

DOI: 10.5846/stxb202004281026

张彪, 谢紫霞, 高吉喜. 上海城市森林植被固碳功能及其抵消能源碳排放效果评估. 生态学报, 2021, 41(22): 8906-8920.

Zhang B, Xie Z X, Gao J X. Assessment on the carbon fixation of urban forests and their efficacy on offsetting energy carbon emissions in Shanghai. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8906-8920.

# 上海城市森林植被固碳功能及其抵消能源碳排放效果评估

张 彪<sup>1,2,\*</sup>, 谢紫霞<sup>1,2</sup>, 高吉喜<sup>3</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

**摘要:** 植被固碳功能是城市森林的重要生态服务之一, 但是定量揭示城市森林植被固碳功能空间格局及其抵消碳排放的研究较少。基于光合速率法和生物量法测算了上海城市森林植被的固定 CO<sub>2</sub> 功能, 并结合其空间分布格局与区域 CO<sub>2</sub> 排放状况对比分析了抵消能源 CO<sub>2</sub> 排放的成效。结果表明, 2017 年上海城市森林植被可固定 CO<sub>2</sub> 135.57 万 t, 约合单位面积固碳 17.02 t/hm<sup>2</sup>。上海城市森林植被的固定 CO<sub>2</sub> 功能呈现出“中间低、四周高”的空间格局, 崇明区和浦东新区的城市森林植被提供了近 52.8% 的固定 CO<sub>2</sub> 效益。2017 年上海市能源消费的 CO<sub>2</sub> 排放量高达 2.73 亿 t, 且呈现出“中间高、四周低”空间分布特征, 中心城区能源 CO<sub>2</sub> 排放约占 11.49%。整体来看, 上海城市森林植被可抵消 0.50% 的能源 CO<sub>2</sub> 排放, 但植被固定 CO<sub>2</sub> 功能与能源 CO<sub>2</sub> 排放的空间匹配较差, 中心城区城市森林植被的 CO<sub>2</sub> 抵消率仅为 0.08%。因此, 重点提升中心城区森林植被的固碳功能并加强海洋碳吸收功能的监测与利用尤其重要。

**关键词:** 城市森林植被; 固碳; 能源碳排放; 碳抵消; 上海市

## Assessment on the carbon fixation of urban forests and their efficacy on offsetting energy carbon emissions in Shanghai

ZHANG Biao<sup>1,2,\*</sup>, XIE Zixia<sup>1,2</sup>, GAO Jixi<sup>3</sup>

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China

**Abstract:** Accompanied by the expansion of cities worldwide and the massive use of fossil fuels, ever-increasing carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions in the urban areas contributes to global climate change. Studies from urban forest have reported that quantification of forest biomass and photosynthetic rate are of great significance to forest carbon cycle studies and climate-change mitigation. However, most former studies have focused on calculating CO<sub>2</sub> sequestration of urban forests at regional and urban scale, and few reports are available in the spatial differences of carbon fixation and the efficacy on offsetting energy CO<sub>2</sub> emissions in urban areas at finer scale. Therefore, based on field survey data and urban forests data derived from high-resolution Gaofen No.2 images, this paper modeled the spatial changes of CO<sub>2</sub> fixation by using assimilation method and biomass method in Shanghai, the most prosperous metropolitan area in China. We then mapped CO<sub>2</sub> emission in pixel size based on yearbook data, population distribution and NPP-VIIRS nighttime light data. The results

**基金项目:** 上海市环保科研项目

**收稿日期:** 2020-04-28; **接收日期:** 2021-06-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangbiao@igsrr.ac.cn

showed that the urban forest in Shanghai could annually absorb 1.36 million tons of  $\text{CO}_2$ , and the average  $\text{CO}_2$  fixation capacity reached 17.02 tons per hectare. The  $\text{CO}_2$  fixation capacity varied among different urban forest types. The broadleaved forest ranked first ( $18.22 \text{ t/hm}^2$ ) while the conifer forest manifested the lowest  $\text{CO}_2$  fixation capacity ( $7.11 \text{ t/hm}^2$ ). The spatial distribution of  $\text{CO}_2$  fixation presented a significantly uneven overall spatial distribution: low in the middle and high on all sides, and the forest in Chongming District and Pudong New District jointly contributed 52.8% of the total sequestered  $\text{CO}_2$ . In addition, the results indicated that the amount of  $\text{CO}_2$  emission from annual energy consumption reached 0.27 billion tons in 2017 and the amount of  $\text{CO}_2$  emission from center area occupied 11.49% of the total  $\text{CO}_2$  emission, being spatially high at center and low at fringe. Collectively, the annual  $\text{CO}_2$  sequestration of urban forest could only offset 0.5% of the annual energy  $\text{CO}_2$  emissions in Shanghai. Furthermore, the  $\text{CO}_2$  sequestration spatially mismatched the  $\text{CO}_2$  emission. Only 0.08% of energy  $\text{CO}_2$  emission in the center area could be offset by its urban forest. Therefore, these results can be used to help assess the actual role of urban forests in reducing atmospheric  $\text{CO}_2$  in Shanghai, and we suggested Shanghai should promote the carbon dioxide fixation capacity of urban forests in the center area, and strengthen the observation and utilization of carbon dioxide sequestration in the marine ecosystem.

**Key Words:** urban forest; carbon fixation; energy carbon emission; carbon offset; Shanghai

城市森林是指城市地域内以林木为主的片林、林带、散生树木等绿地系统<sup>[1]</sup>,可通过光合作用吸收降低空气中  $\text{CO}_2$  浓度,在减缓温室效应与应对气候变化中具有重要作用<sup>[2-3]</sup>。Nowak 等<sup>[4]</sup>评估美国城市森林碳储量和年均固碳量分别达到了 70 亿 t 和 2.28 亿 t。Davies 等<sup>[5]</sup>基于土地覆被和所有权的随机抽样统计,测算英国莱斯特(Leicester)碳储量达到 23.2 万 t。樊登星等<sup>[6]</sup>估算北京市森林碳储量已由 1988 年的 532 万 t 增加到 2003 年的 852 万 t,城市绿地的蒸腾降温效应可减少 24.3 万 t 的  $\text{CO}_2$  排放<sup>[7]</sup>。近年来随着城市能源碳排放的日益增加,植被固碳的抵消效应受到重视。比如,Russo 等<sup>[8]</sup>基于异速生长方程和森林清单数据发现,意大利博尔扎诺(Bolzano)街道树的固碳量可抵消交通运输  $\text{CO}_2$  排放量的 0.08%;Vaccari 等<sup>[9]</sup>基于生物量-蓄积量法,测算佛罗伦萨市(Florence)绿地抵消了 6.2%的人为  $\text{CO}_2$  排放量。此外,我国 35 个主要城市的绿地能够抵消化石能源碳排放的 0.01%—22.45%<sup>[10]</sup>。周健等<sup>[11]</sup>采用材积源生物量法与净初级生产力方法,发现广州城市森林的碳固定可年均抵消 2.27%的碳排放。不过当前研究重视城市森林碳固定及碳抵消效应的整体测算,而对其固碳效益的空间格局研究较少。

近年来上海城市人口和产业规模大幅增加,能源消费的  $\text{CO}_2$  排放量维持在 2.0—2.4 亿 t 之间<sup>[12]</sup>,并形成了以中心城区为核心、排放水平向外递减的碳排放格局<sup>[13]</sup>。因此,如何发挥城市森林植被的固碳功能受到关注<sup>[14-15]</sup>。薛雪等<sup>[16]</sup>、邵永昌等<sup>[17]</sup>和刘敏敏等<sup>[18]</sup>均利用光合速率法,分析比较了上海市绿化树种固碳能力差异;王瑞静等<sup>[19]</sup>采用野外样方调查和材积源生物量法估算了崇明岛植被的碳储量;徐飞等<sup>[20]</sup>基于 CITYgreen 模型、样地调查和遥感影像,估算上海中心城区森林植被固碳率为  $0.625 \text{ tC hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ;龚元等<sup>[21]</sup>利用上海奉贤大学城的涡动相关通量观测站点数据,研究了区域植被对城市生态系统  $\text{CO}_2$  通量的影响。以上研究均较好地揭示了上海地区的植被固碳功能及其影响因素,但这些固碳功能的空间分布特征如何,以及植被碳固定与能源碳排放在空间格局上的关系等问题亟需深入研究。

为此,本文基于高分卫星影像、典型样地调查、VIIRS-NPP 夜间灯光以及能源统计数据,评估测算了上海城市森林植被的固碳功能及其空间分布,并分析了区域能源碳排放以及碳抵消的影响,可为上海城市森林植被规划建设以及节能减排工作提供决策支持。

## 1 研究区概况

上海市地处长江三角洲东南缘( $30^{\circ}40'—31^{\circ}53' \text{ N}$ ,  $120^{\circ}51'—122^{\circ}12' \text{ E}$ )、长江和钱塘江入海汇合处。全

境除西南部有少数剥蚀残丘外,均为坦荡低平的长江三角洲平原,平均海拔 4 m 左右。上海市属于亚热带季风气候,2017 年平均气温 17.7℃,日照时间 1809.2 h,降水量达 1388.8 mm,降雨日达 124 d。2017 年上海市行政区总面积 6340.50 km<sup>2</sup>,分为浦东新区、黄浦区、徐汇区等 16 区(图 1),其中杨浦、虹口、静安等 7 区统称为中心城区。2017 年末上海市常住人口 2418.33 万人,人口密度达到 3814 人/km<sup>2</sup>,其中黄浦区、虹口区、杨浦区、普陀区等人口密度均超 2 万人/km<sup>2</sup>[22]。

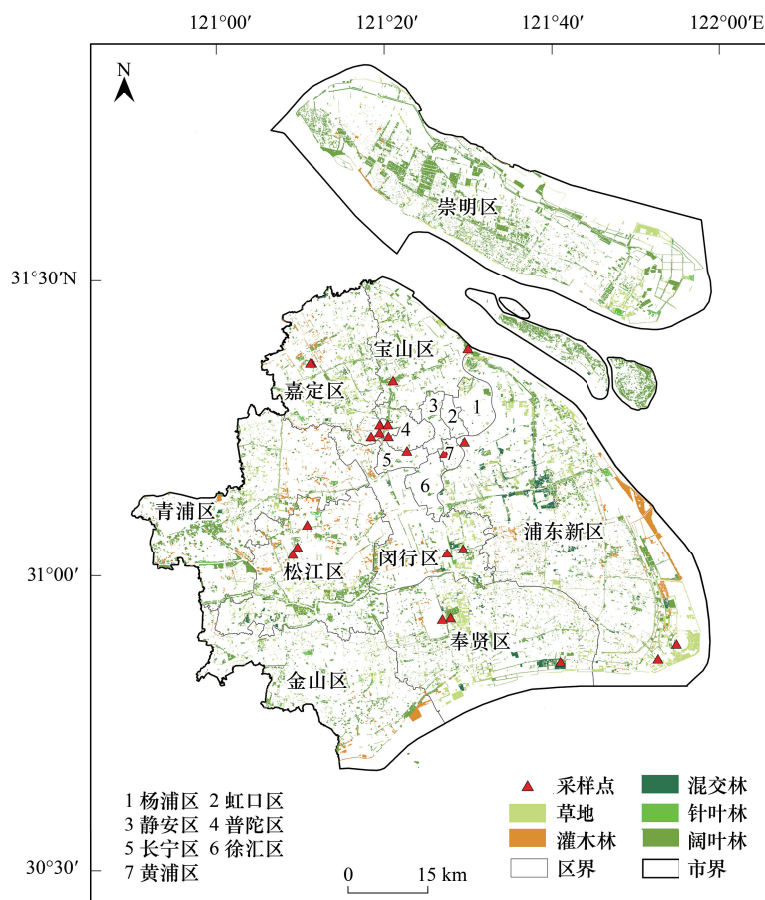


图 1 上海城市森林分布及调查样地

Fig.1 Distribution of urban forests and investigated sites

上海市地跨北亚热带,植被地带性明显,类型丰富,拥有亚热带常绿阔叶林、亚热带落叶阔叶林、针阔混交林、常绿针叶林、亚热带常绿-落叶阔叶混交林、亚热带常绿针叶林等森林类型。根据第九次全国森林调查数据,上海市森林面积为 8.9 万 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率超过 14%<sup>[23]</sup>,主要树种有樟木(*Cinnamomum camphora*)、广玉兰(*Magnoliagrandiflora*)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、杨树(*Populus spp.*)、柳树(*Salix babylonica*)、银杏(*Ginkgo biloba*)等,且以幼龄林为主(57.12%),中龄林占比 29.18%,成熟林和过熟林比例较低。

## 2 研究方法

### 2.1 城市森林获取

基于中国资源卫星应用中心陆地观测卫星数据平台的高分 2 号卫星 38 景影像数据,利用 ENVI 软件完成正射校正、辐射定标、图像融合和大气校正等预处理,生成配准后高分影像(2 m 分辨率);然后以上海市行政边界为范围,采用人工目视解译的方法,按照地理国情监测指标分类(GQJC03—2017),结合上海市森林资

源调查数据,将绿地植被分为阔叶林、针叶林、混交林、灌木林和草地(图 1),完成分幅矢量化的单元网格解译。通过 22 个调查样地进行验证,植被类型解译准确率达到 89%,满足本研究需要。

根据上海典型植物群落分布,选取城市森林分布集中、植被结构类型复杂、调查人员易进入的典型样地(表 1),于 2019 年 7—8 月在每个样地中心附近设置 3 个 20 m×20 m 绿地斑块作为植物调查样方。在样方内记录乔木种类、数量,测量不同种类代表性乔木的树高、胸径、冠幅和枝下高;沿 20 m×20 m 样方内对角线分别设 3 个 3 m×3 m 的样方开展灌木调查,记录所有灌木种类、株数、高度及目测灌木盖度;在灌木样方内分别设置 2 个 1 m×1 m 的样方进行草本调查,测量并记录草本植物的高度、覆盖面积,目测估算草皮盖度。此外,观测样地叶面积指数通过 LAI-2200 植物冠层分析仪获取,按照乔木对角线在冠层下方的同一水平面上(距地面 1.5 m 左右)测量 15—20 次,并取相应平均值。

表 1 上海城市森林植被样地调查  
Table 1 Surveyed plots for each urban forest type

植被类型 Vegetation	植物优势种 Dominant species	平均树高 Average tree height/m	平均胸径 Average crown diameter/cm	乔木密度 Tree density/ (株/hm <sup>2</sup> )	样方数 Filed numbers/个
阔叶林 Broadleaved forest	香樟、栎树、广玉兰、女贞、乌桕、银杏、杨树、银杏、朴树、悬铃木、臭椿	8.72	22.38	690±319	30
混交林 Mixed forest	雪松、香樟、水杉、朴树、冷杉、榔榆	14.29	23.36	1045±598	6
针叶林 Conifer forest	水杉、雪松、龙柏	6.78	17.71	834±337	7
灌木林 Shrubbery	石楠、鸡爪槭、樱花、紫叶里、桂花、海棠、海桐、香樟、中华槭、梅花、女贞、杜英、香樟、玉兰、圆柏	6.91	18.12	110±90	11

灌木林的样地特征描述为灌木林中乔木特征

## 2.2 植被固定 CO<sub>2</sub> 评估

### (1) 光合速率法

光合速率法是通过测定植物叶片的 CO<sub>2</sub> 浓度和水分,得到在某段时间内单位叶面积的净同化量,并借助叶面积指数(LAI)得到单位土地面积植被的日固定 CO<sub>2</sub> 量,最后利用树叶覆盖度、有效光合时间和面积计算周期内区域固定 CO<sub>2</sub> 量<sup>[24-25]</sup>,计算公式为:

$$W_{\text{CO}_2} = P \times (1 - 0.2) \times 44 / 1000 \quad (1)$$

$$Q_{\text{CO}_2} = \text{LAI} \times W_{\text{CO}_2} \quad (2)$$

$$T_{\text{CO}_2} = T \times \text{FPC} \times Q_{\text{CO}_2} \times A \quad (3)$$

式中, $P$  为植物日同化量( $\text{mmol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), $W_{\text{CO}_2}$  为单位叶面积日固定 CO<sub>2</sub>, $Q_{\text{CO}_2}$  为单位面积植物日固定 CO<sub>2</sub>, $T$  为评估周期内有效光合天数(d),FPC(Foilage projective covee)为树叶覆盖度,表示单位面积上树叶投影覆盖的比例, $A$  为城市森林面积( $\text{hm}^2$ ), $T_{\text{CO}_2}$  为  $T$  段时间内区域固定 CO<sub>2</sub>(t)。

典型样地植物的日同化量( $P$ )来源于上海市森林研究结果<sup>[16-18, 26-31]</sup>,并按照夜晚暗呼吸消耗量约占白天同化量 20%得到相应植物日净同化量<sup>[16, 29]</sup>。由于上海城市森林中落叶植被有一定比例<sup>[32]</sup>,且冬季落叶植被的光合作用较低<sup>[33]</sup>,将有效光合天数( $T$ )设定为春夏秋三季<sup>[34]</sup>。张艳丽等<sup>[35]</sup>测定日降雨量大于 5 mm 时,植物光合作用积累量与呼吸作用消耗量相抵。2017 年上海市日降雨量小于 5 mm 的天数为 231 d,其中有 70 d 为冬季,因此确定植被有效光合天数( $T$ )为 161 d。

有效叶面积指数(Leaf area index, LAI)根据 2017 年 8 月 17 日的卫星遥感影像(Landsat 8 OLI)反演和 LAI-2200 光学仪器实地观测数据得到。首先根据归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)构建上海植被有效叶面积指数模型<sup>[36]</sup>,得到 LAI-NDVI 经验模型反演城市森林的 LAI(图 2)。由于 FPC 与 LAI 以及植物群落的光合作用密切相关<sup>[37]</sup>,可利用 LAI 估算模型反演 FPC,计算公式如下:



$$FPC=1-e^{-G(0)LAI}$$

(4)

式中, $G(0)$ 是叶倾角的函数(取 $0.5^{[38]}$ )。

(2)生物量法

生物量法是依据生物量回归模型测算现存有机体的干重来间接计算植物固碳量<sup>[39]</sup>,操作简便且精度较高<sup>[40]</sup>,因而应用较为广泛<sup>[41]</sup>。本文采用异速生长方程计算城市森林生物量<sup>[42]</sup>,森林异速生长方程来自于上海市及周边地区的相关研究文献(表2)<sup>[43-53]</sup>。对于只有地上生物量方程的树种,按照地下地上生物量比为0.25计算全株生物量<sup>[54]</sup>;落叶树种需要减去其树叶的固碳量,常绿树种假设树叶每年凋落25%<sup>[54]</sup>。净初级生产力(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,用以测定植被的CO<sub>2</sub>净固定量<sup>[39]</sup>,因此城市森林的固定CO<sub>2</sub>量可依据净初级生产力得到,计算公式为:

$$S_{CO_2}=NPP\times1.63$$

(5)

式中, $S_{CO_2}$ 为城市森林单位面积年固定CO<sub>2</sub>量( $g\ m^{-2}\ a^{-1}$ ),NPP为城市森林净初级生产力( $gC\ m^{-2}\ a^{-1}$ ),由林分生物量、林分状况以及林龄的函数关系推算所得<sup>[55-58]</sup>。

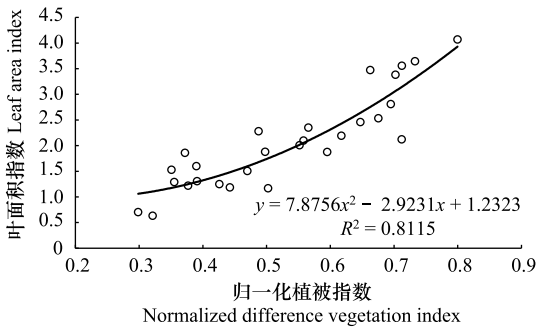


图2 基于Lansat影像和LAI-2200测定的NDVI-LAI关系  
Fig.2 Relationship of NDVI derived from Lansat 8 OLI and LAI from field measurement

表2 上海城市常见植被异速生长模型

植被类型 Vegetation type	生物量模型 Biomass Model	$R^2$	胸径 Diameter at breast height/cm
悬铃木 <i>Platanus Orientalis</i> <sup>[46]</sup>	$B_{total}=0.069(D^2H)^{0.91338}$ $B_f=0.002898(D^2H)^{0.91338}$		
杨树 <i>Populus</i> spp. <sup>[47]</sup>	$B_{total}=0.073D^{2.525}$ $B_f=0.02D^{1.817}$	0.960 0.946	12—36
雪松 <i>Cedrus deodara</i> <sup>[44]</sup>	$B_{total}=0.06662D^{2.00317}H^{0.40763}$ $B_f=0.2805D^{1.3313}$		
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i> <sup>[45]</sup>	$B_{total}=0.1754(D^2H)^{0.8199}$ $B_f=0.0599(D^2H)^{0.5743}$	0.993 0.989	
杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> <sup>[50]</sup>	$B_{total}=0.18833D^{2.14125}$ $B_f=0.00257D^{2.58946}$	0.93 0.95	5—17
黄山栎树 <i>Koelreuteria integrifolia</i> <sup>[50]</sup>	$B_{total}=0.10994D^{2.48238}$ $B_f=0.00139D^{3.23231}$	0.99 0.87	5—15
马褂木 <i>Liriodendron chinense</i> <sup>[50]</sup>	$B_{total}=0.06393D^{2.61147}$	0.97	4—14
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i> <sup>[52]</sup>	$B_{aboveground}=0.4718D^{1.64813}$ $B_f=0.24793D^{0.89346}$	0.98 0.667	2.89—16.8
无患子 <i>Sapindus mukorossi</i> <sup>[52]</sup>	$B_{aboveground}=0.14119D^{2.35753}$ $B_f=0.032D^{1.98218}$	0.97 0.88	2.19—18

续表			
植被类型 Vegetation type	生物量模型 Biomass Model	$R^2$	胸径 Diameter at breast height/cm
广玉兰 <i>Magnolia grandiflora</i> <sup>[53]</sup>	$B_{total} = 0.330788 D^{1.90957}$ $B_f = 0.062077 D^{1.85157}$	0.974 0.918	3—13
银杏 <i>Ginkgo biloba</i> <sup>[51]</sup>	$LN(B_{total}) = -2.29 + 2.41LN(D)$ $LN(B_f) = -5.21 + 2.37LN(D)$	0.985 0.868	>10
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i> <sup>[43]</sup>	$LN(B_{total}) = -0.8168 + 2.1549LN(D)$ $LN(B_f) = -0.7865 + 0.1137LN(D)$	0.976 0.835	
南酸枣 <i>Choerospondias axillaries</i> <sup>[48]</sup>	$B_{total} = 0.825 + 0.02 D^2 H$ $B_f = 0.117 + 0.001 D^2 H$	0.895 0.678	
杜仲 <i>Eucommia ulmoides</i> <sup>[48]</sup>	$B_{total} = 1.687 + 0.046 D^2 H$ $B_f = 0.055 + 0.002 D^2 H$	0.946 0.947	
其他松类 Other pine forest <sup>[49]</sup>	$B_{total} = 0.06H^{0.7934} D^{1.8005} + 0.137708D^{1.487266} L^{0.405207} +$ $0.0417H^{-0.078} D^{2.2618}$ $B_f = 0.0596 D^{1.3484} L^{0.5823}$	0.8685	
其他软阔类(I) Other softwood broadleaf forest(I) <sup>[49]</sup>	$B_{total} = 0.0444H^{0.7197} D^{1.7095} + 0.0856D^{1.22657} L^{0.397} +$ $0.0459H^{0.1067} D^{2.0247}$ $B_f = 0.0211 D^{1.0172} L^{2.5247}$	0.8685	
其他硬阔类(I) Other hardwood broadleaf forest (I) <sup>[49]</sup>	$B_{total} = 0.056H^{0.8099} D^{1.814} + 0.098D^{1.648} L^{0.461} +$ $0.0549H^{0.1068} D^{2.0953}$ $B_f = 0.0111 D^{2.1092} L^{0.3144}$	0.8685	
其他硬阔类(II) Other hardwood broadleaf forest (II) <sup>[49]</sup>	$B_{total} = 0.0803H^{0.7815} D^{1.8056} + 0.286D^{1.0968} L^{0.945} +$ $0.247H^{0.1745} D^{1.7954}$ $B_f = 1.5^{0.1} D^{1.3845} L^{0.2978}$	0.8685	
杂竹 Common bamboo <sup>[49]</sup>	$B_{total} = 0.015189D^{0.6305} H^{2.0687}$	0.869	
灌木类 Shrub <sup>[49]</sup>	$B_{total} = 0.409759D^{1.0615} H^{0.5427}$	0.8685	
草本层 Herbs <sup>[49]</sup>	$B_{total} = 0.050492H^{0.803} G^{1.0877}$	0.8685	

$B_{total}$ : 全株生物量 Total biomass;  $B_{aboveground}$ : 地上生物量 Aboveground biomass;  $B_f$ : 树叶生物量 Foliage biomass;  $D$ : 胸径 Diameter at breast height;  $H$ : 树高 Height;  $L$ : 冠长 Crown length

考虑到光合速率法和生物量法测算城市森林植被的固定 CO<sub>2</sub> 量均存在一定误差,本文取两种计算结果的平均值作为上海城市森林植被的固定 CO<sub>2</sub> 量。

### 2.3 能源 CO<sub>2</sub> 排放估算

目前碳排放量多根据国家及地区统计年鉴等资料计算<sup>[59]</sup>。由于夜间灯光数据直接反映与能源消耗相关的碳排放量<sup>[60]</sup>,不同尺度上利用 CO<sub>2</sub> 和夜间灯光值的回归模型估算成为可能<sup>[61-62]</sup>, Ghosh 等<sup>[63]</sup> 综合利用 DMSP/OLS 夜间灯光数据和人口分布数据开发了一种区域碳排放量计算改进模型。本文基于该改进模型,综合利用上海市人口、能源消费和 VIIRS-NPP 夜间灯光等数据,自上而下估算城市能源消费的 CO<sub>2</sub> 排放量,计算公式为:

$$CE = \sum_{i=1}^{16} EN_k \times EF_k$$

(10)

$$x = \frac{CE_D}{SOP_D} \times \frac{SOP_L}{CE_L} \quad (11)$$

$$PCE_L = CE / (SOP_L + x \times SOP_D) \quad (12)$$

$$CE_L = PCE_L \times SOP_L \quad (13)$$

$$CE_D = x \times PCE_L \times SOP_D \quad (14)$$

$$CE = (CE_L + CE_D) \quad (15)$$

$$CE_{Lp} = \frac{CE_L}{SOP_L} \times DN_p \quad (16)$$

$$CE_{Dp} = \frac{CE_D}{SOP_D} \times POP_{Dp} \quad (17)$$

式中,  $CE$  为城市能源消费的  $CO_2$  排放量(t),  $k$  为能源种类的个数,  $EF_k$  代表能源  $CO_2$  排放系数( $t/t$  或  $t/m^3$ ),  $EN_k$  为能源终端消费量( $t$  或  $m^3$ ), 变量  $x$  表示 2017 年黑暗区与照明区人均  $CO_2$  排放比率,  $CE_L$  是照明区  $CO_2$  排放量(第二产业和城市居民生活能源消费)(t),  $CE_D$  是黑暗区  $CO_2$  排放量(第一产业和农村居民生活能源消费)(t),  $SOP_L$  和  $SOP_D$  分别表示照明区和黑暗区的人口数量(人),  $PCE_L$  为照明区的人均  $CO_2$  排放量( $t/人$ ),  $CE_{Lp}$  代表照明区栅格单元的  $CO_2$  排放量(t),  $SOL_L$  为城市夜间灯光总和,  $DN_p$  为城市照明区栅格单元夜光灯值,  $CE_{Dp}$  为黑暗区栅格单元  $CO_2$  排放量(t),  $POP_{Dp}$  为城市暗区的栅格单元人口数量(人)。

该文采用 2017 年上海街道人口密度数据和 NOAA/NGDC 网站的 VIIRS-NPP 夜间灯光数据, 选择湖泊、旱地、水田等面积较大的中心点作为采样点, 在对应 NPP-VIIRS 夜间灯光数据中记录该位置的灯光像元值, 并以平均像元值作为最小灯光阈值且赋值为零<sup>[64]</sup>。上海市生产和生活能源终端消耗量来源于《中国能源统计年鉴 2018》和《2018 年上海统计年鉴》, 并参考《IPCC 国家温室气体排放清单指南 2006》中  $CO_2$  排放因子、《中国能源统计年鉴》中的标准煤系数和《中国区域电网基准线排放因子公告》的电网  $CO_2$  排放系数, 对 16 类能源终端消费量统计数据计算。

### 3 结果分析

#### 3.1 固定 $CO_2$ 功能供给

评估结果表明, 2017 年上海城市森林面积为 79674.72  $hm^2$ , 年均固定  $CO_2$  135.57 万 t, 单位面积森林植被的固定  $CO_2$  能力达到 17.02  $t/hm^2$ (表 3)。同时发现, 基于生物量法计算的固定  $CO_2$  功能结果高于光合速率法, 原因可能在于光合速率法未考虑冬季常绿植被的光合作用。

表 3 2017 年上海城市森林植被固定  $CO_2$  功能

Table 3 Carbon dioxide fixation of Shanghai's urban forest in 2017

植被固定 $CO_2$ 功能 Carbon dioxide fixation	光合速率法 Assimilation method	生物量法 Biomass method	平均值 Mean value
固定 $CO_2$ 量 Carbon dioxide fixation/(万 t)	127.11	144.04	135.57
固定 $CO_2$ 能力 Carbon dioxide fixation capacity/( $t/hm^2$ )	15.95	18.08	17.02

上海城市森林中的阔叶林面积最大, 占到城市森林总面积的 81%, 可固定  $CO_2$  117.61 万 t, 占到上海城市森林植被固定  $CO_2$  总量的 86.75%, 其固定  $CO_2$  能力达到 18.22  $t/hm^2$ ; 灌木林和混交林面积相对较小, 其面积比例分别为 10.73% 和 5.71%, 因此二者固定  $CO_2$  贡献比例仅为 7.26% 和 4.92%, 不过混交林的固定  $CO_2$  能力明显高于灌木林地。此外, 针叶林的固定  $CO_2$  能力最低, 仅为阔叶林的 0.4, 由于针叶林面积也较小, 不及城市森林总面积的 2.6%, 因此针叶林固定  $CO_2$  的贡献率仅为 1.07%(图 3)。

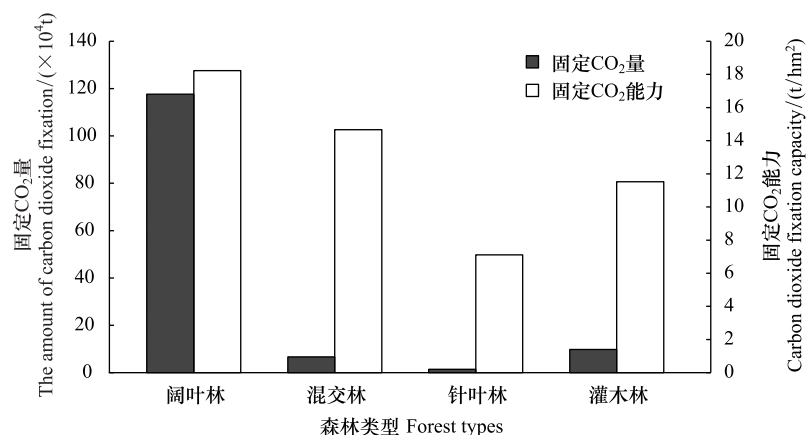
图3 上海城市森林植被固定CO<sub>2</sub>功能的森林类型差异

Fig.3 Average carbon dioxide fixation of four urban forest communities in Shanghai

### 3.2 固定CO<sub>2</sub>空间差异

为比较上海城市森林植被固定CO<sub>2</sub>功能的空间差异,将城市森林植被的固定CO<sub>2</sub>量依据植被群落的空间分布投射到500 m×500 m的栅格上,得到上海城市森林植被固定CO<sub>2</sub>效益空间分布图(图4)。结果发现,崇明区森林植被固定CO<sub>2</sub>效益显著,其它地区森林植被固定CO<sub>2</sub>功能形成了“中间低、四周高”的空间格局,这是因为位于城市远郊区的青浦、松江、奉贤以及浦东新区等,有较为集中的城市森林植被分布,因而表现出较高的固定CO<sub>2</sub>量;而崇明区的生态资源丰富,森林植被保护较好,其固定CO<sub>2</sub>效益明显。

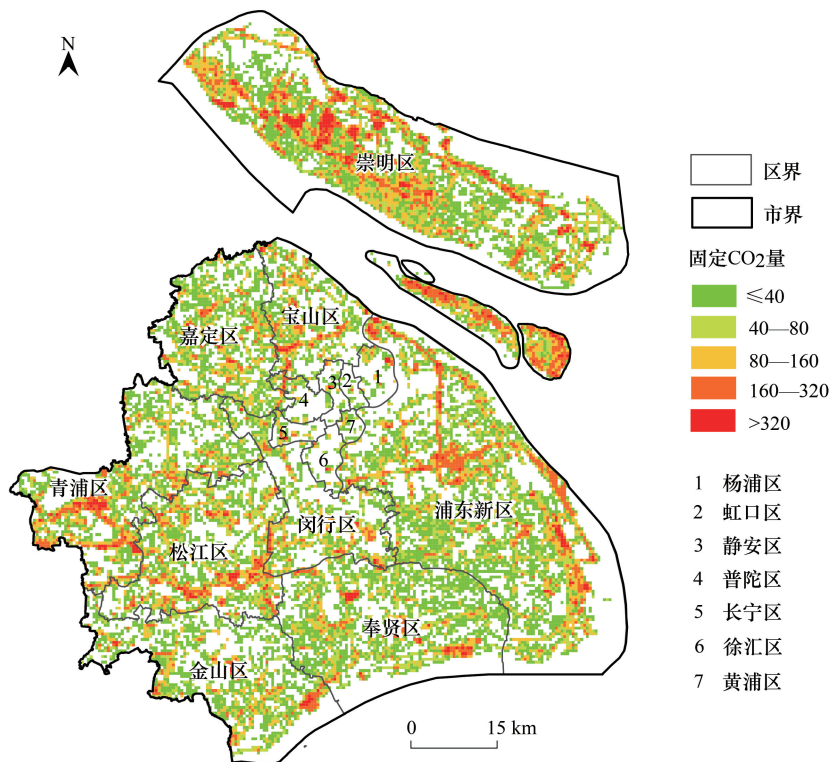
图4 上海城市森林植被固定CO<sub>2</sub>量空间分布

Fig.4 Spatial distribution of carbon dioxide fixation generated by urban forests in Shanghai



从不同行政区来看,崇明区森林植被固定  $\text{CO}_2$  量为 44.34 万 t, 占到上海城市森林植被固定  $\text{CO}_2$  总量的 32.8%, 其固定  $\text{CO}_2$  能力为  $17.88 \text{ t/hm}^2$ ; 其次为浦东新区, 贡献了上海城市森林植被固定  $\text{CO}_2$  量的 20%, 单位面积森林植被固定  $\text{CO}_2$  能力为  $16.15 \text{ t/hm}^2$ , 稍低于崇明区。青浦、松江、奉贤、金山、嘉定、闵行和宝山等郊区森林植被的固定  $\text{CO}_2$  量累计占到全市固定  $\text{CO}_2$  总量的 45.42%。而静安、普陀、虹口等中心城区的固定  $\text{CO}_2$  量不及固定  $\text{CO}_2$  总量的 1.8%, 其中黄埔区固定  $\text{CO}_2$  能力最高, 分别为  $18.52 \text{ t/hm}^2$ 。这主要与各行政区的森林植被面积和植被群落类型相关(图 5)。

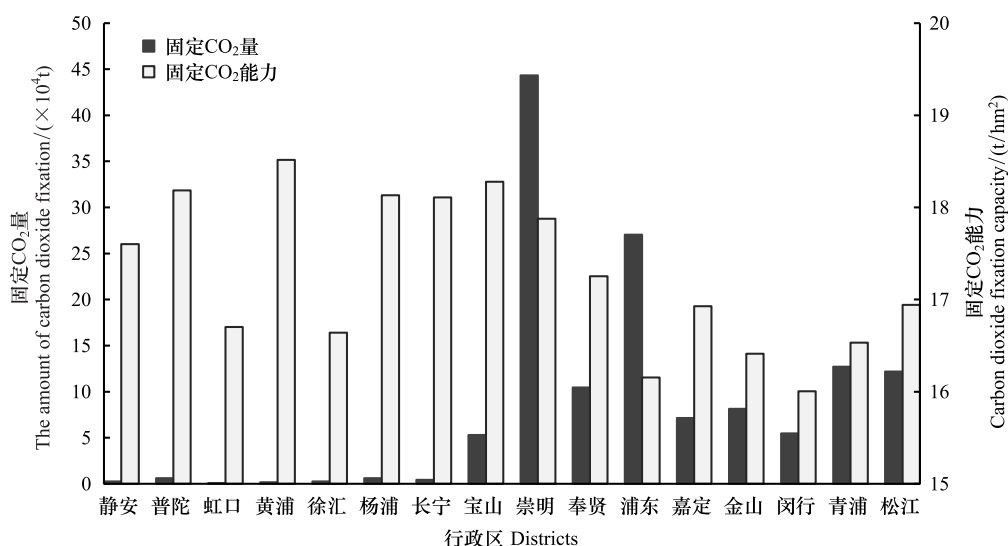


图 5 上海城市森林植被固定  $\text{CO}_2$  功能的分区差异

Fig.5 Carbon dioxide fixation of urban forest among various districts of Shanghai

### 3.3 能源 $\text{CO}_2$ 排放量

测算结果表明,2017 年上海市能源  $\text{CO}_2$  排放量达到 2.73 亿 t, 其中以工业为主的第二产业  $\text{CO}_2$  排放量约为 1.36 亿 t, 占到能源  $\text{CO}_2$  排放总量的 49.88%; 以农业为主的第一产业年  $\text{CO}_2$  排放量为 148.88 万 t, 不及能源  $\text{CO}_2$  排放总量的 0.55%; 而第三产业的  $\text{CO}_2$  排放量约为 1.03 亿 t, 为上海市能源  $\text{CO}_2$  排放总量的 37.94%, 其中交通运输、仓储和邮政业的  $\text{CO}_2$  排放量占到 20.54%; 另外生活消费的  $\text{CO}_2$  排放量为 3171.19 万 t, 主要来自城镇消费的  $\text{CO}_2$  排放(图 6)。可见,上海市能源  $\text{CO}_2$  排放的 68.40% 来自工业和交通运输行业, 为区域  $\text{CO}_2$  的主要排放源。

从上海市网格内  $\text{CO}_2$  排放的空间分布来看, 网格内  $\text{CO}_2$  排放量呈现出由中心向四周边缘降低的趋势(图 7)。静安区、虹口区、普陀区、黄浦区、徐汇区、杨浦区和长宁区等中心城区等中心城区年排放  $\text{CO}_2$  0.31 亿 t, 占到全市  $\text{CO}_2$  排放总量的 11.49%, 且单位面积的  $\text{CO}_2$  排放量高达  $1080.55 \text{ t/hm}^2$ 。其中黄浦区的  $\text{CO}_2$  排放量仅为 289.45 万 t, 不及上海市能源  $\text{CO}_2$  排放量的 1%, 但其单位面积的  $\text{CO}_2$  排放量高达  $1410.25 \text{ t/hm}^2$ 。相比之下,浦东新区年排放  $\text{CO}_2$  约 0.87 亿 t, 占到全市  $\text{CO}_2$  排放量的 32%, 单位面积的  $\text{CO}_2$  排放量为  $540.01 \text{ t/hm}^2$ 。因此,闵行区、嘉定区、松江区和宝山区的  $\text{CO}_2$  排放量较大, 而静安区、长宁区、普陀区等中心城区的单位面积  $\text{CO}_2$  排放量较高(图 8)。

### 3.4 城市森林植被的碳抵消

本文将城市森林植被的碳抵消作用界定为城市森林植被的年固定  $\text{CO}_2$  量占区域能源  $\text{CO}_2$  排放量的比重, 通过每个栅格内  $\text{CO}_2$  固定量占到  $\text{CO}_2$  排放量的百分比来计算碳抵消率。结果表明,上海城市森林植被的碳抵消率大部分分布在 0%—1% 之间, 城市森林植被年  $\text{CO}_2$  吸收量大约抵消城市 0.50% 的年  $\text{CO}_2$  排放量, 其中中心城区城市森林植被的碳抵消率仅为 0.08%。从碳抵消率的空间分布来看, 城市森林植被的碳抵消作用主要表

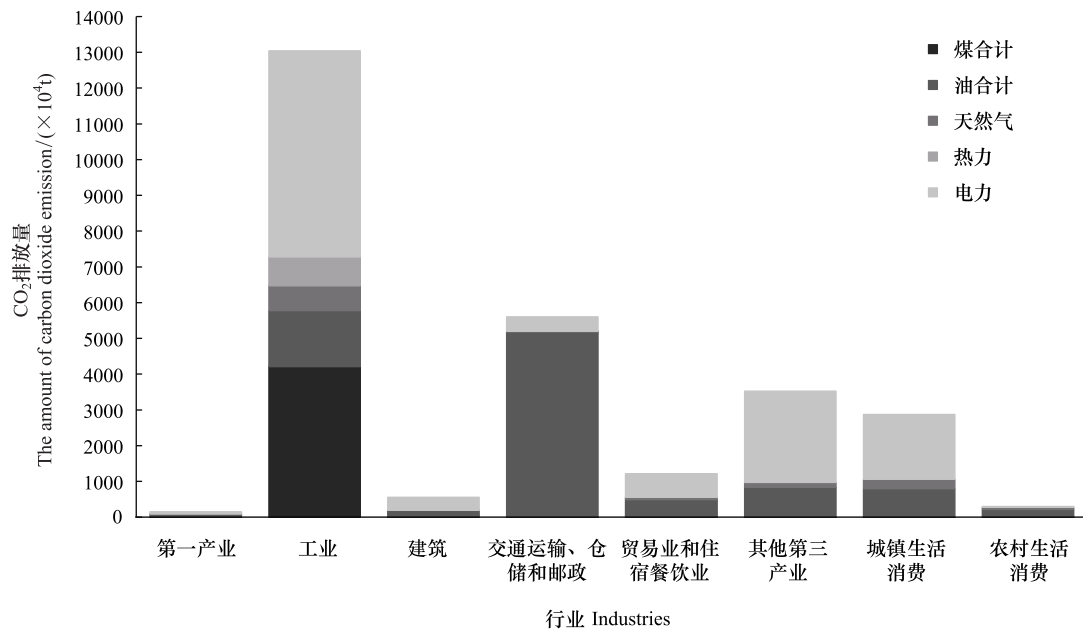
图 6 基于能源终端消费的城市 CO<sub>2</sub> 排放量

Fig.6 Amount of carbon dioxide emission from energy consumption of different industries in Shanghai

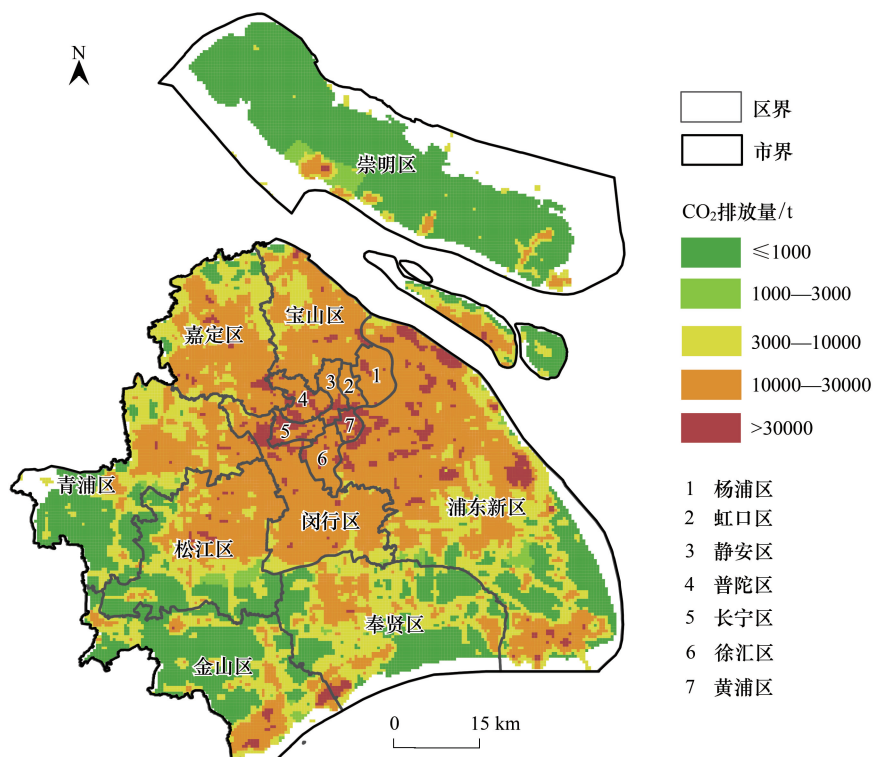
图 7 上海市 CO<sub>2</sub> 排放量的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the carbon dioxide emission from energy consumption in Shanghai

现在崇明区以及远郊区的边缘,其中碳抵消率较高地区主要分布在崇明岛以及中心城区的南部,中心城区内部的碳抵消率较低,而海岸边滩、湖泊水库和崇明岛内大面积森林表现为 CO<sub>2</sub>净吸收区(图 9)。因此,崇明区

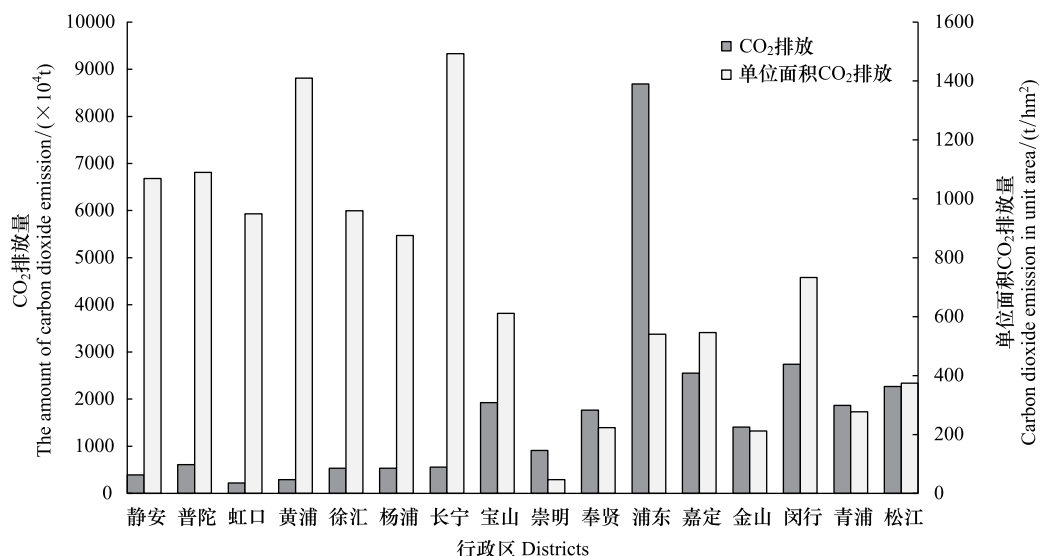
图8 上海城市能源消费的 CO<sub>2</sub> 排放情况

Fig.8 Carbon dioxide emissions from energy consumption in various districts of Shanghai

城市森林植被的碳抵消率最大,平均达到 4.87%,而虹口区城市森林植被的碳抵消率最低,仅为 0.04%。奉贤区、金山区、青浦区和松江区城市森林植被的碳抵消率大于全市平均值,静安区、徐汇区、黄浦区等中心城区的碳抵消率显著小于全市平均值(表 4)。可见,上海城市森林植被的固定 CO<sub>2</sub> 功能和区域能源 CO<sub>2</sub> 排放存在空间不平衡。

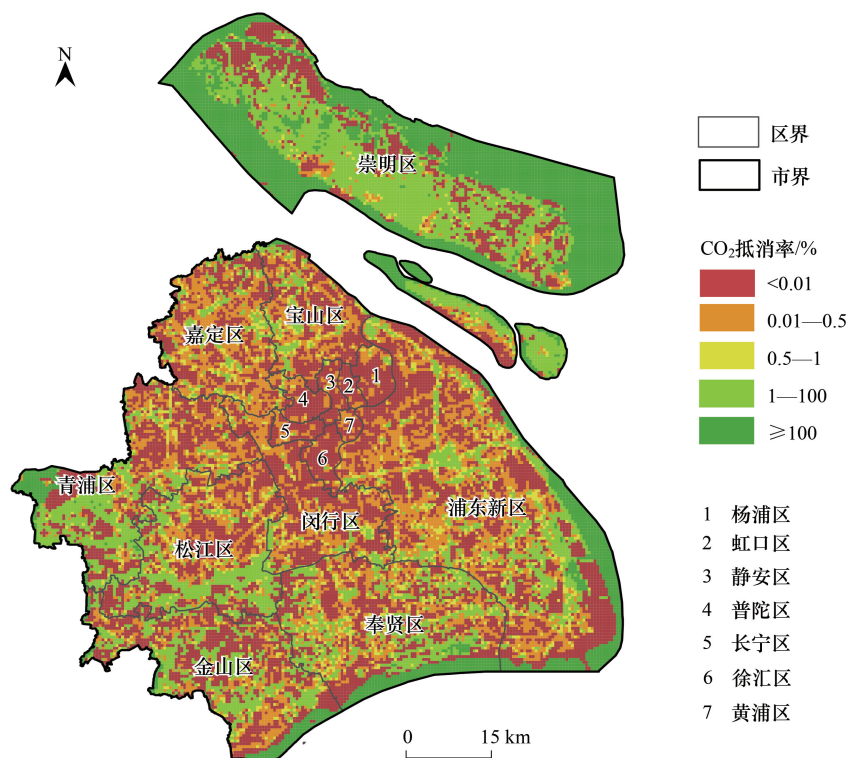
图9 上海城市 CO<sub>2</sub> 抵消率的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of carbon dioxide offset by urban forest in Shanghai

表 4 上海市森林植被 CO<sub>2</sub>抵消率的地区差异

Table 4 Carbon dioxide offset of urban forests among various districts in Shanghai

行政区 Districts	CO <sub>2</sub> 抵消率 CO <sub>2</sub> offset/%	行政区 Districts	CO <sub>2</sub> 抵消率 CO <sub>2</sub> offset/%	行政区 Districts	CO <sub>2</sub> 抵消率 CO <sub>2</sub> offset/%	行政区 Districts	CO <sub>2</sub> 抵消率 CO <sub>2</sub> offset/%
静安区	0.06	崇明区	4.87	徐汇区	0.05	金山区	0.58
普陀区	0.10	奉贤区	0.59	杨浦区	0.12	闵行区	0.20
虹口区	0.04	浦东区	0.31	长宁区	0.08	青浦区	0.68
黄浦区	0.06	嘉定区	0.28	宝山区	0.28	松江区	0.54

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

该文基于光合速率法和生物量法计算发现,2017 年上海市约 8 万 hm<sup>2</sup>的城市森林植被可固定 CO<sub>2</sub> 135.57 万 t。韩玉洁等<sup>[65]</sup>采用《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008)与森林资源监测数据,测算 2016 年上海市森林生态系统固碳量为 59.42 万 t,原因在于本文未涉及森林土壤的固碳量。该文结果表明,上海城市森林植被年均固定 CO<sub>2</sub> 17.02 t/hm<sup>2</sup>,即每公顷森林植被固定 4.64 t C,介于中心城区<sup>[20]</sup>与宝钢厂区<sup>[14]</sup>城市森林植被的固碳能力之间,且针叶林固碳能力(1.93 t C/hm<sup>2</sup>)与崇明岛<sup>[15]</sup>水杉林地上部分的固碳能力(1.52 t C/hm<sup>2</sup>)接近。该研究发现,阔叶林的固碳功能明显高于针叶林,这与陈青青等<sup>[66]</sup>研究结果相一致,但 Sharma 等<sup>[67]</sup>在印度喜马拉雅区域的研究指出,与阔叶树种相比针叶树有更高的碳储量;郑森等<sup>[68]</sup>在滦河上游森林植被固碳效益的研究认为,在整个生命周期里针叶林的固碳功能高于阔叶林的固碳功能,但同在中幼林时期,针叶林的固碳功能小于阔叶林的固碳功能。本文中的上海市森林植被以中幼龄林为主,阔叶树生长速度快于针叶树<sup>[69]</sup>,加上植被叶面积、叶净光合速率、冠层结构和微气候等影响<sup>[2]</sup>,叶面积越大对光能的利用效率越高<sup>[35]</sup>,因此固碳能力优于针叶林的结论可信。

该研究表明,上海城市森林植被的固碳功能可抵消能源碳排放的 0.50%。周健等<sup>[11]</sup>综合比较不同城市森林植被抵消能源碳排放的效率在 0.01%—4.76%之间,Escobedo 等<sup>[70]</sup>认为美国盖恩斯维尔和迈阿密戴德城市森林植被可抵消 3.4%和 1.8%的碳排放,而 Trlica 等<sup>[71]</sup>基于树木生长模型和异速生长方程测算得到,波士顿城市森林植被年均抵消化石能源碳排放的比例不到 1%。该文测算结果相对偏小,一是上海市能源碳排放强度高<sup>[12,72]</sup>,二是未纳入城市森林因遮荫和降温效应间接减少碳排放的效应<sup>[70]</sup>。

需要说明的是,受样地数据限制,该文中森林植被不包括草坪和低矮灌木,未测算土壤与湿地的固碳量。马立辉等<sup>[73]</sup>发现重庆市彭水县的土壤可贡献森林生态系统固碳效益的 20.43%,梅雪英等<sup>[74]</sup>测算长江口湿地固碳量可达全国陆地植被固碳能力的 2.3—4.9 倍,因此土壤和湿地固碳作用也应重视。城市森林易受修剪、施肥等人工干扰,考虑到一般意义上异速生长方程的适用性,本文仅选用上海及周边地区森林本地速生长方程。但是,本研究采用样地尺度外推方法来估算城市森林植被的固碳量,尽管调查样地基本涵盖了上海植物群落类型,但是仍存在较大误差,后续研究应开展更多样地调查评估加以验证完善。由于该研究中的城市森林植被信息来源于高清卫星影像,与林业部门的地面统计结果有一定差距,且调查样地多在植被较好的城市森林斑块内,可能导致部分计算结果偏高。整体来看,城市森林植被对于减少大气中 CO<sub>2</sub>具有重要意义,但与高强度的能源碳排放相比,碳抵消作用的比重普遍较小。不过,上海市拥有约 1.04 万 km<sup>2</sup>的海域面积,而全球海洋对 CO<sub>2</sub>的吸收能力可占人为 CO<sub>2</sub>释放量的 25%—50%<sup>[75]</sup>,因此加强海洋碳吸收功能的监测、评估以及利用途径研究尤其重要。

### 4.2 结论

该文利用样地调查、遥感影像和相关文献统计数据,估算了上海城市森林植被的固定 CO<sub>2</sub>效应,以及对区域 CO<sub>2</sub>排放的影响。结果发现,上海城市森林植被年均固定 CO<sub>2</sub> 135.57 万 t,单位面积固定 CO<sub>2</sub>能力达到



17.02 t/hm<sup>2</sup>,且阔叶林固碳效益显著。城市森林植被的固碳功能呈现出“中间低、四周高”的空间格局,崇明区和浦东新区的城市森林提供了近 52.8%的固碳效益。不过,2017 年上海市能源 CO<sub>2</sub>排放高达 2.7 亿 t,且 11.49% 的 CO<sub>2</sub>排放量来自中心城区,因此上海城市森林植被固碳功能与能源碳排放的空间匹配较差,全市能源碳排放的 0.50%可被城市森林植被的固碳效应抵消,但中心城区城市森林植被的碳抵消效益仅为 0.08%。因此建议上海市重点提升中心城区森林植被的固碳功能,并重视加强海洋碳吸收能力的监测评估以及合理利用。

#### 参考文献(References):

- [1] 王成,彭镇华,陶康华.中国城市森林的特点及发展思考.生态学报,2004,23(3):88-92.
- [2] Li Y, Gao J, Dong S C, Zheng J, Jia X. Study of CO<sub>2</sub> emissions from traffic and CO<sub>2</sub> sequestration by vegetation based on eddy covariance flux measurements in suburb of Beijing, China. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29(1): 727-738.
- [3] Nowak D J, Greenfield E J, Hoehn R E, Lapoint E. Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. Environmental Pollution, 2013, 178: 229-236.
- [4] Nowak D J, Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 381-389.
- [5] Davies Z G, Edmondson J L, Heinemeyer A, Leake J R, Gaston K J. Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale. Journal of Applied Ecology, 2011, 48(5): 1125-1134.
- [6] 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.
- [7] Zhang B, Xie G D, Gao J X, Yang Y. The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: a case study in Beijing, China. Building and Environment, 2014, 76: 37-43.
- [8] Russo A, Escobedo F J, Timilsina N, Zerbe S. Transportation carbon dioxide emission offsets by public urban trees: a case study in Bolzano, Italy. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(2): 398-403.
- [9] Vaccari F P, Gioli B, Toscano P, Perrone C. Carbon dioxide balance assessment of the city of Florence (Italy), and implications for urban planning. Landscape and Urban Planning, 2013, 120: 138-146.
- [10] Chen W Y. The role of urban green infrastructure in offsetting carbon emissions in 35 major Chinese cities: a nationwide estimate. Cities, 2015, 44: 112-120.
- [11] 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.
- [12] 苏颖,廖振良,朱小龙.碳交易总量控制视角下的上海碳排放现状研究.能源环境保护,2017,31(5):55-60.
- [13] 蔡博峰,张力小.上海城市二氧化碳排放空间特征.气候变化研究进展,2014,10(6):417-426.
- [14] 任巧,郭雪艳,蔡北溟,达良俊.宝钢厂区植被碳储量及其固碳效益评价.城市环境与城市生态,2012,25(3):6-9.
- [15] 庄红蕾, Becuwe X, 肖春波,王月华,王海,殷杉,刘春江.上海崇明岛水杉人工林生物量方程构建及固碳潜力研究.上海交通大学学报:农业科学版,2012,29(2):48-55.
- [16] 薛雪,张金池,孙永涛,庄家尧,王鹰翔.上海常绿树种固碳释氧和降温增湿效益研究.南京林业大学学报:自然科学版,2016,40(3):81-86.
- [17] 邵永昌,庄家尧,王柏昌,张金池,李娟娟,李二焕.上海地区主要绿化树种夏季光合特性和固碳释氧能力研究.安徽农业大学学报,2016,43(1):94-101.
- [18] 刘敏敏,黄满红,杨振乾.对南方公路常绿植物固碳释氧和降温增湿的研究.上海师范大学学报:自然科学版,2014,43(2):204-209.
- [19] 王瑞静,赵敏,高峻.城市森林主要植被类型碳储量研究——以崇明岛为例.地理科学,2011,31(4):490-494.
- [20] 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.生态学报,2010,29(3):439-447.
- [21] 龚元,郭智娟,张凯迪,徐良,魏艳艳,赵敏.植被对亚热带城市生态系统 CO<sub>2</sub>通量的影响.生态学报,2019,39(2):530-541.
- [22] 上海市统计局.上海统计年鉴.北京:中国统计出版社,2018.
- [23] 国家林业网.第九次全国森林资源清查主要结果. <http://124.205.185.89:8085/8/>. (2020-02-23)
- [24] Fu D F, Bu B, Wu J G, Singh R P. Investigation on the carbon sequestration capacity of vegetation along a heavy traffic load expressway. Journal of Environmental Management, 2019, 241: 549-557.
- [25] 吴婕,李楠,陈智,余世孝.深圳特区城市植被的固碳释氧效应.中山大学学报:自然科学版,2010,49(4):86-92.
- [26] 赵艳玲.上海社区绿地植物群落固碳效益分析及高固碳植物群落优化[D].上海:上海交通大学,2014.
- [27] 乔小菊.南京城区园林绿化中常见阔叶乔木树种的光合特性及相关生态功能的研究[D].南京:南京农业大学,2016.
- [28] 陈明玲.上海城市典型林荫道生态效益调查分析与管理对策探讨[D].上海:上海交通大学,2013.

- [29] 张娇, 施拥军, 朱月清, 刘恩斌, 李梦, 周建平, 李建国. 浙北地区常见绿化树种光合固碳特征. 生态学报, 2013, 33(6): 1740-1750.
- [30] 李梦. 木兰科几种常用绿化树种光合特性及固碳能力研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [31] 张蓉蓉. 南京城区常见小乔木与灌木阔叶园林树种光合特征及相关生态功能的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [32] 傅徽楠, 严玲璋, 张连全, 高峻. 上海城市园林植物群落生态结构的研究. 中国园林, 2000, 16(2): 22-25.
- [33] Gratani L, Varone L. Carbon sequestration by *Quercus ilex* L. and *Quercus pubescens* Willd. and their contribution to decreasing air temperature in Rome. Urban Ecosystems, 2006, 9(1): 27-37.
- [34] 孙春健, 王春林, 申双和, 张锦标. 珠三角城市绿地 CO<sub>2</sub> 通量的季节特征. 生态学报, 2012, 32(4): 1273-1282.
- [35] 张艳丽, 费世民, 李智勇, 孟长来, 徐嘉. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益. 生态学报, 2013, 33(12): 3878-3887.
- [36] 惠凤鸣, 田庆久, 金震宇, 李海涛. 植被指数与叶面积指数关系研究及定量化分析. 遥感信息, 2003, (2): 10-13.
- [37] Fisher A, Scarth P, Armston J, Danaher T. Relating foliage and crown projective cover in Australian tree stands. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259: 39-47.
- [38] Armston J D, Scarth P F, Phinn S R, Danaher T J. Analysis of multi-date MISR measurements for forest and woodland communities, Queensland, Australia. Remote Sensing of Environment, 2007, 107(1/2): 287-298.
- [39] 周健, 肖荣波, 庄长伟, 邓一荣. 城市森林碳汇及其核算方法研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3368-3377.
- [40] 朱凯, 张倩倩, 武鹏飞, 冯蕾. 城市绿地碳汇核算方法及其研究进展. 陕西林业科技, 2015, (4): 42-47.
- [41] 赵敏, 周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1468-1472.
- [42] McHale M R, Burke I C, Lefsky M A, Peper P J, McPherson E G. Urban forest biomass estimates: is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees? Urban Ecosystems, 2009, 12(1): 95-113.
- [43] 高智慧, 蒋国洪, 邢爱金, 俞铭荣. 浙北平原水杉人工林生物量的研究. 植物生态学与地植物学学报, 1992, 16(1): 64-71.
- [44] Ter-Mikaelian M T, Korzukhin M D. Biomass equations for sixty-five North American tree species. Forest Ecology and Management, 1997, 97(1): 1-24.
- [45] 姚迎九, 康文星, 田大伦. 18 年生樟树人工林生物量的结构与分布. 中南林学院学报, 2003, 23(1): 1-5.
- [46] 嵇浩翔, 史琰, 朱轶梅, 温家石, 唐宇大, 葛滢, 常杰. 杭州市不同土地利用类型的树木生长和碳固存. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2405-2412.
- [47] 李建华, 李春静, 彭世揆. 杨树人工林生物量估计方法与应用. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2007, 31(4): 37-40.
- [48] 贺红早, 黄丽华, 段旭, 贺瑞坤. 贵阳二环林带主要树种生物量研究. 贵州科学, 2007, 25(3): 33-39.
- [49] 袁位高, 江波, 葛永金, 朱锦茹, 沈爱华. 浙江省重点公益林生物量模型研究. 浙江林业科技, 2009, 29(2): 1-5.
- [50] 王哲, 韩玉洁, 康宏樟, 黄丹, 薛春燕, 殷杉, 刘春江. 黄浦江上游主要树种水源涵养林生态系统碳储量. 生态学杂志, 2012, 31(8): 1930-1935.
- [51] 刘坤, 曹林, 汪贵斌, 曹福亮. 银杏生物量分配格局及异速生长模型. 北京林业大学学报, 2017, 39(4): 12-20.
- [52] 张希金, 冷寒冰, 赵广琦, 景军, 涂爱翠, 宋坤, 达良俊. 上海 4 种常见绿化树种地上生物量模型构建. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(2): 141-146.
- [53] 王哲. 黄浦江中上游广玉兰人工林生态系统碳储量特点. 林业世界, 2014, 3(3): 34-41.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 刘建泉, 李进军, 邸华. 祁连山森林植被净生产量、碳储量和碳汇功能估算. 西北林学院学报, 2017, 32(2): 1-7, 42-42.
- [58] Wang S Q, Zhou L, Chen J M, Ju W M, Feng X F, Wu W X. Relationships between net primary productivity and stand age for several forest types and their influence on China's carbon balance. Journal of Environmental Management, 2011, 92(6): 1651-1662.
- [59] 秦耀辰, 荣培君, 杨群涛, 李旭, 宁晓菊. 城市化对碳排放影响研究进展. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1526-1534.
- [60] Lv Q, Liu H B, Wang J T, Liu H, Shang Y. Multiscale analysis on spatiotemporal dynamics of energy consumption CO<sub>2</sub> emissions in China: utilizing the integrated of DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light datasets. Science of the Total Environment, 2020, 703: 134394.
- [61] 苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 吴旗韬, 张虹鸥, 黄宁生, 匡耀求. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理. 地理学报, 2013, 68(11): 1513-1526.
- [62] 于博, 杨旭, 吴相利. 哈长城市群县域碳排放空间溢出效应及影响因素研究——基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的实证. 环境科学学报, 2020, 40(2): 697-706.
- [63] Ghosh T, Elvidge C D, Sutton P C, Baugh K E, Ziskin D, Tuttle B T. Creating a global grid of distributed fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions from nighttime

- satellite imagery. *Energies*, 2010, 3(12): 1895-1913.
- [64] 唐梁博, 崔海山. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据和 Landsat-8 数据的城镇建筑用地提取方法改进——以广州市为例. *测绘与空间地理信息*, 2017, 40(9): 69-73.
- [65] 韩玉洁, 孙文, 张文文. 基于分布式测算方法的上海城市森林生态系统服务功能评估. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2019, (2): 147-155.
- [66] 陈青青, 徐伟强, 李胜功, 傅声雷, 闫俊华. 中国南方 4 种林型乔木层地上生物量及其碳汇潜力. *科学通报*, 2012, 57(13): 1119-1125.
- [67] Sharma C M, Baduni N P, Gairola S, Ghildiyal S K, Suyal S. Tree diversity and carbon stocks of some major forest types of Garhwal Himalaya, India. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(12): 2170-2179.
- [68] 郑森. 滦河上游 3 种林分类型固碳释氧效益估算. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 363-366, 374-374.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] Trlica A, Hutrya L R, Morreale L L, Smith I A, Reinmann A B. Current and future biomass carbon uptake in Boston's urban forest. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: 136196.
- [72] 杨鹏, 陶小马, 崔风暴. 上海市碳排放量及碳源分布. *同济大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(9): 1397-1402.
- [73] 马立辉, 谢英赞, 黄世友, 刘春生, 管运峰, 陈勇. 彭水县森林生态系统固碳释氧特征及其价值估算. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 32(6): 68-71.
- [74] 梅雪英, 张修峰. 长江口典型湿地植被储碳、固碳功能研究——以崇明东滩芦苇带为例. *中国生态农业学报*, 2008, 16(2): 269-272.
- [75] 石洪华, 王晓丽, 郑伟, 王媛. 海洋生态系统固碳能力估算方法研究进展. *生态学报*, 2014, 34(1): 12-22.