

# 基于 GIS 和 InVEST 模型的日照市固碳能力研究

丛文翠<sup>1</sup>, 孙小银<sup>1,2</sup>

(1. 曲阜师范大学 地理与旅游学院, 山东 日照 276800;

2. 南四湖湿地生态与环境保护省高校重点实验室, 山东 日照 276800)

**摘要:** [目的] 分析山东省日照市碳储量的时空变化, 探讨日照市各土地利用类型的固碳能力, 为生态系统服务评估提供决策支持。[方法] 以日照市 1995, 2000, 2005, 2010 和 2015 年 5 期土地利用信息和碳密度数据为基础, 利用 GIS 和 InVEST-Carbon Storage and Sequestration 模块, 获取碳储量时空分布数据, 从而对日照市固碳能力进行准确的定量评估。[结果] ① 1995—2015 年, 研究区内耕地、草地的面积均有所下降, 而林地、水域、建设用地以及未利用地面积增加。② 日照市总固碳量呈现增长趋势, 1995—2015 年依次为  $6.976 \times 10^6$ ,  $6.978 \times 10^6$ ,  $6.957 \times 10^6$ ,  $6.987 \times 10^6$ ,  $7.015 \times 10^6$  t。③ 耕地的碳储量最高, 固碳能力最强。[结论] 1995—2015 年研究区内固碳总量净增  $3.90 \times 10^4$  t, 固碳速率呈现小幅上升趋势, 固碳能力逐步稳定。日照市东部沿海地区固碳能力相对较弱, 应充分开发其固碳潜力。

**关键词:** 固碳能力; InVEST 模型; 土地利用; 山东省日照市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)05-0200-06

中图分类号: F301.2

**文献参数:** 丛文翠, 孙小银. 基于 GIS 和 InVEST 模型的日照市固碳能力研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 200-205. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.032. Cong Wencui, Sun Xiaoyin. A study on carbon sequestration capacity based on GIS and InVEST model in Rizhao City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 200-205.

## A Study on Carbon Sequestration Capacity Based on GIS and InVEST Model in Rizhao City

CONG Wencui<sup>1</sup>, SUN Xiaoyin<sup>1,2</sup>

(1. College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao, Shandong 276800, China;

2. Key Laboratory of Nansi Lake Wetland Ecological and Environmental Protection, Rizhao, Shandong 276800, China)

**Abstract:** [Objective] The spatio-temporal dynamics of carbon sequestration were monitored and the capacity of carbon sequestration in different land use types were discussed in order to provide supports for management of ecosystem services. [Methods] Based on the land use data from 1995 to 2015 and carbon density data, the spatio-temporal changes of carbon sequestration were evaluated by InVEST-Carbon sequestration model in Rizhao City of Shandong Province. [Results] ① The areas of cultivated land and grassland were decreased, while the area of forest land, water area, construction land and unused land area were increased from 1995 to 2015. ② The total carbon storage in Rizhao City showed an increasing trend, which were  $6.976 \times 10^6$ ,  $6.978 \times 10^6$ ,  $6.957 \times 10^6$ ,  $6.987 \times 10^6$ ,  $7.015 \times 10^6$  t in the year of 1995, 2000, 2005, 2010 and 2015, respectively. ③ The highest carbon storage was farmland among all land use types. [Conclusion] The total amount of carbon storage increased by  $3.90 \times 10^4$  t from 1995 to 2015, and the carbon sequestration rate showed a rising trend. The carbon sequestration capacity in the eastern coastal areas was relatively weak, which should be fully developed.

**Keywords:** carbon sequestration capacity; InVEST model; land use; Rizhao City of Shandong Province

收稿日期: 2018-01-25

修回日期: 2018-05-14

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“农业流域降雨径流过程典型除草剂及其转化产物迁移特征与机理研究: 以白马河流域为例”(41471389); 教育部人文社科项目(14YJCZH138)

第一作者: 丛文翠(1995—), 女(汉族), 山东省威海市人, 硕士研究生, 研究方向为生态服务评估与规划。E-mail: 972824231@qq.com。

通讯作者: 孙小银(1978—), 男(汉), 重庆市开县人, 硕士生导师, 副教授, 主要从事流域污染生态过程与生态修复、流域生态服务功能评估与区划研究。E-mail: xiangyin-sky@163.com。

以 CO<sub>2</sub> 为代表的温室气体排放所导致的温室效应以及气候变暖已经引起了全球范围内的广泛关注。据李国栋等<sup>[1]</sup>、吴海斌等<sup>[2]</sup> 研究显示,陆地生态系统与大气交换的 CO<sub>2</sub> 对人类生存环境的质量有十分重要的影响。在这一交换过程中,生态系统的固碳功能将大气中的 CO<sub>2</sub> 固定在植被以及土壤之中,从很大程度上降低了 CO<sub>2</sub> 的浓度,提高了陆地生态系统的碳储量。目前,国内学者对碳储量的研究多以单个碳库为研究对象<sup>[3-7]</sup>,根据生物量法、蓄积量法计算碳密度,以栅格为单元的多个碳库固碳能力的研究相对较少。随着生态系统服务功能评估研究的不断发展,将 GIS 与 InVEST 模型相结合的方法为研究区域固碳能力提供了新思路,成为生态服务研究的热点。与生态系统规划相结合的固碳研究可作为解决全球气候变化问题的桥梁。国外学者如 Moon 等<sup>[8]</sup>, Ahmad 等<sup>[9]</sup> 通过 GIS 对选定区域进行碳循环监测,达到优化生态系统服务功能的目的;Gupta 等<sup>[10]</sup>, Polasky 等<sup>[11]</sup> 通过 InVEST 模型研究区域内土地利用变化以及模拟未来情景下的生态系统固碳能力。在中国,基于 GIS 和 InVEST 模型的固碳功能研究在滨海湿地<sup>[12]</sup>、海岸带<sup>[13-16]</sup>、太湖<sup>[17]</sup>、巢湖<sup>[18]</sup>、白龙江流域<sup>[19]</sup>、三江源等地区得到了成功应用。

自 20 世纪以来,日照市土地利用方式以及植被覆盖度发生显著变化,陆地生态系统的固碳功能受到很大程度的影响。日照市作为山东半岛蓝色经济区的重要组成部分,具有优越的地理位置以及丰富的自然资源,但对这一区域碳储量变化的相关研究相对较少。本研究拟利用 GIS 和 InVEST 模型综合研究日照市 4 大碳库(地上生物量、地下生物量、死亡有机质生物量、土壤生物量)的碳储量,旨在实现对区域碳储量时空变化的动态监测和空间分析,提高对日照市生态系统服务功能的认知,从而制定更加合理的土地利用规划方案,最终实现区域的可持续发展。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区域概况

日照市位于山东省东南部,地理位置为东经 118°,北纬 35°04′—36°04′。东临黄海,海岸线全长 168.5 km,西接临沂市,南与江苏省连云港市毗邻,北与青岛市、潍坊市接壤。南北长约 82 km,东西宽约 90 km,总面积 5 358.57 km<sup>2</sup>,辖东港区、岚山区、莒县、五莲县 2 区 2 县。日照市属鲁东丘陵,中部高四周低,全市河流分属沭河水系、潍河水系和东南沿海水系,无天然湖泊,共有水库 595 座,总库容 1.30 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>。植被以针、阔叶林、灌丛林为主,全市森林

覆盖率达 35.2%,建成区绿化率达 42.45%。地处暖温带湿润季风区,大陆性气候,年平均降水量 768.7 mm,年平均气温 12.7 °C。

### 1.2 InVEST 模型

InVEST (integrated valuation of environment service and tradeoffs) 是斯坦福大学自然资本项目组研发,具有很强的实用性的生态系统评估模型软件,用于帮助管理者和研究者做出关于自然资源管理的决定<sup>[20]</sup>。包括生境质量、环境风险评估、海洋水质以及碳储量和固碳等模块。本研究应用 InVEST 中的 carbon storage and sequestration 模块进行固碳能力的研究。陆地生态系统中的碳储量主要取决于 4 个碳库:地上生物量碳库,地下生物量碳库,土壤碳库和死亡有机碳库。此外,模型还涉及第 5 类碳库,即 HWP (harvested wood products),因数据来源不足,获取困难,所以不考虑第 5 类碳库对固碳能力的影响。本研究从遥感影像数据中提取土地利用信息,结合碳密度数据输入 InVEST 模型,得到不同时期碳储量数据结果,从而对日照市碳储量分布情况进行分析,计算方法如下:

$$C = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (1)$$

式中: C——总碳储量(kg/m<sup>2</sup>); C<sub>above</sub>——地上部分碳储量(kg/m<sup>2</sup>); C<sub>below</sub>——地下部分碳储量(kg/m<sup>2</sup>); C<sub>soil</sub>——土壤碳储量(kg/m<sup>2</sup>); C<sub>dead</sub>——死亡有机质碳储量(kg/m<sup>2</sup>)。

### 1.3 数据来源

本研究所需要数据主要有基础地理数据中的行政边界数据,当前土地利用覆盖图、碳密度表等等。

1.3.1 土地利用图 土地利用数据来源于中科院资源环境数据中心(<http://www.resdc.edu/>)比例尺 1:10 万。经过掩膜提取得到日照市 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 这 5 期的土地利用图,将研究区域土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地 6 类,按照运行 InVEST 模型所需要的数据,将重分类后的土地利用/覆盖图分别转为栅格格式。

1.3.2 碳密度表 地上部分碳密度和土壤碳密度主要根据张德全等<sup>[21]</sup>、方精云等<sup>[22]</sup>和代杰瑞等<sup>[23]</sup>对山东省不同地类的碳储量的研究结果结合研究区土地利用类型统计得出;地下部分碳密度根据周玉荣、方精云等的研究,选取山东省地上部分生物量数据,采用生物量转换因子法,综合计算出日照市各土地利用类型的地下部分碳密度,计算公式如下:

$$C_{\text{below}} = a \times b \times DW_i \quad (2)$$

式中: C<sub>below</sub>——地下部分碳密度(kg/m<sup>2</sup>); a——转

换系数;  $b$ ——地下地上生物量比值;  $DW_i$ ——地上生物量。其中地下生物量根据地上生物量和地上地下生物量比值计算得出,根据代杰瑞等<sup>[23]</sup>、黄玫等<sup>[24]</sup>的研究,耕地、水域、建设用地以及未利用地的地上生物量比值取 0.1;林地主要类型为针阔叶混交林,根据朴世龙等<sup>[25]</sup>、方精云等<sup>[26]</sup>的研究,林地地下地上生物量的比值取 0.4,草地地下地上生物量的比值取 4.1。

死亡有机碳密度数据获取相对困难,在本研究中不予考虑;综合选取日照市各土地利用类型的碳密度,得出日照市各土地利用类型碳密度(见表 1)。

表 1 日照市不同土地利用类型碳密度统计  $\text{kg}/\text{m}^2$

土地利用类型	地上部分碳	地下部分碳	土壤碳
耕地	5.35	2.05	8.68
林地	2.45	3.29	6.48
草地	0.65	2.75	4.34
水域	1.60	4.69	6.73
建设用地	1.03	3.37	5.32
未利用地	0.77	1.40	2.31

## 2 结果与分析

### 2.1 1995—2015 年土地利用变化

1995—2015 年日照市土地利用类型以耕地和林

地为主。西北、东南区域集中分布耕地;日照市中部地区东北—西南走向的条带状区域为地势较高的丘陵地区,林地和草地广布。建设用地主要分布于东部沿海地区,与中心城市的分布高度一致;日照市水体零星分布,主要包括沭河、傅疃河两大河流。

表 2 为日照市各土地利用类型面积变化,结果表明 1995—2015 年,耕地、草地面积有所下降,而林地、水域、建设用地以及未利用地面积增加。耕地为日照市主要土地利用类型,所占比例从 69.3% 减少到 67.6%。耕地的减少主要是转化为城市建设用地、林地以及草地。研究时段内,受城市建设用地扩张的影响,有 197.85  $\text{km}^2$  的耕地被占用;林地、草地面积仅次于耕地,共占区域总面积的比例约为 19%。林地面积的增加与退耕还林政策有关,在 1995 年至 2015 年间,有 147.18  $\text{km}^2$  的耕地转化为林地;在 1995—2015 年,由于人口开始增长,约有 130.54  $\text{km}^2$  的草地转化为耕地发展农业,所占比例从 7.2% 减少到 6.7%;水域面积在 1995—2015 年逐渐扩大,主要接受来自耕地的转化;未利用土地面积略增,转换不明显,有利于平衡农用耕地以及其他土地利用类型之间的矛盾;水域、未利用土地两者面积仅占 0.03%;自 2000 年起,由于城镇化进程加快,日照市建设用地面积明显增加,所占比例从 9% 增加到 9.5%。

表 2 日照市 1995—2015 年土地利用转移矩阵

土地利用类型	2015 年面积						总计
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地	
1995 年 面积							
耕地	3161.27	147.18	125.11	56.36	197.85	3.44	3691.21
林地	153.78	422.11	48.83	0.25	3.94	—	628.91
草地	130.54	34.48	141.51	1.28	6.93	—	314.74
水域	69.60	3.83	3.45	55.03	6.54	—	138.46
建设用地	192.75	7.72	9.25	6.83	133.50	0.61	450.65
未利用地	3.00	1.67	1.03	—	1.03	3.87	10.61
总计	3 810.94	616.99	329.18	119.75	349.79	7.92	5234.58

### 2.2 不同时期碳储量空间分布特征

基于日照市 1995—2015 年土地利用数据、碳密度表运行 InVEST-Carbon Storage and Sequestration 模型,将模型结果加载到 ArcMAP 中进行分析得到日照市碳储量空间分布图及储碳总量(如图 1 所示)。

由图 1 可以看出,1995,2000,2005,2010,2015 年日照市碳储量的空间分布变化不大。碳储量高值区出现在日照市西北、东南地区,该地区大面积分布耕地,土壤以棕壤、潮土为主,土壤肥沃,有机质丰富,地下部分碳密度、土壤碳密度高,故储碳量高,单位土

地面积碳储量达 1 574  $\text{t}/\text{km}^2$ ;中部、西南部地区碳储量呈现次高值,该地区分布有林地、草地,二者单位土地面积碳储量分别达 1 222 和 765  $\text{t}/\text{km}^2$ ,高于或接近碳密度中等水平 950  $\text{t}/\text{km}^2$ ,这是因为日照市五莲、莒县区域分布有一定面积的森林。

此外,两地有沭河湿地、傅疃河湿地,生物量丰富,地上、地下部分含碳量高,固碳能力强。碳储量的低值区出现在东部沿海城市建设用地、五莲县周围裸地区域,单位土地面积碳储量平均为 463  $\text{t}/\text{km}^2$ 。

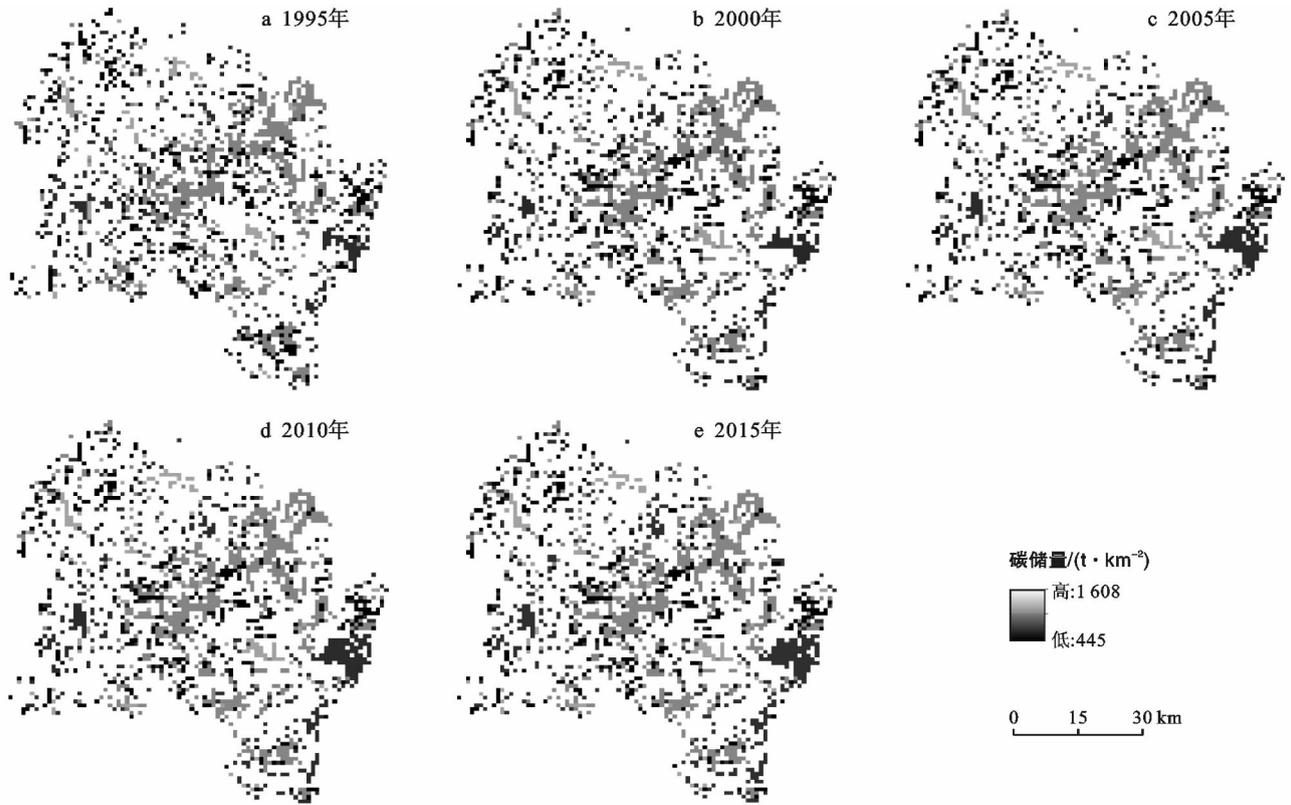


图 1 日照市 1995、2000、2005、2010、2015 年碳储量空间分布

### 2.3 不同时期碳储量数量分析

2.3.1 日照市总固碳量 根据计算可得,1995,2000,2005,2010,2015 年总碳储量分别为  $6.976 \times 10^6$ ,  $6.978 \times 10^6$ ,  $6.957 \times 10^6$ ,  $6.987 \times 10^6$ ,  $7.015 \times 10^6$  t。日照市从 1995—2000 年累计固碳 2 000 t,显示这 5 a 内日照市固碳潜力呈上升趋势;2000—2005 年减少固碳量  $2.10 \times 10^4$  t,表明这 5 a 内固碳潜力明

显下降;2005—2010 年增加固碳量约为  $3 \times 10^4$  t,2010—2015 年固碳量增加  $2.80 \times 10^4$  t。20 a 间固碳量净增加  $3.9 \times 10^4$  t,固碳速率下降缓慢甚至开始增加,固碳能力趋于稳定。

2.3.2 不同土地利用类型碳储量的时间变化 运行 InVEST 模型得到日照市 1995—2015 年碳储量,按照土地利用类型进行分区统计如表 3 所示。

表 3 日照市 1995—2015 年不同土地利用类型碳储量

$10^4$  t

土地利用类型	碳储量					固碳量			
	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	1995—2000 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年
耕地	530.3	529.1	522.3	520.3	518.2	-1.2	-6.8	-2.0	-2.1
林地	79.7	80.2	80.3	80.3	82.2	0.5	0.1	0.9	1.0
草地	29.0	27.3	27.4	27.4	27.3	-1.7	0.1	-0.1	0
水域	16.0	23.3	18.2	18.2	19.4	7.3	-5.1	1.0	0.2
建设用地	42.1	43.4	47.1	47.1	48.9	1.3	3.7	1.5	0.3
未利用土地	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.1	0	0	0

如表 3 所示,1995—2015 年日照市耕地碳储量呈持续下降态势,累计减少固碳量达到  $1.21 \times 10^5$  t。其中,2000—2005 年固碳量下降速率明显高于其他 3 个时间段。5 a 内,耕地面积减少了  $146.87 \text{ km}^2$ ,固碳量下降了  $6.80 \times 10^4$  t,可见,耕地固碳量的下降与

其面积的减少表现一致,与退耕还林还草政策的实施有关;林地储碳量在 1995—2015 年间略有上升,累计固碳量呈不断上升的趋势。研究时段内林地碳储量变化情况与其面积逐渐增加后保持不变的变化情况基本一致;草地的碳储量在 1995—2015 年间呈小幅

度下降后逐渐稳定的趋势,与草地面积轻微下降呈现大致相同的趋势,减少的草地面积主要用作补充耕地以及林地;日照市水域碳储量呈现先增加后减少再增加的态势,研究期末段相比初期碳储量整体呈现增加趋势,但是增加的幅度有所下降;建设用地的碳储量呈现不断上升的趋势,但是上升速率在 1995—2000 年间较缓,与日照市城市建设刚刚起步有很大关系。由于城市化进程加快,建设用地面积在 2000—2005 年间上升迅速,随后趋于稳定,与碳储量变化基本一致;未利用土地碳储量在 20 a 间呈现稳定中略上升的趋势,累计固碳量 1 000 t,与未利用土地面积小幅度增加的趋势基本一致。未利用地是一地区的后备资源,能够有效解决建设用地以及耕地的利用矛盾。

### 3 结论与讨论

(1) 1995—2015 年日照市土地利用空间格局未发生明显变化,而土地利用类型的面积发生了较为明显的变化。日照市西北、东南大面积分布耕地,中部主要为林地、草地以及水域,东部分布建设用地、未利用土地。土地利用类型所占比例:耕地>林地>建设用地>草地>水域>未利用土地,总变化趋势表现为耕地、草地面积的减少以及林地、水域、建设用地、未利用土地面积的增加。受退耕还林政策的影响,耕地、林地及草地 3 种土地利用类型之间相互制约;由于 2000 年以来日照市城镇化的迅速发展,水域以及建设用地面积明显增加。

(2) 1995—2015 年间,日照市累计固碳  $3.90 \times 10^4$  t,总碳储量分别为  $697.6 \times 10^6$ ,  $6.978 \times 10^6$ ,  $6.957 \times 10^6$ ,  $6.987 \times 10^6$ ,  $7.015 \times 10^6$  t,碳储量呈现增加趋势。研究区固碳能力有了一定的提升,2005—2015 年固碳潜力迅速上升。不同土地利用类型的碳储量和固碳能力呈现较大差异。耕地、草地碳储量逐年减少;林地碳储量不断上升,后一阶段上升速率明显高于前一阶段;水域碳储量呈现先增加后减少再增加的态势,研究时段末期比初期整体呈现增加趋势;建设用地和未利用土地碳储量皆保持稳定上升的趋势。

(3) 各土地利用类型的固碳总量从大到小依次为:耕地>林地>建设用地>草地>水域>未利用土地,与各土地利用类型的碳密度以及分布面积呈现较大的一致性。面积较大且碳密度较高的耕地、林地、建设用地固碳能力较强;而面积较小且碳密度较低的水域以及未利用土地固碳能力相对较弱,但仍有较大固碳潜力,应对其进行充分开发。

陆地生态系统的固碳能力与土地利用变化格局

有很强的联系性,因此,定量评价土地利用变化对碳储量的影响,对研究全球气候变化和陆地碳循环具有重要意义。从研究结果来看,日照市耕地、林地等土地利用类型有较强的固碳能力,未来可以通过 InVEST 模型对日照市土地利用的不同情境进行模拟,从而为决策者提供更加科学合理的土地规划方案,实现生态文明的可持续发展。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李国栋,张俊华,陈聪,等. 气候变化背景下中国陆地生态系统碳储量及碳通量研究进展[J]. 生态环境学报, 2013,22(5):873-878.
- [2] 吴海斌,郭正堂,彭长辉. 末次间冰期以来陆地生态系统的碳储量与气候变化[J]. 第四纪研究, 2001,21(4):366-376.
- [3] 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[J]. 植物生态学报, 2000,24(5):518-522.
- [4] 方精云,刘国华,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.
- [5] 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.
- [6] 方精云,陈安平,赵淑清,等. 中国森林生物量的估算:对 Fang 等 Science 一文的若干说明[J]. 植物生态学报, 2002,26(2):243-249.
- [7] 张保华,张金萍,刘子亭,等. 山东省土壤有机碳密度和储量估算[J]. 土壤通报, 2008,39(5):1030-1033.
- [8] Moon B E, Choi E G, Chi H K, et al. An analysis of local quantity of carbon absorption, fixing and discharge by using GIS[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013,46(4):171-175.
- [9] Ahmad M H, Ariffin A, Malik T A. Visualizing the application of GIS in transformation towards a sustainable development and a low carbon society[J]. Institute of Physics, 2014,33(4):30-41.
- [10] Gupta S, Nainwal A, Anand S, et al. Valuation of carbon sequestration in Bidhanala microwatershed, Uttarakhand, India using InVEST model[J]. International Journal of Ecosystem and Ecology Science, 2017,5(1):10-15.
- [11] Polasky S, Nelson E, Pennington D, et al. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the State of Minnesota[J]. Environmental & Resource Economics, 2011,48(2):219-242.
- [12] 唐博,龙江平,章伟艳,等. 中国区域滨海湿地固碳能力研究现状与提升[J]. 海洋通报, 2014,33(5):481-490.
- [13] 陈小花,杨青青,余雪标,等. 热带海岸典型森林类型土壤有机碳储量和碳氮垂直分布特征[J]. 热带作物学报, 2017,38(1):38-44.
- [14] 赵荣钦,黄贤金,钟大洋,等. 南京市不同土地利用方式

- 的碳储量与碳通量[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 164-170.
- [15] 张云倩, 张晓祥, 陈振杰, 等. 基于 InVEST 模型的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 100-105, 111.
- [16] 周自翔, 李晶, 冯雪铭. 基于 GIS 的关中一天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2907-2918.
- [17] 荣月静, 张慧, 赵显富. 基于 InVEST 模型近 10 年太湖流域土地利用变化下碳储量功能[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 447-451.
- [18] 陈翼翔. 基于 GIS 的巢湖流域碳储量时空变化研究[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(5): 176-178, 204.
- [19] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 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[J]. 资源科学, 2016, 38(8): 1585-1593.
- [20] 吴哲, 陈歆, 刘贝贝, 等. InVEST 模型及其应用的研究进展[J]. 热带农业科学, 2013, 33(4): 58-62.
- [21] 张德全, 马玉珍, 王风臻, 等. 山东省森林碳储量计量方法的研究[J]. 山东林业科技, 2016, 46(4): 80-82, 76.
- [22] 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 566-576.
- [23] 代杰瑞, 喻超, 张杰, 等. 山东半岛蓝色经济区土壤有机碳储量及固碳潜力分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(5): 1659-1668.
- [24] 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, 2006, 26(12): 4156-4163.
- [25] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.
- [26] 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(地球科学), 2007, 37(6): 804-812.

(上接第 199 页)

- [6] 陈婷, 周汝良, 朱大运, 等. 基于 DEM 的 2 种提取地形特征线算法对比研究[J]. 林业调查规划, 2011, 36(6): 1-4, 28.
- [7] 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 等. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究[J]. 测绘学报, 2004, 33(3): 258-263.
- [8] 蒋好忱, 杨勤科. 基于 DEM 的地形起伏度算法的比较研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 162-166.
- [9] 杨昕, 汤国安, 刘学军, 等. 数字地形分析的理论、方法与应用[J]. 地理学报, 2009, 64(9): 1058-1070.
- [10] 赵博. DEM 在耕地坡度分析统计方面的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(9): 51-52.
- [11] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1305-1325.
- [12] 刘春, 孙伟伟, 吴杭彬. DEM 地形复杂因子的确定及与地形描述精度的关系[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(9): 1014-1020.
- [13] 杨勤科, 郭伟玲, 张宏鸣, 等. 基于 DEM 的流域坡度坡长因子计算方法研究初报[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 203-206, 211.
- [14] 周佳宁, 秦富仓, 刘佳, 等. 敖特根其木格. 基于 GIS 的坡度、坡向提取: 以多伦多县为例[J]. 内蒙古林业科技, 2016, 42(1): 55-58.
- [15] 刘仁杰, 朱红春, 汤国安, 等. 基于 DEM 的黄土坡面流水侵蚀潜能因子初步研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 161-165.
- [16] 王雷, 汤国安, 刘学军, 等. DEM 地形复杂度指数及提取方法研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(4): 55-58.
- [17] 刘新星, 陈毓川, 王登红, 等. 基于 DEM 的南岭东段离子吸附性稀土矿成矿地貌条件分析[J]. 地球学报, 2016, 37(2): 174-184.
- [18] 宋效东. 基于 DEM 的可视性分析综合模型及其并行算法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. GB/T28407-2012 农用地质量分等规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.