

DOI: 10.5846/stxb201301220132

罗上华,毛齐正,马克明.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.

Luo S H, Mao Q Z, Ma K M, Wu J G. Spatial distribution of soil carbon and nitrogen in urban greenspace of Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 6011-6019.

北京城市绿地表层土壤碳氮分布特征

罗上华¹,毛齐正^{1,2},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. 北京师范大学人与环境系统可持续性研究中心, 北京 100875;

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:在北京中心城区及周边郊区(覆盖六环路范围),采集不同类型绿地表层(0—20cm)土壤样品490份,测定了土壤有机碳、无机碳、全碳和全氮含量,探讨了城市土壤碳氮分布特征。结果表明:城市不同类型绿地土壤中碳含量差异明显,行道树土壤的有机碳、无机碳和全碳含量均显著高于其他类型绿地,而其它类型土壤有机碳含量差异不显著;居住绿地、道路绿地、单位绿地和公园绿地土壤无机碳含量显著高于生产绿地、防护绿地;城市土壤有机碳、无机碳和全碳含量与距离城市中心距离呈显著的负相关关系;与郊区土壤相比,城区绿地土壤有机碳、无机碳含量有富集的趋势,且无机碳增加更加明显;与郊区农业土壤相比,城市绿地土壤中有机碳有明显地增加趋势,说明北京的城市化在一定程度上有利于土壤碳库的累积。不同类型绿地土壤全氮含量差异不显著,城郊之间全氮含量也无显著差异,土壤全氮质量分数和碳氮比有逐渐减小的趋势,城市化对土壤氮的影响需要进一步研究。

关键词:城市土壤; 土壤有机碳; 土壤全氮; 城市绿地

Spatial distribution of soil carbon and nitrogen in urban greenspace of Beijing

LUO Shanghua¹, MAO Qizheng^{1,2}, 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 Center for Human-Environment System Sustainability (CHESS), Beijing Normal University, Beijing 100875, China

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

Abstract: Urbanized land cover and urban populations in China both have increased markedly since 1980s. The rapid and massive urbanization has resulted in widespread ecological and environmental consequences from local to regional and national scales. To alleviate the negative impacts of urbanization and make our cities more sustainable, it is important to understand how urbanization affects biogeochemical cycles, particularly C and N dynamics. So far, however, understanding of urban soil biogeochemistry is rather limited, and more research is urgently needed. In this study, we collected 490 top-soil samples (0—20cm) from different types of green space in urban and suburban area within the sixth-ring road range of Beijing, China. We analyzed concentration and density of soil organic carbon (SOC), inorganic carbon (SIC), total carbon (TC), and total nitrogen (TN), in order to explore the characteristics of the spatial distribution of carbon and nitrogen in the top layer of urban soils. The results showed that urban soils had higher SOC and SIC contents than suburban soils, and soil carbon content varied significantly between different land uses. The roadside tree pit soils had significantly higher SOC, SIC and TC density than other land-use type, and differences in SOC content among other types were not significant. SIC densities of residential, institutional, parks and transportation soil were significantly higher than those of suburban forests,

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:2013-01-22; 网络出版日期:2014-03-11

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

nurseries, and orchards. For urban sites, roadside tree pit had highest SOC, SIC, and TC density, whereas park had lowest SOC, SIC, and TC. The difference in SOC between different land use were not significant. For suburban sites, roadside tree pit also had the highest SOC, SIC, and TC. The differences in SOC and TC among other land cover types were not significant. Shelterbelt and productive plantations had lower SIC densities than other land cover types throughout the entire metropolitan. Comparing similar land cover types between urban and suburban sites, institutional and transportation had significant higher SOC than the same types in the suburban sites. Yet urban parks and roadside tree pits had slightly lower SOC than the similar types in the suburban area. Urban land cover types had higher SIC and TC than the same land cover types of the suburban sites. Significantly negative correlations existed among SOC, SIC and TC, as well as between these variables and distance from the urban core. In other words, SOC, SIC, and TC tended to decrease with increasing distance away from the urban core. This indicates that urbanization in Beijing has augmented the local soil carbon pool to some extent. No significant differences in soil TN were found between land cover types or between urban and suburban sites. But TN and C/N tended to decrease along the urban-rural gradient. Further studies are needed to clarify the effects of urbanization on soil nitrogen in the Beijing region.

Key Words: urban soils; soil organic carbon; soil total nitrogen; urban greenspace

陆地土壤碳库的微小变化显著影响着全球碳循环过程,因此土壤碳循环是全球变化研究中热点领域^[1]。土壤的氮循环与碳循环密切相关,也是全球生物地球化学循环的重要内容^[2]。相对于其它陆生生态系统,城市土壤碳氮循环研究仍处于起步阶段,城市化使越来越多的自然用地和农业用地转变为城市,城市扩张对土壤碳氮循环过程的影响日益受到关注^[3-7]。越来越多的研究表明,城区土壤比郊区土壤具有更高的有机碳储量^[8-10],而且由农业用地转化的城市用地具有较高的碳固持潜力^[11]。我国城市用地主要来自耕地、园地为主的农业用地^[12-13],因此城市扩张所带来的土地利用变化可能有利于提高土壤碳储量^[14]。城市植被和土壤的固碳效应虽不足以抵消城市巨大的碳排放,但开展城市土壤碳氮研究有助于人们深入理解城市化对生物地球化学循环影响。

北京的城市化率居全国前列,自 20 世纪 70 年代末期以来,其城市用地扩张呈现快速蔓延的趋势,其中中心城区用地主要来自于农村居民点及其他建设用地和耕地^[15]。北京地区有关土壤碳氮研究主要是在郊区和农村地区的有机碳组分^[16-18],城区土壤更多的关注土壤重金属及有机污染方面^[19-22],缺乏对城市土壤碳、氮,以及无机碳分布特征的研究。本研究选择北京市中心城区与郊区典型绿地表层土壤为研究对象,按照城郊梯度样线结合空间布点原则采样,研究城市不同土地利用方式对土壤碳氮的影

响,比较城区与郊区土壤碳氮差异特征,以探讨城市用地变化对土壤碳、氮储量的潜在影响。此研究对于了解城市土壤碳氮特征以及快速城市化过程土地利用变化对土壤碳氮的影响具有积极意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

北京市位于 $39^{\circ} 28'—41^{\circ} 25' N$, $115^{\circ} 25'—117^{\circ} 30' E$, 地处华北平原西北缘,辖 14 区 2 县,土地面积 $16410 km^2$,地势总体为西北高、东南低,属暖温带半湿润大陆性季风气候,平均气温在 $11—12^{\circ}C$,年均降雨量超过 $600 mm$,雨量集中在夏季;主要土壤类型有山地草甸土、山地棕壤、褐土、潮土、沼泽土、水稻土和风砂土 7 个大类,17 个亚类。截至 2011 年,北京市常住人口为 2018.6 万人,其中城镇人口占 86.2%,城市建成区面积超过 $1300 km^2$,城市绿化覆盖率 45.6%,园林绿地面积 $63540.84 hm^2$,形成了以公园、道路绿地、生产绿地、防护绿地及单位、居住绿地为主的城市绿地系统。

1.2 样方设计与样品采集

土壤样品采于 2009 年 7—8 月间,采样范围覆盖北京中心城区至六环周边区域。采样点的设置是按照 $6 km \times 6 km$ 网格,利用 GPS 定位,在网格中心布点,同时以天安门广场为中心,沿东、东北、北、西北、西、西南、南、东南方向,设置了 8 条城市-郊区梯度样线,长度为 $21—36 km$ 长不等,样线上的采样点间

隔3km,共设置采样点129个(图1)。在每个采样点周边,以样点为中心半径0.5km范围内,选择1—5个典型的绿地类型,设置20m×20m的样方,在样方对角线上用土钻采集3份表层土壤(0—20cm),取混合样装入样品袋以备化学分析;行道树土壤样品采

集是随机选择相邻的3棵行道树,用土钻分别采集树坑内表层土壤混合。在采集土样的同时,利用环刀(容积100cm³)取土测土壤容重,3个重复。

采集城市绿地土壤样品490个,各类样地数量见表1。

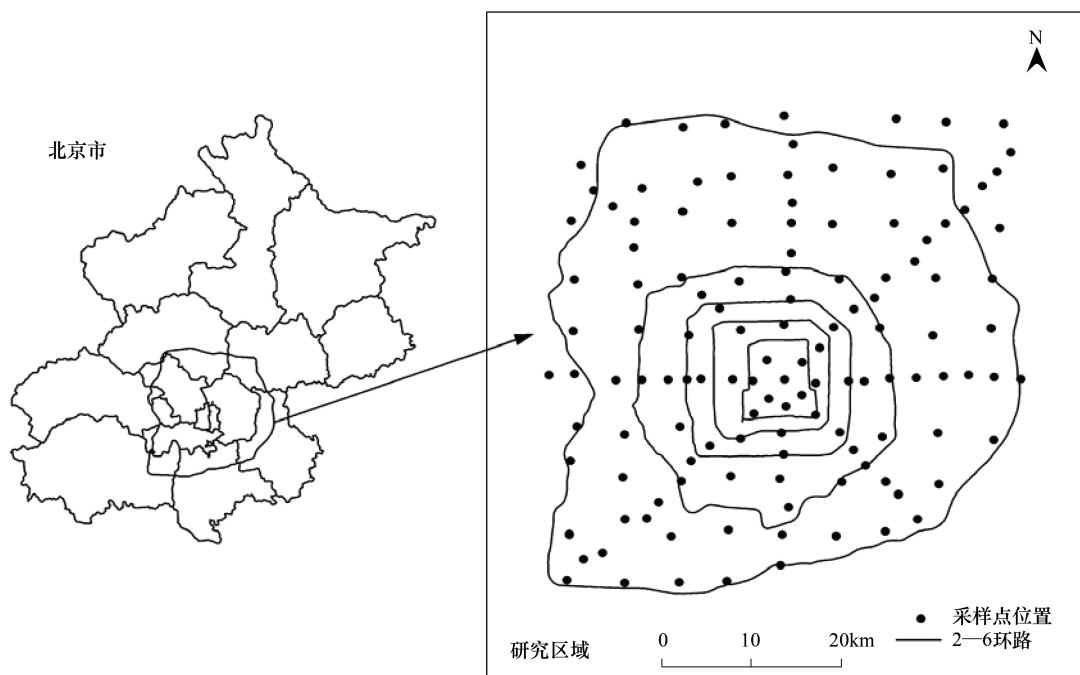


图1 研究区位置及采样点设置示意图

Fig.1 The simplified map of Beijing metropolitan area with soil sampling locations

表1 不同绿地类型表层土壤碳、氮密度与容重

Table 1 Soil carbon & nitrogen density and soil bulk density of different land-use types

绿地类型 Green space type	样品数 (城、郊区样) Number of samples (urban, surbruban)	密度 Density/(kg/m ²)					碳氮比 TOC/TN	土壤容重 Bulk density (g/cm ³)
		有机碳 Soil organic carbon	无机碳 Soil inorganic carbon	全碳 Total carbon	全氮 Total nitrogen			
单位绿地 Institutional	56(32,24)	2.71±0.24ab	2.03±0.15b	4.75±0.35bc	0.23±0.01a	11.06±0.44ab	1.38±0.02ab	
居住绿地 Residential	76(60,16)	2.90±0.11ab	2.34±0.12b	5.24±0.16b	0.25±0.01a	11.44±0.30ab	1.42±0.01a	
公园绿地 Park	49(27,22)	2.70±0.18b	1.90±0.18b	4.61±0.23b	0.25±0.01a	10.72±0.36ab	1.39±0.02ab	
道路绿地 Transportation	123(64,59)	2.53±0.11b	2.36±0.11b	4.90±0.17b	0.23±0.01a	10.85±0.24ab	1.37±0.01ab	
行道树 Roadside pit	104(55,49)	3.52±0.18a	3.28±0.14a	6.79±0.27a	0.24±0.01a	14.18±0.46a	1.34±0.01bc	
防护绿地 Shelterbelt	55(0,55)	2.49±0.11b	1.35±0.12c	3.83±0.18c	0.24±0.01a	10.23±0.30ab	1.30±0.02c	
生产绿地 Productive plantation	27(0,27)	2.64±0.16b	1.02±0.12c	3.66±0.18c	0.26±0.01a	10.00±0.38b	1.34±0.03bc	
平均 Average	490	2.84±0.06	2.28±0.06	5.12±0.10	0.24±0.004	11.54±0.16	1.37±0.01	

1.3 样品处理与分析

土壤样品带回实验室,置于通风、阴凉、干燥的室内风干后,过2mm筛,移除砾石和根系,之后再过100目筛备用。土壤有机碳质量分数采用重铬酸钾

氧化-外加热法测定,土壤容重采用环刀法测定,土壤全碳、全氮质量分数以及碳氮比采用德国Elementar公司Vario EL III型元素分析仪测定,无机碳质量分数等于全碳与有机碳质量分数之差值。

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土壤有机碳的储量,由土壤有机碳质量分数、 $>2\text{mm}$ 砾石体积百分比和土壤容重共同决定的,土壤剖面内某一土层 i 的土壤有机碳密度 $\text{SOC}_{di}(\text{kg}/\text{m}^2)$ 计算公式为:

$$\text{SOC}_{di} = C_i B_i D_i (1 - \delta_i) / 100$$

式中, C_i 为土壤有机碳的平均含量 (g/kg), B_i 为土壤容重 (g/cm^3), D_i 为土层厚度 (cm), δ_i 为直径 $> 2\text{mm}$ 的砾石含量 (体积百分数), 本研究 δ_i 设为 0。

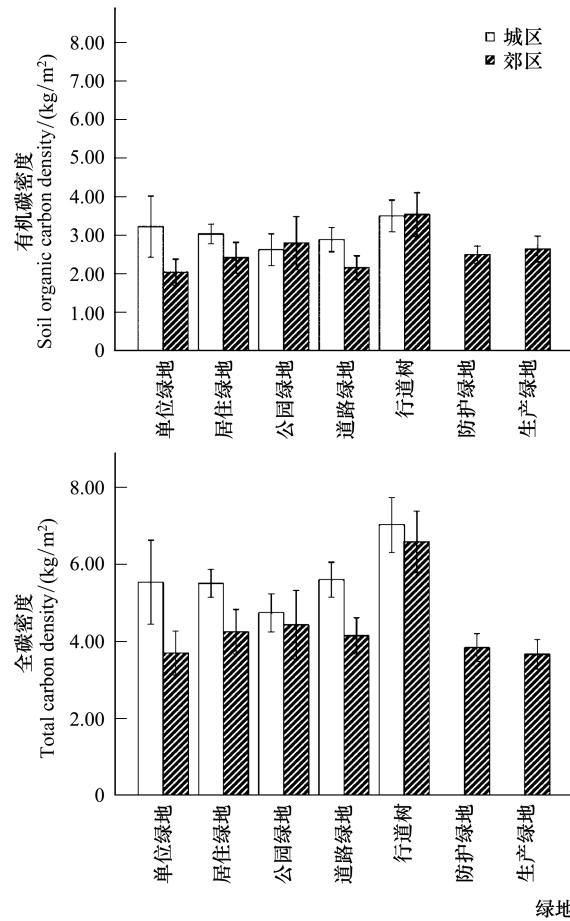
全碳密度、无机碳密度和全氮密度也采用对应的质量分数与容重计算获得。

1.4 数据处理

数据处理采用 SPSS 18.0 软件进行汇总和统计分析。经统计学检验,土壤样品碳及全氮属于偏态分布,故采用非参数检验方法,分别采用 Kruskal-Wallis 检验和 Nemenyi 检验总体差异和均值多重比较。

2 结果与分析

2.1 城市绿地土壤碳氮含量特征



北京城市绿地土壤碳、氮含量变幅较大,有机碳质量分数变幅为 1.68—64.28g/kg,有机碳密度为 0.48—15.48kg/m²;无机碳质量分数 0.19—25.94g/kg,无机碳密度为 0.05—7.33 kg/m²;全碳质量分数 3.8—85.82g/kg,全碳密度为 1.12—19.56 kg/m²;全氮质量分数 0.23—2.46g/kg,全氮密度变幅 0.07—0.61 kg/m²;土壤碳氮比变幅 4.09—42.59;土壤容重在 0.96—1.67g/m³ 之间。不同类型绿地的碳、氮密度及碳氮比、容重等指标均值见表 1,其中,道路绿地主要包括街旁带状绿地或组团式绿地,而行道树指的是道路边单株行道树,防护绿地包括郊区的农田防护林、道路和河流防护林等,生产绿地指郊区的果园和苗圃。

2.2 城-郊不同绿地类型土壤碳氮差异特征

城区的单位绿地、居住绿地、道路绿地土壤有机碳密度均显著高于郊区同类型绿地,而城区公园和行道树土壤有机碳略低于郊区同类绿地,但这种差异不显著(图2,图3);位于郊区的不同类型绿地土

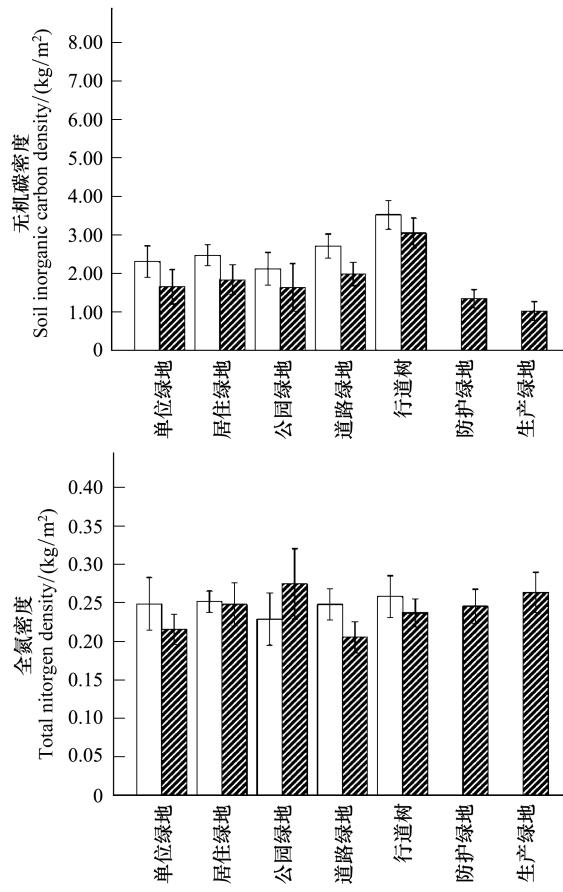


图 2 不同类型绿地土壤碳氮密度差异

Fig.2 Soil carbon density and soil bulk density of different land-use types

壤间有机碳含量差异相对较小,郊区公园绿地、生产绿地、防护绿地土壤中的有机碳含量相对较高。城区各类绿地土壤无机碳密度均显著高于郊区同类绿地,防护绿地、生产绿地无机碳含量显著低于城区和郊区其他类型绿地。此外,城区各类绿地土壤全碳含量均高于郊区同类型绿地及防护绿地、生产绿地(图2,图3)。

城区和郊区各类绿地土壤全氮含量差异不显著,城区单位绿地、居住绿地、道路绿地和行道树土壤中的全氮密度略高于郊区同类型绿地,而城区公园土壤全氮低于郊区公园,郊区公园也是各类绿地中全氮密度最高的类型;此外,同郊区的防护绿地和生产绿地相比,城区绿地土壤中的全氮含量没有明显增加,而郊区的单位绿地、居住绿地、道路绿地和行道树绿地全氮含量略有下降(图2,图3)。

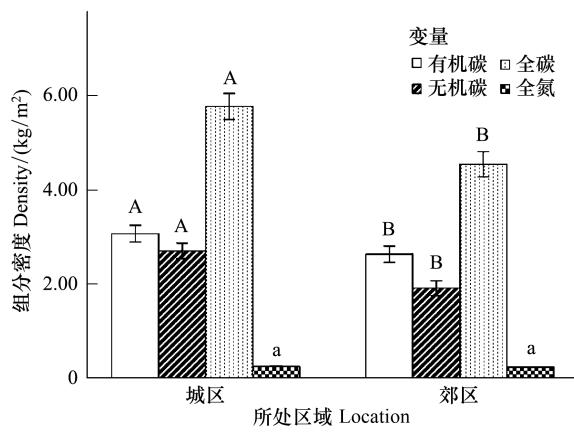


图3 城郊绿地土壤碳氮密度差异

Fig. 3 Soil carbon and nitrogen density between urban and suburban

2.3 与城市中心的距离对土壤碳氮的影响

与郊区绿地土壤相比,城区土壤碳含量显著增加,城区土壤有机碳(3.07 ± 0.09) kg/m^2 、无机碳(2.70 ± 0.08) kg/m^2 和全碳密度(5.77 ± 0.14) kg/m^2 分别比郊区增加16.73%、41.36.0%和27.09%,且有机碳、无机碳和全碳与距城市中心的距离呈显著的负相关关系(表2),即随着距城市中心距离的增加,有机碳、无机碳和全碳含量均呈现逐渐减少的趋势。

城区绿地土壤全氮(0.25 ± 0.005) kg/m^2 略高于郊区绿地(0.24 ± 0.005) kg/m^2 ,但差异不显著,与距城市中心的距离负相关关系不显著。

表2 绿地表层土壤碳氮与距城市中心距离的相关性特征

Table 2 Relationships between soil carbon contents and distance from urban core

土壤成分 Soil contents	相关系数 Spearman's correlation coefficient	显著性检验 Significance P
全碳 Total nitrogen	-0.082	0.084
全氮 Total carbon	-0.488	<0.005
有机碳 Soil organic carbon	-0.233	<0.005
无机碳 Soil inorganic carbon	-0.525	<0.005

3 讨论

3.1 不同土地利用类型对城市土壤碳的影响

土壤中碳氮密度取决于其质量分数及土壤容重,由于土壤母质、植被组成、凋落物分解程度、建成时间以及人为扰动等差异,致使城市不同功能区土壤碳的分布表现出了较大的空间异质性,不同地区差异很大。德国斯图加特市土壤有机碳密度(0—30cm)在3.1—23.2 kg/m^2 ,美国纽约市土壤有机碳密度(0—100cm)在2.9—28.5 kg/m^2 ,城市内部土壤差异近10倍^[4]。美国巴尔的摩市土壤有机碳含量为低密度居住区和单位绿地最高,而商业区最低^[23]。国内城市差异也非常大,长春市土壤有机碳含量差异为街道绿地>广场绿地>公园^[24];沈阳市为工业区>文教区>公园>居民区>风景区>市郊林地>路边绿地^[25];开封市为工业区>休闲区>交通区>文教区>行政/居民区^[9];上海市为公园>工厂>学校>居民区>道路^[26];南京市路边>学校>郊区菜地>居民区>公园^[27]。但由于野外采样土层深度、计量单位的差异,难以直接量化比较这些研究成果,城市土壤碳库特征仍存在很大的不确定性。

北京城市土壤样品中碳含量存在较大的空间变异性,土壤样品的有机碳、无机碳含量的变异系数均超过了50%,属中等强度变异。不同类型绿地在城区和郊区之间也体现出不同的差异性,城区和郊区行道树土壤中有机碳、无机碳和全碳含量均显著高于其他类型土壤,这与崇文区行道树土壤有机质含量较低的结果不一致^[28],可能的原因是此次采样范围更广,相对于其他绿地,行道树坑土壤形成过程受人为扰动更剧烈,建成时间相对较长。郊区的防护绿地和生产绿地中碳含量特征类似,其无机碳含量显著低于城区和郊区其他类型绿地,而其有机碳含量略高于同处郊区的单位绿地、居住绿地和道路绿地,却低于位于城区的这三类绿地类型。造成这一

现象可能的原因是,防护绿地和生产绿地主要来源农业用地,建设过程中受到的人为扰动比单位绿地、居住绿地和交通绿地程度低,引入的无机碳组分较少,且人为扰动所造成的有机碳损失相对较少,而城区绿地建成时间相对较长,人为管理措施较为完善,从而有较高的有机碳的累积。

城区和郊区的公园绿地、行道树土壤所处的小环境和管理方式较类似,因此公园绿地和行道树土壤的有机碳含量在城郊之间差异不显著。此外,北京城区绿地土壤有机碳质量分数均值为11.22g/kg,与上海中心城区绿地土壤有机碳质量分数11.21g/kg差异很小^[29],这在一定程度上证明在类似城市环境和人为管理的作用下,城市土壤中的碳含量趋向于收敛的趋势^[10]。

3.2 城市化增加还是降低了土壤碳库

城市土壤的性质很大程度上是由先前的土壤特征所决定,原来的土地利用方式在长时期内仍会影响城市土壤碳库特征^[30]。Pouyat等比较了相关研究后发现,美国东北部土壤有机碳含量较高地区的自然或农业土地转变后城市用地后,土壤中有机碳含量出现下降,而在其他更温暖或更干旱的区域,城市土壤有机碳有一定程度的增加^[31]。城郊梯度上残存植被样带研究也显示,从郊区到城区的土壤碳含量有增加的趋势,美国纽约城郊梯度样带上残存栎树森林表层土壤有机质质量分数与到城市中心的距离存在显著的负相关关系,有机碳的质量分数和密度有从乡村到城区逐渐升高的趋势^[32];菲尼克斯城乡梯上残存植被*L. tridentata*灌丛下的表层土壤有机碳从乡村到城市逐渐增加,且城区土壤无机碳含量也比郊区高^[33]。

国内已有研究显示,与郊区农业土壤相比,城市土壤有机碳含量有明显的富集趋势。如,长春市城区土壤有机碳分别是近郊菜地和耕地的1.01和1.40倍^[24],沈阳典型城市绿地土壤有机碳含量是郊区农用地的1.23—1.44倍不等^[25];开封市城区表层土壤和1m剖面有机碳密度分别是郊区的2.53和1.56倍^[9];杭州城区表层土壤和1m剖面土壤有机碳密度分别是郊区的4.3倍和5.7倍^[8];南京城区土壤有机碳密度是郊区菜地的1.08倍^[27];上海市城区表层土壤有机碳密度是郊区和农村地区的1.05倍和1.26倍^[14]。

城区绿地土壤有机碳、无机碳和全碳密度分别是郊区绿地的1.17、1.41和1.27倍,绿地土壤碳含量与距离城市中心距离成显著的负相关关系,表明随着城市化程度的增加,城市绿地土壤中有机碳、无机碳和全碳均有不同程度的增加,且无机碳含量的增加更为明显。城区土壤中较高的无机碳含量,可能是由于城市土壤形成过程中人为引入了生活垃圾、建筑材料等碳酸盐类物质^[34]。与北京非城市土壤研究结果比较,城市绿地土壤中有机碳质量分数(10.32g/kg)明显高于郊区农业土壤,城区绿地土壤有机碳(11.22 g/kg)增加更为明显(大兴和平谷郊区土壤分别为7.44g/kg和8.38g/kg,0—20cm)^[35-36];城市绿地有机碳密度(2.81kg/m²)也比北京乡村地区农业用地要高(0—25cm,2.47—2.74kg/m²)^[37]。综上,北京地区的农业用地转变为城市用地后,有利于土壤中有机碳和无机碳的累积。

3.3 城市化对土壤氮的影响

城市化不仅影响土壤碳循环,对土壤氮也有重要影响^[4]。绿地管护过程中施加氮肥,直接增加了城市土壤中的氮含量。已有研究显示,城市土壤比郊区具有更高的氮矿化速率^[38];由农业用地转变为城市绿地后,土壤中的全氮呈现富集的趋势,氮累积速率约为8.3g m⁻² a⁻¹^[11];城市绿地土壤同时也是大气氮沉降重要的汇^[39]。但城市土壤氮含量特征的数据仍十分缺乏,美国丹佛博德市城市草坪土壤全氮含量为2.1g/kg,碳氮比10.95(0—10cm);菲尼克斯城市土壤全氮为0.6—0.9g/kg(0—30cm);德国斯图加特城市土壤全氮为0.05—2.1g/kg(0—30cm)^[4]。北京崇文区绿地土壤全氮质量分数0.91g/kg(0—10cm)^[28];深圳城市绿地土壤全氮为0.58g/kg(0—20cm)^[40];上海市中心城区绿地全氮质量分数为1.06g/kg(0—30cm),低于上海郊区农业土壤^[29];结果显示我国城市土壤中氮含量处于较低的水平。

北京地区不同类型绿地表层土壤全氮含量差异不显著,全氮质量分数均值在0.86—0.96g/kg之间,郊区的防护绿地、生产绿地的土壤全氮质量分数略大于公园绿地、居住区绿地、行道树等其他类绿地,而各类型土壤全氮密度之间差异更小,均值在0.23—0.26 kg/m²。此外,土壤全氮含量与距城市中心的距离不相关。城市绿地土壤全氮含量与京郊农

业用地土壤中全氮含量(0.89g/kg)相差不大^[35],说明城市土壤中氮富集效应并不明显。由于不同类型土壤有机碳含量的差异,导致各类型土壤的碳氮比差异明显,行道树土壤碳氮比显著高于其他类型,单位绿地、道路绿地、居住绿地和公园绿地的碳氮比也显著高于防护绿地和生产绿地,城区土壤碳氮比显著高于郊区。土壤碳氮比作为衡量土壤营养状况的指标,对土壤有机质代谢具有重要影响,因此,城市化对土壤氮循环的影响仍有待于进一步研究。

4 结论

(1)北京不同类型城市绿地土壤有机碳、无机碳和全碳含量差异显著,行道树土壤有机碳、无机碳和全碳显著高于其他类型绿地,而其它类型土壤有机碳和全碳含量差异不显著;居住绿地、道路绿地、单位绿地和公园绿地中土壤无机碳含量显著高于生产绿地、防护绿地。

(2)不同类型绿地土壤碳含量在城区和郊区呈现不同的差异特征,城区单位绿地、居住绿地、道路绿地土壤有机碳密度均显著高于郊区同类型绿地,公园绿地和行道树土壤有机碳城郊差异不显著;城区各类绿地土壤无机碳和全碳密度均显著高于郊区同类绿地,位于郊区的防护绿地、生产绿地绿地无机碳含量显著低于城区和郊区其他类型绿地。

(3)北京城市建成区绿地土壤中有机碳、无机碳和全碳含量均高于郊区绿地,与郊区农业用地相比,城市绿地土壤中有机碳、无机碳和全碳含量均有增加,且土壤无机碳含量的增加更为明显,土壤中碳的含量与距离城市中心距离均呈显著的负相关关系,说明城市化在一定程度上有利当地土壤有机碳库和无机碳库的增加。

(4)北京不同类型绿地土壤中全氮含量差异并不显著,城郊之间土壤全氮含量也无显著差异,但从城区到郊区,土壤全氮质量分数和碳氮比有减小的趋势。城市化对土壤氮含量的影响以及城市土壤中碳、氮元素的相互关系有待进一步研究。

致谢:感谢课题组唐茉莉、宝乐、童抗抗等同学对野外采样工作的帮助。

References:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] Gärdenäs A I, Ågren G I, Bird J A, Clarholm M, Hallin S, Ineson P, Kätterer T, Knicker H, Nilsson S I, Näsholm T, Oglej S, Paustian K, Persson B, Stendahl J. Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions-From molecular to global scale. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(4): 702-717.
- [3] Kaye J P, Groffman P M, Grimm N B, Baker L A, Pouyat R V. A distinct urban biogeochemistry? *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(4): 192-199.
- [4] Lorenz K, Lal R. Biogeochemical C and N cycles in urban soils. *Environment International*, 2009, 35(1): 1-8.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Pataki D E, Carreiro M M, Cherrier J, Grulke N E, Jennings V, Pinceel S, Pouyat R V, Whitlow T H, Zipperer W C. Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services, green solutions, and misconceptions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(1): 27-36.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Liu J Y, Liu M L, Tian H Q, Zhuang D F, Zhang Z X, Zhang W, Tang X M, Deng X Z. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990—2000: An analysis based on Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(4): 442-456.
- [13] Wang L, Li C C, Ying Q, Cheng X, Wang X Y, Li X Y, Hu L Y, Liang L, Yu L, Huang H B, Gong P. China's urban expansion from 1990 to 2010 determined with satellite remote sensing. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2802-2812.
- [14] Xu N Z, Zhang T L, Wang X X, Liu H Y. Analysis on Evolution Trend of Soil Organic Carbon Stock during the course of urbanization. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 659-663.

- [15] Mu F Y, Zhang Z X, Chi Y B, Liu B, Zhou Q B, Wang C Y, Tan W B. Dynamic monitoring of built-up area in Beijing during 1973—2005 based on multi original remote sensed images. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(2) : 257-268.
- [16] Zhang T L, Sun R, Hu B, Dang Y N, Sun L. Analyzing soil carbon characteristics of typical urbanization zones in northwestern Beijing. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2010, 46(1) : 97-102.
- [17] Hu K L, Yu Y, Zhang F R, Wang R. The spatial-temporal variability of soil organic matter and its influencing factors in suburban area of Beijing. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39 (4) : 764-771.
- [18] Wang S F, Wang X K, Ouyang Z Y. Factors controlling soil organic carbon and total nitrogen densities in the upstream watershed of Miyun reservoir, North China. *Environmental Science*, 2012, 33(3) : 946-951.
- [19] Li X Y, Chen T B, Lei M, Guo Q J, Song B, Zhou G D, Xie Y F. Accumulation of heavy metals in urban soils under different land uses in Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30 (11) : 2285-2293.
- [20] Liu G Y, Chen Z S, Shi Y H, Wang G Y, Li W, Li C Q. The levels and compositions of PCBs in Beijing soil. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(12) : 2013- 2017.
- [21] Peng C, Ouyang Z, Wang M, Chen W, Jiao W. Vegetative cover and PAHs accumulation in soils of urban green space. *Environmental Pollution*, 2012, 161: 36-42.
- [22] Wang M, Markert B, Chen W, Peng C, Ouyang Z. Identification of heavy metal pollutants using multivariate analysis and effects of land uses on their accumulation in urban soils in Beijing, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184 (10) : 5889-5897.
- [23] Pouyat R, Groffman P, Yesilonis I, Hernandez L. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution*, 2002, 116: S107-S118.
- [24] Wang Y, Li C Y, Li C L, Han Y N, Lü Y, Zhang J J. Preliminary study on the quantitative characteristics of organic carbon in soils under different land use patterns in Changchun City. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2011, 33 (1) : 51-56.
- [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] 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.
- [27] He Y, Zhang G L. Concentration and source of organic carbon and black carbon of urban soils in Nanjing. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2) : 177-182.
- [28] Liu Y, Wang C, Peng Z H, Qie G F. Soil enzyme activity and its relationship with soil physico-chemical properties in green areas of Chongwen district of Beijing. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(4) : 66-70.
- [29] Hao R J, Fang H L, Shen L Y. Distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen in greenbelt soil in Shanghai center city. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2011, 35(6) : 49-52.
- [30] 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. *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 45-58.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Koerner B A, Klopatek J M. Carbon fluxes and nitrogen availability along an urban-rural gradient in a desert landscape. *Urban Ecosystems*, 2010, 13(1) : 1-21.
- [34] 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.
- [35] Wang S Y, Lu P, Wang J L, Yang L, Yang K, Yu T Q. Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales: a case study in Pinggu County, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10) : 4957-4964.
- [36] Hu K L, Zhang F R, Li H, Huang F, Li B G. Spatial Patterns of Soil Heavy Metals in Urban-Rural Transition Zone of Beijing. *Pedosphere*, 2006, 16(6) : 690-698.
- [37] Zhang X Y, Chen L D, Fu B J, Li Q, Qi X, Ma Y. Soil organic carbon changes as influenced by different agricultural land use types and management practices: A case study in Yanqing Basin, Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10) : 3198-3204.
- [38] Zhu W X, Dillard N D, Grimm N B. Urban nitrogen biogeochemistry: status and processes in green retention basins. *Biogeochemistry*, 2005, 71(2) : 177-196.
- [39] Raciti S M, Groffman P M, Fahey T J. Nitrogen retention in urban lawns and forests. *Ecological Applications*, 2008, 18 (7) : 1615-1626.
- [40] Lu Y, Gan H H, Shi Z J, Liu Z L. Soil fertility quality assessment and managing measures for urban green space in Shenzhen City. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1) : 153-156.

参考文献:

- [8] 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.

- [13] 王雷, 李丛丛, 应清, 程晓, 王晓映, 李雪艳, 胡娈运, 梁璐, 俞乐, 黄华兵, 宫鹏. 中国1990—2010年城市扩张卫星遥感制图. 科学通报, 2012, 57(16): 1388-1399.
- [14] 许乃政, 张桃林, 王兴祥, 刘红樱. 城市化进程中的土壤有机碳库演变趋势分析. 土壤通报, 2011, 42(3): 659-663.
- [15] 牟风云, 张增祥, 迟耀斌, 刘斌, 周全斌, 王长有, 谭文彬. 基于多源遥感数据的北京市1973—2005年间城市建成区的动态监测与驱动力分析. 遥感学报, 2007, 11(2): 257-268.
- [16] 张廷龙, 孙睿, 胡波, 党一诺, 孙亮. 北京西北部典型城市化地区不同土地利用类型土壤碳特征分析. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(1): 97-102.
- [17] 胡克林, 余艳, 张凤荣, 王茹. 北京郊区土壤有机质含量的时空变异及其影响因素. 中国农业科学, 2006, 39(4): 764-771.
- [18] 王淑芳, 王效科, 欧阳志云. 密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究. 环境科学, 2012, 33(3): 946-951.
- [19] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 郭庆军, 宋波, 周广东, 谢云峰. 不同土地利用方式下北京城区土壤的重金属累积特征. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2285-2293.
- [20] 刘耕耘, 陈左生, 史烨弘, 王关玉, 李伟, 李常清. 北京土壤中的PCBs含量与组成. 环境科学学报, 2006, 26(12): 2013-2017.
- [24] 王永, 李春阳, 李翠兰, 韩旖旎, 吕艳, 张晋京. 长春市不同利用方式土壤有机碳数量特征的初步研究. 吉林农业大学学报, 2011, 33(1): 51-56.
- [25] 段迎秋, 魏忠义, 韩春兰, 孔林苏, 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] 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.
- [27] 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.
- [28] 刘艳, 王成, 彭镇华, 郑光发. 北京市崇文区不同类型绿地土壤酶活性及其与土壤理化性质的关系. 东北林业大学学报, 2010, 38(4): 66-70.
- [29] 郝瑞军, 方海兰, 沈烈英. 上海城市绿地土壤有机碳、全氮分布特征. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(6): 49-52.
- [35] 王淑英, 路萍, 王建立, 杨柳, 杨凯, 于同泉. 不同研究尺度下土壤有机质和全氮的空间变异特征——以北京市平谷区为例. 生态学报, 2008, 28(10): 4957-4964.
- [37] 张心昱, 陈利顶, 傅伯杰, 李琪, 齐鑫, 马岩. 不同农业土地利用方式和管理对土壤有机碳的影响. 生态学报, 2006, 26(10): 3198-3204.
- [40] 卢瑛, 甘海华, 史正军, 刘振良. 深圳城市绿地土壤肥力质量评价及管理对策. 水土保持学报, 2005, 19(1): 153-156.