#### DOI: 10.5846/stxb201612302718

李隽永,窦晓琳,胡印红,甘德欣,李锋.城市不同地表覆盖类型下土壤有机碳矿化的差异.生态学报,2018,38(1):112-121. Li J Y, Dou X L, Hu Y H, Gan D X, Li F.Variation in soil organic carbon mineralization under various land cover types in urban areas. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1):112-121.

# 城市不同地表覆盖类型下土壤有机碳矿化的差异

李隽永<sup>1,2</sup>,窦晓琳<sup>2,3</sup>,胡印红<sup>2,3</sup>,甘德欣<sup>1</sup>,李 锋<sup>2,3,\*</sup>

1 湖南农业大学园艺园林学院,长沙 410128

2 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

3 中国科学院大学,北京 100049

摘要:土壤有机碳(SOC)矿化是陆地生态系统碳循环的重要过程。因受到强烈的人为干扰,城市土壤生态服务功能严重退化, 进而对城市土壤地球化学循环尤其是碳循环产生深刻的影响。以北京市奥林匹克森林公园的5种典型地表覆盖类型(草坪、灌 木、行道树、植草砖、硬化地表)下土壤为研究对象,研究了城市不同地表覆盖类型下土壤有机碳矿化过程及固碳能力的差异。 结果表明,城市5种地表覆盖类型下的土壤有机碳矿化趋势与自然生态系统中的土壤基本一致,都表现为前期矿化较为快速, 后期明显减慢并且趋于平稳;不同地表覆盖类型下土壤的有机碳矿化作用有显著差异,灌木、行道树、植草砖覆盖下土壤有机碳 矿化能力较强,硬化地表和草坪较弱,与土壤有机碳含量特征类似;一级动力学方程对各土样有机碳矿化过程的模拟结果较好, 结果显示草坪覆盖下土壤固碳能力较强,灌木覆盖下次之,行道树、植草砖和硬化地表覆盖下较弱;土壤固碳能力的高低并不对 应着土壤有机碳含量的高低,城市人为干扰和外源有机碳的输入对土壤有机碳储量影响较大;硬化地表下不同土层有机碳矿化 作用无明显差异,而其他地表覆盖类型下的土壤有机碳矿化作用随土层加深显著减弱,特别是植草砖和行道树特征最为明显; 各地表覆盖类型下土壤固碳能力随土层深度变化的规律不显著。城市土壤有机碳矿化的最主要限制因子是土壤有机碳的含 量,土壤 pH 值、养分含量、粘粒含量等性质也通过影响土壤有机碳含量及微生物活动等对土壤有机碳矿化过程产生影响。 关键词:城市地表覆盖类型;有机碳矿化;固碳;硬化地表

# Variation in soil organic carbon mineralization under various land cover types in urban areas

LI Juanyong<sup>1,2</sup>, DOU Xiaolin<sup>2,3</sup>, HU Yinhong<sup>2,3</sup>, GAN Dexin<sup>1</sup>, LI Feng<sup>2,3,\*</sup>

1 Horticulture and Landscape College, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

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

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

**Abstract**: Soil organic carbon (SOC) mineralization is a significant process in soil carbon cycling in the terrestrial ecosystem, which is closely related to the soil nutrient release and global climate change. Function of urban soil as an ecosystem has degenerated due to severe human disturbances, which deeply influence the geochemical cycles, especially the carbon cycle, in urban eco-environments. In order to explore the variation in SOC mineralization and SOC sequestration potential under various land cover types, we collected soil samples from five typical land cover types, i.e., grass-covered, shrub-covered, street tree-planted, grass-planting brick, and impervious surface, in the Olympic Forestry Park in the summer of 2016. SOC mineralization and physico-chemical properties, such as pH, particle constitution, and nutrient

收稿日期:2016-12-30; 网络出版日期:2017-09-12

基金项目:国家自然科学基金项目(71533004; 71273254);国家重点研发计划课题(2016YFC0502804)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lifeng@ rcees.ac.cn

113

content, of all soil samples were measured. After the experiment, we analyzed the variation in SOC mineralization under various land cover types and the relationship between SOC mineralization and soil physico-chemical properties. The results showed that the SOC mineralization of urban soil was higher at the early incubation period than that at the late incubation period; the same trend also favored the SOC mineralization in natural ecosystems. However, relatively significant differences in daily and cumulative SOC mineralization were observed among the five land cover types, especially in the early incubation period. Both daily and cumulative SOC mineralization under shrub-covered, street tree-planted and grass-planting brick types were higher than those under the other two land cover types, which was consistent with the variation in the SOC content under the five land cover types. SOC mineralization of all soil samples in this experiment followed the first-order kinetic equation. Simulation results showed that the SOC sequestration potential was relatively weaker under the impervious surface, grass-planting brick and street tree-planted types than under the grass-covered and shrub-covered types. In contrast with the variation in SOC mineralization, the variation in the SOC sequestration potential under the five land cover types was inconsistent with that in the SOC content, because SOC content may be deeply influenced by human disturbances and additional organic carbon input. With regard to the variation of SOC mineralization along layer depth, there was no significant difference among three layers (0-15, 15-30, and 30-45 cm) under the impervious surface type. However, under the other land cover types, especially under the grass-planting brick and street tree-planted types, the SOC mineralization of the top layer was greater than that of the lower layers as a whole. Correlation analysis suggested that the SOC content was the main constraint of SOC mineralization whereas other physico-chemical properties, including pH, nutrient content, and clay content, may indirectly influence SOC mineralization, by affecting the SOC content and microbial activity.

Key Words: urban land cover types; soil organic carbon mineralization; carbon sequestration; impervious surface

目前全球已有超过 50%的人口居住在城市,预计还将持续增长<sup>[1]</sup>。人口的大量涌入使得城市不断向外 扩张<sup>[2-3]</sup>。城市扩张的突出表现之一就是原本以植物种植为特征的生态用地逐渐转变为以硬化地表为主的 建设用地<sup>[4-6]</sup>,地表覆盖类型的剧烈转变使土壤原有的生态服务功能不断退化甚至完全丧失,进而对城市土 壤地球化学循环尤其是碳循环产生深刻的影响<sup>[7]</sup>。土壤中的碳储量占陆地生态系统碳储量的 75%<sup>[8]</sup>,有研 究表明土壤有机碳总量的 10%排放到大气中相当于 30 年内人为产生的 CO<sub>2</sub>排放量,由此可见,土壤有机碳库 较小的改变却能够对大气 CO<sub>2</sub>的浓度产生深刻影响<sup>[9-10]</sup>。土壤有机碳矿化是土壤碳循环的重要过程,是指土 壤生物通过自身活动,分解和利用土壤中活性有机组分来完成自身代谢同时释放出 CO<sub>2</sub>的过程,受到温度、土 壤微生物活动、土壤理化性质及活性有机组分等多重因素的影响<sup>[11-14]</sup>,与土壤养分的释放及全球气候变化有 着密切的联系<sup>[15]</sup>。近年来,城市中大气 CO<sub>2</sub>浓度逐年上升,成为加剧城市热岛效应的主要因素之一<sup>[16]</sup>。因 此,研究城市土壤有机碳矿化过程对于深入了解城市土壤固碳能力及土壤与大气之间的碳交换过程具有重要 意义,进而为提高城市土壤的生态服务功能、改善城市土壤质量、缓解城市热岛效应提供科学依据。

近年来不少关于城市土壤碳循环的研究取得了重要的研究成果。戴慧的研究中显示灌丛土壤有机碳矿 化速率显著高于大部分乔木种植土壤,与其土壤有机碳含量变化趋势大体一致<sup>[17]</sup>。罗上华等的研究则显示 行道树土壤的有机碳、无机碳、全碳含量均高于其他类型绿地,表明人为扰动可能会导致土壤碳储量的增 加<sup>[18]</sup>,但也有研究得出与之相反的结果<sup>[19]</sup>。还有研究表明,在城市绿地建设中种植草坪可以使土壤表层碳 较快积累,而乔木对于深层土壤碳积累作用更显著<sup>[20]</sup>。造成这些结果差异的原因可能与土壤母质、人为扰 动、植被类型等因素相关。另外随着城市的不断扩张,人们对硬化地表下土壤碳循环规律的研究也不断深入。 2012 年 Raciti 等研究者发现城市不透水地表下土壤碳含量比透水地表下土壤低 66%,硬化覆盖导致的碳流 失可能会抵消城市其他地表类型的碳储量<sup>[21]</sup>,这与魏宗强等人的研究结果类似:南京城市硬化覆盖下的土壤 有机碳含量显著低于透水地表下,因而导致硬化地表下土壤有机碳矿化作用弱于透水地表下<sup>[22-23]</sup>。但目前 还没有发现对城市几种典型地表覆盖类型下土壤碳循环进行系统研究的报道,特别是近年来在城市建设中使 用日趋频繁的透水铺装下土壤碳储量和碳循环的研究几乎没有。因此,当前对于城市不同地表覆盖类型下土 壤有机碳矿化的动态变化差异及影响因素等方面的问题亟待进一步研究。

本文以北京市奥林匹克森林公园 5 种典型城市地表覆盖类型(草坪、灌木、行道树、植草砖、硬化地表)下的土壤为研究对象,通过对其有机碳矿化过程的研究,揭示了城市不同地表覆盖类型下土壤有机碳矿化规律的差异及其与土壤基本理化性质的关系,为制定科学有效的城市土壤管理措施、切实提高城市土壤质量和生态系统服务提供理论指导。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

试验样地位于北京市朝阳区奥林匹克森林公园(40°01′3.00″N, 116°23′2.98″E),该公园建成于2008年, 全园占地面积约680 hm<sup>2</sup>,地处华北平原边缘地带,属于温带大陆性半湿润季风气候,四季分明,冬季寒冷干燥,盛行西北风,夏季高温多雨,盛行东南风,年平均气温约11.6℃,降水集中,年平均降水量约600 mm,夏季 降水量约占全年的75%。土壤类型为砂质壤土。

#### 1.2 试验设计

本次试验共设置 5 种不同的地表覆盖类型:草坪、灌木、行道树、植草砖、硬化地表。其中草坪类型为面积 大于 100 m<sup>2</sup>的人工种植草坪覆盖,草种为高羊茅(Festuca arundinace);灌木类型为种植大叶黄杨(Buxus megistophylla Levl.)的绿化带,绿化带宽度约 5 m,外围是大理石硬化地表;行道树类型为种植国槐(Sophora japonica Linn.)的方形行道树坑,边长约 1.5 m,外围是水泥硬化地表;植草砖铺设与公园停车位,其植草孔大 小约 40 cm<sup>2</sup>,孔内种植草种类不明;硬化地表类型是面积大于 100 m<sup>2</sup>的完全不透水的水泥覆盖地表。5 种地 表覆盖类型样地均位于奥林匹克森林公园南园,气候环境及原始土壤条件均相同。草坪、灌木、行道树每年分 别施肥 2 次、3 次、1 次,视情况再进行补施,使用的肥料均为复合肥。

#### 1.3 土壤样品采集

在 2016 年 6 月选择晴朗的白天,于北京市奥林匹克森林公园中设置调查样地,分别在 5 种地表覆盖类型 中均随机选择 3 块有代表性的 4 m×4 m 样方,采用多点混合采样法分层采集土壤,土层深度分别为上层(0— 15 cm)、中层(15—30 cm)、下层(30—45 cm),每个样方采集 3 个重复,共获得 135 个土壤样品。样品装入无 菌袋中带回实验室,部分土壤样品立即放到 4℃冰箱中保存,用于有机碳矿化培养及铵态氮和硝态氮的测定; 其余土壤自然风干,挑去石块、植物根系等杂物后研磨,一部分过 0.15 mm 筛用于土壤总有机碳的测定,一部 分过 2 mm 筛用于其他基本理化性质的测定,密封并保存于干燥处。

#### 1.4 试验方法

#### 1.4.1 土壤有机碳矿化培养

本试验采用室内恒温培养、碱液吸收法测定土壤有机碳矿化量。将保存在4℃冰箱中的土样取出一部 分,放到28℃恒温培养箱中预培养一周,使其从4℃状态恢复到常温状态。预培养后,将相当于20g干土的 新鲜土均匀铺在500 mL 广口瓶底部,调节含水量至田间持水量的60%,在广口瓶中放入装有5 mL 0.2 mol/L NaOH 溶液的小烧杯,在广口瓶口涂抹凡土林并加盖密封,于28℃恒温培养箱中培养31 d,从开始培养后的第 1、4、7、12、17、24、31 d 测定 CO<sub>2</sub>的释放量:小心取出广口瓶中的小烧杯,将碱液全部转移至50 mL 三角瓶中, 于每瓶中加入2 mL 1 mol/L BaCl<sub>2</sub>溶液和2 滴酚酞指示剂,用标准酸(0.2 mol/L HCl 溶液)滴定至红色消失, 记录滴定所用标准酸的量。每次测定后打开广口瓶盖子两小时,以保证为土壤微生物呼吸提供足够的氧气, 并用称重法矫正土壤含水量。每份土样均做2次重复,在同等实验条件下用不加土样的广口瓶作为空白 对照。

#### 1.4.2 土壤基本理化性质测定

本次试验测定了土壤 pH 值、有机碳(SOC)、水溶性有机碳(SWOC)、全氮(TN)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮

115

(NO<sub>3</sub>-N)、速效钾(AK)含量及土壤颗粒组成等理化性质。SOC含量测定方法:称取5g过0.15 mm 筛的风干 土样于100 mL 烧杯中,加入30 mL1 mol/L 盐酸溶液,浸泡24h,每隔2h晃动一次,24h后用蒸馏水冲洗、抽 滤瓶抽滤的方式将土样调节至中性,于40—60℃烘干,压碎,用 Elementarvario EL III 元素分析仪测样品中有 机碳含量;WSOC含量测定方法:称取10g过2 mm 筛的风干土放入三角瓶中,加入30 mL 超纯水,常温下振 荡 30 min,以4000 r/min转速离心15 min,上清液过0.45 µm 滤膜,用 Elementarvario TOC 仪测定滤液中有机 碳浓度,计算得到 WSOC含量;土壤的其他基本理化性质采用常规分析方法测定<sup>[24]</sup>。

1.5 数据统计与分析

由于本次试验中对土壤有机碳矿化培养时间较短,该过程中消耗的有机碳为土壤活性有机碳,所以采用 一级动力学方程对土壤有机碳矿化过程进行模拟<sup>[25]</sup>,其表达式如下:

$$y = Cp \times (1 - e^{-kx})$$

其中, Cp 表示土壤有机碳潜在矿化碳库(mg/kg); k 表示矿化速率常数(d<sup>-1</sup>); x 表示培养天数(d); y 表示培养 时间 x(d)内土壤累积有机碳矿化量(mg/kg)。模型参数采用非线性回归方法进行拟合。

采用 Excel 2013 对试验所得数据进行整理;重复试验数据的平均值及标准差计算、不同地表覆盖类型间 理化性质、土壤有机碳日均矿化量及累积矿化量的差异性检验、土壤有机碳矿化动态拟合以及土壤有机碳矿 化参数与基本理化性质之间的相关性检验采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,结合 SigmaPlot 10.0 进行制图。

#### 2 结果与分析

2.1 供试土壤的基本理化性质差异比较

5种地表覆盖类型及不同土层土壤基本理化性质见表 1,对土壤各理化性质进行双因素方差分析的结果 见表 2。分析结果显示本次试验中的地表覆盖类型和土层深度对土壤 pH、SOC、WSOC、TN、NH<sup>+</sup><sub>4</sub>-N、NO<sup>-</sup><sub>3</sub>-N、颗 粒组成等理化性质具有极显著交互作用,表明二者对于土壤理化性质的影响存在耦合关系。

由表 2 可知城市地表覆盖类型极显著影响着土壤基本理化性质,整体表现为植被覆盖下土壤的理化性质 优于硬化覆盖下的土壤。5 种地表覆盖类型下土壤 pH 值均呈碱性,其中硬化地表下土壤 pH 值显著高于其 他类型。SOC 和 WSOC 含量均以灌木为最高,硬化地表和草坪下相对较低。TN、NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 和 AK 含量均以硬化 地表下最低,其他 4 种类型相对较高;而 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N 含量与其他养分含量相反,硬化地表下土壤 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N 含量显著 高于其余 4 种。5 种地表覆盖类型下土壤 AK 含量有显著性差异,其中灌木覆盖上层土壤 AK 含量高达327.49 mg/kg,而硬化地表下层土壤 AK 含量最低。硬化地表和植草砖下土壤中粘粒和粉粒含量均显著高于其他 3 种覆盖类型,砂粒含量反之。

土层深度对土壤 pH 值没有显著影响,对其他理化指标则有显著或极显著影响。相同地表覆盖类型的不同深度土壤的 SOC 含量大致表现为上层>中层>下层。各地表覆盖类型下土壤中的 WSOC 含量随土层的变化规律各不相同,其中草坪和硬化地表各土层间无明显差异,而灌木和植草砖表现为上层>中>下层,行道树随 土层深度的变化规律不显著。有植被覆盖的土壤中 TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的含量均随土层加深呈降低趋势,而硬化地 表下各层土壤 TN 含量变化不大且都较低。土壤中 AK 含量均随土层加深而降低。

# 2.2 土壤有机碳矿化的动态及模拟

#### 2.2.1 土壤有机碳日均矿化量及累积矿化量

图 1 描述了本次试验的各覆盖类型及不同土层土壤有机碳在 31 d 内的日均矿化量和累积矿化量的变化 情况。有机碳日均矿化量即单位干土每天矿化的有机碳量,又叫有机碳矿化速率,土壤累积矿化量指的是在 一段培养时间内单位干土有机碳分解释放的 CO<sub>2</sub>-C 总量,二者都是表征土壤有机碳矿化动态的重要指标。

随着培养时间的延长,5种覆盖类型土壤的有机碳日均矿化量都呈现下降趋势,且阶段特征较明显:培养前12天属于快速矿化过程,特征是矿化量大、降幅大、持续时间短;12天以后进入缓慢矿化过程,矿化量相对前期显著减小、整体变化趋于平稳。不同覆盖类型土壤有机碳日均矿化量有较大差异,在培养的第1天,5类

			表 Table 1 Soil	E1 不同地表覆盖 physico-chemical	<b>售类型及土层深</b> ↓ properties unde	度下土壤基本理( er various land co	と性质(平均值±≀ vver types and sc	示准误) il depth(Mean±SF			
十层梁度	地表覆盖类型		有机碳 Soil organic	水溶性有机碳 Water soluble	全氮	镀态氮	硝态氮	速效钾	颗粒组	成 Soil particle con	stitute/%
Soil depth/cm	Land cover types	pH(H <sub>2</sub> 0)	carbon/ (g/kg)	organic carbon/ (mg/kg)	Total N/ (g/kg)	NH <sup>+</sup> <sub>4</sub> -N/ (mg⁄kg)	NO <sup>2</sup> -N/ (mg/kg)	Available K/ — (mg/kg)	粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand
0-15	<b></b>	8.44±0.09b	5.57±0.56d	120.05±12.48d	0.76±0.16ac	9.47±1.19b	$3.5 \pm 0.68c$	$225.46 \pm 35.02c$	1.1±0.22ad	37.59±3.95b	61.71±3.74a
	灌木	$8.38{\pm}0.08\mathrm{bc}$	$11.97 \pm 1.75a$	340.81±25.56a	0.86±0.12ab	$8.84{\pm}0.81\mathrm{bc}$	$3.24{\pm}0.71c$	327.49±56.99a	$1.21{\pm}0.27\mathrm{bcd}$	36.41±6.01b	62.37±6.06a
	行道树	$8.27{\pm}0.15{\rm cd}$	$6.66 \pm 1.36c$	$161.87 \pm 16.05c$	0.9±0.31a	$8.4\pm0.68c$	$3.94{\pm}0.77c$	$263.39 \pm 101.26 bc$	$1.37 \pm 0.36c$	33.22±5.42b	65.64±5.91a
	植草砖	$8.33{\pm}0.15\mathrm{bd}$	$8.94{\pm}0.8{ m b}$	218.73±21.01b	$0.7\pm0.12\mathrm{bc}$	11.08±1.23a	$5.44{\pm}0.81\mathrm{b}$	$289.21 \pm 79.66 \mathrm{ab}$	1.74±0.37ab	$47.35 \pm 11.42a$	$50.91 \pm 11.70 \mathrm{b}$
	硬化地表	$8.62 \pm 0.19 a$	$2.16 \pm 0.4e$	64.22±8.85e	0.37±0.04d	5.27±0.98d	6.57±0.77a	113.39±25.95d	1.75±0.26a	46.32±5.77a	$51.93{\pm}5.92b$
15—30	草坪	$8.46{\pm}0.12\mathrm{ab}$	3.78±0.79d	$124.79 \pm 19.08b$	0.45±0.09c	$5.49\pm0.70$ cd	$2.69{\pm}0.51\mathrm{bd}$	$128.43 \pm 39.20 \mathrm{cd}$	$1.02\pm0.25d$	$37.51{\pm}5.40{\rm bc}$	61.47±5.45a
	灌木	$8.46 \pm 0.12 ac$	9.98±1.38a	253.72±28.43a	0.68±0.09a	7.82±0.99b	$2.73{\pm}0.86{\rm bc}$	263.39±65.28a	$1.32{\pm}0.39{\rm cd}$	35.92±9.53c	62.75±9.86a
	行道树	$8.37{\pm}0.10\mathrm{bc}$	$5.07 \pm 0.95c$	$127.51 \pm 25.67 \mathrm{b}$	$0.57{\pm}0.13\mathrm{b}$	$6.17 \pm 0.91c$	$2.45\pm0.49$ cd	$164.13 \pm 76.91 \mathrm{bc}$	$1.54{\pm}0.38\mathrm{bc}$	45.97±6.51a	$52.49\pm6.47b$
	植草砖	$8.36{\pm}0.14\mathrm{bc}$	$6.28{\pm}1.22\mathrm{b}$	$135.99 \pm 18.34 \mathrm{b}$	$0.59\pm0.08b$	10.57±0.78a	$3.33{\pm}0.85\mathrm{b}$	$187.30 \pm 51.43 \mathrm{b}$	1.88±0.34a	48.19±12.02a	$49.93 \pm 12.13b$
	硬化地表	$8.49 \pm 0.15a$	$2.1{\pm}0.45{\rm e}$	67.69±13.3c	$0.38{\pm}0.04\mathrm{c}$	$5.21\pm0.94$ d	4.45±0.77a	$86.25 \pm 18.56d$	$1.78\pm0.27\mathrm{ab}$	45.01±6.69ab	$53.21{\pm}6.86\mathrm{b}$
3045	草坪	$8.50 \pm 0.07a$	$3.88\pm0.65c$	$129.54 \pm 13.33 \mathrm{b}$	$0.4\pm0.12c$	$5.4\pm0.88b$	1.69±0.60d	$101.87 \pm 22.43  \mathrm{cd}$	$0.76\pm0.17b$	44.32±5.65a	$54.92\pm5.76b$
	灌木	$8.40{\pm}0.11\mathrm{bcd}$	8.57±1.23a	$168.68 \pm 16.85 a$	$0.68 \pm 0.11 a$	$6.32 \pm 0.84 b$	2.96±0.60bd	263.16±44.63a	$1.02{\pm}0.24\mathrm{b}$	$28.81{\pm}5.25\mathrm{b}$	70.18±5.47a
	行道树	$8.43 \pm 0.13 ad$	$5.07\pm0.99b$	$163.14 \pm 16.35a$	$0.52{\pm}0.07{\rm b}$	$5.35 \pm 1.05 b$	2.27±0.52cd	$138.56 \pm 41.30 \mathrm{bc}$	1.42±0.33a	38.12±6.71a	$60.45 \pm 7.04 b$
	植草砖	$8.47{\pm}0.05{\rm ab}$	$5.75 \pm 1.43 \mathrm{b}$	$60.09 \pm 11.11c$	$0.5\pm0.06\mathrm{b}$	$8.6 \pm 2.18a$	2.55±0.65bc	$166.38 \pm 79.73 \mathrm{b}$	1.41±0.47a	38.70±7.60a	59.89±7.98b
	硬化地表	$8.46 \pm 0.12 ac$	$2.11{\pm}0.45\mathrm{d}$	$64.01 \pm 10.01c$	$0.4\pm0.07c$	$5.78{\pm}0.71\mathrm{b}$	5.73±0.81a	73.12±13.57d	$1.41 \pm 0.19a$	39.41±7.07a	$59.18 \pm 7.09 \mathrm{b}$
<u>一</u> *		远,相同土层的不 1	同地表类型之	间有显著差异(P<	.0.05),相同字质	<b>技表示相同土层的</b>	不同地表类型之	回養垣不起著(1)	0.03	5	

http://www.ecologica.cn

38卷

生 态 学 报

	r	Table 2 Ty	wo way ANO	VA results	s of soil phys	ico-chemical	properties			
项目	<b>U</b>	SOC	WSOC	TN	NH <sup>+</sup> N	NO <sup>-</sup> N	٨V	粘粒	粉粒	砂粒
Items	рп	300	WSOC	111	1114-11	1103-11	111	Clay	Silt	Sand
地表覆盖类型 Land cover type	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *
土层深度 Soil depth	ns	* *	* *	* *	* *	* *	* *	* *	*	**
地表覆盖类型× 土层深度 Land cover type× Soil depth	* *	* *	* *	* *	* *	* *	ns	* *	* *	**

表 2 土壤理化性质双因素方差分析

\*表示在 0.05 水平上有显著差异; \*\*表示在 0.01 水平上有显著差异, ns(not significant)表示差异不显著; SOC: 土壤总有机碳 soil organic carbon;WSOC:水溶性有机碳 water soluble organic carbon;TN: 总氮 Total nitrogen;AK;速效钾 Available kalium

土壤有机碳日均矿化量均处在最高点,其中灌木达到 38.71 mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>,显著高于草坪和硬化地表,最低为硬 化地表 18.12 mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, 仅为灌木的 46.80%。; 至培养的第7天, 各类型土壤有机碳日均矿化量均大幅减少, 其中草坪、灌木和硬化地表尤为明显,分别是各自第1天日均矿化量的30.29%、52.9%和54.35%;到12天以 后,土壤有机碳日均矿化量趋于平稳,保持在开始时的16.7%—45.55%,同时各类型间整体差异减小,但灌木、 行道树和植草砖的日均矿化量仍处于较高水平;至培养中后期(17天后),日均矿化量虽仍有小幅波动,但相 对前中期较稳定:24-31 天时草坪和硬化地表之间无明显差异,日均矿化量约为 2.12 mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>,而灌木、行 道树和植草砖日均矿化量分别为7.6、6.29、8.44 mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>。方差分析表明,除硬化地表各土层间差异不显著 外,其他覆盖类型的土层深度对有机碳日均矿化量均有显著影响,整体表现为上层>中层>下层。

土壤有机碳累积矿化量表现出与日均矿化量变化相应的变化趋势:在培养前期快速增加,然后逐渐变慢。 在矿化培养期间,除草坪和硬化地表的上层土壤有机碳累积矿化量差异不显著、行道树和植草砖的下层壤有 机碳累积矿化量差异不显著外,其余相同深度的不同覆盖类型土壤有极显著差异(P<0.01),上层土壤有机碳 累积矿化量从大到小依次为植草砖>行道树>灌木>草坪>硬化地表,中层和下层均表现为灌木>行道树>植草 砖>硬化地表>草坪。除灌木和硬化地表外,其余3种覆盖类型下土壤有机碳累积矿化量都随土层加深有显 著的下降,植草砖表现最为明显,其中层和下层土壤有机碳累积矿化量仅为上层的50%左右。 2.2.2 土壤有机碳矿化模拟

根据不同地表覆盖类型及土层深度下土壤在矿化培养期间各阶段测定的 CO,释放量及计算出的土壤有 机碳累积矿化量,运用一级动力学方程采取非线性回归的方式对碳矿化进行拟合,得到 Cp 和 k 值,结果显示 在表 2 中, 由拟合决定系数 R<sup>2</sup>可知该模型拟合效果较好。Cp 和 k 值是土壤有机碳矿化作用的表征, Cp 值越 大、k 值越小表明土壤有机碳矿化作用越强、反之则越弱。

由表 2 可以看出,不同覆盖类型下土壤的 Cp 值变化范围为 83.244—644.8 mg/kg。方差分析表明,相同 土层的不同覆盖类型土壤 Cp 值存在显著差异(P<0.05),上层土壤 Cp 值以植草砖为最高,中、下层土壤以灌 木为最高,各层土壤 Cp 值均以草坪覆盖为最低;土层深度对土壤有机碳 Cp 也有显著影响(P<0.05),但不存 在明显的规律。k 变化范围为 0.033—0.229 d<sup>-1</sup>, 草坪各土层均为最大,其次是硬化地表,灌木相对较小。Cp/ SOC 值(土壤有机碳矿化潜能占土壤有机碳含量的比重)是土壤固碳能力的体现,该值越低表示土壤有机碳 矿化能力越弱,有机碳固存能力越强。不同地表覆盖类型土壤 Cp/SOC 值有显著差异,其中硬化地表、植草砖 和行道树下土壤 Cp/SOC 值显著高于草坪和灌木,尤其是硬化地表下各层土壤 Cp/SOC 值均达 7%以上。 2.3 土壤有机碳矿化拟合参数与土壤理化性质的关系

对拟合得到的土壤有机碳矿化动态参数  $C_{P,k}$  值与土壤基本理化性质进行 Pearson 相关性分析(表 4)。 结果表明:土壤 Cp 值与 SOC、WSOC、TN、NH4-N、AK、粘粒含量之间呈显著或极显著正相关,而与土壤 pH 值、 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量极显著负相关;其中 SOC 含量和 Cp 关系最密切,相关系数达到 0.759,其次 AK、WSOC、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含 量与 Cp 值相关系数也较高,分别为 0.653、0.612、0.540。土壤 k 值与 NH<sup>+</sup><sub>4</sub>-N、NO<sup>-</sup><sub>4</sub>-N、AK、TN 含量呈显著负相

http://www.ecologica.cn

## 关,而与其他理化性质没有显著相关性。







- 3 讨论
- 3.1 城市土壤有机碳矿化规律

城市5种地表覆盖类型下土壤有机碳矿化的变化趋势一致,均表现为前期速度较快而后期显著减缓,与

自然生态系统中土壤有机碳矿化过程类似<sup>[11,26]</sup>。矿化培养初期,土壤中易分解养分含量相对较高,能够为土 壤微生物的生长和代谢过程供应充足的营养物质,使得土壤微生物数量和活力都大大提高,因此这段时间土 壤有机碳矿化速率很快,而随着培养时间的延长,土壤中的易分解有机碳不断减少,微生物代谢活动逐渐受到 营养源的限制,有机碳矿化速率则相对前期显著降低,各地表覆盖类型间的差异也逐渐缩小<sup>[27]</sup>。

Table .	3 Parameters of the first	-order kinetics and Cp/SOC	values for the SOC mi	neralization ( N	Mean±SE)	
土巨沤庄	事车超关于	拟合参数	Fitting parameters			
Soil depth/cm	地衣復皿关室 Land cover types	有机碳潜在矿化碳库 <i>Cp/</i> (mg/kg)	矿化常数 k∕(d)	$R^2$	Cp/SOC/%	
0—15	草坪	149.122±2.293c	0.191±0.011	0.94	2.68±0.27c	
	灌木	$467.468 \pm 29.052 \mathrm{b}$	$0.047 \pm 0.005$	0.96	3.90±0.60b	
	行道树	$454.420{\pm}14.537{\rm b}$	$0.066 \pm 0.004$	0.97	6.82±1.47a	
	植草砖	644.8±28.070a	$0.054 \pm 0.004$	0.97	7.21±0.65a	
	硬化地表	152.587±5.326c	$0.090 \pm 0.008$	0.92	7.08±1.31a	
15—30	草坪	$104.878 \pm 1.830c$	$0.202 \pm 0.013$	0.92	2.78±0.81d	
	灌木	521.721±33.688a	0.04±0.004	0.97	$5.23 \pm 0.74 \mathrm{c}$	
	行道树	$456.658 \pm 26.320$ ab	$0.042 \pm 0.004$	0.97	9.01±0.18a	
	植草砖	$434.014{\pm}37.937{\rm b}$	$0.033 \pm 0.004$	0.97	$6.91{\pm}0.13{\rm bc}$	
	硬化地表	$161.686 \pm 4.637 c$	$0.091 \pm 0.006$	0.95	7.71±0.20ab	
30—45	草坪	$83.224 \pm 1.575 d$	$0.229 \pm 0.017$	0.89	$2.14 \pm 0.32 \mathrm{b}$	
	灌木	514.914±43.015a	$0.037 \pm 0.005$	0.96	6.01±1.13a	
	行道树	333.392±16.678b	$0.057 \pm 0.005$	0.95	6.57±1.33a	
	植草砖	$377.432 \pm 27.857 \mathrm{b}$	$0.040 \pm 0.005$	0.96	6.56±1.66a	
	硬化地表	149.37±3.995c	$0.097 \pm 0.007$	0.95	7.06±1.86a	

表3 土壤有机碳矿化的一级动力学参数及 Cp/SOC 值(平均值±标准误)

\* 小写字母表示同一土层的不同地表覆盖类型下土壤间 *Cp* 的比较, 字母相同的表示差异不显著(*P*>0.05, a=0.05), 字母不同的表示差异 显著(*P*<0.05, a=0.05); *Cp*:有机碳潜在矿化碳库 the potentially mineralizable carbon; k: 矿化速率常数 the mineralization rate constant(k); SOC: 土 壤有机碳 soil organic carbon

表4 土壤 Cp、k 与理化性质的相关性分析

Table 4	Relationship	between p	parameters	of SOC	mineralization	and soil	chemico	-physical	properties
---------	--------------	-----------	------------	--------	----------------	----------	---------	-----------	------------

项目 Items	рН	SOC	WSOC	TN	$\mathrm{NH}_4^+$ -N	NO <sub>3</sub> -N	AK	粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand
Ср	-0.393 **	0.759 **	0.612 **	0.367 **	0.540 **	-0.315 **	0.653 **	0.204 *	-0.097	0.082
k	0.033	-0.164	-0.022	-0.170 *	-0.306 **	-0.170 *	-0.214 *	0.085	-0.022	0.016

\* P<0.05, \*\* P<0.01

# 3.2 不同地表覆盖类型下土壤有机碳矿化差异

本研究结果显示,城市不同地表覆盖类型下土壤有机碳矿化作用差异显著。其中灌木、行道树、植草砖下的土壤有机碳日均矿化量、累积矿化量、Cp 均较大,k 值较小,而硬化地表和草坪下土壤有机碳矿化作用则相对较弱。不难发现,与前面三种地表覆盖类型下的土壤相比,后两者受到的人为干扰更严重:硬化地表阻碍地上地下空气、水分、养分等物质交换和能量流动,土壤微生物呼吸作用等代谢行为受到抑制<sup>[21,28]</sup>;草坪土壤虽然有较大的植被覆盖度,但城市中的草坪受到人类活动的剧烈影响,导致其发育过程缓慢,土壤质地较差,养分含量较低(表1)。这说明人类活动的干扰是影响城市土壤有机碳矿化的重要因素,但城市中人类活动对样地的干扰程度很难进行控制和量化,未来可以建立专门的样地以便对人为因素进行控制,同时结合野外样地进行综合研究,这样既能提出人为因素的干扰又能确保反应城市中真实的情况。

此外,通过比较发现,行道树和植草砖(这两者为既有硬化覆盖又有植被种植的地表覆盖类型)下土壤的 有机碳矿化速率、累积矿化量及 Cp 值显著高于硬化地表下土壤,且上层土壤表现最为显著,说明植被种植能 够显著减轻硬化覆盖对表层土壤有机碳矿化的消极影响:一方面,植被凋落物能够加快表层土壤发育进程,有助于土壤有机质的形成,另一方面,植物根系分泌物能够为土壤微生物提供大量的营养和能量物质,提高微生物的种类、数量及代谢活性<sup>[29]</sup>。

3.3 土壤理化性质对有机碳矿化的影响

城市不同地表覆盖类型下土壤理化性质差异显著(表1),理化性质的差异通过影响土壤酶活性及微生物种类、数量、代谢活性等进而能够对土壤有机碳矿化作用产生深刻影响<sup>[22]</sup>。土壤 SOC 作为土壤微生物代谢所需营养物质的主要来源,对土壤有机碳矿化过程有着最直接的影响。灌木、行道树、植草砖下土壤中 SOC、WSOC 含量相对较高,底物的充足供应能够帮助微生物维持较高的活性,增强土壤有机碳矿化作用<sup>[27]</sup>。此外较高的 NH<sub>4</sub>-N 含量也是植草砖土壤有机碳矿化较强的原因之一,有室内模拟实验证实,NH<sub>4</sub>-N 含量升高能够促进土壤有机质矿化,增加 SWOC 含量<sup>[30]</sup>,但植草砖下 NH<sub>4</sub>-N 含量相对偏高的原因暂不明确,有待进一步研究。硬化地表下土壤中氧气和养分含量低,土壤微生物呼吸作用等代谢行为受到制约,同时 NO<sub>3</sub>-N 含量相对较高也是抑制硬化地表下土壤有机碳的矿化的原因之一,研究表明较高的 NO<sub>3</sub>-N 含量在成土壤有效氮的流失,从而对土壤微生物数量和活性产生不利影响<sup>[31]</sup>。粘粒含量较低可能是本研究中草坪土壤有机碳矿化作用较弱的原因,公园草坪土壤发育不成熟,质地较差,黏粒含量极低,导致土壤有机质含量较低<sup>[11]</sup>,从而影响土壤有机碳矿化过程与土壤养分的释放。此外城市建设过程中掺杂的石灰等物质导致土壤 pH 值升高,偏碱性的土壤中微生物的种类、数量和活性随着 pH 升高而降低,对土壤有机碳矿化产生消极影响<sup>[28]</sup>。

3.4 不同地表覆盖类型下土壤固碳能力差异

从 Cp/SOC 值来看,草坪和灌木的固碳能力强于另外 3 种覆盖类型下土壤,可能与这两种覆盖类型受硬 化地表的影响较小且植被覆盖度相对较高有关系,但不排除绿地养护过程中施肥灌溉增加了土壤有机质的输 入;硬化覆盖阻挡了地上地下的物质循环,尽管其有机碳矿化作用较弱,消耗的有机碳很少,但其有机质的零 输入仍导致其固碳能力较差。行道树和植草砖覆盖下土壤的固碳能力也较弱,与硬化地表相似,说明植物对 于增强硬化地表下土壤的固碳能力没有起太大作用,可能是由于公园建成时间较短,建设过程及硬化覆盖对 土壤结构破坏较严重,短时间内土壤发育不够成熟,土壤粘粒含量低,团聚体不稳定,进而导致其固碳能力较 差;同时可以推测这两种覆盖类型下土壤较高的 SOC、WSOC 含量并非完全来源于土壤对空气中碳的固定,而 应该有较大部分来源于人为的输入,包括行道树的定期施肥、埋管灌溉以及汽车尾气排放通过增加大气 CO<sub>2</sub> 浓度进而使植草砖土壤有机碳含量增加等外源有机碳输入<sup>[32]</sup>。城市土壤固碳能力的影响因素较为复杂,包 括人为干扰、植被类型和覆盖度等<sup>[17]</sup>,尚需深入研究。

### 4 结论

城市化过程中,当自然植被覆盖被硬化覆盖取代后,土壤固碳能力将被大大削弱,其碳储量会显著减少, 土壤有机碳矿化受到抑制,进而对土壤发育过程产生消极影响,而行道树、植草砖等能通过种植植物增加土壤 有机物质的输入,帮助减轻硬化地表对土壤有机碳矿化的消极作用,促进土壤养分循环。

城市土壤有机碳矿化的最主要限制因子是土壤有机碳的含量,此外土壤 pH 值、养分含量、粘粒含量等理 化性质也能通过影响土壤有机碳含量及微生物活动等对土壤有机碳矿化过程产生影响。

#### 参考文献(References):

[4] Kuang W H, Liu J Y, Zhang Z X, Lu D S, Xiang B. Spatiotemporal dynamics of impervious surface areas across China during the early 21st

Jacobson C R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: a review. Journal of Environmental Management, 2011, 92(6): 1438-1448.

<sup>[2]</sup> Wu J G, Xiang W N, Zhao J Z. Urban ecology in China: historical developments and future directions. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 222-233.

<sup>[3]</sup> Xu M, He C Y, Liu Z F, Dou Y Y. How did urban land expand in China between 1992 and 2015? A multi-scale landscape analysis. PLoS One, 2016, 11(5): e0154839.

century. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(14): 1691-1701.

- [5] 赵丹,李锋,王如松.城市土地利用变化对生态系统服务的影响——以淮北市为例.生态学报,2013,33(8):2343-2349.
- [6] Kaufmann R K, Seto K C, Schneider A, Liu Z T, Zhou L M, Wang W L. Climate response to rapid urban growth: evidence of a human-induced precipitation deficit. Journal of Climate, 2007, 20(10): 2299-2306.
- [7] 罗上华,毛齐正,马克明,邬建国.城市土壤碳循环与碳固持研究综述. 生态学报, 2012, 32(22): 7177-7189.
- [8] Maia S M F, Ogle S M, Cerri C E P, Cerri C C. Soil organic carbon stock change due to land use activity along the agricultural frontier of the southwestern Amazon, Brazil, between 1970 and 2002. Global Change Biology, 2010, 16(10): 2775-2788.
- [9] Kirschbaum M U F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 21-51.
- [10] Díaz-Hernández J L. Is soil carbon storage underestimated. Chemosphere, 2010, 80(3): 346-349.
- [11] Rabbi S M F, Wilson B R, Lockwood P V, Daniel H, Young I M. Soil organic carbon mineralization rates in aggregates under contrasting land uses. Geoderma, 2014, 216: 10-18.
- [12] 任秀娥, 童成立, 孙中林, 唐国勇, 肖和艾, 吴金水. 温度对不同粘粒含量稻田土壤有机碳矿化的影响. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2245-2250.
- [13] 李银坤, 陈敏鹏, 梅旭荣, 夏旭, 郭文忠, 李昊儒, 郝卫平. 土壤水分和氮添加对华北平原高产农田有机碳矿化的影响. 生态学报, 2014, 34(14): 4037-4046.
- [14] Prayogo C, Jones J E, Baeyens J, Bending G D. Impact of biochar on mineralisation of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(4): 695-702.
- [15] 罗友进,赵光,高明,魏朝富,赵丽荣.不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响.水土保持学报,2010,24(6):117-122.
- [16] 彭少麟,周凯,叶有华,粟娟.城市热岛效应研究进展. 生态环境, 2005, 14(4): 574-579.
- [17] 戴慧, 王希华, 阎恩荣. 浙江天童土地利用方式对土壤有机碳矿化的影响. 生态学杂志, 2007, 26(7): 1021-1026.
- [18] 罗上华,毛齐正,马克明,邬建国.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.
- [19] 刘艳,王成,彭镇华, 郄光发. 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.
- [20] 孟令涵,曾辉,熊燕梅,郭大立. 深圳市不同建成区密度和植被类型下绿地土壤碳、氮、磷含量和细根生物量. 北京大学学报:自然科学 版,2013,49(5):899-907.
- [21] Raciti S M, Hutyra L R, Finzi A C. Depleted soil carbon and nitrogen pools beneath impervious surfaces. Environmental Pollution, 2012, 164: 248-251.
- [22] Wei Z Q, Wu S H, Zhou S L, Lin C. Installation of impervious surface in urban areas affects microbial biomass, activity (potential C mineralisation), and functional diversity of the fine earth. Soil Research, 2013, 51(1): 59-67.
- [23] Wei Z Q, Wu S H, Zhou S L, Li J T, Zhao Q G. Soil organic carbon transformation and related properties in urban soil under impervious surfaces. Pedosphere, 2014, 24(1): 56-64.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [25] Saviozzi A, Vanni G, Cardelli R. Carbon mineralization kinetics in soils under urban environment. Applied Soil Ecology, 2014, 73: 64-69.
- [26] Jia J, Yu D P, Zhou W M, Zhou L, Bao Y, Meng Y Y, Dai L M. Variations of soil aggregates and soil organic carbon mineralization across forest types on the northern slope of Changbai Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 1-7.
- [27] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 马强. 土壤活性有机碳. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1412-1417.
- [28] 贾丙瑞,周广胜,王风玉,王玉辉.土壤微生物与根系呼吸作用影响因子分析.应用生态学报,2005,16(8):1547-1552
- [29] 吴林坤,林向民,林文雄.根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望.植物生态学报,2014,38(3):298-310
- [30] 马芬,马红亮,邱泓,杨红玉.水分状况与不同形态氮添加对亚热带森林土壤氮素净转化速率及 N<sub>2</sub>O 排放的影响.应用生态学报,2015, 26(2):379-387.
- [31] 余明泉,袁平成,陈伏生,胡小飞,杜天真.城市化对湿地松人工林氮素供应的影响.应用生态学报,2009,20(3):531-536.
- [32] 张小萌、李艳红、王盼盼. 乌鲁木齐城市土壤有机碳空间变异研究. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 117-121.