

DOI: 10.5846/stxb201803210557

兰秀, 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 彭晚霞, 刘永贤, 范稚莲, 张家涌. 广西主要森林植被碳储量及其影响因素. 生态学报, 2019, 39(6): - .

Lan X, Du H, Song T Q, Zeng F P, Peng W X, Liu Y X, Fan Z L, Zhang J Y. Vegetation carbon storage in the main forest types in Guangxi and the related influencing factors. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): - .

广西主要森林植被碳储量及其影响因素

兰 秀^{1,2,3}, 杜 虎^{1,2}, 宋同清^{1,2,*}, 曾馥平^{1,2}, 彭晚霞^{1,2}, 刘永贤⁴, 范稚莲³, 张家涌^{1,2}

1 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125

2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100

3 广西大学农学院, 南宁 530005

4 广西壮族自治区农业科学院农业资源与环境研究所, 南宁 530007

摘要: 广西森林面积和覆盖率位居全国前列, 在全国和区域碳平衡中起着至关重要的作用。正确评价广西森林植被碳储量、碳储量的时空格局及其影响因素对我国碳循环及碳汇研究具有十分重要的意义。为阐明广西森林植被碳储量分布格局及其主要影响因素, 基于广西 10 类主要森林类型 345 个样地的调查, 结合森林资源清查资料, 估算广西主要森林植被碳储量, 探讨广西不同森林类型、不同龄组、不同层次的碳储量组成与分配。采用地统计学方法描绘了植被碳密度空间分布, 并采用主成分分析方法和回归分析方法分析了植被碳储量的影响因素。结果表明: 广西主要森林植被总碳储量达到 746.06 Tg (1Tg = 10^{12} g), 平均碳密度为 55.37 t/hm², 松树、杉木、桉树、栎类、软阔、硬阔、石山林、竹林、八角和油茶林对广西植被碳储量的贡献比例分别为 26.83%、12.28%、6.67%、3.03%、20.37%、16.32%、10.84%、0.88%、1.38% 和 1.39%。各森林类型植被碳密度介于 20.77—108.28 t/hm², 大小顺序为硬阔>软阔>松树>杉木>栎类>石山林>桉树>八角>竹林>油茶。广西区森林植被碳密度在 7.05—219.73 t/hm² 之间, 总体表现为广西北部、西南部和广西东部存在高值区, 广西中部和东南部有明显的低值区。碳储量以乔木层占优势, 且随林龄增大呈逐渐增加的趋势。影响广西植被碳储量的主控因子是平均胸径、林龄和林分密度, 经度、碱解氮、全氮、有机碳是影响碳储量的关键因子。

关键词: 森林植被; 碳储量; 影响因素; 广西

Vegetation carbon storage in the main forest types in Guangxi and the related influencing factors

LAN Xiu^{1,2,3}, DU Hu^{1,2}, SONG Tongqing^{1,2,*}, ZENG Fuping^{1,2}, PENG Wanxia^{1,2}, LIU Yongxian⁴, FAN Zhilian³, ZHANG Jiayong^{1,2}

1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China

3 Guangxi University, Nanning 530005, China

4 Agricultural Resources and Environment Research Institute Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China

Abstract: Guangxi boasts the forefront of national forest area and coverage, and takes a vital role in the national and regional carbon balance. Accurate assessment of vegetation carbon storage, spatial-temporal patterns, and the influencing

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502405); 国家自然科学基金项目 (31770495, 31660141); 广西重点研发计划项目 (桂科 AB16380255, 桂科 AB17129009); 广西科技惠民项目 (桂科转 1599001-6); 广西特聘专家项目

收稿日期: 2018-03-21; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songtongq@isa.ac.cn

factors in Guangxi has been of greatest significance for carbon cycling and carbon sequestration research in China. The objective of this study was to understand the spatial distribution of vegetation carbon storage and its influencing factors in the main forest ecosystems in Guangxi. A total of 345 sample plots were established and the size of each plot was 50 m×20 m. Based on forest resource inventory data and field investigations, vegetation carbon storage in the main forests in Guangxi was estimated, and the composition and distribution of carbon storage in various forest types for various stand ages and forest layers were assessed. Geostatistics were applied to analyze the spatial patterns of vegetation carbon storage and the effects of the main influencing factors on vegetation carbon storage were also explored using a principal component analysis and stepwise regression. The results showed that the total vegetation carbon storage was 746.06 Tg (1 Tg = 10^{12} g), and the vegetation carbon density was up to 55.37 t/hm². Pine, Chinese fir, eucalyptus, oak, hard broadleaves, soft broadleaves, forests in limestone areas, bamboo, anise, and oil-tea forests accounted for 26.83%, 12.28%, 6.67%, 3.03%, 20.37%, 16.32%, 10.84%, 0.88%, 1.38%, and 1.39% of the total vegetation carbon storage in Guangxi, respectively. The average vegetation carbon density of 10 major forest types ranged from 20.77 to 108.28 t/hm², with an order of hard broadleaves>soft broadleaves>pine>Chinese fir>oak>forests in limestone areas>eucalyptus>anise>bamboo>oil-tea. The average vegetation carbon density of forest types in Guangxi ranged from 7.05 to 219.73 t/hm². The north, southwest, and east of Guangxi had high carbon storage and the middle part and southeast had low carbon storage. The total carbon storage were dominated by the arbor layer and increased gradually with an increase in stand age. The main factors that affected forest vegetation carbon storage in Guangxi were the average diameter at breast height, forest age, and stand density. The longitude, available nitrogen, total nitrogen, and organic carbon were the most critical factors affecting forest vegetation carbon storage.

Key Words: forest vegetation; carbon storage; influence factors; Guangxi

森林生态系统的碳储量是由整个森林生态系统的生物量、凋落物量的累积量与分解量以及林下土壤有机质等相互关系共同决定的,其中,森林植被碳储量是衡量大气中碳元素增加或者减少的一个重要参数^[1]。据统计,森林生态系统生物量约占整个陆地生态系统生物量的 90%,其碳储量约占整个陆地生态系统总碳储量的 46%^[2]。对森林生物量及碳储量的研究已经成为林业科学家们争相探究的热点问题^[1],近些年,诸多学者从不同尺度(全球、国家、区域和样地)对森林生态系统的碳通量、碳储量的时空变化和分布格局展开了大量研究^[1,3-11],但对其影响因素的研究则较少。其中,大尺度的森林碳储量研究多是以森林资源清查数据为基础,对森林生态系统的碳储量进行估算^[4]。方精云等^[5]、徐新良等^[6]、李海圭等^[1]分别根据国家第三次、第六次、第七次森林资源清查数据估算了中国森林植被碳储量。从省级尺度范围,黄从德等^[7]、王新闯等^[8]、张修玉等^[9]、王磊等^[10]、甄伟等^[11]分别对四川、吉林、广东、江苏、辽宁进行了全省森林生物量和碳储量的估算,这些为我国碳储量的估算提供了丰富的数据,为评价北半球中高纬度地区碳库和我国森林碳汇功能奠定了基础^[12]。同时也表明了中国森林植被碳储量是随时间呈现动态变化的,因此,开展森林植被碳储量的估算、探究其影响因素对全球森林生态系统碳循环研究及森林生态系统碳汇管理具有重要意义。

广西地处中国南疆,地跨北热带、亚热带、中亚热带 3 个生物气候带,森林植物区植被类型多样,且气候温和、热量充足、雨量充沛,非常适宜森林植物的生长^[13],是我国南方重要的林区之一^[3]。目前关于广西碳储量的研究主要集中在小区域范围内^[14],而基于大尺度范围内的广西森林植被碳储量的研究和认识较少,前人的研究也仅涉及个别林分^[3,12,14-15],对森林生态系统其它组分,包括林下灌草、枯枝落叶层、细根等研究较少或未涉及,以致结果往往不能客观反映整个森林生态系统的碳汇特征^[16]。为此本研究利用样地调查和森林资源清查资料相结合的方法,以广西典型森林生态系统作为对象基于 345 个典型样方(20 m×50 m)的调查,分析全区典型森林植被碳储量(乔木层、灌木层、草本层、凋落物、细根)的林龄分布,估算广西主要森林(松树林、杉木林、桉树林、栎类、硬阔林、软阔林、石山林、竹林、八角林、油茶林)植被碳储量,并研究其空间分布特征和影响因素,为科学评价广西森林碳汇质量、碳汇能力林业碳汇效益等提供科学依据^[15]。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

广西壮族自治区位于中国西南边陲,地处东经 104°28′—112°04′,北纬 20°54′—26°23′之间,属于我国西部地区^[15]。全区土地总面积达 23.67 万 km²,处于云贵高原东南边缘,两广丘陵的西部,地势东南低,西北高,地貌为山地丘陵性盆地地貌,属于亚热带季风气候区,全区各地极端最高气温为 33.7—42.5℃,极端最低气温为-8.4—2.9℃,年平均气温 21℃,各地年降水量均 1070 mm 以上,大部分地区为 1500—2000 mm,4—9 月为雨季,其降水量占全年降水量的 70%—85%^[17-18]。广西第八次森林资源清查结果表明:全区森林面积达 1509.75 hm²,森林覆盖率为 56.51%,活立木总蓄积量 5.58×10⁸ m³,其面积和蓄积分别占全国的 6.41%和 3.42%^[16]。全区森林资源主要包括杉类、松类、柏类、桉类、栲类、青冈类、软阔类、枫香树、拟赤杨等)、经济林(荔枝、龙眼、柑橘、八角、板栗、李等)、竹类、城市森林、石山林等类型^[18]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与调查

本研究按照典型选样的方法,参照《IPCC 优良做法指南》对系统随机抽样的建议,充分考虑广西森林分布现状(树种、林龄、起源等情况),基于广西第八次森林资源清查数据和《广西森林资源规划设计调查技术方法》以及国家林业局发布的主要树种龄级与龄组划分中林龄、林组划分标准(表 1),计算本研究各森林类型幼龄林(I)、中龄林(II)、近熟林(III)、成熟林(IV)、过熟林(V) 5 个不同林龄在广西各县(市)的面积、蓄积综合权重,遵循“代表性、均一性、连续性”的原则,选择权重最大的县(市)进行样点分配,每个样点建立同一林型、同一龄组的 3 块重复样地,各样地的立地条件基本一致,相互距离>100 m,样地大小为 1000 m²(50 m×20 m),共计 115 个样点 345 个样地。将每块样地进一步划分为 10 个 100 m²(10 m×10 m)的样方,对样方内乔木层林木的树种名称、胸径、坐标以及存活状况等进行每木调查;灌木层按“品”字型在样地内设置 3 个 2 m×2 m 的小样方,调查样方内灌木的种类、株丛数、高度、地径、覆盖度;草本层在灌木层样框内各建立 1 个 1 m×1 m 的小样方,调查样方内草本种类、株丛数、平均高度、覆盖度。同时用 GPS 定位,记录其经纬度、海拔、方位及在林分中的相对位置^[17]。各样地分布见图 1。

表 1 10 类林型的林龄划分
Table 1 Division of stand ages for the 10 plantations

林型 Forest types	林龄 Stand ages				
	幼龄林 Young forest/a	中龄林 Middle-aged forest/a	近熟林 Near-mature forest/a	成熟林 Mature forest/a	过熟林 Over-mature forest/a
松树林 Pine	≤10	21—30	11—20	31—50	≥51
杉木林 Chinese fir	≤10	11—20	21—25	26—35	≥36
桉树林 Eucalypt	1	2	3	4—5	≥6
栎类 Oak	≤20	21—40	41—50	51—70	≥71
硬阔林 Hard broadleaves	<41	41—60	61—68	81—120	>120
软阔林 Soft broadleaves	<21	21—40	41—50	51—70	>70
石山林 Forest in limestone	<41	41—60	61—68	81—120	>120
竹林 Bamboo	1	2—5	—	—	≥6
八角林 Anise	≤6	6—15	—	—	>15
油茶林 Oil-tea	≤6	7—30	—	—	>30

“—”表示无数值

1.2.2 植被生物量测定和碳储量计算

根据样地每木调查的结果以及前期研究所得生物量回归方程^[19]计算乔木层各个体的生物量,并由此获得乔木层的总生物量。根据各组份的碳含量,将生物量换算为碳量。将样地内所有树种的单株碳储量相加,

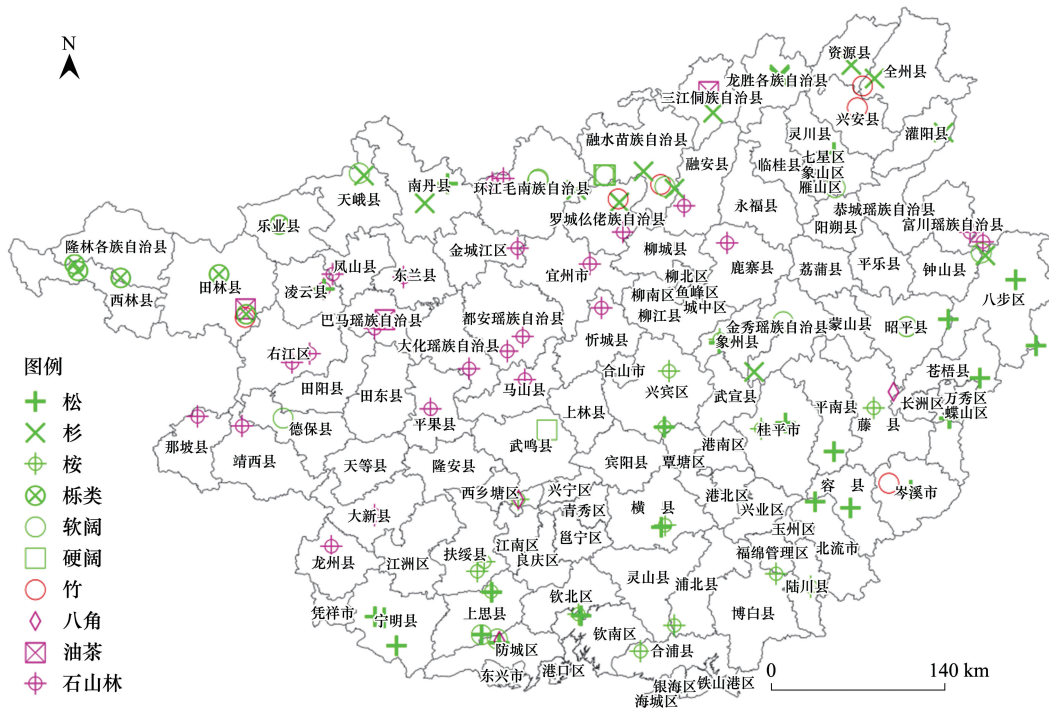


图1 调查样地分布图

Fig.1 The maps of plots

得到样地树木总碳储量。根据样地总碳储量和总面积换算出碳密度,即单位面积的碳储量,以吨/公顷(t/hm^2)表示。

采用全收获法收获样框内所有灌木的枝、叶、根,称重、取样,烘干测定各器官生物量,并以3个样框的平均值来推算样地中灌木层的总生物量。按同样方法在 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 小样框内获取草本层地上地下生物量、凋落物生物量。细根生物量:采用土钻法(内径 $>5\text{ cm}$)在样地10个小样方中心采集0—20,20—40 cm的土芯10个,分层混合装袋;将样品用流动水浸泡、漂洗、过筛,拣出细根,风干后称鲜重,然后烘干至恒重,保存样品。乔木、灌木、草本、凋落物层及细根的碳储量以其生物量现存量乘以相应的碳含量求得^[20]。

1.2.3 土壤调查和取样

在样地4个角和中间按土壤机械分层,用土钻钻取0—10、10—20、20—30、30—50、50—100 cm,5个层次样品,各层样品合成一个混合样(约1000 g)(不足100 cm的取到基岩)。将混合样带回实验室风干研磨待测有机碳、pH、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量^[16]。

1.2.4 样品分析

野外所采集植物叶、枝、干、根样品,经粉碎过筛后,采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定全碳含量。土壤有机碳的测定也采用重铬酸钾氧化-外加加热法;全氮的测定采用半微量开氏法-流动注射仪;全磷的测定采用NaOH熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法;全钾的测定采用NaOH熔融-原子吸收法;碱解氮的测定采用扩散法;有效磷的测定采用 0.5 mol/L NaHCO_3 提取-钼锑抗显色-紫外分光光度法;速效钾的测定采用 NH_4Ac 浸提-原子吸收法^[21]。温度和降雨量的数据取自近10年广西平均温度与降雨量。

1.2.5 数据处理

本研究的数据在Excel 2007中整理,数据分析主要在SPSS 18中进行。采用因子分析提取影响植被碳储量的主要因子。利用ArcGIS 9.3软件进行Kriging插值分析,绘制出植被碳密度空间分布图,其它图件采用Origin 8.5绘制。

2 结果与分析

2.1 广西区各林型不同林龄组植被碳储量

由表 2 可知,广西 10 大类树种(组)各林龄所占比例分别为 8.31%—34.75%(松树林)、8.28%—30.42%(杉木林)、3.37%—37.34%(桉树林)、10.17%—27.21%(栎类)、13.88%—33.09%(硬阔林)、7.70%—43.73%(软阔林)、7.78%—43.69%(石山林)、21.38%—44.73%(竹林)、12.53%—53.14%(八角林)、10.29%—50.99%(油茶林),植被总碳储量均表现为过熟林>成熟林>近熟林>中龄林>幼龄林,即随林龄的增加而增加,符合植被生长规律。不同林龄单位碳储量存在差异,各树种平均碳储量大小顺序为硬阔(108.28 t/hm²)>软阔(103.68 t/hm²)>松树(92.98 t/hm²)>杉木(92.61 t/hm²)>栎类(87.74 t/hm²)>石山林(74.69 t/hm²)>桉树(40.44 t/hm²)>八角(28.86 t/hm²)>竹林(21.36 t/hm²)>油茶(20.77 t/hm²)。

表 2 各树种(组)不同林龄总碳储量分配
Table 2 Total vegetation carbon with different stand ages for different forest types

林型 Forest types	幼龄林 Young forest		中龄林 Middle-aged forest		近熟林 Near-mature forest		成熟林 Mature forest		过熟林 Over-mature forest		小计 Total/ (t/hm ²)
	碳储量 Carbon storage/ (t/hm ²)	比例 Ratio/%	碳储量 Carbon storage/ (t/hm ²)	比例 Ratio/%	碳储量 Carbon storage/ (t/hm ²)	比例 Ratio/%	碳储量 Carbon storage/ (t/hm ²)	比例 Ratio/%	碳储量 Carbon storage/ (t/hm ²)	比例 Ratio/%	
松树林 Pine	38.64	8.31	54.73	11.77	95.64	20.57	114.34	24.59	161.55	34.75	464.9
杉木林 Chinese fir	38.36	8.28	65.31	14.10	92.5	19.98	126.01	27.21	140.85	30.42	463.03
桉树林 Eucalypt	6.81	3.37	30.98	15.32	38.82	19.20	50.08	24.77	75.5	37.34	202.19
栎类 Oak	44.62	10.17	82.11	18.72	93.72	21.36	98.9	22.54	119.37	27.21	438.72
硬阔林 Hard broad leaves	75.12	13.88	79.04	14.60	94.09	17.38	113.98	21.05	179.17	33.09	541.4
软阔林 Soft broad leaves	39.92	7.70	55.61	10.73	68.74	13.26	127.44	24.58	226.68	43.73	518.39
石山林 Forest in limestone	29.05	7.78	44.35	11.88	58.88	15.77	78.01	20.89	163.17	43.69	373.46
竹林 Bamboo	13.7	21.38	21.72	33.89	—	—	28.67	44.73	—	—	64.09
八角林 Anise	10.77	12.53	29.52	34.33	—	—	45.69	53.14	—	—	85.98
油茶林 Oil-tea	6.41	10.29	24.12	38.71	—	—	31.77	50.99	—	—	62.31

由图 2 可知,广西主要林型碳储量大小顺序为松树(200.94 Tg)>硬阔(152.58 Tg)>软阔(122.27 Tg)>杉木(92.00 Tg)>石山林(81.16 Tg)>桉树(50.00 Tg)>栎类(22.70 Tg)>油茶(10.45 Tg)>八角(10.35 Tg)>竹林

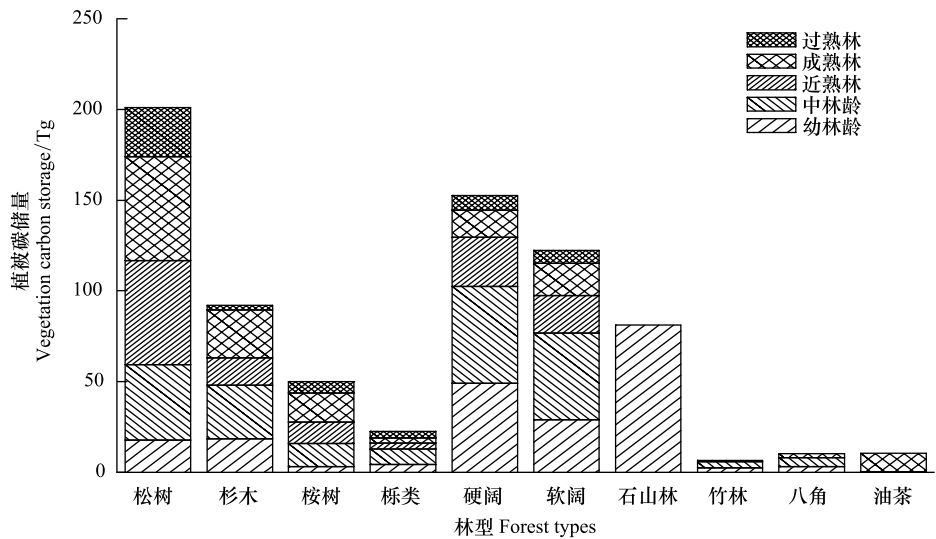


图 2 广西各林型不同林龄植被总碳储量
Fig.2 Total vegetation carbon storage of different forest types with different stand ages

(6.61 Tg),其对广西植被碳储量的贡献比例分别为 26.83%、12.28%、6.67%、3.03%、20.37%、16.32%、10.84%、0.88%、1.38%和 1.39%(图 3)。广西所调查林型植被总碳储量为 749.06 Tg,其平均碳储量为 55.37 t/hm²。

2.2 广西区各林型不同层次植被碳储量

由表 3 可知,各林型乔木层、灌木层、草本层、凋落物层以及细根所占碳储量比例分别为 84.74%—99.28%、0.26%—2.28%、0.48%—8.15%、1.16%—5.20%、1.36%—6.15%,植被碳储量均以乔木层占绝对优势,除桉树林和八角林所占比例为 84.74%和 84.78%外,其它林型乔木层碳储量均达 90%以上。不同森林类型各层次所占比例不同,松树林、杉木林、硬阔、软阔、竹林和油茶林为乔木层>细根>凋落物层>草本层>灌木层(硬阔、竹林和油茶林无细根数据),桉树林为乔木层>凋落物层>细根>草本层>灌木层>灌木层>草本层>凋落物层>灌木层>草本层,栎类和石山林为乔木层>乔木层>细根>凋落物层>灌木层>草本层,八角林为乔木层>草本层>凋落物层>灌木层。

2.3 广西森林生态系统植被碳密度空间格局

从图 4 中可以看出广西区森林植被碳密度在 7.05—219.73 t/hm²之间,具有一定的空间异质性,斑块的破碎性较明显,连续性不好。广西碳密度的不均匀与地形以及森林林分树种构成有关,总体表现为广西北部、广西西南部和广西东部存在高值区,广西中部和东南部有明显的低值区。碳密度为 7.05—34.05、34.06—49.78、49.79—64.92 t/hm²的森林主要出现在处于喀斯特区域的广西中部石灰岩石山青冈栎仪花青檀林区(ⅠA2b)和广西东部山地丘陵刺栲林厚壳桂林马尾松林区(ⅠA2a),前者处于喀斯特区域,大径级乔木相对较少,植被碳密度相对较低,后者处于广西东南部,该区域是广西桉树主产区,轮伐期短,其植被碳密度相对较小。碳密度为 64.93—83.75、83.76—119.15、119.16—219.73 t/hm²的森林主要分布在桂西北原西部落叶栎类林细叶云南松林区(ⅠB2a)以及广西北部部和东北部,前者分布有大面积的栎类天然林,后者种植有大量的杉木林和硬阔林。

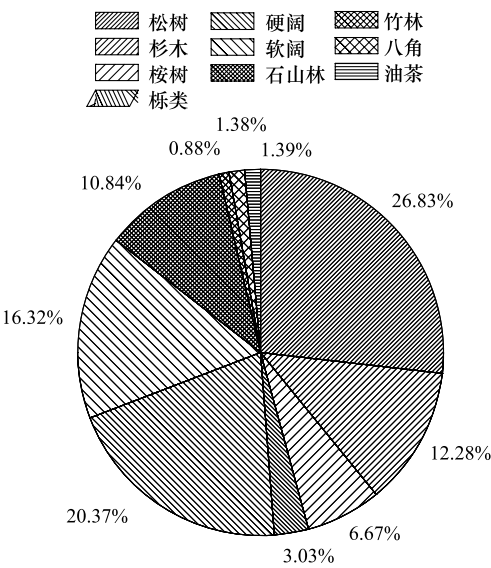


图 3 广西各林型总碳储量比例

Fig.3 The proportion total vegetation carbon storage of different forest types

表 3 各树种(组)不同层次总碳储量分配

Table 3 Total vegetation carbon with different forest layer for different forest types

林型 Forest types	乔木层 Arbor layer		灌木层 Shrub-grass layer		草本层 Herb layer		凋落物层 Litter layer		细根 Fines roots	
	碳储量 Carbon	比例	碳储量 Carbon	比例	碳储量 Carbon	比例	碳储量 Carbon	比例	碳储量 Carbon	比例
	storage/ ratio/%	Ratio/%	storage/ ratio/%	Ratio/%	storage/ ratio/%	Ratio/%	storage/ ratio/%	Ratio/%	storage/ ratio/%	Ratio/%
	(t/hm ²)		(t/hm ²)		(t/hm ²)		(t/hm ²)		(t/hm ²)	
松树林 Pine	84.91	91.32	1.05	1.13	1.71	1.84	2.51	2.70	2.80	3.01
杉木林 Chinese fir	86.93	93.87	0.38	0.41	0.92	0.99	1.63	1.76	2.75	2.97
桉树林 Eucalypt	34.27	84.74	0.64	1.57	1.64	4.05	2.13	5.26	1.77	4.37
栎类 Oak	79.11	90.17	0.91	1.04	0.91	1.03	1.41	1.61	5.40	6.15
硬阔林 Hard broadleaves	105.06	97.03	0.89	0.82	0.94	0.87	1.39	1.29	—	—
软阔林 Soft broadleaves	94.30	90.96	0.28	1.23	1.66	1.60	2.69	2.59	3.74	3.61
石山林 Forest in limestone	71.87	96.22	0.57	0.77	0.36	0.48	0.87	1.16	1.02	1.36
竹林 Bamboo	19.48	91.20	0.32	1.48	0.45	2.12	1.11	5.20	—	—
八角林 Anise	24.30	84.78	0.65	2.28	2.34	8.15	1.37	4.79	—	—
油茶林 Oil-tea	20.12	99.28	0.05	0.26	0.12	0.58	0.48	2.35	—	—

2.4 广西主要森林植被碳储量的影响因素

相关分析结果(表 4)表明,在选取的 16 个因子中,海拔、林龄、降雨量、平均胸径、土壤 pH 值、有机碳、碱解氮、有效磷与碳储量存在显著或者极显著的相关性,由于各因子间存在交互作用,因此采用主成分分析方法提取主要影响因子,从主成分分析结果(表 5)可以看出,特征值 ≥ 1 的主成分有 6 个,因此可以提取 6 个主成分,且这 6 个主成分的累积贡献率达 75.192%,可以基本反应影响植被碳储量的大部分信息。第一主成分上碱解氮、全氮、有机碳具有较高的载荷,分别为 0.857、0.844、0.745,第二主成分上经度具有较高的载荷为 0.795,第三主成分上载荷较高的有平均胸径、林分密度、林龄,分别为 0.718、0.658、0.535,第四主成分上海拔、pH 值、有效磷具有较高的载荷,分别为 0.583、0.438、0.433,第五主成分上有效磷、全钾、速效钾具有较高的载荷,分别为 0.630、0.518、0.507。第六主成分上载荷较高的有降雨量、全钾,分别为 0.588、0.505。对因子得分进行线性回归分析,由表 6 可得到,5 个主成分对植被碳储量的影响大小为:因子 3($\text{Beta} = 0.484$)>因子 2($\text{Beta} = 0.389$)>因子 4($\text{Beta} = 0.367$)>因子 5($\text{Beta} = 0.184$)>因子 1($\text{Beta} = 0.055$)>因子 6($\text{Beta} = 0.008$),即平均胸径、林分密度、林龄是影响广西森林植被碳储量的主控因子,经度、碱解氮、全氮、有机碳是影响碳储量的关键因子。

3 讨论

本研究中广西森林植被碳储量达到 746.06 Tg,远高于李伟等^[3]基于第 8 次森林资源清查数据所估算的广西植被总碳储量值(197 Tg)和覃连欢^[15]2012 年对广西植被碳储量的估算值(156.07 Tg),也高于陕西省 2014 年森林植被总碳储量(238 Tg)^[22]和吉林省 2009 年森林植被碳储量(496.827 Tg)^[8]、湖南省 2014 年森林植被碳储量(196.95 Tg)^[23]。主要原因是:1)本研究中植被碳储量包括乔木层、灌木层、草本层、凋落物层以及细根,而过往估算的碳储量未全部包括以上部分;2)各树种(组)平均碳含量在 492.25—562.28 g/kg 之间,总平均碳含量为 523.69 g/kg,高于国际通用的树木平均碳含量(500 g/kg)和热带 32 个树种的平均碳含量(444.0—494.5 g/kg)^[24]。广西森林单位面积平均碳密度达到 55.37 t/hm²,与我国森林植被平均碳密度(57.07 t/hm²)接近,高于广东省 2007 年植被碳密度 22.96 t/hm²^[25]和四川省 2003 年植被碳密度 38.04 t/hm²^[7]、湖南省 2014 年森林植被平均碳密度 16.31 t/hm²^[23],但小于世界平均水平 86 t/hm²^[26],主要原因可能是目前广西森林结构中幼、中龄林所占比例大,原始林和老龄林比例小,故碳积累较少。广西不同林型森林植被碳储量的贡献量不同,松树、硬阔、软阔、杉木、石山林集中贡献了广西森林植被碳储量的 80%以上,其它林型因为面积小或者伐林期短,贡献率相对较小。不同层次碳储量的分配差异也很大,各林型乔木层碳储量所占比例除桉树和八角外,其它林型乔木层碳储量均达 90%以上,这表明乔木层是植被碳储量的主要部分,且随林龄的增长其固碳比例逐渐增大,这与李海奎等^[1]、李明军等^[27]、潘鹏等^[28]的研究结果一致。林下灌木层、草本层、凋落物和细根对碳储量的贡献远小于乔木层,尤其是在生长后期,而以往的研究多关注于乔木层,忽略了其它层次的贡献,在一定程度上低估了植被碳储量的大小。这些植被层不仅是森林植物群落的重要组成部分,而且在森林生态系统碳循环过程中发挥着重要作用,尤其是凋落物和细根的分解是土壤有机质最主要的来源,直接决定了碳素的周转速率^[16]。

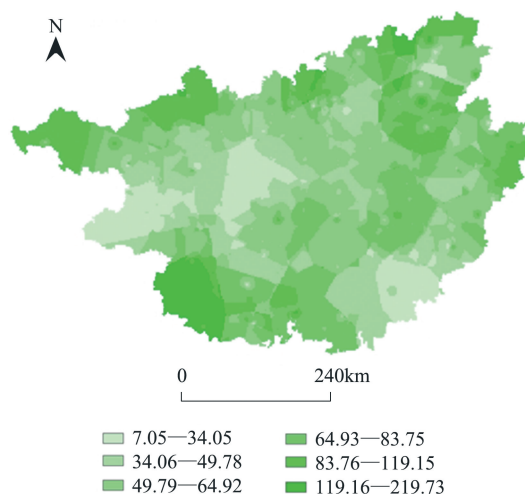


图 4 广西森林植被碳密度空间分布/(t/hm²)

Fig.4 Spatial distribution of forest carbon density in Guangxi

表 4 广西植被碳储量与样地因子的相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix of arbors carbon storage and plot factors in Guangxi

因子 Factors	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17
X1	1.000																
X2	0.004	1.000															
X3	0.066	0.142**	1.000														
X4	0.184**	-0.416**	0.422**	1.000													
X5	-0.038	-0.459**	-0.815**	-0.197**	1.000												
X6	0.116*	0.342**	-0.193**	-0.231**	-0.040	1.000											
X7	0.604**	0.127	0.015	0.015	-0.001	0.133*	1.000										
X8	0.664**	0.064	-0.086	0.014	0.140*	0.022	1.000										
X9	-0.206**	-0.102	0.237**	0.046	-0.245**	-0.231**	-0.243**	1.000									
X10	0.211**	0.078	0.370**	0.207**	-0.355**	-0.069	0.066	0.007	0.315**	1.000							
X11	0.016	-0.006	0.414**	0.248**	-0.377**	-0.067	0.006	-0.037	0.594**	0.688**	1.000						
X12	-0.079	-0.054	0.211**	0.098	-0.186**	-0.156**	-0.102	-0.125*	0.511**	0.374**	0.499**	1.000					
X13	-0.035	0.261**	0.135*	-0.041	-0.141**	-0.103	-0.018	-0.032	-0.121*	0.067	-0.047	0.188**	1.000				
X14	0.175**	0.021	0.478**	0.342**	-0.428**	-0.090	0.008	0.029	0.467**	0.725**	0.791**	0.406	-0.012	1.000			
X15	0.114*	-0.052	0.041	0.011	0.007	-0.051	0.174**	0.038	-0.020	0.149**	0.112*	0.157**	0.065	0.107*	1.000		
X16	0.099	-0.082	0.281**	0.140**	-0.171**	-0.157**	0.045	0.042	0.311**	0.222**	0.283**	0.258**	0.128*	0.314**	0.432**	1.000	
X17	-0.069	-0.021	0.237**	0.147**	-0.249**	0.082	-0.107	-0.397**	-0.187**	0.071	-0.032	-0.078	0.107	0.049	0.151**	0.047	1.000

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; X1: 碳储量, Carbon storage; X2: 经度, Longitude; X3: 纬度, Latitude; X4: 海拔, Altitude; X5: 温度, Temperature; X6: 降雨量, Precipitation; X7: 林龄, Stand age; X8: 平均胸径, Average DBH; X9: pH 值, pH value; X10: 有机碳, Organic carbon; X11: 全氮, Total nitrogen; X12: 全磷, Total phosphorus; X13: 全钾, Total potassium; X14: 碱解氮, Available nitrogen; X15: 有效磷, Available phosphorus; X16: 速效钾, Available potassium; X17: 林分密度, Stand density

表 5 主成分分析结果

Table 5 Principal component analysis results

因子 Factors	成份 Component					
	1	2	3	4	5	6
经度 Longitude	0.031	0.795	-0.172	-0.410	0.146	-0.087
纬度 Latitude	0.702	0.257	-0.334	0.251	-0.204	-0.259
海拔 Altitude	0.407	-0.246	-0.082	0.583	-0.425	-0.117
温度 Temperature	-0.631	-0.472	0.431	0.029	0.151	0.137
降雨量 Precipitation	-0.252	0.480	-0.013	-0.266	-0.098	0.588
林龄 Stand age	-0.017	0.551	0.535	0.362	-0.095	0.042
平均胸径 Average DBH	-0.086	0.405	0.718	0.184	-0.166	-0.250
pH 值 pH value	0.625	-0.368	0.135	-0.438	0.049	-0.056
有机碳 Organic carbon	0.745	0.114	0.165	-0.063	-0.056	0.207
全氮 Total nitrogen	0.844	-0.052	0.186	-0.203	-0.097	0.192
全磷 Total phosphorus	0.588	-0.218	0.140	-0.269	0.322	-0.094
全钾 Total kalium	0.077	0.288	-0.230	0.035	0.518	-0.505
碱解氮 Available nitrogen	0.857	0.067	0.156	-0.047	-0.170	0.162
有效磷 Available phosphorus	0.199	0.053	0.198	0.433	0.630	0.335
速效钾 Available kalium	0.477	-0.039	0.166	0.281	0.507	0.025
林分密度 Stand density	0.102	0.078	-0.658	0.385	0.095	0.405
特征值 Total	4.150	1.976	1.812	1.535	1.391	1.167
方差贡献率/% Variance contribution	25.935	12.347	11.322	9.597	8.695	7.296
累积贡献率/% Accumulative contribution	25.935	38.293	49.605	59.202	67.897	75.192

表 6 植被碳储量影响因子得分回归系数

Table 6 Standard regression coefficient of variables contolling vegetation carbon storage

	非标准化系数 Unstandardized Coefficients		标准系数 Standardized coefficients	<i>t</i>	<i>Sig.</i>
	<i>B</i>	标准误差 Standard error			
常量 Constant	-0.005	0.037		-0.142	0.887
1	0.027	0.018	0.055	1.479	0.140
2	0.276	0.026	0.389	10.411	0.000
3	0.358	0.028	0.484	12.963	0.000
4	0.296	0.030	0.367	9.844	0.000
5	-0.156	0.032	-0.184	-4.935	0.000
6	0.008	0.034	0.008	0.225	0.822

B:回归系数,Coefficient of regression

本研究分析了气候因子(温度、降雨量)、地形因子(经度、纬度、海拔)、生物因子(林龄、平均胸径、林分密度)和土壤因子(有机碳、pH、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾)对广西植被碳储量的影响。气候变化对森林生态系统碳循环的影响是多方面的,其中温度与降水是两个重要方面。本研究温度和降雨量的数据取自近 10 年广西平均温度与降雨量,分析发现植被碳储量和温度呈负相关,和降雨量呈正相关关系,这与李红梅等^[29]对西双版纳植被碳密度的研究结果相一致。适宜的温度水分条件有利于植被层的生长,为形成深厚的凋落物奠定基础,但同时,水分条件适中更有利于凋落物层的分解,从而影响凋落物层的碳储量^[30]。地形因子是影响森林分布的重要因子,其可通过影响其他变量例如土壤类型、土壤含水量、土壤营养循环、光照条件等影响森林的物种组成、结构和生物量^[31],进而影响森林生态系统碳密度。因广西地形独特,植被碳密度在不同海拔和经纬度条件下均具有一定的差异,经度对碳储量的影响显著。影响碳储量的生物因子主要包括

物种组成和森林结构,其主要通过影响植被生物量对碳储量造成影响。胸径作为生物量计算模型的重要参数,与植被生物量显然有着很强的正相关性,本研究表明胸径是影响广西植被碳储量的主控因子之一^[32]。林分密度作为决定林分结构的重要因素,已有的研究表明,植被碳储量随林分密度增加^[33]、减少^[34]、无显著差异^[35]三种变化趋势,产生差异的原因可能是与研究林分密度的范围、调查样本的数量、时间跨度等有关,因此无法判断碳储量随林分密度的变化规律^[36]。随着林龄的增加,植被碳库越来越多的积累到老龄林中,因此注重增加老龄林的面积是提高森林生态系统碳汇功能的重要举措。有研究^[37-38]表明在景观尺度上土壤因子对地上生物量空间变异的解释度达到三分之一,土壤理化性状和生物性状在一定程度上决定着森林生态系统碳密度的分布^[31],土壤养分的多少直接影响着土壤对植被养分的供给情况,土壤中氮、磷、钾的丰缺及供给状况是影响植被生长的重要因素,其有效量是易被植物吸收利用的部分^[39]。

本研究采用样地调查与森林资源清查资料相结合的方法估算不同林龄各层次碳储量,虽然系统全面,但结果仍不够准确,因为调查的林型中还有一些未涉及到,例如四旁树、疏林地等未完全调查,且在所调查森林类型中,细根数据不完整。选取的影响植被碳储量的因子不够全面,未考虑到其他的影响因素,例如森林类型、土壤类型、土层厚度、土壤矿质成分、土壤微生物性状、人为干扰等,这些因素对森林植被碳储量的影响不可忽略,需要进一步研究分析。

4 结论

(1)广西主要森林植被碳储量达到 746.06 Tg,碳密度达到 55.37 t/hm²,各森林类型植被碳密度介于 20.77—108.28 t/hm²之间,松树、杉木、桉树、栎类、软阔、硬阔、石山林、竹林、八角和油茶林对广西植被碳储量的贡献比例分别为 26.83%、12.28%、6.67%、3.03%、20.37%、16.32%、10.84%、0.88%、1.38%和 1.39%。各林型不同林龄碳储量以乔木层为主要碳库,且随着林龄的增加而增加。

(2)广西区森林植被碳密度在 7.05—219.73 t/hm²之间,具有一定的空间异质性。广西碳密度的不均匀总体表现为广西北部、广西西南部和广西东部存在高值区,广西中部和东南部有明显的低值区。

(3)主成分分析结果表明平均胸径、林分密度、林龄是影响植被碳储量的主控因子,经度、碱解氮、全氮、有机碳的载荷较其他的因子高,是影响碳储量的关键因子。虽然本研究得到的估算结果与真实值有偏差,但在一定程度上为整个广西植被碳储量的研究和评价广西森林生态系统的碳汇功能、碳汇质量等提供了科学依据。

参考文献(References):

- [1] 李海奎,雷渊才,曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量. 林业科学, 2011, 47(7): 7-12.
- [2] 周广胜. 全球碳循环. 北京: 气象出版社, 2003.
- [3] 李伟,张翠萍,李士美. 基于第8次森林资源清查数据的广西森林碳储量特征研究. 西南林业大学学报, 2017, 37(3): 127-133.
- [4] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [5] 方精云,郭兆迪,朴世龙,陈安平. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804-812.
- [6] 徐新良,曹明奎,李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究. 地理科学进展, 2007, 26(6): 1-10.
- [7] 黄从德,张健,杨万勤,唐宵,赵安玖. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态. 生态学报, 2008, 28(3): 966-975.
- [8] 王新闯,齐光,于大炮,周莉,代力民. 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2013-2020.
- [9] 刘倩楠,欧阳志云,李爱农,徐卫华. 重庆市森林植被生物量和碳储量的空间分布特征研究. 水土保持研究, 2016, 23(6): 221-226.
- [10] 王磊,丁晶晶,季永华,梁珍海,李荣锦,阮宏华. 江苏省森林碳储量动态变化及其经济价值评价. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, 34(2): 1-5.
- [11] 甄伟,黄玫,翟印礼,陈珂,龚亚珍. 辽宁省森林植被碳储量和固碳速率变化. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1259-1265.
- [12] 明安刚,贾宏炎,田祖为,陶怡,卢立华,蔡道雄,史作民,王卫霞. 不同林龄格木人工林碳储量及其分配特征. 应用生态学报, 2014, 25(4): 940-946.
- [13] 农胜奇,张伟,蔡会德. 1977—2010年广西森林资源变化动态及其主要驱动因素分析. 广西林业科学, 2014, 43(2): 171-178.

- [14] 刘恩,王晖,刘世荣. 南亚热带不同林龄红锥人工林碳贮量与碳固定特征. 应用生态学报, 2012, 23(2): 335-340.
- [15] 覃连欢. 广西森林植被碳储量及价值估算研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [16] 高阳,金晶炜,程积民,苏纪帅,朱仁斌,马正锐,刘伟. 宁夏回族自治区森林生态系统固碳现状. 应用生态学报, 2014, 25(3): 639-646.
- [17] 杜虎,宋同清,曾馥平,王克林,彭晚霞,付威波,李莎莎. 喀斯特峰丛洼地不同植被类型碳格局变化及影响因子. 生态学报, 2015, 35(14): 4658-4667.
- [18] 杜虎,曾馥平,王克林,宋同清,温远光,李春干,彭晚霞,梁宏温,朱宏光,曾昭霞. 中国南方 3 种主要人工林生物量和生产力的动态变化. 生态学报, 2014, 34(10): 2712-2724.
- [19] 汪珍川,杜虎,宋同清,彭晚霞,曾馥平,曾昭霞,张浩. 广西主要树种(组)异速生长模型及森林生物量特征. 生态学报, 2015, 35(13): 4462-4472.
- [20] 胡芳,杜虎,曾馥平,宋同清,彭晚霞,兰斯安,张芳. 广西不同林龄喀斯特森林生态系统碳储量及其分配格局. 应用生态学报, 2017, 28(3): 721-729.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 崔高阳,陈云明,曹扬,安淳淳. 陕西省森林生态系统碳储量分布格局分析. 植物生态学报, 2015, 39(4): 333-342.
- [23] 李雷达,方晰,李斌,刘兆丹. 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. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 69-77.
- [24] Elias M, Potvin C. Assessing inter-and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(6): 1039-1045.
- [25] 张亮,林文欢,王正,余娜,陈红跃. 广东省森林植被碳储量空间分布格局. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1295-1299.
- [26] Dixon RK, Solomon A M, Brown S, Houghton RA, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science, 1994, 263(5144): 185-190.
- [27] 李明军,杜明凤,喻理飞. 贵州省森林植被碳储量、碳密度及其分布. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 48-54.
- [28] 潘鹏,吕丹,欧阳勋志,王雄涛. 赣中马尾松天然林不同生长阶段生物量及碳储量研究. 江西农业大学学报, 2014, 36(1): 131-136.
- [29] 李红梅,马友鑫,郭宗峰,刘文俊. 西双版纳土壤有机碳储量及空间分布特征//中国气象学会. 推进气象科技创新加快气象事业发展——中国气象学会 2004 年年会论文集(下册). 北京: 气象出版社, 2004: 1.
- [30] 董金相. 戴云山黄山松林碳储量及其影响因子研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [31] 徐耀粘,江明喜. 森林碳库特征及驱动因子分析研究进展. 生态学报, 2015, 35(3): 926-933.
- [32] 魏亚伟,周旺明,于大炮,周莉,方向民,赵伟,包也,孟莹莹,代力民. 我国东北天然林保护工程区森林植被的碳储量. 生态学报, 2014, 34(20): 5696-5705.
- [33] 王秀云,孙玉军,马炜. 不同密度长白落叶松林生物量与碳储量分布特征. 福建林学院学报, 2011, 31(3): 221-226.
- [34] 潘辉,赵凯,王玉芹,黄石德. 不同密度福建柏人工林碳储量研究//中国科学技术协会, 福建省人民政府. 经济发展方式转变与自主创新——第十二届中国科学技术协会年会(第一卷). 福州: 中国科学技术协会, 福建省人民政府, 2010: 5.
- [35] 方晰,田大伦,项文化,蔡宝玉. 不同密度湿地松人工林中碳的积累与分配. 浙江林学院学报, 2003, 20(4): 374-379.
- [36] 刘婷岩,张彦东,彭红梅,甘秋妹. 林分密度对水曲柳人工幼龄林植被碳储量的影响. 东北林业大学学报, 2012, 40(6): 1-4.
- [37] Paoli G D, Curran L M, Slik J W F. Soil nutrients affect spatial patterns of aboveground biomass and emergent tree density in southwestern Borneo. Oecologia, 2008, 155(2): 287-299.
- [38] DeWalt S J, Chave J. Structure and biomass of four lowland Neotropical forests. Biotropica, 2004, 36(1): 7-19.
- [39] 王媛. 庙岛群岛南部岛群森林植被碳储量及其影响因素研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2014.