

基于 InVEST 模型的江苏海岸带生态系统 碳储量时空变化研究

张云倩^{1,2}, 张晓祥³, 陈振杰^{1,2}, 王伟玮³, 陈东^{1,2}

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 南京大学 江苏省地理信息技术重点实验室,
南京 210023; 3. 河海大学 地理信息科学与工程研究所, 南京 210098)

摘要: 研究改革开放以来长时间序列的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化, 对于保证我国东部沿海地区环境与经济协调发展显得十分迫切和必需。以江苏沿海 3 市海岸带为对象, 通过获取 1975—2007 年的遥感影像数据, 采用 InVEST(Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs)模型对江苏海岸带生态系统的碳储量进行定量评估, 构建了长时间序列的碳储量变化数据, 并结合 ESDA(Exploratory Spatial Data Analysis)方法研究其空间相关性, 探讨了江苏海岸带碳储量的时空变异。结果表明: 江苏海岸带总碳储量呈增长趋势, 但单位土地面积的碳储量呈降低趋势; 该区域碳储量在空间分布上呈现一定的空间相关性, 主要体现在连云港云台山境内、新沂河泛洪区和盐城滨海苇地是碳储量的高集聚区, 城镇是碳储量的低集聚区。

关键词: 碳储量; InVEST 模型; 空间相关性; 时空变化; 江苏海岸带

中图分类号: S154.1; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)03-0100-06

Research on the Spatiotemporal Variation of Carbon Storage in Coastal Zone Ecosystem of Jiangsu Based on InVEST Model

ZHANG Yunqian^{1,2}, ZHANG Xiaoxiang³, CHEN Zhenjie^{1,2}, WANG Weiwei³, CHEN Dong^{1,2}

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Institute of Geographical Information Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: It is urgent to investigate the spatiotemporal variation of carbon storage in coastal zone ecosystem of Jiangsu Province since the reform and opening up in China with respect to harmonizing the environment with economic development. The remote sensing images which date from the year of 1975 to 2007 were acquired. The integrated valuation of environmental services and tradeoffs (InVEST) model was utilized to evaluate the amount of carbon storage in coastal zone of Jiangsu Province. Long time series of carbon storage data were built. The spatial analysis method was used to investigate the spatial correlation of the ecosystem services and to explore the pattern of spatiotemporal variation. Some basic conclusions can be drawn from the experimental results. The total amount of carbon storage increased while the amount of carbon storage per unit area decreased. The amount of carbon storage in this area presented highly spatial agglomeration and obvious relevance. Specifically, the amounts of carbon storage in Yuntaishan Mountain of Lianyungang City, floodplain of Xinyi River, coastal reeds of Yancheng City were high while those in cities and towns were low.

Keywords: carbon storage; InVEST model; spatial correlation; spatiotemporal variation; coastal zone of Jiangsu Province

碳固定作为一项重要的生态系统服务, 对降低大气中 CO₂ 等温室气体浓度、减缓全球气候变化具有至关重要的作用。研究碳储量的时空变化对于了解

区域碳固定状况及生态系统服务功能演变、维持和管理具有重要意义^[1]。江苏海岸带自然资源丰富、地理位置优越。改革开放以来, 江苏沿海地区对海岸带的

过度开发导致土地利用方式、土地覆被类型发生显著变化,大量滨海原生湿地消失,进而影响陆地生态系统的碳储量,该地区的生态系统服务受到严重威胁^[2-3]。因此,研究改革开放以来长时间序列的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化,对于保证我国东部沿海地区环境与经济协调发展显得十分迫切和必需。

传统的碳储量估算研究多采用样地清查法,如根据土壤剖面数据估算土壤碳储量^[4-5]。该方法只适用于小面积区域,且费时费力,研究成果呈静态,无法反映研究区碳储量的动态变化^[6]。近年来,遥感(Remote Sensing, RS)监测和地理信息系统(Geographical Information System, GIS)空间处理技术的快速发展为碳储量估算提供了有利的工具。不少研究利用 RS 手段估算碳储量,如基于 TM/ETM+ 影像反演归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)来估算研究区碳储量^[7-8]。还有学者应用 GIS 空间分析技术评价碳储量并分析其变化的驱动因素,实现了大面积区域的碳储量估算及结果的空间化表达^[9]。但是这些研究以特定生态系统的地上部分碳库碳储量或者土壤碳储量居多^[10-11],缺乏对区域纵向空间多个碳库碳储量的综合评价研究。目前,利用 RS、GIS 技术建立模型来研究碳储量及其变化过程,成为碳储量空间化动态评估的发展趋势,其中较为著名的是 InVEST(Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs)模型。该模型被广泛应用于多个地区,如美国 O'ahu 岛^[12]、威拉米特河流域^[13]、中国汶川地震灾区^[14]、三江源区^[6]、白洋淀^[15]、北京山区^[16]等。然而现有研究多是单时相的,针对区域碳储量的长时间序列研究较少,单时相的碳储量评估结果只能体现一个时期的生态系统碳固定情况,不能反映区域生态系统碳储量的演变过程和变化趋势^[17-19]。因此,构建长时间序列的、综合碳库的碳储量数据是满足碳储量动态变化监测需求、进一步了解区域碳储量时空变化规律的关键。

本研究以江苏沿海 3 市(连云港、盐城、南通)海岸带为研究区,利用 InVEST 模型的碳储量估算方法,构建 1975—2007 年江苏海岸带长时间序列的 4 大碳库(地上部分生物量、地下部分生物量、土壤、死亡有机质)的碳储量变化数据,定量研究生态系统碳储量的分布和变化情况。在此基础上,利用探索性空间数据分析(Exploratory Spatial Data Analysis, ESDA)技术分析江苏省海岸带碳储量的空间分布格局,尝试剖析这种格局时空演变背后的动因。

1 研究区概况

江苏海岸带地处长江三角洲、江淮下游,地理位

置为东经 119°00′—122°00′,北纬 31°30′—35°30′,岸线北起苏鲁交界的绣针河口,南抵长江北口,海岸线全长 953.87 km,隶属于连云港、盐城、南通 3 市的 14 个县(市、区)。该地区地势平坦,海拔 0~4 m。江苏沿海滩涂蕴藏了重要的土地资源,受泥沙沉积作用和大规模的人工围垦等工程措施影响,这一区域的海岸持续东扩^[20],海岸带面积从 1975 年的 29 338 km² 增加到 2007 年的 30 964 km²。其景观类型是以耕地为基质,道路、河渠、林带为廊道,以城镇村落、港口码头、水库坑塘、盐田、草地、滩涂等为斑块的斑、廊、基空间镶嵌格局^[21]。江苏海岸带为沿海社会经济的可持续发展提供了物质基础,而且也提供着多种重要的生态系统服务功能,如调洪蓄水、水土保持和维护生物多样性等^[22]。

2 数据来源

2.1 遥感影像

遥感影像用于提取研究区土地利用/覆盖信息,包括 1975—2007 年 30 幅 Landsat MSS/TM/ETM+ 遥感影像,考虑到数据质量问题,采用了不同成像时期的遥感影像以保证数据的完整性、准确性,研究序列分为 1975—1979 年(T₁)、1987—1991 年(T₂)、2000—2001 年(T₃)、2004 年(T₄)、2006—2007 年(T₅)5 个时期(表 1)。

2.2 碳密度数据

(1) 地上部分碳密度和土壤碳密度。地上部分碳库即地表以上所有活的植被碳储量,主要根据揣小伟等^[23]对江苏省陆地生态系统不同土地利用类型植被碳密度的研究成果,与研究区土地利用类型对应,通过归并和统计获得。土壤碳密度的获得方法同地上部分碳密度。

(2) 地下部分碳密度和死亡有机碳密度。根据以往研究中对每种地类实测的地上部分生物量(碳)密度与地下部分生物量(碳)密度、死亡生物量(碳)密度比值及生物量—碳转换率等研究结果^[24-25],换算出地下部分碳密度和死亡有机碳密度。

3 研究方法

本研究以 1975—2007 年江苏海岸带 5 个时段的 Landsat MSS/TM/ETM+ 遥感影像为基础,研究碳储量的时空变化,主要包含 3 个步骤:土地利用/覆盖信息提取、碳储量估算和碳储量时空变化分析。(1) 土地利用/覆盖信息提取环节包括几何纠正、辐射校正和监督分类等,目的是得到适用于 InVEST 模型的研究区土地利用/覆盖信息;(2) 碳储量估算将分类得到的土地利用/覆盖信息结合碳密度数据,输入 InVEST 模

型中,得到各个时期研究区的碳储量结果,进而评估江苏海岸带碳储量的分布情况;(3)碳储量时空变化分析基于空间相关性分析进行,用ESDA方法分别对碳储量进行全局和局部空间自相关分析,分析碳储量的时空变化情况。

表 1 研究区遥感数据

时期	传感器	条带号 (行/列)	成像日期 (年-月-日)	分辨率/ m	云量/ %
T ₁ (1975—1979 年)	MSS	127/38	1979-08-04	79	0
		128/38	1979-05-25	79	0
		128/37	1975-03-26	79	0
		129/37	1979-08-06	79	0
		129/36	1978-09-16	79	0
		130/36	1978-08-25	79	0
T ₂ (1987—1991 年)	TM	118/38	1989-08-11	30	0
		119/38	1991-07-23	30	0
		119/37	1987-02-02	30	1
		120/37	1988-10-25	30	0
		120/36	1987-09-21	30	0
		121/36	1988-04-23	30	0
T ₃ (2000—2001 年)	ETM+	118/38	2000-09-18	30	0
		119/38	2001-07-26	30	1
		119/37	2000-07-31	30	2
		120/37	2000-09-16	30	0
		120/36	2000-09-16	30	0
		121/36	2001-04-03	30	0
T ₄ (2004 年)	TM	118/38	2004-07-19	30	0
		119/38	2004-07-26	30	0
		119/37	2004-05-23	30	0
		120/37	2004-04-28	30	0
		120/36	2004-04-28	30	0
		121/36	2004-09-10	30	0
T ₅ (2006—2007 年)	TM	118/38	2007-07-28	30	0
		119/38	2006-09-18	30	0
		119/37	2006-09-18	30	0
		120/37	2006-09-09	30	0
		120/36	2006-09-09	30	0
		121/36	2007-05-14	30	0

3.1 土地利用/覆盖信息提取

为了从多时相遥感影像中得到土地利用/覆盖信息,需要对原始影像进行图像预处理,主要包括几何纠正、辐射校正和监督分类等。本研究在数据整合中以江苏海岸带 1 : 5 万历史地形图为准,结合地面实测点位,对 1975 年 Landsat MSS 影像以及 1990 年、2000 年、2004 年、2007 年的 Landsat TM/ETM+ 影像进行像元对像元的几何精校正。卫星传感器接收到的目标地物的反射会受到太阳高度、地形及大气条件等因素的影响而导致光谱信号的失真,辐射校正的预处理能有效提高分类的精度。因此,本研究基于 FLAASH(Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)模型对 5 个时相的 Landsat 影像进行辐射校正。采用最大似然法进行监督分类,并且结合 1 : 5 万历史地形图以及 1 : 1 万土地利用现状

图提高影像数据的分类精度,根据 InVEST 模型中碳储量模块的数据需要,将影像分为高密度建筑、低密度建筑、水体、农田、山地、泛洪区、芦苇地、盐沼、盐田、非固结岸滩、未利用地 11 种土地利用/覆盖类型,分类精度均在 80% 以上,符合试验精度要求。

3.2 碳储量估算

土地利用与土地覆盖作为陆地生态系统变化的重要标志,其变化直接影响碳储量的变化。陆地生态系统中的碳储存大部分来自 4 类基本的碳库:地上部分生物量、地下部分生物量、土壤、死亡有机质碳库。地上部分碳库包括地表以上所有活的植被的碳储量;地下部分碳库包括植物活的根系系统;土壤碳库包括土壤有机碳和矿质土壤有机碳;死亡有机质碳库包括枯立木、凋落物和倒木中的碳储量。由美国斯坦福大学世界自然基金会(World Wildlife Fund,WWF)与大自然保护协会(the Nature Conservancy,TNC)联合开发的 InVEST 模型能够有效地对陆地上某一区域某一时段内的碳储量及其价值进行评估。该模型以土地利用类型为评估单元,利用区域土地利用/覆盖信息、各碳库碳密度数据,通过栅格叠加计算生成不同土地利用类型上的生态系统碳储量,得到区域碳储量的空间分布。InVEST 模型中还设计了第 5 碳库:木材碳库。但由于研究区的森林和木材含有量少,本研究中不考虑木材收获的起始时间、轮伐期、木材产品衰减率等对总碳储量的影响^[26]。InVEST 模型的碳储量模块中碳储量计算方法如下:

C=C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead} (1)

式中:C——总碳储量(t/km²);C_{above}——以土地利用类型为统计单元的地上部分碳储量;C_{below}——以土地利用类型为统计单元的地下部分碳储量;C_{soil}——以土地利用类型为统计单元的土壤碳储量;C_{dead}——以土地利用类型为统计单元的死亡有机质碳储量。

3.3 碳储量空间相关性分析

空间相关性是检验空间上分布邻近的要素属性相关联的重要指标。正相关表明某单元的属性值变化与其相邻空间单元具有相同变化趋势,负相关则相反^[27]。为了分析江苏海岸带的碳储量在空间分布的相关性,本研究使用 ESDA 方法分别从全局和局部空间自相关角度对其空间格局进行分析。

全局空间相关性是对整个区域内的属性值所具有的空间特性进行描述,一般通过 Moran's I 指数表征。Moran's I 取值范围为[-1,1],大于 0 表示区域内空间要素存在空间的正相关关系;等于 0 表示不存在相关性;小于 0 表示呈负相关关系。本研究采用 999 次蒙特卡洛模拟方法检验 Moran's I 是否显著。Moran's I 指数计算公式如下:

$$I = \frac{N}{S_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W(i,j) (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W(i,j) \quad (3)$$

式中: N ——研究对象的数目; X_i ——栅格单元碳储量观察值; \bar{X} —— X_i 的平均值; $W(i,j)$ ——研究对象 i,j 之间的空间邻接矩阵,表示区域 i 与 j 的邻近关系,它可以根据邻接标准或距离标准来度量。本研究采取简单的二进制邻接矩阵来定义 $W(i,j)$ 。即当区域 i 和 j 相邻时, $w=1$;不相邻时, $w=0$,区域与其自身的临近关系也为 0。

由于空间异质性普遍存在,全局观测指标难以有效地反映局部的细微差别,局部空间自相关可以进一步探索局部空间集聚。本研究通过将 LISA 显著性水平与 Moran 散点图结合,分析研究区碳储量局部空间自相关特征,识别局部空间集聚的“热点”和“冷点”。LISA 指数计算公式如下:

$$I_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{\sum_i (X_i - \bar{X})^2} \sum_j W(i,j) (X_j - \bar{X}) \quad (4)$$

4 结果与分析

4.1 碳储量时空分布分析

由于江苏海岸带的面积在不断变化,1975—1979 年、1987—1991 年、2000—2001 年、2004 年、2006—2007 年 5 个时期的土地面积分别为 29 337.73,30 230.88,

30 721.05,30 826.84,30 964.23 km²;为了比较各时期江苏海岸带土地的碳固定能力,试验统计了每个时期江苏海岸带总碳储量和单位土地面积的平均碳储量(图 1)。由图 1 可知,江苏海岸带 5 个时期的总碳储量分别为 27 152.90,27 771.6,28 137.5,28 203.1,28 115.8 万 t;单位土地面积的平均碳储量分别为 9 255.283,9 186.501,9 159.029,9 148.878,9 080.090 t/km²。1975—1979 年,江苏海岸带的碳储量最低,随后开始持续升高,从 1975—1979 年的 27 152.9 万 t 升高到 2004 年的 28 203.1 万 t,2006—2007 年下降到 28 115.8 万 t,但仍然高于 1975—1979 年碳储量水平。单位土地面积的平均碳储量呈降低趋势,年均降幅为 5.475 t/(km² · a),表示研究区土地固碳能力减弱,正从碳汇区逐渐向碳源区过渡。

从地理空间来看,连云港北部云台山山脉和盐城市滨海滩涂的苇地、盐沼碳储量最高,单位土地面积碳储量分别高达 16 351,12 818 t/km²,这是由于云台山境内的花果山、保驾山中有一定规模的森林,碳密度很高;苇地、盐沼中生长的芦苇、米草等湿地植物地上和地下生物量碳含量均较高,固碳能力强。此外连云港南部的新沂河以及周边泛洪区也呈高值,单位土地面积碳储量高达 12 095 t/km²,这是因为泛洪区土壤肥沃、富含死亡有机碳。碳储量的低值区在连云港和盐城的滨海盐田以及 3 市的城镇,单位土地面积碳储量均在 10 t/km² 以下(图 2)。

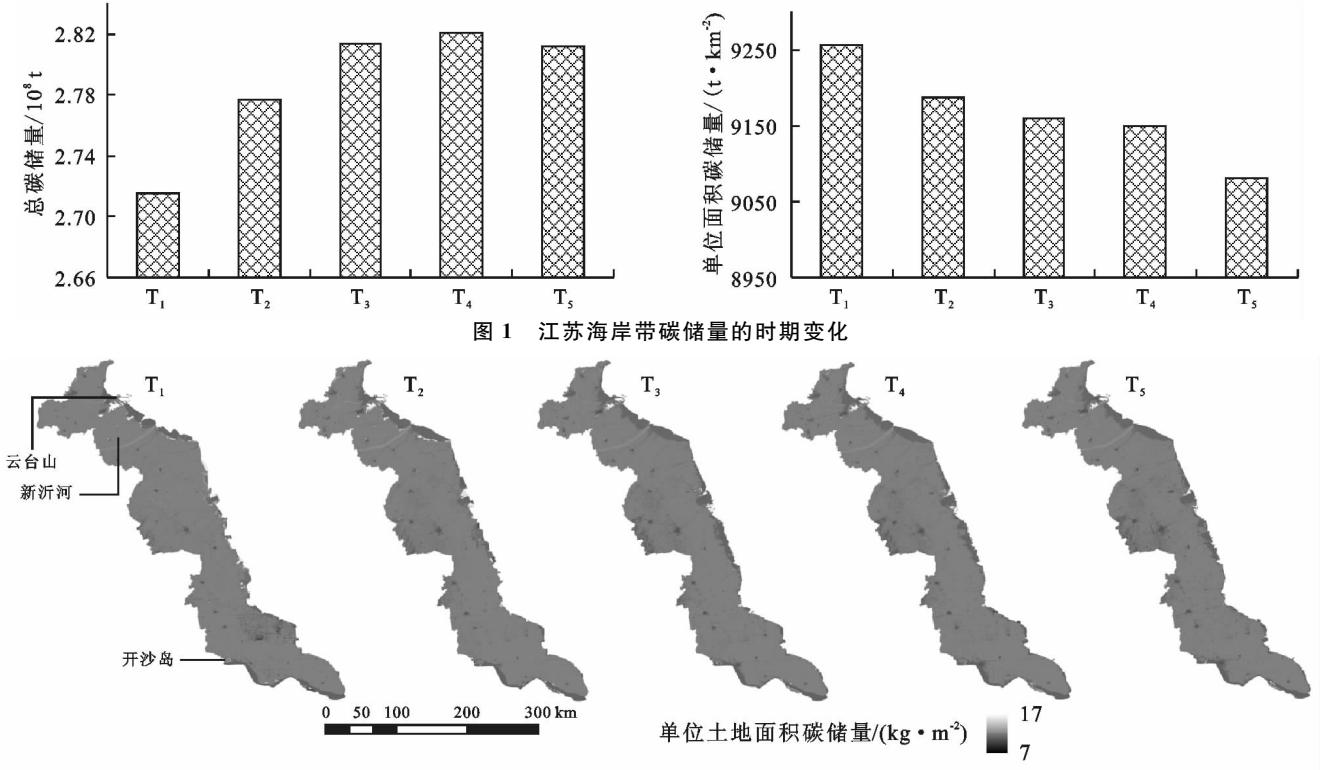


图 2 江苏海岸带碳储量分布

4.2 碳储量空间相关性分析

试验通过统计 5 个时期碳储量的 Moran's *I*, 得出江苏海岸带碳储量存在全局空间相关性的结论(图 3)。5 个时期江苏海岸带碳储量的 Moran's *I* 值均大于 0, 说明江苏省碳储量的分布呈现出一定的空间趋同集聚现象, 即高密度区域与高密度区域相邻接, 低密度区域与低密度区域相邻接。从 1975 年起, 空间集聚趋势增强, 到 2000 年到达顶值, 随后空间集聚趋势减弱, 空间异质性增强。

将 LISA 显著性水平与 Moran 散点图结合生成 LISA 聚类地图, 如图 4 所示, 高高集聚区域为自身和周围区域碳储量均较高的, 主要分布在连云港云台山和新沂河泛洪区, 高值集聚效应明显; 低低集聚区域为自身和周围区域碳储量均较低的, 主要分布在三市的城镇, 低值集聚中心分布零散并逐渐扩大; 高低集聚区域为自身碳储量较高但周围区域较低的; 低高集聚区域为自身碳储量较低但周围区域较高的。

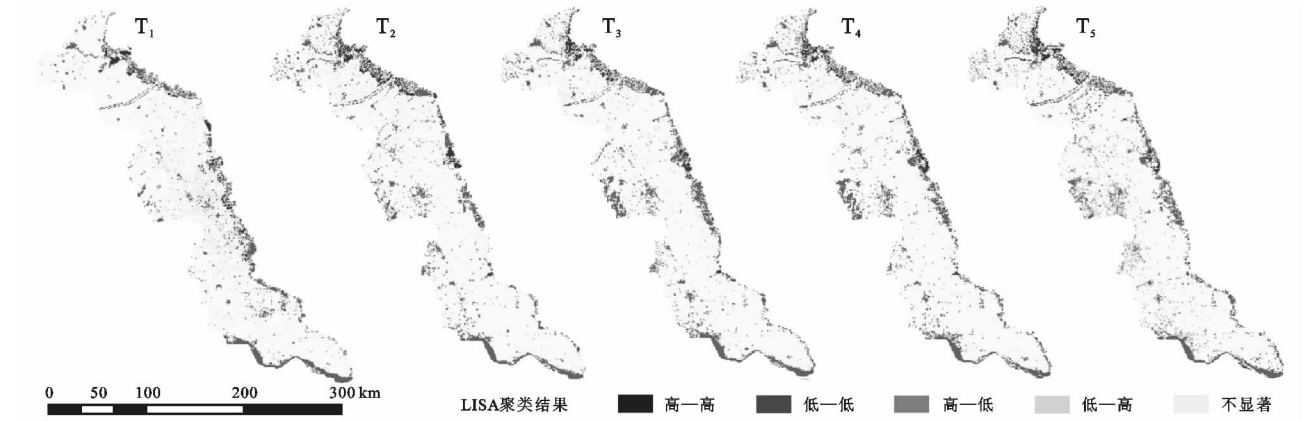


图 4 江苏海岸带碳储量 LISA 聚类

4.3 碳储量时空变异分析

为揭示研究区碳储量的时空变异情况, 试验选取多组步长(1.0×10^{-3} , 1.5×10^{-3} , 4.0×10^{-3} , $5.0 \times 10^{-3} \text{ t/m}^2$)将碳储量评估结果划分等级进行统计, 最

近代以来, 江苏沿海围垦活动较为频繁, 土地利用方式转变多样, 滨海地区碳储量在高高集聚和低低集聚间转换剧烈; 20 世纪 90 年代, 江苏省先后提出了“海上苏东”战略和“沿海开发”战略, 政策驱动下的快速城镇化过程使得连云港、盐城境内建设用地面积扩张, 占用耕地、草地等其他地类, 碳储量低低集聚现象明显增加; 整体看来高低集聚和低高集聚现象不明显(图 4)。

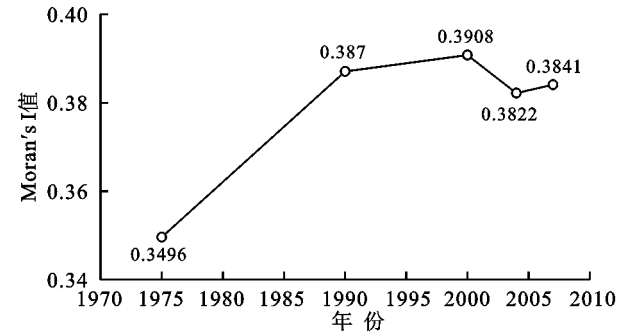


图 3 江苏海岸带 1975—2007 年碳储量 Moran's *I* 值

后确定在步长为 $4.0 \times 10^{-3} \text{ t/m}^2$, 碳储量划分为 3 级时最能客观反映碳储量的各时期变化, 分别计算了 1975—2007 年江苏海岸带各级碳储量的土地面积占比和碳储量总量占比(表 2)。

表 2 1975—2007 年江苏海岸带碳储量分级统计结果

碳储量/ ($10^{-4} \text{ t} \cdot \text{m}^{-2}$)	各时期面积所占百分比/%					各时期碳储量总量所占百分比/%				
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
$C < 40$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$40 \leq C < 80$	10.34	11.91	13.27	13.50	13.98	9.00	10.35	11.60	11.78	12.13
$80 \leq C < 120$	87.63	86.17	85.33	85.16	84.80	88.32	87.14	86.59	86.51	86.32
$C \geq 120$	2.03	1.92	1.40	1.34	1.22	2.68	2.51	1.81	1.71	1.55

由表 2 可知, 江苏海岸带高碳储量的土地比重在逐渐减少, 碳储量高于 $1.2 \times 10^{-2} \text{ t/m}^2$ 的土地面积比例从 1975—1979 年的 2.03% 下降到 2006—2007 年的 1.22%, 相应的碳储量总量比例由 2.68% 下降到 1.55%; 碳储量为 $8.0 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{ t/m}^2$ 的土地面积比例从 1975—1979 年的 87.63% 下降到 2006—2007 年的 84.80%, 相应的碳储量总量比例由 88.32% 下降到

86.32%; 碳储量低于 $8.0 \times 10^{-3} \text{ t/m}^2$ 的土地面积及碳储量总量比例则在增长, 土地面积比例从 1975—1979 年的 10.34% 增长到 2006—2007 年的 13.98%, 相应的碳储量总量比例由 9.00% 增长到 12.13%。

如表 3 所示, 在研究期内有 348.20 km^2 面积的高碳储量($C \geq 1.2 \times 10^{-2} \text{ t/m}^2$)土地向较低等级碳储量转化, 2172.00 km^2 面积的一般碳储量($8.0 \times 10^{-3} \text{ t/m}^2$

$\leq C < 1.2 \times 10^{-3} \text{ t/m}^2$) 土地向低碳储量转化,而仅有 66.08 km² 面积的土地面积向高碳储量级别转化。以上结果均表明土地利用方式的变化使得江苏海岸带碳储量倾向于向低级别转化,固碳能力削弱。

表 3 1975—2007 年份江苏海岸带各级碳储量

面积转化统计结果		km ²		
时期	碳储量/ (10 ⁻⁴ t·m ⁻²)	T ₁ (1975—1979 年)		
		40≤C<80	80≤C<120	C≥120
T ₅ (2006—2007 年)	40≤C<80	1492.72	2172.00	79.57
	80≤C<120	1612.80	24409.70	268.63
	C≥120	22.00	44.08	267.05

对上述结果作如下分析:(1) 1975—1991 年江苏省海岸带总面积增加 893.15 km²,总碳储量增加了 962.9 万 t,但单位土地面积碳储量减少了 175.193 t/km²。主要原因在于:连云港北部和中部原有耕地转化为农村居民点和城镇,碳储量低值区增长明显;云台山境内部分林地转化成农田,碳储量降低;盐城滨海盐沼受围垦影响部分转化成农田,碳储量降低;南通西南睡开沙岛附近大面积苇地转化成农田,碳储量降低;盐城主城区、东台市区城市化进程明显,大量农田转化为建设用地,碳储量降低。(2) 1991—2001 年盐城滨海地带大面积围垦继续发生,高碳储量的滩涂苇地向盐田、水库坑塘转化,用于发展盐业、养殖业^[2];连云港滨海的滩涂苇地则转化成农田,碳储量进一步降低。(3) 2001—2004 年碳储量的空间分布变化很少,可忽略不计。(4) 2004—2007 年,盐城和南通城镇面积新增明显,部分农田、林地转化成建设用地,碳储量降低^[28]。总体看来,江苏省沿海 3 市在研究期受产业发展、滩涂开发影响,土地利用变化明显,农田、水库坑塘和农村居民点等人工景观的面积不断增加,而自然景观如林地、苇地减少,从而造成碳储量降低。

5 结 论

(1) 江苏海岸带 1975—2007 年总碳储量增加了 962.9 万 t,但是单位土地面积的碳储量呈降低趋势。

(2) 江苏海岸带碳储量在空间分布上呈现一定的空间相关性,连云港云台山境内、新沂河泛洪区和盐城滨海苇地是碳储量的高集聚区。

(3) 研究期内受滩涂围垦等人类活动影响,江苏海岸带自然湿地(如苇地、盐沼)减少,部分转化成耕地、水库坑塘,滨海地带碳储量减少;城市化进程下,研究区 3 市城镇面积扩张,部分林地、农田转化成建设用地也造成一定程度的碳储量降低。

后续研究将搜集研究区更完整的土壤、植被碳密度数据,进一步提高碳储量估算的准确性。

参考文献:

[1] 高扬,何念鹏,汪亚峰. 生态系统固碳特征及其研究进展[J]. 自然资源学报,2013,28(7):1264-1274.

[2] 王玉,贾晓波,张文广,等. 江苏海岸带土地利用变化及驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(S1):7-12.

[3] 戴亚南,彭检贵. 江苏海岸带生态环境脆弱性及其评价体系构建[J]. 海洋学研究,2009,27(1):78-82.

[4] 王绍强,周成虎,李克让,等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报,2000,55(5):533-544.

[5] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报,2004,41(1):35-43.

[6] 杨园园. 三江源区生态系统碳储量估算及固碳潜力研究[D]. 北京:首都师范大学,2012.

[7] Myeong S, Nowak D J, Duggin M J. A temporal analysis of urban forest carbon storage using remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 101(2): 277-282.

[8] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学:D 辑,2007,37(6):804-812.

[9] 张宏锋,欧阳志云,郑华,等. 玛纳斯河流域农田生态系统服务功能价值评估[J]. 中国生态农业学报,2009,17(6):1259-1264.

[10] 蔡广鹏,韩会庆,张凤太,等. 喀斯特地区贵州省绥阳县土地利用/覆被变化对陆地植被碳储量的影响[J]. 水土保持研究,2012,9(4):122-125.

[11] 毕珍,石辉,许五弟,等. 四川盆地森林土壤的有机碳储量及其空间分布特征[J]. 水土保持研究,2009,16(5): 83-87.

[12] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, et al. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012,109(19):7565-7570.

[13] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. Frontiers in Ecology and the Environment,2009,7(1):4-11.

[14] 彭怡. Invest 模型在生态系统服务功能评估中的应用研究:以四川汶川地震灾区为例[D]. 北京:中国科学院研究生院,2010.

[15] 白杨,郑华,庄长伟,等. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控[J]. 生态学报,2013,33(3):711-717.

[16] 杨芝歌,周彬,余新晓,等. 北京山区生物多样性分析与碳储量评估[J]. 水土保持通报,2012,32(3):42-46.

[17] 黄绍霖,徐涵秋,曾宏达,等. 福建汀江河田盆地的马尾松林碳储量时空动态变化[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2013,38(5):1081-1089.

[18] 王淑君,管东生,黎夏,等. 广州森林碳储量时空演变及异质性分析[J]. 环境科学学报,2008,28(4):778-785.

- [5] Zhang J H, Nie X J, Su Z A. Soil profile properties in relation to soil redistribution by intense tillage on a steep hillslope [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008,72(6):1767-1773.
- [6] Li F C, Zhang J H, Su Z A, et al. Simulation and ^{137}Cs tracer show tillage erosion translocating soil organic carbon, phosphorus, and potassium [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013,176(5):647-654.
- [7] 朱波,况福虹,高美荣,等. 土层厚度对紫色土坡地生产力的影响[J]. *山地学报*, 2009,27(6):735-739.
- [8] 尚河英,尹忠东,张鹏. 川中不同类型小流域土壤侵蚀特征分析[J]. *水土保持研究*, 2015,22(5):5-8.
- [9] 李富程,花小叶,赵丽,等. 紫色土坡地犁耕方向对耕作侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2015,29(6):35-40.
- [10] Wildemeersch J C J, Vermanga J, Cornelisa W M, et al. Tillage erosion and controlling factors in traditional farming systems in Pinar del Rio, Cuba [J]. *Catena*, 2014,121(10):344-353.
- [11] Zhang J H, Frielinghaus M, Tian G, et al. Ridge and contour tillage effects on soil erosion from steep hillslopes in the Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004,59(6):277-283.
- [12] Dercon G, Govers G, Poesen J, et al. Animal-powered tillage erosion assessment in the southern Andes region of Ecuador[J]. *Geomorphology*, 2007,87(1/2):4-15.
- [13] Li Y, Tian G, Lindstrom M J, et al. Variation of surface soil quality parameters by intense-donkey-drawn tillage on steep slope [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004,68(3):907-913.
- [14] Lobb D A, Kachanoski R G, Miller M H. Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using ^{137}Cs as a tracer [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995,75(2):211-218.
- [15] Su Z A, Zhang J H, Qin F C, et al. Landform change due to soil redistribution by intense tillage based on high-resolution DEMs [J]. *Geomorphology*, 2012,175(6):190-198.
- [16] Zhang J H, Li F C. Soil redistribution and organic carbon accumulation under long-term (29 years) upslope tillage systems[J]. *Soil Use and Management*, 2013,29(3):365-373.
- [17] 刘刚才,李兰,周忠浩,等. 紫色土容许侵蚀量的定位试验确定[J]. *水土保持通报*, 2008,28(6):90-94.
- [18] Dercon D, Gover G, Posen J, et al. Animal-powered tillage erosion assessment in the southern Andes region of Ecuador [J]. *Geomorphology*, 2007,87(1/2):4-15.
- [19] Turkelboom F, Poesen J, Ohler I, et al. Reassessment of tillage erosion rates by manual tillage on steep slopes in northern Thailand [J]. *Soil & Tillage Research*, 1999,51(3/4):245-259.
- [20] Zhang J H, Su Z A, Nie X J. An investigation of soil translocation and erosion by conservation hoeing tillage on steep lands using a magnetic tracer[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009,105(2):177-183.

~~~~~

(上接第 105 页)

- [19] 柳梅英,包安明,陈曦,等. 近 30 a 玛纳斯河流域土地利用/覆被变化对植被碳储量的影响[J]. *自然资源学报*, 2010,25(6):926-938.
- [20] 唐得昊,邹欣庆,刘兴健. 海岸带生态系统健康评价中能质和生物多样性的差异:以江苏海岸带为例[J]. *生态学报*, 2013,33(4):1240-1250.
- [21] 陶丽华,朱晓东,桂峰. 苏北辐射沙洲海岸带农业景观生态分析与优化设计[J]. *环境科学*, 2001,22(3):118-122.
- [22] 李加林,张忍顺,王艳红,等. 江苏淤泥质海岸湿地景观格局与景观生态建设[J]. *地理与地理信息科学*, 2003,19(5):86-90.
- [23] 揣小伟,黄贤金,郑泽庆,等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J]. *资源科学*, 2011,33(10):1932-1939.
- [24] 方精云,徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 1996,16(5):497-508.
- [25] 黄玫,季劲钧,曹明奎,等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟[J]. *生态学报*, 2013,26(12):4156-4163.
- [26] Tallis H, Ricketts T, Guerry A, et al. InVEST 2.0 beta User's Guide: Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs [Z]. Stanford, USA: Natural Capital Project, 2011.
- [27] Haining R, Wise S, Ma J. Exploratory spatial data analysis[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 1998,47(3):457-469.
- [28] 张晓祥,唐彦君,严长清,等. 近 30 a 来江苏海岸带土地利用/覆被变化研究[J]. *海洋科学*, 2014,38(9):90-95.