

天山北坡城市群非渗透面下的土壤有机碳特征

艳 燕^{1,2}, 张 弛^{1,3*}, 匡文慧⁴, 罗格平¹, 陈春波^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中亚利桑那菲尼克斯长期生态研究站, 亚利桑那州立大学,
美国亚利桑那州 坦佩 85287; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要:城市非渗透面(Impervious Surface Areas, ISA)的覆盖, 强烈地改变了区域土壤理化性状, 从而在不同尺度上影响着生态系统碳循环。ISA下土壤样品获得的困难性致使对ISA所封存的土壤有机碳(Soil Organic Carbon beneath ISA, SOC_{ISA})及其分布特征的认识极为缺乏。为揭示ISA下土壤理化特征, 本文收集天山北坡城市群在建工程ISA下27个100 cm深土壤样品, 同时采集对应ISA点邻近的渗透面(Pervious Surface Areas, PSA)样品作对比分析。利用Landsat 8图像提取了研究区ISA与PSA面积, 并结合实测值估算SOC储量。研究发现:①干旱区城市100 cm深土壤剖面平均SOC_{ISA}=5.74±0.39 kgC·m⁻², 显著低于其邻近PSA下的SOC; ISA下土壤容重(Bulk Density, BD)BD_{ISA}=1.58±0.02 g·cm⁻³, 显著高于其邻近BD_{PSA}约5%($p<0.01$)。②两种地表下SOC和BD均随着深度加深而降低, 通过与土层深度的线性拟合, SOC_{ISA}和BD_{ISA}具有明显降低趋势, PSA下SOC和BD并无显著规律; 深层土壤(60~100 cm)SOC_{PSA}显著高于SOC_{ISA}($p<0.05$), 两者间并无稳定的比例关系。③天山北坡城市群SOC_{ISA}为总城市土壤碳库的68%, 单个城市SOC_{ISA}比例50%以上, SOC_{ISA}构成干旱区城市土壤碳库的主体。本文不仅加深了对城市ISA下土壤理化性状的了解, 而且对评估城市乃至全球生态系统碳循环及碳评估具有重要意义。

关 键 词:非渗透面; 土壤有机碳; 土壤容重; 天山北坡城市群; 干旱区

1 引言

城市化是人类改变地表结构最为强烈的干扰活动(Pickett et al, 2008), 成为20世纪中国(Bai, 2014)乃至全球最主要的土地利用变化之一(Bengtson et al, 2005)。目前, 全球约3%~4%的陆地表面转化为城市用地与居民点(Svirejeva-Hopkins et al, 2004)。中国城市建成区面积虽仅占国土面积的0.5%(2008年), 但扩张迅速, 仅在2000-2008年间就增加了43%以上(Kuang et al, 2013)。城市扩张已导致大面积的自然或农田土壤被城市非渗透面(Impervious Surface Areas, ISA)所覆盖(蔡运龙等, 2002)。ISA指房屋建筑、道路以及停车场、城市广

场等硬化地表(Xu et al, 2013), 可作为衡量不同尺度自然生态系统转变为城市生态系统所引发的生态和气候效应的指标, 因此逐渐成为城市生态系统研究的热点(Bierwagen et al, 2010)。当前, ISA占中国城市建成区面积的63%以上(Kuang et al, 2013)。

ISA的覆盖通过移除地表植被以及表层有机土, 上下翻动、夯实等扰动强烈改变了土壤原有理化性质; ISA覆盖还阻断了土壤与外界环境的物质能量交换, 从而影响土壤碳循环(Montague et al, 2004; Hardin et al, 2007), 改变了原始土壤环境以及生物地化循环过程(Pataki et al, 2006; Scalenghe et al, 2009; Laurance et al, 2014)。在城市、陆地甚至全球尺度上, 土壤碳库的微小变化将对全球碳循环产

收稿日期: 2014-09; 修订日期: 2015-03。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170347); 中国科学院百人计划项目(Y174131001); 国家国际科技合作项目课题(2010DFA92720-10)。

作者简介: 艳燕(1986-), 女, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 研究方向为城市生态学, E-mail: vvyaya@hotmail.com。

通讯作者: 张弛(1973-), 男, 湖北武汉人, 博导, 研究员, 研究方向为全球变化与生态系统碳循环模拟, 城市生态系统模拟, E-mail: zc@ms.xjb.ac.cn。

引用格式: 艳燕, 张弛, 匡文慧, 等. 2015. 天山北坡城市群非渗透面下的土壤有机碳特征[J]. 地理科学进展, 34(6): 781-789. [Yan Y, Zhang C, Kuang W H, et al. 2015. Organic carbon characteristics of soils beneath urban impervious surface in northern Tianshan urban cluster[J]. Progress in Geography, 34(6): 781-789.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.06.013

生深刻影响 (Grimm, Faeth et al, 2008; Grimm, Foster et al, 2008)。城市作为常年受到强烈干扰的自然—社会复合式生态系统,为人们了解生态系统过程与全球变化之间的相互响应提供了理想的研究场所,从而出现大量城市碳储量相关研究 (Grimm, Foster et al, 2008)。尽管 Pataki 等 (2006) 认为,其他土壤转变为城市土壤后,其有机质 (Soil Organic Matter, SOM) 和有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 均有增加趋势,但同时也指出,城市土壤碳总量的计算结果对于是否包含 ISA 下土壤具有较高的敏感性。Churkina 等 (2008) 估算出北美大陆城市碳密度与热带雨林相当,而其大部分碳则储存于城市土壤中。但在估算城市 ISA 下土壤有机碳 (SOC_{ISA}) 时, Curkina 等采用了 Pouyat 等 (2006) 的研究结果,即城市填埋场的土壤碳密度 ($3.3 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$)。Raciti 等 (2012) 在将美国纽约市非渗透面下土壤延伸到 100 cm 时,得出其 SOC_{ISA} 约为 $5.8 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。有些研究则认为,ISA 的覆盖过程使 SOC 完全分解而设定其值为 $0 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$ (Svirejeva-Hopkins et al, 2004; Bell et al, 2011),有些研究中设定城市 SOC 的平衡点为 $1 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$ (Schaldach et al, 2007),但不论哪种假设均严重低估了城市生态系统碳库。而在其他城市生态系统碳库相关研究中,有学者认为城市 SOC_{ISA} 与其邻近渗透面 (Pervious Surface Areas, PSA) 下 SOC (SOC_{PSA}) 并无差异,进而以 SOC_{PSA} 代替 SOC_{ISA} 进行估算 (Kaye et al, 2008)。然而, Raciti 等 (2012) 的研究结果显示,在表层 (0~15 cm) 处, SOC_{ISA} 显著低于 SOC_{PSA} (Raciti et al, 2012); 在中国南京的研究也得出相同结论 (Wei et al, 2014)。但 Edmondson 等 (2012) 的研究结论表明,英国莱斯特的市的 SOC_{ISA} 与 SOC_{PAS} 之间并无显著差异。

ISA 占了城市建成区面积的一半以上,准确把握 SOC_{ISA} 的理化性状及分布格局是阐明城市生态系统碳循环以及准确估算城市生态系统碳储量的关键。准确量化城市化 SOC 库,对评估城市碳平衡以及城市化对区域甚至全球尺度碳循环的影响具有重要意义。迄今为止,由于获得城市 ISA 下土壤样品的困难性,现有对于城市 SOC_{ISA} 的研究并未充分提供其下的土壤属性。例如,对于城市 SOC_{ISA} 垂直格局的揭示可以通过所观测的表层 (例如 0~20 cm) 推算出整个 0~100 cm 深度土壤剖面的 SOC 值。而鉴于城市 ISA 下的土壤碳采样的困难性限制,利用表层土壤推算其整个深度 SOC 至关重要。针对以上

问题,本文选取处于快速发展阶段的天山北坡城市群作为研究区域,结合道路与城市建筑在建工程,采取 100 cm 深土壤样品进行分析,获得城市 ISA 与 PSA 两种地表下 100 cm 深土壤的理化性状及其分布格局;结合遥感,估算出城市两种地表下的 SOC 储量。对埋藏在城市 ISA 下土壤属性的定量研究,有助于准确评估城市生态系统碳循环以及估算城市的土壤碳储量。

2 研究区域与研究方法

2.1 研究区概况

天山北坡城市群 (位于 $43^{\circ}\sim 46^{\circ}\text{N}$, $83^{\circ}\sim 89^{\circ}\text{E}$ 之间) 主要包括乌鲁木齐市、米泉市、昌吉市、石河子市、乌苏市、奎屯市以及克拉玛依市等 7 个城市 (方创林等, 2005; 宋吉涛等, 2006), 处于准格尔荒漠南缘、天山北麓, 土地总面积约为 4.7 万 km^2 , 总人口 438.75 万。该区域年均温 $7.4\sim 8.5^{\circ}\text{C}$, 年降水 $169.2\sim 286.9 \text{ mm}$ (新疆维吾尔自治区统计局, 2013), 土壤类型以淡棕钙土、灰漠土为主 (于东升等, 2005; 新疆维吾尔自治区统计局, 2013) (图 1), 属温带荒漠干旱区。城区用地主要由荒漠植被和灌溉农地转化而来 (吴世新等, 2005)。由于其区位优势, 自然资源丰富, 逐渐成为新疆经济最为发达且城市化水平最高的区域, 更是连接中亚地区与中国的枢纽。近年来, 天山北坡城市群迅速扩展, 其城市化过程明显 (程维明等, 2002)。

2.2 土壤样品收集

2013 年 4-5 月, 结合乌鲁木齐市“田”字路二期工程, 以及其他城市的高层建筑在建工程, 我们采集了深入城市道路、房屋等建筑物至少 100 cm 处的 ISA 下土壤样品; 为了进行对比, 分别在每个 ISA 样点邻近 PSA (主要为城市行道树、草坪等) 采取对应土壤样品 (图 2)。将土壤剖面深度定为 0~100 cm。采用均分法, 将土壤剖面分为 5 层 (0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm), 自下而上采集土壤样品。每层土壤样品包括利用容积为 100 cm^3 的环刀采集的土壤容重样品, 以及在 20 cm 厚度范围均匀采集的分析样品。对于没有现成土壤剖面, 利用直径为 3 cm 的土钻进行土样采集。为减少试验中的误差, 分别对每个样点采集 3 个剖面作为重复。

此次采集供包括上述 7 个城市的 27 个样点, 其中每个样点包含了 ISA 与 PSA 土壤的分层样品。

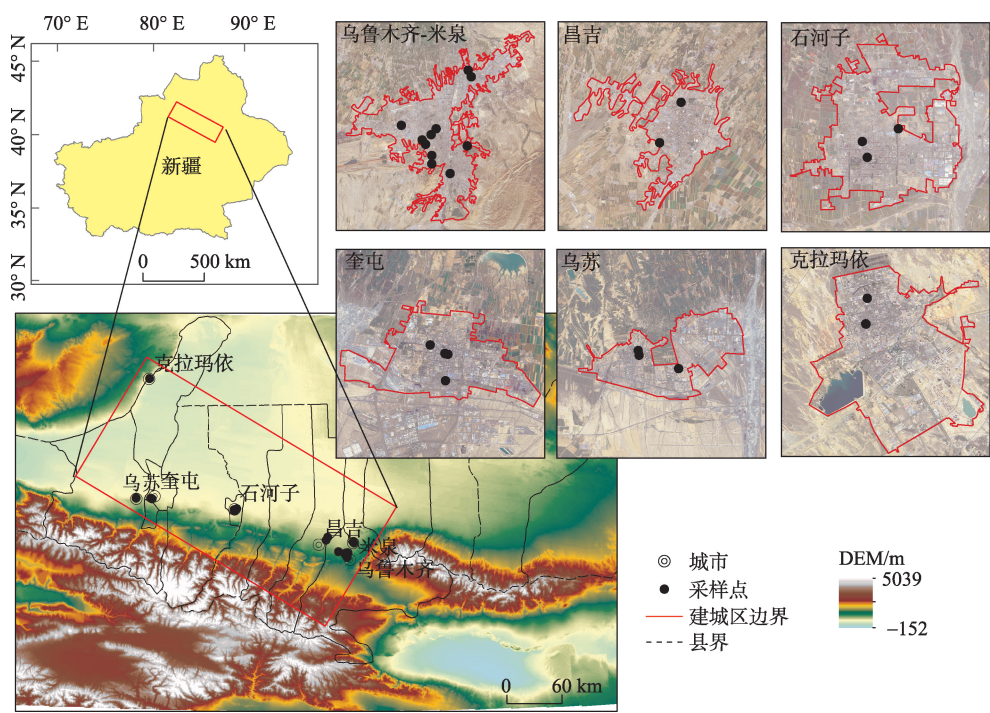


图1 天山北坡城市群位置以及城市土壤采样点分布图

Fig.1 Location of the northern Tianshan urban cluster and the sampling sites



图2 城市两种地表采样示意图(方框内1表示城市非渗透面,2表示城市渗透面)

Fig.2 Sampling sites of two different surfaces in urban area (Box 1 represents impervious surface and box 2 represents pervious surface.)

共有 162 个土壤剖面的 810 个土壤样数据(分析样品)。将土壤容重样品放置于烘箱,在 65℃下连续烘干 48 h 直至恒重后,将石砾、砖头、玻璃等侵入体分离,并通过 2 mm 土壤筛,而后进行称重并除以环刀容积(100 cm³)获得土壤容重数据(Bulk Density, BD)(g·cm⁻³);利用重铬酸钾外加热氧化法测定土壤有机质含量(SOM) (g·kg⁻¹),根据 Bemmelen 系数(文启孝,1984)和测得容重数据将结果转换为 SOC 密度(kgC·m⁻²),具体公式如下(Wu et al, 2003):

$$SOC = 0.58 \times BD \times SOM / 100 \quad (1)$$

为了明确 SOC_{ISA} 与 SOC_{PSA} 之间的差异,不仅采

用独立样本 t 检验以及配对样本 t 检验,还利用变异系数(Coefficient of Variation, CV)来刻画其变异性:

$$CV = SD / MN \times 100\% \quad (2)$$

式中:SD 为该组数据的标准误差, MN 为其平均值。

2.3 城市非渗透面的提取

利用研究区 2013 年 8-9 月云量为 0 的 Landsat 8 数据(<http://glovis.usgs.gov/>),进行图像预处理后,通过与其全色波段的融合将其分辨率提高到 15 m。从中国 1:100 万 LUCC 数据提取研究区建成区边界(城乡居民地和交通建设用地解译精度达到 98%) (Liu et al, 2010),确定所选 6 个天山北坡城市(由于

乌鲁木齐与米泉市建成区的边界无法分离,故在提取城市土地覆被时将两市合为一个城市)的研究区边界。利用基于端元选择的线性光谱混合模型(Linear Spectral Mixture Model, LSMM)进行混合像元的分解(Lu et al, 2004),将城市土地覆盖简化为植被—非渗透面—土壤(Vegetation-Impervious Surface-Soil, V-I-S)(Ridd, 1995)。提取结果见图3。利用分层随机抽样布点法结合 Worldview 高分图像(分辨率最高达 0.3 m)进行检验,其准确度达到 90%,可满足城市尺度研究需求。

在进行城市生态系统土壤碳库估算时,设定城市水体不含有机碳,在前期将其掩膜。以城市为单位,分别以本次的实测 SOC_{ISA} 与 SOC_{PSA} 值为单位值,估算城市土壤碳库。

3 结果与分析

3.1 区域城市土壤有机碳概况

从表1可以看出,研究区 100 cm 土壤剖面平均 SOC_{ISA} 为 $5.74 \pm 0.39 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$, SOC_{PSA} 为 $8.69 \pm 0.75 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$; 27 对样的配对样本 t 检验均表明, SOC_{PSA} 显著高出 SOC_{ISA} 约 52% ($p < 0.01$); 两者差值 ($SOC_{PSA} - SOC_{ISA}$) 的变异系数高达 133%; 平均 BD_{ISA} 为 $1.58 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; BD_{PSA} 为 $1.51 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; BD_{ISA} 显著高

出 BD_{PSA} 约 5% ($p < 0.01$); 两者差值 ($BD_{ISA} - BD_{PSA}$) 的变异系数高达 156%。

研究区城市两种地表下 SOC 均随着深度的增加而降低,利用线性拟合法拟合 SOC 与土层深度关系,发现 $SOC_{ISA}(k = -0.01, p = 0.007)$ 降低比 $SOC_{PSA}(k = -0.011, p = 0.027)$ 更为显著。研究区深层土壤 (60~80、80~100cm) 的 SOC_{PSA} 显著高于 SOC_{ISA} ; 总体上, BD_{ISA} 高于 BD_{PSA} , 但并无显著差异 (图4)。 BD_{ISA} 随着深度增加,呈现显著降低的趋势 ($k = -0.001, p = 0.048$), BD_{PSA} 则并未表现出明显的降低趋势 ($k = -0.001, p = 0.254$)。

3.2 单个城市土壤有机碳量估算

以单个城市为单位计算获得每个城市的平均 SOC (表2)。遥感提取结果表明,除去水体后,天山北坡城市群6个城市总建成区面积约为 536 km^2 ,其中城市 ISA 面积 403 km^2 , 占总建成区的 75.2%; 天山北坡城市群总建成区两种不同地表下 100 cm 深土壤中共储存了 3.56 TgC, 其中封存于城市 100 cm 深处 SOC_{ISA} 储量为 2.4 TgC, 占整个城市土壤碳库的 68%, 故 SOC_{ISA} 是整个城市生态系统土壤碳库的主体 (表3)。以城市为单位进行计算后,城市 ISA 面积比例均在 60% 以上,最高超过 89%, 其下 100 cm 深处土壤中的 SOC 储量也占整个土壤碳库 50% 以上 (表3)。

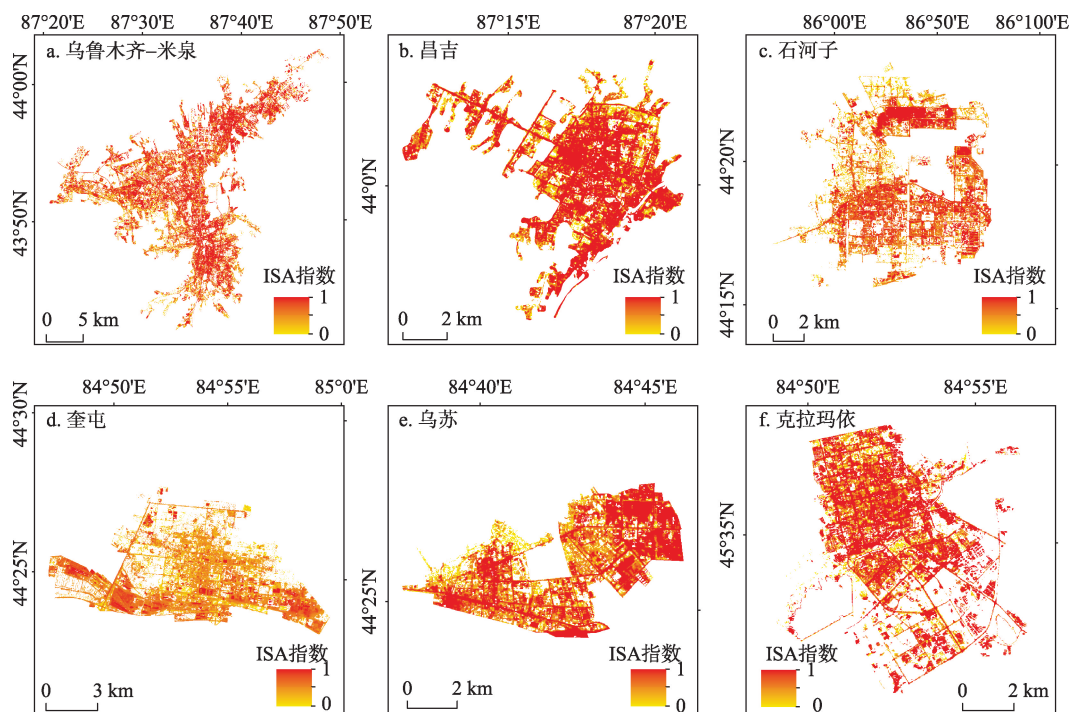


图3 天山北坡城市群城市ISA面积指数

Fig.3 Impervious surface area index of the northern Tianshan urban cluster

4 讨论

ISA 覆盖城市建城区大面积土壤,改变了土壤的理(BD)化(SOC)性状(仝川等, 2007)。研究表明,干旱区城市土壤的 BD_{ISA} 为区域原位土 BD 的1.23倍, BD_{PSA} 则达1.18倍(王绍强等, 2000),压实作用明显。城市土壤 BD 的分层特征也发生改变:自然土壤剖面紧实度呈现上松下紧的格局(杨金玲等, 2007);而建城区ISA下土壤由于受到车辆及行人的碾压,其剖面呈现出上紧下松的格局。城市PSA土壤容重则可能由于城市植被种植过程中经过多次翻动而失去了其原有的分层特征(Lorenz et al, 2006),且表层(0~20 cm)土壤由于人为践踏而高于其他土层。同时,ISA覆盖改变了SOC的分层特征(图4)。研究区约50%的 SOC_{ISA} (51%)与 SOC_{PSA} (47%)分布在地表下0~40 cm的土层中,远远低于草地(65%)与森林土壤(71%)的比例,略低于灌丛土壤比例(56%)(Jobbágy et al, 2000)。在表层(0~20 cm)处, SOC_{ISA} 比例为28%,均低于自然土壤平均水平(草地42%;灌丛33%;森林50%)。PSA下表层(0~20 cm)土壤含总SOC的26%,0~40 cm含总SOC的

47%,40 cm以下土壤层中的总SOC差距并不明显(图4),这与自然土壤碳的垂直分布具有明显差距(Jobbágy et al, 2000)。

干扰机制的不同导致 SOC_{ISA} 与 SOC_{PAS} 之间存在显著差异。ISA的覆盖在垂直方向上阻断了土壤与外界的交流而切断外界凋落物以及植物根系的补充,从而总 SOC_{ISA} 偏低。研究表明,100 cm深 SOC_{ISA} 明显低于同等深度区域原位土有机碳总量(5.74 ± 0.39 vs 6.52 ± 3.17 $kgC\cdot m^{-2}$)(新疆维吾尔自治区农业厅, 1996)。但由于压实现象的存在,所需的原位土土壤厚度超过100 cm,因此ISA的覆盖导致相当一部分的SOC损失。此外,在城市管理活动中会将PSA表面植物凋落物及时清理,但绿地的管理(灌溉、施肥)活动致使渗透面土壤中的有机质蓄积增加,因此 SOC_{PSA} 显著高于同等厚度区域原位土有机碳总量(8.69 ± 0.75 vs 6.52 ± 3.17 $kgC\cdot m^{-2}$)。

将本文结果与以往主要位于湿润、半湿润区的结果进行比较后发现(表4),不论是在总剖面还是各层水平上,干旱区城市两种地表下SOC在同等深度上均低于湿润区城市土壤。具体而言,天山北坡城市群的 SOC_{ISA} 约为湿润区城市 SOC_{ISA} 的72%~74%, SOC_{PSA} 约为湿润城市的43%~54%。这可能是由于干旱区气候条件限制,其土壤本底碳库以及城市绿地土壤碳库的累积速率均显著低于湿润地区所致(王绍强等, 2000)。另外,中国的城市无论在湿润、半湿润、或干旱地区,在0~20 cm或40~60 cm层, SOC_{PSA} 都显著高于 SOC_{ISA} ,而这种差别在英国Leicester市土壤(Edmondson et al, 2012)以及美国纽约的深层土壤(45~60 cm)(Raciti et al, 2012)中都不存在。这种差异可能是因为不同国家在建设和绿

表1 研究区城市两种地表土壤有机碳概况
Tab.1 Urban soil organic carbon (SOC) of the northern Tianshan urban cluster

样本类型	$SOC\pm SE/(kgC\cdot m^{-2})$	CV/%	$BD\pm SE/(g\cdot cm^{-3})$	CV/%
ISA	5.74 ± 0.39	45	1.58 ± 0.02	6.09
PSA	8.69 ± 0.75	35	1.51 ± 0.02	4.96
差值(PSA-ISA)	$2.95\pm0.76^{**}$	133	$-0.08\pm0.03^{**}$	156.00

注:**表示配对样本t检验在 $p<0.01$ 的水平上显著。

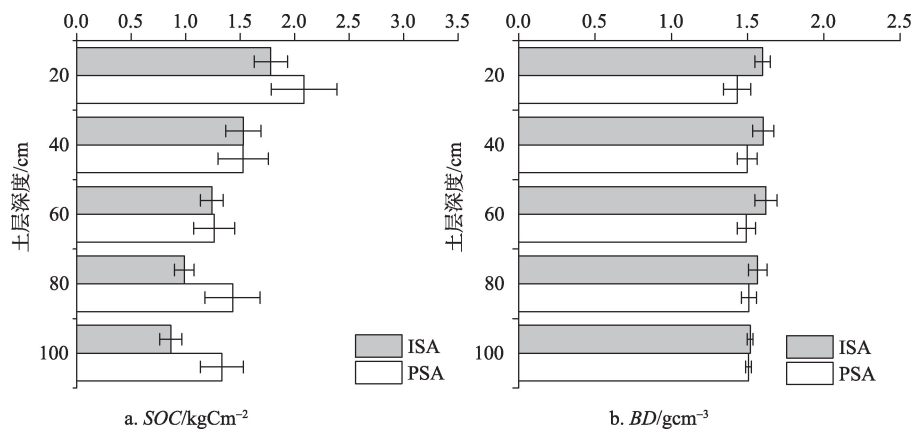


图4 城市土壤有机碳与土壤容重垂直变化规律

Fig.4 Vertical distribution of bulk density and soil organic carbon of soils in the northern Tianshan urban cluster

地管理过程中对城市土壤的不同干扰模式所致。因此,那种忽略气候、土壤母质和管理模式的影响,将城市SOC设为恒定值(Cannell et al, 1999; Svirejeva-Hopkins et al, 2004; Tomlinson et al, 2006; Schal-dach et al, 2007; Bell et al, 2011) 的处理方法可能会

错估城市化对碳源汇格局的影响,尤其会高估湿冷区(有较高的本底土壤碳储量)因城市化而导致的土壤碳损失。

此外,一些研究根据非渗透面邻近的渗透面测量值(即SOC_{PSA})来估测SOC_{ISA}(Kaye et al, 2008; Eigenbrod et al, 2011);但本文和Raciti等(2012)的研究均表明,SOC_{ISA}显著低于其邻近的SOC_{PSA}。另外,SOC_{PSA}与SOC_{ISA}间不论在总量还是垂直分布格局上,均无稳定关系比例。本文结果显示,两者差值(SOC_{PSA}-SOC_{ISA})在样本间的变异系数高达133%,远高于SOC_{ISA}或SOC_{PSA}本身35%~45%的变异系数(表1)。此外,PSA和ISA各自内部容重变异系数都很低,分别为5.0%和6.09%,但其容重差值的变异系数则高达156%(表1)。在垂直分布上,也未发现SOC_{PSA}与SOC_{ISA}间有任何联系规律(图4)。因此,通过SOC_{PSA}来估测SOC_{ISA}的方案(Kaye et al, 2008; Eigenbrod et al, 2011)并无实际根据。

表2 单个城市土壤有机碳密度/(kgC·m⁻²)
Tab.2 Soil organic carbon beneath different
surfaces of each city/(kgC·m⁻²)

城市	样点数	SOC _{PSA} ±SE	SOC _{ISA} ±SE
乌鲁木齐—米泉	11	7.81±0.83	5.41±0.52
昌吉	2	11.83±3.43	7.10±1.16
石河子	3	10.04±0.56	8.26±1.00
奎屯	4	6.78±1.48	6.03±1.33
乌苏	4	6.72±1.57	4.26±0.78
克拉玛依	3	13.71±3.77	5.12±1.02
城市群平均		9.48±1.18	6.03±0.59
		CV=12%	CV=9.8%

表3 天山北坡城市地表面积与碳储量

Tab.3 Area and carbon storage of each city in the northern Tianshan urban cluster

	面积/km ²		面积比例/%		碳储量/Tg		碳储量比例/%	
	ISA	PSA	ISA	PSA	ISA(MN±SE)	PSA(MN±SE)	ISA	PSA
乌鲁木齐—米泉	223.58	70.80	75.95	24.05	1.26±0.12	0.55±0.06	69.6	30.4
昌吉	37.93	4.46	89.47	10.53	0.27±0.04	0.05±0.02	84.4	15.6
石河子	52.49	23.21	69.34	30.66	0.43±0.05	0.23±0.01	65.2	34.8
奎屯	33.19	19.33	63.20	36.80	0.2±0.04	0.13±0.06	60.6	39.4
乌苏	26.87	4.14	86.65	13.35	0.11±0.02	0.03±0.01	78.6	21.4
克拉玛依	28.84	10.76	72.83	27.17	0.15±0.15	0.15±0.04	50	50
总计	402.90	132.70	75.22	24.78	2.42	1.14	68	32

表4 干旱区城市土壤(本研究)与其他(前人报道)地区土壤有机碳的比较

Tab.4 Comparison of urban SOC in dryland (this study) with those from wetter areas (other reports)

	气候特征	单位	土层/cm	非干旱区		干旱区陕北城市群	
				SOC_{ISA}	SOC_{PSA}	SOC_{ISA}	SOC_{PSA}
美国纽约(Raciti et al, 2012)	大陆性湿润气候	$kgC \cdot m^{-2}$	0~15	2.29**	5.67**	1.77**	2.15**
			45~60	SOC_{ISA} 与 SOC_{PSA} 间无显著差异		SOC_{PSA} 显著高于 SOC_{ISA}	
中国南京(Wei et al, 2014)	湿润季风气候	$kgC \cdot m^{-2}$	0~20	2.35	4.52	1.83	2.47
英国 Leicester(Edmondson et al, 2012)	湿润海洋性气候	$kgC \cdot m^{-2}$	0~21	SOC_{ISA} 与 SOC_{PSA} 间无显著差异		SOC_{PSA} 显著高于 SOC_{ISA}	
中国北京(Zhao et al, 2012)	半湿润大陆性季风气候	$g \cdot kg^{-1}$	0~10	6.68	19.20	5.84	8.70
			10~20	6.76	16.71	5.46	7.72
			20~30	8.17	11.79	5.18	6.60
			30~40	7.32	10.27	4.72	6.02
			0~40	7.23	14.49	5.30	7.26

注:**表示配对(Paired t-test)和独立样本t检验均呈双尾p<0.01的显著水平,*表示p<0.05的显著水平。

本文结果显示,ISA是构成城市土地表面的主体,其比例达到63%以上,即使根据实测值计算获得 SOC_{ISA} 在整个城市土壤碳库中的比例也超过50%,最高达80%以上;因此不论在区域还是在单个城市水平上, SOC_{ISA} 均可构成城市土壤碳库的主体(表3)。以往研究中偏低恒定值假设会严重低估城市土壤碳库,而 $SOC_{ISA}=SOC_{PSA}$ 的假设则无疑会高估了 SOC_{ISA} 在城市碳库中的位置。但由于取样条件的苛刻(取样工作受到旧城区改造工程分部的限制以及同时具有ISA与PSA下的土壤剖面)而存在样点偏少的问题,加大了研究结果的不确定性(变异系数CV的偏大)。当然, SOC 的空间分布受宏观地理背景因素(如气候带,海陆分布等因素)影响,决定了不同城市所处区域原位土的异质性;不同的土地利用、土地覆被的结构,叠加对于城市PSA(多为城市绿地)不同的管理模式、强度,导致城市土壤属性变得更加复杂。因此,为了准确量化城市化对土壤环境以及生态系统碳循环的影响,需要更多的地面观测以及实验研究来证实城市化过程对土壤环境的影响机制。

5 结论

准确量化 SOC_{ISA} 直接关系到区域乃至全球碳循环研究中对城市化效应的正确评估。本文结合城市在建工程,采取新疆天山北坡城市群7个城市不同城市地表下100 cm深土壤,并对其土壤容重、 SOC 总量与分布特征进行对比分析;结合Landsat8遥感图像进行研究区ISA的提取,计算了天北城市群城市100 cm深土壤的碳储量,主要结论为:

(1) 天山北坡干旱区城市群100 cm土壤剖面平均 $SOC_{ISA}(5.74 \pm 0.39 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2})$,显著低于 $SOC_{PSA}(8.69 \pm 0.75 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2})$ 约52%($p < 0.01$);平均 $BD_{ISA}(1.58 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3})$,显著高于 $BD_{PSA}(1.51 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3})$ 约5%($p < 0.01$)。

(2) SOC_{ISA} 与 SOC_{PSA} 均呈现出随着深度加深而降低的垂直变化规律,但在深层(60~80、80~100 cm), SOC_{ISA} 均显著低于 $SOC_{PSA}(p < 0.05)$; BD_{PSA} 具有显著的随着深度增加而降低的变化趋势($k = -0.968, p < 0.05$),但 BD_{PSA} 则并未表现出显著趋势。

(3) 天北城市群平均ISA面积比例为75.2%,单个城市ISA面积比例均在63%以上;在区域与单个城市水平上, SOC_{ISA} 的比例均超出50%, SOC_{ISA} 为构

成城市生态系统土壤碳库的主体。

参考文献(References)

- 蔡运龙, 傅泽强, 戴尔阜. 2002. 区域最小人均耕地面积与耕地资源调控[J]. 地理学报, 57(2): 127-134. [Cai Y L, Fu Z Q, Dai E F. 2002. The minimum area per capita of cultivated land and its implication for the optimization of land resource allocation[J]. Acta Geographica Sinica, 57(2): 127-134.]
- 程维明, 周成虎, 李建新. 2002. 天山北麓经济发展与绿洲扩张[J]. 地理学报, 57(5): 561-568. [Cheng W M, Zhou C H, Li J X. 2002. Economic development and oasis growth at the northern foot of the Tianshan Mountains. [J]. Acta Geographica Sinica, 57(5): 561-568.]
- 方创林, 宋吉涛, 张蔷, 等. 2005. 中国城市群结构体系的组成与空间分异格局[J]. 地理学报, 60(5): 827-840. [Fang C L, Song J T, Zhang Q, et al. 2005. The formation, development and spatial heterogeneity patterns for the structures system of urban agglomerations in China[J]. Acta Geographica Sinica, 60(5): 827-840.]
- 宋吉涛, 方创林, 宋敦江. 2006. 中国城市群空间结构的稳定性分析[J]. 地理学报, 61(12): 1311-1325. [Song J T, Fang C L, Song D J. 2006. Spatial structure stability of urban agglomerations in China[J]. Acta Geographica Sinica, 61(12): 1311-1325.]
- 全川, 董艳. 2007. 城市生态系统土壤碳库特征[J]. 生态学杂志, 26(10): 1616-1621. [Tong C, Dong Y. 2007. Characteristics of soil carbon pool in -urban ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 26(10): 1616-1621.]
- 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 2000. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 55(5): 533-544. [Wang S Q, Zhou C H, Li K R, et al. 2000. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in china[J]. Acta Geographica Sinica, 55(5): 533-544.]
- 文启孝. 1984. 土壤有机质研究方法[M]. 北京: 农业出版社: 316-318. [Wen Q X. Study methods of soil organic matter [M]. Beijing, China: Agriculture Press, 1984: 316-318.]
- 吴世新, 周可法, 刘朝霞, 等. 2005. 新疆地区近10年来土地利用变化时空特征与动因分析[J]. 干旱区地理, 28(1): 52-58. [Wu S X, Zhou K F, Liu Z X, et al. 2005. Study on the temporal and spatial dynamic changes of land use and driving forces analyses of Xinjiang in recent 10 years[J]. Arid Land Geography, 28(1): 52-58.]
- 新疆维吾尔自治区农业厅. 1996. 新疆土壤[M]. 北京: 科学出版社. [Agriculture Bureau of Uygur Autonomous region of Xinjiang. 1996. Soil in Xinjiang[M]. Beijing: Science Press.]
- 新疆维吾尔自治区统计局. 2013. 新疆统计年鉴[M]. 北京,

- 中国统计出版社. [Statistics Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 2013. Xinjiang Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press.]
- 杨金玲, 张甘霖. 2007. 城市功能区、植被类型和利用年限对土壤压实的影响[J]. 土壤, 39(2): 263-269. [Yang J L, Zhang G L. 2007. Effects of function zone, vegetation type and land use age on soil compaction in urban Nanjing[J]. Soils, 39(2): 263-269.]
- 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 2005. 基于 1:100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究[J]. 应用生态学报, 16(12): 2279-2283. [Yu D S, Shi X Z, Sun W X, et al. 2005. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:100000 soil database[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 16(12): 2279-2283.]
- Bai X M. 2014. Realizing China's urban dream[J]. Nature, 509: 423-423.
- Bell M J, Worral F, Smith P, et al. 2011. UK land-use change and its impact on SOC: 1925-2007[J]. Global Biogeochemical Cycles, 25(4): GB4015.
- Bengston D N, Potts R S, Fan D P, et al. 2005. An analysis of the public discourse about urban sprawl in the United States: monitoring concern about a major threat to forests [J]. Forest Policy and Economics, 7(5): 745-756.
- Bierwagen B G, Theobald D M, Pyke C R, et al. 2010. National housing and impervious surface scenarios for integrated climate impact assessments[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107(49): 20887-20892.
- Cannell M G R, Milne R, Hargreaves K J, et al. 1999. National inventories of terrestrial carbon sources and sinks: the UK experience[J]. Climatic Change, 42(3): 505-530.
- Churkina G. 2008. Modeling the carbon cycle of urban systems [J]. Ecological Modelling, 216(2): 107-113.
- Edmondson J L, Davies Z G, McHugh N, et al. 2012. Organic carbon hidden in urban ecosystems[J]. Scientific Reports 2, doi: 10.1038/srep00963.
- Eigenbrod F, Bell V A, Davies H N, et al. 2011. The impact of projected increases in urbanization on ecosystem services [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 278: 3201-3208.
- Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. 2008. Global change and the ecology of cities[J]. Science, 319: 756-760.
- Grimm N B, Foster D, Groffman P, et al. 2008. The changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 6(5): 264-272.
- Hardin P J, Jensen R R. 2007. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: A Terre Haute case study[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 6(2): 63-72.
- Jobbágy E G, Jackson R B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 10(2): 423-436.
- Kaye J P, Majumdar A, Gries C, et al. 2008. Hierarchical Bayesian scaling of soil properties across urban, agricultural, and desert ecosystems[J]. Ecological Applications, 18(1): 132-145.
- Kuang W H, Liu J Y, Zhang Z X, et al. 2013. Spatiotemporal dynamics of impervious surface areas across China during the early 21st century[J]. Chinese Science Bulletin, 58(14): 1691-1701.
- Laurance W F, Clements G R, Sloan S, et al. 2014. A global strategy for road building[J]. Nature, 514: 262-262.
- Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. 2010. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century[J]. Journal of Geographical Sciences, 20(4): 483-494.
- Lorenz K, Kandeler E. 2006. Microbial biomass and activities in urban soils in two consecutive years[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 169(6): 799-808.
- Lu D S, Weng Q H. 2004. Spectral mixture analysis of the urban landscape in Indianapolis with landsat ETM plus imagery[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 70(9): 1053-1062.
- Montague T, Kjelgren R. 2004. Energy balance of six common landscape surfaces and the influence of surface properties on gas exchange of four containerized tree species[J]. Scientia Horticulturae, 100(1-4): 229-249.
- Pataki D E, Alig R J, Fung A S, et al. 2006. Urban ecosystems and the North American carbon cycle[J]. Global Change Biology, 12(11): 2092-2102.
- Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M, et al. 2008. Urban ecological systems: linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas [C]//Marzluff J, Shulenberg E, Endlicher W, et al. Urban Ecology. New York: Springer.
- Pouyat R V, Yesilonis I D, Nowak D J. 2006. Carbon storage by urban soils in the United States[J]. Journal of Environmental Quality, 35(4): 1566-1575.
- Raciti S M, Hutyra L R, Finzi A C. 2012. Depleted soil carbon and nitrogen pools beneath impervious surfaces[J]. Environmental Pollution, 164: 248-251.
- Ridd M K. 1995. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities[J]. International Journal of Remote Sensing, 16(12): 2165-2185.
- Scalenghe R, Marsan F A. 2009. The anthropogenic sealing of

- soils in urban areas[J]. *Landscape and Urban Planning*, 90 (1-2): 1-10.
- Schaldach R, Alcamo J. 2007. Simulating the effects of urbanization, afforestation and cropland abandonment on a regional carbon balance: a case study for central Germany [J]. *Regional Environmental Change*, 7(3): 137-148.
- Svirejeva-Hopkins A, Schellnhuber H J, Pomaz V L. 2004. Urbanised territories as a specific component of the global carbon cycle[J]. *Ecological Modelling*, 173(2-3): 295-312.
- Tomlinson R W, Milne R M. 2006. Soil carbon stocks and land cover in northern Ireland from 1939 to 2000[J]. *Applied Geography*, 26(1): 18-39.
- Wei Z Q, Wu S H, Zhou S L, et al. 2014. Soil organic carbon transformation and related properties in urban soil under impervious surfaces[J]. *Pedosphere*, 24(1): 56-64.
- Wu H B, Guo Z T, Peng C H. 2003. Distribution and storage of soil organic carbon in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2): 1-6.
- Xu H Q, Lin D f, Tang F. 2013. The impact of impervious surface development on land surface temperature in a subtropical city: Xiamen, China[J]. *International Journal of Climatology*, 33(8): 1873-1883.

Organic carbon characteristics of soils beneath urban impervious surface in northern Tianshan urban cluster

YAN Yan^{1,2}, ZHANG Chi^{1,3*}, KUANG Wenhui⁴, LUO Geping¹, CHEN Chunbo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Central Arizona-Phoenix Long-Term Ecological Research, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, the United States; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Existence of impervious surface areas (ISA) in cities strongly influences the physical and chemical characteristics of regional soil, therefore, has profound impact on ecosystem carbon cycle at multiple scales. However, due to the inaccessibility of soil sample beneath urban ISA, we know little about the biochemical properties and distribution pattern as well as the importance of soil organic carbon under urban ISA (SOC_{ISA}). To clarify this issue, 100-cm-depth soil profiles from 27 paired ISA and pervious surface areas (PSA) sites in northern Tianshan urban cluster in a dryland environment of northwestern China were taken. In order to estimate total soil carbon storage, urban land cover was retrieved from cloud-free Landsat8 images. Based on the data of land cover area and SOC, the soil carbon storage of this urban cluster was calculated. (1) averaged 100-cm-depth SOC_{ISA} of the northern Tianshan urban cluster is $5.74 \pm 0.39 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$, which is significantly lower than the paired soil organic carbon of PSA (SOC_{PSA}) of $8.69 \pm 0.75 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$, about 52% of the latter ($p < 0.01$); averaged soil bulk density (BD) under ISA $\text{BD}_{\text{ISA}} = 1.58 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, which is significantly higher than its paired BD of PSA of $1.51 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, about 5% of the latter ($p < 0.01$). (2) SOC and BD of both ISA and PSA declines with depth. The results of linear fitting between SOC, BD, and depth show that SOC_{ISA} and BD_{ISA} have significantly declining trends, however, SOC_{PSA} and BD_{PSA} does not show such clear trend. In addition, SOC_{PSA} at the 60~100 cm soil layers is significantly higher than SOC_{ISA} but there is no stable correlation between them. (3) Carbon storage hidden under ISA of northern Tianshan urban cluster is 68% of the total urban carbon storage and for individual cities this percentage is higher than 50%, therefore, SOC_{ISA} is the main part of the urban SOC storage. By revealing the SOC_{ISA} and its distribution, this study can facilitate the understanding of biochemical characteristics of soils beneath urban ISA, which is significance for estimating carbon cycling in both urban and global ecosystems.

Key words: impervious surface areas; soil organic carbon; bulk density; northern Tianshan urban cluster; dryland