

江苏省森林植被碳储量分布结构及变化特征

徐 钊,曹国华,李思刚,刘 斌

(江苏省森林资源监测中心,江苏 南京 210036)

摘 要:2010年以来,江苏省森林资源呈现出面积下降但蓄积增长的分化走势,森林类型和区域分布发生结构性变化,对全省森林植被碳储量产生较大影响。基于全国第8次(2010年)、第9次(2015年)2期森林资源清查资料,利用生物量转换因子连续函数法对5 a间全省森林植被碳储量、碳密度、地理空间分布格局及动态变化的特征和原因进行了研究。结果表明:1)2015年江苏省森林/林木碳储量分别为 $3\ 638.10\times 10^4\text{t}$ 、 $4\ 594.59\times 10^4\text{t}$,相比2010年增长8.94%、11.53%,森林碳密度 $23.15\text{t}/\text{hm}^2$,增加14.22%。2)2015年全省乔木林碳储量 $3\ 321.73\times 10^4\text{t}$,同比增长9.97%,树种(组)碳储量比重标准差下降4.38,其中杨树比重降低17.45%,树种碳储量更平衡;碳储量林龄分布由2010年时集中于中龄林(53.86%)大幅调整为23:33:44(幼:中:近成过),结构更为合理。3)2015年全省森林碳储量在地理板块间分布比重为苏北57.26%、苏南32.61%、苏中10.13%,前两者分别降低10.5%、增长10.65%,区域分布结构趋于均衡,不同类型在市域间表现较大差异性。经分析,全省各森林类型间、树种间、林龄间、区域间的碳储量、碳密度结构趋向合理,增长的可持续性得到强化,在不同地区间造林绿化、采伐消耗、森林抚育等针对性措施驱动下,全省碳库潜力巨大,未来增长空间与速度可观。同时,在四旁树和散生木碳储量估算方法、不同树种(组)宜地生物量转换因子甄选、江淮地区灌木经济林和竹林单位面积碳储量因子选取等方面做了讨论,以期为更高精度下基于清查数据估算华东平原省份森林植被碳储量提供借鉴。

关键词:江苏省;森林植被;碳储量;碳密度;2015年;2010年;结构;变化

中图分类号:S718.557

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2019)02-0069-07

Characteristics of Carbon Storage Distribution Structure and Dynamic Change of Forest Vegetation in Jiangsu Province

XU Zhao, CAO Guo-hua, LI Si-gang, LIU Bin

(Jiangsu Forest Resources Monitoring Center, Nanjing 210036, Jiangsu, China)

Abstract: Since 2010, the forest resources in Jiangsu Province have shown differentiation trend: decrease in forest area and increase in accumulation growth. Structural changes occurred in forest types and regional distribution, which exerted great impact on forest carbon storage in the whole province. Based on the ninth (2015) and eighth (2010) national forest resource inventory data, the characteristics and driving forces of the changes in carbon reserves, carbon density, spatial distribution patterns and forest vegetation were studied by using the continuous function method of biomass conversion factor. The results showed that: 1) the forest carbon storage and the carbon storage of trees in Jiangsu Province in 2015 was $3\ 638.10\times 10^4\text{t}$ and $4\ 594.59\times 10^4\text{t}$, increased by 8.94% and 11.53%, respectively, compared to 2010, and the forest carbon density in 2015 was $23.15\text{t}/\text{hm}^2$, increased by 14.22%. 2) The forest carbon storage of arbor tree species was $3\ 321.73\times 10^4\text{t}$, increased by 9.97%. The standard deviation weight of the carbon storage of the

收稿日期:2018-06-06 修回日期:2018-08-29

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0502704);江苏省林业三新工程(LYSX[2015]19);江苏省高校优秀学科建设工程自助项目(PAPD)。

作者简介:徐 钊,男,硕士,工程师,研究方向:森林资源调查与动态监测。E-mail:342675091@qq.com

dominant tree species/group decreased by 4.38, of which the poplar tree species accounted for 17.45%, and the carbon storage of the tree species were more balanced. The proportion of forest age distribution of the carbon storage among young/middle aged/premature, mature and over mature stands were 23 : 33 : 44 in 2015, more reasonable in structure than 2010, in which the middle aged forest stands accounted for 53.86%. 3) By 2015, the geographical distribution of forest carbon reserves in the province was 57.26% in northern Jiangsu, 32.61% in southern and 10.13% in central part of Jiangsu. The proportion of the northern Jiangsu increased by 10.5% and that of the southern Jiangsu decreased by 10.65%. The structure tended to be optimal, and the forest types varied in different districts or areas. It was concluded that the structure of carbon storage and density among forest types, tree species, forest ages and regions tended to be reasonable, and the sustainability of growth was strengthened in Jiangsu Province, driven by afforestation, cutting consumption and forest tending among different regions. There would be a huge potential carbon pool, its growth space would be large and its growth speed would be considerably great in the future. Additionally, this paper made a useful discussion on the method of estimating the reserves of the "four-side trees" and scattered wood carbon reserves, the selection of the suitable biomass conversion factor of different tree species, the selection of the shrub economic forest and the selection of the carbon reserves in the unit area of the bamboo forest in region of the Changjiang River and the Huaihe River, in order to estimate the carbon storage of the forest vegetation in the East China Plain based on the higher precision.

Key words: Jiangsu Province; forest vegetation; carbon storage; carbon density; 2015; 2010; structure; change

温室气体的“源”和“汇”循环问题一直是全球气候变化研究的着力点,大气、海洋和陆地生物圈是人为源 CO₂ 的 3 大“汇”库,而森林作为陆地生态系统的主要组成,因占 2/3 的陆生年固定碳量和较突出的碳累积效率,在减缓大气 CO₂ 浓度升高和气候变暖方面发挥着不可替代的特殊作用^[1]。森林碳储量是全国林业碳汇计量监测体系的关键一环,是评价森林固碳能力及动态消长的重要数据,成为反映包括森林质量、造林力度、资源管理水平在内的林业生态文明建设成效的重要指标^[2]。

如何及时准确地估算森林碳储量,国内外学者开展基于不同尺度、不同手段的广泛研究,在遥感估测、大气反演等领域取得一定理论成果^[3]。近年来,建立在国家森林资源三级调查体系(一类清查、二类调查、作业设计调查)成果基础上的估算方法体现出可操作性强、尺度适应性广、准确性符合预期的特点,相关研究内容与实践应用日益增多。其中,省级区划尺度上森林资源连续清查数据运用于大尺度森林碳储量估算已被证明是有效的,在多个省区得到有效运用。

江苏省素有“一山两水七分田”的说法,天然林资源极其匮乏,2003 年全省启动绿色江苏建设以来,在行政推动、产业带动下,各类造林工程建设突飞猛进,杨树为全省森林蓄积增长贡献超过 80%。自 2010 年起,全省造林绿化规模逐年缩减,造林工程与树种选择呈现多样化趋势。根据 2010、2015 年

2 次清查结果,虽然全省森林覆盖率仅增加 0.6%,但森林蓄积量实现增长,森林类型结构趋于复杂,区域间各森林及林木资源指标走势逐渐分化。因而有必要基于近 2 期清查数据对江苏省 5 a 间森林植被碳储量、碳密度、地理空间分布格局及动态变化进行研究分析,为全省及区域造林与森林经营管理政策措施的制订提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江苏位于我国大陆东部沿海中心、长江下游,东濒黄海(116°18′—121°57′E, 30°45′—35°20′N),省际陆地边界线 3 383 km,面积 10.72×10⁴ km²,占全国的 1.12%,整体地势平坦,绝大部分地区在海拔 50 m 以下,境内湖泊众多,水网密布,平原、水域面积分别占 69%和 17%,比例之高居全国首位,低山丘陵面积仅占 14%,集中分布在西南和北部。年均温度 13~16℃,最低月均温度 -1~3℃,年降水量 800~1 200 mm,地处暖温带向亚热带过渡地区,跨越南亚热带、北亚热带和中亚热带 3 个生物气候带,典型地带性植被类型依次为落叶阔叶林、落叶常绿阔叶混交林和常绿阔叶林,人工林比重超过 96%。

1.2 数据来源

江苏省根据国家林业局统一部署,分别开展了第 8 次(2010 年)、第 9 次(2015 年)森林资源清查,对全省 8 536 个固定布设样地进行复测调查,2 期主

要结果抽样精度(95%可靠性)均达到技术规定要求。本研究以2期清查成果为数据源,提取全省及分设区市乔木林(刨除梨、枣、柿等经济树种)面积,乔木树种单株材积,经济林树种、面积,竹林面积、株数,灌木林面积等因子。

1.3 研究方法

1.3.1 森林碳储量估算 根据清查成果数据类型和活立木蓄积量(V)、森林生物量(B)、碳储量(C_s)关系的相关研究结论,选择生物量转换因子连续函数法^[4]进行碳储量估算。

$$C_s = \sum_i B_i \times q_i + \sum_j A_j \times S_j \times q_j \quad (1)$$

式中, C_s 为区域森林碳储量; B_i 为区域乔木类型(包括乔木林、疏林、四旁树、散生木)各主要树种(组)生物量, q_i 为对应树种含碳率; A_j 分别为区域经济林、竹林和灌木林单位面积生物量, S_j 为对应面积, q_j 为对应类型含碳率。

1.3.2 乔木类型生物量估算 研究表明,森林蓄积量与生物量存在线性关系,鉴于清查数据源包含样地内不同立木类型蓄积量,为提高估算的准确性,对于乔木林(包含跨角林)、疏林、四旁树、散生木类型(未包括林下灌木层、草本层、死地被物层)均采用分优势树种蓄积量——生物量换算法。根据方精云^[5]等、Zhang^[6]等、刘国华^[7]等关于不同森林类型大样本因子实测拟合研究,并参照田勇燕^[8]等对常见乔木含碳率数据的收集结果,结合江苏以杨树(*Populus*)、樟树(*Cinnamomum*)、榆树(*Ulmus*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)及阔叶混(依据《国家森林资源连续清查技术规定》关于混交树种组的规定)为主的阔叶林树种(组)特征和以水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、湿地松(*Pinus elliottii*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柏树(*Platycladus orientalis*)为主的针叶林树种(组)特征,并将未矮化的银杏(*Ginkgo biloba*)树种纳入,建立江苏主要乔木类型生物量与蓄积量回归方程,公式:

$$B_i = (a_i V_i + b_i) \times S_i \quad (2)$$

式中, a_i 、 b_i 为计算参数, V_i 为优势树种单位面积蓄积量, S_i 为对应面积;其中四旁树、散生木均按江苏四旁树折算面积表进行分树种分径阶面积折算后计算单位面积蓄积量(表1)。

1.3.3 经济林、竹林和一般灌木林生物量估算

1)江苏经济树种分为乔木型(矮化,一般为果树林)和特别灌木林,主要位于淮北地区,树种选择较为单一,主要为桃(*Amygdalus persica*)、梨(*Pyrus*)、苹果(*Malus pumila*)等,另有少量山核桃(*Carya cathayensis*)、枇杷(*Eriobotrya japonica*)种植。国内关于经济树种生物量的研究成果较少且

区域性差异较大,鉴于清查数据仅提供经济林面积数据,本文综合引用田勇燕^[9]等关于徐州地区经济树种生物量估算结果和方精云等人成果,其中,苹果采用9~10年生苹果树萌芽展叶期的平均生物量17.01 t/hm²,梨取18.6 t/hm²,其他乔木型经济树种取23.7 t/hm²,其他灌木型经济树种取淮河以北灌木林平均生物量13.1 t/hm²(表2)。

表1 江苏省主要优势树种(组)生物量转换因子

Table 1 Biomass conversion factors of dominant tree species in Jiangsu Province

树种/组	a	b	p
杉木	0.399 9	22.541 0	0.510 0
水杉,池杉,其他杉类	0.415 8	41.331 8	0.508 0
柏树	0.612 9	26.145 1	0.510 0
湿地松/火炬松	0.516 8	33.237 8	0.545 0
其他松类	0.516 2	18.293 0	0.509 0
针叶混	0.744 2	26.806 0	0.500 0
栎树(<i>Quercus</i>)	0.784 8	16.715 0	0.499 0
樟树	0.797 5	0.420 4	0.454 0
榆树	0.756 4	8.310 3	0.500 0
杨树	0.496 9	26.973 0	0.451 0
泡桐(<i>Paulownia</i>)	0.895 6	0.004 8	0.500 0
柳树(<i>Salix</i> spp.)	0.978 8	5.376 4	0.465 0
银杏(<i>Ginkgo biloba</i>)	1.178 3	2.558 5	0.466 0
其他硬阔	1.178 3	2.558 5	0.500 0
其他软阔	0.475 4	30.603 0	0.500 0
阔叶混	0.978 8	5.376 4	0.500 0
针阔混	0.801 9	12.279 9	0.500 0

2)目前竹林常用生物量估算方法主要有2种,经分析,江苏2期清查数据中每亩杂竹株数较多,平均 2.12×10^4 株/hm²,密度较大,单株生物量与22.5 kg/株的全国平均水平偏差较大,若采用竹林总株数结合平均单株生物量法则结果明显偏高,本文利用郭兆迪^[10]等建立的毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)和杂竹生物量数据库,采用单位平均生物量结合竹林面积估算法,毛竹林、杂竹林分别取81.9 t/hm²和53.1 t/hm²。

3)资源清查资料仅包含灌木林面积和盖度数据,本文采用灌木林面积和单位面积平均生物量进行估算,并考虑江苏省地跨我国地理南北分界线因素,单位平均生物量以淮河为界,淮河以北、以南分别对取13.14 t/hm²、19.76 t/hm²进行估算^[4]。

2 结果与分析

2.1 全省乔木林碳储量、碳密度现状与动态

全省2015年乔木林碳储量 $3\ 321.73 \times 10^4$ t,碳密度25.74 t/hm²,相比2010年分别增长9.97%、11.84%。

2.1.1 不同优势树种(组)碳储量、碳密度现状与动态 2015年杨树贡献了55.18%的碳储量,其他树种(组)共占44.82%。其中,阔叶混超10%,樟树、其他硬阔均超5%,针叶树种碳储量合计仅占13.37%,不同树种(组)间固碳量差异较明显。碳密度方面,栎树、水池杉均在35 t/hm²以上,柳树、榆树、其他硬阔碳密度在10 t/hm²左右,其他树种(组)位于20~35 t/hm²,体现出不同树种(组)林分发育状况的优劣。

经对比,2015年相对于2010年树种(组)碳储量结构已显著优化,标准差从17.70下降至13.32,其中,杨树比重下降了17.45%,其他14个树种(组)有10种占比出现增长,其中,樟树增长5倍,榆树、其他硬阔等增长超过3倍,柳树、阔叶混、水池杉涨幅均超50%,但银杏、松树、杉木则出现大幅下降;碳密度也呈现整体上升走势,15个树种(组)中有12种有所增加,其中,杨树、阔叶混作为碳储量贡献最大的树种(组),其碳密度增幅明显。

2.1.2 不同龄级碳储量、碳密度现状与动态 由表3可知,乔木林各龄级碳储量从高至低依次为中龄林(32.97%)>近熟林(29.69%)>幼龄林(23.23%)>成过熟林(14.10%),分布结构相对于2010年集中于中龄林(53.86%)的情况大为改善,更接近法正林理论中林龄蓄积比1:3:6的期望值^[1],森林可持续固碳能力得到加强,但与全国森林植被碳储量主要分布在成熟林的特征仍有差距^[12-13]。

2015年乔木林碳密度随林龄递增,中龄林碳密度达到幼龄林252.74%后逐渐减缓;与2010年比较,各龄级碳密度均有所增加,其中,中龄林增幅最大,同比增加26.65%。分树种看,2015年杨树、柏木碳储量在各龄级的分布较为均衡,樟树、榆树、阔叶混、其他软硬阔集中于中幼龄;对比2010年,杨树碳储量的林龄分布结构改善明显,从集中于中龄林

(61.45%)优化为接近1:3:6,杉木则呈现衰退走势,由成过熟林占比48.22%进一步增加至74.34%且无幼龄林分布,湿地松/火炬松、栎树、其他松类表现出类似的衰退走势。

2.1.3 乔木林碳储量、碳密度变化原因分析 自2003年启动“绿色江苏”建设至2010年,全省累积成片栽植的33.74×10⁴hm²杨树林逐渐进入采伐期,在木材价格长期滞涨、惠农政策支持、杨树季节性飘絮影响等多重因素推动下,杨树采伐规模与伐后栽植难度均逐年加大,5a间,杨树面积净减28.73×10⁴hm²,年均净减8.42%,主要集中在中龄、近熟2个龄级,共同促成了杨树碳储量比重大幅下降而各林级占比有效改善的结果。2003年之后栽植樟树、榆树、水池杉、阔叶混等林种主要为防护林且未进入采伐期,生长情况较好;同时,随着全省造林绿化向发挥生态社会综合效益转变,树种选择更加多样,各类阔叶型适地树种造林比例连年提高,形成了碳储量大幅增长同时龄级分布集中在中幼龄的现状;而松树、杉木针叶树种等在全省分布较广泛且零碎,生长速率、综合效益不突出,病虫害发生率高,已逐渐退出江苏主要造林树种选择范围,加上采伐抚育缺位,出现了固碳功能的严重退化。

2.2 全省及区域间不同类型碳储量、碳密度现状与动态

2.2.1 全省森林碳储量、碳密度及动态 森林碳储量包括乔木林、经济林、竹林、一般灌木林。从表2可以看出,5a间森林总面积出现了5.79%的缩减,其中乔木林、经济林面积分别下降3.91%、17.8%;2015年全省森林碳储量相比2010年仍增加了271.74~3638.1×10⁴t,增幅8.94%,年均增量为54.348×10⁴t,其中乔木林贡献了总量的91.30%,同比增加2.34%,表明乔木林是江苏省森林植被碳储量的主要载体。

表2 江苏省2期森林/林木碳储量、碳密度

Table 2 Forest and tree carbon storage and carbon density in Jiangsu Province during the study term

年份	类型	林木 碳储量 合计	森林 碳储量 合计	乔木类型林分					经济林	竹林	一般 灌木林
				小计	乔木林	疏林	四旁树	散生木			
2010	面积/(×10 ⁴ hm ²)	187.45	166.12	154.93	133.60	0.12	19.73	1.48	27.48	3.48	1.56
	碳储量/10 ⁴ t	4119.51	3366.36	3773.47	3020.32	2.61	684.88	65.66	203.54	128.68	13.82
	碳密度/(t·hm ⁻²)	21.98	20.26	24.36	22.61	21.75	34.71	44.36	7.41	36.98	8.86
2015	面积/(×10 ⁴ hm ²)	181.94	157.18	153.83	129.07	0.24	22.37	2.15	22.58	3.12	2.41
	碳储量/10 ⁴ t	4594.59	3638.10	4278.22	3321.73	1.57	859.31	95.61	173.79	120.85	21.73
	碳密度/(t·hm ⁻²)	25.25	23.15	27.81	25.74	6.54	38.41	44.47	7.70	38.73	9.02

2015年全省森林碳密度相比2010年增加了2.88 t/hm²,达23.15 t/hm²,5a间提高了14.22%,年均增长2.88%;全省各类型碳密度差异较大,竹

林因毛竹比重超过85%,2015年碳密度达38.73 t/hm²,经济林、竹林均不到10 t/hm²,体现了不同类型单位面积固碳能力的强弱。

2.2.2 全省林木碳储量、碳密度及动态 全省林木植被资源在森林基础上涵盖了四旁树、疏林、散生木。由表 3 可以看出,2015 年全省林木植被碳储量达 $4\,594.59 \times 10^4 \text{ t}$, 同比增长 11.53%。其中,四旁树碳储量占总量的 18.70%, 增加 $174.43 \times 10^4 \text{ t}$, 增

量贡献率达 33.21%, 仅次于乔木林, 这是东部平原少林省份的特点之一, 也是影响江苏林木固碳能力的重要因素, 疏林、散生木碳储量、面积(折算面积)比重较低, 合计分别占 2 期总量不到 3%。

表 3 江苏省乔木林分树种按林级碳储量、碳密度

Table 3 Forest carbon storage and carbon density by stand age and tree species in Jiangsu Province

树种(组)	年份	幼龄林		中龄林		近熟林		成过熟林		合计	
		碳储量 / $\times 10^4 \text{ t}$	碳密度 / $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	碳储量 / $\times 10^4 \text{ t}$	碳密度 / $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	碳储量 / $\times 10^4 \text{ t}$	碳密度 / $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	碳储量 / $\times 10^4 \text{ t}$	碳密度 / $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	碳储量 / $\times 10^4 \text{ t}$	碳密度 / $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$
杨树	2010	371.72	17.97	1345.85	27.34	394.56	33.27	81.44	39.92	2 193.57	26.17
	2015	134.15	15.97	577.03	32.17	857.82	38.99	263.84	39.85	1 832.83	33.35
樟树	2010	26.26	6.08	0.51	25.38					26.77	6.17
	2015	134.01	17.31	47.14	102.03					181.15	22.09
栎树	2010	11.84	19.10	4.91	40.94	16.10	67.08			32.85	33.52
	2015	4.19	8.74	14.71	61.27	14.67	61.14	12.14	101.19	45.72	42.33
柳树	2010	2.38	5.80	2.07	5.75	2.22	15.83	4.40	36.64	11.06	10.74
	2015	16.46	7.51	4.98	12.96	6.68	25.29	2.31	19.23	30.42	10.28
银杏	2010	15.24	4.10	38.25	13.86	27.37	31.83			80.86	11.02
	2015			4.59	12.74					4.59	12.74
榆树	2010	3.15	6.56	1.60	53.31	3.40	28.30			8.14	12.93
	2015	27.09	7.32	9.85	20.52					36.94	8.83
其他软阔	2010	40.11	15.43	19.39	16.16	10.72	22.34	10.84	30.12	81.06	17.47
	2015	73.23	17.09	50.46	28.80	10.25	21.35	17.81	24.73	151.75	20.97
其他硬阔	2010	17.27	5.38	16.26	32.51					33.52	9.04
	2015	96.82	7.50	75.08	31.52					171.91	11.24
阔叶混	2010	71.63	8.48	91.69	21.52	28.82	40.03	14.46	30.13	206.59	14.85
	2015	189.81	13.85	170.22	29.79	22.36	37.26	40.02	47.64	422.41	20.25
柏木	2010	4.65	9.69	12.24	25.50	17.71	36.90			34.60	24.03
	2015	2.26	4.72	10.22	28.39	25.03	34.76			37.51	24.05
湿地松/火炬松	2010	15.03	20.87	8.45	35.20	23.53	32.69	23.00	27.39	70.02	27.78
	2015	16.93	23.51	29.28	34.86	13.46	37.38	38.74	40.35	98.40	34.17
其他松类	2010	6.34	10.57	10.71	17.85	8.64	24.01	7.53	20.91	33.22	17.30
	2015	3.09	12.86	2.98	24.85	6.33	26.38	6.09	25.39	18.49	22.01
杉木	2010	1.68	13.99	9.85	20.51	12.20	23.91	22.09	26.30	45.81	23.49
	2015			9.05	25.14			26.23	31.22	35.28	29.40
水池杉及 其他杉类	2010	9.34	49.14	40.87	37.85	17.19	47.76	19.43	74.72	86.83	45.94
	2015	61.84	21.94	44.39	71.82	4.11	34.25	42.34	84.00	152.67	37.60
针阔混	2010	30.90	17.17	24.04	25.04	20.45	28.40			75.39	21.66
	2015	11.86	9.88	45.35	40.42	25.52	42.54	18.94	39.45	101.68	29.89
总计	2010	627.52	12.96	1 626.68	26.10	582.92	33.18	183.19	34.56	3 020.32	22.61
	2015	771.74	13.11	1 095.32	33.06	986.23	38.49	468.44	40.93	3 321.73	25.74

2.2.3 区域间碳储量、碳密度分布特征 从表 4 可看出,2015 年全省 3 大板块间森林碳储量从高到低依次是苏北(57.26%)、苏南(32.61%)、苏中(10.13%), 其中,徐州占比超过 1/5, 南京、淮安、盐城在 10% 以上, 另有市未达到 5%, 各区域间森林固碳体量相差较大; 碳密度表现出“沙漏”型区域特征, 苏中 2 市在 $10 \text{ t}/\text{hm}^2$ 左右, 6 市超过 25%, 徐州接近 $30 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。分类型看, 各市乔木林碳储量比重与森林碳储量相近; 经济林则是苏南的无锡和苏北的

徐州、盐城 2 市较为突出, 苏北地区的宿迁、淮安则远低于其乔木林碳储量比重; 竹林呈现南多北少特点, 苏南 5 市竹林碳储量比重高达 92.09%, 其中无锡占 40.66%, 可见, 不同森林类型在区域间碳储分布差异显著。

对比 2010 年, 苏南森林碳储量 5 市比重均有所增长, 无锡、苏州约 3%, 苏北 5 市均下降, 淮安、宿迁超过 3%, 2 大板块分别增加 10.5%、降低 10.65%, 区域间呈现由南北向规律性变化。各森林

表 4 江苏省区域间碳储量、碳密度动态变化

Table 4 Dynamic changes of carbon storage and carbon density in Jiangsu Province

类型	年份	苏南				苏中				苏北						
		南京	无锡	常州	苏州	镇江	南通	扬州	泰州	徐州	连云港	淮安	盐城	宿迁		
碳储量/ $\times 10^4$ t	森林	2010	278.82	132.31	140.68	85.86	106.15	87.47	151.00	97.90	737.10	264.56	471.81	402.94	409.75	
		2015	373.73	251.82	208.94	203.50	148.47	153.68	143.06	71.76	783.69	234.00	368.76	368.97	327.71	
	乔木林	2010	239.12	67.51	93.50	67.77	83.75	38.26	140.34	91.61	696.63	253.98	466.26	375.31	406.28	
		2015	338.88	180.46	158.99	192.76	129.58	132.55	133.64	64.74	741.98	224.24	358.00	343.58	322.34	
	经济林	2010	14.48	19.39	14.51	16.90	5.83	41.66	6.29	6.29	39.69	9.79	0.79	24.44	3.47	
		2015	14.18	22.22	11.18	8.38	5.50	15.57	5.05	5.84	40.92	9.77	4.42	25.39	5.38	
	竹林	2010	22.84	44.23	32.67	0.00	13.01	6.37	3.19	0.00	0.00	0.00	3.19	3.19	0.00	
		2015	14.74	49.14	37.58	0.00	9.83	3.19	3.19	0.00	0.00	0.00	3.19	0.00	0.00	
	四旁	2010	40.02	36.74	26.30	44.57	25.49	64.76	48.76	31.24	85.24	42.32	67.62	103.56	68.26	
		2015	68.31	46.23	34.62	68.76	22.24	78.89	61.73	26.56	124.84	47.74	90.40	113.64	75.37	
	碳密度/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	森林	2010	20.25	19.15	17.72	13.80	16.64	9.78	18.51	14.61	22.90	19.86	25.00	19.64	25.29
			2015	23.19	25.69	21.31	26.18	21.50	11.18	26.55	10.87	29.86	23.05	25.82	19.84	27.56
		乔木林	2010	21.72	19.68	17.25	15.76	17.37	17.23	20.16	15.96	26.22	21.16	25.35	22.18	25.84
			2015	25.62	30.88	22.22	28.80	23.71	11.94	28.97	11.01	35.80	25.05	27.12	22.72	28.88
		经济林	2010	7.54	8.50	8.64	9.39	6.94	6.55	6.55	6.55	7.35	8.16	6.55	7.02	7.24
			2015	7.38	8.05	7.12	9.97	6.55	6.83	10.53	9.73	7.58	8.14	9.20	7.29	7.36
竹林		2010	38.07	40.95	38.89		36.15	26.55	26.55				26.55	26.55		
		2015	40.95	40.95	39.15		40.95	26.55	26.55				26.55			
四旁		2010	40.02	36.74	26.30	44.57	25.49	64.76	48.76	31.24	85.24	42.32	67.62	103.56	68.26	
		2015	68.31	46.23	34.62	68.76	22.24	78.89	61.73	26.56	124.84	47.74	90.40	113.64	75.37	

类型中,13市中9市经济林碳储量比重略有增加,南通大幅下降11.51%;竹林类型中,苏南无锡、常州增长超5%,其他区域均下降或未有竹林样地。区域间四旁树碳储量比重同样整体表现出南增北减走势,苏南增加了2.67%。

2.2.4 区域间碳储量、碳密度分布原因分析 整体来看,2003—2010年,全省年均成片造林 8.30×10^4 hm^2 ,受国土资源禀赋制约,宜造林地不断缩减,2010—2015年全省年均成片造林下降至 6.31×10^4 hm^2 ,降幅达31.5%,同时,受林业比较效益下降等因素影响,全省普遍存在种植结构调整情况,经统计,特殊灌木林地(江苏均指经济林)年均减少 1×10^4 hm^2 ,5 a间有 41.48×10^4 hm^2 乔木林地转为其他地类,造成全省森林面积下降,但由于间隔期内森林、四旁树总生长量仍大于消耗量,因此总碳储量与碳密度仍有增长。

江苏各板块间地形地貌、水文气候差异较大,低山丘陵集中在西南部,苏北的徐州、连云港、淮安也有分布,其他地区(尤其是苏中)除湖泊水网外,均为平原,森林资源本底分布不均,各森林类型在不同区域间也有所侧重,碳储量、碳密度整体表现出“两头高、中间低”形态;竹林碳储量则集中于西南部的宁镇、宜溧、茅山山脉;而经济林在苏北宿迁、淮安2地缺少种植历史。5 a间,片状、四旁杨树消耗主要在

苏北5市,而苏南地区通过造林绿化推动森林面积增长22.3%的同时,采伐消耗控制在较低水平,林木经过5 a生长,表现出苏北碳储量比重大幅降低、苏南碳储量和碳密度均大幅提高的变化特点。个别地区(如南通)造林力度突出,但苗木规格偏低,5 a进界木比重低,同时受土地比较效益影响,传统蚕桑业迅速萎缩,形成森林面积增长53.69%,森林碳储量、碳密度比重变化相对不突出的同时经济林碳储量大幅下降的情况。

3 结论与讨论

3.1 结论

1)2010—2015年间江苏省的森林、林木碳储量均呈上升态势,分别增长了8.94%、11.53%,其中乔木林贡献了森林碳储量的91.30%,同比增加了2.34%,远高于全国85%的平均水平;四旁树占林木碳储量的18.7%,增量贡献达33.21%,成为华东平原省份的一大特色。

2)2015年全省乔木林各树种(组)间碳储量分布更平衡,相对于2010年,树种间比重标准差下降4.38,其中杨树比重大幅降低;各林龄碳间储量比例得到显著优化,幼、中、近成过熟林蓄积比例接近1:3:6,且超过70%的森林面积集中在中幼林,碳吸收速率有望迅速提升。

3)2015 年全省森林碳储量、碳密度区域分布结构也得到显著优化,苏北地区相对于 2010 年降低 10.5%、苏南地区增长了 10.65%,受自然禀赋、经济水平、林业基础等因素影响,乔木林、经济林、竹林、四旁树等不同类型的碳储量分布在市域间表现较大差异性。

4)从全省各区域间碳储量发展空间来看,苏南树种选择更多样、森林面积平稳增长,森林抚育力度大,碳汇增长速度稳定;苏北地区杨树近年从大规模采伐消耗逐渐向有序调整转变,随着连云港、盐城等地创建国家森林城市目标带动新一轮成片造林绿化,可望扭转碳储量下降趋势。

综合来看,江苏是拥有潜在巨大碳库的省份,未来增长空间与速度可观。

3.2 讨论

从估算结果在全国的位置来看,由于目前国内基于第 9 次清查的相关研究结果较少,对比近期国家、省域尺度研究结果,江苏省仅占 2008 年全国森林植被碳储量(郭兆迪^[10]等,2008)的 0.52%,森林碳密度远低于 2008 年全国平均水平 41.3 t/hm²,也低于陕西森林(2014 年^[14])33.73 t/hm²、四川(2013 年^[15])43.26 t/hm²、辽宁(2011 年^[16])30.18 t/hm²、重庆森林(2013 年^[17])50.77 t/hm²,其中,乔木林碳密度与周边平原省份相近,稍低于山东(2013 年^[14])27.24 t/hm²、略高于河南(2008 年^[18])20.0 t/hm²,处于与自然资源类型相近省份不落后但仍具有较大追赶空间的位置。

从碳储量估算方法来看,本研究将具有江苏森林资源特色的四旁树、散生木纳入范畴,并将省内分布普遍、用途广泛的银杏计入乔木林,以期尽可能囊括江苏所有林木类型;目前关于四旁树碳储量相关研究较少,文中采取先分树种按阶径以株数为依据进行折算得到单位面积蓄积量的方式首次进行估算,今后需进一步验证对比。通过与其他研究者关于江苏省森林碳储量估算结果的横向比较,发现其结果相对本文略高,可能原因是其杨树等树种含碳率 q 值偏高,经济林(特别规定灌木林地)未能对淮河以南、以北进行区分,竹林估算时对杂竹采用 22.5 kg/株生物量造成数据偏高,同时所采用的乔木林面积高于实际清查结果(可能将部分其它森林类型计入乔木林),说明在碳储量估算时应综合考虑森林类型、区域(立地条件)等因素。本文并未计入土壤、林下灌木、草本和凋落物碳储量,在更精细尺度上以更高精度估算江苏全省森林生态系统碳储量估算是下一步研究方向^[19-20]。

参考文献:

- [1] 谢高地,李士美,肖玉,等.碳汇价值的形成和评价[J].自然资源学报,2011,26(1):1-10.
- [2] 杨晓菲,鲁绍伟,饶良懿,等.中国森林生态系统碳储量及其影响因素研究进展[J].西北林学院学报,2011,26(3):73-78.
YANG X F, LU S W, RAO L Y, *et al.* Advances in the researches of carbon storage of forest ecology and related factors in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(3):73-78. (in Chinese)
- [3] 张春华,居为民,王登杰,等.2004—2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J].生态学报,2018,38(5):1739-1749.
ZHANG C H, JU W M, WANG D J, *et al.* Biomass carbon stocks and economic value dynamics of forests in Shandong Province from 2004 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(5):1739-1749. (in Chinese)
- [4] 方精云,刘国华,徐嵩龄.我国森林植被生物量和净生产力[J].生态学报,1996,16(5):497-508.
FANG J Y, LIU G H, XU S L. Biomass and net production of forest vegetation in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 1996, 16(5):497-508. (in Chinese)
- [5] FANG J Y, CHEN A P, PENG C H, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292:2320-2322.
- [6] ZHANG C H, JU W M, CHEN J M, *et al.* China's forest biomass carbon sink based on seven inventories from 1973 to 2008[J]. Climatic Change, 2013, 118(3/4):933-948.
- [7] 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[J].生态学报,2000,20(5):733-740.
LIU G H, FU B J, FANG J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5):733-740. (in Chinese)
- [8] 田勇燕,秦飞,言华,等.我国常见木本植物的含碳率[J].安徽农业科学,2011,39(26):16166-16169.
TIAN Y Y, QIN F, YAN H, *et al.* Carbon content rate in the common woody plants of China[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2011, 39(26):16166-16169. (in Chinese)
- [9] 田勇燕,秦飞,关庆伟.江苏徐州市果树经济林的碳储量估算[J].中国园艺文摘,2014(5):50-52.
- [10] 郭兆迪,胡会峰,李品,等.1977—2008 年中国森林生物量碳汇的时空变化[J].中国科学:生命科学,2013,43(5):421-431.
GUO Z D, HU H F, LI P, *et al.* Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests during 1977—2008[J]. Science China: Life Science, 2013, 43(5):421-431. (in Chinese)
- [11] 郑刚,戎慧,程小义,等.基于森林资源连续清查的江苏省森林资源动态变化分析[J].江苏林业科技,2017,44(2):43-47.
- [12] 李雷达,方晰,李斌,等.湖南省 2014 年森林植被碳储量、碳密度及其区域空间分布格局[J].中南林业科技大学学报,2017,37(1):70-77.
LI L D, FANG X, LI B, *et al.* Forest vegetation carbon storage, carbon density and spatial distribution pattern in 2014 in Hunan Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(1):70-77. (in Chinese)

- ZHAI H, ZHANG H, QIU M, *et al.* Soil biological activity of different tree types on slope land converted from farmland in the Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(4): 33-38. (in Chinese)
- [22] 雷波, 焦峰, 王志杰, 等. 延河流域生态环境脆弱性评价及其特征分析[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(3): 161-167.
LEI B, JIAO F, WANG Z J, *et al.* Eco-environment vulnerability evaluation and characteristics analysis in Yanhe River watershed[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(3): 161-167. (in Chinese)
- [23] GOLODETS C, STERNBERG M, KIGEL J. A community-level test of the leaf-height-seed ecology strategy scheme in relation to grazing conditions [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2009, 20(3): 392-402.
- [24] 温仲明, 焦峰, 焦菊英. 黄土丘陵区延河流域潜在植被分布预测与制图[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1897-1904.
WEN Z M, JIAO F, JIAO J Y. Prediction and mapping of potential vegetation distribution in Yanhe River catchment in hilly area of Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 1897-1904. (in Chinese)
- [25] 赫晓慧, 温仲明, 王金鑫. 基于 GAM 模型的延河流域主要草地物种空间分布及其与环境的关系[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(10): 1718-1724.
HE X H, WEN Z M, WANG J X. Spatial distribution of major grassland species and its relations to environment in Yanhe River catchment based on generalized additive model [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10): 1718-1724. (in Chinese)
- [26] 涛扬, 王得祥, 周金星, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落演替规律及物种多样性动态研究[J]. *西北林学院学报*, 2009, 24(5): 10-15.
YANG T, WANG D X, ZHOU J X, *et al.* Vegetation succession and species diversity dynamics of the plant communities in the Loess Hilly and Gully Region[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(5): 10-15. (in Chinese)
- [27] 罗先真, 熊源新, 夏欣, 等. 环境因子对湖泊岛屿苔藓植物分布和物种组成的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(7): 2352-2359.
LUO X Z, XIONG Y X, XIA X, *et al.* Environmental variables affect species composition and distribution of Bryophytes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2352-2359. (in Chinese)
- [28] 施宇. 延河流域植物功能性状对环境变化的响应和植物适应策略研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2012.
- [29] 闫建成, 梁存柱, 付晓玥, 等. 草原与荒漠一年生植物性状对降水变化的响应[J]. *草业学报*, 2013, 22(1): 68-76.
YAN J C, LIANG C Z, FU X Y, *et al.* The responses of annual plant traits to rainfall variation in steppe and desert regions [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(1): 68-76. (in Chinese)
- [30] 覃凤飞, 沈益新, 李兰海, 等. 干旱胁迫对新疆三个优势牧草种的光合特性与水分利用效率的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25(10): 86-94.
QIN F F, SHEN Y X, LI L H, *et al.* Effect of drought stress on the photosynthetic characteristics and water use efficiency of three dominant forage grasses in Sinkiang [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(10): 86-94. (in Chinese)
- [31] 王斌世, 张荣. 半干旱区农田杂草的生活史对策研究[J]. *草业学报*, 2011, 20(1): 257-260.
WANG B S, ZHANG R. Study of life-history strategy of farmland weeds in semi-arid areas [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(1): 257-260. (in Chinese)
- (上接第 75 页)
- [13] 王琪瑶, 李云红, 刘延坤, 等. 不同间伐强度下长白落叶松人工林土壤总有机碳特征及其影响因素[J]. *森林工程*, 2018, 34(1): 1-5.
WANG Q Y, LI Y H, LIU Y K, *et al.* The characteristics and impact factors of different thinning intensity on soil total organic in the *Larix olgensis* plantation[J]. *Forest Engineering*, 2018, 34(1): 1-5. (in Chinese)
- [14] 郝丽, 徐娟娟, 翟园, 等. 近 30 a 陕西省森林植被碳储量及其动态变化[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(5): 1056-1062.
HAO L, XU J J, ZHAI Y, *et al.* Forest carbon storage and its dynamic change in Shaanxi Province in recent 30 years[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(5): 1056-1062. (in Chinese)
- [15] 邵波, 燕腾. 四川省森林植被碳储量及碳密度估算[J]. *西南林业大学学报*, 2017, 37(2): 179-183.
SHAO B, YAN T. Study on carbon storage and carbon density of forest in Sichuan Province[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2017, 37(2): 179-183. (in Chinese)
- [16] 燕腾, 彭一航, 王效科, 等. 西南 5 省市区森林植被碳储量及碳密度估算[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(4): 39-43.
TENG Y, PENG Y H, WANG X K, *et al.* Estimation on carbon reserve and carbon density of the forest vegetation in five Southwestern provinces [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(4): 39-43. (in Chinese)
- [17] 刘艳, 孙向阳, 范俊岗, 等. 辽宁省森林植被碳储量及其动态变化[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(2): 211-216.
LIU Y, SUN X Y, FAN J G, *et al.* Carbon storage and its dynamics of forest vegetations in Liaoning Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(2): 211-216. (in Chinese)
- [18] 贾松伟. 基于森林资源清查资料的河南省森林碳储量及其经济价值研究[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(6): 1612-1616.
JIA S W. Study on carbon storage of forest vegetation and its economic value in Henan Province based on continuous forest resources inventory[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(6): 1612-1616. (in Chinese)
- [19] 林维, 崔晓阳. 地形因子对大兴安岭北端寒温带针叶林土壤有机碳储量的影响[J]. *森林工程*, 2017, 33(3): 1-6.
LIN W, CUI X Y. The influences of topographic factors on soil organic carbon storage in cool conifer forest in the North of Great Xing'an Mountain [J]. *Forest Engineering*, 2017, 33(3): 1-6. (in Chinese)
- [20] 王棣, 余雕, 张帆, 等. 森林生态系统碳储量研究进展[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(2): 85-91.
WANG L, SHE D, ZHANG F, *et al.* Avances in the researches of carbon storage of forest ecosystems [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(2): 85-91. (in Chinese)