

上海市崇明区森林碳储量空间格局及对策研究

陆颖

上海市崇明区林业站

DOI:10.12238/eep.v8i3.2592

[摘要] 崇明区作为全国首个碳中和示范区,其森林生态系统碳储量的空间格局与管理优化对实现碳中和目标具有重要意义。本研究基于2023年森林资源监测数据、历史样地调查数据及遥感技术,系统评估了崇明区森林碳储量的空间异质性及其原因。结果显示:(1)全区森林总碳储量为304.0万吨(植被126.7万吨,土壤177.3万吨),植被和土壤平均碳密度分别为32.3t/ha和45.2t/ha;(2)碳密度空间分异显著,高值区集中于成熟阔叶混交林区域(>57t/ha),低值区与幼龄林或人为干扰密切相关(<26t/ha);(3)中龄林贡献39.1%的植被碳储量,阔叶混交林碳密度达57.1t/ha,显著高于其他林型。研究提出分类经营、低效林改造、动态监测体系等管理对策,为崇明生态岛建设提供科学依据。

[关键词] 森林碳储量; 碳密度; 空间异质性; 管理对策; 崇明区

中图分类号: S285 文献标识码: A

Research on the Spatial Pattern and Management Countermeasures of Forest Carbon Storage in Chongming District, Shanghai

Ying Lu

Chongming District Forestry Station

[Abstract] As the first carbon neutrality demonstration zone in China, Chongming District's spatial pattern and management optimization of carbon storage in its forest ecosystem are of great significance for achieving the carbon neutrality goal. Based on the forest resource monitoring data of 2023, historical plot survey data and remote sensing technology, this study systematically evaluated the spatial heterogeneity of forest carbon storage in Chongming District and its causes. The results show that: (1) The total carbon storage of forests in the entire region is 3.04 million tons (1.267 million tons for vegetation and 1.773 million tons for soil), and the average carbon densities of vegetation and soil are 32.3 t/ha and 45.2 t/ha respectively; (2) The spatial differentiation of carbon density is significant. The high-value area is concentrated in the mature broad-leaved mixed forest area (>57 t/ha), and the low-value area is closely related to young forests or human interference (<26 t/ha). (3) Middle-aged forests contribute 39.1% of the vegetation carbon storage, and the carbon density of broad-leaved mixed forests reaches 57.1 t/ha, which is significantly higher than that of other forest types. The research proposes management countermeasures such as classified operation, transformation of low-efficiency forests, and dynamic monitoring systems, providing a scientific basis for the construction of Chongming Ecological Island.

[Key words] Forest carbon storage Carbon density Spatial heterogeneity Management countermeasures Chongming District

引言

全球气候变化背景下,森林生态系统作为陆地生态系统的主体,其碳储存潜力十分巨大,在调节全球碳循环及维持气候变化等方面具有重要作用^[1]。一方面,森林植被通过光合作用,存储了全球陆地植被碳库86%以上的有机碳;另一方面,森林土壤也蕴含丰富的碳,约占陆地碳库40%左右,两者是全球碳库的主

要组成部分^[2,3]。城市森林因受高强度人为干扰,其碳储量研究亟待深化。上海市崇明区作为全国首个碳中和示范区,森林覆盖率已达30.62%(2023年),但现有研究多聚焦单一树种或小尺度样地,全区尺度的碳储量空间格局与驱动机制仍不明晰。本研究以崇明区为研究对象,通过整合多源数据,揭示崇明区森林碳储量的空间分异特征、不同龄组与林分类型的碳汇能力差异以及

关键驱动因子,提出碳汇经营管理优化路径,研究成果可为区域碳中和政策制定提供理论支撑。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

崇明区地处长江入海口(31° 27′ N-31° 51′ N,121° 09′ E-121° 54′ E),属北亚热带季风气候区,年均气温15.3℃,年降水量1025mm。土壤类型以潮土(占62.3%)和黄棕壤(占31.7%)为主,成土母质多为长江冲积物。研究区森林植被以人工林为主,全区林地面积3.92万公顷,主要林分类型包括水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、阔叶混交林等,总面积39194.6ha(2023年)。

1.2 数据来源

森林资源数据:2023年上海市崇明区森林资源年度监测成果数据,涵盖3.92万公顷林地的面积、蓄积量、龄组及林分类型信息。

样地调查数据:样地调查分两部分:(1)乔木层的每木检尺调查,包括胸径、树高、冠幅、枝下高等指标;(2)土壤调查,包括土壤容重和土壤总碳含量的测定等指标。

2 研究方法

2.1 植被碳储量估算

本研究采用高翔伟、韩玉洁等^[4]建立的上海地区主要造林树种林分生物量-蓄积量回归方程以及郭雪艳、韩玉洁等^[5]建立的上海地区柑橘和桃树等果林的研究模型,参考中国森林植被生物量和碳储量评估结果^[6]对不同林分的含碳系数进行了系统推算(表1)。根据2023年上海市森林资源年度监测成果数据,以小班为单位按不同林型估测上海市崇明区森林植被碳储量。

各林分类型的总生物量 $B_t(t)$ 计算公式如下:

$$B_t = \sum_{i=1}^n A_i \times B_i \tag{1}$$

式中, B_i 为各林分类型生物量(t); A 为各林分类型第*i*个小班的面积; i 为某一林分类型某个小班($i=1,2,3,\cdots,n$)

B_i 为某一林分类型的某个小班生物量(t/ha)计算公式如下:

$$B_i=aV_i+b \tag{2}$$

式中, V_i 为某一林分类型的某个小班单位面积蓄积量(m^3/ha); a 、 b 为常数; i 为某一林分类型

崇明区森林植被总碳储量 $C(t)$ 计算公式如下:

$$C_t=B_t\times C_c \tag{3}$$

某林分类型碳密度 $P_i(t/ha)$ 可用该林分类型总碳储量 C_t 与该林分类型总面积 $A(ha)$ 相除即可得到。

$$P_i=C_t/C_c \tag{4}$$

式中, C_t 为某一林分类型的某个小班某个小班生物量(t/ha); C_c 为某一林种的含碳系数。

式中 bm 为单位面积生物量(t/ha), V 为单位面积蓄积量(m^3/ha), BM 为某种竹林、灌木的总生物量(t); F 为某种果树的总碳储量(t); S 为某种竹林、灌木或果树的面积(ha)。

表1 主要造林树种林分生物量—蓄积量回归方程及含碳系数

林分类型	优势树种(组)	模型公式	含碳系数
乔木林	樟木	$bm=0.40141\times V^{0.32}$	0.4916
	水杉	$bm=0.34603\times V^{0.29}$	0.5013
	杨树	$bm=0.4754\times V^{0.30}$	0.4956
	女贞	$bm=0.5612\times V^{0.2}$	0.4289
	广玉兰	$bm=0.4801\times V^{0.4}$	0.4335
	杜英	$bm=0.573\times V^{0.4}$	0.4335
	银杏	$bm=2.4372\times V^{0.4}$	0.4437
	竹林	$bm=0.19046\times V^{0.7}$	0.5000
	针阔混	$bm=0.8136\times V^{0.18}$	0.4978
	阔叶混	$bm=0.6255\times V^{0.91}$	0.4900
	其他硬阔(含杂木林)	$bm=0.7564\times V^{0.8}$	0.4834
	杉木	$bm=0.3999\times V+22.5410$	0.5201
	其他松类	$bm=0.5168\times V+33.2378$	0.5100
灌木林	常绿阔叶	$bm=0.9501\times V^{0.17}$	0.4160
	橡、栎及其他软阔叶树	$bm=0.7084\times V^{0.21}$	0.4900
	散生竹、竹灌、丛生竹、混生竹等	$BM=26.397\times S$	0.5000
	栎灌、其它灌、松灌	$BM=12.48\times S$	0.5000
	含笑(灌木)、茶叶	$BM=0.04\times S$	0.5000
果林	桂花	$BM=3.71\times S$	0.5000
	木兰类	$BM=13.96\times S$	0.5000
	柑桔类	$F=9.9\times S$	0.5000
	梨	$F=7.92\times S$	0.5000
	苹果、樱桃、蓝莓等	$F=8.91\times S$	0.5000

2.2 土壤碳储量估算

本研究土壤碳储量测算是基于2011-2021年各个森林样地的土壤碳含量实测数据,用这些实测值代表每种林分类型的土壤碳密度值 P ,与每个区域内的每种林分类型面积 A 相乘后,相加可得到该区域该种林分类型的土壤碳储量,以此推算崇明区森林土壤总碳储量。所用公式如下:

$$C = \sum_{i=1}^n P \times A \tag{5}$$

式中: C 为某一区域某种林分类型的土壤碳储量, P 为某一区域某种林分类型土壤碳密度, A 为某一区域某种林分类型的小班面积,各区域各类型森林土壤碳储量相加即可得到崇明区土壤总碳储量。

3 结果与分析

评估结果显示：崇明区林地面积39194.6ha，森林生态系统总碳储量为304万t，其中森林植被碳储量为126.7万t，森林土壤碳储量为177.3万t；森林植被和土壤碳密度分别为32.3t/ha和45.2t/ha。

3.1各龄组碳储量特征

评估结果表明：从碳储量来看，中龄林对于崇明区森林生态系统总碳储量贡献最大，占比达67.8%，其中植被碳储量占比39.1%，土壤碳储量占比28.7%。从碳密度来看，成熟林植被层碳密度为62.2t/ha，但面积占比仅4.7%；幼龄林和中龄林植被层碳密度分别为23.4t/ha和45.7t/ha，面积占比72.4%。

表2 崇明区不同龄组森林碳储量及碳密度

龄组	林地面积 (ha)	森林植被层			森林土壤层		
		碳储量	碳密度	碳储量	碳储量	碳密度	碳储量
		(t)	(t/ha)	比例(%)	(t)	(t/ha)	比例(%)
幼龄林	17549.979	409850.7	23.4	32.3	793771.7	45.2	44.8
中龄林	10831.686	495403.4	45.7	39.1	508618.5	47.0	28.7
近熟林	2569.646	142378.1	55.4	11.2	120133.5	46.8	6.8
成熟林	1831.053	113898.8	62.2	9.0	82054.7	44.8	4.6
过熟林	702.077	49200.5	70.1	3.9	33202.5	47.3	1.9
其它	5710.167	56583.5	9.9	4.5	234943.2	41.1	13.3
合计	39194.608	1267315.0	32.3	100.0	1772724.1	45.2	100.0

注：其它包括灌木林地、苗圃地、未成林地、无立木林地等。

3.2各林分类型碳储量特征

评估结果表明：从碳储量来看，阔叶混交林对于崇明区森林生态系统总碳储量贡献最大，占比达78.8%，其植被层和土壤层碳储量占比分别为49.1%，碳储量占比29.7%。从碳密度来看，阔叶混交林植被层碳密度为57.1t/ha，是针阔混交林的2.4倍；杜英、女贞、果林和木兰类林分，碳密度较低，均低于10t/ha。

表3 崇明区各林分类型森林碳储量及碳密度

林分类型	林地面积 (ha)	森林植被层			森林土壤层		
		碳储量	碳密度	碳储量	碳储量	碳密度	碳储量
		(t)	(t/ha)	比例(%)	(t)	(t/ha)	比例(%)
水杉	4450.4	154715.4	34.8	12.2	215577.4	48.4	12.2
樟木	2489.7	94182.7	37.8	7.4	118985.1	47.8	6.7
杜英	90.4	682.8	7.6	0.1	3539.8	39.2	0.2
木兰类	464.4	4585.9	9.9	0.4	17848.3	38.4	1.0
女贞	1492.6	12389.1	8.3	1.0	65242.3	43.7	3.7
杨树	630.9	36352.3	57.6	2.9	26019.4	41.2	1.5
银杏	456.0	19794.8	43.4	1.6	18806.8	41.2	1.1
阔叶混	10895.3	622637.8	57.1	49.1	526025.6	48.3	29.7
针阔混	4989.9	117972.3	23.6	9.3	240913.3	48.3	13.6
竹林	1205.6	15911.6	13.2	1.3	48632.5	40.3	2.7
果林	3736.0	35603.7	9.5	2.8	155173.6	41.5	8.8
其它	8293.3	152486.5	18.4	12.0	335960.0	40.5	19.0
合计	39194.6	1267315.0	32.3	100.0	1772724.1	45.2	100.0

注：其它包括灌木林地、苗圃地、未成林地、无立木林地等。

3.3空间分布异质性

从植被碳密度来看，高值区(>44t/ha)集中于陈家镇、建设镇等成熟阔叶混交林区域，低值区(<26t/ha)多见于绿华镇幼龄林及崇明工业园区(图1)。从土壤碳密度来看，高值区(>45t/ha)分布在上实现代农业园区，低值区(<38t/ha)与木兰类幼龄林相关(图2)。

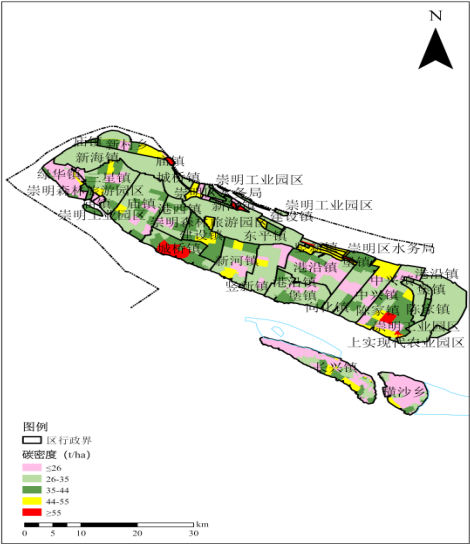


图1 基于村落的崇明区森林生物量碳密度分布图(2023)

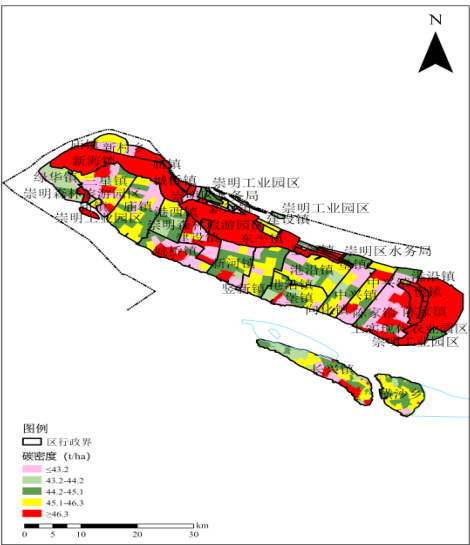


图2 基于村落的崇明区土壤碳密度分布图

4 管理对策

基于研究发现的碳储量空间分异特征及驱动机制，结合崇明区生态岛发展战略，提出以下管理建议：

4.1实施分类经营策略

针对不同林分类型的碳汇特征，建立差异化管理机制：(1)高碳汇区域保育：对陈家镇-中兴镇等阔叶混交林集中区(碳密度>57t/ha)，实施严格的封育保护政策，禁止经营性采伐，建立碳汇功能保护区。(2)中幼林抚育优化：对绿华镇等低效林区(碳密

度<26t/ha),开展间伐抚育,清除病弱木,促进林分结构优化。多项研究表明,适度间伐(强度25%–35%)可使林分碳汇能力提升15%–20%,该结论得到杉木^[7]、湿地松^[8]、红锥^[9]等人工林的长期定位观测支持,其机制主要源于间伐后林分结构优化、林下植被恢复及土壤有机碳固持增强(活性碳组分提升的协同作用^{[7][8][9]})。

4.2 推进低效林改造工程

针对土壤碳密度低于40t/ha的林地,实施三项改造措施:(1)树种更新:将杉木、杨树等低效林分替换为木荷、麻栎等高产碳汇树种,改造后碳密度可提升30%–50%^[8];(2)土壤改良:通过林木废弃物还田、有机肥施用等措施提升土壤有机碳含量;(3)复合经营:发展林下经济,种植菌类作物,既能提升碳汇能力,又能增加经济收益。

4.3 构建动态监测体系

建立“天空地一体化”监测网络:(1)遥感监测:利用卫星影像每季度更新植被覆盖度数据,结合机器学习算法实现碳储量动态评估;(2)地面观测:每年继续对现有的固定监测样地开展调查采样,建立时间序列数据库;(3)智慧管理平台:开发森林碳汇数字孪生系统,集成监测数据与地理信息系统,实现碳汇功能可视化。

4.4 完善政策保障机制

(1)碳汇交易试点:建立区域碳汇交易平台,将崇明森林碳储量纳入上海碳排放权交易市场。(2)生态补偿制度:对碳密度提升显著的乡镇给予财政补贴,标准可设定为每吨碳增量50元。(3)科研支撑计划:依托高校科研力量,设立专项基金开展碳汇功能提升技术研发,重点攻关乡土树种选育、土壤固碳强化等关键技术。

5 结论

本研究通过多源数据融合与空间分析,系统揭示了崇明区森林碳储量的空间格局与驱动机制,主要结论如下:

(1)碳储量现状:全区森林总碳储量为304.0万吨,其中植被碳储量126.7万吨(占比41.7%),土壤碳储量177.3万吨(占比58.3%),森林植被和土壤碳密度分别为32.3t/ha和45.2t/ha。(2)空间分异特征:碳密度呈现显著空间异质性,高值区集中分布于陈家镇-中兴镇等成熟阔叶混交林区域,而低值区与杜英、女贞、果林和木兰类等林分类型高度重叠。(3)林分类型差异:阔叶混

交林植被层碳密度达57.1t/ha,显著高于其他林型,其土壤层碳密度也较高,为48.3t/ha。幼龄林和中龄林面积占比72.4%,崇明区森林生态系统碳储量具备较大的增长空间。

建议通过分类经营、低效林改造、动态监测体系建设等措施优化碳汇管理。本研究成果为崇明生态岛建设提供了量化依据,同时可为长三角城市群森林碳汇功能提升提供参考范式。

[基金项目]

中央财政林业草原科技推广示范项目《城市人工林固碳增汇经营技术推广示范》(编号:沪(2024)TG01号)。

[参考文献]

[1]THOM D,RAMMER W,SEIDL R.The impact of future forest dynamics on climate: interactive effects of changing vegetation and disturbance regimes[J].Ecological monographs,2017,87(4):665–684.

[2]PAN Y,BIRDSEY R A,FANG J,et al.A large and persistent carbon sink in the world's forests[J].science,2011,333(6045):988–993.

[3]CHEN X,CHEN H Y.Global effects of plant litter alterations on soil CO₂ to the atmosphere[J].Global Change Biology,2018,24(8):3462–3471.

[4]高翔伟,戴咏梅,韩玉洁.上海市森林生态连清体系监测布局与网络建设研究[M].北京:中国林业出版社,2016.

[5]郭雪艳,蔡婷,段秀文,等.上海主要经果林生态系统碳储量及其分布格局[J].生态学杂志,2013,32(11):2881–2885.

[6]李海奎,雷渊才.中国森林植被生物量和碳储量评估[M].北京:中国林业出版社,2010.

[7]李萌,陈永康.不同间伐强度对南亚热带杉木人工林林下植物功能群的影响[J].生态学报,2020,40(14):4985–4993.

[8]董凯丽,张国湘,王瑞辉.抚育间伐对湿地松人工林生长及林下植被多样性的影响[J].林业资源管理,2019,(4):59–68.

[9]王家妍,韦慧,朱兵,等.抚育间伐对红锥人工林生长和碳汇能力的影响[J].亚热带农业研究,2024,20(3):145–154.

作者简介:

陆颖(1986—),女,汉族,上海市人,大学本科,绿化工程师,主要研究方向为森林资源监测与管理。