

1997—2006年中国城市建成区有机碳储量的估算*

朱超 赵淑清** 周德成

(北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要 随着城市区域碳排放的增加, 城市碳循环在全球碳循环中的地位越来越重要, 而城市碳排放和碳储量的估算是城市碳循环研究的基础. 本研究利用统计资料, 参考国内外相关研究成果, 对1997—2006年中国城市建成区有机碳储量进行估算. 结果表明: 1997—2006年, 中国城市建成区总有机碳储量呈上升趋势, 由0.13~0.19 Pg C(平均值为0.16 Pg C)增加到0.28~0.41 Pg C(平均值为0.34 Pg C); 建成区有机碳密度由9.86~14.03 kg C·m⁻²(平均值为11.95 kg C·m⁻²)增加到10.54~15.54 kg C·m⁻²(平均值为13.04 kg C·m⁻²). 建成区的有机碳主要储存在土壤中, 其次是建筑物和绿地, 居民有机体的碳储量可忽略不计. 1997和2006年, 土壤、建筑物、绿地和居民有机体在总碳库中的比例分别为78%、12%、9%、1%和73%、16%、10%、1%.

关键词 城市建成区 有机碳储量 有机碳密度

文章编号 1001-9332(2012)05-1195-08 **中图分类号** Q149 **文献标识码** A

Organic carbon storage in urban built-up areas of China in 1997–2006. ZHU Chao, ZHAO Shu-qing, ZHOU De-cheng (*Ministry of Education Key Laboratory for Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2012, 23(5): 1195–1202.

Abstract: With the increase of greenhouse gases emission in urban regions, urban carbon cycle plays a more and more important role in global carbon cycle. To estimate urban carbon emission and carbon storage is crucial for understanding urban carbon cycle. By using China's statistics data and the results from recent publications, this paper estimated the organic carbon storage in China's urban built-up areas in 1997–2006. From 1997 to 2006, the total organic carbon storage in the urban built-up areas increased from 0.13–0.19 Pg C (averagely 0.16 Pg C) to 0.28–0.41 Pg C (averagely 0.34 Pg C), and the organic carbon density increased from 9.86–14.03 kg C·m⁻² (averagely 11.95 kg C·m⁻²) to 10.54–15.54 kg C·m⁻² (averagely 13.04 kg C·m⁻²). The total organic carbon storage in the urban built-up areas was mainly contributed by soils (78% in 1997 and 73% in 2006), followed by buildings (12% in 1997 and 16% in 2006) and green spaces (9% in 1997 and 10% in 2006), while the carbon storage in resident bodies only accounted for less than 1%, which could be neglected.

Key words: built-up areas; organic carbon storage; organic carbon density.

全球城市面积仅占陆地面积的2.4%^[1], 但快速发生的城市化的影响却具有全球性. 据统计, 全球78%的碳排放、60%的生活用水消耗以及76%的工业用木材消耗发生在城市^[2]. 目前, 世界范围内的城市人口增长率是全球人口增长率的3倍^[3], 而城市面积的增长速度远高于城市人口的增长速度^[4],

随着城市面积和城市人口的进一步增加, 城市化对生态系统结构和功能的影响会越来越大^[5]. 近年来, 城市化对区域碳循环的影响已成为研究热点^[5-9]. 城市化一方面使城市人口、建筑物和机动车辆增加, 从而导致更多的碳排放, 另一方面可以使城市生态系统储存更多的碳^[5,10]. 因此, 综合评估城市化对碳循环的影响十分必要. 目前, 已有的研究侧重于城市碳排放的研究^[11-15], 对城市碳储量的研究较少.

西方发达国家如美国等已对全国城市碳储量进

* 国家自然科学基金项目(41071050)和科技部气候变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB50600)资助.

** 通讯作者. E-mail: sqzhao@urban.pku.edu.cn

2011-08-25 收稿, 2012-02-24 接受.

行了较全面的估算. 例如, Nowak 和 Crane^[16] 研究表明, 美国城市森林碳储量为 0.7 Pg C, 每年可固定碳量为 0.022 Pg C; Pouyat 等^[17] 认为, 美国城市土壤总碳储量为 2.6 Pg C, 土壤平均碳密度为 7.7 kg C · m⁻²; Churkina 等^[18] 研究表明, 美国城市总有机碳储量为 18 Pg C, 是美国陆地生态系统总碳储量的 10%. 中国学者目前仅对某些城市中绿地 (如管东生等^[19] 利用实测数据估算了广州建成区的绿地碳储量; Peng 等^[20] 利用 Citygreen 模型对南京主城区的绿地碳储量进行研究; Zhao 等^[21] 和 Ren 等^[22] 分别对杭州和厦门城市森林碳储量进行研究) 和土壤 (Xu 等^[23] 对长江三角洲地区土壤碳储量的动态变化进行了监测; 张廷龙等^[24] 和史利江等^[25] 分别对北京和上海不同土地利用方式下土壤碳特征进行了分析) 的碳储量进行研究, 缺乏在全国尺度上对城市碳储量的全面研究. 本研究利用 1998—2007 年的统计资料和文献中的数据, 参考 Churkina 等^[18] 的方法, 对 1997—2006 年中国大陆 (不含港澳台) 地级及以上城市建成区的有机碳储量进行全面评估, 并分析了有机碳储量的构成及年际变化, 以期能为城市碳循环研究提供基础数据, 为更合理的城市规划提供理论依据.

1 数据与方法

本文选择中国大陆 (不含港澳台) 地级及以上城市建成区为研究区. 建成区指城市行政区内已成片开发建设、市政公用设施和公共设施基本具备的区域^[26], 它是城市建设成果的缩影, 对其进行研究有助于把握城市发展的规律, 可为制定未来的城市发展战略提供依据^[27].

本研究关注的碳库主要为有机碳库, 城市建成区中的有机碳库可分为 2 种: 天然碳库和人工碳库. 天然碳库包括土壤和植被, 人工碳库包括建筑和家具、衣物和有机体等^[18].

1.1 植被有机碳库

城市植被包括城市森林和城市草地, 在中国较常用的概念是城市园林绿地. 城市园林绿地 (以下简称绿地) 指用作园林和绿化的各种绿地, 包括公共绿地、居住区绿地、单位附属绿地、防护绿地、生产绿地、道路绿地和风景林地^[26]. 植被有机碳库是绿地中各种植物储存的有机碳量. 城市建成区绿地有机碳储量 (C_{green}) 的估算公式如下:

$$C_{green} = A_{green} C_{ggreen} \quad (1)$$

式中: A_{green} 为建成区绿化覆盖面积 (m²); C_{ggreen} 为绿

地碳密度 (kg C · m⁻²).

建成区绿化覆盖面积来自于《中国城市统计年鉴》(1998—2007 年)^[28], 建成区绿地植被碳密度见表 1.

1.2 土壤有机碳库

城市土壤是在地带性土壤背景下, 在城市化过程中受人类活动影响而形成的一种特殊土壤^[29]. 城市中的土壤一般被绿地或不透水面覆盖, 极少裸露. 因此, 本研究将城市地表覆被类型分为绿地和不透水面, 二者下方土壤储存的有机碳量之和就是土壤碳库的有机碳储量. 城市土壤有机碳储量 (C_{soil}) 的估算公式如下:

$$C_{soil} = A_{green} C_{sgreen} + (A_{builtup} - A_{green}) C_{simp} \quad (2)$$

式中: $A_{builtup}$ 为建成区面积 (m²); C_{sgreen} 和 C_{simp} 分别为绿地和不透水面的土壤碳密度 (kg C · m⁻²).

建成区面积来自于《中国城市统计年鉴》(1998—2007 年)^[28], 绿地土壤碳密度来自于前人研究成果 (表 1). 国际上计算土壤碳含量以 1 m 深度为参照标准^[30], 因此, 表 1 所列参数土壤深度均为 1 m. 由于缺乏不透水面下土壤的碳密度, 本研究采用我国土壤平均有机碳密度代替, 考虑到不透水面下土壤的碳密度不会发生太大变化, 因此, 这种代替比较合理. Yang 等^[31] 根据第二次土壤调查数据和野外实测数据得到中国土壤平均有机碳密度为 7.8 kg C · m⁻².

表 1 中国城市建成区不同地表类型的植被和土壤碳密度
Table 1 Carbon density of vegetation and soils of different surface types in China's urban built-up areas

地表类型 Surface type	碳密度 Carbon density (kg C · m ⁻²)	
	植被 Vegetation	土壤 Soil
不透水面 Impervious	-	7.8b
绿地 Green space	3.02 ~ 4.63a	7.03 ~ 18.6c

a) 由于没有全国尺度的城市绿地植被碳密度数据, 本文采用部分城市的植被碳密度数据代替, 包括广州 3.21 kg C · m⁻²^[19]、杭州 4.63 kg C · m⁻²^[32]、南京 3.02 kg C · m⁻²^[20]、沈阳 3.84 kg C · m⁻²^[33]、昆明 3.86 kg C · m⁻²^[34]. Considering the lack of carbon density of vegetation at country scale, this paper used the carbon density of vegetation in some cities as a substitute, *i. e.*, Guangzhou 3.21 kg C · m⁻²^[19], Hangzhou 4.63 kg C · m⁻²^[32], Nanjing 3.02 kg C · m⁻²^[20], Shenyang 3.84 kg C · m⁻²^[33], Kunming 3.86 kg C · m⁻²^[34]; b) 采用中国土壤平均有机碳密度代替不透水面下土壤碳密度 This paper used the average soil carbon density in China as a substitute; c) 由于没有全国尺度的城市土壤碳密度数据, 采用部分城市的土壤碳密度实测数据代替, 包括广州 12.75 kg C · m⁻²^[19]、北京 7.03 kg C · m⁻²^[35]、杭州 18.6 kg C · m⁻²^[36]. Considering the lack of soil carbon density beneath green spaces at country scale, this paper used the soil carbon density beneath green spaces in some cities as a substitute, *i. e.*, Guangzhou 12.75 kg C · m⁻²^[19], Beijing 7.03 kg C · m⁻²^[35], Hangzhou 18.6 kg C · m⁻²^[36].

1.3 有机体碳库

有机体碳库指储存在城市有机体内的碳总量,主要包括人类和动物体中储存的碳.由于城市动物中储存的碳量不足人体储存碳量的 1%^[37],因此,本研究主要考虑人体储存的碳.刘继生和陈彦光^[38]认为,目前人口统计中的市区非农业人口指标与建成区人口指标较接近,因此,本研究采用市区非农业人口代替建成区人口.人体碳储量(C_{hum})计算公式如下:

$$C_{\text{hum}} = N_{\text{n-agri}} M_{\text{ave}} f_1 f_2 \quad (3)$$

式中: $N_{\text{n-agri}}$ 为市区非农业人口数量; M_{ave} 为城市居民的平均体质量,本文取 60 kg; f_1 为人体中干物质的比例,本文取 0.3^[37]; f_2 为干物质中碳的比例,本文取 0.5^[18].

市区非农业人口数量来源于《中国城市统计年鉴》(1998—2007 年)^[28].

1.4 建筑物有机碳库

建筑物所含的有机碳主要存在于房屋的建筑材料、装饰材料和有机生活用品中.本文主要考虑两部分:建筑材料的碳储量和家具的碳储量.计算时,首先将建筑材料和家具的数量转换成所含木材的量,进而求出其碳储量.

1.4.1 建筑材料有机碳储量 目前,城市建筑的主要材料有水泥、钢铁、砖瓦、木材和沙砾^[39].其中,木材属于有机碳库,因此本研究主要关注建筑材料中木材的碳储量.城市里的建筑大致可分为住宅和商业建筑,二者消耗的木材不同.因此,对住宅和商业建筑的碳储量分别进行计算,二者之和就是建筑材料的有机碳储量(C_{build}).计算公式如下:

$$C_{\text{build}} = 0.6 f_3 f_4 f_2 A_{\text{house}} + 0.2 f_5 f_4 f_2 (A_{\text{build}} - A_{\text{house}}) \quad (4)$$

式中: A_{build} 和 A_{house} 分别为建成区房屋建筑面积和建成区住宅建筑面积($\times 10^4 \text{ m}^2$); f_3 为住宅建筑木材消耗强度($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$); f_5 为商业建筑木材消耗强度($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$); f_4 为平均木材蓄积密度($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$);0.6和0.2分别为住宅和商业建筑固定建筑木材的比例^[40].

由于现有的统计指标中没有建成区的房屋和住宅建筑面积,本文假定市区非农业人口和市人口的比例与建成区房屋建筑面积和全市房屋建筑面积的比例相等,采用下式计算建成区房屋建筑面积:

$$A_{\text{build}} = N_{\text{n-agri}} / N_{\text{peop}} \times A_{\text{total}} \quad (5)$$

式中: N_{peop} 和 A_{total} 分别为市人口和全市房屋建筑面

积($\times 10^4 \text{ m}^2$),市人口数来源于《中国城市统计年鉴》(1998—2007 年)^[28],全市的房屋建筑面积和住宅建筑面积来源于《中国统计年鉴》(1998—2007 年)^[41];住宅建筑和商业建筑木材消耗强度分别为 0.04 和 0.03 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ ^[42];平均木材容积密度为 0.4 $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[43].

1.4.2 家具有机碳储量 家具有机碳储量的估算基于成套家具的数量.成套家具是指一次性购买不同功能、能满足日常生活的多件家具,一般应包括床、衣柜、矮柜、书柜等常用家具^[44].由于无法获取其他家具的数量,我们假定居民家中的家具主要是成套家具,且家具主要分为木家具和钢家具两种.家具碳储量(C_{furn})计算公式为:

$$C_{\text{furn}} = N_{\text{set}} N_{\text{household}} f_6 (0.8 f_7 f_4 f_2 + 0.2 f_8 f_4 f_2) \quad (6)$$

式中: N_{set} 为城镇居民成套家具拥有量(套); $N_{\text{household}}$ 为市非农业人口户数; f_6 为每套家具的件数;0.8和0.2分别为家具中木家具和钢家具的比例^[45]; f_7 和 f_8 分别为木家具和钢家具的木材消耗强度.

市非农业人口户数由市非农业人口数和每户的人数得到(假定每户居民数为 3 人),城镇居民成套家具拥有量来源于《中国统计年鉴》(1998—2007 年)^[41],每套家具的件数假定为 10~20 件,木家具和钢家具的木材消耗强度分别为每件 0.07 和 0.03 m^3 ^[42].

2 结果与分析

2.1 天然碳库的有机碳储量

1997—2006 年,植被有机碳储量呈缓慢增加趋势(图 1),从 1997 年的 0.01~0.02 Pg C(平均值

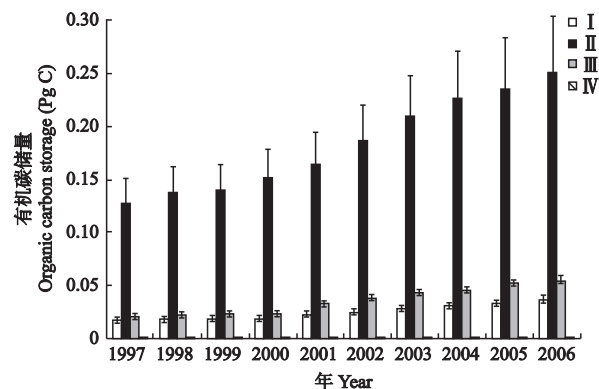


图 1 1997—2006 年城市建成区主要碳库有机碳储量

Fig. 1 Organic carbon storage in major pools of China's urban built-up areas from 1997 to 2006.

I: 绿地 Green space; II: 土壤 Soil; III: 建筑物 Building; IV: 居民 Human. 下同 The same below.

为 0.02 Pg C) 增加到 0.03 ~ 0.04 Pg C (平均值为 0.04 Pg C), 这与建成区绿化覆盖面积的增加直接相关, 期间中国的建成区绿化覆盖面积从 $3.99 \times 10^3 \text{ km}^2$ 增加到 $9.20 \times 10^3 \text{ km}^2$. 但植被有机碳储量占总储量的比例始终在 10% 左右.

1997—2006 年, 土壤有机碳储量呈快速增加趋势(图 1), 从 1997 年的 0.10 ~ 0.15 Pg C (平均值为 0.13 Pg C) 增加到 2006 年的 0.20 ~ 0.30 Pg C (平均值为 0.25 Pg C), 但土壤有机碳储量占总储量的比例从 1997 年的 78% 降到 2006 年的 73% (图 2). 土壤有机碳储量由 2 部分组成: 绿地土壤有机碳储量和不透水面下土壤有机碳储量. 由图 3 可以看出, 不透水面下土壤有机碳储量占土壤总有机碳储量的 60% 左右, 但研究期间其比例在下降, 绿地土壤有机碳储量的比例不断增加, 这与绿地面积所占比例的增加直接相关.

研究期间, 城市天然碳库的总有机碳储量由

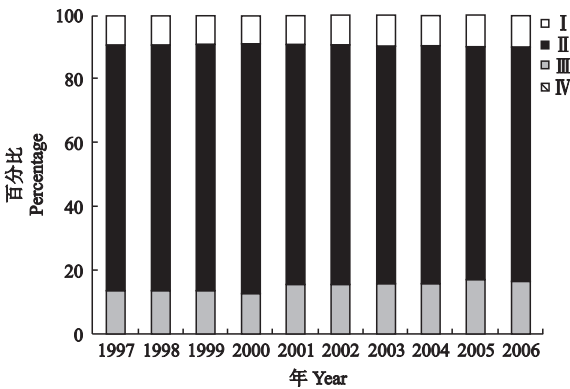


图 2 1997—2006 年城市建成区总有机碳储量的构成
Fig. 2 Composition of total organic carbon storage in China's urban built-up areas from 1997 to 2006.

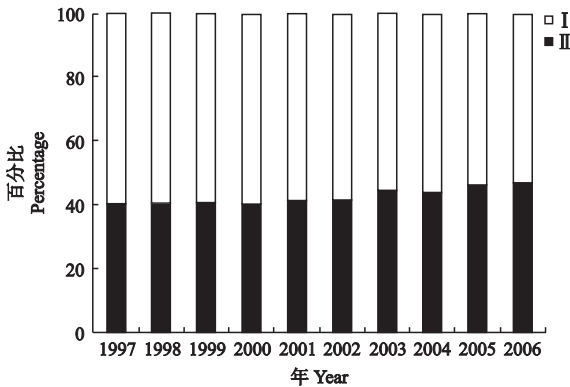


图 3 1997—2006 年城市建成区土壤有机碳库的构成
Fig. 3 Composition of soil organic carbon pools of China's urban built-up areas from 1997 to 2006.
I: 不透水面 Impervious surface; II: 绿地 Green space.

0.12 ~ 0.17 Pg C (平均值为 0.14 Pg C) 增加到 0.23 ~ 0.35 Pg C (平均值为 0.29 Pg C), 其中, 植被碳库在天然碳库中的比例由 10.7% 上升到 12.3%, 说明城市绿地的固碳能力在增强. 但与美国城市天然碳库的组成相比(绿地约占 25% [18]), 中国的城市绿地还有很大的固碳潜力. 随着城市绿化的进一步发展, 城市绿地在天然碳库中的作用会越来越明显.

2.2 人工碳库的有机碳储量

1997—2006 年, 建筑物有机碳储量呈显著增加趋势(图 1), 从 1997 年的 0.01 ~ 0.02 Pg C (平均值为 0.02 Pg C) 增加到 2006 年的 0.05 ~ 0.06 Pg C (平均值为 0.05 Pg C), 其在总碳储量中的比例也从 12% 增加到 16% 左右(图 2). 其中, 住宅有机碳储量在建筑物碳库中的比例从 54% 增加到 63% (图 4), 这是由于快速城市化下大批人口涌进城市, 导致住宅需求增加, 住宅建筑面积急剧增加(图 5), 2000 年以后这种趋势尤为明显.

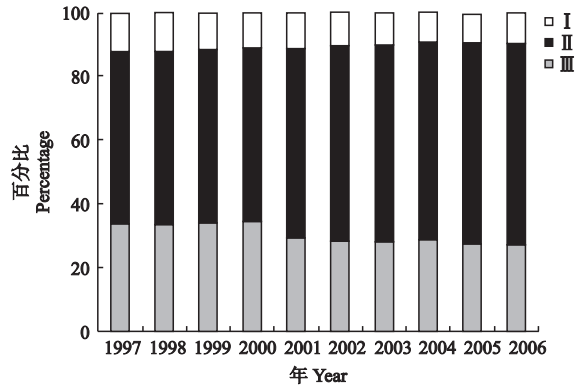


图 4 1997—2006 年城市建成区建筑物有机碳库的构成
Fig. 4 Composition of building organic carbon pools of China's urban built-up areas from 1997 to 2006.

I: 商业建筑 Commercial building; II: 住宅 Private house; III: 家具 Furniture. 下同 The same below.

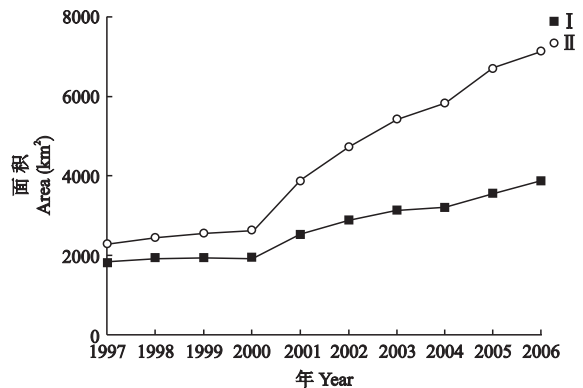


图 5 1997—2006 年城市建成区住宅和商业建筑面积
Fig. 5 Area of private houses and commercial buildings in China's urban built-up areas from 1997 to 2006.

1997—2006 年,城市居民有机碳储量变化不大(图 1),其在总碳储量中的比例始终保持在 1% 左右.相对于其他碳库的有机碳储量,城市居民的碳储量可忽略不计.

研究期间,城市人工碳库的总有机碳储量由 0.01 ~ 0.02 Pg C (平均值为 0.02 Pg C) 增加到 0.05 ~ 0.06 Pg C (平均值为 0.06 Pg C),占建成区总碳储量的比例由 13% 上升到 16%,说明人类活动对建成区有机碳储量的影响在增强.在人工碳库中,建筑物碳库的比例由 94% 上升到 96%,居民碳库的比例由 6% 下降到 4%.随着城市化的发展和居民生活水平的提高,房屋建筑面积和家具数目会继续增加,人工碳库特别是建筑物有机碳库对城市建成区有机碳库的影响会越来越强.

2.3 城市建成区总碳储量

1997—2006 年,城市建成区总有机碳储量由 0.13 ~ 0.19 Pg C (平均值为 0.16 Pg C) 增加到 0.28 ~ 0.41 Pg C (平均值为 0.34 Pg C);城市建成区有机碳密度由 9.86 ~ 14.03 kg C · m⁻² (平均值为 11.95 kg C · m⁻²) 增加到 10.54 ~ 15.54 kg C · m⁻² (平均值为 13.04 kg C · m⁻²) (图 6).

对比建成区有机碳储量与面积和人口的关系(图 6 和图 7)可以看出,1997—2006 年,建成区面积的增长速度大于人口的增长速度,加之有机体碳储量较小,所以建成区有机碳储量的增加主要是由于

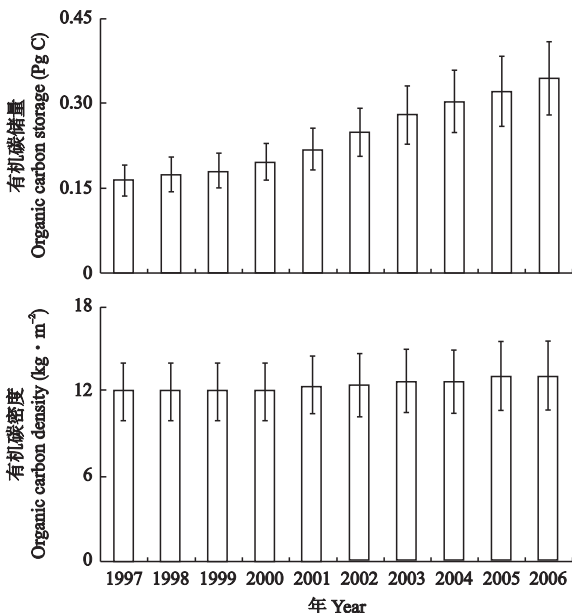


图 6 1997—2006 年城市建成区的总有机碳储量和有机碳密度

Fig. 6 Total organic carbon storage and organic carbon density in China's urban built-up areas from 1997 to 2006.

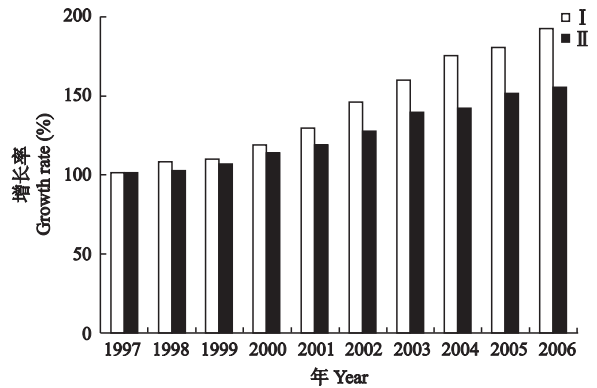


图 7 1997—2006 年建成区面积和人口的增长率

Fig. 7 Growth rates in land area and population in China's urban built-up areas from 1997 to 2006.

I: 建成区面积 Area of built-up areas; II: 建成区人口 Population of built-up areas.

建成区面积的扩张所致.可以预见,随着城市化的进程,越来越多的有机碳将会被储存在建成区中.

3 讨 论

3.1 误差来源分析

本研究对中国城市建成区的有机碳储量进行了估算,但其结果具有一定的不确定性.

1) 植被有机碳库.由于中国统计数据没有详细区分城市森林和城市草地,本研究植被碳库采用建成区绿化覆盖面积计算,而城市森林和城市草地的碳密度有所差异,如台州市建成区乔木的碳储量是灌丛和草坪碳储量之和的 2.6 倍^[46].因此,以绿地来笼统代替森林和草地可能会使估算结果偏低,有必要在以后的研究中区分城市森林和草地.另外,已有的绿地碳密度数据多集中在东部地区,西部地区的数据较少,这也在一定程度上影响了植被有机碳库的估算精度.

2) 土壤有机碳库.城市土壤有机碳含量主要取决于土壤的母质和土地利用方式^[47].中国疆域广阔,各地区地形、成土母质、土壤微生物和气候类型差异较大,并且由于社会经济不平衡,不同地区的土地利用方式也不同,因此中国城市的土壤有机碳含量存在很大的时空变异性. Yang 等^[31]研究发现,中国的土壤有机碳密度由东南向西北递减.而已有的城市土壤碳密度实测数据主要集中在东部沿海地区,因此,以东部建成区的土壤碳密度来估算全国建成区的土壤碳储量,可能会高估中国建成区的土壤有机碳储量.

城市湿地也是城市景观中重要的组成部分^[48],由于湿地中大量有机质的积累,其土壤有机碳含量

高于一般的城市土壤。Post 等^[49]估算的全球湿地土壤碳密度为 $72.3 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$, 远高于绿地土壤碳密度。由于现有的统计资料未将湿地和绿地区分开, 这也在一定程度上影响了结果的精度。

3) 建筑物有机碳库。考虑到数据的可获取性, 本研究中建筑材料仅考虑了木材, 其他有机碳性质的材料如非金属管线类和装饰材料等并未考虑; 建成区的房屋建筑面积由全市的房屋建筑面积推算得到, 存在一定误差; 且房屋的木材消耗强度参数来源年代较早, 随着科技的发展, 木材消耗强度可能会有变化; 建筑物中其他含碳物质如有机生活用具和书籍等的碳储量也未考虑。因此, 结果可能会低估建筑物的有机碳储量。

4) 有机体碳库。20 世纪 80 年代后, 大量流动人口进入城市, 在人口普查时, 他们不被认为是非农业人口^[50]。而本研究中建成区的人口数据采用市区的非农业人口数据计算, 未考虑到流动人口, 这会低估有机体的碳储量。

3.2 与其他研究结果的比较

2006 年, 中国城市建成区有机碳密度为 $10.54 \sim 15.54 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ (平均值为 $13.04 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$), 而中国土壤平均碳密度为 $7.8 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[31], 1994—1998 年中国森林平均生物量碳密度为 $4.49 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[51], 中国草地生物量碳密度为 $0.22 \sim 0.35 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[52]。说明本研究中我国城市建成区有机碳密度明显高于草地生态系统碳密度。

2000 年, 中国城市建成区有机碳密度为 $9.81 \sim 13.99 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ (平均值为 $11.90 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$); 而 2000 年美国城市城区有机碳密度为 $23 \sim 42 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[18], 而且两国城市有机碳库的组成也存在差异 (表 2)。中国建成区有机碳密度小于美国城区有机碳密度, 可能的原因是: 1) 美国的城市绿化水平较高; 2) 中国城市土壤碳库的测定数据极少, 建成区土壤有机碳库估算的不确定性很大; 3) 两国房屋建筑材料有差别, 中国房屋木材消耗为 $13.2 \sim 16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 而美国为 $40 \sim 130 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 且城市建筑物分类的详细程度不完全一致。

表 2 2000 年中国、美国城市建成区有机碳库的组成
Table 2 Composition of organic carbon pools of urban built-up areas in China and USA in 2000 (%)

国家 Country	植被 Vegetation	土壤 Soil	建筑物 Building	居民 Human
中国 China	9	78	12	1
美国 USA	15	44	41	<1

3.3 中国建成区碳储量的未来趋势

中国正在发生着快速的城市化, 城市面积和城市化水平迅速增加: 城市建成区土地面积由 1984 年的 $8.84 \times 10^3 \text{ km}^2$ 上升到 2007 年的 $27.59 \times 10^3 \text{ km}^2$ ^[28], 城市化水平由 1978 年的 12.5% 上升到 2007 年的 44.9%^[41]。但目前中国的城市化水平还低于世界平均水平 (2007 年为 50%^[53]), 因此, 在未来相当长的时间内, 中国的城市面积和城市人口仍会继续增加, 城市地区在我国生态系统碳平衡格局中的地位也会越来越重要^[13]。以 2006 年为例, 中国化石燃料燃烧排放的 CO_2 为 1.5 Pg ^[54], 当年中国建成区有机碳储量为 $0.28 \sim 0.41 \text{ Pg C}$ (平均值为 0.34 Pg C), 相当于化石燃料碳排放的 18.4% ~ 27.2%。本研究仅考虑了建成区的有机碳储量, 而建成区中无机碳的储量也不能忽略。Sakin 等^[55]发现, 土耳其 Adana 市的土壤有机碳储量为 0.17 Pg ($0 \sim 100 \text{ cm}$), 而无机碳储量达到 0.40 Pg ($0 \sim 100 \text{ cm}$), 是有机碳储量的 2 倍以上。因此, 在碳排放增加的情况下 (2000—2006 年中国碳排放增长了近 80%^[54]), 除了节能减排外, 如何使城市建成区储存更多的碳也是应对气候变化的重要措施之一。

4 结 论

1997—2006 年, 中国城市建成区总有机碳储量呈增加趋势, 由 $0.13 \sim 0.19 \text{ Pg C}$ (平均值为 0.16 Pg C) 增加到 $0.28 \sim 0.41 \text{ Pg C}$ (平均值为 0.34 Pg C), 主要由建成区面积的增加所致; 建成区的有机碳密度同样呈增加趋势, 由 $9.86 \sim 14.03 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ (平均值为 $11.94 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$) 增加到 $10.54 \sim 15.54 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ (平均值为 $13.04 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$)。建成区中有机碳主要储存在土壤中, 其次储存在建筑物和绿地中, 居民碳储量可忽略不计。本研究结果存在一定的不确定性, 如未能区分城市森林和城市草地、城市土壤碳库的测定数据极少、对建筑物碳库的分类过于粗略等。在未来的研究中, 为了提高估算结果的精度, 需要对统计指标进行细化, 并且需要更多实测数据的支持。

参考文献

- [1] Potere D, Schneider A. A critical look at representations of urban areas in global maps. *GeoJournal*, 2007, **69**: 55–80
- [2] Brown LR. *Eco-Economy: Building an Economy for the Earth*. New York: W. W. Norton & Company, 2002
- [3] United Nations. *World Urbanization Prospects: The*

- 2005 Revision. New York: United Nations, 2006
- [4] European Environment Agency. Urban Sprawl in Europe: The Ignored Challenge. Copenhagen: European Environment Agency, 2006
- [5] Kaye JP, McCulley RL, Burke IC. Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 575-587
- [6] Alberti M. The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review*, 2005, **28**: 168-192
- [7] Pataki DE, Alig RJ, Fung AS, *et al.* Urban ecosystems and the North American carbon cycle. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 2092-2102
- [8] Churkina G. Modeling the carbon cycle of urban systems. *Ecological Modelling*, 2008, **216**: 107-113
- [9] Lu DS, Xu XF, Tian HQ. The effects of urbanization on net primary productivity in southeastern China. *Environmental Management*, 2010, **46**: 404-410
- [10] Golubiewski NE. Urbanization increases grassland carbon pools: Effects of landscaping in Colorado's front range. *Ecological Applications*, 2006, **16**: 555-571
- [11] Wei YM, Liu LC, Fan Y, *et al.* The impact of lifestyle on energy use and CO₂ emission: An empirical analysis of China's residents. *Energy Policy*, 2007, **1**: 247-257
- [12] Svirejeva-Hopkins A, Schellnhuber HJ. Urban expansion and its contribution to the regional carbon emissions: Using the model based on the population density distribution. *Ecological Modelling*, 2008, **216**: 208-216
- [13] Dhakal S. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. *Energy Policy*, 2009, **37**: 4208-4219
- [14] Guo R, Cao XJ, Yang XY, *et al.* The strategy of energy-related carbon emission reduction in Shanghai. *Energy Policy*, 2010, **38**: 633-638
- [15] Zhou Y, Wu Y, Yang L. The impact of transportation control measures on emission reductions during the 2008 Olympic Games in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**: 285-293
- [16] Nowak DJ, Crane DE. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 2002, **116**: 381-389
- [17] Pouyat RV, Yesilonis ID, Nowak DJ. Carbon storage by urban soils in the United States. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**: 1566-1575
- [18] Churkina G, Brown DG, Keoleian G. Carbon stored in human settlements: The conterminous United States. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 135-143
- [19] Guan D-S (管东生), Chen Y-J (陈玉娟), Huang F-F (黄芬芳). The storage and distribution of carbon in urban vegetation and its roles in balance of carbon and oxygen in Guangzhou. *China Environmental Science* (中国环境科学), 1998, **18**(5): 437-441 (in Chinese)
- [20] Peng LH, Chen S, Liu YX, *et al.* Application of CITY green model in benefit assessment of Nanjing urban green space in carbon fixation and runoff reduction. *Frontiers of Forestry in China*, 2008, **3**: 177-182
- [21] Zhao M, Kong ZH, Escobedo FJ, *et al.* Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. *Journal of Environmental Management*, 2010, **91**: 807-813
- [22] Ren Y, Wei X, Wei XH, *et al.* Relationship between vegetation carbon storage and urbanization: A case study of Xiamen, China. *Forest Ecology and Management*, 2011, **261**: 1214-1223
- [23] Xu NZ, Zhang TL, Wang XX, *et al.* Soil organic carbon storage changes in Yangtze Delta region, China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **63**: 1021-1028
- [24] Zhang T-L (张廷龙), Sun R (孙睿), Hu B (胡波), *et al.* Analyzing soil carbon characteristics of typical urbanization zones in northwestern Beijing. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)* (北京师范大学学报·自然科学版), 2010, **46**(1): 97-102 (in Chinese)
- [25] Shi L-J (史利江), Zheng L-B (郑丽波), Mei X-Y (梅雪英), *et al.* Characteristics of soil organic carbon and total nitrogen under different land use types in Shanghai. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(9): 2279-2287 (in Chinese)
- [26] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (中华人民共和国住房和城乡建设部). Notice of the Ministry of Construction on Issuing the Interpretation of Statistical Indicator of Urban Construction [EB/OL]. (2001-12-11) [2011-03-29]. http://www.mohurd.gov.cn/zcfg/jswj/cw/200611/t20061101_156776.htm (in Chinese)
- [27] Yu J-G (俞金国), Wang L-H (王丽华). Features of urbanization and ecological quality change in built-up area: A case study of Dalian. *Urban Environment & Urban Ecology* (城市环境与城市生态), 2007, **20**(5): 43-47 (in Chinese)
- [28] Department of Urban Society and Economic Statistics, National Bureau of Statistics of China (国家统计局城市社会经济调查司). *China City Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2008 (in Chinese)
- [29] Song Y-C (宋永昌), You W-H (由文辉), Wang X-R (王祥荣). *Urban Ecology*. Shanghai: East China Normal University Press, 2000 (in Chinese)
- [30] Jin F (金峰), Yang H (杨浩), Cai Z-C (蔡祖聪), *et al.* Calculation of density and reserve of organic carbon in soils. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2001, **38**(4): 522-528 (in Chinese)
- [31] Yang YH, Mohammad A, Feng JM, *et al.* Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 2007, **84**: 131-141
- [32] Wen J-S (温家石). Effects of Urbanization on Carbon Storage and Sequestration in the Built-up Area. Master Thesis. Hangzhou: Zhejiang University, 2010 (in Chinese)
- [33] Liu C-F (刘常富), He X-Y (何兴元), Chen W (陈玮), *et al.* Analysis of environmental benefits of vegetation in Shenyang built-up areas. *Journal of Liaoning*

- Forestry Science & Technology* (辽宁林业科技), 2006 (2): 1-3 (in Chinese)
- [34] Liu J-T (刘江涛), Zhao L-S (赵林森). Quantitative analysis on partial ecological benefits and related tending cost of Jinbi Park, Kunming. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2008, **23**(4): 214-217 (in Chinese)
- [35] Wang D-S (王迪生). Studies on Net Carbon Reserves in Beijing Urban Landscape Green Based on Biomass Measurement. PhD Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2009 (in Chinese)
- [36] Zhang M-K (章明奎), Zhou C (周翠). Characterization of organic matter accumulated in urban soils in the Hangzhou City. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2006, **37**(1): 19-21 (in Chinese)
- [37] Bramryd T. Fluxes and accumulation of organic carbon in urban ecosystems on a global scale// Bornkamm R, Lee JA, Seaward MRD, eds. *Urban Ecology*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1980: 3-12
- [38] Liu J-S (刘继生), Chen Y-G (陈彦光). An allometric analysis of the Shandong urban system using ideas from fractals. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2005, **25**(2): 135-141 (in Chinese)
- [39] You F, Hu D, Zhang HT. Carbon emissions in the life cycle of urban building system in China: A case study of residential buildings. *Ecological Complexity*, 2011, **8**: 201-212
- [40] Wang Y-L (王永林). Wooden Door Industry Begins to Enter a Vigorous Developing Period [EB/OL]. (2005-01-10)[2011-09-27]. <http://epub.cnki.net/grid2008/detail.aspx?QueryID=80&CurRec=1> (in Chinese)
- [41] National Bureau of Statistics of China (中华人民共和国国家统计局). *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2008 (in Chinese)
- [42] Hu M-X (胡明形), Chen T-S (陈太山), Lou N-Y (楼南云). Forecast for structural demand of timber in China in 2000. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 1993, **15**(3): 123-131 (in Chinese)
- [43] Fang J-Y (方精云), Liu G-H (刘国华), Xu S-L (徐嵩龄). Carbon cycling in terrestrial ecosystem of China and its influence on global climate change// Wang G-C (王庚辰), Wen Y-P (温玉璞), eds. *Concentration and Emission Detection of Greenhouse and the Relevant Procedures*. Beijing: China Environmental Science Press, 1996: 129-139 (in Chinese)
- [44] Department of Urban Society and Economic Statistics, National Bureau of Statistics of China (国家统计局城市社会经济调查司). *China Urban Life and Price Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2008 (in Chinese)
- [45] Xu M-Q (许美琪). Chinese furniture industry: Marketplace and resource. *International Wood Industry* (国际木业), 2004(3): 3-7 (in Chinese)
- [46] Wen J-S (温家石), Ge Y (葛滢), Jiao L (焦荔), et al. Does urban land use decrease carbon sequestration? A case study in Taizhou, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2010, **34**(6): 651-660 (in Chinese)
- [47] Lorenz K, Lal R. Biogeochemical C and N cycles in urban soils. *Environment International*, 2009, **35**: 1-8
- [48] Wang XL, Ning LM, Yu J, et al. Changes of urban wetland landscape pattern and impacts of urbanization on wetland in Wuhan City. *Chinese Geographical Science*, 2008, **18**: 47-53
- [49] Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, et al. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, **298**: 156-159
- [50] Zhang T-S (张同升), Liang J-S (梁进社), Song J-P (宋金平). Summarization of studies on measuring of urbanization in China. *Urban Studies* (城市发展研究), 2002, **9**(2): 36-41 (in Chinese)
- [51] Fang JY, Chen AP, Peng CH, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, **292**: 2320-2322
- [52] Fang J-Y (方精云), Yang Y-H (杨元合), Ma W-H (马文红), et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China's grasslands. *Science China Life Sciences* (中国科学: 生命科学), 2010, **40**(7): 566-576 (in Chinese)
- [53] Population Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations. *World Population 2007*. New York: Population Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations, 2007
- [54] Gregg JS, Andres RJ, Marland G. China: Emissions pattern of the world leader in CO₂ emissions from fossil fuel consumption and cement production. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**: L08806
- [55] Sakin E, Deliboran A, Sakin ED, et al. Organic and inorganic carbon stocks and balance of Adana city soils in Turkey. *African Journal of Agricultural Research*, 2010, **5**: 2737-2743

作者简介 朱超,男,1987年生,硕士研究生.主要从事城市生态学研究. E-mail: interzhuc@pku.edu.cn

责任编辑 杨弘
