

DOI: 10.5846/stxb201305030913

周健, 肖荣波, 庄长伟, 邓一荣. 城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例. 生态学报 2013, 33(18): 5865–5873.

Zhou J, Xiao R B, Zhuang C W, Deng Y R. The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou. Acta Ecologica Sinica 2013, 33(18): 5865–5873.

城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果 ——以广州为例

周 健, 肖荣波*, 庄长伟, 邓一荣

(广东省环境科学研究院, 广州 510045)

摘要: 城市森林及其管理相关政策作为减少 CO₂ 排放的有效策略得到了较为广泛的关注。采用材积源生物量方程与净初级生产力方法来定量分析了广州市城市森林碳储量和碳固定量。根据化石能源使用量及其碳排放因子核算了广州城市能源碳排放, 最后评估了城市森林碳抵消效果。结果显示广州市城市森林碳储量为 654.42×10⁴ t, 平均碳密度为 28.81 t/hm², 而森林碳固定量为 658732 t/a, 平均固碳率为 2.90 t·hm⁻²·a⁻¹。2005—2010 年广州市年均能源碳排放则达到 2907.41×10⁴ t。广州城市森林碳储量约为城市年均能源碳排放的 22.51%, 其通过碳固定年均能够抵消年均碳排放的 2.27%, 不过从城市森林综合效益来看其仍是城市低碳发展重要举措之一。分析了林型组成和林龄结构对于广州森林碳储量和碳固定量的影响, 并从森林管理角度为城市森林碳汇提升提出建议。这些结果和讨论有助于评估城市森林碳汇在抵消碳排放中所起的效果。

关键词: 城市森林; 碳储量; 碳固定量; 能源碳排放; 碳抵消

The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou

ZHOU Jian, XIAO Rongbo*, ZHUANG Changwei, DENG Yirong

Guangdong Provincial Academy of Environment Science, Guangzhou 510045, China

Abstract: Urban forest and relevant management policies have been widely considered as a tool to mitigate carbon dioxide (CO₂) emissions. However, the urban forest structure, function and role in carbon (C) offsets of Chinese urban forests are little understood. The main objective of this study was to evaluate the C storage and sequestration by urban forests and C emissions from energy consumption by urban energy consumption in Guangzhou, and analyse the effect of urban forests offsetting the C emissions from energy use. This paper also discussed the relationship between urban low carbon development and forest C sink, and explored the management practices for improving Guangzhou's urban forest function of offsetting C emissions. Guangzhou is located in north side of the Pearl River, along southeastern coast of China. The forests in Guangzhou includes five main types: *Eucalyptus*, *Plus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata*, economic forest and evergreen broad-leaved forest. C storage and sequestration were quantified using urban forest inventory data and by applying volume-derived biomass equations and other models related to net primary productivity (NPP). C emissions from urban energy use were estimated by accounting for fossil fuel use and C emission factors. Total C storage by Guangzhou's urban forests was estimated at 654.42×10⁴ t, and average C density was 28.81 t/hm². C storage in different districts ranged from 1.50×10⁴ t to 354.99×10⁴ t, as in the following order: Conghua>Zengcheng>Huadu>Baiyun>Luogang>Panyu>Tianhe>Huangpu. C storage of evergreen broad-leaved forest and young age class forest were respectively 530.67×10⁴ t and 271.86×10⁴ t, which had played a chief role in forest total C storage in terms of forest type and age class. C sequestration by urban forests was 658,732 t/a, with an average C sequestration rate was 2.90 t·hm⁻²·a⁻¹. The spatial distribution of C

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201601); 国家科技支撑计划子课题(2012BAC13B04-06, 2012BAC20B12-06); 广东省科技重大专项(2012A010800011-4)

收稿日期: 2013-05-03; 修订日期: 2013-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ecxiaorb@163.com

<http://www.ecologica.cn>

sequestration in Guangzhou was imbalanced: most of C was sequestered in exurb just like Conghua and Zengcheng. The C sequestration percentages of *Eucalyptus*, *Plus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata*, economic forest and evergreen broad-leaved forest were 6.25%, 8.13%, 3.67%, 1.48% and 82.25% respectively. C sequestration rate decreased with increasing forest age. For *Eucalyptus*, C sequestration for young, middle-aged, premature, mature and post-mature forests decreased with age from $3.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ to $2.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Results were similar for *Plus massoniana* which decreased from $1.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ to $1.34 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, for *Cunninghamia lanceolata* from $4.06 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ to $2.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and for evergreen broad-leaved forest from $4.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ to $3.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Average annual C emissions of urban energy use from 2005 to 2010 in Guangzhou were $2907.41 \times 10^4 \text{ t}$. Therefore, the C stored by urban forests equaled 22.51% of the average annual C emission from fossil fuel use, and C sequestration could offset 2.27% of the average annual C emission in Guangzhou. Urban forest's C sequestration had a small contribution on urban carbon reduction, but it is still one of the important measures of low carbon development from its comprehensive benefits such as releasing Oxygen, air purification, VOC (volatile organic compounds) management, stormwater runoff capture, building energy saving, aesthetics and recreation. Furthermore, this paper also analyzed the impacts of forest composition and forest age structure on C storage and sequestration of urban forests in Guangzhou, and gave suggestions on improving forest C sink to enhance C offset effect through the forest management.

Key Words: urban forest; carbon storage; carbon sequestration; energy carbon emission; carbon offset

当前,人类开始面对越来越严重的气候变化形势,大气中 CO_2 浓度从工业革命前的 $280 \mu\text{mol/mol}$ 升至 2011 年的 $390 \mu\text{mol/mol}$ [1]。如果不采取任何措施来缓解大气中 CO_2 浓度的积累,则可能严重威胁生态和社会经济系统 [2]。城市是化石燃料燃烧的集中区域,消耗能源占据全球 75%,温室气体排放量占世界的 80% [3]。城市区域由于大面积的不透水地面和高能源消耗,同比周围乡村温度更高 [4-6],因此气候变化对城市的影响会更为显著。

城市森林作为城市生态系统的重要组成部分,具有环境、经济和社会的多重效益,在减少 CO_2 缓解气候变化影响中扮演重要角色,主要方式包括光合作用固碳、森林土壤固定有机碳、遮荫和挡风来减少建筑物制冷和采暖的能源消耗碳排放 [7-10]。如美国城市森林碳储量和年均固碳量分别达到了 $7 \times 10^9 \text{ t}$ 和 $2.28 \times 10^8 \text{ t}$ [7],而城市森林所引起的建筑节能的碳减排则为固碳量的 3 倍多 [11]。城市森林作为城市应对气候变化行动也已经在一些城市里面得到了推广(如北京、美国迈阿密戴德县、波特兰、芝加哥和布鲁克林区、韩国的首尔) [12-16]。

目前,中国城市森林碳汇研究仍主要集中在碳储量和固碳量的核算 [17-22],但罕有城市森林碳汇对于碳排放的抵消效果研究,而城市森林碳汇对于城市低碳发展具有重要意义。本文则以广州市城市森林为研究对象,研究目的包括:定量广州市城市森林碳储量和碳固定量;判断城市森林在抵消城市能源碳排放中所起的作用;对比分析广州市与其他城市森林碳储量和碳固定量;讨论城市低碳发展与森林碳汇关系;总结广州市城市森林碳汇影响因素及管理启示。本研究对于评估中国城市森林在减少大气 CO_2 减缓气候变化的现状和潜力有着积极意义,也为城市碳管理和低碳发展提供了参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

广州市是广东省省会,地处中国大陆南方,广东省的中南部,珠江三角洲的北缘,接近珠江流域下游入海口 ($112^\circ 57' - 114^\circ 3' \text{E}$, $22^\circ 26' - 23^\circ 56' \text{N}$)。广州市土地类型多样,适宜性广,地形复杂,地势东北高,西南低,其中东北部为中低山区,中部为丘陵、台地,南部为珠江三角洲冲积平原。气候属于亚热带海



图1 广州市行政区划示意图

Fig. 1 The administrative zoning map of Guangzhou

洋性季风气候,年平均日照时数为 1875.1—1959.9 h,全年平均气温在 21.5—22.2 ℃ 之间,雨水资源丰富,平均年降水量在 1800 多 mm,年降水日数在 150d。植物有 198 科,487 属,1500—1600 种。广州现辖 10 区 2 市,市域面积总共为 7434.40 km²,其中城市建成区面积约为 1035 km²,中心城区建成区面积 533 km²,为华南第一大城市(图 1)。

2010 年广州城市森林面积为 3077.8 km²,其中林业用地面积 2946.8 km²,非林业用地面积 131 km²。全市森林活立木蓄积量 11720490 m³,森林覆盖率 41.4%,林木绿化率 44.8%。经过数十年的采伐利用和更新,广州市林分的龄组结构以幼中龄林为主,其中,幼龄林面积占 33.0%,中龄林面积占 30.6%,近熟林面积占 21.2%,成熟林面积占 9.9%,过熟林面积占 5.3%。

本文采用广州市森林资源清查资料的林班数据,调查年限从 2003—2010 年,其中包括了各类林型的小班属性信息,诸如区位、起源、龄级、面积和蓄积等。广州市城市森林林型分为桉树(*Eucalyptus*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、经济林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和常绿阔叶林 5 种,具体面积如表 1 所示。

表 1 广州市各行政区主要林型面积
Table 1 Area of major forest types by district in Guangzhou

行政区 District	桉树/hm ² <i>Eucalyptus</i>	马尾松/hm ² <i>Pinus massoniana</i>	杉木/hm ² <i>Cunninghamia lanceolata</i>	经济林/hm ² Economic forest	常绿阔叶林/hm ² Evergreen broad-leaved forest	合计/hm ² Total
从化	2883.03	25413.89	7042.57	65.19	89659.44	125064.13
增城	9500.57	10589.37	1296.64	2870.46	27540.56	51797.60
花都	4206.74	14537.09	936.62	724.16	7872.34	28276.95
天河	384.61	116.21	0.70	111.41	796.17	1409.10
白云	1308.74	2401.54	131.75	637.42	8609.80	13089.26
萝岗	468.11	256.34	94.90	422.62	2146.02	3387.99
番禺	1439.21	398.99	25.42	106.60	1350.69	3320.90
黄埔	97.05	491.52	1.45	4.47	206.61	801.10
合计 Total	20288.07	54204.96	9530.04	4942.32	138181.64	227147.02

1.2 研究方法

本文碳储量为当前城市森林植被生物量中所含的总碳量,而固碳量则表示年均树木通过净初级生产力(NPP)所固定的碳量。碳抵消指通过城市森林 NPP 固碳抵消城市能源消费中的碳排放量。碳密度和固碳率则分别为城市森林单位面积(hm²)的碳储量与碳固定量。

城市森林碳储量多依据森林资源或者建成区绿地清查数据,采用材积源生物量方程、生物量-胸径和树高模型等来计算干生物量同时乘以系数 0.5 得出^[7,9,19,21]。城市森林碳储量基于类似方法,不同林型的干生物量运用材积源生物量方程来进行核算(表 2)。NPP 表示植被通过光合作用所固定的有机碳扣除植被本身呼吸和死亡的部分,其能够说明植被从大气中的 CO₂ 净固定量^[22-23],因此本文城市森林碳固定量采用 NPP 乘以系数 0.5 来获得。植被生物量同其 NPP 之间存在着一定的函数关系,本文通过这种函数关系来估算 NPP 值(表 1)。具体碳储量和碳固定量计算公式如下:

$$C = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (C_{ji} \times A_{ji}) \quad (1)$$

式中 C 指城市森林碳储量(t)或碳固定量(t/a); C_{ji} 为第 j 个小班 i 个林型的碳储量(t/hm²)或碳固定量(t·hm⁻²·a⁻¹); A_{ji} 为第 j 个小班的第 i 个树种或林型的面积, hm²; m 为小班个数; n 为林型个数。

表 2 城市森林生物量和 NPP 估算方程
Table 2 Equations used to calculate urban forest biomass and NPP

林型 Forest type	生物量估算 Biomass estimate	NPP 估算 NPP estimate	参考文献 References
桉树 <i>Eucalyptus</i>	$B=0.7893V+6.9306$; $R^2=1.00$; $P<0.01$	$NPP=0.208B+1.836$; $R^2=0.94$; $P<0.01$	[24]
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	$B=0.5101V+1.0451$; $R^2=0.92$; $P<0.01$	$NPP=B/(0.238A+0.0304B)$; $R^2=0.83$; $P<0.001$	[25-26]
经济林 Economic forest	$B=23.7$; $R^2=N/A$	$NPP=9.2$; $R^2=N/A$	[24]
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	$B=0.3999V+22.5410$; $R^2=0.92$; $P<0.01$	$NPP=B/(0.636A-0.015B)$; $R^2=0.84$; $P<0.001$	[24, 26]
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	$B=0.6255V+91.0013$; $R^2=0.87$; $P<0.01$	$NPP=81.54B^{-0.353}$; $R^2=0.36$; $P<0.01$	[24, 27]

A: 林龄(a); B: 植被生物量(t/hm²); V: 森林蓄积量(m³/hm²); NPP(t·hm⁻²·a⁻¹)

<http://www.ecologica.cn>

广州市能源消耗碳排放主要基于 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 清单指南方法 ,即通过能源消耗量与排放因子乘积估算碳排放量。碳排放主要核算年份为 2005—2010 年 ,其中能源消费数据主要来自于各年份广州市统计年鉴中能源平衡表 ,具体核算公式如下:

$$E_c = \sum_i F_i \times EF_i \tag{2}$$

式中 E_c 为城市能源消费碳排放量 ,tC; F_i 为 i 类型能源消费总量 , 10^4 tce (ton of standard coal equivalent) ; EF_i 为 i 类型能源碳有效碳排放因子。广州市本地所需化石能源主要包括外输电力、煤炭、各种油品、液化石油气等 ,具体排放因子如表 3 所示 ,各种能源消耗量见表 4。

表 3 各类能源碳排放因子

Table 3 Carbon emission factor by type of fuel

化石能源 Fossil fuel	碳排放因子 ^a C emission factor(/tC/TJ)	氧化率 contribution rate/%	有效碳排放因子 ^b Effective C emission factor/(tC/ 10^4 tce)
原煤 Coal	25.8	100	7561.36
焦炭 Coke	29.2	100	8557.83
汽油 Gas	18.9	100	5539.15
柴油 Diesel	20.2	100	5920.15
燃料油 Fuel oil	21.1	100	6183.90
液化石油气 LPG	17.2	100	5040.90
外输热力 Import heat			10112.8 ^c
外输电力 Import electricity			0.2392 tC/MWh ^d

a: 化石能源碳排放因子参考^[28]; b: 有效碳排放因子根据碳排放因子与标准煤转换系数综合而来; 各种能源同标准煤转换系数参考国家标准《综合能耗计算通则(GB/T2589—2008) 》; c: 外输热力参考广州市 2010 年本地供热碳排放因子; d: 电力排放系数参考 2009 中国电网基准线排放因子南方区域电网 66 万千瓦基准线排放因子^[29]

表 4 广州市 2005—2010 年主要能源消费量

Table 4 Major energy consumption in Guangzhou from 2005 to 2010

年份 Year	煤炭 ^a Coal	焦炭 Coke	汽油 Gas	柴油 Diesel	燃料油 Fuel oil	液化石油气 LPG(Liquefied Petroleum Gas)	外输热力 Import heat	外输电力 Import electricity
2005	1750.06	59.5	278.71	396.61	550.75	174.17		754.71
2006	1871.52	63.77	298.24	425.42	450.92	212.42		1224.73
2007	1906.61	71.85	335.09	504.16	414.72	269.90		1506.00
2008	1928.12	68.95	440.41	540.10	404.38	286.79		2344.17
2009	1904.69	73.45	502.10	604.51	422.53	359.01	5.55	2632.39
2010	2023.12	68.12	605.02	700.31	432.58	392.44	10.99	2925.45

外输电力单位为 10^4 MWh ,其余能源全部为 10^4 tce; a: 煤炭中剔除了作为工业生产炼焦、炼油原料以及损失的煤炭量

2 结果与分析

2.1 广州市城市森林碳储量

广州城市森林碳储量总计约 654.42×10^4 t ,并且随着林型(表 5) 和林龄(表 6) 的不同而变化。其中从化、增城和花都碳储量分别为 354.99×10^4 t、 149.54×10^4 t 和 69.73×10^4 t ,占据了广州市森林碳储量 80% 以上。各林型中 ,按碳储量从大到小依次为常绿阔叶林、马尾松、桉树、杉木和经济林 ,其中常绿阔叶林碳储量达到了 530.67×10^4 t ,比重在 78% 以上 ,远超其他林型。林龄方面 ,幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林分别占据了森林碳储量的 33.46%、26.16%、19.40%、13.66% 和 7.33% 。由表 3 可知 ,广州市城市森林平均碳密度为 28.81 t/hm² ,变动范围从经济林的 11.85 t/hm² 到常绿阔叶林的 45.51 t/hm² 。不同行政区域碳密度差异较大 ,变动范围从黄埔区的 18.67 t/hm² 到天河区 38.57 t/hm² 。大体上 ,广州市处于城区和近郊的城市森林碳密度要大于远郊 ,如处于城区和近郊天河区与白云区其碳密度分别为 38.57 t/hm² 和 37.29 t/hm² ,而处于远郊的从化(28.38 t/hm²) 和增城(28.87 t/hm²) 等则均要低于 30 t/hm² 。

不同森林龄组碳密度差别也较大 ,幼龄林碳密度普遍要低于中龄林和成熟林(表 6) 。桉树、马尾松、杉木和常绿阔叶林幼龄林碳密度分别为 16.25 、 10.94 、 19.08 t/hm² 和 44.69 t/hm² 。同比成熟龄组中 4 种主要林型碳密度分别为 24.98 、 21.35 、 30.78 t/hm² 和 48.13 t/hm² 。其中幼龄林、中龄林和近熟林中碳储量超过了广州市 79% 总碳储量 ,而同比成熟林和过熟林则不

足总碳储量的 21%。

表 5 广州市各行政区主要林型碳储量与碳密度

Table 5 Urban forest carbon storage and density for major forest type and by district in Guangzhou

行政区 District	碳储量 Carbon storage /(10 ⁴ t)	碳密度 C density/(t/hm ²)					均值 ^a Mean
		桉树 <i>Eucalyptus</i>	马尾松 <i>Plus massoniana</i>	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	经济林 Economic forest	常绿阔叶林 Evergreen broad- leaved forest	
从化 Conghua	354.99	15.44	16.80	23.36	11.85	54.17	28.38
增城 Zengcheng	149.54	15.95	15.20	18.99		38.18	28.87
花都 Huadu	69.73	17.25	12.03	26.37		48.67	24.66
天河 Tianhe	5.44	19.68	9.75	18.49		45.80	38.57
白云 Baiyun	48.81	17.47	17.24	23.01		47.37	37.29
萝岗 Luogang	12.94	22.34	13.28	19.66		46.42	38.21
番禺 Panyu	11.46	22.88	16.76	21.91		42.36	34.52
黄埔 Huangpu	1.50	20.63	7.53	21.13		41.14	18.67
总和/均值 Total/mean	654.42	18.96	13.57	21.62		45.51	28.81
S. E.	N/A	2.66	3.36	2.46	N/A	4.64	N/A

S. E.: 平均标准误差; N/A: 无相关数据; a: 此处均值根据各区总碳储量/总面积所得

表 6 广州市不同龄组类型碳储量和碳密度

Table 6 Carbon storage and density of major urban forest type by forest stand age in Guangzhou

龄组	桉树		马尾松		杉木		经济林		常绿阔叶林		比重	
Age class	Eucalyptus		Plus massoniana		Cunninghamia lanceolata		Economic forest		Evergreen broad-leaved forest			Percent /%
	/(t/hm ²)	/(10 ⁴ t)	/(t/hm ²)	/(10 ⁴ t)	/(t/hm ²)	/(10 ⁴ t)	/(t/hm ²)	/(10 ⁴ t)	/(t/hm ²)	/(10 ⁴ t)		
幼 Young	16.25	12.43	10.94	15.73	19.08	5.38	11.85	1.60	44.69	182.72	33.29	
中 Middle age	18.2	16.04	15.34	29.22	23.68	7.03		1.60	47.06	116.81	26.08	
近 Premature	23.45	5.84	18.83	13.46	26.84	1.88		1.60	47.29	104.22	19.41	
成 Mature	24.98	2.17	21.35	3.48	30.78	1.32		1.59	48.13	81.33	13.74	
过 Post-mature	22.98	0.54	23.44	1.25	N/A	N/A		1.59	46.26	45.58	7.48	
均值/总和 Mean/Total	21.17	37.02	17.98	63.14	25.10	15.61		7.98	46.69	530.67	100	
S. E.	3.74	N/A	4.96	N/A	4.95	N/A	N/A	N/A	1.30	N/A	N/A	

经济林碳储量为 7.98×10⁴ t, 由于没有龄组分级, 为方便计算将其平均分配到各林龄; N/A: 无相关数据

2.2 城市森林碳固定量

由表 7 可知, 广州市城市森林碳固定量为 658732 t/a, 平均固碳率为 2.90 t·hm⁻²·a⁻¹, 其空间分布同样呈现不均衡状态, 其超过 80% 的碳固定于城市远郊区域。远郊的从化市碳固定量最高, 达到了 334351 t/a (碳固定总量 50.76%), 而最小则位于黄埔仅为 1391 t/a (碳固定总量 0.21%)。不同林型方面碳固定量差异明显, 常绿阔叶林碳固定量为 719318 t/a, 其比重高达总量的 82.25%, 而马尾松、桉树、杉木和经济林等则占总碳固定比重分别为 8.13%、6.25%、3.67% 和 1.48%。固碳率同样受同林型和龄组影响较大 (图 2)。其中平均固碳率最高为常绿阔叶林, 为 3.91 t·hm⁻²·a⁻¹, 而马尾松最低仅为 1.65 t·hm⁻²·a⁻¹。其中固碳率按照幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林的林龄变化顺序均呈现减少趋势, 如桉树随着林龄变化从 3.06 t·hm⁻²·a⁻¹ 降低到 2.35 t·hm⁻²·a⁻¹, 马尾松从 1.99 t·hm⁻²·a⁻¹ 降低到 1.34 t·hm⁻²·a⁻¹, 杉木从 4.06 t·hm⁻²·a⁻¹ 降低到 2.61 t·hm⁻²·a⁻¹, 常绿阔叶林从 4.17 t·hm⁻²·a⁻¹ 降低到 3.68 t·hm⁻²·a⁻¹。

2.3 城市森林抵消能源碳排放效果

广州市能源碳排放量 2010 年为 3513.98×10⁴ t^①, 同比 2005 年的 2372.29×10⁴ t 年均增长 8%, 年均碳排放量为 2907.41×10⁴ t (图 3)。同期广州市城市森林碳固定量为 658732 t/a (表 7), 按本文碳抵消定义, 年均共抵消了城市能源碳排放的 2.27%。

① 此处为 C 排放, 非 CO₂, 下同

同时,定量城市森林碳储量对于长期碳汇的规划和管理也有着重要意义。因此,广州市城市森林碳储量为 $654.42 \times 10^4 \text{ t}$,约为 2005—2010 年同期广州市能源碳排放总量均值 $2907.41 \times 10^4 \text{ t}$ 的 22.51%。

表 7 广州不同行政区主要林型的碳年固定量
Table 7 Urban forest carbon sequestration for major forest types by district in Guangzhou

行政区 District	碳固定量 C sequestration/(t/a)					总和 Total	比重 Percent/%
	桉树 <i>Eucalyptus</i>	马尾松 <i>Plus massoniana</i>	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	经济林 Economic forest	常绿阔叶林 Evergreen broad- leaved forest		
从化 Conghua	3882	30575	12216	110	287567	334351	50.76
增城 Zengcheng	23832	19736	2753	7616	123375	177311	26.92
花都 Huadu	11148	15411	1055	1761	35029	64404	9.78
天河 Tianhe	2038	140	N/A	320	3433	5930	0.90
白云 Baiyun	4943	4195	265	1676	37671	48751	7.40
萝岗 Luogang	2084	342	117	1178	10199	13920	2.11
番禺 Panyu	6363	439	50	280	5543	12675	1.92
黄埔 Huangpu	399	274	1	12	705	1391	0.21
总和 Total	54689	71112	16457	12952	503523	658732	100
比重 Percent/%	8.30	10.80	2.50	1.97	76.44%	100	

N/A: 无相关数据

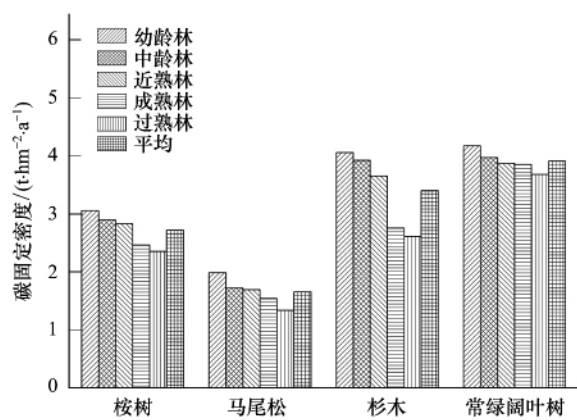


图 2 广州城市森林主要林型分龄固碳率

Fig. 2 Carbon sequestration rate for forest types by age class in Guangzhou

经济林没有区分不同龄组固碳率

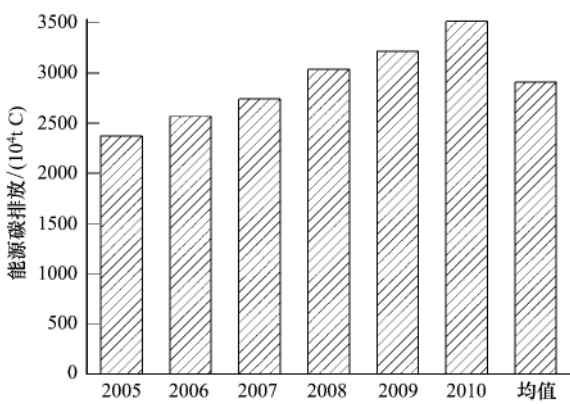


图 3 2005—2010 年广州市能源碳排放量

Fig. 3 Energy carbon emission of Guangzhou from 2005 to 2010

3 结论与讨论

3.1 城市森林碳储量与碳固定量比较分析

广州城市森林平均碳密度为 28.81 t/hm^2 , 低于自然条件下全国 (41.32 t/hm^2)^[27] 和世界森林 (86 t/hm^2)^[30] 的平均水平。本文中,广州市桉树、马尾松、杉木和常绿阔叶林平均碳密度分别为 18.96 、 13.57 、 21.62 t/hm^2 和 45.51 t/hm^2 , 分别小于自然条件下同种林型碳密度 20.76 、 56.25 、 40.55 t/hm^2 和 82.12 t/hm^2 ^[26]。除桉树外,其他林型城市森林碳密度基本为自然条件下的 50%,这也和 McPherson 的研究相似^[11]。

广州城市森林较低的碳密度可能是由于林龄结构组成所引起。广州当前城市森林总面积中 84.8% 为非成熟林,其中 33% 又为幼龄林,而成熟林和过熟林不足 16%。因此广州城市森林在碳固定方面有着较大潜力,并且在未来抵消城市能源碳排放过程中会起更大作用。成熟的森林仍具有固定碳的能力,但同幼龄林则速率会下降许多^[31],特别是树木生长的前 20a^[32]。此外,由于城市建筑和不透水界面的大量存在以及人类的养护管理等导致的树木密度的减少也会对碳储量造成影响,而研究表明城市区域同比自然地域其树木密度和覆盖度更低^[11]。

3.2 城市低碳发展与森林碳汇

随着城市病和气候变化问题日益严峻,发展低碳经济、建设低碳城市已经成为城市可持续发展的重要选择,而城市低碳发

展要从能源、产业、交通、建筑、消费以及碳汇等多角度来综合考量^[33-34]。综合来看,城市森林碳固定抵消能源碳排放基本均在5%以下,其中杭州最高达到了4.76%,而上海最低不到0.01%(表8)。不过不同森林碳汇研究的范围、方法和数据等有所差异,并不能进行精确比较,因此对比仅具有参考意义。但同比而言,能效提高、能源替代、产业升级和交通调整等却是城市节能减排的主要手段,占有较大贡献率。如曹斌等研究表明,2015年厦门能源替代和热电联产在城市减排贡献率达到了80%和11%^[35],但厦门市城市森林碳汇则由于城市化的推进却一直呈现下降趋势^[21]。不过本文森林碳汇不含灌木层、草本层、凋落物层和土壤层,因此固碳效果会比实际要小。特别是土壤碳汇,其通常为森林碳汇数倍,如韩国春川(Chuncheon)研究表明土壤占据整个碳库的54%^[12]。此外,城市森林除了固碳作用外,还包括释氧、空气净化、VOC(volatile organic compounds)挥发量管理、雨水截留、建筑节能、美学价值和游憩功能等综合效益^[11,36]。其中建筑节能主要通过高大乔木在夏季的遮荫和蒸腾作用以及冬季减风作用来减少建筑制冷和采暖能耗,如美国萨克拉门托市城市森林建筑节能减排量约为净固碳量的3.18倍^[11]。因此,尽管城市森林在直接固碳方面对于低碳城市建设贡献率较低,但从长期发展来看,其多重的生态服务价值、美学以及为居民提供游憩场所等功能仍是城市低碳发展的重要政策措施之一。

表8 不同城市碳固定与能源碳排放

Table 8 Carbon sequestration and energy C emission in several cities

城市 City	能源碳排放 Energy C emission /(10 ⁴ t/a)	碳固定 C sequestration /(10 ⁴ t/a)	碳抵消比重 Percent of C offset/%	数据来源 Data source	
				碳排放 C emission	碳固定 C sequestration
广州 Guangzhou	2907.41(2005—2010)*	65.87(2005—2010)	2.27	本文研究 This study	
北京 Beijing	4456.64(2007)	63.05(2005)	1.41	[18]	[37]
上海 Shanghai	5042.45(2007)	0.63(2007)	0.01	[38]	[17]
杭州 Hangzhou	2791.36(2010)	132.81(2010)	4.76	[39]	[40]
纽约 New York	1422.82(2008)	3.84(2002)	0.27	[41]	[7]
芝加哥 Chicago	987.27(2005)	4.01(2002)	0.41	[16]	[7]
韩国春川 Chuncheon, Korea	24.6(1994—1996)	0.43(1994—1996)	1.75	[12]	

* () 中为研究年份,碳固定均为城市森林乔木层固定量

3.3 碳汇影响因素及森林管理启示

林龄是影响城市森林碳储量和碳固定量的一项重要因素。碳密度随着林龄增加而普遍递增,如马尾松过熟林碳密度为23.44 t/hm²,幼龄林为10.94 t/hm²,仅为前者的46.67%(表6)。固碳率与碳密度则呈现相反趋势,林龄越老固碳率越低,马尾松过熟林固碳率仅为1.34 t·hm⁻²·a⁻¹,而幼龄林固碳率为1.99 t·hm⁻²·a⁻¹。固碳率与森林生长速率息息相关,因此对于速生林或者出于快速生长期的森林来说数值越高,然而固定速率会随着树木的成熟而减小,同时随着森林退化或者面积缩小枯死树木呼吸作用超过活立木碳固定作用,将从碳汇转化为碳源^[8]。随着森林林龄过熟其碳固定量会逐渐减少,所以在过熟林区域种植新树来恢复植被的固碳能力以及保护原始郊野森林区域非常必要^[42]。广州过熟林在城市森林总面积不足6%,但随着时间推移,近熟林和成熟林会陆续转化为过熟林,因此保持城市森林的更新对于广州城市森林碳汇的稳定同样重要。

林型会影响城市森林碳密度和固碳率:如广州马尾松碳密度为13.57 t/hm²,而常绿阔叶林达到了45.5 t/hm²,后者为前者的3.35倍;固碳率方面也差异明显,其中常绿阔叶林固碳率要高于针叶林(表5,表6和图2)。广州地处亚热带气候,亚热带常绿阔叶林占据了城市森林的主体。因此,选择合适的本土常绿阔叶林种对于提升广州城市森林碳储量具有重要意义。同时,提高城市森林的物种多样性和种层结构(包括草地、灌木和林木)同样也是提升碳储量的重要管理措施^[43]。此外,城市适合种植和养护的树种选择应确保更长的生长寿命来保证固碳能力^[44]。提升碳汇的同时也要控制碳排放的产生,因为城市森林的养护管理会通过树木管理养护活动(如灌溉、修剪、移栽和施肥等)和运输导致CO₂的排放^[12,44]。所以,从能源节约立场种植长寿命、低养护树种以及减少养护活动相关化石能源使用会使城市森林碳抵消效益最大化。

3.4 研究不足及展望

本文不含灌木层、土壤以及枯枝落叶层等碳汇,对于城市森林诸如修剪、移栽、灌溉、施肥和交通运输等养护管理活动产生的碳排放也没有进行分析。除此之外,本文也没有考虑城市森林的遮荫、蒸腾和降低风速等作用所产生的节能碳减排作用。随着研究的进一步开展以及相关数据的获得,上述各种不足将会得到解决,从而更为合理的评估城市森林碳汇潜力和碳抵消效果。

References:

- [1] World Meteorological Organization. WMO Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2011. Geneva: World Meteorological Organization, 2011: 1-4.

<http://www.ecologica.cn>

- [2] Karl T R, Nicholls N, Gregory J. The coming climate. *Scientific American*, 1997, 276(5): 78–83.
- [3] Gu Z L, Tan Z B, Liu W, Yu T F, Han Q, Liu H L, Dai Y X, Liu Z L, Zheng S Q. A Study on climate change, carbon emissions and low-carbon city planning. *Urban Planning Forum*, 2009, (3): 38–45.
- [4] Pan J H, Yang W M. Spatiotemporal pattern of urban heat island in Lanzhou of Northwest China based on fractal net evolution approach and spectral mixture analysis. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(1): 178–185.
- [5] Pan J H, Han W C. Urban expansion and its heat island response in Lanzhou City based on remote sensing analysis. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(11): 2597–2603.
- [6] Xiao R B, Ouyang Z Y, Li W F, Zhang Z M, Wang X K. Spatial-temporal distribution and causes of urban heat islands. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, 27(2): 230–236.
- [7] Nowak D J, Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 381–389.
- [8] Pataki D E, Alig R J, Fung A S, Golubiewski N E, Kennedy C A, McPherson E G, Nowak D J, Pouyat R V, Romero Lankao P. Urban ecosystems and the North American carbon cycle. *Global Change Biology*, 2006, 12(11): 2092–2102.
- [9] Wang Z H, Liu H M, Guan Q W, Wang X J, Hao J P, Ling N, Shi C. Carbon storage and density of urban forest ecosystems in Nanjing. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2011, 35(4): 18–22.
- [10] Liu C F, He X Y, Chen W, Zhao G L, Li L, Xu W D. Ecological benefit evaluation of urban forests in Shenyang City based on QuickBird image and CITYgreen model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 1865–1870.
- [11] McPherson E G. Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture*, 1998, 24(4): 215–223.
- [12] Jo H K. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64(2): 115–126.
- [13] Escobedo F, Varela S, Zhao M, Wagner J E, Zipperer W. Analyzing the efficacy of subtropical urban forests in offsetting carbon emissions from cities. *Environmental Science & Policy*, 2010, 13(5): 362–372.
- [14] City of Portland Bureau of Planning and Sustainability. City of Portland and Multnomah County: Climate Action Plan 2009. Portland, 2009.
- [15] Beijing Municipal Bureau of Landscape and Forest. Beijing landscape and greening action plan on climate change (2011–2015). Beijing, 2011.
- [16] City of Chicago. Chicago Climate Action Plan. Chicago, 2008.
- [17] Xu F, Liu W H, Ren W L, Zhong Q Y, Zhang G L, Wang K Y. Effects of community structure on carbon fixation of urban forests in Shanghai, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(3): 439–447.
- [18] Liu C L, Chen C C, Chen Q, Zhu S L, Wang H H, Li Z. Evolution mechanisms of CO₂ emissions in Beijing City during the Period 1997–2007. *Resources Science*, 2010, 32(2): 235–241.
- [19] Liu C F, Li X M. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2012, 11(2): 121–128.
- [20] Yang J, McBride J, Zhou J X, Sun Z Y. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2005, 3(2): 65–78.
- [21] Ren Y, Wei X, Wei X H, Pan J Z, Xie P P, Song X D, Peng D, Zhao J Z. Relationship between vegetation carbon storage and urbanization: A case study of Xiamen, China. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(7): 1214–1223.
- [22] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, Moore B, Vorosmarty C J, Schloss A L. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363(6426): 234–240.
- [23] Peng C H, App M J. Modelling the response of net primary productivity (NPP) of boreal forest ecosystems to changes in climate and fire disturbance regimes. *Ecological Modelling*, 1999, 122(3): 175–193.
- [24] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica*, 1996, 16(5): 497–508.
- [25] Zhou G Y. Measures to increase carbon sink in Guangzhou based on carbon storage dynamics in recent 10 years. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2007, 5(6): 24–27.
- [26] Zhao M, Zhou G S. Estimation of biomass and net primary productivity of major planted forests in China based on forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 2005, 207(3): 295–313.
- [27] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation in China and its relationship with climatic factors. *Climatic Change*, 2006, 74(1–3): 175–189.
- [28] Eggleston S, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [29] Nation Development and Reform Commission. The announcement of published about China's regional power grid of baseline emission factor of low carbon technology fossil fuels grid-connected power generation project in 2009. [2013–3–15]. http://www.ndrc.gov.cn/tztg/t20090901_299579.htm
- [30] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 733–740.

- [31] Grimmond C S B, King T S, Cropley F D, Nowak D J, Souch C. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. *Environmental Pollution*, 2002, 116(S1): S243-S254.
- [32] Klöpffer W. Life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 1997, 4(4): 223-228.
- [33] Qin R C, Zhang L J, Lu F X, Yan W Y, Wang X. Progresses of low-carbon city research. *Progress in Geography*, 2010, 29(12): 1459-1469.
- [34] Liu W L, Wang C. Practice and patterns of low carbon city development. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(4): 17-22.
- [35] Cao B, Lin J Y, Cui S H, Tang L N. Scenario analysis of reduction potentials of energy demand and GHG emissions based on LEAP model in Xiamen City. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3358-3367.
- [36] Ma N, He X Y, Shi X F, Chen W. Assessment of urban forest economic benefits based on i-Tree model: Research progress. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(4): 810-817.
- [37] Fan D X, Yu X X, Yue Y J, Niu L L, Gao Z L, Ma L Y. Forest carbon storage and its dynamics in Beijing. *Journal of Beijing Forest University*, 2008, 30(S2): 117-120.
- [38] Guo R, Cao X J, Li F T. *Energy Carbon Emission of Shanghai 2050*. Shanghai: Tongji University Press, 2011.
- [39] Hangzhou Government. *Hangzhou Twelve-Five low carbon development plan*. Hangzhou, 2011.
- [40] Zhao M, Kong Z H, Escobedo F J, Gao J. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(4): 807-813.
- [41] Dickinson J, Tenorio A. Inventory of New York City Greenhouse Gas Emissions (2011). [2013-3-15]. www.nyc.gov/html/om/pdf/2011/pr331-11_report.pdf
- [42] Wu C X, Xiao Q F, McPherson E G. A method for locating potential tree-planting sites in urban areas: A case study of Los Angeles, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2008, 7(2): 65-76.
- [43] Iverson L R, Prasad A M, Matthews S N, Peters M. Estimating potential habitat for 134 eastern US tree species under six climate scenarios. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254(3): 390-406.
- [44] Nowak D J, Stevens J C, Sisinni S M, Luley C J. Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *Journal of Arboriculture*, 2002, 28(3): 113-122.

参考文献:

- [3] 顾朝林, 谭纵波, 刘宛, 于涛方, 韩青, 刘合林, 戴亦欣, 刘志林, 郑思齐. 气候变化、碳排放与低碳城市规划研究进展. *城市规划学刊*, 2009, (3): 38-45.
- [4] 潘竟虎, 杨旺明. 基于分形网络演化算法和混合光谱分解的兰州市中心城区热岛的时空格局. *生态学杂志*, 2013, 32(1): 178-185.
- [5] 潘竟虎, 韩文超. 兰州中心城区用地扩展及其热岛响应的遥感分析. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2597-2603.
- [6] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 张兆明, 王效科. 城市热岛时空特征及其影响因素. *气象科学*, 2007, 27(2): 230-236.
- [9] 王祖华, 刘红梅, 关庆伟, 王晓杰, 郝俊鹏, 凌宁, 石聪. 南京城市森林生态系统的碳储量和碳密度. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(4): 18-22.
- [10] 刘常富, 何兴元, 陈玮, 赵桂玲, 李玲, 徐文铎. 基于 QuickBird 和 CITYgreen 的沈阳城市森林效益评价. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1865-1870.
- [15] 北京市园林绿化局. *北京市园林绿化应对气候变化行动计划 (2011-2015 年)*. 北京, 2011.
- [17] 徐飞, 刘为华, 任文玲, 仲启钺, 张桂莲, 王开运. 上海城市森林群落结构对固碳能力的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 439-447.
- [18] 刘春兰, 陈操操, 陈群, 朱世龙, 王海华, 李铮. 1997 年至 2007 年北京市二氧化碳排放变化机理研究. *资源科学*, 2010, 32(2): 235-241.
- [24] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.
- [25] 周国逸. 广州市林业碳汇措施——从近 10 年森林碳汇动态谈起. *中国城市林业*, 2007, 5(6): 24-27.
- [29] 中国国家发展和改革委员会. 关于公布 2009 年中国低碳技术化石燃料并网发电项目区域电网基准线排放因子的公告. [2013-3-15]. http://www.ndrc.gov.cn/tztg/t20090901_299579.htm.
- [30] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [33] 秦耀辰, 张丽君, 鲁丰先, 闫卫阳, 王喜. 国外低碳城市研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(12): 1459-1469.
- [34] 刘文玲, 王灿. 低碳城市发展实践与发展模式. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(4): 17-22.
- [35] 曹斌, 林剑艺, 崔胜群, 唐立娜. 基于 LEAP 的厦门市节能与温室气体减排潜力情景分析. *生态学报*, 2010, 30(12): 3358-3367.
- [36] 马宁, 何兴元, 石险峰, 陈玮. 基于 i-Tree 模型的城市森林经济效益评估. *生态学杂志*, 2011, 30(4): 810-817.
- [37] 樊登星, 余新晓, 岳永杰, 牛丽丽, 高志亮, 马莉娅. 北京市森林碳储量及其动态变化. *北京林业大学学报*, 2008, 30(S2): 117-120.
- [38] 郭茹, 曹晓静, 李凤婷. *上海市能源碳排放 2050*. 上海: 同济大学出版社, 2011.
- [39] 杭州市政府. *杭州市“十二五”低碳城市发展规划*. 杭州, 2011.