮存量约占全美国陆地碳储量的 10%。由此可见,城市在全球碳循环中具有不可忽视的地位。

城市土壤有机碳的分布与距离城市中心的距离具有相关性。美国纽约市建成区—乡村环境梯度上残存栎树林土壤对比研究表明,林地表层土壤(0—10 cm)有机质含量沿着城乡梯度变化较大,土壤有机质含量与到城市中心的距离存在显著的负相关关系,而有机碳密度与距离的相关性不显著,但有从城市到乡村逐渐下降的趋势^[18]。美国菲尼克斯城乡梯度上残存植被研究显示,*L. tridentata* 灌丛下表层土壤(0—10 cm 和 10—20 cm)有机碳沿城村梯度有相似的分布,城市地区灌丛间和林下的有机碳含量比近郊和远郊的土壤含量高,且无机碳含量也要高^[19]。我国杭州的城区表层土壤(0—10 cm 和 0—100 cm)有机碳贮量约为近郊和远郊区农业土壤的 4.3 倍和 5.7 倍^[20]。

城市建设区内不同功能区间的土壤碳库特征表现出了较大的空间异质性,不同研究者报道的差异很大。美国纽约市土壤有机碳含量最高是高尔夫球场的 28.5 kg/m²,最低的疏浚底泥堆场只有 2.9 kg/m²^[5];巴尔的摩市土壤(0—15 cm)有机碳含量为公共机构区(39.9 g/kg \pm 4.5 g/kg)和低人口密度居民区(49.2 g/kg \pm 8.5 g/kg)最高,而商业区最低(22.1 g/kg \pm 4.5 g/kg)^[21]。德国斯图加特市则是公园(3653 kg/hm² \pm 131 kg/hm²)和花园(3556 kg/hm² \pm 270 kg/hm²)最高,而铁路附近土壤(177 kg/hm² \pm 68 kg/hm²)最低^[22]。我国开封市的城市土壤(0—100 cm)有机碳密度在 6.39—11.02 kg/m² 之间,不同功能区差异表现为文教区>交通区>工业

区>休闲区>行政/居民区,而表层土壤(0—10 cm)有机碳在8.24—40.08 g/kg之间^[23];南京市道路附近土壤(21.84—37.21 g/kg)和学校土壤有机碳(10.93—26.26 g/kg)较高、公园最低(2.44—21.49 g/kg),且城区土壤中有机碳的变幅比郊区菜地变幅大^[24];而沈阳市的工业区绿地土壤有机碳比居民区和公园含量高^[25]。

城市土壤有机碳在垂直方向上分布不同于自然土壤的平缓递减规律,表现出非一致性降低的现象,深层往往含较多有机碳^[21, 26]。德国斯图加特市人为扰动大的居民区和公园深层土壤中含有较多的有机碳^[22];罗斯托克市浅层土壤(10—27 cm)有机碳含量3.0 g/kg,远低于深层土壤(50—75 cm)中的114.9 g/kg^[27]。我国城市绿地土壤有类似的发现^[28]。这是由于受人类活动扰动,城市土壤被多次翻动,导致下部土层的有机碳含量高,如果受人为扰动程度低,城市草坪土壤有机碳也随土层深度增加而降低的趋势^[29-31]。

在时间差异上,土壤碳贮存量随土壤形成时间增加而增长。美国丹佛市高尔夫草坪土壤中有机质在建成1a后增加了1.76%,20a增加3.8%^[32];丹佛博德市区土壤有机碳库(0—30 cm)建成初期下降,但之后逐渐增加,25a左右累积量达最大值,积累速率超过了城外自然草原土壤^[29];而地处干旱地区的菲尼克斯城市草坪土壤中碳的累积速率达(82 ± 30) g·m⁻²·a⁻¹^[31]。新西兰北帕默斯顿市高尔夫球场草坪表层土壤(0—25 cm)固碳速率为(69.8 ± 8) g·m⁻²·a⁻¹,建成40a土壤碳固持量最大,而这期间碳固持速率与建成时间呈负线性相关^[33]。我国杭州城区绿地土壤的总有机碳、颗粒有机碳和微生物量碳等随绿地年龄增加而增加,与人为污染密切相关的黑炭含量也呈增加趋势^[34]。Pouyat等^[35]认为,干旱地区和湿润地区的城市土壤中有机碳含量和累积速率呈现类似特征,说明城市土壤在相似管理措施等人为作用影响下,其性质有趋同效应。

城市化不仅改变土壤碳库的规模,而且改变了土壤有机质组成及土壤微生物碳的特性。美国纽约城区森林土壤中的易降解炭含量比郊区林地土壤低,而惰性碳成分较高^[36]。德国罗斯托克城市土壤中烷类和烃类有机碳含量减少,而芳香族有机碳增加^[27];斯图加特市土壤中的黑炭组分占有机碳的18%—73%^[37];建成时间越长的城市土壤中微生物量碳与总有机碳的比值越低^[38]。中国杭州城区土壤含较高比例的黑炭、颗粒态碳和较低比例的易氧化态碳^[20];南京市不同功能区土壤中黑炭与有机碳呈显著的正相关关系^[24];徐州城市道路边土壤中有较高的黑碳组分^[39]。有研究显示,城市化降低土壤微生物酶活性,土地利用类型、时间、斑块特征等对土壤微生物活性均有明显影响^[40-41]。

2.2 城市土壤碳通量

土壤呼吸是土壤中有机体和植物的地下部分产生CO₂的过程,包括土壤中微生物、动物、植物根和根茎所产生的CO₂。区域或全球尺度上的碳通量研究往往忽略城市或假定城市与其他土地利用类型有相似的碳通量,这可能是由于以城市为对象的碳通量研究较少,特别是直接测量城市化对碳通量的影响研究有限^[42]。美国菲尼克斯和巴尔的摩长期生态研究计划对城市土壤温室气体通量进行了较为系统的研究,我国上海、南京等地有少量研究。

城市土壤一般比农业土壤和自然土壤具有更高的碳通量。美国柯林斯堡城区草坪土壤呼吸维持较高速率,全年平均为(2773 ± 273) gC·m⁻²·a⁻¹,是玉米地、小麦田和天然矮草草地的2.5—5.0倍,草坪仅占研究区6.4%的面积,但其土壤呼吸占全区土壤呼吸量的24%^[43]。美国菲尼克斯城市绿地土壤呼吸值在3.16—11.37 μmol·m⁻²·s⁻¹之间,高峰出现在春季的4月和夏季的7、8月,城市绿地通量显著高于城区内残存灌丛的呼吸量^[44]。菲尼克斯不同土地利用类型的土壤呼吸变化范围为1.79—51.87 g CO₂·m⁻²·d⁻¹,草坪、高尔夫球场的碳通量比农业用地高,而填埋场的土壤呼吸最高,荒地和沙漠植被土壤呼吸量较低^[45]。但是,菲尼克斯城郊梯度上典型*L. tridentata*灌丛样地的土壤呼吸值的变幅约为38—674 mg CO₂·m⁻²·h⁻¹,乡村地区的土壤呼吸值比城区样地土壤高79%,较地处近郊的样地高49%^[19]。

纽约梯度样带研究显示,城市化降低了土壤对CH₄的吸收能力,城市土壤CO₂、CH₄的通量与土地利用方式关系密切,但与土地类型变化程度关系不密切^[46-47]。巴尔的摩长期样地CH₄通量研究表明,郊区森林具有较高的CH₄吸收能力1.68 mg·m⁻²·d⁻¹,城市森林样地只有0.23 mg·m⁻²·d⁻¹,城市草坪样地几乎不吸收CH₄,城市大气氮沉降和较高的CO₂浓度、以及施肥等因素均对CH₄的吸收有影响^[48]。

我国上海、南京、福州等地也有少量关于城市绿地土壤呼吸的研究。上海市典型城市草坪是 CO₂ 和 N₂O 的排放源,其排放强度较我国温带自然系统偏高,它同时是 CH₄ 的弱汇,且不同草坪品种之间的温室气体通量存在较大差异^[49]。草坪土壤呼吸变化范围在 0.13—9.27 μmol·m⁻²·s⁻¹,依次为百慕大草坪<黑麦草<百慕大混播草坪<结缕草草坪<狗牙根草坪^[50]。而南京市中山植物园内草坪、疏林和近自然林 3 种植被类型的土壤呼吸速率在 0.82—7.58 μmol·m⁻²·s⁻¹ 之间^[51]。福州城市草坪土壤呼吸季节变化受土壤温度和总生物量的驱动,修剪处理对土壤呼吸影响不显著,而无雨时期浇水显著提高了土壤呼吸值^[52]。

2.3 城市土壤碳固持

土壤碳固持是指采取土壤修复或推荐管理措施(RMPs)等手段以增加土壤中碳含量,这是应对全球变化的重要途径^[53]。一般认为城市是地球上最大的人为碳排放源,约占人类碳排放量的 80% 以上,同时城市也是巨大的碳库^[17, 54],但仍缺乏城市土壤是碳源还是碳汇的直接证据。

城市土壤及地上植物所固持的碳虽不足以抵消城市的碳排放量,但对减缓碳排放有积极作用。美国巴尔的摩城区草坪累积的有机碳量是郊区森林的 1.5 倍以上,城区残存森林土壤含碳量也比郊区森林高 80%^[16];丹佛市草坪土壤有机碳密度约为当地矮草草原的 2 倍,其累积速率约为 0.18 tC·hm⁻²·a⁻¹,远高于矮草草原 0.03 tC·hm⁻²·a⁻¹ 的水平^[35],建成时间 1.5—45 a 的高尔夫草坪的年固碳量约为 1.0 tC·hm⁻²·a⁻¹,建成 25—30 a 草坪土壤碳固持量最高,而 30 a 以上的草坪固碳量趋于稳定^[32]。北京 3 种常见草坪(多年生黑麦草、草地早熟禾和高羊茅草坪)仅在生长季修剪草屑累积的固碳量分别为 345.07 g C·m⁻²·a⁻¹,368.66 g C·m⁻²·a⁻¹ 和 479.17 g C·m⁻²·a⁻¹,远高于我国内蒙古典型草原年固碳水平 230 g C·m⁻²·a⁻¹^[55]。

尽管如此,绿地灌溉、施肥、修剪等管护措施所带来的碳排放,部分甚至全部抵消城市绿地的固碳效益。美国芝加哥绿地的碳清单核算显示,城市绿地土壤和乔木是净碳汇,但草坪管护中的碳排放量是草坪碳固持量的 1.5 倍^[56]。草坪管护过程中剪草机械燃油直接排放以及灌溉、施肥等间接产生的温室气体量大于草坪固持碳量^[57]。高尔夫球场管护的碳排放强度情况大约为 14.15 Mg C,而若按照平均 91.4 a 寿命核算其碳固持能力大约为 0.44 Mg C·hm⁻²·a⁻¹;管护中的碳排放使高尔夫球场在 30 a 内仍是温室气体排放源^[58]。Bartlett 等^[59]采用生命周期法建立的模型估算认为高尔夫球场是温室气体的汇,两个典型案例的碳汇分别为 (-5.4±0.9) Mg CO₂e hm⁻² a⁻¹ 和 (-1.6±0.3) Mg CO₂e hm⁻² a⁻¹。由此可见,城市土壤碳固持具有很大的不确定性,如何提升城市土壤的固碳潜力,仍需深入研究。

综上所述,在人为作用占主导的各类因子复合影响下,城市化地区土壤的空间格局呈现为典型的土壤镶嵌体特征,即在不同功能区之间具有很大的时空异质性。城市土壤中有机碳含量比农业土壤以及一些自然土壤含量高,土壤呼吸量一般也比原有土地类型的呼吸值要大,且变化幅度很大;随着建成时间延长土壤碳累积现象明显、土壤呼吸量逐渐降低;在碳的组成特征上表现为,化学性质上稳定、具芳香结构的黑炭含量较高,而微生物组成及活性差异很大。

3 城市化影响土壤碳循环的主要因素

3.1 土地利用/覆盖变化

城市化意味着越来越多的自然植被或农业用地被以不透水地面、绿化用地为主的城市用地类型所替代。据 Elvidge 等^[60]2007 年的估算,全球不透水地面的面积高达 57.9 万 km²,其中中国、美国、印度的不透水面积均超过了 8 万 km²。美国城市草坪约占城市总面积的 39%—54%,占全美陆地面积的 3.5%—4.9%,是美国灌溉作物播种面积的 3 倍^[61]。而我国 20 世纪 90 年代的城市扩张用地中,85.6% 来自包括耕地、林地、草地、果园在内的农业用地^[62]。

土地利用或覆盖变化引起的土壤碳变化较为复杂。城市建设过程通常是首先去除地表植物,经过翻动、移出、回填等剧烈扰动,然后修建建筑或种植绿化植物等,对土壤产生最直接影响。Pouyat 等^[63]利用巴尔的摩市商业区开发过程中的数据,估算出 2600 m² 的建设活动引起 2.7×10⁴ kgC 损失。已有研究表明,从最初的农田和森林土壤转变到城市土壤过程,土壤碳库及碳通量在很大程度上得以改变。美国科林斯堡的研究表

明,城市草坪表层土壤(0—15 cm)中的有机碳含量为(4.758 ± 0.272) kg/m²,比临近的矮草草原高65%,是农地土壤的2倍,但浅层土壤中(15—30 cm)的有机碳含量差异不显著^[43]。我国南京^[24]、沈阳^[25]、开封^[23]等地城区绿地土壤有机碳含量高于郊区农业土壤。

城市土壤的性质很大程度上是由先前的土壤特征所决定,原有土壤的土地利用方式在长时期内仍会影响土壤碳库特征^[21, 35]。美国菲尼克斯市由耕地土壤转换而来的城市居民区土壤中的有机碳和总碳含量分别是荒漠生态系统转换来的居民区土壤中含量的2.2倍和2.3倍,原耕地土壤营养库在转化为居民地40a后仍保持较高水平^[64];菲尼克斯城内草坪变成沙漠植被后,土壤性质与城区残存沙漠植被及城外沙漠植被下土壤有较大差异^[65]。而湿润地区,由农业用地转变成城市用地中土壤碳累积能力显著高于由森林用地转变来的城市用地^[31];而更早的研究显示,农业用地转变为草坪后,土壤中碳累积量低于由天然草地转变成的草坪的累积^[32]。有控制实验证明,不同土地覆盖方式不仅导致土壤pH值、容重、土壤温度、水分含量、蚯蚓数量等性质差异,而且直接影响土壤有机碳组成和碳呼吸等碳循环过程^[66]。

土壤紧实和不透水地表覆盖也是城市土壤的重要特征,土壤压实不仅增加了土壤容重,对土壤其它理化性质和土壤呼吸也有显著影响^[67],不透水地面覆盖的土壤有机碳含量明显低于绿地土壤^[68]。而由于研究方法上的困难,城市不透水地面对土壤生态过程的影响研究仍处于探索阶段^[69]。

3.2 城市土壤中动植物及土壤管护措施

城市化改变了城市植被的结构和组成,非本地种的引入以及额外的管护是其重要特征^[70]。城市景观建设和绿化过程中有目的引种非本地物种,不仅加速入侵种的分布,也增加绿地碳固持能力和对水的消耗^[71]。城市绿地一般具有更高的净初级生产力,为土壤提供了更多的碳源,进而影响土壤碳循环^[72]。纽约城郊梯度研究中发现城市中外来种蚯蚓对于土壤碳、氮循环等都有影响^[73],蚯蚓可能是导致城市土壤呼吸量上升的原因之一^[66]。地下动物对地球化学循环的影响正成为城市土壤研究的重要内容^[74-75]。

城市土壤和植物管护措施是影响碳循环的重要因素,这类人为活动对土壤碳库的影响往往超过自然变化影响。高尔夫球场草坪的碳固持速率大约为0.9—1.0 tC·hm⁻²·a⁻¹,与由草地变为耕地后的土壤碳固持速率1.1 tC·hm⁻²·a⁻¹相当,但明显高于无管护措施的草地0.33 tC·hm⁻²·a⁻¹^[76]。特别是在干旱和半干旱地区,如果没有灌溉、施肥等管护措施,许多绿地植物品种竞争不过当地物种,额外的灌溉水补充能使绿地土壤有更高的碳累积量^[29];而湿润地区城市草坪有机碳累积与自然土壤相近^[35]。在温暖的生长季中经常性修剪的草坪所释放二氧化碳量是不常修剪草坪释放量的4倍,修剪频率对碳通量的影响超过了施肥和土壤性质等因素影响^[77]。而减少灌溉和施肥增加了城市草坪N₂O的释放,采用碎木屑护根措施的花园土壤中N₂O的释放低,而CH₄的吸收以及碳固持能力显著提高,实验处理对土壤CO₂通量没有显著影响^[78]。

3.3 城市小气候

温度和降雨是影响土壤碳通量的关键因素^[79-80]。城市地区独特的小气候特征,如“热岛效应”、“雨岛效应”等,改变了植物与微生物的生长过程,进而将影响土壤生物化学循环过程。

城市地区的温度总体高于郊区,且这种差异随城市规模扩大有增加的趋势^[81-82],但直接观测城郊土壤温度差异的研究较为有限。美国巴尔的摩的研究表明,城市森林比郊区森林样地的年平均气温高约2.1℃时,城郊土壤温度相差约0.7℃^[83];巴尔的摩长期生态样地连续8年的土壤温度数据显示,城市和郊区间草坪土壤年均温差约为1.5℃,林地土壤温差约为0.4℃;城区内草坪和林地之间最大温差能达到5.3℃;而郊区的森林与草坪间的温差年最大是3.6℃^[84]。另有研究表明,夏季中午时分,不透水地面下土壤温度比草坪、农地等的土壤温度高8—20℃^[85]。土壤温度升高将加速凋落物的降解,进而影响土壤中的地化循环过程^[86-87],但是城市中热岛效应对土壤碳循环的直接影响的研究鲜见报道。

城市化引起城市地区降雨和水文格局的改变,也会对碳通量产生影响,特别是在干旱和半干旱地区,降雨和灌溉引起的水分变化对生物生产量、土壤呼吸和土壤有机碳的影响超过温度的影响^[88]。Shen等^[89]采用生态过程模型研究表明,在菲尼克斯的土壤水分是决定沙漠灌丛生态系统对二氧化碳浓度和温度升高、氮沉降

及其复合影响的程度和格局的最重要因素。巴尔的摩的研究显示,城市草坪在生长季由于灌溉使其表层(0—10 cm)水分含量高于林地,而落叶之后样地之间差异不明显;2001—2005年的连续数据则显示,0—50 cm 草坪土壤水分显著高于林地,但 2001—2003 年间 0—30 cm 的土壤湿度则呈现相反的格局,这也反映了土壤水分格局的复杂性^[48]。

3.4 大气环境

城市大气环境中的 SO₂、CO₂、NO_x 及气溶胶等污染物浓度明显高于农村地区,对碳的地球化学循环产生直接或间接的影响,如城市土壤中难降解类黑炭成分的增加,与大气污染关系密切^[90]。

纽约城郊梯度森林样带研究中发现,城区中大气沉降中的 N、S、Ca、Mg 等元素量明显的高于近郊和远郊地区^[91],大气中无机 N 沉降加速了凋落物降解过程^[86]。土壤中的氮元素可以通过影响凋落物的质和量、根的生物量和分泌物的量进而影响到根系呼吸、根际微生物呼吸和土壤总呼吸量,直接表现就是城市土壤的 CH₄ 消耗量比乡村小^[46]。而菲尼克斯的梯度研究发现,大气 N 沉降并没有显著改变土壤微生物生物量和丰富度,植物和水分的分布是影响了土壤微生物过程的更重要因素^[92]。

CO₂ 浓度升高将对土壤碳循环过程产生显著的影响^[87]。城市地区 CO₂ 浓度显著上升,中心区域的 CO₂ 浓度甚至能达到 500 μmol/mol^[93-94],对城市土壤碳通量有一定影响。此外,城市大气气溶胶细粒子和粗粒子中的有机碳对于土壤呼吸具有不同的影响,细粒子能显著增加土壤呼吸,粗粒子在土壤中的富集增加了土壤有机碳含量^[95]。

3.5 土壤污染

城市土壤形成的重要特征就是人为物质的直接注入。不同来源的有机物质的填埋、施肥过程不仅直接导致城市土壤有机碳含量增加^[37],且通常增加城市土壤中重金属元素含量、提高了土壤 pH 值,进而影响土壤微生物的生命活动,改变其对土壤中氮、碳的消耗量和消耗速度,导致养分循环能力的变化,最终影响土壤碳库的规模与动态^[96]。城市绿地中土壤重金属含量与微生物酶活性、微生物碳量及土壤呼吸呈负相关关系^[97]。在碱性土壤中,高浓度的溶解酚类限制了水解酶的活性,削弱了溶解性有机碳的降解,进而促进碱性土壤中碳的累积^[98]。

此外,城市生活垃圾、生活污水污染土壤,对城市土壤碳循环产生一定影响。向土壤中添加生活垃圾是农业土壤改良的重要手段之一,生活垃圾的添加通常不会对土壤微生物量产生明显不利影响,且能有效的提高土壤中有机碳和微生物生物量^[99]。退化土壤中碳含量及基础呼吸等微生物活性指标的变化与生活垃圾的添加量呈正相关的关系^[100]。采用生活污水灌溉的样地土壤中细菌、真菌等的组成并没有发生显著变化,但土壤呼吸的强度下降^[101],但也有研究发现,采用生活污水灌溉比用河水灌溉的城市花园土壤具有更高的 NH₃、N₂O 和 CO₂ 的释放量^[102]。

4 研究展望

4.1 需要开展长期、系统的城市土壤碳循环监测

城市化是影响全球气候变化重要因素,目前人们对全球变化下城市生态系统响应的认识仍基于单个和孤立的研究^[103]。城市碳循环研究仍处于起步阶段,近年才开始长期连续系统的城市碳通量观测,“城市碳通量网络计划”建立起遍布 5 大洲、超过 30 个基本站点的通量观测网络^[104]。而且美国长期生态学研究计划中巴尔的摩和菲尼克斯两个城市生态站,以及我国北京城市生态系统研究站,已经将土壤生物地球化学循环作为长期研究内容^[105]。

因此,按照全球碳循环研究的原则和方法,系统开展由位于不同气候带、不同生态系统类型、不同土地利用历史的城市生态系统土壤碳循环特征研究,进一步拓展基于城市定位观测的数据空间网络,比较城市和自然生态系统土壤碳循环的异同点,辅以历史、人口及其它社会经济数据,才能够加深对人类生态系统前景及其应对未来气候变化的理解^[3]。综合开展土壤中 N₂O、CH₄、CO₂ 等主要温室气体通量研究也是长期生态监测的重要内容。

4.2 需要进一步深入研究城市土壤碳循环机制

在人为干扰和自然因素的交互影响下,城市化对土壤碳循环的影响机制方面存在诸多未知领域。Gregg等^[106]通过控制实验证明,尽管城区内大气污染、CO₂、氮沉降以及温度等指标均明显高于郊区,但这些因素并不能很好的解释城区植物生产量显著高于郊区的现象,是郊区大气中O₃累积造成了对植物生长的不利影响。由此可见,城市化对生物的影响存在较大不确定性。

因此,从理论上,全面、深入的研究城市化对土壤碳库和碳通量的影响及其作用机制等问题仍是该领域研究的重点。综合土壤—植被—一大气圈层的城市土壤生物地球化学循环中不同化学元素,特别是C、N、P及水分之间耦合机制以及从样地—城市—区域乃至全球等不同尺度上的研究将是该领域未来研究的挑战^[107-109]。

4.3 需要创新城市土壤碳循环研究范式和方法

由于人为因素的加入,城市土壤表现出更高的时空异质性和复杂性,城市土壤研究无法直接采用其他自然生态系统研究中的常规范式^[6]。在美国巴尔的摩和菲尼克斯城市生态学长期研究框架指导下,城市土壤地球化学循环研究已经取得积极进展,Pouyat等^[110]基于“城市土壤镶嵌体模型”系统总结了纽约、巴尔的摩和菲尼克斯的相关研究成果;M. Alberti and L. Hutyra^[111]提出了整合样地观测、数学模型和情景分析的城市生态系统碳特征的系统研究框架;L. B. Byrne^[85]提出的“生境结构概念框架”;Pavao-Zuckerman^[8]提出基于资源、干扰和理化环境的城市土壤生态学研究概念模型,这些新的模型和范式都为未来的城市土壤碳循环研究提供了新的视角。

在研究方法上,目前城市土壤生态学研究主要采用“比较研究”或者说是“自然实验”的方法,这类研究主要利用城市中不同土地利用类型土壤特征的比较研究、或者利用城市—乡村环境梯度上受人为扰动较小的残留植被斑块之间的比较研究,来探究城市格局与过程对地球化学循环的影响,这已经成为城市生态学研究的经典范式^[112]。但由于自然环境中综合因素的交互作用的复杂性,这类实验设计需要符合诸多标准,辅助开展控制性实验、设计性实验正成为城市生态学研究的新趋势^[113-114]。此外,全球碳循环研究中的涡度相关技术、同位素示踪法、GIS技术、数学模型等方法在城市土壤碳循环研究中具有广阔的应用前景^[94, 115-116]。

4.4 结合城市景观规划与设计,强化城市土壤碳管理

城市土壤作为载体,为城市提供多种生态系统服务。未来城市的规划管理将对土壤碳循环产生巨大影响。2005年,全球碳计划发起的城市与区域碳管理研究计划(Urban and Regional Carbon Management, URCM)是基于区域且与政府政策密切相关的科学计划,其核心是城市和区域水平的能源使用和土地利用变化,目标是支持区域碳管理和实现城市可持续发展,土壤管理将成为城市碳管理中不可忽视的部分^[117]。

合理的城市景观规划是整合城市土壤碳管理与城市可持续发展的关键过程,将城市土壤碳管理整合到城市发展,提出一些能通过情景和政策分析检验的方法,恢复或重建土壤这类“棕色基础设施”的生态功能,将有效防止城市土壤碳汇能力的减弱。加强城市绿地碳固持潜力研究,优化城市绿地的管护,提升绿地碳固持潜力,也是应对全球变化的重要挑战^[118]。

5 结语

尽管城市及其周边土壤仅占陆地生态系统很小的面积,但它们在全球碳循环中发挥着巨大作用。城市土壤碳循环研究仍处于基础的认识和调查阶段,随着世界范围内城市用地的持续扩张,特别是处于城市化进程高速发展的发展中国家,迫切需要更深入认识这种转化对于区域乃至全球变化的影响。明确城市化对土壤地球化学循环的影响及城市土壤对全球变化的响应,仍是城市生态学研究面临的新挑战。中国正处于快速城市化进程中,这为我国的城市生态学研究提供了一个契机,及时开展跨学科、整合性的城市土壤碳循环研究,为城市土壤的生态修复和提升城市土壤的生态服务提供科学依据。

References:

- [1] UNFPA. World urbanization prospects: the 2009 revision population database. Uniter Nations, 2010.
- [2] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. Science, 2008,

- 319(5864) : 756-760.
- [3] Grimm N B, Foster D, Groffman P, Grove J M, Hopkinson C S, Nadelhoffer K J, Pataki D E, Peters D P C. The changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 6(5) : 264-272.
- [4] Knorr W, Prentice I C, House J I, Holland E A. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 2005, 433(7023) : 298-301.
- [5] Pataki D E, Alig R J, Fung A S, Golubiewski N E, Kennedy C A, McPherson E G, Nowak D J, Pouyat R V, Lankao P R. Urban ecosystems and the north american carbon cycle. *Global Change Biology*, 2006, 12(11) : 2092-2102.
- [6] Kaye J P, Groffman P M, Grimm N B, Baker L A, Pouyat R V. A distinct urban biogeochemistry? *Trends in Ecology and Evolution*, 2006, 21(4) : 192-199.
- [7] Svirjeva-Hopkins A, Schellnhuber H J. Urban expansion and its contribution to the regional carbon emissions: Using the model based on the population density distribution. *Ecological Modelling*, 2008, 216(2) : 208-216.
- [8] Pavao-Zuckerman M, Byrne L. Scratching the surface and digging deeper: exploring ecological theories in urban soils. *Urban Ecosystems*, 2009, 12(1) : 9-20.
- [9] Zhang G L, Zhu Y G, Fu B J. Quality changes of soils in urban and suburban areas and its eco-environmental impacts-a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3) : 539-546.
- [10] Lorenz K, Lal R. Biogeochemical C and N cycles in urban soils. *Environment International*, 2009, 35(1) : 1-8.
- [11] Effland W R, Pouyat R V. The genesis, classification, and mapping of soils in urban areas. *Urban Ecosystems*, 1997, 1(4) : 217-228.
- [12] WRB I W G. Word Reference Base for Soil Resources 2006. *Wordsoil Resources Reports*. No. 103. Rome: FAO Rome, 2006: 145-145.
- [13] Lehmann A, Stahr K. Nature and significance of anthropogenic urban soils. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, 7(4) : 247-260.
- [14] Scharenbroch B C, Lloyd J E, Johnson-Maynard J L. Distinguishing urban soils with physical, chemical, and biological properties. *Pedobiologia*, 2005, 49(4) : 283-296.
- [15] Pickett S T A, Cadenasso M L. Altered resources, disturbance, and heterogeneity: a framework for comparing urban and non-urban soils. *Urban Ecosystems*, 2009, 12(1) : 23-44.
- [16] Pouyat R V, Yesilonis I D, Nowak D J. Carbon storage by urban soils in the united states. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4) : 1566-1575.
- [17] Churkina G, Brown D G, Keoleian G. Carbon stored in human settlements: the conterminous united states. *Global Change Biology*, 2010, 16(1) : 135-143.
- [18] Pouyat R V, McDonnell M J, Pickett S T A. Soil characteristics of oak stands along an urban-rural land-use gradient. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(3) : 516-526.
- [19] A Koerner B, M Klopatek J. Carbon fluxes and nitrogen availability along an urban-rural gradient in a desert landscape. *Urban Ecosystems*, 2010, 13(1) : 1-21.
- [20] Zhang M K, Zhou C. Characterization of organic matter accumulated in urban soils in the Hangzhou city. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1) : 19-21.
- [21] Pouyat R, Groffman P, Yesilonis I, Hernandez L. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution*, 2002, 116(S1) : S107-S118.
- [22] Lorenz K, Kandeler E. Biochemical characterization of urban soil profiles from stuttgart, germany. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(7) : 1373-1385.
- [23] Sun Y L, Ma J H, Li C. Content and densities of soil organic carbon in urban soil in different function districts of kaifeng. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(1) : 148-156.
- [24] He Y, Zhang G L. Concentration and sources of organic carbon and black carbon of urban soils in Nanjing. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2) : 177-182.
- [25] Duan Y Q, Wei Z Y, Han C L, Kong L S, Wang Q B. Contents of organic carbon urban soil in different land use type areas, Northeast China. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2008, 39(3) : 324-327.
- [26] Zhang G L, He Y, Gong Z T. Characteristics of organic carbon distribution in anthropogenic soils and its implication on carbon sequestration. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(2) : 149-159.
- [27] Beyer L, Kahle P, Kretschmer H, Wu Q L. Soil organic matter composition of man-impacted urban sites in north germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2001, 164(4) : 359-364.
- [28] Bian Z X, Wang Q B. Study on urban park soil nutrients in Shenyang city's green areas. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(4) : 284-290.
- [29] Golubiewski N E. Urbanization increases grassland carbon pools: effects of landscaping in colorado's front range. *Ecological Applications*, 2006, 16(2) : 555-571.

- [30] Lorenz K, Kandeler E. Microbial biomass and activities in urban soils in two consecutive years. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169(6): 799-808.
- [31] Raciti S M, Groffman P M, Jenkins J C, Pouyat R V, Fahey T J, Pickett S T A, Cadenasso M L. Accumulation of carbon and nitrogen in residential soils with different land-use histories. *Ecosystems*, 2011, 14(2): 287-297.
- [32] Qian Y L, Follett R F. Assessing soil carbon sequestration in turfgrass systems using long-term soil testing data. *Agronomy Journal*, 2002, 94(4): 930-935.
- [33] Huh K Y, Deurer M, Sivakumaran S, McAuliffe K, Bolan N S. Carbon sequestration in urban landscapes: the example of a turfgrass system in new zealand. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, 46(7): 610-616.
- [34] Liu Z Y, Zhang M K. Effects of green space age on organic carbon accumulated in urban soils. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(1): 142-145.
- [35] Pouyat R V, Yesilonis I D, Golubiewski N E. A comparison of soil organic carbon stocks between residential turf grass and native soil. *Urban Ecosystems*, 2009, 12(1): 45-62.
- [36] Groffman P M, Pouyat R V, McDonnell M J, Pickett S T A, Zipperer W C. Carbon pools and trace gas fluxes in urban forest soils // Lal R, Kimble J, Levine E, Stewart B A, eds. *Soil Management and Greenhouse Effect*. Boca: CRC Press, 1995: 147-158.
- [37] Lorenz K, Preston C M, Kandeler E. Soil organic matter in urban soils: estimation of elemental carbon by thermal oxidation and characterization of organic matter by solid-state ^{13}C nuclear magnetic resonance(NMR) spectroscopy. *Geoderma*, 2006, 130(3/4): 312-323.
- [38] Beyer L, Blume H P, Elsner D C, Willnow A. Soil organic-matter composition and microbial activity in urban soils. *Science of the Total Environment*, 1995, 168(3): 267-278.
- [39] Wang X S. Black carbon in urban topsoils of Xuzhou (China): environmental implication and magnetic proxy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 163(1/4): 41-47.
- [40] Hall S J, Ahmed B, Ortiz P, Davies R, Sponseller R A, Grimm N B. Urbanization alters soil microbial functioning in the sonoran desert. *Ecosystems*, 2009, 12(4): 654-671.
- [41] Hao R J, Fang H L, Shen L Y, Li Z P. Changes of soil organic carbon mineralization and enzyme activities from different urban functional areas. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(2): 229-235.
- [42] Grimmond C S B, King T S, Cropley F D, Nowak D J, Souch C. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. *Environmental Pollution*, 2002, 116(S1): S243-S254.
- [43] 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.
- [44] Green D M, Oleksyszyn M. Enzyme activities and carbon dioxide flux in a sonoran desert urban ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 2002-2008.
- [45] Koerner B, Klopatek J. Anthropogenic and natural CO_2 emission sources in an arid urban environment. *Environmental Pollution*, 2002, 116(S1): S45-S51.
- [46] Goldman M B, Groffman P M, Pouyat R V, McDonnell M J, Pickett S T A. CH_4 uptake and n availability in forest soils along an urban to rural gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(3): 281-286.
- [47] Groffman P M, Pouyat R V, Cadenasso M L, Zipperer W C, Szlavecz K, Yesilonis I D, Band L E, Brush G S. Land use context and natural soil controls on plant community composition and soil nitrogen and carbon dynamics in urban and rural forests. *Forest Ecology and Management*, 2006, 236(2/3): 177-192.
- [48] Groffman P M, Pouyat R V. Methane uptake in urban forests and lawns. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(14): 5229-5235.
- [49] Mei X Y. Study on Greenhouse Gases Fluxes of Urban Lawn Ecosystems. Shanghai: Northeast Normal University, 2008.
- [50] Sun Q, Fang H L, Liang J, Qian X W, Liu M D, Zhang Q F, Hao R J, Hao G J. Soil respiration characteristics of typical urban lawns in Shanghai. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(8): 1572-1578.
- [51] Zhang G X, Xu J, Wang G B, Wu S S, Ruan H H. Soil respiration under different vegetation types in Nanjing urban green space. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(2): 274-280.
- [52] 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.
- [53] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [54] Dhakal S. GHG emissions from urbanization and opportunities for urban carbon mitigation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010, 2(4): 277-283.
- [55] Liu Y S, Liu Z X, Li X G, Zhang Z H. Study on biomass and nutrient uptake dynamics of three cold-season turf grass species in Beijing.

- Pratacultural Science, 2008, 25(4): 88-94.
- [56] Jo H K, Mcpherson E G. Carbon storage and flux in urban residential greenspace. *Journal of Environmental Management*, 1995, 45(2): 109-133.
- [57] Townsend-Small A, Czimezik C I. Carbon sequestration and greenhouse gas emissions in urban turf. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L02707, doi: 10.1029/2009GL041675.
- [58] Selhorst A, Lal R. Carbon budgeting in golf course soils of central ohio. *Urban Ecosystems*, 2011, 14(4): 771-781.
- [59] Bartlett M D, James I T. A model of greenhouse gas emissions from the management of turf on two golf courses. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(8): 1357-1367.
- [60] Elvidge C D, Tuttle B T, Sutton P C, Baugh K E, Howard A T, Milesi C, Bhaduri B, Nemani R. Global distribution and density of constructed impervious surfaces. *Sensors*, 2007, 7(9): 1962-1979.
- [61] Milesi C, Running S W, Elvidge C D, Dietz J B, Tuttle B T, Nemani R R. Mapping and modeling the biogeochemical cycling of turf grasses in the united states. *Environmental Management*, 2005, 36(3): 426-438.
- [62] Liu J Y, Tian H Q, Liu M L, Zhuang D F, Melillo J M, Zhang Z X. China's changing landscape during the 1990s: large-scale land transformations estimated with satellite data. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(2): L02405, doi: 10.1029/2004GL021649.
- [63] Pouyat R V, Pataki D E, Belt K T, Groffman P M, Hom J, Band L E. Effects of urban land-use change on biogeochemical cycles // Canadell J G, Pataki D E, Pitelka L F, eds. *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Heidelberg: Springer, 2007: 45-58.
- [64] Lewis D B, Kaye J P, Gries C, Kinzig A P, Redman C L. Agrarian legacy in soil nutrient pools of urbanizing arid lands. *Global Change Biology*, 2006, 12(4): 703-709.
- [65] Davies R, Hall S J. Direct and indirect effects of urbanization on soil and plant nutrients in desert ecosystems of the Phoenix metropolitan area, Arizona (USA). *Urban Ecosystems*, 2010, 13(3): 295-317.
- [66] Byrne L B, Bruns M A, Kim K C. Ecosystem properties of urban land covers at the aboveground-belowground interface. *Ecosystems*, 2008, 11(7): 1065-1077.
- [67] Edmondson J L, Davies Z G, McCormack S A, Gaston K J, Leake J R. Are soils in urban ecosystems compacted? A citywide analysis. *Biology Letters*, 2011, 7(5): 771-774.
- [68] Raciti S M, Hutyra L R, Finzi A C. Depleted soil carbon and nitrogen pools beneath impervious surfaces. *Environmental Pollution*, 2012, 164: 248-251.
- [69] Zhao D, Li F, Wang R S. Effects of ground surface hardening on plant eco-physiological processes in urban landscapes. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3923-3932.
- [70] Hope D, Gries C, Zhu W X, Fagan W F, Redman C L, Grimm N B, Nelson A L, Martin C, Kinzig A. Socioeconomics drive urban plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(15): 8788-8792.
- [71] Niinemets U, Peñuelas J. Gardening and urban landscaping: significant players in global change. *Trends in Plant Science*, 2008, 13(2): 60-65.
- [72] Nowak D J, Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 381-389.
- [73] Bohlen P J, Groffman P M, Fahey T J, Fisk M C, Suarez E, Pelletier D M, Fahey R T. Ecosystem consequences of exotic earthworm invasion of north temperate forests. *Ecosystems*, 2004, 7(1): 1-12.
- [74] Osler G H R, Sommerkorn M. Toward a complete soil C and N cycle: incorporating the soil fauna. *Ecology*, 2007, 88(7): 1611-1621.
- [75] Szlavecz K, Pouyat R V, Carroll W, Lev S M, Groffman P M, Casey R, Landa E R. Urban soil fauna and ecosystem services: examples from the baltimore ecosystem study. *Journal of Nematology*, 2009, 41(4): 383-384.
- [76] Qian Y L, Bandaranayake W, Parton W J, Mecham B, Harivandi M A, Mosier A R. Long-term effects of clipping and nitrogen management in turfgrass on soil organic carbon and nitrogen dynamics: the century model simulation. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(5): 1694-1700.
- [77] Allaire S E, Dufour-L'Arrivée C, Lafond J A, Lalancette R, Brodeur J. Carbon dioxide emissions by urban turfgrass areas. *Canadian Journal of Soil Science*, 2008, 88(4): 529-532.
- [78] Livesley S J, Dougherty B J, Smith A J, Navaud D, Wylie L J, Arndt S K. Soil-atmosphere exchange of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in urban garden systems: impact of irrigation, fertiliser and mulch. *Urban Ecosystems*, 2010, 13(3): 273-293.
- [79] Vargas R, Baldocchi D D, Allen M F, Bahn M, Black T A, Collins S L, Yuste J C, Hirano T, Jassal R S, Pumpanen J, Tang J W. Looking deeper into the soil: biophysical controls and seasonal lags of soil CO₂ production and efflux. *Ecological Applications*, 2010, 20(6): 1569-1582.
- [80] Wu Z T, Dijkstra P, Koch G W, Peñuelas J, Hungate B A. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 927-942.
- [81] Stone B Jr. Urban and rural temperature trends in proximity to large us cities: 1951—2000. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(13):

1801-1807.

- [82] Huang J L, Wang R S, Shi Y. Urban climate change: A comprehensive ecological analysis of the thermo-effects of major Chinese cities. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2) : 188-197.
- [83] George K, Ziska L H, Bunce J A, Quebedeaux B. Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban-rural transect. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(35) : 7654-7665.
- [84] Savva Y, Szlavecz K, Pouyat R V, Groffman P M, Heisler G. Effects of land use and vegetation cover on soil temperature in an urban ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(2) : 469-480.
- [85] Byrne L B. Habitat structure: a fundamental concept and framework for urban soil ecology. *Urban Ecosystems*, 2007, 10(3) : 255-274.
- [86] Pouyat R V, McDonnell M J, Pickett S T A. Litter decomposition and nitrogen mineralization in oak stands along an urban-rural land use gradient. *Urban Ecosystems*, 1997, 1(2) : 117-131.
- [87] Pendall E, Bridgham S, Hanson P J, Hungate B, Kicklighter D W, Johnson D W, Law B E, Luo Y Q, Megonigal J P, Olsrud M, Ryan M G, Wan S Q. Below-ground process responses to elevated CO₂ and temperature: a discussion of observations, measurement methods, and models. *New Phytologist*, 2004, 162(2) : 311-322.
- [88] Conant R T, Klopatek J M, Malin R C, Klopatek C C. Carbon pools and fluxes along an environmental gradient in northern arizona. *Biogeochemistry*, 1998, 43(1) : 43-61.
- [89] Shen W J, Wu J G, Grimm N B, Hope D. Effects of urbanization-induced environmental changes on ecosystem functioning in the phoenix metropolitan region, USA. *Ecosystems*, 2008, 11(1) : 138-155.
- [90] Han Y M, Cao J J, Chow J C, Watson J G, An Z S, Liu S X. Elemental carbon in urban soils and road dusts in Xi'an, China and its implication for air pollution. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(15) : 2464-2470.
- [91] Lovett G M, Traynor M M, Pouyat R V, Carreiro M M, Zhu W X, Baxter J W. Atmospheric deposition to oak forests along an urban-rural gradient. *Environmental science and technology*, 2000, 34(20) : 4294-4300.
- [92] McCrackin M L, Harms T K, Grimm N B, Hall S J, Kaye J P. Responses of soil microorganisms to resource availability in urban, desert soils. *Biogeochemistry*, 2008, 87(2) : 143-155.
- [93] Idso C D, Idso S B, Balling R C Jr. An intensive two-week study of an urban CO₂ dome in phoenix, arizona, USA. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(6) : 995-1000.
- [94] Pataki D E, Xu T, Luo Y Q, Ehleringer J R. Inferring biogenic and anthropogenic carbon dioxide sources across an urban to rural gradient. *Oecologia*, 2007, 152(2) : 307-322.
- [95] Kaye J P, Eckert S E, Gonzales D A, Allen J O, Hall S J, Sponseller R A, Grimm N B. Decomposition of urban atmospheric carbon in sonoran desert soils. *Urban Ecosystems*, 2011, 14(4) : 737-754.
- [96] Wong C S C, Li X D, Thornton I. Urban environmental geochemistry of trace metals. *Environmental Pollution*, 2006, 142(1) : 1-16.
- [97] Papa S, Bartoli G, Pellegrino A, Fioretto A. Microbial activities and trace element contents in an urban soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 165(1/4) : 193-203.
- [98] Yao H Y, 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.
- [99] de Araújo A S F, de Melo W J, Singh R P. Municipal solid waste compost amendment in agricultural soil: changes in soil microbial biomass. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 2010, 9(1) : 41-49.
- [100] Bastida F, Moreno J L, Garcia C, Hernández T. Addition of urban waste to semiarid degraded soil: long-term effect. *Pedosphere*, 2007, 17(5) : 557-567.
- [101] Wolna-Maruwka A, Sawicka A, Kayzer D. Size of selected groups of microorganisms and soil respiration activity fertilized by municipal. *Polish J of Environ Stud*, 2007, 16(1) : 129-138.
- [102] Predotova M, Gebauer J, Diogo R V C, Schlecht E, Buerkert A. Emissions of ammonia, nitrous oxide and carbon dioxide from urban gardens in niamey, niger. *Field Crops Research*, 2010, 115(1) : 1-8.
- [103] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M, Boone C G, Groffman P M, Irwin E, Kaushal S S, Marshall V, McGrath B P, Nilon C H, Pouyat R V, Szlavecz K, Troy A, Warren P. Urban ecological systems: scientific foundations and a decade of progress. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3) : 331-362.
- [104] Velasco E, Roth M. Cities as net sources of CO₂: review of atmospheric CO₂ exchange in urban environments measured by eddy covariance technique. *Geography Compass*, 2010, 4(9) : 1238-1259.
- [105] Wang X K, Ouyang Z Y, Ren Y F, Wang H F. Perspectives in long-term studies of urban ecosystem. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(8) : 928-935.

- [106] Gregg J W, Jones C G, Dawson T E. Urbanization effects on tree growth in the vicinity of new york city. *Nature*, 2003, 424(6945) : 183-187.
- [107] Jenerette G D, Wu J G, Grimm N B, Hope D. Points, patches, and regions: scaling soil biogeochemical patterns in an urbanized arid ecosystem. *Global Change Biology*, 2006, 12(8) : 1532-1544.
- [108] Kaye J P, Majumdar A, Gries C, Buyantuyev A, Grimm N B, Hope D, Jenerette G D, Zhu W X, Baker L. Hierarchical bayesian scaling of soil properties across urban, agricultural, and desert ecosystems. *Ecological Applications*, 2008, 18(1) : 132-145.
- [109] Hutyra L R, Yoon B, Alberti M. Terrestrial carbon stocks across a gradient of urbanization: a study of the seattle, wa region. *Global Change Biology*, 2011, 17(2) : 783-797.
- [110] Pouyat R V, Szlavecz K, Yesilonis I D, Groffman P M, Schwarz K. Chemical, physical, and biological characteristics of urban soils // Jacqueline A P, Astrid V, eds. *Urban Ecosystem Ecology Agronomy Monograph*. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2010: 119-152.
- [111] Alberti M, Hutyra L. Detecting carbon signatures of development patterns across a gradient of urbanization: linking observations, models, and scenarios. *Fifth Urban Research Symposium 2009*, 2009.
- [112] McDonnell M J, Hahs A K. The use of gradient analysis studies in advancing our understanding of the ecology of urbanizing landscapes: current status and future directions. *Landscape Ecology*, 2008, 23(10) : 1143-1155.
- [113] Carreiro M M, Tripler C E. Forest remnants along urban-rural gradients: examining their potential for global change research. *Ecosystems*, 2005, 8(5) : 568-582.
- [114] Felson A J, Pickett S T A. Designed experiments: new approaches to studying urban ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3(10) : 549-556.
- [115] Qian Y L, Follett R F, Kimble J M. Soil organic carbon input from urban turfgrasses. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(2) : 366-371.
- [116] Vargas R, Carbone M S, Reichstein M, Baldocchi D D. Frontiers and challenges in soil respiration research: From measurements to model-data integration. *Biogeochemistry*, 2011, 102(1/3) : 1-13.
- [117] Zhao R Q, Huang X J, Xu H, Gao S. Progress in the research of carbon cycle and management of urban system. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10) : 1847-1859.
- [118] Pavao-Zuckerman M A. The nature of urban soils and their role in ecological restoration in cities. *Restoration Ecology*, 2008, 16(4) : 642-649.

参考文献:

- [9] 张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应. *生态学报*, 2003, 23(3) : 539-546.
- [20] 章明奎, 周翠. 杭州市城市土壤有机碳的积累和特性. *土壤通报*, 2006, 37(1) : 19-21.
- [24] 何跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析. *土壤学报*, 2006, 43(2) : 177-182.
- [25] 段迎秋, 魏忠义, 韩春兰, 孔令苏, 王秋兵. 东北地区城市不同土地利用类型土壤有机碳含量特征. *沈阳农业大学学报*, 2008, 39(3) : 324-327.
- [26] 张甘霖, 何跃, 龚子同. 人为土壤有机碳的分布特征及其固定意义. *第四纪研究*, 2004, 24(2) : 149-159.
- [28] 边振兴, 王秋兵. 沈阳市公园绿地土壤养分特征的研究. *土壤通报*, 2003, 34(4) : 284-290.
- [34] 刘兆云, 章明奎. 城市绿地年龄对土壤有机碳积累的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(1) : 142-145.
- [41] 郝瑞军, 方海兰, 沈烈英, 李忠佩. 城市不同功能区绿地土壤有机碳矿化和酶活性变化. *中国农学通报*, 2009, 25(2) : 229-235.
- [49] 梅雪英. 城市草坪温室气体通量研究. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [50] 孙倩, 方海兰, 梁晶, 钱秀苇, 刘鸣达, 张庆费, 郝瑞军, 郝冠军. 上海典型城市草坪土壤呼吸特征. *生态学杂志*, 2009, 28(8) : 1572-1578.
- [51] 张鸽香, 徐娇, 王国兵, 武珊珊, 阮宏华. 南京城市公园绿地不同植被类型土壤呼吸的变化. *生态学杂志*, 2010, 29(2) : 274-280.
- [52] 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.
- [55] 刘艺杉, 刘自学, 李晓光, 张自和. 北京地区3种冷季型禾本科草坪草生物量及养分吸收动态的研究. *草业科学*, 2008, 25(4) : 88-94.
- [69] 赵丹, 李锋, 王如松. 城市地表硬化对植物生理生态的影响研究进展. *生态学报*, 2010, 30(14) : 3923-3932.
- [105] 王效科, 欧阳志云, 仁玉芬, 王华锋. 城市生态系统长期研究展望. *地球科学进展*, 2009, 24(8) : 928-935.
- [117] 赵荣钦, 黄贤金, 徐慧, 高珊. 城市系统碳循环与碳管理研究进展. *自然资源学报*, 2009, 24(10) : 1847-1859.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO ₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Energy and economic evaluations of two sewage treatment systems	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi	LI Wenbin, LI Xinping (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hypereutrophic Lake Taihu	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn ²⁺	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO ₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of jiaozhou bay reclamation based on habitat equivalency analysis	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
Review and Monograph	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils	LUO Shanghai, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition	SU Qiang (7213)
Scientific Note	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenyi, et al (7247)

《生态学报》2013 年征订启事

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

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

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

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

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

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 2012)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:1000717

印 刷 北京北林印刷厂
行 销 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

订 购 全国各地邮局
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

广 告 经 营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

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

Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

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

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q
22>

9 771000093125