DOI: 10.5846/stxb202207051909
高述超,陈毅青,陈宗铸,雷金睿,吴庭天.海南岛森林生态系统碳储量及其空间分布特征.生态学报,2023,43(9):3558-3570.
Gao S C, Chen Y Q, Chen Z Z, Lei J R, Wu T T.Carbon storage and its spatial distribution characteristics of forest ecosystems in Hainan Island, China. Acta Ecologica Sinica,2023,43(9):3558-3570.

海南岛森林生态系统碳储量及其空间分布特征

高述超[1],陈毅青[2,3,*],陈宗铸[2,3],雷金睿[2,3],吴庭天[2,3]
1 海南省林业局,海口　570203
2 海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院),海口　571100
3 海南省热带林业资源监测与应用重点实验室,海口　571100

摘要:利用最新的森林资源二类调查分布数据和野外样地调查资料,采用 InVEST 模型和空间统计分析等方法,研究了海南岛森林生态系统碳储量及其空间分布特征。结果表明:海南岛森林生态系统总碳储量为 338.15 TgC,其中地上生物、地下生物、凋落物和土壤的碳储量分别为 85.12、18.73、2.90 TgC 和 231.40 TgC,所占比重依次为 25.17%、5.54%、0.86%和 68.43%。海南岛森林生态系统平均碳密度为 147.66 MgC/hm^2,其中地上生物、地下生物、凋落物和土壤碳密度分别为 37.17、8.18、1.27 MgC/hm^{2}和 101.04 MgC/hm^2。不同市县森林生态系统碳储量分布在 8.55—35.40 TgC 的范围内,最高的是琼中县。不同植被类型中,橡胶林的碳储量最高,占全岛森林生态系统总碳储量的 27.72%;热带山地雨林的碳密度最高,达到 249.64 MgC/hm^2。在海拔梯度上,森林生态系统碳密度呈现先增加后减少的变化特征,在海拔 600—1300 m 范围内的碳密度最高,碳密度为 200.37—228.86 MgC/hm^2。海南岛森林生态系统碳储量在空间分布上具有非常显著的空间聚集性($P<0.01$),呈现出中间高、四周低的空间分布格局。未来应加强天然林资源保护与修复,科学森林经营,优化林分结构,提升森林固碳增汇能力。

关键词:碳储量;碳密度;森林生态系统;空间分布;InVEST 模型;海南岛

Carbon storage and its spatial distribution characteristics of forest ecosystems in Hainan Island, China

GAO Shuchao[1], CHEN Yiqing[2,3,*], CHEN Zongzhu[2,3], LEI Jinrui[2,3], WU Tingtian[2,3]
1 *Hainan Forestry Bureau, Haikou* 570203, *China*
2 *Hainan Academy of Forestry(Hainan Academy of Mangrove), Haikou* 571100, *China*
3 *Hainan Key Laboratory of Monitoring and Application of Tropical Forestry Resources, Haikou* 571100, *China*

Abstract: Carbon storage in forest ecosystems is one of the largest and most active components of carbon cycling in terrestrial ecosystems, its carbon storage level and carbon sequestration potential have been of great concern. Research into the spatial distribution characteristics of carbon storage and carbon density in forest ecosystems plays an important role in the evaluation of carbon sequestration potentials and healthy forest management. Forest vegetation carbon, soil organic carbon, forest litter carbon and dead tree carbon are the four main carbon pools in forest ecosystems. Based on the latest distribution data of forest resource inventory and field sample-plot survey information, the carbon storage and spatial distribution characteristics of the forest ecosystem in Hainan Island were studied using the InVEST model and spatial statistical analysis. The results are as follows: The total carbon storage of the forest ecosystem in Hainan Island is 338.15 TgC. The carbon storages of aboveground organisms, belowground organisms, litterfall, and soil are 85.12, 18.73, 2.90 TgC and

基金项目:海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院)基础性科研工作(KYYS-2021-04);国家自然科学基金(32260106);海南省重大科技计划项目(ZDKJ202008)
收稿日期:2022-07-05;　　**采用日期**:2022-12-04
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: 13876350188@126.com

231.40 TgC, with 25.17%, 5.54%, 0.86%, and 68.43%, respectively. The average carbon density of forest ecosystem in Hainan Island is 147.66 MgC/hm^2, of which 37.17, 8.18, 1.27, and 101.04 MgC/hm^2 for aboveground organisms, belowground organisms, litterfall, and soil, respectively. The carbon storages of forest ecosystems in different cities and counties range from 8.55 TgC to 35.40 TgC, with the highest in Qiongzhong County. Among different vegetation types, rubber forests show the highest carbon storages, accounting for 27.72% of the total carbon storages of forest ecosystems across the Island, while the tropical montane rainforests possess the highest carbon density with 249.64 MgC/hm^2. Regarding the altitudinal gradient, the carbon density of forest ecosystems shows an increase followed by a decrease, and the highest carbon density occurs within 600—1300 m above sea level, and the carbon density ranges from 200.37 MgC/hm^2 to 228.86 MgC/hm^2. The spatial distribution of carbon storages of forest ecosystems in Hainan Island has a significantly spatial aggregation ($P<0.01$), showing a pattern of high in the middle and low in the surroundings. In the future, we should strengthen the protection and restoration of natural forest resources, achieve scientific management of forests, and optimize the stand structure to realize carbon sequestration and sink enhancement of forests.

Key Words: carbon storage; carbon density; forest ecosystem; spatial distribution; InVEST model; Hainan Island

陆地生态系统是地球生物圈三大碳库之一[1],过去几十年,由于陆地生态系统对大气二氧化碳(CO_2)的净吸收,有效地减缓了气候变暖[2]。但有研究显示,大气中不断增加的 CO_2 水平仍然是全球变暖的主要原因[3]。通过保护和提高生态系统碳储量来调节大气 CO_2 浓度已被认为是缓解全球气候变化的主要途径[4]。森林生态系统碳储量是陆地生态系统碳库中最大、最活跃的组成部分,储存了陆地生态系统地上碳库的 80%、地下碳库的 40%[5],在抵抗全球变暖和减轻气候变化的不利影响等方面起着不可替代的作用[6—8]。因此,评估森林生态系统碳储量和固碳潜力对了解碳循环机制和制定减排政策至关重要。

目前,对于全球或区域尺度上的森林碳储量已经开展了大量的研究[3,9—11]。在我国,有学者对全国[9,12—13]、吉林[14]、陕西[15]、湖南[16]、河南[17]、云南[18]、成都市[19]等国家、省、市不同尺度上的森林植被或生态系统的碳储量和碳密度也进行了相关研究。这些研究大多是基于国家森林资源连续清查数据(一类调查)或森林资源规划设计调查数据(二类调查),采用材积源-生物量法来估算森林碳储量水平,不能提供森林不同植被类型碳储量及其变化的空间细节。也有研究将森林资源清查数据与遥感数据结合应用于研究森林生物量碳储量的空间分布及其变化[9,20—21]。但以上大部分研究主要针对乔木层,较少关注林下灌草、凋落物以及土壤有机碳储量和碳密度,在很大程度上会低估森林生态系统的碳储量。因此,在减缓气候变化的森林管理中,确定森林生态系统中植被和土壤碳储量及其空间分布特征显得至为关键。为此,有学者基于 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Service and Tradeoffs)模型和 ArcGIS 技术,按照不同植被类型碳密度评估了甘肃白龙江流域碳储量及其空间格局,并探讨海拔、坡度和坡向对碳储量空间分布的影响[22];修珍珍等[23]则利用森林资源二类调查数据所对应的优势树种进行植被分类,采用 InVEST 模型估算了富阳市森林生态系统碳储量及其空间分布规律。该方法不仅能对包括土壤碳库在内的森林生态系统碳储量进行定量化评估,而且还能实现碳储量空间制图和分析,是区域森林生态系统碳储量研究的一种有效的评估、量化和制图的模型方法。

海南岛是我国最大的热带岛屿,也是全球生物多样性保护的热点地区之一,拥有大面积的热带森林和丰富的物种资源,其巨大的固碳能力在区域碳循环和碳平衡中起着关键作用[3,20]。早在 2002 年,曹军等[24]利用 1979—1993 年海南森林资源二类调查数据的林分类型,结合材积源生物量法估算了海南岛近 20 年森林碳储量变化,显示出海南森林碳汇作用显著;张镱锂等[25]同样利用 1993 年森林资源二类调查数据分析了不同植被分类系统造成的碳储量差异;但以上研究均没有包含土壤和部分森林类型的碳储量。Ren 等[20]则结合 1993—2008 年 4 期的国家森林资源清查数据和实测数据,估算了海南森林生态系统碳储量的分布格局。但经过十余年的发展,特别是海南国际旅游岛和自由贸易港建设的推进,海南森林资源及其分布已发生较大变

化,森林覆盖率已从 2008 年 58.5%上升至 2021 年的 62.1%。2021 年,海南省第三次森林资源二类调查数据成果正式公布,全面查清了全省森林资源的类型、面积、蓄积量及其分布状况。但当前全岛森林生态系统碳储量及其空间分布情况仍不清楚,亟需结合最新的森林资源二类调查数据和不同植被类型的野外样地调查资料,利用 InVEST 模型和空间统计分析探讨海南岛森林生态系统碳储量及其空间分布特征,为热带森林固碳增汇经营管理、制定碳达峰碳中和政策提供基础数据和科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

海南岛(18.80°—20.10°N,108.37°—111.03°E)与雷州半岛隔海相望,面积约 3.4 万 km^2,涉及 18 个市县(图 1)。研究区地貌类型多样,地形中高周低,最高海拔位于五指山(1867 m)。气候高温多雨、长夏无冬,年降水量 1000—2500 mm,年平均气温 23.8—26.2℃,具有典型的热带季风海洋性气候。海南岛的土壤成土母质岩有花岗岩、玄武岩、火山灰等多种,土壤类型以砖红壤为主,为海南热带雨林、季雨林下形成的地带性土壤。全岛土地利用现状以林地和耕地为主,两者约占全岛总面积的 90%;森林生态系统以热带雨林、热带季雨林和热带针叶林等地带性植被构成的生态系统为主。根据海南省第三次森林资源二类调查成果数据(2021 年),全省森林总面积 219.76 hm^2,其中天然林面积占 28.07%,森林总蓄积量达 1.61 亿 m^3。海南岛具有丰富的植物多样性,有维管植物 6036 种,其中野生植物 4579 种。

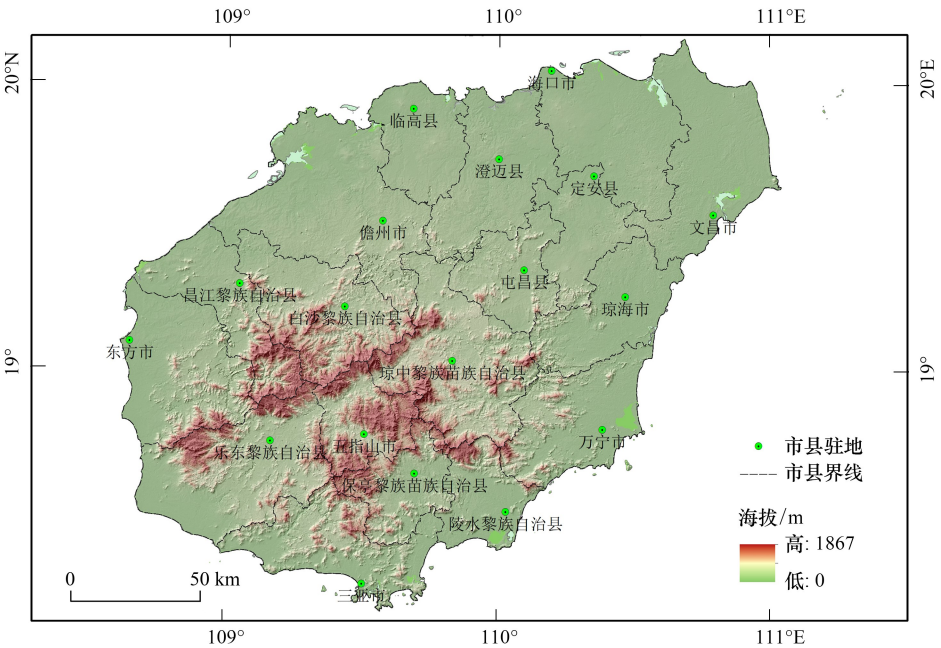

图 1 研究区位置

Fig.1 The location of the research area

1.2 数据来源及处理

本研究森林生态系统植被类型空间分布以 2021 年海南省第三次森林资源二类调查小班矢量数据为数据源,参考海南植被分类体系[26],按照“起源”、“林种”和“优势树种”等林分要素,对森林生态系统分门别类,最终将研究区域森林生态系统细分成 22 种植被类型(图 2 和表 1),并将其空间分布数据转换为栅格图像数据,图像分辨率为 10 m,坐标系采用 2000 国家大地坐标系。

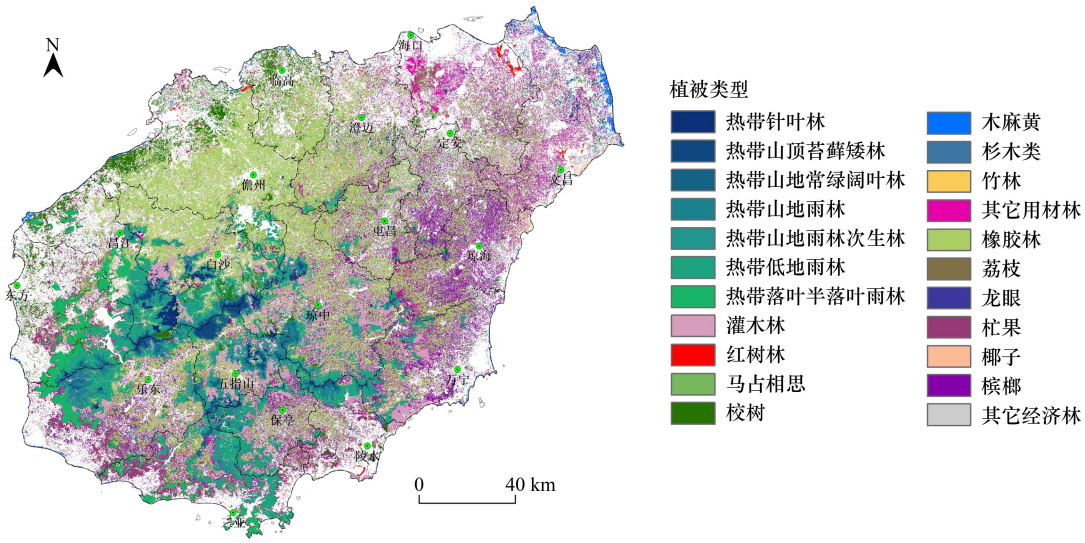

图 2　海南岛森林生态系统植被类型分布图

Fig.2　Vegetation type distribution map of forest ecosystems in Hainan Island

表 1　海南岛森林生态系统不同植被类型碳密度

Table 1　Carbon density of different vegetation types in forest ecosystem of Hainan Island

起源 Origin	林种 Forest category	植被类型 Vegetation types	地上生物碳密度 Aboveground biomass carbon density/ (Mg/hm^2)	地下生物碳密度 Belowground biomass carbon density/ (Mg/hm^2)	凋落物碳密度 Litterfall carbon density/ (Mg/hm^2	土壤碳密度 Soil carbon density/ (Mg/hm^2)
天然林		热带针叶林	63.32	6.09	2.48	124.26
Natural forest		热带山顶苔藓矮林	45.98	15.36	1.29	102.37
		热带山地常绿阔叶林	61.48	12.55	1.42	145.04
		热带山地雨林	64.68	13.77	1.71	189.48
		热带山地雨林次生林	56.11	13.17	1.49	160.65
		热带低地雨林	56.74	13.82	1.64	153.20
		热带落叶半落叶雨林	48.49	11.04	1.41	108.66
		灌木林	11.53	3.27	1.58	66.40
		红树林	38.90	6.84	6.82	141.79
人工林	用材林	马占相思	44.17	11.77	1.10	105.72
Plantation		桉树	33.06	4.24	1.31	69.39
		木麻黄	20.02	4.09	1.03	34.63
		杉木类	49.08	14.25	1.27	124.52
		竹林	23.11	4.79	1.86	98.03
		其他用材林	41.93	8.50	1.39	87.04
	经济林	橡胶林	38.66	9.05	1.39	94.49
		荔枝	31.14	5.66	0.91	99.47
		龙眼	28.21	5.13	0.99	96.30
		杧果	40.62	7.38	1.05	99.60
		椰子	24.80	4.73	0.63	70.57
		槟榔	26.58	5.37	0.23	96.51
		其他经济林	15.22	4.51	0.95	81.45

研究区域的数字高程模型(DEM)使用 ASTER GDEM 数据产品,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn),空间分辨率为 10 m。为了分析海南岛森林生态系统在不同海拔梯度上的碳储量和碳密度分布特征,根据研究区实际情况,将海拔范围大致划分为 10 个级别,即≤50 m、50—100 m、100—200 m、200—300 m、300—400 m、400—600 m、600—800 m、800—1000 m、1000—1300 m、>1300 m。

1.3 研究方法

1.3.1 不同植被类型碳密度

利用海南各类森林生态系统国家野外科学观测研究站的长期野外实验数据,统筹考虑全岛森林生态系统 22 种不同植被类型面积及分布、起源、群系/群系组及林龄组,设置调查样区,在每个样区内设置不少于 3 个调查样地,共设置样地总数 528 个。天然林样地大小为 1200 m^2,乡土阔叶树种人工林为 900 m^2,树种单一的用材林(桉树、相思等)、经济林(荔枝、龙眼等)、竹林等的样地面积为 600 m^2,将样地划分为 10 m×10 m 的样方若干个,对样地内乔木、藤本、林下植被(灌木和草本)层展开调查。在乔木样方中对每种优势树种按大、中、小径级共选择 3—5 株样木,按叶、枝、干、根(2—5 cm)取样,同器官混合形成一个样品,每个样品鲜重 300 g左右。每个样方内设置 3 个 2 m×2 m 的灌木小样方,在每个灌木小样方内设置 1 个 1×1m 的草本小样方,在样方内另外随机设置 3 个 1 m×1 m 的凋落物小样方。在灌木调查样方内将所有灌木全部收获,分根、枝干、叶称质量,分别取约 300 g 样品称鲜质量。在草本调查样方内收获样方内全部草本,分地上和地下部分称量,并分别取约 300 g 样品称鲜质量。在凋落物调查样方内收集所有凋落物并称量,取其混合样品约 300 g 称鲜质量[15,20,27]。土壤调查采用剖面法,沿剖面采用环刀法分层(0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—50 cm,50—100 cm)采集土壤,用于测定土壤容重,土钻法分层采样测定土壤有机碳含量;采用重铬酸钾—硫酸氧化法测定以上各样品的碳含量[28]。通过样地实验数据获取不同植被类型地上生物、地下生物、凋落物和土壤各组分的平均碳密度参数,具体见表 1。

1.3.2 InVEST 模型

本研究采用 InVEST 3.5.0 模型中的碳储量模块(Carbon Model)定量评估海南岛森林生态系统碳储量分布[22—23]。InVEST 模型碳储量模块以森林生态系统植被类型分类的空间栅格数据为评估单元,依据各植被类型空间分布格局及其对应的平均碳密度来评估区域生态系统碳储量,模型自动生成碳储量空间分布图[29]。其中,地上生物碳储量(C_{above})主要包括地表以上所有存活的植被(树皮、树干、树枝和树叶等)中的碳储量;地下生物碳储量(C_{below})是指存在于植物活根系统中的碳储量;死亡有机碳储量(C_{dead})表示凋落物、枯立木或已死亡倒木中的碳储量,这里主要指凋落物碳库;土壤碳储量(C_{soil})一般是指矿质土壤和有机土壤中的有机碳储量。计算公式为:

$$C_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil} \tag{1}$$

式中,C_{tot}为总碳储量(MgC);C_{above}为地上生物碳储量(MgC);C_{below}为地下生物碳储量(MgC);C_{dead}为死亡有机碳储量(MgC);C_{soil}为土壤碳储量(MgC)。

1.3.3 空间自相关分析

探索性空间数据分析是地统计学分析的一种方法,它是通过计算空间自相关系数,描述可视化事物或现象空间分布格局的空间集聚和异常状态,被广泛应用于社会经济和生态环境分析中[30—31]。本文采用 Moran′s I 指数用于描述碳储量全局空间自相关特征;Getis-Ord G_i^* 指数用于探究碳储量空间变化的聚集与分异特征,即碳储量“热点”与“冷点”分布格局[32]。计算公式分别为:

$$\text{Moran's } I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2(\sum_i \sum_j w_{ij})} \tag{2}$$

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_{i,j} x_j - X \sum_{j=1}^{n} w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{\left[n \sum_{j=1}^{n} w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} w_{i,j}\right)^2\right]}{(n-1)}}} \tag{3}$$

$$X = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} x_i \tag{4}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} x_j^2 - (X)^2} \tag{5}$$

式中,n 是空间网格单元数量,x_i和 x_j分别表示单元 i 和单元 j 的观测值,$(x_i - \bar{x})$ 是第 i 个空间单元上的观测值与平均值的偏差,w_{ij}是基于空间 k 邻接关系建立的空间权重矩阵。Moran′s I 指数的取值范围为[-1, 1],大于 0 表示空间正相关,值越大,正相关性越显著,空间集聚性越强;小于 0 表示空间负相关;等于 0 表示空间不相关,空间单元分布随机。Getis-Ord G_i^* 指数的 P 值表示典型概率,0.01、0.05 和 0.1 分别对应典型置信区间 99%、95%和 90%,表明空间单元热点(或冷点)的聚集与分异程度。

2　结果与分析

2.1　海南岛森林生态系统碳储量和碳密度特征

由表 2 可知,海南岛森林生态系统的总碳储量为 338.15 TgC,平均碳密度为 147.66 MgC/hm^2,其中地上生物、地下生物、凋落物和土壤的平均碳密度分别为 37.17、8.18、1.27 MgC/hm^{2}和 101.04 MgC/hm^2。可见,土壤层碳储量最高,达 231.40 TgC,占总碳储量的 68.43%,其次为地上生物碳库为 85.12 TgC,占总量的25.17%;最低的是凋落物碳库,仅占总量的 0.86%。

表 2　海南岛森林生态系统不同碳库的碳储量和碳密度

Table 2　Carbon storage and carbon density of different carbon pools in the forest ecosystems of Hainan Island

指标 Index	地上生物碳库 Aboveground biomass carbon pool	地下生物碳库 Belowground biomass carbon pool	凋落物碳库 Litterfall carbon pool	土壤碳库 Soil carbon pool	森林生态系统 Forest ecosystem
碳储量 Carbon storage/(TgC)	85.12	18.73	2.90	231.40	338.15
碳密度 Carbon density/(MgC/hm^2)	37.17	8.18	1.27	101.04	147.66
占比 Percentage/%	25.17	5.54	0.86	68.43	100.00

从空间分布上看(图 3),森林生态系统碳储量高值区主要分布在海南岛中南部山区,低值区则主要分布在四周海拔较低的区域,特别是海南岛东北部平原地区。其中地上生物、地下生物、凋落物和土壤层碳库的空间分布也跟总碳储量分布相对一致,呈现出中间高、四周低的分布格局。

2.2　不同植被类型碳储量和碳密度特征

不同植被类型碳储量差异较大(图 4),橡胶林的碳储量最高,达 93.72 TgC,占全岛森林生态系统总碳储量的 27.72%,其中橡胶林幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林的碳储量分别为 17.48、24.07、17.25、18.07 TgC 和 16.85 TgC。其次为热带低地雨林的碳储量,为 59.00 TgC,占总量的 17.45%;再次为棕榈科经济作物槟榔,为 36.28 TgC;最少的是杉木类的碳储量,仅有 0.30 TgC。从不同植被类型的碳密度上看,天然林的碳密度较高,大多高于 190 MgC/hm^2,其中碳密度最高的是分布于海南岛中部山区的热带山地雨林,达到 249.64 MgC/hm^2,其次是热带山地雨林次生林、热带低地雨林和热带山地常绿阔叶林,分别为 231.43、225.41 MgC/hm^{2}和 220.49 MgC/hm^2。人工林碳密度介于 59.77—187.94 MgC/hm^{2}之间,最低的是分布在沿海地区的木麻黄,仅为 59.77 MgC/hm^2。

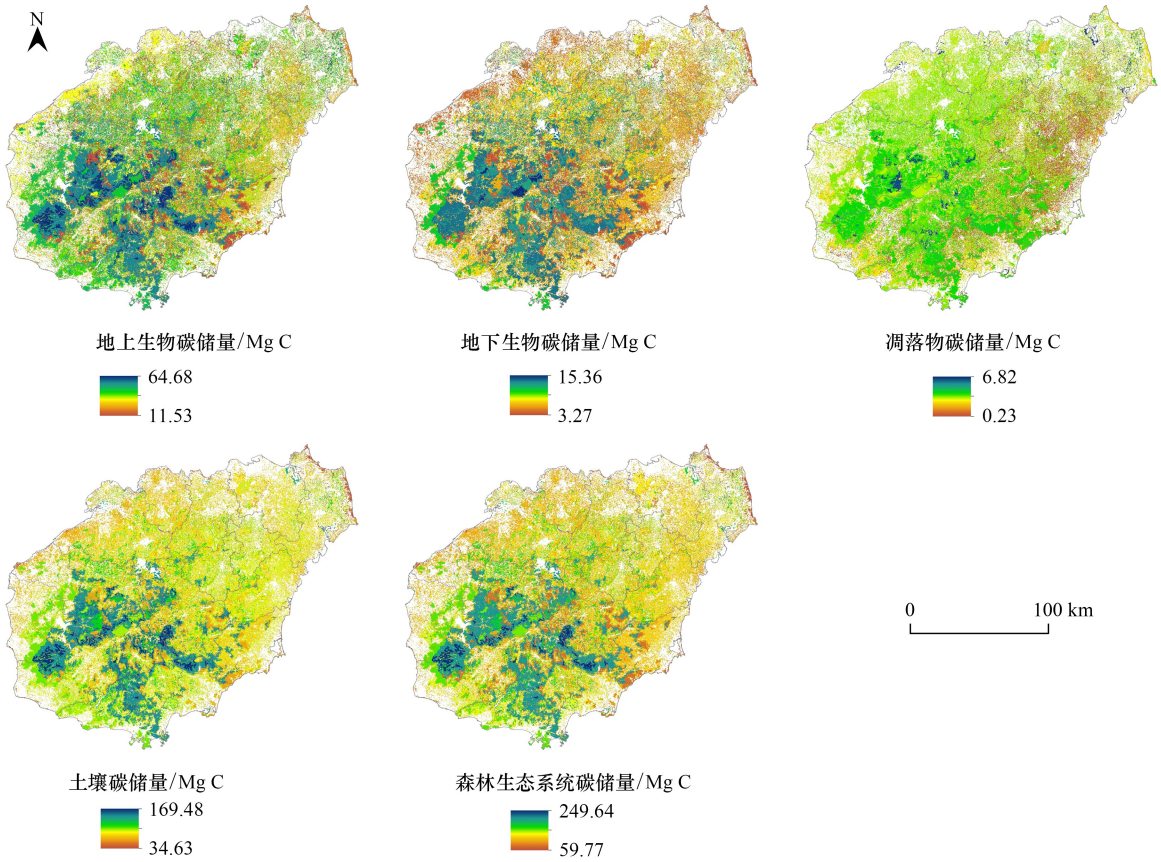

图 3 海南岛森林生态系统不同碳库碳储量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of carbon storage in different carbon pools of forest ecosystems in Hainan Island

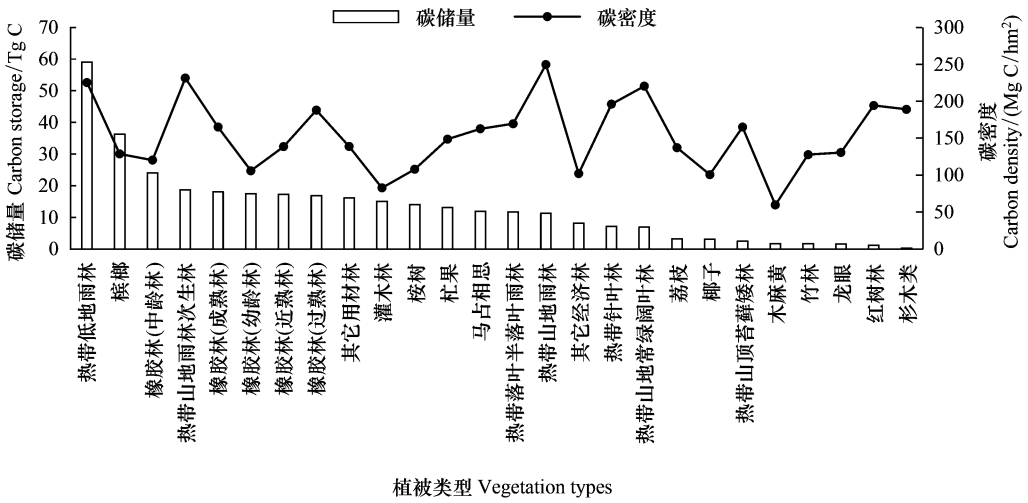

图 4 海南岛森林生态系统不同植被类型碳储量和碳密度分布

Fig.4 Distribution of forest ecosystem carbon storage and carbon density in different vegetation types of Hainan Island

2.3 碳储量和碳密度对海拔的变化

总体来看,海南岛森林生态系统的碳储量呈现出随海拔高度增加而减小的分布特征(图 5)。具体上,在海拔 0—300 m 的范围,森林生态系统碳储量达到 215.26 TgC,占总碳储量的 63.66%,这主要与研究区海拔分

布有关,区域内森林生态系统面积占总面积达到 70.42%,但平均碳密度最低,为 133.49 MgC/hm^2。而在海拔 400 m 以上的区域,森林生态系统碳储量随海拔升高而逐渐减少。从碳密度的分布特征上看,森林生态系统的碳密度随海拔高度增加呈现先增加后减少的变化态势,碳密度较高区域主要分布在海拔 600—1300 m 范围内,碳密度可达 200.37—228.86 MgC/hm^2,与该区域集中分布的热带低地雨林、热带山地雨林、热带山地雨林次生林、热带山地常绿阔叶林等热带天然林密切相关。而在 1300 m 以上的海拔区域,森林生态系统的碳密度则逐渐降低,这主要是与在区域内分布的热带山顶苔藓矮林和部分灌木林有关。

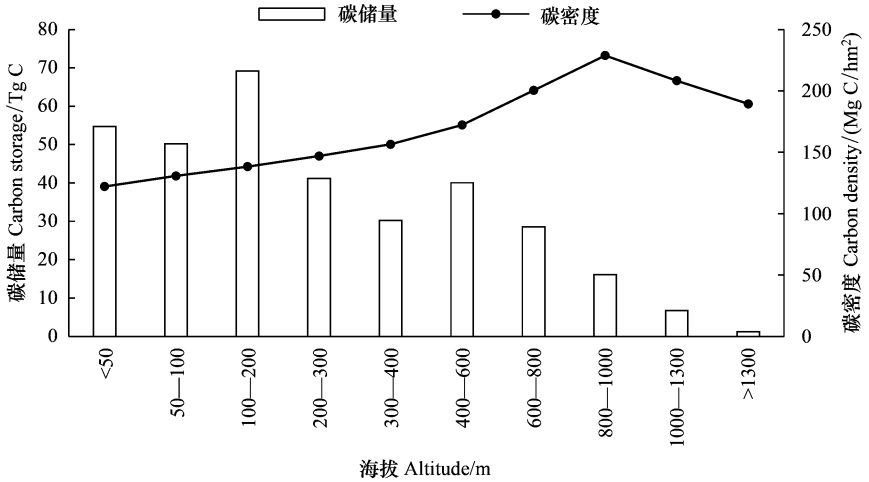

图 5　海南岛森林生态系统碳储量和碳密度随海拔的变化

Fig.5　Changes of forest ecosystem carbon storage and carbon density with altitude in Hainan Island

2.4　碳储量和碳密度市县分布特征

海南各市县的森林生态系统碳储量分布在 8.55—35.40 TgC 的范围内(图 6),其中碳储量分布较高的是琼中、乐东、白沙、儋州等,分别为 35.40、31.46、28.58 TgC 和 27.86 TgC;最低的是临高县,碳储量仅为 8.55 TgC。海南岛不同市县的森林生态系统碳密度空间分布格局则与碳储量稍有不同,较高的市县主要分布在海南岛中南部地区(图 7),其中以五指山、三亚的碳密度最高,分别为 175.20、174.12 MgC/hm^2,其次为保亭、昌江、东方、乐东、白沙 5 个市县,碳密度范围介于 160—170 MgC/hm^{2}之间;海南岛东北部区域的市县碳密度则较低,处于 117.68—137.68 MgC/hm^{2}之间,以临高县最低。

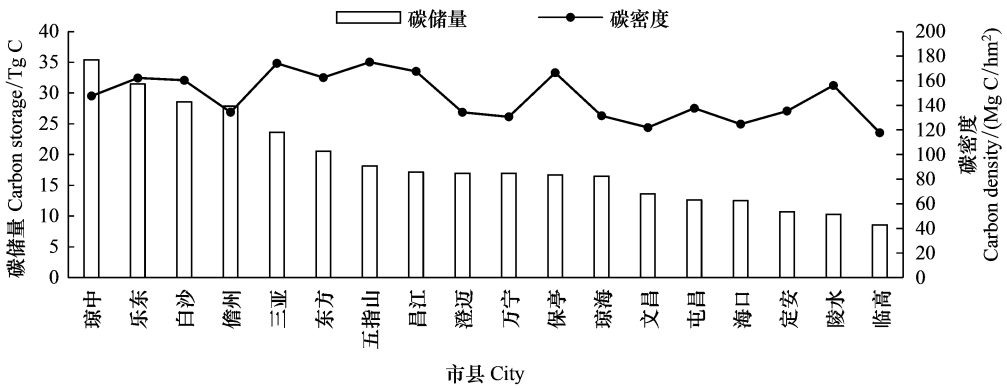

图 6　海南岛不同市县森林生态系统碳储量和碳密度分布

Fig.6　Distribution of forest ecosystem carbon storage and carbon density in different cities of Hainan Island

2.5 森林生态系统碳储量空间统计分析

以碳储量为观测变量,分析得到海南岛森林生态系统碳储量的 Moran 散点分布图(图 8),可以看出,碳储量的 Moran 散点主要分布在第一象限(HH,高-高聚集)和第三象限(LL,低-低聚集),第二象限(LH,低-高异常)和第四象限(HL,高-低异常)散点分布相对较少,碳储量的全局 Moran′s I 值为 0.8460,呈现极显著正的空间自相关性($P<0.01$),表明研究区碳储量的空间分布具有非常显著的空间聚集性,在空间分布上并非完全随机。

从森林生态系统碳储量的冷热点分析来看(图 9),海南岛森林生态系统碳储量的热点区主要集中在中部山区($P<0.05$),该区域是海南热带雨林的集中分布区,林分质量高,有利于碳的积累;冷点区则主要分布在海南岛沿海区域,呈环状分布($P<0.05$),该区域受人为活动的影响主要以人工林分布为主;其他区域的冷热点显示不显著。可见,海南岛森林生态系统碳储量的冷热点空间分布特征与不同海拔梯度碳密度的空间分布格局一致,这可能与受到海拔、植被类型和人类活动干扰等多重因素的综合影响有关。

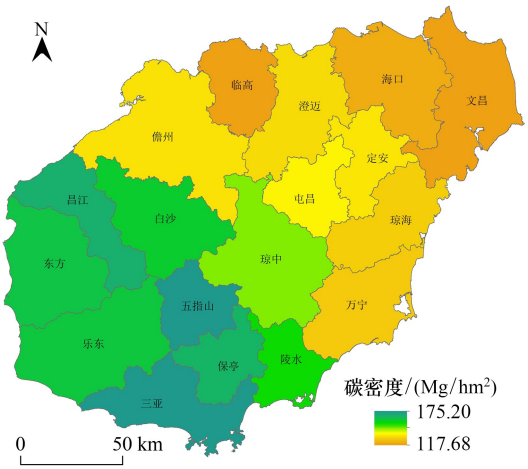

图 7 海南岛不同市县森林生态系统碳密度空间分布图

Fig.7 Spatial distribution map of forest ecosystem carbon density in different cities of Hainan Island

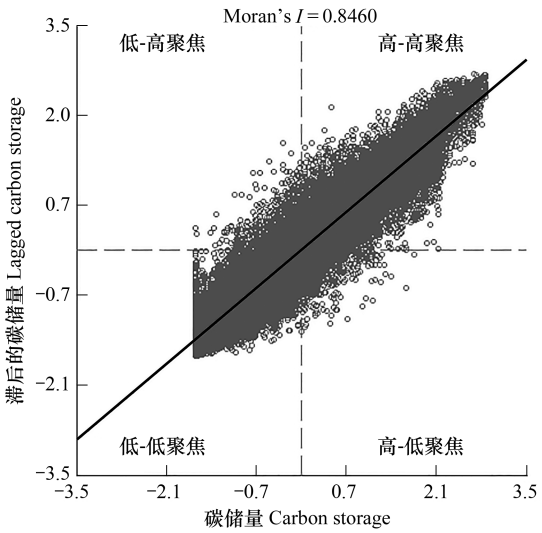

图 8 海南岛森林生态系统碳储量 Moran 散点图

Fig.8 Moran scatter-plot of carbon storage in forest ecosystems in Hainan Island

HH:高-高聚集,High-high cluster;LL:低-低聚集,Low-low cluster;HL:高-低异常,High-low outlier;LH:低-高异常,Low-high outlier

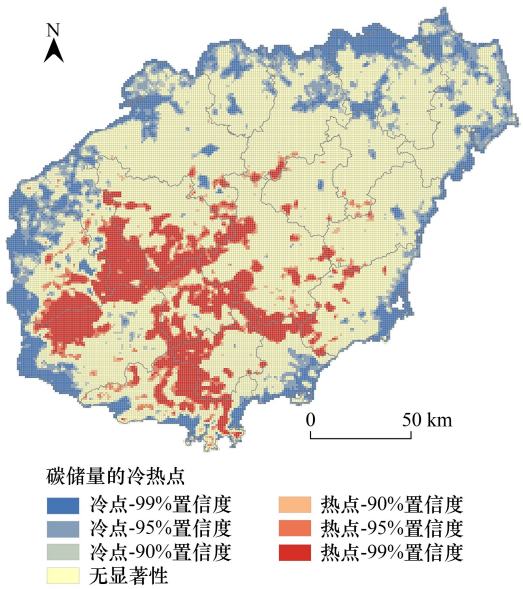

图 9 海南岛森林生态系统碳储量热点和冷点空间分布

Fig.9 Spatial distribution of hot spots and cold spots of carbon storage in forest ecosystems in Hainan Island

3 讨论

3.1 海南岛森林生态系统碳储量和碳密度分配特征

森林生态系统作为陆地碳循环的重要组成部分,其碳储量水平和固碳潜力一直备受关注,对于掌握碳循环机制和制定减排政策至关重要。本研究利用最新的森林资源二类调查数据和不同植被类型的野外样地调查资料,对海南岛森林生态系统碳储量和碳密度分配特征进行了分析,结果表明海南岛森林生态系统总碳储

量为 338.15 TgC,其中地上生物、地下生物、凋落物和土壤的碳储量分别为 85.12、18.73、2.90 TgC 和 231.40 TgC,所占比重依次为 25.17%、5.54%、0.86%和 68.43%。这一比例关系和周玉荣等[33]对我国主要森林生态系统碳储量、Ren 等[20]人对 1993—2008 年海南森林生态系统碳储量的研究结果比较吻合。本研究中土壤碳库约是植被碳库(地上生物和地下生物)的 2.2 倍, 森林生态系统超 2/3 的碳储量都储存在土壤中, 说明土壤碳库作为森林生态系统内最大的碳库, 在维持稳定森林碳储量方面具有重要作用。Ren 等[20]对海南森林生态系统碳储量的研究结果表明,森林生态系统碳储量从 1993 年的 109.51 TgC 增加到 2008 年的 279.17 TgC,主要原因是这一时期森林覆盖率的持续增加。因此,这一变化趋势与本研究中现阶段的海南岛森林生态系统碳储量研究结果十分吻合,表明随着森林面积和森林质量的提升,森林生态系统碳储量也在逐渐增加。海南岛森林生态系统平均碳密度为 147.66 MgC/hm^2,明显低于全国森林生态系统平均碳密度 258.83 MgC/hm^2[33]、四川省的 232.81 MgC/hm^2[34]和吉林省的 225.30 MgC/hm^2[14],高于陕西省的 123.70 MgC/hm^2[15]、浙江省的 120.80MgC/hm^2[28],这可能是由于不同地域内的水热条件、自然环境条件、森林结构和土壤类型等的差异所致[3,35]。但本研究结果与 2014 年 Ren 等[20]人基于海南省连清数据的森林生态系统碳密度为163.70 MgC/hm^2、Liu 等[36]人对亚热带森林生态系统碳密度为(149±12) MgC/hm^2的研究结果十分接近。其中海南岛森林生态系统的植被(地上生物和地下生物)碳密度为 45.35 MgC/hm^2稍低于王万同等[37]对海南主要森林类型植被碳密度为 58.36 MgC/hm^2、李海奎等[38]的 55.51 MgC/hm^2的研究结果,但与 Ren 等[20]人对海南森林植被碳密度为 41.20 MgC/hm^2的研究结果基本一致;土壤碳密度为 101.04 MgC/hm^2也与王万同等[37]对海南的113.88 MgC/hm^2的研究结论比较接近,这表明本研究对海南岛森林生态系统碳密度的研究结果是可靠的。

从不同植被类型来看,热带山地雨林、热带山地雨林次生林、热带低地雨林和热带山地常绿阔叶林等热带天然林的碳密度要明显高于人工林,表明天然林资源对于稳定全岛森林生态系统碳储量具有举足轻重的作用。但海南热带森林的碳密度远低于世界其他区域的热带森林[3,39],具有较大的提升空间,其碳储量可通过选择碳密度高的树种和改善群落结构来提高。1994 年,海南省全面停止天然林商业性采伐,并实施封山育林等措施,有效保护了天然林资源;且随着海南热带雨林国家公园对天然林的综合性保护和系统性修复,海南岛中部山区的次生林、低效人工林、浆纸林等逐渐恢复为物种丰富的热带天然林。有研究表明,树种丰富度可以增加热带森林生态系统碳储量[3],并且每增加一个树种,碳储量将增加 6.4%[36]。因此,可将海南岛具有重要生态功能区域的人工林通过改变单一树种结构,向多树种近自然造林方式转变,进一步优化林分结构,提高林分质量,达到提升全岛热带森林生态系统固碳潜力的目标。

3.2　海南岛森林生态系统碳储量和碳密度空间分布格局

有研究认为,森林生态系统碳储量的空间分布格局是受到地形地貌、植被类型、气候条件等多重因素综合影响的结果[3,22,34—35,40]。本研究结果显示海南岛森林生态系统碳储量和碳密度均呈现出中间高、四周低的空间分布格局,这与海南的地形分布特征高度一致,也与中部山区集中分布热带原始天然林、四周主要分布人工林的植被类型分布特征基本吻合。通过探索性空间数据分析也表明,研究区森林生态系统碳储量的空间分布具有非常显著的空间聚集性,高值热点区主要集中在海南岛较高海拔的中部山区。在海拔梯度上,海南岛森林生态系统的碳储量呈现出随海拔高度增加而减小的分布特征,这与张影等[22]对甘肃白龙江流域碳储量的分布规律不同,这主要是由于海南岛四周地势平坦,在海拔 0—300 m 的范围,森林生态系统面积占总面积达到 70.42%,所以导致其碳储量大部分分布在该海拔区域内,但是平均碳密度却远低于中部地区。同时,在海南岛沿海区域,由于长期受高强度人为活动的影响,许多原生植被被人工林或者建设用地等所取代,造成 CO_2 排放增加,区域森林生态系统碳储量和碳密度降低,因此分布有较多的低值冷点区;特别是位于海南岛东北部区域的市县,原生植被消失殆尽,其碳储量和碳密度均处于较低水平。这也反映出人类活动干扰是影响海南岛森林生态系统碳储量和碳密度空间分布的重要因素之一[14,34]。未来可以通过合理的抚育管理和森林质量精准提升措施提高林地生产力和林木生长量,积极培育、使用能持续固碳的优良树种,减少林地占用、林业灾害等对森林资源的损毁,进一步提升海南岛森林生态系统的碳储量,以最大限度地发挥陆地生态系统对将来

人类活动 CO_2排放的潜在抵消能力。

3.3 碳储量估算的不确定性及展望

不同研究对于碳储量估算方法的差异可能会在一定程度上造成研究结果的不确定性,主要原因是植被类型多样,研究区域复杂,估算方法和基础数据存在不同[6]。与之前的研究相比,我们的基础数据利用最新的森林资源二类调查数据并结合不同植被类型长期且全面的野外样地调查资料,有助于更准确地估算海南岛森林生态系统碳储量及碳密度。在空间分布上,本研究引入 InVEST 模型,为碳储量的估算与空间分布制图提供了可行的方法。但是本研究受研究区地形和可达性、生态系统复杂性等限制,相同植被类型在不同区域、不同海拔上的碳密度差异仍难以区分;同时碳密度也会随林龄增加而升高[15—16],本研究仅考虑了面积占比较大的橡胶林龄组,没有区分所有植被类型不同林龄阶段碳密度的差异。此外,土壤有机碳是碳库的重要组成部分,其变化也与植被组成、凋落物输入量和质量、土壤容重、土壤母质和小气候等因素密切有关[41—42]。由于缺乏野外长期实验观测数据和基础数据,上述因素均会对研究结果造成不确定性。森林碳储量现状的准确评估是后续固碳速率、潜力及机制分析的重要基础, 是理解森林生态系统在全球碳平衡和碳循环中所处地位的重要手段[15]。建议在以后的研究中进一步优化研究方案,在改进和参数本地化的基础上,充分考虑同一植被类型的空间异质性特点,获取更为精细的基础参数,从中小尺度开展碳储量研究,通过数学建模和升尺度方式扩展到较大尺度上来,以减少估算结果的不确定性。

4 结论

本研究基于最新的森林资源二类调查分布数据和野外样地调查资料,采用 InVEST 模型和空间统计分析等方法,研究了海南岛森林生态系统不同植被类型、海拔梯度和不同市县上的碳储量及其空间分布特征。结果表明:

(1)海南岛森林生态系统总碳储量为 338.15 TgC,其中地上生物、地下生物、凋落物和土壤的碳储量分别为 85.12、18.73、2.90 TgC 和 231.40 TgC,所占比重依次为 25.17%、5.54%、0.86%和 68.43%。海南岛森林生态系统平均碳密度为 147.66 MgC/hm^2,其中地上生物、地下生物、凋落物和土壤碳密度分别为 37.17、8.18、1.27 MgC/hm^2和 101.04 MgC/hm^2。不同植被类型中,橡胶林的碳储量最高,占全岛森林生态系统总碳储量的 27.72%;热带山地雨林的碳密度最高,达到 249.64 MgC/hm^2;人工林碳密度介于 59.77—187.94 MgC/hm^2之间。

(2)在海拔梯度上,森林生态系统碳密度呈现先增加后减少的变化特征,在海拔 600—1300 m 范围内的碳密度最高,碳密度为 200.37—228.86 MgC/hm^2。不同市县森林生态系统碳储量分布在 8.55—35.40 TgC 的范围内,最高的是琼中县,达到 35.40 TgC。

(3)海南岛森林生态系统碳储量在空间分布上具有非常显著的空间聚集性($P<0.01$),热点区主要集中在中部山区,冷点区则主要分布在海南岛沿海区域,呈现出明显的中间高、四周低的空间分布格局。

致谢:感谢海南文昌森林生态系统国家定位观测研究站、尖峰岭森林生态系统国家定位观测研究站等单位在此次研究过程中提供的数据和给予的帮助。

参考文献(References):

[1] Houghton R A, Davidson E A, Woodwell G M. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance. Global Biogeochemical Cycles, 1998, 12(1): 25-34.

[2] IPCC. Climate Change 2013 - the Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014

[3] Kothandaraman S, Dar J A, Sundarapandian S, Dayanandan S, Khan M L. Ecosystem-level carbon storage and its links to diversity, structural and environmental drivers in tropical forests of Western Ghats, India. Scientific Reports, 2020, 10: 13444.

[4] Grassi G, House J, Dentener F, Federici S, den Elzen M, Penman J. The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible

mitigation. Nature Climate Change, 2017, 7(3): 220-226.

[5] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. Plant, Cell and Environment, 1999, 22(6): 715-740.

[6] 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.

[7] Watson R T, Noble I R, Bolin B, Ravindranath N H, Verardo D J, Dokken D J. Land Use, Land-Use Change, and Forestry: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

[8] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexier M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science, 1994, 263(5144): 185-190.

[9] Piao S L, Fang J Y, Zhu B, Tan K. Forest biomass carbon stocks in China over the past 2 decades: Estimation based on integrated inventory and satellite data. Global Change Biology, 2005, 110: G01006.

[10] Asner G P, Powell G V N, Mascaro J, Knapp D E, Clark J K, Jacobson J, Kennedy-Bowdoin T, Balaji A, Paez-Acosta G, Victoria E, Secada L, Valqui M, Hughes R F. High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(38): 16738-16742.

[11] López-Santiago J G, Casanova-Lugo F, Villanueva-López G, Díaz-Echeverría V F, Solorio-Sánchez F J, Martínez-Zurimendi P, Aryal D R, Chay-Canul A J. Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. Agroforestry Systems, 2019, 93(1): 199-211.

[12] Fang J, Chen A, Peng C, Zhao S, Ci L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.

[13] Xu L, Yu G R, He N P, Wang Q F, Gao Y, Wen D, Li S G, Niu S L, Ge J P. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems: a synthesis. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2806.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 刘兆丹, 李斌, 方晰, 项文化, 田大伦, 闫文德, 雷丕锋. 湖南省森林植被碳储量、碳密度动态特征. 生态学报, 2016, 36(21): 6897-6908.

[17] 刘领, 王艳芳, 悦飞雪, 李冬, 赵威. 基于森林清查资料的河南省森林植被碳储量动态变化. 生态学报, 2019, 39(3): 864-873.

[18] 汤浩藩, 许彦红, 艾建林. 云南省森林植被碳储量和碳密度及其空间分布格局. 林业资源管理, 2019(5): 37-43.

[19] 任德智, 廖兴勇, 肖前刚, 赖长鸿, 宋放, 孟思淼, 彭雪芹. 成都市森林植被碳储量及空间分布格局. 西部林业科学, 2021, 50(3): 74-81.

[20] Ren H, Li L J, Liu Q, Wang X, Li Y D, Hui D F, Jian S G, Wang J, Yang H, Lu H F, Zhou G Y, Tang X L, Zhang Q M, Wang D, Yuan L L, Chen X B. Spatial and temporal patterns of carbon storage in forest ecosystems on Hainan Island, Southern China. PLoS One, 2014, 9(9): e108163.

[21] Sun Z Z, Peng S S, Li X R, Guo Z D, Piao S L. Changes in forest biomass over China during the 2000s and implications for management. Forest Ecology and Management, 2015, 357: 76-83.

[22] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 巩杰, 张玲玲. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征. 资源科学, 2016, 38(8): 1585-1593.

[23] 修珍珍, 王斌, 杨校生, 余超, 张龙, 格日乐图. 基于 InVEST 模型估算富阳市森林生态系统碳储量. 广西植物, 2016, 36(7): 868-874.

[24] 曹军, 张镱锂, 刘燕华. 近 20 年海南岛森林生态系统碳储量变化. 地理研究, 2002, 21(5): 551-560.

[25] 张镱锂, 张玮, 丁明军. 基于土地利用/覆被分类系统估算碳储量的差异——以海南岛森林为例. 地理科学进展, 2004, 23(6): 63-70.

[26] 杨小波, 陈宗铸, 李东海. 海南植被分类体系与植被分布图. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(3): 321-333.

[27] 李银, 陈国科, 林敦梅, 陈彬, 高雷明, 简兴, 杨波, 徐武兵, 苏宏新, 赖江山, 王希华, 杨海波, 马克平. 浙江省森林生态系统碳储量及其分布特征. 植物生态学报, 2016, 40(4): 354-363.

[28] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996.

[29] Tallis H, Icketts T, Guerry A. InVEST User's Guide: Integrated valuation of environmental services and tradeoffs. Stanford: The Natural Capital Project, 2013.

[30] Li G D, Fang C L, Wang S J. Exploring spatiotemporal changes in ecosystem-service values and hotspots in China. Science of the Total Environment, 2016, 545/546: 609-620.

[31] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2020, 40(14): 4760-4773.

[32] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA. Geographical Analysis, 2010, 27(2): 93-115.

[33] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.

[34] 黄从德. 四川森林生态系统碳储量及其空间分异特征[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.

[35] Hofhansl F, Chacón-Madrigal E, Fuchslueger L, Jenking D, Morera-Beita A, Plutzar C, Silla F, Andersen K M, Buchs D M, Dullinger S, Fiedler K, Franklin O, Hietz P, Huber W, Quesada C A, Rammig A, Schrodt F, Vincent A G, Weissenhofer A, Wanek W. Climatic and edaphic controls over tropical forest diversity and vegetation carbon storage. Scientific Reports, 2020, 10: 5066.

[36] Liu X J, Trogisch S, He J S, Niklaus P A, Bruelheide H, Tang Z Y, Erfmeier A, Scherer-Lorenzen M, Pietsch K A, Yang B, Kühn P, Scholten T, Huang Y Y, Wang C, Staab M, Leppert K N, Wirth C, Schmid B, Ma K P. Tree species richness increases ecosystem carbon storage in subtropical forests. Proceedings Biological Sciences, 2018, 285(1885): 20181240.

[37] 王万同, 唐旭利, 黄玫. 中国森林生态系统碳储量-动态及机制. 北京: 科学出版社, 2018.

[38] 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.

[39] Lal R. Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management, 2005, 220(1/2/3): 242-258.

[40] 戴巍, 赵科理, 高智群, 刘康华, 张峰, 傅伟军. 典型亚热带森林生态系统碳密度及储量空间变异特征. 生态学报, 2017, 37(22): 7528-7538.

[41] Dar J A, Somaiah S. Altitudinal variation of soil organic carbon stocks in temperate forests of Kashmir Himalayas, India. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(2): 11.

[42] 郭晓伟, 骆土寿, 李意德, 许涵, 陈德祥, 林明献, 周璋, 杨怀. 海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳密度空间分布特征. 生态学报, 2015, 35(23): 7878-7886.