

城市绿地土壤固碳研究进展

Research Progress on Soil Carbon Sequestration in Urban Green Space

王小涵 张桂莲 张 浪* 梁 晶 张 琪
WANG Xiaohan ZHANG Guilian ZHANG Lang* LIANG Jing ZHANG Qi

(上海市园林科学规划研究院, 城市困难立地生态园林国家林业和草原局重点实验室, 国家林业和草原局城市困难立地绿化造林国家创新联盟, 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海 200232)

(Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, National Innovation Alliance of National Forestry and Grassland Administration on Afforestation and Landscaping of Challenging Urban Sites, Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Sites, Shanghai, China, 200232)

摘 要

城市绿地为城市生态环境健康提供了多种生态系统服务功能,与提升人类福祉和促进城市可持续发展密切相关。城市土壤固碳功能与潜力是全球气候变化背景下城市生态系统碳循环研究的热点问题之一,城市绿地是城市生态系统内唯一具备直接碳汇价值的用地要素,在减缓全球变暖、积极应对气候变化等方面具有不可忽视的作用。绿地土壤碳库数量和质量是衡量城市绿地土壤健康状况的重要内容,直接关系到促进人体健康、维持生物多样性和保持景观游憩等多种城市绿地生态系统服务持续供给。然而,人们对城市绿地在土壤碳库形成和积累过程与机制方面的研究仍处于起步阶段。研究系统整理了城市绿地土壤相关定义及主要特性,总结了绿地土壤碳库空间分布规律及主要影响因子,并梳理了城市绿地土壤碳排放与自然土壤的差别及其潜在机制。重点探讨了城市绿地土壤碳固持特征及其驱动因素,分析了绿地植被、人类活动及时间等因素对城市绿地土壤固碳功能的主要影响。最后提出目前城市绿地土壤固碳研究的局限与不足,并对未来城市绿地土壤固碳的研究方向与热点进行展望,为提升绿地土壤固碳潜力提供科学依据。

关键词

城市绿地; 土壤碳库; 固碳增汇

Abstract

Urban green space provides a variety of ecosystem services for urban ecological environment health, which is closely related to improving human well-being and promoting sustainable urban development. The carbon sequestration function and potential of urban soil are one of the hot issues in the study of the carbon cycle of the urban ecosystems under the background of global climate change. Urban green space is the only land element with direct carbon sink value in the urban ecosystem, which plays an important role in mitigating global warming and responding to climate change. The quantity and quality of soil carbon pool is an important content to measure the soil health status of urban green space, which is directly related to promoting human health, maintaining biodiversity, and maintaining the sustainable supply of various urban green space ecosystem services, such as landscape recreation. However, the research on the formation and accumulation process and mechanism of soil carbon pool in urban green space is still in its infancy. This study systematically sorted out the definitions and main characteristics of soil in urban green space, summarized the spatial distribution pattern and main influencing factors of soil carbon pool in urban green space, and sorted out the difference between soil carbon flux in urban green space and natural soil and its potential mechanism. This paper focuses on the characteristics and driving factors of soil carbon sequestration in urban green space and discusses the main effects of vegetation, human activities, and time

基金项目:

上海市科委工程技术研究中心建设专项“上海城市困难立地绿化工程技术研究中心”(编号: 16dz2251400); 上海市科技计划项目“城市绿地碳汇计量监测技术标准研究与应用示范”(编号: 21DZ2206600); 上海市科技计划项目“上海‘四化’生态网络空间综合评价与质量提升关键技术研究及集成示范”(编号: 19DZ1203301)

文章编号: 1000-0283(2022)01-0018-07
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2022. 01. 0018. 003
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2021-11-12
修回日期: 2021-11-30

王小涵
1989年生/女/河北人/博士/工程师/研究方向为城市绿地土壤养分循环与质量提升

张桂莲
1976年生/女/山西太原人/博士/高级工程师/研究方向为林业碳汇计量监测、城市绿地系统生态网络研究

张 浪
1964年生/男/安徽人/博士/教授级高级工程师, 博士生导师/上海领军人才、享受国务院特殊津贴专家/研究方向为生态园林规划设计与技术研究/本刊主编

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: zl@shsyky.com

on soil carbon sequestration in urban green space. Finally, the limitations and shortcomings of current research on soil carbon sequestration in urban green space were put forward, and the future research directions and hot spots of soil carbon sequestration in urban green space have been prospected. It provides the scientific basis for improving the soil carbon sequestration potential of green space.

Keywords

urban green space; soil carbon sink; carbon sink

目前, 全球近4%的土地是城市化状态^[1], 超过50%的人口生活在城市地区^[2], 这一数字将继续以每10年4%的速度增长^[3]。中国城市人口从1975年的17.4%增长到2013年的53.7%, 预计到2030年将达到60%^[3]。随着全球城市化的迅猛发展, 城市生态系统碳循环研究日益得到社会广泛关注。城市绿地作为重要的城市绿色基础设施, 在改善城市环境、维护城市生态系统平衡与居民福祉方面发挥了重要作用。土壤碳库是陆地碳库的重要组成部分, 其微小变化对区域气候环境, 乃至全球碳循环过程产生深远影响。城市绿地土壤碳储存与碳固定是城市绿地提供的关键生态系统服务之一, 但相对于其他陆地生态系统, 绿地土壤固碳过程与机制方面的研究仍较少。高强度人类活动干扰下的绿地土壤碳素循环过程变化及其生态效应仍然存在诸多不确定性。

文章介绍了城市绿地土壤相关专业术语和绿地土壤主要特征, 综述了国内外在绿地土壤碳库、碳通量和碳固持研究方面的进展, 探讨了绿地土壤固碳的主要影响因素, 提出了相关问题的未来研究趋势。

1 绿地土壤定义及特征

1.1 绿地土壤相关术语间区别与联系

国内外城市绿地土壤生态研究中, 常见的专业术语包括城市土壤、园林土壤和城市绿地。国内外学者从分布区域、人类活动方

式和作用强度几个方面明确城市土壤的定义与内涵。Bockheim最先提出城市土壤是指具有人为的, 非农业作用形成的, 由于土地的混合、填埋或污染而形成的厚度 ≥ 50 cm层次的城区或郊区土壤^[4]。在园林绿化中, 根据园林植物对土壤条件的需要, 人为地调节和改良土壤肥力因素, 以满足园林植物需要的土壤条件, 使树和花卉按照预期目标生长发育, 这种土壤叫做园林土壤。城市绿地是指以自然植被和人工植被为主要存在形态的城市用地。城市绿地也可以被视为绿色基础设施的一部分, 在欧盟政策中被定义为“一个自然和半自然区域的战略规划网络, 具有其他环境特征, 旨在提供广泛的生态系统服务”^[5]。在《城市绿地分类标准》(CJJ/T85-2017)中城市绿地被描述为在城市行政区域内以自然植被和人工植被为主要存在形态的用地, 包含两个层次的内容: (1) 城市建设用地范围内用于绿化的土地; (2) 城市建设用地之外, 对生态、景观和居民休闲生活具有积极作用, 绿化环境较好的区域。

1.2 绿地土壤特征

在城市化过程中, 人口和非农业活动都集中在城市中心, 区域景观发生了明显的变化。土地城市化则是城市化进程的重要空间载体和最直观的反映^[6]。绿地土壤是典型的人为土壤, 与自然土壤不同, 城市化过程中人类活动是土壤形成和发育的关键驱动因素,

促进土壤的物理、化学和生物性质及养分循环过程呈现不同特征。强烈的人为扰动导致城市绿地土壤存在明显的压实现象, 土壤养分含量降低, 并存在较大的空间变异特性^[7]。与硬质地面覆盖的城市土壤相比, 表层植被保护下的绿地土壤不受直接辐射的影响, 从而抑制土壤的温度升高与蒸发, 使土壤含水量保持在高于裸露土壤的水平^[8]。这些条件有利于土壤动物的挖掘和生物的扰动活动, 增加土壤入渗。微生物分解凋落物增加土壤有机质和土壤养分的供应, 并增强土壤的结构稳定性、入渗和淋滤^[9]。然而, 娱乐活动可能会对土壤性质产生相互冲突的影响。一方面, 游客的踩踏增加了土壤的压实度, 降低土壤水分, 阻止植被生长, 从而导致有机源的减少, 使有机质含量减少^[10]。另一方面, 密集的游客活动, 包括人类的食物消费和喂养动物, 增加了土壤有机质, 因为这些活动提供了额外的有机来源, 如食物残渣、木炭和娱乐活动的残留物或灰烬中的烧焦材料^[11]。此外, 城市土壤中可溶盐的含量可能受到人类活动和自然因素的影响。城市系统内的土壤属性也受社会经济水平的影响, 土壤有机质含量和水分含量显著高于低经济水平地区, pH值和土壤压实度显著低于低经济水平地区^[12]。

2 绿地土壤碳库、碳排放和碳固持研究进展

2.1 城市绿地土壤碳库

城市绿地土壤有机碳储量及其分布特

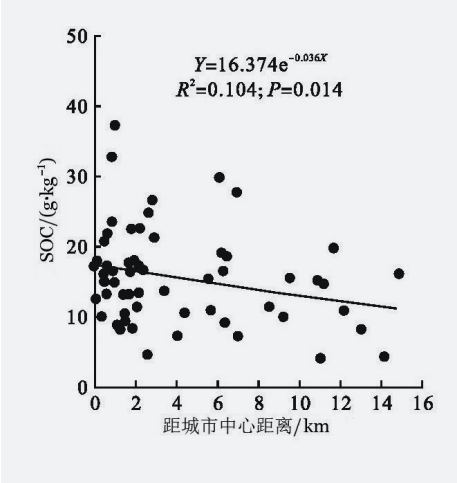


图1 距城市中心距离与土壤SOC含量的回归分析^[30]
Fig.1 Correlation between distance from the urban center and soil SOC concentrations^[30]

征是城市土壤有机碳研究的重要内容。城市绿地土壤有机碳含量具有很大变异性，其有机碳含量可能比农田或森林等生态系统土壤低或高。韩国城市绿地0～60 cm土层有机碳库储量低于自然生态系统^[13]；芬兰赫尔辛基公园土壤的平均碳密度（所有公园土壤为10.4 kg/m²，植被下土壤为15.5 kg/m²）则明显高于芬兰农田的平均碳含量（0～15 cm土壤为4.1～6.7 kg/m²）^[14]和森林土壤碳库（0～100 cm土壤约为6.3 kg/m²）^[15]；沈阳城市绿地有机碳含量与碳密度为24.82 g/kg和3.98 kg/m²，高于研究区周边的郊区和农村表层土壤^[16]。

城市绿地土壤碳储量大小与所处气候（温度和降雨量）密切相关，具有一定的地

带性特征。低纬度城市绿地土壤固存的有机碳密度在2～18 kg/m²之间^[17]，在高纬度寒冷地区土壤有机碳储量可能更大。根据Setälä等人^[18]在赫尔辛基和拉赫蒂城市进行的公园土壤调查估计，公园土壤在0～50 cm处有机碳储量高达22.0～35.5 kg/m²。中国城市绿地土壤表层有机碳密度同样呈现由北向南逐渐降低的趋势（表1）。土壤有机碳含量取决于有机质输入和异养呼吸的大小，而异养呼吸是由土壤温度、水分、养分、氧含量以及分解凋落物的质量、分解者群落的结构等因素决定的^[19-20]。这些环境因素都受所在区域气候特征影响，改变了土壤的输入和矿化过程，进而影响土壤有机碳储量。

城市绿地的典型特征是土壤表层有机质积累，有机质和碳含量随土壤深度的增加而明显下降^[25]。司志国^[26]对徐州市绿地土壤有机碳储量空间分布进行研究发现，附属绿地、防护绿地、公园绿地、生产绿地和道路绿地等绿地土壤有机碳储量均出现了随深度增加而逐渐降低的趋势，附属绿地、公园绿地、道路绿地的0～20 cm土层有机碳密度占剖面有机碳密度的50%以上，防护绿地与生产绿地有机碳密度也达到了剖面有机碳密度的40%以上。武慧君等^[27]在芜湖城市森林土壤碳储量特征的观测结果中同样发现了这一垂直分布趋势。这可能与植被根系在土壤剖面中的垂直分布有关，一般认为浅层土壤具

有更高的根系生物量。由于根系周转是有机质进入土壤的最重要机制之一，从而影响碳在土壤剖面中的分布^[28]。

城市绿地土壤有机碳的空间分布具有较高的空间异质性，绿地与城市核心区间的距离对土壤碳储量有一定影响^[29]。一般认为，绿地土壤碳储量由城市核心向城市边缘递减。安吉等^[30]对成都一温江这一典型的“中心城—郊区—卫星城”梯度带绿地土壤有机碳空间分布特征进行研究，结果表明土壤有机碳含量随着与城市中心距离的增加呈显著指数降低趋势（图1），这一趋势与柳云龙等^[31]和丁明军等^[32]的研究结果一致。Pouyat等^[33]发现美国纽约建成区—乡村梯度上栎树林表层0～10 cm土壤有机质含量随着与城市中心距离的增加显著降低，有机碳密度从城市到农村呈下降趋势。

绿地土壤碳储量与碳密度变化的同时，伴随着土壤有机碳组分及其生物特性的改变。土壤可溶性有机碳（DOC）是土壤活性碳库的重要组成部分，在生态系统中土壤碳迁移和转化过程中发挥了不可忽视的作用。陶晓等^[34]发现城市绿地土壤DOC含量25.91～41.57 mg/kg，在0～30 cm土壤剖面同样呈下降趋势。其中森林公园0～30 cm土壤DOC含量显著高于老工业区、居民服务区和老商业区等功能区绿地土壤DOC含量，这主要是由于森林公园植物掉落物丰富，土壤微生物活性较高，从而为DOC的积累提供了良好条件。郝瑞军等^[35]观测了城市不同功能区绿地土壤有机碳矿化过程和酶活性变化，发现土壤有机碳矿化速率与土壤有机碳、DOC及微生物量碳含量显著相关。卢瑛等^[36]对广州市中心城区部分公园绿地0～20 cm土壤肥力特性与酶活性进行分析，结果表明土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性与土壤有机质含量呈显著正相关。

表1 城市绿地土壤表层有机碳密度
Tab.1 Soil surface organic carbon density of urban green space

城市 City	土层深度 Soil depth/cm	土壤有机碳密度 Soil organic carbon density/ (kg/m ²)	数据来源 Data sources
沈阳	0～20	3.98	汤煜等, 2019 ^[16]
北京	0～20	2.84	罗上华等, 2014 ^[21]
上海	0～20	2.65	Wang et al, 2013 ^[22]
重庆	0～20	2.61	Liu et al., 2013 ^[23]
广州	0～20	1.35	史琰, 2013 ^[24]

2.2 城市绿地土壤碳排放

土壤呼吸是指土壤中的有机体和植物地下部分产生CO₂的所有代谢作用, 主要包括三个生物学过程(根呼吸、微生物呼吸及动物呼吸)和一个非生物学过程(含碳物质的化学氧化过程), 其受环境及生物因素的综合影响^[37]。土壤呼吸相关研究可追溯至19世纪, 近年来全球气候变化导致的一系列环境问题愈加严峻, 使得土壤呼吸变化规律、测定方法、影响因素等相关研究迅猛发展。目前, 国内外针对土壤呼吸的相关研究主要集中在森林、农田、草地等自然、半自然生态系统, 与城市土壤尤其是绿地土壤呼吸相关报道仍相对较少。

城市绿地土壤可能比其他自然土壤具有更高的土壤CO₂通量。Upadhyay等^[38]对印度瓦拉纳西市不同城市土地利用类型土壤CO₂通量进行连续观测, 结果表明草坪土壤CO₂通量显著高于草地、人工林、农业和裸地, 其中城市草坪的土壤CO₂通量是裸地的两倍。这一结果与Crum等人^[39]的研究相吻合, 他们发现在美国南加州, 城市草坪土壤CO₂通量同样高于农田和裸地。此外, 一些研究报告称, 与其他植被覆盖的城市土壤相比, 草坪的土壤CO₂通量显著更高^[40]。草坪土壤CO₂通量升高的可能原因包括:(1)刈割、草坪管理和养分输入等人为干扰;(2)持续的养分供应和温度、水分条件有利于微生物活动;(3)高根系生物量、短命植被及其分解或根系分泌物后的养分输入^[41]。

土壤温度和水分条件是影响土壤CO₂产生与排放过程的关键驱动因素。Upadhyay等^[38]发现城市草坪土壤CO₂通量变化主要是由土壤温度、水分和养分有效性的空间和季节变化引起的。白洁等^[42]对沈阳市不同植被配置方式绿地土壤呼吸速率时空动态进行研究,

结果表明土壤温度与土壤呼吸时间动态变化显著相关。一般认为, 绿地土壤CO₂通量高峰出现在夏季, 这可能是由于冬季较低的土壤温度会阻碍微生物的活动, 导致土壤碳矿化和有机质分解减慢^[43]。王亚军等^[44]开展了降雨前后城市绿地土壤呼吸和环境因子连续监测, 发现增雨显著提高土壤湿度, 土壤呼吸提高了1.43%。此外, 土壤容重^[38]、养分有效性^[45]、绿地植被配置^[46]等因素也对绿地土壤CO₂通量有不同程度的影响。

2.3 城市绿地土壤碳固持

自工业革命以来, 人类已经越来越多地改变了全球碳循环, 大气中CO₂浓度的上升已经成为一个日益关注的问题。城市在全球碳循环中发挥着重要作用, 由于能源消耗、交通运输和自然或半自然生态系统转化为建筑环境的土地转换, 城市排放了大量的CO₂。通过建设和改造城市基础设施, 提高能源和资源效率、鼓励可持续消费方式、减少CO₂排放是气候变化背景下亟待解决的热点问题。据统计, 中国城市碳排放量占全国排放总量的90%, 城市绿地作为城市生态系统中唯一有生命的城市基础设施, 在固碳减排过程中有着不可替代的作用。土壤碳固持指通过土壤修复或推荐管理措施等方法增加土壤碳含量, 而城市绿地土壤及覆盖植被固碳过程积极应对气候变化有重要作用。Pouyat等^[47]发现美国巴尔的摩城区森林土壤的含碳量比郊区森林土壤高80%。北京多年生黑麦草、草地早熟禾和高羊茅草坪生长季修剪草屑累积的固碳量均在300 g·C/m²·a, 远高于中国内蒙古典型草原年固碳水平^[48]。尽管城市绿地是城市中唯一的自然碳汇, 具有固碳释氧、调节城市小气候等重要生态系统服务, 但城市绿地在建设和养护过程中同样存在较高的

能源消耗及碳源释放。研究表明, 绿化养护面积、绿化灌溉、绿地照明、农药和化肥的施用等绿地管护措施等都产生了较高的碳排放, 在一定程度上抵消了绿地土壤的固碳效益。以晋中市社火公园为研究对象, 对运行维护阶段不同养护措施碳排放量进行比较发现, 灌溉类措施产生的碳排放可达公园绿地碳排放总量的70%以上^[49]。因此, 如何综合提高城市绿地土壤固碳潜力, 仍需要长期深入研究。

城市绿地土壤通过地上植被光合作用和土壤碳蓄积过程被认为是陆地生态系统的重要碳汇之一。Bae等^[50]对韩国首尔一公园内2003年至2013年间不同类型绿地土壤有机碳含量进行分析发现, 10年间土壤有机碳含量增长2.5倍。罗上华^[21]发现1984年至2010年期间北京市绿地土壤有机碳的总储量增加了0.507 Mt。以上研究表明, 城市绿地具有一定的固碳潜力。土壤有机碳矿化速率是土壤碳素周转的重要环节, 绿地土壤有机碳积累可能与土壤矿化速率变化密切相关。李娟^[51]发现公园绿地土壤有机碳矿化强度及矿化潜力均随种植年限增加而降低。此外, 单一园林植被种植模式下土壤矿化强度及矿化潜力较高, 也不利于土壤碳的积累。

3 绿地土壤固碳的主要影响因素

3.1 绿地植被组成与类型

优势植物的功能属性强烈影响土壤形成和植物—土壤系统的功能。例如, 快速生长和缓慢生长的植物在凋落物上的不同, 促进了细菌或真菌食物网的形成^[52]。根据植物功能群和两种土壤微生物群的相对优势, 具有这种食物网的系统之间的分解和土壤有机质积累存在一定差异^[53]。在家庭花园^[54]和城市公园^[16]中进行的一些研究发现, 植被组成与

结构影响根际土壤碳积累速度，进而改变土壤特性。植被覆盖度也会影响土壤碳含量，木质植被由于具有较高的覆盖度可能比草坪拥有更高的土壤碳储量。例如，Bae和Ryu^[50]发现在韩国首尔的一个城市公园中，混交林的有机碳储量最高，其次是常绿林、阔叶林以及草坪。同样，Livesley等^[17]在对澳大利亚墨尔本13个高尔夫球场绿地的研究中发现，树冠覆盖区域的土壤碳浓度高于附近的草地区域。这些研究表明，木本植物在增加城市土壤碳库中具有更为突出的作用。高植物多样性通过提高碳输入和增加土壤微生物群落多样性和活性，或通过抑制分解产生的碳损失来增加土壤有机碳储量。

3.2 人类活动

绿地养护、人群踩踏、城市建设过程中的土地利用变化等人类活动对土壤碳库的影响可能超过自然环境的影响。Edmondson等^[54]发现英国Leicester市家庭花园土壤有机碳浓度与含量均显著高于非家庭花园土壤，这可能是由于家庭花园中添加了更多的外源有机质，包括泥炭、堆肥、有机肥料及植被掉落物等，从而增加土壤有机碳储量。绿化植物废弃物覆盖后土壤微生物周转速率加快，微生物活性增强，同时能够降低土壤密度，提高土壤保水能力，从而促进土壤有机质的积累^[55]。城市化进程中的高强度建设施工、土地利用类型转变导致的土壤退化，如废物污染、土壤养分流失、土壤结构破坏等会加剧绿地土壤碳库损失^[6]。绿地土壤受游客踩踏等活动的影响，导致不同程度的土壤压实，增加土壤容重，进而影响土壤呼吸等碳素周转过程。城市绿地转变为不透水地面也会导致土壤有机碳和植被碳的大量流失^[56]。此外，城市化过程还会引起物种分布的均质

化，植物多样性可能随着城市化梯度的变化而增加或减少。研究表明植物多样性强烈影响生态系统功能和服务，包括土壤碳储量。Lange等^[57]较高的植物多样性增加了根际对微生物群落的碳输入，从而增加了微生物活性和碳储量。因此城市化过程中的植物多样性演变与分布也在一定程度上作用于绿地土壤碳的积累。

3.3 时间跨度

除有机质输入和分解的影响外，时间对城市土壤碳动态也有一定的影响。城市土地利用变化，如公园建设，往往涉及表土清除、土壤迁移、表面分级和压实。土壤扰动影响碳的封存和释放，需要较长时间才能最终获得新的碳储量平衡。在新建立的草坪系统中，土壤碳库在大约30 ~ 50年后达到相对稳定的状态^[58]。在住宅庭院、街道树木种植和公园中，时间被认为是影响城市土壤物理、化学和生物特性的最显著因素^[6]。与新建绿地（平均建成时间9年）相比，建成时间较久的绿地（平均建成时间64年）土壤容重明显降低，微生物生物量和活性增加，有机质也增加^[6]。由于根源碳的平均停留时间是茎源碳的两倍，建成时间较短的公园绿地土壤根系生物量较少，因此其根源碳含量较低，所以土壤有机碳含量低于建成时间较长的公园绿地^[59]。

4 研究展望

与森林、农田等生态系统相比，城市生态系统碳循环研究仍处于初级阶段。城市绿地作为自然生态系统的重要组成部分，具有不可忽视的生态服务功能。城市化是当代人类社会最显著的特征之一，城市化过程对城市绿地分布、生态过程与功能等方面的影

响逐渐成为生态学、地理学等领域的热点问题。关于全球环境变化过程中城市绿地土壤固碳减排响应的认识大部分仍基于单个城市内局部绿地的研究，不同气候带、不同城市化进程、不同土地利用转变历史条件下，城市绿地土壤碳循环过程研究仍十分匮乏。因此，开展更大时空尺度的生态观测研究，比较分析城市绿地与其他生态系统类型土壤碳循环过程的异同，综合社会经济数据，有助于全面、深入地理解高强度人类活动城市化过程中城市绿地土壤碳循环过程变化与机制。目前，人类活动与环境变化对城市绿地土壤碳循环的影响机制方面仍存在诸多不确定因素，人类活动干扰、土壤环境与地上植被如何相互作用，进而作用于土壤碳库的形成与转化依然是相关领域研究的重点。此外，城市绿地规划与管理在绿地土壤固碳减排方面的重要作用日益突出，将绿地建设管护过程中的能源消耗与碳排放整合到绿地固碳效益与潜力研究中，根据绿地土壤固碳能力优化城市绿地管理措施，助力城市生态系统固碳减排。

参考文献

- [1] CIESIN I. Global Rural-Urban Mapping Project, Version 1 (GRUMPv1: Urban Extents Grid)[EB/OL]. [2021.11.30]. <http://sdac.ciesin.columbia.edu/gpw>
- [2] ROSEN C. World resources 2000-2001: People and Ecosystems-the Fraying Web of Life[M]. Amsterdam: Elsevier, 2000.
- [3] United Nations(UN). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision[R]. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2015.

- [4] BOCKHEIM J G. Nature and Properties of Highly-disturbed Urban Soils. Philadelphia. Pennsylvania. Paper Presented Before Division S25[C]//Annual Meeting of the Soil Society of America. Chicago: Soil Genesis, Morphology and Classification, 1974.
- [5] European Commission. Green Infrastructure (GI)—Enhancing Europe’s Natural Capital. COM (2013) 249 final[EB/OL]. [2021.11.30]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52013DC0249>
- [6] XU Q, YANG R, DONG Y X, et al. The Influence of Rapid Urbanization and Land Use Changes on Terrestrial Carbon Sources/Sinks in Guangzhou, China[J]. Ecology Indicators, 2016(70): 304-316.
- [7] 侯昱竹. 成都市城市绿地土壤碳氮磷含量特征及其空间变异性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.
- [8] KOTZEN B. An Investigation of Shade Under Six Different Tree Species of the Negev Desert Towards Their Potential Use for Enhancing Microclimatic Conditions in Landscape Architectural Development[J]. Journal of Arid Environments, 2003(2): 231-274.
- [9] SARAH P, RODEH Y. Soil Structure Variations Under Manipulations of Water and Vegetation[J]. Journal of Arid Environment, 2004(58): 43-57.
- [10] ZHAO Y G, ZHANG G L, ZEPP H, et al. Establishing a Spatial Grouping Base for Surface Soil Properties Along Urban-Rural Gradient—A Case Study in Nanjing, China[J]. Catena, 2007(69): 74-81.
- [11] SARAH P, ZHEVELEV M H, OZ A. Urban Park Soil and Vegetation: Effects of Natural and Anthropogenic Factors[J]. Pedosphere, 2015(25): 393-404.
- [12] ZHEVELEV H M, BAR P. Urban Soil Properties as Affected by Land Use Units and Socio-Economic Levels: The Case of the City of Tel-Aviv, Israel[J]. Geography Research Forum, 2012(32): 28-45.
- [13] JO H K. Impacts of Urban Green Space on Offsetting Carbon Emissions from Middle Korea[J]. Journal of Environmental Management, 2002(64): 115-126.
- [14] HEIKKINEN J, KETOJA E, NUUTINEN V, et al. Declining Trend of Carbon in Finnish Cropland Soils in 1974-2009[J]. Global Change Biology, 2013(19): 1456-1469.
- [15] LISKI J, LEHTONEN A, PALOSUO T, et al. Carbon Accumulation in Finland’s Forests 1922-2004—An Estimate Obtained by Combination of Forest Inventory Data with Modelling of Biomass, Litter and Soil[J]. Annals of Forest Science, 2006(63): 687-697.
- [16] 汤煜, 石铁矛, 卜英杰, 等. 城市化进程中沈阳城市绿地土壤有机碳储量空间分布研究[J]. 中国园林, 2019, 35(12): 68-73.
- [17] LIVESLEY S J, OSSOLA A, THRELFALL C G, et al. Soil Carbon and Carbon/Nitrogen Ratio Change under Tree Canopy, Tallgrass, and Turfgrass Areas of Urban Green Space[J]. Journal of Environmental Quality, 2016(45): 215-223.
- [18] Setälä H, BIRKHOFFER K, BRADY M, et al. Urban and Agricultural Soils: Conflicts and Trade-Offs in the Optimization of Ecosystem Services[J]. Urban Ecosystems, 2014(17): 239-253.
- [19] WILLIAMS M A, RICE C W. Seven Years of Enhanced Water Availability Influences the Physiological Structural, and Functional Attributes of a Soil Microbial Community[J]. Applied Soil Ecology, 2007(35): 535-545.
- [20] Garcia-Palacios P, SHAW E A, WALL D H, et al. Temporal Dynamics of Biotic and Abiotic Drivers of Litter Decomposition[J]. Ecology Letters, 2016, 19(5): 554-563.
- [21] 罗上华, 毛齐正, 马克明, 等. 城市土壤碳循环与碳固持研究综述[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7177-7189.
- [22] WANG Z, CUI X, YIN S, et al. Characteristics of Carbon Storage in Shanghai’s Urban Forest[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(10): 1130-1138.
- [23] LIU Y, WANG C, YUE W, et al. Storage and Density of Soil Organic Carbon in Urban Topsoil of Hilly Cities: A Case Study of Chongqing Municipality of China[J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23(01): 26-34.
- [24] 史琰. 中国城市建成区植被结构特征和碳吸收[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [25] EDMONDSON J L, DAVIES Z G, MCCORMACK S A, et al. Land-Cover Effects on Soil Organic Carbon Stocks in a European City[J]. Science of the Total Environment, 2014(472): 444-453.
- [26] 司志国. 徐州市城市绿地土壤碳储量及质量评价[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [27] 武慧君, 姚有如, 苗雨青, 等. 芜湖市城市森林土壤理化性质及碳库研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(5): 1015-1023.
- [28] JOBBAGY E G, JACKSON R B. The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation[J]. Ecological Applications, 2000(10): 423-436.
- [29] SUN Y, MA J, LI C. Content and Densities of Soil Organic Carbon in Urban Soil in Different Function Districts of Kaifeng[J]. Journal of Geographical Science, 2010, 20(1): 148-156.
- [30] 安吉, 李婷, 傅翔, 等. 城市化梯度带绿地土壤碳氮的空间分布特征[J]. 生态学杂志, 2019, 38(09): 2780-2787.
- [31] 柳云龙, 章立佳, 施振香, 等. 上海城市样带土壤有机碳空间变异性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(12): 1488-1494.
- [32] 丁明军, 王敏, 张华. 南昌快速城市化过程对环境多介质有机碳含量的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(06): 2307-2314.
- [33] POUYAT R V, MCDONNELL M J, PICKETT S. Soil Characteristics of Oak Stands Along an Urban-Rural Land-Use Gradient[J]. Journal of Environmental Quality, 1995, 24(3): 516-526.
- [34] 陶晓, 许克福, 戴允泽, 等. 城市不同功能区绿地土壤微生物量碳氮及溶解性碳氮分布特征及影响因素[J]. 土壤通报, 2016, 47(5): 1169-1176.
- [35] 郝瑞军, 方海兰, 沈烈英, 等. 城市不同功能区绿地土壤有机碳矿化和酶活性变化[J]. 中国农学通报, 2009(02): 15-21.
- [36] 卢瑛, 冯宏, 甘海华. 广州城市公园绿地土壤肥力及酶活性特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 160-163.
- [37] 范洪旺, 滕臻, 许克福. 城市绿地土壤呼吸研究综述[J]. 生态科学, 2018, 37(5): 210-216.
- [38] UPADHYAY S, SINGH R, VERMA P, et al. Spatio-Temporal Variability in Soil CO₂ Efflux and Regulatory Physicochemical Parameters from the Tropical Urban Natural and Anthropogenic Land Use Classes[J]. Journal of Environmental Management, 2021(295): 113141.
- [39] CRUM S M, LIANG L L, JENERETTE G D. Landscape Position Influences Soil Respiration Variability and Sensitivity to Physiological Drivers in Mixed-Use Lands of Southern California, USA[J]. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 2016(121): 2530-2543.
- [40] DECINA S M, HUTYRA L R, GATELY C K, et al. Soil Respiration Contributes Substantially to Urban Carbon Fluxes in the Greater Boston Area[J]. Environmental Pollution, 2016(212): 433-439.
- [41] LERMAN S B, CONTOSTA A R. Lawn Mowing Frequency and Its Effects on Biogenic and Anthropogenic Carbon Dioxide Emissions[J]. Landscape and Urban Planning, 2019(182): 114-123.
- [42] 白洁, 范志平, 林力涛, 等. 沈阳城市绿地土壤呼吸时空变化特征[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(5): 105-112.
- [43] SRIVASTAVA P, SINGH P K, SINGH R, et al. Relative Availability of Inorganic N-Pools Shifts

- Under Land Use Change: an Unexplored Variable in Soil Carbon Dynamics[J]. Ecology Indicators, 2016(64): 228-236.
- [44] 王亚军, 郁珊珊. 城市绿地生态系统雨季土壤呼吸对降雨变化的响应[J]. 生态环境学报, 2018, 27(04): 625-633.
- [45] SHCHEPELEVA A S, VASENEV V I, MAZIROV I M, et al. Changes of Soil Organic Carbon Stocks and CO₂ Emissions at the Early Stages of Urban Turf Grasses' Development[J]. Urban Ecosystems, 2017, 20(2): 309-321.
- [46] 张鸽香, 徐娇, 王国兵, 等. 南京城市公园绿地不同植被类型土壤呼吸的变化[J]. 生态学杂志, 2010(02): 274-280.
- [47] POUYAT R V, YESILONIS I D, NOWAK D J. Carbon Storage by Urban Soils in the USA[J]. Journal of Environmental Quality, 2006(35): 1566-1575.
- [48] 刘艺杉, 刘自学, 李晓光, 等. 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[J]. 草业科学, 2008(04): 88-94.
- [49] 马洁. 海绵城市建设典型措施的碳源解析和碳排放研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2018.
- [50] BAE J, RYU Y. Land Use and Land Cover Changes Explain Spatial and Temporal Variations of the Soil Organic Carbon Stocks in a Constructed Urban Park[J]. Landscape and Urban Planning, 2015(136): 57-67.
- [51] 李娟. 成都市不同植被类型与种植年限公园绿地土壤有机碳矿化研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.
- [52] BARDGETT R D, WARDLE D A. Above-Ground-Belowground Linkages Biotic Interactions, Ecosystem Processes and Global Change[M]. New York: Oxford University Press, 2010.
- [53] PATERSON E, OSLER G, DAWSON L A, et al. Labile and Recalcitrant Plant Fractions are Utilised by Distinct Microbial Communities in Soil: Independent of the Presence of Roots and Mycorrhizal Fungi[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(5): 1103-1113.
- [54] RACITI S M, GROFFMAN P M, JENKINS J C, et al. Accumulation of Carbon and Nitrogen in Residential Soils with Different Land Use Histories[J]. Ecosystems, 2011(14): 287-297.
- [55] 顾兵, 吕子文, 梁晶, 等. 绿化植物废弃物覆盖对上海城市林地土壤肥力的影响[J]. 林业科学, 2010(03): 9-15.
- [56] 朱士华, 艳燕, 胡云锋, 等. 干旱区城市化对生态系统碳库的影响——以乌鲁木齐市为例[J]. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1086-1099.
- [57] LANGE M, EISENHAUER N, SIERRA C A, et al. Plant Diversity Increases Soil Microbial Activity and Soil Carbon Storage[J]. Nature Communications, 2015(6): 6707.
- [58] POUYAT R V, YESILONIS I D, GOLUBIEWSKI N E. A Comparison of Soil Organic Carbon Stocks Between Residential Turf Grass and Native Soil[J]. Urban Ecosystems, 2009(12): 45-62.
- [59] RASSE D P, RUMPELL C, DIGNAC M F. Is Soil Carbon Mostly Root Carbon? Mechanisms for Specific Stabilization[J]. Plant and Soil, 2005(269): 341-356.