

DOI: 10.5846/stxb201404200775

王曦, 杨靖宇, 俞元春, 侯文军, 侯也, 余健, 王如海. 不同功能区城市林业土壤黑碳含量及来源——以南京市为例. 生态学报, 2016, 36(3):

Wang X, Yang J Y, Yu Y C, Hou W J, Hou Y, Yu J, Wang R H. Concentration and sources of black carbon in urban forest soils in different functional areas of Nanjing, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3):

## 不同功能区城市林业土壤黑碳含量及来源 ——以南京市为例

王曦<sup>1,2,3</sup>, 杨靖宇<sup>1,2</sup>, 俞元春<sup>1,2,3,\*</sup>, 侯文军<sup>1</sup>, 侯也<sup>2</sup>, 余健<sup>4</sup>, 王如海<sup>1,3</sup>

1 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

2 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037

3 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008

4 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241003

**摘要:** 由于城市化过程中人为活动的影响, 城市林业土壤的性质发生了很大变化。城市林业土壤黑碳由于来源的多样性和受到人为活动的影响, 其分布表现出独特的特征。本研究以南京市为对象, 调查分析了不同功能区城市林业土壤黑碳的含量及可能来源。结果表明: 不同功能区城市林业土壤黑碳含量差异很大, 其变幅为 0.77—21.27 g/kg。道路绿化带土壤黑碳含量显著高于其它功能区, 居民区含量最低。黑碳在土壤表层中含量均高于表下层, 黑碳富集于土壤表层。道路绿化带表层土壤黑碳含量与有机碳含量的比值 (BC/SOC) 为 0.55, 土壤黑碳的碳同位素比值 ( $\delta^{13}C_{PDB}$ ) 为 -27.04‰, 与其它功能区差异显著, 城市交通污染对土壤黑碳积累产生强烈影响。

**关键词:** 城市林业土壤; 黑碳; 含量; 来源; 南京市

## Concentration and sources of black carbon in urban forest soils in different functional areas of Nanjing, China

WANG Xi<sup>1,2,3</sup>, YANG Jingyu<sup>1,2</sup>, YU Yuan Chun<sup>1,2,3,\*</sup>, HOU Wenjun<sup>1</sup>, HOU Ye<sup>2</sup>, YU Jian<sup>4</sup>, WANG Ruhai<sup>1,3</sup>

1 Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2 College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture; Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

4 College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

**Abstract:** Properties of soils in urban forests have been greatly altered by human activities during the process of urbanization. The distribution of black carbon in urban forest soils shows large variation resulting from its diverse origins and as a result of human activities. The concentrations and the potential origins of black carbon in urban forest soils from different functional areas were studied. Concentrations of black carbon in urban forest soils in different functional areas varied significantly, from 0.77 g/kg to 21.27 g/kg. The concentrations of black carbon in road side green belts soils were significantly higher than those in soils of other functional areas. Residential areas had the lowest concentrations of soil black carbon. The concentrations of black carbon in surface soil (0—10 cm) were higher than those in subsurface soil (10—30 cm) and black carbon was enriched in surface soil. The ratio of black carbon to organic carbon (BC/SOC) in road green

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (31270664, 41101529); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20123204110004); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (CXZZ13\_0533); 国家级、省级大学生创新创业训练计划项目 (201310298001Z); 江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD)

**收稿日期:** 2014-04-20; **网络出版日期:** 2015-

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ycyu@njfu.edu.cn

belt surface soils was 0.55. In roadside green belts areas, the carbon isotope ratio of soil black carbon ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ) was  $-27.04\text{‰}$ , which is significantly different than that of other functional areas. These results indicate that the accumulation of black carbon in urban forest soils is strongly influenced by traffic pollution.

**Key Words:** urban forest soil; black carbon; content; origin; Nanjing

城市林业土壤是指分布在城市不同功能区域的公共绿地以及郊区的森林、农田等组成的自然绿地上的土壤,是支撑城市发展的空间和基础<sup>[1]</sup>。城市林业土壤受人为扰动大,其物理、化学和生物

学特性与自然土壤相比有很大的不同,城市林业土壤碳库的含量、组成分布及演化特征也随城市化

进程的快速发展表现出其特有的规律。目前针对城市土壤碳库中有机碳的研究已有较多成果,而对黑碳(Black carbon, BC)的研究尚未受到重视,相关的报道较少。黑碳是生物质和化石燃料不完全燃烧的产物<sup>[2]</sup>,具有生物化学和热稳定性,广泛分布于大气、土壤、沉积物、水体和冰雪等环境中<sup>[3]</sup>。在城市中,化石燃料的使用和生活垃圾的燃烧都相对比较集中,并产生了规模可观的黑碳类物质。这些黑碳类物质在水体、土壤和大气中均有分布,其中的大部分最终沉积在土壤中。黑碳作为一种人为活动的排放产物,包含了有关人类活动的记录,在生态系统中所起的作用十分复杂,正面和负面效应兼而有之。由黑碳形成的气溶胶是导致全球升温效应的大气成分中占第二位权重的物质<sup>[4-5]</sup>,同时也是多种空气污染物( $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$ 、PAHs 等)的吸附载体及光化学烟雾的催化中心<sup>[6]</sup>。黑碳具有高度的化学惰性和多孔隙性,土壤中的黑碳可稳定土壤中的有机质,优化土壤结构,显著并持续地提高土壤的耕性和保肥能力<sup>[7]</sup>。因其良好的吸附能力,黑碳还可以固定土壤中各种有机无机污染物,降低污染物的生物有效性并改良土壤生态环境<sup>[8]</sup>,但土壤中微生物转化降解有机污染物的速率也随污染物被黑碳吸附固定而降低<sup>[8]</sup>。在全球碳循环过程中黑碳也占有重要地位,有研究显示黑碳可能是全球碳循环中不能合理解释的“丢失的碳”的一部分,还可能是大气中  $\text{CO}_2$  的汇<sup>[9-10]</sup>。因此,以城市林业土壤碳库中黑碳为研究对象,揭示城市林业土壤黑碳的分布和来源,了解其在城市林业土壤中的环境行为和生态效应十分必要。本研究以城市化进程快速的南京市为例,调查分析了不同土地利用方式的都市林业土壤的黑碳含量,分析了城市林业土壤的黑碳的可能来源,为城市林业土壤生态功能评价及管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品采集

以城市化进程快速的南京市作为研究地区。南京市地处长江下游沿岸,地理坐标为北纬  $31^\circ 14' - 32^\circ 37'$ ,东经  $118^\circ 22' - 119^\circ 14'$ ,属亚热带季风气候,四季分明,雨水充沛,年降水 1106mm,年平均温度  $15.4^\circ\text{C}$ ,无霜期 237d,春季风和日丽,梅雨时节阴雨绵绵,夏季炎热,秋天干燥凉爽,冬季寒冷、干燥。地貌属宁镇扬丘陵地区,以低山缓岗为主,地带性土壤为黄棕壤。全市面积  $6587.02\text{km}^2$ ,森林覆盖率 13%,其中市区面积  $200.85\text{km}^2$ ,市区绿地覆盖率达 40% 以上。

城市林业土壤可按绿地作用和分布地点的差异分为不同的功能区。本研究以城市中出现几率较高的典型城市林业功能区为研究对象,按其地点和作用的差异将其区分为城郊天然林、城区天然林、绿地广场、公园绿地、居民住宅区、道路绿化带、学校绿地七种功能区,每种功能区选取南京市中具有典型代表性的区域进行土壤调查和样品采集。为了使样品更具有代表性,本研究选择的采样区域是有一定利用历史的城市林业土壤。由于城市林业土壤的空间变异性较大,将各功能区中具有代表性的不同样地选取为采样点,每个采样点 6 个重复,6 个重复尽量均匀地分布在采样点区域上。根据王俊霞<sup>[5]</sup>的相关研究,城市人类活动产生的黑碳沉降主要集中于公路沿线相距公路 5m—15m 范围内的绿化带土壤中,且多富集于 0—30cm 土壤中。因此选择在距离各功能区中主要公路沿线 10m 处的绿化带土壤为采样点,并在各采样点采集 0—10cm 和 10—30cm

两个层次的样品。采集到的土壤样品自然风干,剔除大于2mm的石子、根茎等杂物,过筛待用。各个功能区的具体采样地点见表1。

## 1.2 土壤样品分析

土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)含量采用外加热重铬酸钾氧化法测定<sup>[11]</sup>。其测定的基本步骤为:(1)称取0.5克左右(准确至0.0001克)过100目的风干土样;(2)准确加入5.00mL 0.8000mol/L 1/6 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>溶液和5mL浓硫酸;(3)用油浴将溶液加热至沸腾,沸腾的温度严格控制在178—182℃之间,并保持沸腾5min;(4)待溶液冷却后,将溶液洗入锥形瓶中,邻菲罗啉为指示剂,用0.2mol/L硫酸亚铁滴定,并计算其有机碳含量。

土壤中黑碳含量采用Lim等<sup>[12]</sup>介绍的方法。其测定基本步骤为:(1)称取3g左右过100目的风干土样;(2)加入15mL 3mol/L HCl除去碳酸盐,反应24h;(3)加入15mL 10mol/L HF;1mol/L HCl除去硅酸盐,反应24h;(4)加入15mL 10mol/L HCl反应,除去可能生成的CaF<sub>2</sub>,反应24h;(5)加入15mL 0.1mol/L K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>; 2mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,在55±1℃下除去易氧化的有机碳,反应60h;(6)得到的残渣即为土壤中的黑碳,离心、烘干后直接利用元素分析-同位素质谱联用仪(FLASH EA-DELTA V, Thermo Fisher, USA)测定其黑碳含量和黑碳的碳稳定同位素比值 $\delta^{13}C_{PDB}$ 。不同来源黑碳的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 比值差异较大,因此可借助样品土壤黑碳的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 比值追溯其可能来源。

## 1.3 数据统计分析方法

实验数据用Excel2010和SPSS18.0软件进行分析。

## 2 结果分析

### 2.1 城市林业土壤黑碳含量

不同功能区的城市林业土壤受人为活动影响程度不同,土壤黑碳含量不同。不同功能区城市林业土壤黑碳含量的总体特征是(图1):道路绿化带土壤黑碳含量明显高于其他功能区,公园和居民区最低,各功能区表层土壤(0—10cm)含量高于表下层(10—30cm),表层土壤黑碳含量高低依次为:道路绿化带>城区天然林>城郊天然林>学校>城市绿地广场>公园>居民区。在表下层,则表现出不同的规律,城郊天然林和城区天然林中的含量明显降低,而其它功能区表下层中的黑碳含量降低幅度较小。

### 2.2 城市林业土壤黑碳来源

#### 2.2.1 土壤BC/SOC值

BC/SOC值指土壤中黑碳与有机碳(湿烧法测定)含量之间的相对比值。各功能区中道路绿化带土壤的BC/SOC比值最大,大于0.5;城郊天然林的比值最低,约为0.2(表2)。同一功能区土壤表层和表下层土壤的BC/SOC值相差很小。

#### 2.2.2 城市林业土壤黑碳的碳同位素比值

城市林业各功能区土壤黑碳的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值如表3所示。在表层土壤中,道路绿化带土壤黑碳的<sup>13</sup>C丰度最

表1 不同功能区土壤采样点概况

Table 1 General information of research sites

功能区 Function zone	采样区域 Sampling site
道路绿化带 Road green belt	新庄立交桥
学校 School	南京林业大学
公园 Park	玄武湖公园
居民区 Residential area	锁金村小区
城市绿地广场 City green square	和平公园
城区天然林 Urban forest	紫金山
城郊天然林 Suburban forest	老山森林公园

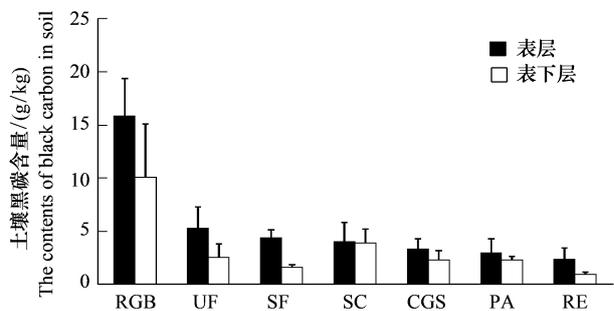


图1 不同功能区城市林业土壤黑碳含量

Fig. 1 Black carbon contents of urban forest soil in different function zones

RGB-道路绿化带;UF-城区天然林;SF-城郊天然林;SC-学校;CGS-城市绿地广场;PA-公园;RE-居民区

低,黑碳中碳元素的 $^{13}\text{C}$  贫化程度最大,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值为 $-27.04\%$ ,与其它功能区差异显著,而居民区土壤黑碳的 $^{13}\text{C}$  丰度最高,为 $-17.80\%$ 。在表下层土壤中,城区天然林土壤黑碳的 $^{13}\text{C}$  丰度最低,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值为 $-21.07\%$ ,居民区土壤黑碳的 $^{13}\text{C}$  丰度最高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值为 $-14.30\%$ 。

表 2 不同功能区城市林业土壤 BC/SOC 值

Table 2 BC/SOC values of urban forest soil in different function zones

功能区 Function zone	0—10cm		10—30cm	
	变幅 Range	均值 Average	变幅 Range	均值 Average
道路绿化带 Road green belt	0.51-0.57	0.55±0.04	0.46-0.57	0.51±0.08
公园 Park	0.35-0.45	0.41±0.07	0.41-0.52	0.44±0.07
学校 School	0.36-0.40	0.39±0.02	0.35-0.49	0.42±0.05
居民区 Residential area	0.35-0.42	0.38±0.03	0.30-0.37	0.33±0.03
城市绿地广场 City green square	0.31-0.38	0.34±0.03	0.31-0.40	0.37±0.03
城区天然林 Urban forest	0.31-0.38	0.33±0.03	0.26-0.34	0.32±0.08
城郊天然林 Suburban forest	0.20-0.22	0.21±0.01	0.16-0.24	0.20±0.03

表 3 不同功能区城市林业土壤黑碳的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值

Table 3  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  values of black carbon in different urban forest function zones

功能区 Function zone	0—10cm	10—30cm
	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\%$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\%$
道路绿化带 Road green belt	$-27.04\pm 0.78$ aA	$-16.34\pm 2.23$ cC
城区天然林 Urban forest	$-24.21\pm 1.00$ bB	$-21.07\pm 3.64$ aAB
城郊天然林 Suburban forest	$-23.00\pm 0.37$ bB	$-16.39\pm 2.23$ cC
城市绿地广场 City green square	$-22.31\pm 1.31$ bB	$-21.06\pm 1.64$ aA
学校 School	$-21.29\pm 2.49$ bB	$-20.85\pm 1.77$ abB
公园 Park	$-19.97\pm 2.03$ bB	$-19.33\pm 1.13$ bB
居民区 Residential area	$-17.80\pm 0.67$ bB	$-14.30\pm 0.20$ dD

同列不同小写字母表示  $P<0.05$  显著水平,大写字母表示  $P<0.01$  显著水平,下同。

### 3 讨论

#### 3.1 城市林业土壤黑碳含量分布规律

以往的土壤有机碳研究很少关注黑碳类物质的含量。黑碳作为人类活动的记录,在受到人为扰动的土壤中广泛存在<sup>[13]</sup>。城市林业土壤由于受到人为活动的剧烈影响,必然含有一定量的黑碳类物质。不同功能区土壤黑碳含量的方差分析表明:在表层土壤中,道路绿化带土壤中黑碳含量最高,与其它功能区的含量差异均达到极显著水平。城郊天然林和城区天然林土壤中黑碳含量也较高。居民区黑碳含量最低,与道路绿化带和城区天然林差异显著。亚表层土壤黑碳含量的分布则表现出不同的规律,在表下层土壤中,道路绿化带与其它功能区有极显著差异,而其它功能区相互之间差异均不显著。

道路绿化带由于受到城市中机动车排放的尾气影响<sup>[14-15]</sup>,土壤中的黑碳含量无论在表层还是表下层都非常高,分别为  $15.68\text{g/kg}$  和  $10.08\text{g/kg}$ ,与较低含量的居民区相比,分别是其含量的 6.8 和 10.8 倍。由于我国汽车排放的尾气中污染物浓度比国际水平高出数十倍,机动车排放污染已成为我国城市空气污染的重要来源<sup>[15]</sup>。因燃油燃烧不完全,机动车尾气中含有大量夹杂着黑碳物质的颗粒物。这些污染物中的一部分会直接落入路边的土壤中或植被上,最终向下迁移进入土壤。而另一部分粒径较小的污染物会形成气溶胶而悬浮于空气中,并通过干湿沉降进入土壤。道路绿化带土壤黑碳的高含量正是这种污染的重要标志。但这种现象也说明道路绿化带的存在降低了机动车排放的黑碳向周围区域扩散的程度。

表 4 不同功能区城市林业土壤黑碳含量方差分析

Table 4 Analytical variance of soil black carbon in different urban forest function zones

功能区 Function zone	0—10cm		10—30cm	
	变幅 Range/ (g/kg)	均值 Average/ (g/kg)	变幅 Range/ (g/kg)	均值 Average/ (g/kg)
道路绿化带 Road green belt	13.30-19.73	15.68±3.52aA	6.93-21.27	10.08±5.02aA
城区天然林 Urban forest	3.85-9.18	5.28±2.00bB	1.43-5.00	2.51±1.27bB
城郊天然林 Suburban forest	3.46-5.35	4.36±0.74bcB	1.40-1.88	1.58±0.22bB
学校 School	1.31-5.63	3.98±1.79bcB	2.15-5.89	3.86±1.31bB
城市绿地广场 City green square	2.50-4.44	3.33±0.95bcB	1.16-3.40	2.30±0.87bB
公园 Park	1.85-4.87	2.94±1.32bcB	1.77-2.61	2.27±0.35bB
居民区 Residential area	1.59-3.54	2.31±1.07cB	0.77-1.11	0.93±0.17bB

城市天然林包括城郊天然林和城区天然林中表层土壤中黑碳含量较高的原因应与其土壤中存在较多的有机碳积累有关。与表层土壤比较,城市天然林表下层土壤的黑碳含量明显降低,其它功能区表下层土壤的黑碳含量则降低幅度比较小。造成这种情况的原因应有两个,首先,黑碳不溶于任何溶剂中,因此不随土壤径流发生垂直方向上的迁移。其次,城市中各功能区的土壤常受到人为扰动,相应土层也常产生混合。在此过程中,不同土层间差异的显著性也逐渐消失。而城郊天然林和城区天然林中人类活动少,土壤受人为扰动程度小,因此黑碳物质多富集于表层土壤。

### 3.2 城市林业土壤黑碳来源分析

#### 3.2.1 土壤 BC/SOC 比值

BC/SOC 值大小在一定程度上反映了土壤的污染程度<sup>[16-17]</sup>,同时也与特定的人为活动过程相关<sup>[16]</sup>。在城市大气气溶胶里面,如果 BC/SOC 值在 0.11±0.03 附近,则认为黑碳主要来源于生物质的燃烧;BC/SOC 值为 0.5 左右时,则认为黑碳主要来源于化石燃料的燃烧<sup>[16-17]</sup>。比较不同功能区土壤的 BC/SOC 值可以发现:道路绿化带土壤不仅含有较高的黑碳含量,而且 BC/SOC 值也较高,平均值表层土壤是 0.55±0.04,表下层土壤是 0.51±0.08,反映了其来源主要是化石燃料的不完全燃烧。而受人为活动影响相对较小的城郊天然林,BC/SOC 在表层土壤是 0.21±0.01,表下层土壤是 0.20±0.03,表明黑碳的来源主要是生物质的燃烧。而城区天然林虽受人为活动影响也相对较小,但有多条公路贯穿林带,导致此功能区中部分地区土壤的黑碳输入来源相对于城郊天然林更复杂,黑碳的含量随之增大,BC/SOC 值也产生偏离,达到 0.3 左右。其它功能区的情况更为复杂,化石燃料的燃烧和生物质的燃烧均是其黑碳物质的来源。但各功能区土壤中各种来源的黑碳所占比重不同,因此其 BC/SOC 比值介于 0.11 和 0.5 之间。

从表 2 还可以发现,不同功能区城市林业土壤的 BC/SOC 值的分布情况也表现出不同的特征。道路绿化带土壤的 BC/SOC 值明显高于其他功能区,这是直接受到机动车辆尾气排放影响的结果;公园、学校则分布比较分散,这与相关功能区实际所处的复杂环境有关;居民区、城市绿地广场表现出相对集中的分布,这与这两个功能区环境相对单一的事实相吻合;城郊林带的 BC/SOC 值分布最集中,其黑碳来源主要是生物质燃烧的结果。因此,在城市林业土壤研究中,可以根据 BC/SOC 值大致判断土壤中黑碳的主要来源。

#### 3.2.2 土壤黑碳的碳同位素比值( $\delta^{13}C_{PDB}$ )

刘兆云<sup>[18]</sup>的研究显示自然土壤表层黑碳的  $\delta^{13}C_{PDB}$  值一般在 -23.2‰ 左右,高于有机碳 -29‰ 的均值,说明黑碳与有机碳相比其  $^{13}C$  富集程度较高。C3 植物和 C4 植物来源黑碳的同位素组成则相对固定,Oindrila<sup>[19]</sup>的研究表明 C3 植物燃烧后所收集到的黑碳的  $\delta^{13}C_{PDB}$  值约为 -24.6‰—-26.1‰,C4 植物则为 -12.3‰—-13.8‰。近年来,城市化建设中化石燃料被普遍使用,Andres<sup>[20]</sup>的实验表明, $^{13}C$  在化石燃料中的丰度相对于现在的各种含碳物质要低得多,其各种化石燃料的  $\delta^{13}C_{PDB}$  平均值为:天然气:-44‰;石油:-28‰;煤炭:-24.1‰。刘刚<sup>[21]</sup>的研究证明在机动车尾气烟尘中的黑碳颗粒存在  $^{13}C$  相对贫化的情况,其  $\delta^{13}C_{PDB}$  值在-

25.9‰—27.6‰之间。因此化石燃料的大量燃烧,使大气 CO<sub>2</sub> 的 δ<sup>13</sup>C 值降低<sup>[22]</sup>,同样也使土壤表层的含碳物质的 δ<sup>13</sup>C 值降低,黑碳的 δ<sup>13</sup>C 值也随之降低。

因此,若有大量 C3 植物燃烧所产生的黑碳颗粒进入土壤,如森林火灾,林木燃烧所生成的黑碳进入土壤,则土壤中黑碳的<sup>13</sup>C 浓度必然会受到影 响,其 δ<sup>13</sup>C 值会随进入量的增多逐渐趋向于 C3 来源黑碳的 δ<sup>13</sup>C 值。而 C4 植物如秸秆等燃烧所产生的黑碳颗粒进入土壤时,由于其同位素组成中<sup>13</sup>C 的丰度较高,则土壤中黑碳的 δ<sup>13</sup>C 值也会随输入量的增高而升高。而化石燃料燃烧产生的黑碳颗粒存在<sup>13</sup>C 相对贫化的情况,其大量进入土壤时会造成土壤中黑碳的 δ<sup>13</sup>C 值降低的结果。

本研究的结果与以上的推论吻合较好,从表 3 看出:道路绿化带表层样品中黑碳的 δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> 值小于其它功能区,其黑碳<sup>13</sup>C 的贫化程度最高,这与其黑碳来源主要是机动车的尾气排放和化石燃料的燃烧有关。城市天然林表层土壤中黑碳的来源相对简单。城郊天然林表层土壤黑碳的 δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> 值与刘兆云<sup>[18]</sup>的研究结果较为接近。这与城郊天然林受人为干扰最少,其土壤状态最接近自然土壤有关。而城区天然林表层土壤黑碳的 δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> 值略低于城郊天然林。这种情况应是贯穿森林的道路交通影响城区天然林的土壤所致。交通运输产生的低丰度<sup>13</sup>C 黑碳进入土壤,导致表层土壤中的黑碳的 δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> 值降低。而其它功能区的 δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> 值偏离城郊林带的情况可能与其黑碳来源的复杂性有关。化石燃料的不完全燃烧和生物质(生活垃圾、秸秆等)的燃烧均是其黑碳物质的来源。城市中大规模的林木燃烧情况较少,而各种有机的生活垃圾等焚烧情况较多。但生活垃圾的成分极为复杂,这可能是导致这几个功能区内土壤黑碳的<sup>13</sup>C 富集情况发生变异的原因。且各功能区土壤中各种来源的黑碳所占比重也有所不同,这也会对相关土壤中黑碳的 δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> 值产生影响。因此,其它功能区中黑碳的 δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> 值未体现出明显的规律性。

#### 4 结论

(1) 土壤黑碳含量在城市林业不同功能区之间表现出差异性。城市林业各功能区中,土地利用方式不同,土壤中黑碳含量差异很大,其变化范围是 0.77 g/kg—21.27g/kg。道路绿化带土壤黑碳含量显著高于其它功能区,而居民区含量最低。各功能区土壤黑碳含量表层均高于亚表层,说明当黑碳在土壤表层有富集趋势。

(2) 土壤中黑碳的主要来源可用 BC/SOC 值做较好地判定,道路绿化带土壤的 BC/SOC 比值最大,平均值在表层是 0.55±0.04,在表下层是 0.51±0.08,其次为公园,城郊天然林的比值最低。说明城市交通污染对土壤黑碳含量有显著的影响,而城市天然林土壤黑碳主要来源于生物质的燃烧。

(3) 黑碳的 δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> 值可作为利用 BC/SOC 值判定黑碳来源的补充和证明。道路绿化带表层样品中黑碳的 δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> 值小于其它功能区,其黑碳来源主要与机动车的尾气排放和化石燃料的燃烧有关。城郊天然林表层土壤黑碳的 δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> 值接近于自然土壤,城区天然林由于受到贯穿森林的道路交通影响,表层土壤黑碳的 δ<sup>13</sup>C<sub>PDB</sub> 值略低于城郊天然林。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 单奇华, 俞元春, 张金池. 城市林业土壤质量评价. 林业科技开发, 2007, 21(5): 12-15.
- [ 2 ] Goldberg E D. Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution. New York: John Wiley & Sons Inc, 1985: 1-146.
- [ 3 ] 刘兆云, 章明奎. 浙江省几种人为土壤中黑碳的含量. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2010, 36(5): 542-546.
- [ 4 ] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. Nature, 2001, 409(6821): 695-697.
- [ 5 ] Hansen J E, Sato M. Trends of measured climate forcing agents. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 98(26): 14778-14783.
- [ 6 ] 王俊霞, 俞元春, 张雪莲. 高速公路沿线土壤黑碳含量特征. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2009, 33(1): 155-157.
- [ 7 ] Nama J J, Gustafsson O, Kurt-Karakus P, Breivik K, Steinnes E, Jones K C. Relationships between organic matter, black carbon and persistent organic pollutants in European background soils: Implications for sources and environmental fate. Environmental Pollution, 2008, 156(3):

809-817.

- [ 8 ] 杨基峰, 应光国, 赵建亮, 杨小兵, 彭平安. 黑碳对污染物环境地球化学过程的影响. 生态环境, 2008, 17(4): 1685-1689.
- [ 9 ] Masiello C A. New directions in black carbon organic geochemistry. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1/4): 201-213.
- [ 10 ] Druffel E R M. Comments on the importance of black carbon in the global carbon cycle. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1-4): 197-200.
- [ 11 ] 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: 135-139.
- [ 12 ] Lim B, Cachier H. Determination of black carbon by chemical oxidation and thermal treatment in recent marine and lake sediments and Cretaceous-Tertiary clays. *Chemical Geology*, 1996, 131(1/4): 143-154.
- [ 13 ] Glaser B, Balashov E, Haumajer L, Guggenberger G, Zech W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7-8): 669-678.
- [ 14 ] Miguel A H, Kirchstetter T W, Harley R A, Hering S V. On-road emissions of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon from gasoline and diesel vehicles. *Environmental Science and Technology*, 1998, 32(4): 450-455.
- [ 15 ] Fruin S A, Winer A M, Rodes C E. Black carbon concentrations in California vehicles and estimation of in-vehicle diesel exhaust particulate matter exposures. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(25): 4123-4133.
- [ 16 ] Muri G, Cemelj B, Faganeli J, Brancelj A. Black carbon in Slovenian alpine lacustrine sediments. *Chemosphere*, 2002, 46(8): 1225-1234.
- [ 17 ] Gatari M J, Boman J. Black carbon and total carbon measurements at urban and rural sites in Kenya, East Africa. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(8): 1149-1154.
- [ 18 ] 刘兆云, 章明奎. 杭嘉湖平原典型水耕人为土的碳库构成与<sup>13</sup>C 稳定性同位素分布特征. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2010, 36(3): 275-281.
- [ 19 ] Das O, Wang Y, Hsieh Y P. Chemical and carbon isotopic characteristics of ash and smoke derived from burning of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> grasses. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(3): 263-269.
- [ 20 ] Ciais P, Tans P P, White J W C, Trolrier M, Francey R J, Berry J A, Randall D R, Sellers P J, Collatz J G, Schimel D S. Partitioning of ocean and land uptake of CO<sub>2</sub> as inferred by  $\delta^{13}\text{C}$  measurements from the NOAA climate monitoring and diagnostics laboratory global air sampling network. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D3): 5051-5070.
- [ 21 ] 刘刚, 姚祁芳, 杨辉. 汽车尾气烟尘中有机碳和元素碳的稳定同位素组成. 环境与健康杂志, 2008, 25(9): 822-823.
- [ 22 ] 涂成龙, 刘丛强, 武永锋. 城市公路绿化带土壤有机碳的分异. 水土保持学报, 2008, 22(1): 100-104.