

# 西安市城区表层土壤碳储量与分布特征

段保正, 石辉, 魏小芳, 李余, 蒋子银, 陈越浦

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** [目的] 研究城市的土壤碳储量与分布特征, 为进一步认识城市碳固定和碳循环提供科学依据。[方法] 采集西安市绕城高速内不同土地利用/功能区表层土壤样品 230 个(0—20 cm), 利用 Vario EL III 元素分析仪进行有机碳分析。[结果] 西安市城区表层土壤有机碳在 0.88~27.18 g/kg 之间, 均值为 5.59 g/kg; 碳密度 0.22~7.11 kg/m<sup>2</sup>, 均值为 1.41 kg/m<sup>2</sup>; 在西安市城区表层土壤总储碳量为 6.32×10<sup>5</sup> t, 平均每 1 km<sup>2</sup> 的土壤碳储量为 1.37×10<sup>3</sup> t。风景休闲区和交通区是城区土壤有机碳含量较高的区域, 而工业区有机碳含量较低。在空间上, 以中心城区形成一个南北带状分布的有机碳高值区。[结论] 西安市城区的这种有机碳分布模式, 与城市化前的土壤利用、城市绿地管理, 食物与燃料的残余物、各种废水等大量生活垃圾进入土壤有关。交通道路的有机碳含量也受到汽车尾气排放的黑炭沉降影响。整体上, 西安市城区有机碳显著低于国内其它城市的有机碳含量。

**关键词:** 城市土壤; 土壤表层碳含量; 土壤表层碳密度

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)06-0293-05

**中图分类号:** S153.6, X171.1

**文献参数:** 段保正, 石辉, 魏小芳, 等. 西安市城区表层土壤碳储量与分布特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6):293-297. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.049

## Surface Soil Carbon Storage and Distribution in Xi'an City

DUAN Baozheng, SHI Hui, WEI Xiaofang, LI Yu, JIANG Ziyin, CHEN Yuepu

(School of Environmental and Municipal Engineerings, Xi'an University of Architecture and Tecnolgy, The Key Labatory of Environmental Engineering, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

**Abstract:** [Objective] With the development of urbanization, a large number of natural lands or agricultural lands are changed into urban land, which bring about dramatic changes in soil carbon stocks. It has an important significance for understanding of urban soil carbon pools and the response to global change to research the soil carbon storage in city area. [Methods] The inner Xi'an beltway area was selected as research range, where the soil carbon pool was researched. Total 230 surface soil samples under different land uses/functions were collected, and soil organic carbon of each sample was analyzed by Vario EL III elementer. [Results] The soil organic carbon ranged 0.88~27.18 g/kg with a mean of 5.59 g/kg; and the organic carbon density was 0.22~7.11 kg/m<sup>2</sup> with a mean of 1.41 kg/m<sup>2</sup>. The total carbon storage was 6.32×10<sup>5</sup> t in the city area of inner Xi'an beltway, the average per square kilometer was 1.37×10<sup>3</sup> t. The scenic recreation and traffic area were the regions with high soil organic carbon content, and the industrial zone was relatively lower. A north-south strip of high soil organic carbon with city center as concentrated core was recognized. [Conclusion] The soil organic carbon distribution pattern of Xi'an City maybe relate to some indices prior to urbanization, as soil use, green management, garbage of food and fuel residues and waste water into the soil. The organic carbon content near traffic road was affected by black carbon settlement from vehicle exhaust emissions. The overall topsoil organic carbon content of Xi'an urban was significantly lower than that of other domestic cities.

**Keywords:** urban soil; contents of soil carbon in topsoil; densities of soil carbon in topsoil

收稿日期:2016-05-05

修回日期:2016-06-11

资助项目:陕西省自然科学重点项目“城市生态系统中碳库特征及其演变规律对城市扩张的响应”(2014JZ011)

第一作者:段保正(1990—),男(汉族),湖南省株洲市人,硕士研究生,研究方向为城市环境生态。E-mail:dbaozheng@163.com。

通讯作者:石辉(1968—),男(汉族),陕西省眉县人,博士,教授,主要从事环境生态方面的研究。E-mail:shihui06@126.com。

城市化进程是 20 世纪世界发展最重要的特征之一,在这段时间内世界城市人口数量增长了 10 倍,城市人口比例也从 14% 上升到 50% 以上;预计到 2030 年,世界上将有超过 60% 的人口居住在城市中。中国至 2000 年城市人口的比例已达 36.2%,145 个大中城市的建设用地面积扩张了 39.8%,城镇用地的空间拓展将日益成为现在及未来几十年中国土地利用变化的主要特征<sup>[1]</sup>。随着经济的快速发展,城市化进程的加快,城市区域内人类活动不同的土地利用方式导致了土壤碳储量和碳通量的变化,从而进一步影响着人类生活的环境<sup>[2]</sup>。

城市土壤是一种重要的城市碳库。Jo 和 McPherson<sup>[3]</sup> 的研究表明,在芝加哥的住宅区,住宅绿地土壤固定的碳占到全部固定量的 78.7%~88.7%;Pouyat 等<sup>[4]</sup> 发现住宅区土壤碳贮量可以高达  $15.2 \pm 1.2 \text{ kg/m}^2$ 。在城市天然或受人为活动影响的土壤中,碳的贮存量每  $1 \text{ hm}^2$  可达 31.6 t,是地上植被碳贮量的 1.2 倍<sup>[5]</sup>。在区域尺度上,Pouyat 等<sup>[6]</sup> 发现城市土壤具有很强的固定有机碳的能力,特别是住宅区由于投入增加和人为活动的减少能贮存更多的碳;同时区域土地利用和分布的不同,导致碳贮存的空间变异。Churkina<sup>[7]</sup> 估算出美国城市和郊区的人类居住区中土壤有机碳密度值在  $23 \sim 42 \text{ kg/m}^2$ ,高于典型的热带雨林,并且城市的总碳贮存量占全美国陆地的碳储量的 10%。

在中国,城市土壤碳储量也受到了广泛的关注,杭州<sup>[8]</sup>、上海<sup>[9]</sup>、武汉<sup>[10]</sup>、开封<sup>[11]</sup>、北京<sup>[12]</sup>、南京<sup>[13]</sup>、福州<sup>[14]</sup> 和沈阳<sup>[15]</sup> 等城市的土壤有机碳含量和密度被研究,表现出不同的气候环境、城市不同土地利用的差异。说明了自然因素与人为因素均对城市土壤碳储量有重要影响<sup>[16]</sup>。虽然有关城市土壤碳固定进行了一些研究,但在不同气候带的城市分布不均,对

于半湿润半干旱气候下的城市土壤碳固定研究不足。西安市作为这一气候下的典型城市,近年城市扩张十分迅速,年增长率达到百分之十几以上,研究西安市城市土壤的碳库特征,可为进一步认识城市碳固定和碳循环提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 样品采集

西安市属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季冷暖干湿分明,春季升温迅速,干燥多风;夏季炎热高温,日照强烈;秋季凉爽湿润,时有阴雨;冬季寒冷干燥,雨雪偏少。年无霜期 226 d,年平均气温  $13.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,市区年平均降水量为 584.9 mm,年平均湿度 69.6%。由于在城市中,人类活动方式和强度明显的差异使得土地利用形式和土壤碳的积累程度不一;因此根据西安市实际情况,将土地利用化为风景休闲区、交通区、工业区、文教区、居民/行政区、商业区 6 个类型,以西安市绕城以内为主体,采集土壤表层样品。

由于西安市城区东西方向长、南北方向相对较短,采样时采用  $2 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  的网格,根据网格内主要的土地利用方式进行土样的功能分区。选定样点之后,在样点周边 5 m 的范围内分别采集 3 个 0—20 cm 的样品,形成 1 个混合样,通过四分法保留土壤样品重约 1 kg 左右,用于表征相应功能区的土壤特征。共采集混合样品 230 个,覆盖西安整个城区的各种土地利用模式。由于城市土壤中的侵入体较多,且土壤容重的变异较小,在每个功能区内分别采集 8 个样点的容重样品,每个样点在其周边 5 m 的范围内分别采集 3 个直径 5 cm 的环刀样,其均值作为这个样点的容重。6 个功能区共有 48 个样点的容重数据。各种类型土壤样品采集情况详见表 1。

表 1 西安城市不同功能区土壤表层碳含量和土壤容重

功能分区	土壤有机碳/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			土壤容重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )		
	样本数量	范围	均值	样本数量	范围	均值
风景休闲区	43	2.26~20.74	7.77	8	1.23~1.34	1.28
交通区	94	2.12~27.18	7.16	8	1.04~1.64	1.32
居民/行政区	31	2.16~9.74	4.87	8	1.18~1.38	1.29
文教区	34	0.88~7.74	4.68	8	1.10~1.30	1.22
商业区	12	2.38~8.02	4.63	8	1.30~1.52	1.39
工业区	16	1.42~11.94	4.45	8	1.00~1.23	1.12
合计/均值	230	1.87~14.23	5.59	48	1.14~1.40	1.27

## 1.2 样品处理和分析

土壤样品带回实验室,拣除砾石和根系后,置于通风阴凉干燥的环境下室内风干;然后土壤过 2 mm 筛备用。有机碳的含量采用德国 Elementar 公司的 Vario EL III 元素分析仪测定。将过 2 mm 筛的土壤样品称取 5 g,研磨过 0.25 mm 的尼龙筛,准确称取 50.0 mg 土壤样品锡箔纸包裹,送入仪器测定,燃烧管的温度为 950 ℃。每个样品分析重复 3 次。

## 1.3 计算方法

单位土壤碳含量和碳密度的计算公式为:

$$p = \text{SOC} \cdot \rho \cdot D$$

式中:  $p$ ——单位面积土壤碳密度 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  
SOC——表层土壤全碳含量 ( $\text{g}/\text{kg}$ );  $D$ ——采样深度 (0.2 m);  $\rho$ ——土壤容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

## 2 结果分析

### 2.1 城市土壤有机碳含量的总体特征

通过对 230 个样本的分析,西安城市土壤有机碳的范围在 0.88~27.18  $\text{g}/\text{kg}$  之间,均值为 5.59  $\text{g}/\text{kg}$ ,中位数为 4.97,标准差为 4.35,变异系数为 56.5%;偏度系数 1.98 表现为右偏分布;峰度为 5.03,表现为陡峭的尖顶峰(表 2)。

表 2 西安城市不同功能区土壤有机碳含量的整体分布特征

有机碳含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	<2	2~4	4~6	6~8	8~10	10~12	12~14
分布频次	19	96	90	32	30	16	8
有机碳含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	14~16	16~18	18~20	20~22	22~24	24~26	26~28
分布频次	5	2	3	2	1	1	1

### 2.2 不同功能区的有机碳含量

按照功能分区,西安市城区不同功能区土壤有机碳含量具有显著的差异 ( $p=0.001$ );其中风景区和道路交通区的有机碳分别为 7.77 和 7.16  $\text{g}/\text{kg}$ ,工业区、居住区、文教区、商业区的有机碳分别为 4.87, 4.68, 4.63 和 4.45  $\text{g}/\text{kg}$ ,风景区和道路交通区显著高于其余的功能区 ( $p=0.001$ )(图 1)。

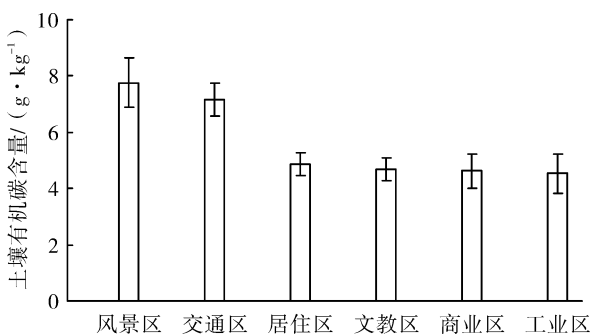


图 1 不同功能区表层土壤有机碳含量

### 2.3 不同功能区土壤的有机碳密度

土壤的有机碳密度受到有机碳含量和土壤容重的影响。不同功能区的土壤容重在 1.00~1.64  $\text{g}/\text{cm}^3$  之间;平均而言,以商业区和交通区的容重较大,达到 1.30  $\text{g}/\text{cm}^3$  以上,工业区的容重较小,主要原因是土壤样品采集主要在工业绿化场地进行。根据不同功能区有机碳含量和容重结果,得到土壤表层碳密度变

化范围为 0.22~7.11  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;平均有机碳密度的大小依次为风景休闲区、交通区、商业区、居民区、文教区和工业区,分别为 1.99, 1.89, 1.29, 1.26, 1.14, 1.00  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;也表现出风景区、交通区与其余功能区之间的显著差异 ( $p=0.001$ )。

### 2.4 西安市城区土壤有机碳储量

西安市建成区面积为 500  $\text{km}^2$  多,绕成高速以内的面积为 460  $\text{km}^2$ ,绕城高速围绕范围内的碳储量基本可以代表城区的碳储量。根据土壤碳密度含量,将该区域分为 0~1.02  $\text{kg}/\text{m}^2$ , 1.03~2.03  $\text{kg}/\text{m}^2$ , 2.04~3.05  $\text{kg}/\text{m}^2$ , 3.06~4.06  $\text{kg}/\text{m}^2$ , 4.07~5.08  $\text{kg}/\text{m}^2$ , 5.09~6.09  $\text{kg}/\text{m}^2$  和 6.10~7.11  $\text{kg}/\text{m}^2$  共 7 个等级,根据每个等级的面积和其平均碳密度计算整个区域的碳储量。在西安市城区,表层土壤碳储量约为  $6.32 \times 10^5 \text{ t}$ ,平均每 1  $\text{km}^2$  的土壤碳储量为  $1.37 \times 10^3 \text{ t}$ 。其中碳密度为 0~1.02  $\text{kg}/\text{m}^2$  等级的占总面积的 49.07%,土壤储碳  $1.15 \times 10^5 \text{ t}$ ;碳密度为 1.03~2.03  $\text{kg}/\text{m}^2$  等级的占总面积的 32.22%,土壤储碳  $2.27 \times 10^5 \text{ t}$ ;碳密度为 2.04~3.05  $\text{kg}/\text{m}^2$  等级的占总面积的 11.23%,土壤储碳  $1.32 \times 10^5 \text{ t}$ ;这 3 个等级决定了西安市城区土壤碳储量的近 75%。碳密度最高的 6.10~7.11  $\text{kg}/\text{m}^2$  等级,由于所占面积较小,因此对西安市城区总体碳储量影响较小(表 3)。

表 3 西安市绕城高速内城区表层土壤碳密度的分布

有机碳等级	有机碳范围/(kg·m <sup>-2</sup> )	面积/km <sup>2</sup>	面积比例/%	碳储量/t	碳储量比例/%
I	0~1.02	225.84	49.07	1.15×10 <sup>5</sup>	18.20
II	1.03~2.03	148.31	32.22	2.27×10 <sup>5</sup>	35.92
III	2.04~3.05	51.71	11.23	1.32×10 <sup>5</sup>	20.89
IV	3.06~4.06	12.90	2.80	4.6×10 <sup>4</sup>	7.28
V	4.07~5.08	10.78	2.34	4.9×10 <sup>4</sup>	7.75
VI	5.09~6.09	8.32	1.82	4.7×10 <sup>4</sup>	7.43
VII	6.10~7.11	2.40	0.52	1.6×10 <sup>4</sup>	2.53
合计	—	460.26	100	6.32×10 <sup>5</sup>	100

### 3 讨论

西安市城区土壤的有机碳在 0.88~27.18 g/kg 之间,平均值为 5.59 g/kg,大多数样点的碳含量与周边主要农业土壤的有机碳含量 4~10.2 g/kg 几乎一致<sup>[17]</sup>,说明了西安城市土壤的有机碳含量主要受到自然背景土壤碳含量的影响。但对于不同的功能区,风景区和交通区高的碳含量可能与管理、人为活动和交通污染有关。在风景区,由于施肥、灌溉等管理措施,以及较少的人为踩踏等因素,植被生长良好、有机物积累较多,土壤中积累了相对较多的有机碳。而以交通道路绿地为主的交通区高的有机碳含量,可能由于高的车流量而引起的汽车尾气固体悬浮微粒的沉降有关。章明奎和周翠<sup>[12]</sup>在杭州的研究也发现城市土壤的有机物质包含较多的黑碳。将西安的城市土壤有机碳含量与国内别的城市相比(表 4),发现不同城市土壤的碳含量存在显著的差异。开封、杭州、南京、福州和沈阳等城市城区的土壤碳含量远远高于西安市城区的碳含量,而北京城区的与西安相当,上海的远远低于西安。从功能分区来看,整体也表现出休闲风景区和交通区的碳含量高的趋势。出现这种趋势的原因,可能与城市的所在的地理位

置、气候、原始的背景土壤以及城市历史和管理有关。

城市土壤是在自然土壤利用基础上,在城市化过程中受人类活动影响而形成的一种特殊土壤,缺少自然剖面、新浸入体多、结构比较差、污染严重<sup>[18]</sup>。城市土壤中有机碳的积累显然与这种特殊的环境和有机碳来源有关。城市土壤的有机碳大多来源于转变为城市用地之前的土壤,由于城市土壤较为坚实、不以生产为目的,土壤有机碳分解较慢、消耗较少,反而促进了土壤有机碳的积累。调查还发现,在以钟楼为中心的人口密集南北带状区域是西安城市土壤有机碳储量的高值区,其形成的原因可能在于绿地管理投入增加和人为活动的减少;包括食物、燃料的残余物、各种废水等大量生活垃圾进入了这些出露面极少的城市土壤而致。自然土地利用转变为城市土地利用是城市化不可避免的过程,这一过程通过物理扰动、土壤封闭和各种人为活动物质的加入改变了自然土壤;直接影响是在土壤发育过程中形成新的母质,间接影响是城市化改变了土壤的生物非生物环境,从而影响了土壤的发育。对于城市土壤这种可逆或不可逆演变的变化研究,是认识城市生态系统对快速城市响应机制的基础,也是提高城市应对全球气候变化能力需要亟待解决的问题。

表 4 西安城市土壤有机碳含量相关城市比较

城市	风景休闲区	交通区	工业区	文教区	居民/行政区	商业区	平均
杭州 <sup>[8]</sup>	30.8	—	21.7	19.5	16.2	17.3	22.50
上海 <sup>[9]</sup>	—	—	—	—	—	—	2.72
武汉 <sup>[10]</sup>	—	—	—	—	—	—	4.16
开封 <sup>[11]</sup>	26.56	20.73	28.13	17.11	14.65	—	21.43
北京 <sup>[12]</sup>	—	—	—	—	—	—	5.12
南京 <sup>[13]</sup>	10.05	29.09	—	17	11.19	—	15.31
福州 <sup>[14]</sup>	18.02	—	26.06	—	22.21	30.03	23.75
沈阳 <sup>[15]</sup>	—	—	—	—	—	—	19.29
西安	7.77	7.16	4.45	4.68	4.87	4.63	5.59

## 4 结论

(1) 西安市城区表层土壤有机碳在 0.88~27.18 g/kg 之间,均值为 5.59 g/kg;表层碳密度 0.22~7.11 kg/m<sup>2</sup>,均值为 1.41 kg/m<sup>2</sup>。在城区各种功能土地利用中,风景休闲区和交通区的有机碳含量与碳密度较高,分别为 7.77, 7.16 和 1.99, 1.89 kg/m<sup>2</sup>,以工业用地土壤中的有机碳最低。交通区表层土壤有机碳含量高的原因可能与汽车尾气排放的黑炭沉降有关。

(2) 以绕城高速内区域为代表的西安市城区表层土壤总储碳量为 6.32×10<sup>5</sup>t,平均每 1 km<sup>2</sup>的土壤碳储量为 1.37×10<sup>3</sup>t。城区表层土壤有机碳储量在空间上分布不均,在中心城区形成一个南北带状分布的高值区,其形成的原因可能在于绿地管理投入增加和人为活动的减少;包括食物、燃料的残余物、各种废水等大量生活垃圾进入了这些出露面极少的城市土壤而致。

(3) 西安市城区有机碳显著低于国内其他城市的有机碳含量,可能与城市所在的地理位置、气候、原始的背景土壤以及城市历史和管理有关。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 谈明洪,李秀彬,吕昌河. 20世纪90年代中国大中城市建设用地扩张及其对耕地的占用[J]. 中国科学(D):地球科学,2004,34(12):1157-1165.
- [2] Churkina G. Modeling the carbon cycle of urban systems[J]. Ecological Modelling, 2008,216(2):107-113.
- [3] Jo H K, McPherson G E. Carbon Storage and flux in urban residential greenspace[J]. Journal of Environmental Management, 1995,45(2):109-133.
- [4] Pouyat R V, Effland W R. The investigation and classification of humanly modified soils in the Baltimore ecosystem study[C]//Kimble J M, Ahrens R J, & Bryant R B, Eds. Classification, Correlation, and Management of Anthropogenic Soils. Lincoln, NE: USDA-NRCS, National Soil Survey Center, Nevada and California, 1999:141-154.
- [5] Jo H J. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea[J]. Journal of Environmental Management, 2002,64(2):115-126.
- [6] Pouyat R V, Yesilonis I D, Nowak D J. Carbon storage by urban soils in the United States[J]. Journal of Environmental Quality, 2006,35(4):1566-1575.
- [7] Churkina G, Brown D G, Keoleian G. Carbon stored in human settlements: The conterminous united states[J]. Global Change Biology, 2010,16(1):135-143.
- [8] 章明奎,周翠. 杭州市城市土壤有机碳的积累和特性[J]. 土壤通报,2006,37(1):19-21.
- [9] 史利江,郑丽波,梅雪英,等. 上海市不同土地利用方式下的土壤碳氮特征[J]. 应用生态学报,2010,21(9):2279-2287.
- [10] 谢双玉,王亚玲,黄涛,等. 武汉市主城区土地利用/覆被变化及其对土壤有机碳储量的影响[J]. 华中师范大学学报,2014,48(3):442-447.
- [11] 孙艳丽,马建华,李灿,等. 开封市不同功能区城市土壤有机碳含量与密度分析[J]. 地理科学,2009,29(1):124-128.
- [12] 罗上华,毛齐正,马克明,等. 北京城市绿地表层土壤碳氮分布特征[J]. 生态学报,2014,34(20):6011-6019.
- [13] 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[J]. 土壤学报,2006,43(2):177-181.
- [14] 邱敏. 福州市不同功能区土壤有机碳和黑碳的对比研究[D]. 福建 福州:福建师范大学,2009.
- [15] 王秋兵,段迎秋,魏忠义,等. 沈阳市城市土壤有机碳空间变异特征研究[J]. 土壤通报,2009,40(2):252-257.
- [16] 罗上华,毛齐正,马克明,等. 城市土壤碳循环与碳固持研究综述[J]. 生态学报,2012,32(22):7177-7188.
- [17] 陕西省土壤普查办公室. 陕西 土壤[M]. 北京:科学出版社,1992:91-110.
- [18] 石辉. 城市环境学[M]. 陕西 西安:陕西科学技术出版社,2010:95-111.