

DOI: 10.5846/stxb201809131973

谢天, 侯鹰, 陈卫平, 王美娥, 吕斯丹, 李勖之. 城市化对土壤生态环境影响研究进展. 生态学报, 2019, 39(4): - .

Xie T, Hou Y, Chen W P, Wang M E, Lyu S D, Li X Z. Impact of urbanization on the soil ecological environment: A review. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): - .

城市化对土壤生态环境影响研究进展

谢 天¹, 侯 鹰¹, 陈卫平^{1,2,*}, 王美娥¹, 吕斯丹³, 李勖之⁴

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 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟院重点实验室, 北京 100101

4 环境保护部南京环境科学研究所, 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室, 南京 210042

摘要: 城市土壤是城市生态系统的重要组成部分之一, 发挥着重要的生态系统服务功能。在全球快速城市化的背景下, 城市土壤受到人类活动的强烈干扰, 土壤物理、化学性质发生改变, 土壤退化与污染日益加重。一方面, 城市土壤退化导致土壤动物生态特征与行为模式发生变化, 城市景观格局与土地利用类型的变化强烈影响了土壤动物的栖息地, 为土壤动物的生存与生物多样性带来潜在威胁; 另一方面, 城市化过程改变了土壤微生物群落组成与功能特征。此外, 城市化直接影响了城市土壤维持植物生长、土壤自然消减能力以及碳储存功能等重要的生态系统服务功能。针对城市化过程对土壤生态环境产生的一系列影响, 需要采用科学的管理方式, 改善土壤理化性质, 提高土壤环境质量, 保护和恢复土壤生物多样性, 从而增强城市土壤的生态系统服务功能。

关键词: 城市化; 城市土壤; 土壤退化; 土壤动物; 土壤微生物; 生态系统服务功能

Impact of urbanization on the soil ecological environment: A review

XIE Tian¹, HOU Ying¹, CHEN Weiping^{1,2,*}, WANG Meie¹, LYU Sidan³, LI Xuzhi⁴

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control, Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China

Abstract: Urban soil is one of the most important components in urban ecosystems and plays a prominent role in ecosystem services. With the ongoing rapid urbanization worldwide, urban soils are being extensively disturbed by human activities, which alters their physical and chemical properties and results in soil degradation and severe pollution. The ecological characteristics and behavioral patterns of urban soil fauna has been affected by soil degradation, and changes in urban land use and land cover have disturbed the habitats of these fauna, posing potential threats to their survival and biodiversity. Urbanization has also significantly influenced the assemblage composition and functional characteristics of the soil microbial community. Furthermore, it has a direct impact on the essential ecosystem services of urban soils, including the maintenance of plant survival and growth, natural attenuation capacity, and carbon sequestration. To counter the impact of

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0505702); 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室项目基金(SKLURE2013-1-04); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC034)

收稿日期: 2018-09-13; 修订日期: 2018-12-25

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

urbanization on the soil ecological environment, it is necessary to improve soil physical and chemical properties through scientific management, to maintain soil environmental quality, preserve biodiversity, and enhance the ecosystem service function of urban soil.

Key Words: urbanization; urban soil; soil degradation; soil fauna; soil microorganisms; ecosystem service

在全球城市化的背景下,世界城市人口不断增加,城市规模持续扩张。全球城市人口总数已经由 1950 年的 7.5 亿上升至 2018 年的 42 亿,城市人口比例已达到 55%^[1]。较欧美发达国家,我国城市化进程起步相对较晚,但发展速度较快,截止 2014 年,我国城镇化常住人口已经由改革开放初期的 1.7 亿增至 7.3 亿^[2]。然而在城市化快速发展的背景下,一些城市与地区仍保持着不可持续的发展模式,城市不断提高的人类活动强度导致城市生态环境问题日益突出,对城市生态系统结构和过程的影响不断加剧,进而对生态系统的功能与服务带来显著的影响,并持续威胁着城市生态安全与城市居民的身体健康。

土壤是人类赖以生存的物质基础和持续发展的宝贵资源。Daily 等^[3]将土壤生态系统服务功能总结为:调节水文循环、植物的物理支撑作用、植物养分的供给与传输、废弃物与污染物的处理、土壤肥力的恢复以及元素循环的调节作用。作为城市生态系统的重要组成部分,城市土壤提供了多样的生态系统服务功能。然而,在快速城市化的过程中,人类活动导致城市中原始的土地覆被类型不断被工业建筑用地及人工景观所取代,自然土壤被硬化地表逐渐封实,高强度的人类活动改变了土壤覆被和土地利用格局,影响了城市土壤地球化学元素的循环过程,土壤动物的生境随之受到威胁,生物多样性发生变化,土壤生态系统的健康状态受到影响,超出土壤自然生态功能的阈值,从而带来一系列的土壤生态环境问题。

城市土壤的健康状况与城市生态环境质量和城市居民健康安全紧密相关。自上世纪末,全球范围内对城市土壤的关注逐渐增多。当前针对城市土壤生态环境问题的研究主要集中在城市各类人为排放的污染物在土壤中的累积特征及健康风险^[4-5]。尽管学界已普遍认同人类活动导致城市土壤理化性质的变化,并带来各种不利的生态效应,然而城市化过程对土壤特征、土壤生物,以及土壤生态功能影响的研究仍然缺乏系统的分析。本文梳理了国内外相关文献资料,分析讨论了与城市土壤生物及生态系统服务功能相关的生态学过程,并从土壤理化性质、土壤动物、土壤微生物以及土壤生态系统服务功能等几个方面探讨了城市化过程对土壤生态环境的影响。

1 城市化对土壤理化特征的影响

城市土壤的理化特征受城市人为活动影响剧烈。建筑施工地和新建的大型公共绿地的土壤经历了人为的移除、堆填及混合等剧烈扰动,其自然剖面被改变,原有的成土层结构遭到破坏,在垂直方向上形成深厚的均匀混合土层。同时,土壤中无规律地混入大量的建筑垃圾和生活垃圾等外来物质^[6]。城市人类活动造成土层结构的无序变化,杂质来源多样和成分组成复杂,导致城市生态系统土壤质量的下降^[7]。城市中,不同城市化程度的公园或居民区的土壤性质均表现出显著差异^[8]。城市土壤理化特征的变化是城市化过程影响土壤生态环境的直观反映,也是土壤生态功能变化的潜在原因。

1.1 城市化对土壤物理特征的影响

人为压实是城市绿地土壤的普遍现象,是城市土壤物理特征变化的根本原因。在城市中,建筑材料的堆放、重型机器的作业、交通车辆和行人践踏等行为均直接导致城市土壤压实,这些人为压实行为导致土壤自然结构体变形,土粒团聚体之间的孔隙体积缩小,孔隙结构变化甚至坍塌,土壤紧实度增加,透水透气性能下降,从而形成较天然土壤更高的容重,造成土壤质量的降低。城市中不同类型的人类活动代表了不同水平的人为干扰强度,导致土壤容重的差异。研究表明,国内外不同城市的不同功能区土壤容重的均值间存在显著差异,受到剧烈人类活动干扰的城市中心土壤容重大多高于城市周边郊区(表 1)。另外,相同功能区内不同类型土

壤容重同样差异明显,例如城市湿地中灌丛下土壤容重显著高于河漫滩土壤容重^[15],而城市公园草地下土壤容重高于乔木植被下土壤容重,并与建筑时间呈显著正相关关系^[16]。因此,城市内不同类型的人为活动对土壤压实程度具有显著的影响。

表 1 国内外不同城市中不同功能区绿地土壤容重统计结果

Table 1 Statistical results of soil bulk densities of different land use types in different cities worldwide

研究城市 Study areas	公园绿地 Urban park	道路绿地 Vehicular traffic	居民绿地 Residential areas	单位/学校绿地 Company/ school	郊区绿地 Suburbs
北京 ^[9] Beijing	1.38b	1.49b	1.44b	1.42b	0.89a
北京 ^[10] Beijing	1.39ab	1.36ab	1.42b	1.38ab	1.31a
南京 ^[11] Nanjing	1.70	1.65	1.54	1.49	1.36
哈尔滨 ^[12] Harbin	1.35ab	1.40b	—	—	1.31a
美国佛罗里达州戴德郡 ^[13] Dade County, Florida, USA	1.6	1.8	1.4	—	1.5
美国新泽西州海洋郡 ^[14] Ocean County, New Jersey, USA	1.42	1.79	1.67	—	1.47

表中均值后不同字母表示不同土地利用类型之间的显著差异

此外,城市下垫面的改变影响了土壤水分下渗的能力。一方面,地表封实增加城市地表径流量,影响地下水自然回灌过程,改变城市的水文状况,成为城市内涝的重要原因^[17],地表径流带走土壤中的大量营养物质,增加了地表河流的营养物质与下游水体的污染负荷,同时影响城市土壤和水体的质量;另一方面,地表封实使绿地植物根系难以获得充足的空气、水分以及养分,直接限制了植物的生长,缺乏营养的植物需要更加频繁地通过人为施肥获得其生长必需的营养元素,进一步导致了降雨径流中养分的增加^[18]。因此,物理特征的退化是城市土壤质量下降的一种主要表现形式,并进一步产生各类城市生态环境效应。

1.2 城市化对土壤化学特征的影响

城市化对土壤化学特征的影响主要表现为城市土壤化学元素循环过程的变化。一方面,在城市化过程中,人为搅动造成了城市土壤自身化学性质的改变,土壤的有机质和速效养分含量降低,其保持养分的能力减弱。此外,由于城市中植物的凋落物多数情况下得到了及时清理,难以实现土壤与植物之间的养分循环;土壤有机质和养分进一步的损失,导致土壤抵抗干扰能力下降。另一方面,碳、氮、磷、硫等各类营养元素通过大气沉降、城市面源和点源排放等途径输入土壤,改变土壤元素的生物化学循环过程^[19]。此外,城市土壤化学特征还受到了其物理性质变化的影响,例如土壤的可溶性碳、总氮以及总磷在土壤中移动性较强,与土壤容重呈正相关关系^[16]。

城市化过程对土壤化学特征影响的另一重要表现是城市土壤污染的加剧。城市土壤处于城市生态系统物质循环的末端,具有接收城市人类活动废弃物和富集污染物质的作用^[20]。城市中工业“三废”、机动车尾气排放以及城市生活垃圾倾倒,使得大量污染物进入土体,从而导致城市土壤重金属、有机污染物以及病原菌污染等环境问题^[21-22]。城市土壤中累积的各类污染物可以通过不同的方式进入人体,包括直接通过食物链传递和土壤颗粒物吸入,伴随富集的营养元素通过地下水进入食物链等途径摄入人体,对城市居民身体健康造成潜在的威胁^[23]。因此,城市化对土壤化学性质的影响与城市生态环境和人体健康密切相关,关注城市土壤化学性质的变化具有重要的现实意义。

2 城市化对土壤动物生态学特征的影响

城市土壤物理化学特征的退化为土壤动物的生存与生物多样性造成了潜在威胁。作为土壤动物的栖息地,土壤为生活在其中的动物提供了必需的营养元素和适宜的生存环境。与此同时,土壤动物作为陆地生态系统的重要组成部分,参与了土壤生态系统中诸多的生态过程,在改善土壤理化性质,分解土壤凋落物,促进土壤养分循环等过程中均起到了积极的作用。因此,土壤蚯蚓等土壤动物能够反映土壤健康水平,常作为指

示生物用以表征土壤环境质量^[24]。当前对于土壤动物种群和群落的研究已经不再局限于自然生态系统,在人为干扰的生态系统中,土壤动物的生态学特征的响应同样引发了国内外学者的关注。诸多研究表明,城市土壤污染、土壤理化环境的变化以及其它宏观尺度的人为活动干扰深刻影响了土壤动物个体、种群以及群落特征。

城市人类活动造成的土壤污染深刻影响了土壤动物的生存环境,并在基因、细胞、个体、群落等水平上对土壤无脊椎动物产生不同程度的毒性效应^[25-26]。例如,Creamer 等^[27]研究发现土壤线虫和线蚓的丰度和物种多样性对土壤重金属浓度变化的响应较为敏感,而土壤蚯蚓则具有相对较强的耐受性,但在土壤重金属超过特定阈值时,土壤中蚯蚓仍表现显著下降的趋势。Skaldina 等^[28]发现芬兰城市工业区土壤蚂蚁在个体和种群水平上均受到土壤重金属浓度的影响。Santoruf 等^[29]发现意大利那不勒斯市土壤节肢动物,尤其是弹尾虫种群丰度受土壤重金属污染影响尤其显著。此外,Santoruf^[30]研究了土壤节肢动物群落结构特征对重金属污染响应的季节性差异,结果表明螨目和弹尾目的相对丰度在秋季分别与土壤总 Cu 和水溶态 Cu 的浓度显著相关。多数研究均表明,城市土壤污染对于无脊椎动物群落具有明显的负面效应,在短时间内,土壤动物物种多样性和丰度均呈现下降的趋势^[31];在长时间内,土壤动物对污染的适应性可能提高,耐抗性的物种不断取代群落中敏感的物种,从而改变土壤群落的结构组成^[32]。因此,土壤污染物能够对城市土壤中多种无脊椎动物的种群丰度、群落组成和物种多样性产生不同程度的影响,甚至使其行为活动发生显著变化^[33-34]。

城市土壤理化性质的改变,导致土壤动物具有独特的生态特征与行为模式。诸多研究表明城市土壤理化性质是土壤蚯蚓丰度与生物量的决定性因子。例如,Amossé 等^[35]对瑞士奈沙泰尔市土壤蚯蚓的研究显示土壤深度与土壤容重是城市土壤中影响蚯蚓群落结构组成的主要的环境因子,而线虫群落特征则与土壤含水量显著相关。Xie 等^[36]对于北京市居民区蚯蚓群落的研究结果则表明,土壤含水量和土壤 pH 值是当地蚯蚓群落结构组成的主要影响因素。此外,伴随着土壤理化性质的变化,土壤动物的广幅种更容易适应被干扰的环境,成为优势物种,同时狭幅种则不断减少,因而具有更高的灭绝风险^[37]。

除了土壤理化性质改变带来的影响以外,城市土壤动物的生存还受到来自宏观尺度的城市化过程的影响。随着城市规模的扩张,由城市景观格局和土地利用类型发生变化引起的土壤动物栖息地的破坏与丧失直接影响了土壤动物的群落结构特征与物种多样性。例如,彭涛等^[38]发现北京市不同土地利用类型下土壤节肢动物种群丰度具有显著差异。章家恩等^[39]发现广州市受人为干扰的土地利用类型中的土壤动物物种多样性显著低于自然植被类型下的相应水平。土壤节肢动物群落对于不同程度城市化压力的响应也存在着显著差异^[36, 40],如图 1 所示,本团队研究发现北京市居民区和公园土壤蚯蚓种群丰度和生物量均与建成时间显著相关^[36]。而且,城市化过程所导致的土壤动物栖息地的破碎和消失还可能是城市土壤动物局地性濒危和灭绝的主要原因,其对土壤动物物种多样性的影响程度可能甚至高于土壤理化性质所产生的影响^[41]。其他国家学者的研究也发现类似结果,例如,Leonard^[42]发现悉尼市不同的土壤节肢动物种群丰度受栖息地破碎度的影响极其显著。美国曼哈顿土壤蚂蚁群落结构与种群丰富度在不同的景观尺度下具有显著差异^[43-44]。此外,Xie 等^[36]还通过 Meta-种群动态理论模型解释了不同景观尺度下城市土壤生境破碎度对土壤蚯蚓种群丰度的差异性影响。综上,由城市化导致的土壤污染物累积、土壤理化性质的退化以及土壤动物栖息地丧失等现象是土壤动物个体、种群以及群落特征变化的重要原因。

3 城市化对土壤微生物特征的影响

土壤微生物在陆地生态系统生物化学循环过程中发挥着不可替代的作用。土壤微生物群落组成结构特征与土壤环境变化密切相关,对土壤环境变化高度敏感,能够反映土壤生态系统的健康状况,因而被视为理想的土壤质量的评价指标^[45]。城市化是影响全球生物多样性的关键因素之一,土壤微生物在生物多样性中占有重要的地位^[46]。全球城市的快速扩张导致了土壤微生物群落组成与功能发生变化,因此,研究城市土壤微生物群落的结构与功能的变化与驱动规律,具有重要的理论与现实意义,因而城市化对土壤微生物群落特征

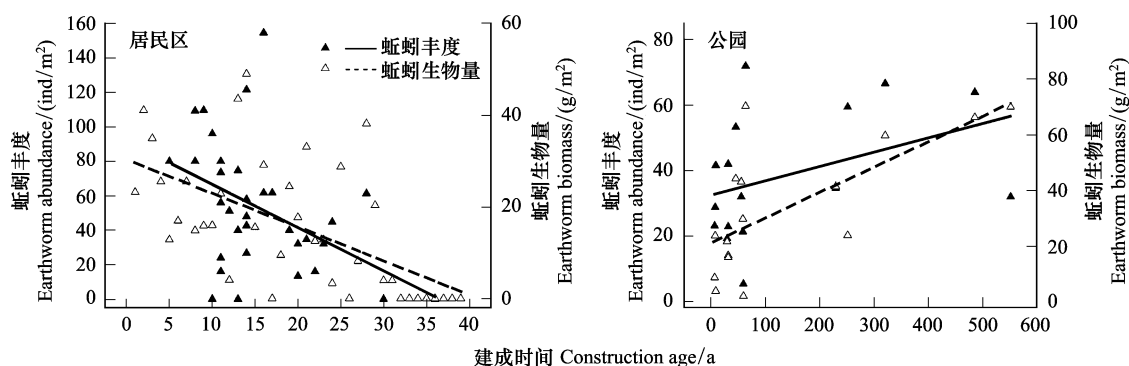


图1 北京市土壤蚯蚓种群特征与居民区与公园建成时间的拟合曲线

Fig.1 Fitting curves between the earthworm population and the age of residential areas and parks in Beijing

的影响受到学界越来越多地关注。

已有的研究采用不同技术手段对城市土壤微生物群落特征及其影响因素展开分析。例如, Xu 等^[47]通过 454 焦磷酸测序技术对我国 16 个城市的代表性公园的土壤微生物群落及地学特征进行研究,揭示了公园土壤理化特征和气候特征对细菌群落结构特征的内在关系。Yan 等^[48]采用高通量测序的方法分析了北京市建成区土壤微生物群落结构特征,表明城市发展是影响当地城市土壤微生物群落组成与生物多样性的因子,其中土壤 pH 对细菌群落特征的影响最为关键。相似的研究发现城市土壤微生物群落多样性随城市不透水地表的扩张而显著下降,城市土壤重金属累积以及不同土地利用类型的差异也是土壤微生物群落结构变化的重要原因^[49-50]。上述研究均指出,土壤微生物群落特征与城市化过程密切相关,由城市化过程导致的土壤理化性质的变化可能是土壤微生物群落结构特征差异的根本原因。

此外,国内外学者还针对土壤中不同功能类型的微生物受城市化过程的影响展开研究。例如,闫冰等^[51]利用 Biolog-ECO 微平板技术的分析表明,北京市不同环路土壤微生物群落代谢功能的多样性之间并未表现出显著差异,认为城市化发展过程可能使土壤微生物功能多样性趋于同质化,该结论与杨元根等^[52]对英国城市的研究结果有所差异,后者指出不同代谢功能的微生物的数量在城乡梯度上的差异是由于重金属对微生物功能损伤的长期效应所导致的。Rai 等^[53]指出在土壤固氮过程中起到重要作用的蓝藻细菌群落内的物种多样性水平受城市化过程影响显著。具有耐热性能的球囊霉素相关的土壤蛋白的群落同样在城乡梯度上表现出了显著的差异^[12]。Mafiz 等^[54]通过宏基因组学工具对于美国城市农田土壤细菌的抗生素耐药性与耐药基因展开研究,发现无论城市土壤是否受到污染,土壤细菌均存在较为多样的抗生素抗性基因,且抗生素抗性基因之间、抗生素抗性基因与重金属抗性基因之间均存在显著的正相关性^[55-56]。此外,不同的研究还表明城市道路交通压力、土壤重金属污染及土地利用类型变化均对城市土壤多种酶的活性产生重要的影响^[57-58]。因此,城市化过程不仅改变了土壤微生物群落结构特征,同时对其功能特征也产生了深刻的影响。

城市土壤微生物群落受到了城市地上与地下各种生物因素以及土壤理化性质等非生物因素的共同影响,然而城市微生物群落组成、结构和功能特征与各种土壤理化参数的关系仍然不明晰,围绕土壤微生物群落多样性和地上部分生物多样性互相作用机理的研究仍然缺乏。因此,仍需采取相应的微生物研究技术,进一步对城市化导致的城市土壤理化性质的变化、土壤污染、土地管理措施以及地上生物多样性的变化对土壤微生物群落的影响机制加以深入研究。

4 城市化对土壤生态系统服务功能的影响

土壤作为生态系统的重要组成部分,为人类提供了各种福祉。当前学界提出了土壤生态系统服务功能的不同研究框架,用以评估土壤生态风险、土壤生态功能保护的优先性,并用以制定相应的土壤修复措施。在城市生态系统的管理中,生态系统服务功能的概念正在越来越多地被引入到土壤管理的议题当中,例如,在城市

管理的前端提出 DESTISOL 决策支持系统的概念,构建了基于城市土壤理化因子、土壤功能以及土壤生态系统服务的综合定量关系,从而将土壤生态系统服务功能的概念运用于城市管理的决策中^[59]。简而言之,城市土壤生态系统服务功能受到了研究者和决策者越来越多的重视。城市土壤既为植物的生长提供必需的养分,以维持绿色植物的生长;又能够过滤、缓冲和转换土壤中有害物质,实现污染物的净化;并且具有固定与储存大气中温室气体的能力;同时还可以与地上部分进行水和热的交换,发挥其气候调节的功能^[60]。已有的相关研究主要针对城市化对土壤维持植物生长功能、土壤自然消减功能和土壤碳储存功能的影响。

4.1 城市化对土壤维持植物生长功能的影响

城市绿地植被为城市居民提供了重要的生态系统服务。相关研究表明,绿地植物能够有效缓解城市居民日常的精神压力,提供绿地景观的美学审美价值。然而,相较于自然森林植被,城市绿地植物具有较低的存活率^[61-62]。城市土壤物理、化学和生物特征的改变能够对城市树木存活率产生不利影响。伴随着人类活动的强烈干扰,城市土壤理化性质改变,土壤营养物质减少,对植物的养分供应下降,降低了城市绿地的质量,影响了土壤维持植物生长的功能,阻碍了绿地植物的生长。

城市化过程中,土壤物理性质的改变是影响城市植物正常生长的重要因素。土壤的孔隙状况与土壤环境中生物与非生物过程密切相关,包括孔隙度、孔隙结构等相关土壤物理指标决定了土壤中水、气的比例关系以及土壤温度和营养的状态。然而,人为活动导致的土壤压实改变了土壤透气孔径的分布,相关研究表明城市土壤孔隙度介于 39.6%—47.2%之间,低于土壤的适宜区间(50%—60%)^[7, 63]。Jim 等^[63]通过研究香港道路绿地土壤孔隙状况对树木生长的影响,发现土壤孔隙度指标是影响城市植物生长功能的重要因子,与植物的健康稳定的生长紧密相关;此外,不透水地表的扩张对道路绿地植物生长空间的限制,同样影响了其正常生长。同时,Haan 等^[61]对美国密西根城市道路绿地的研究表明,较土壤孔隙度而言,植物的存活率更加取决于土壤质地。因此,对相应土壤物理性质的改良应在城市绿地土壤管理中加以运用。

此外,城市土壤化学特征的变化,使其难以为城市植物生长提供足够的肥力和理想的生存环境,进一步抑制城市植物的生存与生长。例如,Lawrence^[64]通过一般线性混合模型表征城市土壤特征与城市植被特征之间的关系,发现包括土壤 pH、钾素等土壤化学特征是决定城市植物生存的重要因子,而城市土地利用覆被类型与人为管护方式的差异同样与城市植物的存活率和死亡率密切相关。类似的研究同样证实通过翻耕与堆肥等不同的人为管理方式可以改善土壤性质,促进城市树木的生长^[65]。综上所述,土壤维持植物生长的功能受到城市化过程的影响,与土壤性质密切相关,并随土壤理化性质的退化而持续下降。

维持植物生长是城市土壤基本的生态系统服务功能之一。在城市中,土壤理化性质的改良,对于维持植物生长的功能、保障城市绿化效果极为重要。当前针对城市土壤维持植物生长功能的研究侧重于单一的土壤或城市化因子对植物健康的影响,难以形成完善的定量评价体系。如何建立城市土壤不同理化特征与维持植物生长功能之间的定量关系,并为城市绿地管理提供相应的科学指导依据,仍是城市土壤生态功能研究的重点。

4.2 城市化对土壤自然消减功能的影响

城市中人类活动产生的污染物大多直接或间接地进入城市土壤。作为城市环境的天然屏障,城市土壤既是城市污染物的汇集地,又是污染物的净化器,具有容纳、过滤和消解污染物的能力。土壤对于污染物的净化功能是城市土壤生态系统最为重要的生态功能之一,对城市生态系统的保护和居民健康起到了积极的作用^[16, 20]。城市化过程中人为排放的污染物,在土壤中不断累积,可能超过土壤自身的净化能力,从而导致土壤污染。

美国环保局(EPA)将土壤自然消减能力(natural attenuation capacity)定义为,在没有人类干扰的情况下,土壤中污染物的总量、浓度和体积减少、污染物的毒性降低、迁移能力削弱的一系列物理、化学和生物过程,是土壤重要的生态系统服务功能^[66]。土壤自然消减能力与土壤复杂的生态过程密切相关,不同的土壤因子对土壤净化功能发挥着不同的作用,例如土壤有机质可以通过固定重金属离子,显著降低土壤重金属有效

性^[67];土壤微生物能够将土壤中有机污染物吸收、转化并降解为其他无害的物质^[68]。因此,土壤对污染物的净化功能与土壤自身的物理、化学和生物学特征之间的相互作用密切相关。通过土壤理化指标对土壤净化功能进行定量评价,是当前城市土壤净化功能研究的热点。

城市化过程对城市土壤生态系统产生的环境胁迫直接影响了其生态学过程,导致了其物理、化学和生物特征出现了不同程度的改变,进一步影响土壤自然消减功能。例如,Setälä 等^[16]分析了城市公园土壤理化性质的变化对土壤固定重金属能力的影响。Rutgers 等^[69]和 Thomsen 等^[70]则针对土壤重金属和有机污染物在土壤媒介中挥发、降解、迁移、扩散和生物固定等一系列的生态学过程建立了相应的生态系统功能评价指标。Wang 等^[71]借助了 Rutgers 等^[69]的模型,选取土壤若干理化指标对北京市土壤的自然消减能力进行了评价,发现北京市土壤自然消减能力与居民区和公园的建成年数显著相关,其中,在不同的用地类型中,城市公园具有最高的土壤自然消减能力。此外,Xie 等^[72]考虑到城市土壤不同物理、化学和生物因子在土壤净化功能中参与的生态过程的差异,在评价指标体系中引入权重,对北京市居民区绿地土壤自然消减能力进行定量评价,结果表明城市土壤容重、微生物群落多样性以及有机质含量对城市土壤自然消减能力的发挥起到重要的作用;该研究同时揭示了城市居民区城市化社会经济发展程度对土壤净化功能的显著影响,土壤自然消减能力可以通过城市化社会经济因子有效地进行表征。因此,城市土壤自然消减能力与土壤自身理化性质密切相关,土壤理化特征的健康是土壤相关功能正常发挥的重要前提,同时城市化强度对土壤自然消减能力具有显著的影响。

城市土壤自然消减能力的发挥关系到人体健康和城市生态环境质量。现有的土壤生态服务功能评价方法较多,尚仍不存在标准的定量评价体系。如何建立标准规范的土壤功能的评价体系,是今后土壤生态服务功能,尤其是土壤自然消减能力研究的重点和难点。由于城市土壤理化特征的变化是导致城市土壤自然消减能力变化的根本原因,因此通过土壤理化特征对城市土壤自然消减能力展开定量评价是较为有效且科学的研究方法。此外,当前国内外学界仍然缺乏根据土壤自然消减能力确定城市土壤中可容纳污染物的临界阈值的系统研究。构建土壤自然消减能力的定量评价方法,确定土壤自然消减能力和土壤中污染物临界阈值之间的定量关系,对于明晰城市土壤污染生态效应,提高土壤环境质量,保护城市居民健康安全具有重要意义。

4.3 城市化对土壤碳储存功能的影响

土壤碳库是陆地碳库的重要组成部分。土壤与植被碳库的碳储存能力决定了大气与陆地生态系统之间的净碳通量,其微小的波动能够影响大气中 CO_2 浓度的年际变化,从而导致全球气候变化^[73]。城市土壤是城市生态系统的重要碳库,其碳储存功能是城市土壤重要的生态系统服务功能。城市土壤固碳功能不仅受到自然因素的影响,也受到城市人类活动的干扰,因此,城市生态系统土壤碳储存特征、功能及人类活动的影响受到学界越来越多的关注^[74-75]。

近年来国内外学者对全球范围内城市土壤碳储量进行估算,结果显示以往的研究低估了城市土壤的固碳功能。例如,朱超等^[76]对中国城市建成区土壤有机碳储量的估算发现,2006 年土壤有机碳储量约为 0.25 Pg,占城市生态系统有机碳总储量的 73%。国内学者对北京^[77]、上海^[78]、广州^[79]、南京^[80]等城市土壤碳储量分别展开调查,结果显示不同城市土壤均具有较高的碳库储量。Churkina 等^[81]对美国城市土壤碳储量进行量化,表明不同城市区域内土壤固碳总量可达 7—17 Pg C,占城市碳库总量的 64%,城市碳库密度则高达 23—42 kg/m^2 ,远高于其它自然生态系统的碳库密度。Edmondson 等^[82]发现城市绿地与不透水地表下的土壤均具有较高的固碳功能,其固碳潜力远高于人们的预期。尽管不同国家和城市的土壤碳储量存在一定差异,但针对不同城市的研究结果均表明城市土壤具有较强的固碳能力。

由于人类活动的影响,城市土壤碳库与天然土壤相比,在时间和空间上具有更高的异质性。在时间尺度上,随着我国城市建成区绿地面积的不断增加,土壤有机碳储量在 1997—2006 年间呈现出快速增长的趋势^[76]。相似地,美国城市土壤从 1950—2000 年之间碳储量增速显著。此外,由于城市湿地土壤面积的扩张,韩国的公园在 2003—2013 年 10 年间公园表层土壤有机碳密度增加了 2 倍以上^[83]。相反,哈尔滨市土壤有

机碳库储量近 30 年来下降 0.16 Tg,这是由于城市中具有较强固碳功能的耕地与林地快速消失所导致的^[84]。

在空间尺度上,城市土壤有机碳储量与距市中心距离呈显著的负相关关系^[85]。陈浩等^[80]研究发现南京市土壤有机碳储量较低的区域主要分布在快速城市化区域,地表的封实是影响土壤碳储存功能的最主要原因。在空间垂直方向上,土壤有机碳储量与土壤深度存在负相关关系。比如,英国莱彻斯特城的土壤有机碳储量与土壤深度呈现出负的指数相关的关系,1 m 深的土壤中 47% 的有机碳均集中在表层土壤^[82]。Ghosh 等^[86]发现城市表层土壤(0—30 cm)较深层土壤(30—50 cm 和 50—100 cm)具有更高的有机碳储量。此外,许多研究证实了城市不同植被类型下土壤固碳功能存在显著差异,例如,林地土壤的碳固存能力显著高于草地土壤^[75, 83],不同乔木种的土壤之间同样存在差异^[87]。尽管城市造林能够提升城市生态系统的碳储量,但是对于土壤碳储量的贡献仍然存在一定争议^[88]。

不同城市化水平对土壤碳储存功能具有显著的影响。例如,不同研究发现土壤固碳能力随城市土地建成年数增加而增加,这可能由于土壤理化性质的变化所导致的^[89-90]。相似地,城市人口数量、城市规模、土地利用/覆被变化以及城市绿地的不同管理模式均被证实显著影响城市土壤碳储量^[91-92]。此外,Liu 等^[77]采用多个与土壤有机碳相关的指标,利用生态系统服务功能指数的方法,对北京市建成区土壤固碳能力进行评价,结果表明北京市建成区土壤固碳功能较差,城市化过程削弱了城市土壤的固碳功能。Sarzhonov 等^[93]通过 CO₂/有机碳库比衡量俄罗斯城市土壤碳库,结果表明城市化过程显著降低了土壤碳储存功能。Vasenev 等^[94]通过情景分析的方法,模拟不同城市化水平下,俄罗斯莫斯科城市的区域扩张和土地覆被类型变化可能对土壤有机碳储量产生有利或不利的效应。综上,城市中土壤碳库具有明显的时空异质性,城市化能够显著影响土壤碳储存功能。

城市土壤固碳功能在促进生态系统碳循环、缓解气候变化效应的过程中扮演着重要的角色,是当前城市生态系统服务功能的研究热点。目前国内外学者对不同城市土壤碳储存功能及其影响因素的研究较为丰富,但城市土壤碳库的稳定性较差,土壤固碳功能的影响因素及其生态效应较为复杂。此外,由于不同研究中土壤碳库的数据来源、研究尺度、以及模型和参数的选取不同,可能导致估算结果存在较大差异和不确定性,因而难以将不同城市的研究结果进行对比。如何在特定尺度上确定统一的碳储存功能的评估方法,并提高模型的估算精度,是当前土壤相关功能研究的难点。

5 结论与展望

城市土壤既为土壤动物和微生物提供了天然的栖息地,也为人们提供多种重要的生态系统服务功能。然而,城市土壤受到人类活动的强烈干扰,一方面,其本身物理和化学性质较天然土壤而言,均表现出明显差异。城市土壤理化性质的变化能够显著影响土壤动物与微生物群落的结构特征,同时导致一系列土壤生态系统服务功能,包括维持植物生长功能、自然消减能力以及碳储存功能等发生变化。因此,城市土壤退化是城市土壤动物生态特征与行为模式、土壤微生物群落特征、功能效应以及土壤生态服务功能变化的根本原因。另一方面,城市化过程改变了城市土地利用/覆被类型,破坏了土壤生物栖息地,改变了土壤生物群落结构特征,甚至导致土壤物种局地灭绝,并且影响土壤生态系统服务功能的发挥。

然而,关于城市化过程对土壤生态环境的影响研究仍然存在许多空白,因此亟须对城市土壤质量和土壤生态服务功能的影响因素及其机制展开更加细致和全面的研究。开展对城市土壤理化特征长期定位和系统性的观测,探讨城市土壤生物生态学特征的动态变化趋势及其影响驱动因素,能够为城市生态系统的管理和决策提供科学依据,对提高城市土壤生态系统服务功能,缓解城市化所产生的负面生态效应,保障城市居民健康、保护人居环境具有重要的意义。

参考文献 (References):

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs. World urbanization prospects: The 2018 revision. 2018.

- [2] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国统计年鉴 2016. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [3] Daily G C, Matson P A, Vitousek P M. Ecosystem services supplied by soil//Daily G C, ed. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997: 113-132.
- [4] 王美娥, 陈卫平, 彭驰. 城市生态风险评价研究进展. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 911-918.
- [5] McIlwaine R, Doherty R, Cox S F, Cave M. The relationship between historical development and potentially toxic element concentrations in urban soils. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 1036-1049.
- [6] Meuser H. Anthropogenic soils//Meuser H, ed. *Contaminated Urban Soils*. Dordrecht: Springer, 2010: 121-193.
- [7] 崔晓阳, 方怀龙. 城市绿地土壤及其管理. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [8] Sarah P, Zhevelev H M, Oz A. Urban park soil and vegetation: effects of natural and anthropogenic factors. *Pedosphere*, 2015, 25(3): 392-404.
- [9] 马秀梅. 北京城市不同绿地类型土壤及大气环境研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [10] 毛齐正. 北京城市绿地植物多样性—土壤关系研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [11] 杨金玲, 张甘霖, 赵玉国, 赵文君, 何跃, 阮心玲. 城市土壤压实对土壤水分特征的影响——以南京市为例. *土壤学报*, 2006, 43(1): 33-38.
- [12] Wang W J, Wang Q, Zhou W, Xiao L, Wang H M, He X Y. Glomalin changes in urban-rural gradients and their possible associations with forest characteristics and soil properties in Harbin City, Northeastern China. *Journal of Environmental Management*, 2018, 224: 225-234.
- [13] Hagan D, Escobedo F, Toor G, Mayer H, Klein J, Dobbs C. Soil Bulk density and organic matter in urban miami-Dade county, Florida. *Soil and Water Science*, 2010, SL 327: 1-4.
- [14] Ocean County Soil Conservation District. The Impact of Soil Disturbance During Construction on Bulk Density and Infiltration in Ocean County, New Jersey[R]. Forked River, NJ: Schnabel Engineering Associates, Inc., 2001.
- [15] Chappell C, Johnson A. Influence of pH and bulk density on carbon dioxide efflux in three urban wetland types. *Professional Agricultural Workers Journal*, 2015, 3(1): 5.
- [16] Setälä H, Francini G, Allen J A, Jumpponen A, Hui N, Kotze D J. Urban parks provide ecosystem services by retaining metals and nutrients in soils. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 451-461.
- [17] 刘文, 陈卫平, 彭驰. 社区尺度绿色基础设施暴雨径流消减模拟研究. *生态学报*, 2016, 36(6): 1686-1697.
- [18] Koeser A, Hauer R, Norris K, Krouse R. Factors influencing long-term street tree survival in Milwaukee, WI, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(4): 562-568.
- [19] 卢琰, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤的特性及其分类的初步研究. *土壤*, 2001, (1): 47-51.
- [20] 张甘霖, 吴运金, 龚子同. 城市土壤——城市环境保护的生态屏障. *自然杂志*, 2006, 28(4): 205-209.
- [21] Wang M E, Liu R, Chen W P, Peng C, Markert B. Effects of urbanization on heavy metal accumulation in surface soils, Beijing. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 64: 328-334.
- [22] Peng C, Ouyang Z Y, Wang M E, Chen W P, Li X M, Crittenden J C. Assessing the combined risks of PAHs and metals in urban soils by urbanization indicators. *Environmental Pollution*, 2013, 178: 426-432.
- [23] Soltani N, Keshavarzi B, Moore F, Tavakol T, Lahijanzadeh A R, Jaafarzadeh N, Kermani M. Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 712-723.
- [24] Li X Z, Wang M E, Chen W P, Uwizeyimana H. Ecological risk assessment of polymetallic sites using weight of evidence approach. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 154: 255-262.
- [25] Vogels J J, Verberk W C E P, Lamers L P M, Siepel H. Can changes in soil biochemistry and plant stoichiometry explain loss of animal diversity of heathlands? *Biological Conservation*, 2017, 212: 432-447.
- [26] Uwizeyimana H, Wang M E, Chen W P, Khan K. The eco-toxic effects of pesticide and heavy metal mixtures towards earthworms in soil. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2017, 55: 20-29.
- [27] Creamer R E, Rimmer D L, Black H I J. Do elevated soil concentrations of metals affect the diversity and activity of soil invertebrates in the long-term? *Soil Use and Management*, 2008, 24(1): 37-46.
- [28] Skaldina O, Peräniemi S, Sorvari J. Ants and their nests as indicators for industrial heavy metal contamination. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 574-581.
- [29] Santorufu L, Van Gestel C A M, Rocco A, Maisto G. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality. *Environmental Pollution*, 2012, 161: 57-63.
- [30] Santorufu L, Van Gestel C A M, Maisto G. Sampling season affects conclusions on soil arthropod community structure responses to metal pollution in Mediterranean urban soils. *Geoderma*, 2014, 226-227: 47-53.

- [31] Bang C, Faeth S H. Variation in arthropod communities in response to urbanization: Seven years of arthropod monitoring in a desert city. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(3/4): 383-399.
- [32] Salminen J, van Gestel C A M, Oksanen J. Pollution-induced community tolerance and functional redundancy in a decomposer food web in metal-stressed soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2001, 20(10): 2287-2295.
- [33] Khan S R, Singh S K, Rastogi N. Heavy metal accumulation and ecosystem engineering by two common mine site-nesting ant species: implications for pollution-level assessment and bioremediation of coal mine soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(4): 195.
- [34] Belskaya E, Gilev A, Belskii E. Ant (*Hymenoptera*, *Formicidae*) diversity along a pollution gradient near the Middle Ural Copper Smelter, Russia. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(11): 10768-10777.
- [35] Amossé J, Dózsá-Farkas K, Boros G, Rochat G, Sandoz G, Fournier B, Mitchell E A D, le Bayon R C. Patterns of earthworm, enchytraeid and nematode diversity and community structure in urban soils of different ages. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 73: 46-58.
- [36] Xie T, Wang M E, Chen W P, Uwizeyimana H. Impacts of urbanization and landscape patterns on the earthworm communities in residential areas in Beijing. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1261-1269.
- [37] Lee C M, Kwon T S. Response of ground arthropods to effect of urbanization in southern Osaka, Japan. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 2015, 8(4): 343-348.
- [38] 彭涛, 欧阳志云, 文礼章, 郑华. 北京市海淀区土壤节肢动物群落特征. *生态学杂志*, 2006, 25(4): 389-394.
- [39] 章家恩, 秦钟, 李庆芳. 不同土地利用方式下土壤动物群落的聚类与排序. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2849-2856.
- [40] Smetak K M, Johnson-Maynard J L, Lloyd J E. Earthworm population density and diversity in different-aged urban systems. *Applied Soil Ecology*, 2007, 37(1/2): 161-168.
- [41] Liu Z F, He C Y, Wu J G. The relationship between habitat loss and fragmentation during urbanization: an empirical evaluation from 16 World Cities. *PLoS One*, 2016, 11(4): e0154613.
- [42] Leonard R J, McArthur C, Hochuli D F. Habitat complexity does not affect arthropod community composition in roadside greenspaces. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 30(108-114).
- [43] Savage A M, Hackett B, Guénard B, Youngsteadt E K, Dunn R R. Fine-scale heterogeneity across Manhattan's urban habitat mosaic is associated with variation in ant composition and richness. *Insect Conservation and Diversity*, 2015, 8(3): 216-228.
- [44] Cilliers S. Social Aspects of Urban Biodiversity - An Overview//Müller N, Werner P, Kelcey J G, eds. *Urban Biodiversity and Design*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2010.
- [45] 侯颖, 周会萍, 张超. 城市化对土壤微生物群落结构的影响. *生态环境学报*, 2014, 23(7): 1108-1112.
- [46] Kuramae E E, Yergeau E, Wong C L, Pijl A S, van Veen J A, Kowalchuk G A. Soil characteristics more strongly influence soil bacterial communities than land-use type. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, 79(1): 12-24.
- [47] Xu H J, Li S, Su J Q, Nie S A, Gibson V, Li H, Zhu Y G. Does urbanization shape bacterial community composition in urban park soils? A case study in 16 representative Chinese cities based on the pyrosequencing method. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, 87(1): 182-192.
- [48] Yan B, Li J S, Xiao N W, Qi Y, Fu G, Liu G H, Qiao M P. Urban-development-induced changes in the diversity and composition of the soil bacterial community in Beijing. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38811.
- [49] Nsabimana D, Haynes R J, Wallis F M. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use. *Applied Soil Ecology*, 2004, 26(2): 81-92.
- [50] Hu Y H, Dou X L, Li J Y, Li F. Impervious surfaces alter soil bacterial communities in urban areas: a case study in Beijing, China. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 226.
- [51] 闫冰, 肖能文, 齐月, 付刚, 高晓琦, 刘高慧, 李俊生. 北京城市发展对土壤微生物群落功能多样性的影响. *环境科学研究*, 2016, 29(9): 1325-1335.
- [52] 杨元根, Paterson E, Campbell C. 用微生物对单一碳源利用方法探讨重金属在城市土壤中积累的环境效应. *地球化学*, 2001, 30(5): 459-464.
- [53] Rai P K, Rai A, Sharma N K, Singh S. Study of soil cyanobacteria along a rural-urban gradient. *Algal Research*, 2018, 35: 142-151.
- [54] Mafiz A I, Perera L N, He Y S, Zhang W, Xiao S J, Hao W L, Sun S, Zhou K Q, Zhang Y F. Case study on the soil antibiotic resistome in an urban community garden. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 2018, 52(2): 241-250.
- [55] Berglund B, Fick J, Lindgren P E. Urban wastewater effluent increases antibiotic resistance gene concentrations in a receiving northern European river. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, 34(1): 192-196.
- [56] Pei R T, Kim S C, Carlson K H, Pruden A. Effect of River Landscape on the sediment concentrations of antibiotics and corresponding antibiotic resistance genes (ARG). *Water Research*, 2006, 40(12): 2427-2435.
- [57] Li T X, Meng L L, Herman U, Lu Z M, Crittenden J. A survey of soil enzyme activities along major roads in Beijing: the implications for traffic

- corridor green space management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(10): 12475-12488.
- [58] LI Y, LI H G, LIU F C. Pollution in the urban soils of Lianyungang, China, evaluated using a pollution index, mobility of heavy metals, and enzymatic activities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 189(1): 34.
- [59] Potschin-Young M, Haines-Young R, Görg C, Heink U, Jax K, Schleyer C. Understanding the role of conceptual frameworks: reading the ecosystem service cascade. *Ecosystem Services*, 2018, 29: 428-440.
- [60] Lehmann A. Technosols and other proposals on urban soils for the WRB (World reference base for soil resources). *International Agrophysics*, 2006, 20(2): 129-134.
- [61] Haan N L, Hunter M R, Hunter M D. Investigating predictors of plant establishment during roadside restoration. *Restoration Ecology*, 2012, 20(3): 315-321.
- [62] McGrath D M, Henry J. Getting to the root of tree stress along highways. *Acta Horticulturae*, 2015, 1085: 109-118.
- [63] Jim C Y, Ng Y Y. Porosity of roadside soil as indicator of edaphic quality for tree planting. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 364-374.
- [64] Lawrence A B, Escobedo F J, Staudhammer C L, Zipperer W. Analyzing growth and mortality in a subtropical urban forest ecosystem. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 104(1): 85-94.
- [65] Somerville P D, May P B, Livesley S J. Effects of deep tillage and municipal green waste compost amendments on soil properties and tree growth in compacted urban soils. *Journal of Environmental Management*, 2018, 227: 365-374.
- [66] US EPA. Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites. Washington, DC, US: Environmental Protection, 1999: 4-17.
- [67] Wang Y, Tang C, Wu J, Liu X, Xu J. Impact of organic matter addition on pH change of paddy soils. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(1): 12-23.
- [68] Gibson D T. *Microbial Degradation of Organic Compounds*. New York: M. Dekker, 1984.
- [69] Rutgers M, van Wijnen H J, Schouten A J, Mulder C, Kuiten A M P, Brussaard L, Breure A M. A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. *Science of the Total Environment*, 2012, 415: 39-48.
- [70] Thomsen M, Faber J H, Sorensen P B. Soil ecosystem health and services-Evaluation of ecological indicators susceptible to chemical stressors. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 67-75.
- [71] Wang M E, Faber J H, Chen W P, Li X M, Markert B. Effects of land use intensity on the natural attenuation capacity of urban soils in Beijing, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 117: 89-95.
- [72] Xie T, Wang M E, Su C, Chen W P. Evaluation of the natural attenuation capacity of urban residential soils with ecosystem-service performance index (EPX) and entropy-weight methods. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 222-229.
- [73] Ballantyne A P, Alden C B, Miller J B, Tans P P, White J W C. Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature*, 2012, 488(7409): 70-72.
- [74] Edmondson J L, Davies Z G, McCormack S A, Gaston K J, Leake J R. Land-cover effects on soil organic carbon stocks in a European city. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 444-453.
- [75] Livesley S J, Ossola A, Threlfall C G, Hahs A K, Williams N S G. Soil carbon and carbon/nitrogen ratio change under tree canopy, tall grass, and turf grass areas of urban green space. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(1): 215-223.
- [76] 朱超, 赵淑清, 周德成. 1997—2006 年中国城市建成区有机碳储量的估算. *应用生态学报*, 2012, 23(5): 1195-1202.
- [77] Liu R, Wang M E, Chen W P. The influence of urbanization on organic carbon sequestration and cycling in soils of Beijing. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 169: 241-249.
- [78] 周陶冶. 上海城市绿地土壤有机碳储量的空间格局和驱动机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [79] 吴志峰, 黄银华, 姜春. 广州市土壤与植被碳蓄积及其空间格局分析. *广州大学学报: 自然科学版*, 2014, 13(3): 73-79.
- [80] 陈浩, 吴绍华, 陈东湘, 周生路, 李保杰, 施亚星. 城市土壤封闭对有机碳库影响的时空变化模拟. *生态学报*, 2017, 37(8): 2600-2610.
- [81] Churkina G, Brown D G, Keoleian G. Carbon stored in human settlements: the conterminous United States. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 135-143.
- [82] Edmondson J L, Davies Z G, McHugh N, Gaston K J, Leake J R. Organic carbon hidden in urban ecosystems. *Scientific Reports*, 2012, 2: 963.
- [83] 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. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 136: 57-67.
- [84] 吕海亮. 城市植被与土壤碳储量时空变化规律研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2017.
- [85] 罗上华, 毛齐正, 马克明, 邹建国. 北京城市绿地表层土壤碳氮分布特征. *生态学报*, 2014, 34(20): 6011-6019.
- [86] Ghosh S, Scharenbroch B C, Ow L F. Soil organic carbon distribution in roadside soils of Singapore. *Chemosphere*, 2016, 165: 163-172.
- [87] Edmondson J L, O'Sullivan O S, Inger R, Potter J, McHugh N, Gaston K J, Leake J R. Urban tree effects on soil organic carbon. *PLoS One*,

2014, 9(7): e101872.

- [88] Davies Z G, Edmondson J L, Heinemeyer A, Leake J R, Gaston K J. Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(5): 1125-1134.
- [89] Setälä H M, Francini G, Allen J A, Hui N, Jumpponen A, Kotze D J. Vegetation type and age drive changes in soil properties, nitrogen, and carbon sequestration in urban parks under cold climate. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2016, 4: 93.
- [90] Trammell T L E, Pouyat R V, Carreiro M M, Yesilonis I. Drivers of soil and tree carbon dynamics in urban residential lawns: a modeling approach. *Ecological Applications*, 2017, 27(3): 991-1000.
- [91] Tao Y, Li F, Wang R S, Zhao D. Effects of land use and cover change on terrestrial carbon stocks in urbanized areas: a study from Changzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 651-657.
- [92] 段保正, 石辉, 魏小芳, 李余, 蒋子银, 陈越浦. 西安市城区表层土壤碳储量与分布特征. *水土保持通报*, 2016, 36(6): 293-297.
- [93] Sarzhanov D A, Vasenev V I, Vasenev I I, Sotnikova Y L, Ryzhkov O V, Morin T. Carbon stocks and CO₂ emissions of urban and natural soils in Central Chernozemic region of Russia. *CATENA*, 2017, 158: 131-140.
- [94] Vasenev V I, Stoorvogel J J, Leemans R, Valentini R, Hajiaghayeva R A. Projection of urban expansion and related changes in soil carbon stocks in the Moscow Region. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170: 902-914.