

# 基于 InVEST 模型的芜湖市固碳能力及影响因子研究

夏全升<sup>1</sup>, 洪欣<sup>1</sup>, 桂翔<sup>2</sup>, 沈高平<sup>2</sup>,  
邓良<sup>3</sup>, 姚镇海<sup>4</sup>, 彭鹏<sup>5</sup>, 储云志<sup>6</sup>, 徐升<sup>7</sup>, 许伟<sup>8</sup>

(1.安徽大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230031; 2.安徽省地勘局第二水文工程地质勘察院, 安徽 芜湖 241100; 3.安徽省地质测绘技术院空间信息应用技术中心, 安徽 合肥 230000; 4.安徽省公共气象服务中心, 安徽 合肥 230000; 5.安徽省地质科学研究所, 安徽 合肥 230000; 6.安徽省地质测绘技术院测绘航测分院, 安徽 合肥 230000; 7.安徽省环境监测中心站, 安徽 合肥 230000; 8.天立泰科技股份有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要:** [目的] 研究安徽省芜湖市 2011—2021 年碳储量时空分布格局, 同时探究生态环境因子、地形因子、气象因子和土地利用程度对其固碳能力的影响变化, 为芜湖市土地资源管理及绿色农业发展提供参考依据。[方法] 以芜湖市 2011, 2015, 2021 年土地利用数据, 利用 InVEST 模型 Carbon storage 模块定量评估研究碳储量空间分布, 探究土地利用程度、地形、气象、土壤侵蚀等因子影响, 并根据相关性分析叠加计算碳储量热点区域。[结果] ①近年, 芜湖市因土地利用变化碳储量减少了  $4.14 \times 10^5$  t, 呈逐年减少趋势; 固碳能力: 草地 < 耕地 < 林地, 林地为  $5\ 488.97$  t/km<sup>2</sup> 且耕地碳储量高达  $7.39 \times 10^6$  t。②在自然因素中, 用地类型、海拔、坡度及土地利用程度是影响碳储量空间分布主要原因, 随海拔、坡度升高而逐级缓慢增加, 碳储量整体呈“北低南高”分布情况。③在生态环境因素中, 碳储量与土壤保持为显著正相关, 相辅相成互为协同关系; 相反, 与土壤侵蚀互为权衡关系。④南部碳储量呈现“高一高集聚”占 18.77%, 北部为“低—低集聚”仅为 2.73%; 碳储量热点区域因资源开发利用影响呈逐年减少趋势, 优良区域占 11.95%, 集中于南部山林地带, 局部较弱需重点保护管理优化。[结论] 2011—2021 年芜湖市固碳总量逐年减少, 固碳速率呈现逐年减弱趋势, 固碳能力较稳定。芜湖市北部固碳能力相对较弱, 可通过土地管理优化以提升其固碳能力。

**关键词:** InVEST 模型; 碳储量; 土地利用程度; 热点区域; 聚类分析; 安徽省芜湖市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0385-10

中图分类号: X196, S157.4

**文献参数:** 夏全升, 洪欣, 桂翔, 等. 基于 InVEST 模型的芜湖市固碳能力及影响因子研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 385-394. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230526.001; Xia Quansheng, Hong Xin, Gui Xiang, et al. A study on carbon fixation capacity and its influencing factors based on InVEST model at Wuhu City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 385-394.

## A Study on Carbon Fixation Capacity and Its Influencing Factors Based on InVEST Model at Wuhu City

Xia Quansheng<sup>1</sup>, Hong Xin<sup>1</sup>, Gui Xiang<sup>2</sup>, Shen Gaoping<sup>2</sup>,

Deng Liang<sup>3</sup>, Yao Zhenhai<sup>4</sup>, Peng Peng<sup>5</sup>, Chu Yunzhi<sup>6</sup>, Xu Sheng<sup>7</sup>, Xu Wei<sup>8</sup>

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230031, China;

2.The Second Hydroengineering Geological Exploration Institute of Anhui Geological Exploration Bureau, Wuhu,

Anhui 241100, China; 3.Spatial Information Application Technology Center of Anhui Institute of Geological Surveying

and Mapping Technology, Hefei, Anhui 230000, China; 4.Anhui Public Meteorological Service Center, Hefei, Anhui

230031, China; 5.Anhui Institute of Geological Sciences, Hefei, Anhui 230000, China; 6.Surveying and Mapping Aerial Survey

Branch of Anhui Institute of Geological Surveying and Mapping Technology, Hefei, Anhui 230000, China; 7.Anhui Environmental

Monitoring Center Station, Hefei, Anhui 230000, China; 8.Tianlitai Technology Limited Company, Hefei, Anhui 230000, China)

收稿日期: 2022-11-28

修回日期: 2023-04-12

资助项目: 安徽省自然资源科技项目“基于遥感的土地质量调查与评价模型研究”(2020-K-15); 安徽省自然科学基金资助项目“牯牛降森林生态系统生物多样性野外监测大样地(二期)”(K160139340)

第一作者: 夏全升(1997—), 男(汉族), 安徽省南陵县人, 硕士研究生, 资源保护与利用研究方向。Email: 2710247265@qq.com。

通信作者: 洪欣(1989—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 博士, 副教授, 主要从事生态环境保护与应用。Email: honxin@ahu.edu.cn。

**Abstract:** [Objective] The spatial and temporal distribution pattern of carbon storage at Wuhu City, Anhui Province from 2011 to 2021 were analyzed, and the influence of ecological environmental factors, topographic factors, meteorological factors, and land use degree on carbon sequestration capacity were determined in order to provide a reference for land resource management and green agricultural development at Wuhu City. [Methods] The carbon storage module of the InVEST model was used to quantitatively determine the spatial distribution of carbon storage, to explore the effects of land use degree, topography, meteorology, soil erosion, and other factors, and to calculate the hot spots of carbon storage based on correlation analysis superposition using land use data from 2011, 2015, and 2021 at Wuhu City. [Results] ① Carbon storage at Wuhu City has declined by  $4.15 \times 10^5$  t in recent years due to land use changes, with an annually decreasing trend. The carbon sequestration capacity of grassland was lower than that of cultivated land. The carbon storage capacity of cultivated land was  $7.41 \times 10^6$  t, while that of forest land was 5 489.01 t/km<sup>2</sup>. ② Land use type, elevation, slope, and land use degree were the most important natural factors determining the spatial distribution of carbon stocks, which increased gradually step by step with altitude and slope. The overall distribution of carbon stocks was “lower in the north and higher in the south.” ③ Carbon storage and soil conservation were significantly and positively associated, mutually reinforcing, and synergistic among ecological and environmental variables; yet, there was a trade-off with soil erosion. ④ Carbon storage in the south showed a pattern of “high-high accumulation”, accounting for 18.77% of the total carbon accumulation, whereas carbon storage in the north showed a pattern of low-low accumulation, accounting for just 2.73% of the total carbon accumulation. The hotspots of carbon storage declined over time as a result of the effect of resource development and usage, with 11.95% of the area classified as excellent concentrated in the southern mountain forest. Certain areas were found to be vulnerable and will need to be conserved and optimized. [Conclusion] From 2011 to 2021, the total amount of carbon sequestration at Wuhu City decreased year by year, and the carbon sequestration rate showed a trend of weakening over time, while carbon sequestration capacity was relatively stable. Carbon sequestration capacity in the northern part of Wuhu City was relatively weak, and could be increased through land management optimization.

**Keywords:** InVEST model; carbon storage; land use degree; hotspot; cluster analysis; Wuhu City, Anhui Province

在陆地生态环境中碳储量是生态系统服务功能最重要的环节之一<sup>[1]</sup>,生态系统可以通过吸收和释放 CO<sub>2</sub> 气候调节从而固持一部分碳,使得陆地生态系统整体固碳量较多<sup>[2]</sup>;可通过用地类型变化、管理方法的调整、重建以及耕作方式的改变也可以间接增加陆地生态系统的碳储量,对人类居住环境质量具有深刻的影响,同时陆地生态系统储存的碳量虽高于大气,但受自然、人为等因素影响较大<sup>[3]</sup>。

目前,关于碳储量计算方法较多,对于小面积研究区的固碳量计算一般通过外业调查、数据统计分析、仪表测量等技术方法<sup>[4]</sup>,但费时费力且研究结果较少,具有一定的空间尺度差异性,无法准确定量的反映研究区碳储量空间分布及时空变化。虽然通过累积量化法、生物量统计法等估算较方便,但无法精准反映长时间序列和大面积碳储量的时空分布变化<sup>[5]</sup>。国内学者对碳储量研究对象多以单个碳库为主体,而以多个碳库划分为栅格单元,以及自然、人

为等因素与固碳能力的变化影响研究相对较少<sup>[6]</sup>。而 InVEST 模型具有操作简易、数据精确、结果可视化等优点,被广泛应用于定量预估区域碳储量和生态系统服务功能评价。将 InVEST 模型和 GIS 软件相结合,可精准、快速且可视化地估算研究区碳储量分布情况及空间动态变化<sup>[7]</sup>。

安徽省芜湖市位于长江干流下游、地处长江的南北两岸,平原丘陵较多和丰富的自然资源,是长三角流域重要的生态环境保护区域之一<sup>[8]</sup>;自 2011 年以来,政府不断调整城镇结构及功能优化为芜湖市经济发展提供优良环境,研究区城乡建设加快,围湖造田、退耕还林等政策使土地利用和植被覆盖程度发生了显著变化<sup>[9]</sup>。拟利用 InVEST 模型研究芜湖市 2011—2021 年碳储量时空分布格局,同时探究生态环境因子、地形因子、降雨因子和土地利用程度对研究区的固碳能力影响变化;分析各因子之间的权衡与协同关系,以科学严谨的圈划芜湖市碳储量热点区

域,有利于实现碳中和及城市可持续发展,对维持长江下游生态安全具有实践意义,也为芜湖市土地资源规划管理及绿色农业发展提供科学参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

芜湖市位于长江流域下游分布长江两岸,117°40′—118°44′E,30°19′—31°34′N;研究区降雨量较多、强度较大常有连续性暴雨,芜湖市年均降雨量约 1 251 mm,属北亚热带湿润季风气候;因一定空间尺度的城市“热岛效应”,研究区中北部的城市中心(镜湖区、弋江区)年均降雨量明显低于南部村镇区域。研究区南高北低且呈不规则形状,无为和鸠江区为河流沉积作用形成的平原地貌,海拔较低有部分洼地和山丘,而西南部南陵县、繁昌区等地海拔较高,则以丘陵和山地为主。

2011—2021 年芜湖市土地利用类型总体以耕地为主,约 4 234 km<sup>2</sup>,占该市土地总面积的 70.46%,林地约 777 km<sup>2</sup>。耕地分布于江北(如鸠江区、无为市等)。芜湖市中南部海拔较高为丘陵、低山区域,广泛分布林地及草地;建设用地主要集中在芜湖市,如镜湖、弋江区等。水域主要包括长江干流(芜湖段)、龙窝湖和镜湖等。未利用地的面积较少,仅为 0.04 km<sup>2</sup>。

### 1.2 数据来源

(1) 土地利用数据。2011—2021 年 3 期土地利用数据源自于武大杨杰教授课题组公开发布的数据集,该土地利用和土地覆盖变化(land use and land cover change,LUCC)数据集空间分辨率为 30 m×30 m<sup>[10]</sup>。将研究区土地利用类型结合现状并根据第三次全国国土调查数据(三调数据)划分,利用 ArcGIS 10.6 软件的“重分类”模块,将芜湖市 LUCC 划分为林地、耕地、水域、草地、建设用地和未利用地等 6 大类。

(2) 气象数据。2011—2021 年的年均降雨量数据由省气象服务中心及中国气象数据网(www.cma.gov.cn)下载获取;研究区蒸发量由潜在蒸发散量数据网(www.figshare.com)获取。

(3) 高程、矢量数据。数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM)由空间地理数据云(www.gscloud.cn)下载、芜湖市矢量数据(三调数据)由省地勘局对地高分辨率应用中心提供。

(4) 土壤数据及土壤理化性质。土壤质地及类型源于世界土壤数据库(HWSD)的中国区域土壤数据集;土壤理化性质由安徽省芜湖二水高分中心及安

徽省地质实验研究所检测提供。

以上所有收集的数据利用 ArcGIS 10.6 软件进行投影转换及重采样;均采用同一投影坐标系(WGS\_1984\_Albers),栅格数据重采样统一转化空间分辨率为 30 m×30 m。

### 1.3 InVEST 模型

利用 InVEST 模型的 Carbon storage 模块对研究区碳储量进行定量评估计算,一般陆地生态系统碳储量主要包含以下 4 个碳库:地上碳储量(土壤上部凋落的植物)、地下碳储量(植物根系)、土壤有机碳和土壤有机质<sup>[11]</sup>。通过前期数据搜集处理及参考武慧君等对芜湖市土壤理化性质及碳库研究<sup>[12]</sup>,结合土壤采样的实测数据,整理得到研究区不同土地覆盖类型的碳密度(表 1);结合 2011—2021 年的土地利用类型、年均降雨量、海拔、坡度等数据计算其碳储量,详见技术路线(图 1)。

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

式中: $C$ 为总碳储量; $C_{\text{above}}$ 为地上碳储量; $C_{\text{below}}$ 为地下碳储量; $C_{\text{soil}}$ 为土壤有机碳; $C_{\text{dead}}$ 为土壤有机质。

表 1 芜湖市不同土地利用类型的碳密度  
Table 1 Carbon density of different land use types at Wuhu City

| 土地利用类型 | 地上碳储量 | 地下碳储量 | 土壤有机碳(实测) | 土壤有机质(实测) |
|--------|-------|-------|-----------|-----------|
| 耕地     | 5.69  | 2.15  | 5.21      | 0.38      |
| 林地     | 3.61  | 4.22  | 9.58      | 28.51     |
| 草地     | 0.81  | 2.79  | 4.51      | 5.17      |
| 水域     | 1.57  | 4.31  | 6.91      | 0.01      |
| 建设用地   | 1.09  | 3.51  | 5.81      | 0.02      |
| 未利用地   | 0.78  | 1.27  | 2.55      | 0.03      |

### 1.4 土壤侵蚀、土壤保持

利用修正后的通用水土流失方程定量评估研究区土壤侵蚀、土壤保持,土壤保持为潜在的土壤侵蚀量(RKLS)与实际的土壤侵蚀量(USLE)之间的差值<sup>[13]</sup>。

$$RKLS = R \times K \times L \times S \quad (2)$$

$$USLE = R \times K \times L \times S \times P \times C \quad (3)$$

式中:降雨侵蚀力因子( $R$ ),选取吴素业研究皖南地区降雨侵蚀量的回归统计模型计算<sup>[14]</sup>;土壤可蚀性因子( $K$ ),查阅相关土壤类型、土壤质地并结合安徽省土壤普查以确定各土壤类型的可蚀性因子<sup>[15]</sup>;  $L$ 为坡长, $S$ 为坡度因子,可根据 DEM 数据计算;参考张群<sup>[16]</sup>对于芜湖市植被覆盖/农作物管理、相关保持措施因子研究,以确定各土地利用类型覆盖因子( $C$ )、工程管理措施因子( $P$ )(见表 2)。

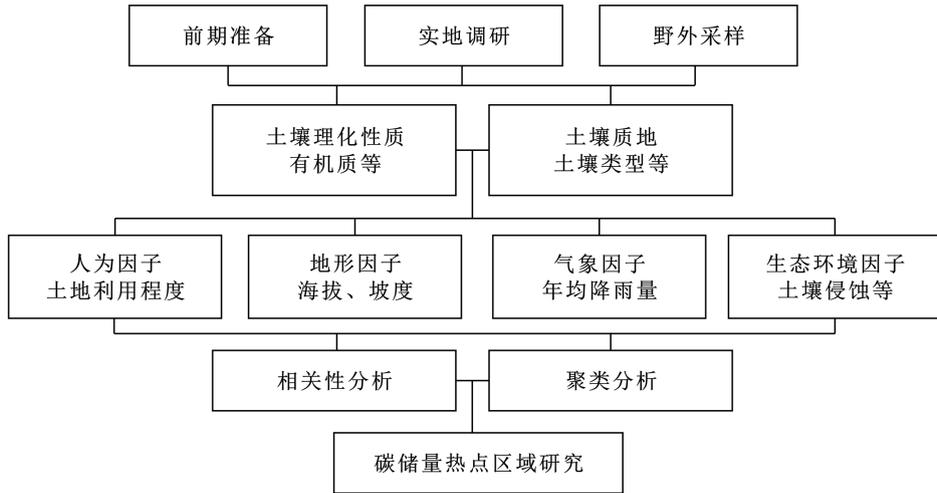


图 1 碳储量计算技术流程图

Fig.1 Technical flow chart for carbon storage calculation

表 2 芜湖市土壤保持参数

Table 2 Soil conservation parameters at Wuhu City

| 土壤类型  | 土壤质地 | K    | 土地利用类型 | C    | P    |
|-------|------|------|--------|------|------|
| 潜育水稻土 | 黏土   | 0.27 | 耕地     | 0.18 | 0.15 |
| 潜育水稻土 | 黏土   | 0.27 | 林地     | 0.16 | 0.9  |
| 水体    | 水体   | 0    | 草地     | 0.06 | 0.9  |
| 黄褐土   | 砂土   | 0.12 | 水域     | 0    | 0    |
| 黄棕壤   | 砂质黏土 | 0.17 | 建设用地   | 0.04 | 0.01 |
| 潮土    | 黏土   | 0.21 | 未利用地   | 0.02 | 1    |

注:K 为土壤可蚀性因子;C 为覆盖因子;P 为管理措施因子。

### 1.5 土地利用程度

指土地资源开发利用综合程度以不连续的函数形式表示,公式将土地利用类型分为 4 级并赋值计算(表 3)土地利用程度<sup>[17]</sup>。

$$L_a = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \quad (4)$$

式中: $L_a$  是土地利用综合指数;A 不同土地利用类型的分级指数;C 为不同等级土地利用类型的面积比例。

### 1.6 空间自相关分析

利用 ArcGIS 软件的“空间自相关”模块分析研

究邻近区域相似或独立情况,通过计算判断是否存在空间集聚/分散以及空间集聚分布类型。其中,局部莫兰指数(Moran Index)可计算研究区内某个栅格单元的某种属性值与邻近栅格的相同属性值,可以表明两者的相关联程度,在生态系统服务功能空间分布格局中,可通过软件的可视化分布图表示某生态系统服务空间自相关性,进而分析研究区某项或多项的服务功能空间分异情况。Moran Index 反映其均等化程度, Moran Index > 0 则表示集聚分布,否则为离散分布,若 Moran Index = 0 则是空间随机分布,不具有空间一致性。General G 是一项根据距离矩阵的局部/全域的空间自相关性指数,以分析研究区某项或多项生态系统服务功能的低值/高值在局部空间区域上集聚分布的情况。General G 指数反映研究区域的空间集聚类型,若 General G > 0 则表示高一高集聚(高值与高值集聚分布), General G < 0 则表示低—低集聚(低值与低值密集分布),若 General G = 0 则无显著集聚分布<sup>[18]</sup>。

表 3 芜湖市土地利用程度赋值

Table 3 Assignment of land use degree at Wuhu City

| 类型     | 未利用土地级    | 林、草、水用地级 | 农业用地级      | 城镇聚落用地级         |
|--------|-----------|----------|------------|-----------------|
| 土地利用类型 | 未利用地、难利用地 | 林地、草地、水域 | 耕地、园地、人工草地 | 城镇、居民点、工矿用地、交用地 |
| 分级指数   | 1         | 2        | 3          | 4               |

### 1.7 重分类计算

利用 ArcGIS 软件“空间分析”模块计算:一般将与研究对象为正相关(协同关系)因子利用 ArcGIS 的“栅格计算器”选取高值区域,并利用重分类功能赋值为 1,其余赋值为 0;反之,若为显著负相关(权衡关系)因子,选取低值区域定义赋值为 1 其余赋值为 0,最

后通过将各影响因子的栅格图层进行空间叠加计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 因子分析

2.1.1 土地类型及土地利用程度因子 2011—2021 年研究区土地利用空间分布格局有较明显的变化。除

建设用地面积逐年增加外,其余土地类型面积均逐年减少。其中,耕地是芜湖市主要的土地利用类型,由 71.23% 减少至 70.46%,可能与国家“退耕还林”政策相关,耕地有 129.23 km<sup>2</sup> 主要转化为林地;因芜湖市人口迅速增长、绿色农业可持续发展等原因,芜湖市

以“围湖造田”措施使得水域有 68.55 km<sup>2</sup> 转为耕地,发展农业种植水稻、小麦以提高城市粮食生产;因近年城镇化建设不断加速发展,芜湖市建设用地面积明显增加,由 6.18% 增加到 8.85%;相反,未利用地因面积较少变化较不显著(表 4)。

表 4 芜湖市 2011—2021 年土地利用转移矩阵

Table 4 Land use transfer matrix of Wuhu City from 2011 to 2021

km<sup>2</sup>

| 项目   | 2021 年面积 |        |      |         |        |         | 总计       |
|------|----------|--------|------|---------|--------|---------|----------|
|      | 耕地       | 林地     | 草地   | 水域      | 建设用地   | 未利用地    |          |
| 耕地   | 4 010.72 | 129.23 | 0.11 | 93.66   | 0.36   | 0       | 4 234.08 |
| 林地   | 48.62    | 728.03 | 0.02 | 0.01    | 0      | 0       | 776.68   |
| 草地   | 0.11     | 0.08   | 0.02 | 0       | 0      | 0.01    | 0.22     |
| 水域   | 68.55    | 0.06   | 0.00 | 391.76  | 6.02   | 0       | 466.39   |
| 建设用地 | 152.36   | 4.33   | 1.61 | 8.10    | 365.21 | 0.03    | 531.64   |
| 未利用地 | 0.004 2  | 0      | 0    | 0.004 7 | 0      | 0.000 8 | 0.009 7  |
| 总计   | 4 280.36 | 861.73 | 1.76 | 493.53  | 371.59 | 0.04    | 6 009.02 |

近 10 a 芜湖市固碳能力逐渐缓慢减弱,总碳储量减少了  $4.14 \times 10^5$  t。芜湖市林地和耕地的固碳能力较强,研究区单位面积的碳储量表现为:草地 < 耕地 < 林地。研究区主要以耕地农业种植为主体,芜湖市总碳储量表现为:草地 < 林地 < 耕地;耕地的总碳储量高达  $7.39 \times 10^6$  t,比例为 57.91%;其次,林地碳储量为  $4.25 \times 10^6$  t,占 33.3%;而芜湖市草地面积极少,仅为 0.22 km<sup>2</sup>,水域和未利用地固碳能力相

对较弱、碳密度较低,所以三者的总碳储量整体贡献率相对较低且不明显。其中,林地、耕地固碳量的减少速率明显快于其余土地利用类型,当林地的面积缩减 85.05 km<sup>2</sup>,同时林地的固碳量对应减少了  $45.89 \times 10^4$  t;而耕地的面积减少了 46.28 km<sup>2</sup> 时,其固碳量也相应减少了  $8.64 \times 10^4$  t(表 5)。综上分析可知,研究区碳储量与土地利用类型具有密不可分的联系。

表 5 芜湖市 2011—2021 年不同土地利用类型碳储量

Table 5 Carbon reserves of different land use types in Wuhu City from 2011 to 2021

| 土地利用类型 | 碳储量/10 <sup>4</sup> t |          |          | 碳汇/碳减量/10 <sup>4</sup> t |             |
|--------|-----------------------|----------|----------|--------------------------|-------------|
|        | 2011 年                | 2015 年   | 2021 年   | 2011—2015 年              | 2015—2021 年 |
| 耕地     | 748.35                | 744.09   | 739.71   | -4.26                    | -4.38       |
| 林地     | 471.21                | 413.89   | 425.32   | -57.32                   | 11.43       |
| 草地     | 0.25                  | 0.04     | 0.03     | -0.21                    | -0.01       |
| 水域     | 61.89                 | 64.37    | 58.43    | 2.48                     | -5.94       |
| 建设用地   | 37.02                 | 48.53    | 53.84    | 11.51                    | 5.31        |
| 未利用地   | 0.001 6               | 0.000 8  | 0.000 5  | -0.000 8                 | -0.000 3    |
| 总计     | 1 318.72              | 1 270.92 | 1 277.33 | -47.80                   | 6.41        |

土地利用程度综合指数是表现人类对土地开发利用程度强弱,若人为开发程度越强、土地使用率越大,则表明土地利用程度越强。自 2011 年城镇化建设加快,研究区耕地、林地面积整体缩减,而建设用地面积逐年增加,侧面反映了整体土地利用程度逐渐增强;截至 2021 年,镜湖区土地利用程度最强高达 315.91,南陵县、繁昌区等地为郊区以丘陵、低山为主,所以土地利用程度最弱仅为 271.14(图 2)。

2.1.2 气象因子 因全球温室效应影响,2011—2021 年芜湖市年均降雨量整体呈减少趋势,年均降雨量最

低值为 980.27 mm,最高为 1 625.37 mm。因热岛效应影响,城市大气环境与山区具有不同的气候特点,使得温度具有一定差异性、昼夜温差较大<sup>[19]</sup>,导致芜湖市南部山林地区降雨量明显高于市中心,空间上表现为自北向南逐步递增(图 2)。

2.1.3 海拔、坡度因子 芜湖市碳储量整体呈现“南高北低”的空间分布格局,随海拔升高而逐级增加,碳储量随坡度升高而增加变化。从总碳储量上看,芜湖市海拔 100 m 以下碳储量最大,高达  $10.59 \times 10^6$  t, 82.64%,其次是海拔 100~200 m 地带仅占 11.42%。

坡度小于  $5^\circ$  时,碳储量随坡度变大而增加,总量为  $7.77 \times 10^6$  t, 60.63%;从固碳能力上看,2011—2021 年芜湖市固碳能力均随海拔、坡度的变大而增强,即

海拔高、坡度大则固碳能力逐级增强;当海拔大于 400 m 时,单位面积碳储量高达  $5\,355.67$  t/km<sup>2</sup>,当坡度  $>15^\circ$  时,固碳能力高达  $4\,834.86$  t/km<sup>2</sup>(表 6)。

表 6 2011—2021 芜湖市不同海拔、坡度碳储量

Table 6 Carbon storage at different altitudes and slopes at Wuhu City during 2011—2021

| 海拔/m           | 总碳储量/ $10^4$ t |           |           | 固碳能力/( $t \cdot km^{-2}$ ) |           |           |
|----------------|----------------|-----------|-----------|----------------------------|-----------|-----------|
|                | 2011 年         | 2015 年    | 2021 年    | 2011 年                     | 2015 年    | 2021 年    |
| <0             | 13.790         | 13.771    | 13.787    | 1 290.770                  | 1 288.980 | 1 290.520 |
| 0~100          | 1 078.323      | 1 035.970 | 1 045.122 | 1 974.720                  | 1 897.160 | 1 913.920 |
| 100~200        | 153.071        | 148.563   | 146.365   | 5 147.020                  | 4 995.450 | 4 921.520 |
| 200~300        | 52.340         | 51.608    | 51.103    | 5 383.880                  | 5 308.530 | 5 256.600 |
| 300~400        | 20.618         | 20.499    | 20.457    | 5 399.110                  | 5 368.010 | 5 357.150 |
| 400~500        | 4.113          | 4.043     | 3.978     | 5 487.150                  | 5 394.400 | 5 307.180 |
| 500~600        | 0.467          | 0.461     | 0.458     | 5 484.600                  | 5 414.770 | 5 375.670 |
| >600           | 0.036          | 0.036     | 0.035     | 5 489.000                  | 5 489.000 | 5 334.360 |
| 坡度( $^\circ$ ) | 2011 年         | 2015 年    | 2021 年    | 2011 年                     | 2015 年    | 2021 年    |
| <2             | 317.833        | 312.562   | 313.432   | 1 673.280                  | 1 645.530 | 1 650.110 |
| 2~5            | 473.228        | 459.604   | 463.488   | 1 791.320                  | 1 739.750 | 1 754.450 |
| 5~10           | 217.480        | 200.013   | 204.304   | 2 633.940                  | 2 422.400 | 2 474.370 |
| 10~15          | 108.753        | 101.438   | 101.190   | 4 420.620                  | 4 123.280 | 4 113.190 |
| 15~20          | 81.381         | 78.771    | 77.764    | 5 059.750                  | 4 897.450 | 4 834.860 |
| 20~25          | 61.995         | 61.002    | 60.176    | 5 251.800                  | 5 167.690 | 5 097.700 |
| 25~45          | 62.023         | 61.495    | 60.890    | 5 313.200                  | 5 267.960 | 5 216.130 |
| >45            | 0.064          | 0.064     | 0.064     | 5 009.390                  | 4 995.560 | 4 962.330 |

2.1.4 生态环境因子 2011—2021 年研究区总碳储量整体呈缩减趋势。近 10 a 芜湖市总碳储量由  $1.32 \times 10^7$  t 减少至  $1.28 \times 10^7$  t。单位面积固碳能力较强主要集中于林地,能力较弱分布于未利用地和建设用地,2021 年耕地总碳储量为  $7.39 \times 10^6$  t,林地  $4.25 \times 10^6$  t,而草地仅为  $0.03 \times 10^4$  t。

近年,芜湖市土壤侵蚀程度主要以微度侵蚀和轻度侵蚀为主(图 2),整体呈逐年增加变化,由  $6.49 \times 10^6$  t 增加至  $6.78 \times 10^6$  t,耕地的土壤侵蚀总量最高为  $4.76 \times 10^6$  t,占 70.27%,林地其次仅占 29.63%;同时,坡度及降雨量大易造成水土流失;土壤侵蚀于耕地出现低值是由于耕地地势较平坦无明显降雨冲刷影响。

芜湖市土壤保持总体情况呈逐年减弱的变化趋势,由  $1.20 \times 10^8$  t 减少至  $1.18 \times 10^8$  t,单位面积土壤保持及土壤保持的高值区域,均集中分布于繁昌区和南陵县等南部的林地范围内,主要因为林地内植物有较好的水土保持、防风固沙等功能。

## 2.2 相关性分析

利用 ArcGIS 软件生成 1 000 个随机点且随机点之间呈现正态分布和非线性特征,将碳储量、土壤侵蚀、土壤保持、海拔、坡度、年均降雨量和土地利用程度等 7 项影响因子提取至采样点,并通过 Origin 软

件统计计算分析相关性,若  $R^2 = 0$  无显著的相关性,则为兼容关系;若  $R^2 < 0$  为显著负相关性,则为权衡关系;相反则为协同关系<sup>[20-21]</sup>。经检验,除降雨量与碳储量无显著相关性为兼容关系外,碳储量与其他影响因子  $p < 0.05$ ,均具有显著相关性。

芜湖市固碳能力与海拔、坡度相关系数  $R^2$  高达 0.71,相关性显著互为协同关系(图 3)。一般地区高程越高、坡度较陡则以林地为主,人为扰动因素较少,植被生长环境较适宜,有利于植物充分进行光合作用,所以,碳储量与坡度及海拔因子之间形成相辅相成的协同关系。相反,研究区固碳能力与土壤侵蚀、土壤保持相关系数  $R^2$  分别为  $-0.23, 0.53$ ,分别表现为权衡关系和协同关系;研究区以微度侵蚀和轻度侵蚀为主,长时间的水土流失及降雨冲刷不利于固碳量的稳定保持,互为显著负相关;而土壤保持能力高表现于植被或森林茂密的区域,植物有益于减少水土流失并一定程度增加了土壤和植物的固碳量,因此固碳能力与土壤保持等形成了相互促进的协同关系。同时,研究区固碳能力与土地利用程度相关系数  $R^2$  为  $-0.53$ ,为显著负相关,因受自然环境、土地资源开发利用等人为因素影响,使得研究区生态环境质量受到破坏,不利于农作物、植物生长,一定空间范围内导致耕地和林地面积减少,从而致使研究区固碳量相应缩减。

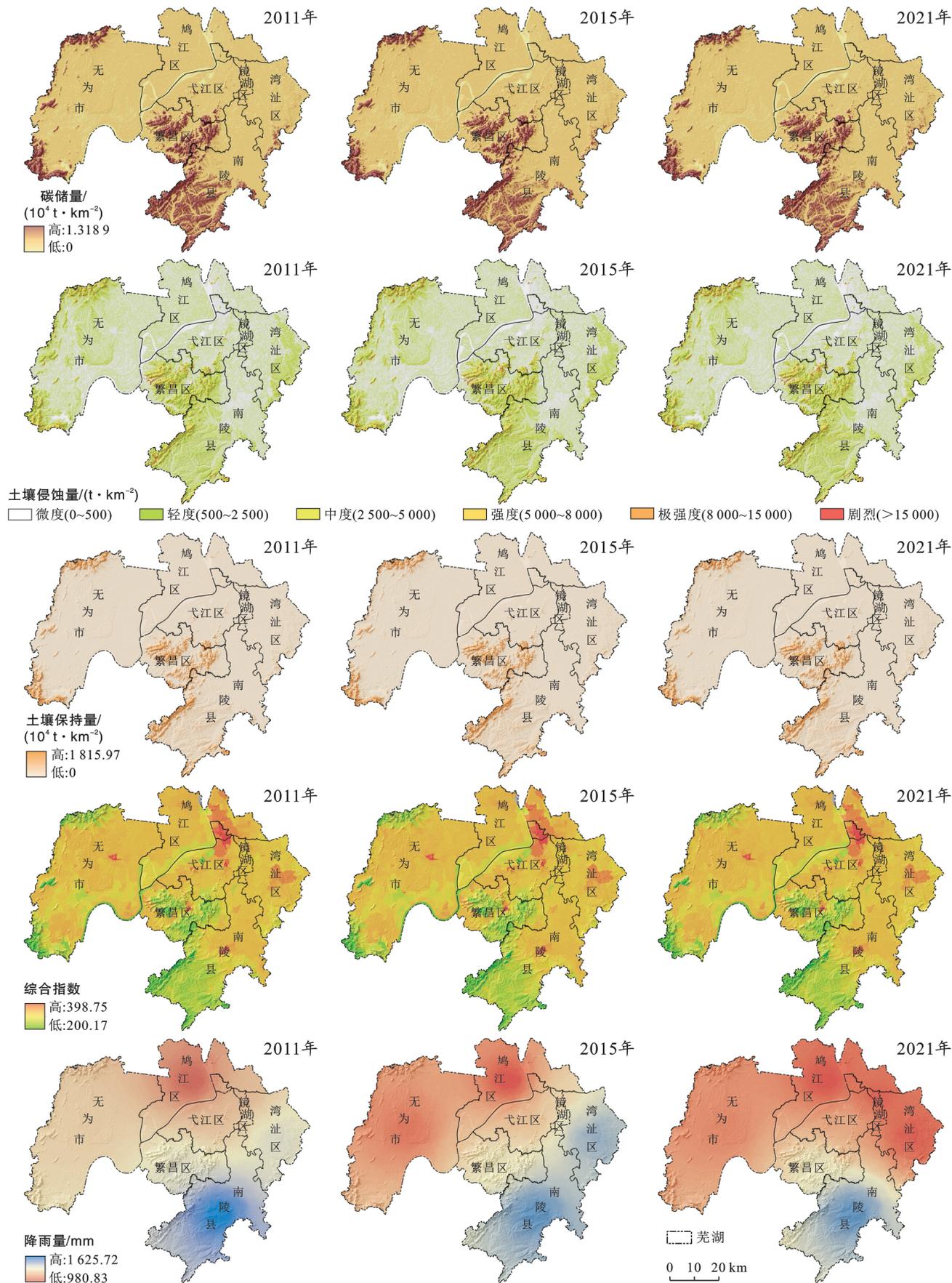


图 2 2011—2021 芜湖市碳储量及各因子空间分布

Fig.2 Spatial distribution of carbon storage and each factor at Wuhu City during 2011—2021

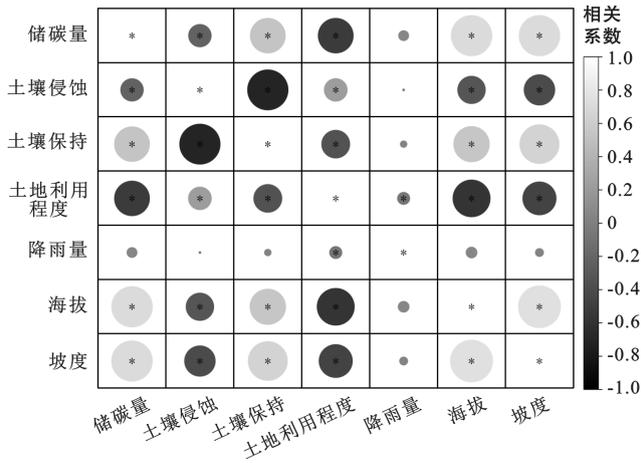


图 3 芜湖市各因子相关性分析结果

Fig.3 Correlation analysis results of each factor at Wuhu City

## 2.3 综合研究

2.3.1 聚类分析 分析 2011—2021 年的相关计算,  $p$  值均为 0.000(置信度在 99% 以上)且莫兰指数

(Moran Index)都为正值表现为集聚分布<sup>[22]</sup>。其中,碳储量、土壤保持等影响因子 General  $G > 0$ , 在空间上均呈现高一高集聚分布<sup>[23]</sup>。

碳储量与各影响因子集聚分布区域具有空间相关一致性,碳储量和土壤保持均表现为高值和高值的集聚分布,碳储量高值分布区域较多,比例为 18.77%,土壤保持仅为 14.33%(表 7);相反,土壤侵蚀、土地利用程度和年均降雨量主要以低—低集聚为主,土壤侵蚀部分高一高集聚主要分布于繁昌区、南陵县的林地区域范围内占 20.99%;年均降雨量低值聚类面积最大,占 34.6%;土地利用程度为低—低集聚最低,占 16.98%。其低—低集聚区域与碳储量低值集聚空间分布基本一致,主要集中分布于芜湖市中南部的林地区域。所以,分析结果侧面反映了碳储量与土壤保持、土壤侵蚀、土地利用程度等影响因子,在空间上具有协同/权衡作用影响,分布区域也具有显著的空间一致性。

表 7 2011—2021 年芜湖市碳储量及影响因子空间集聚比例

Table 7 Spatial clustering ratio of carbon storage and influencing factors at Wuhu City during 2011—2021

| 年份   | 集聚类型 | 碳储量   | 土壤侵蚀  | 土壤保持  | 土地利用程度 | 年均降雨量 |
|------|------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 2011 | 高一高  | 18.77 | 20.15 | 14.33 | 4.68   | 19.00 |
|      | 高一低  | 0     | 0.23  | 0     | 0.08   | 0     |
|      | 低—高  | 0.08  | 0.84  | 0     | 0.40   | 0     |
|      | 低—低  | 2.73  | 28.04 | 0     | 17.05  | 27.95 |
| 2015 | 高一高  | 18.35 | 20.69 | 14.33 | 4.73   | 25.84 |
|      | 高一低  | 0     | 0.23  | 0     | 0.08   | 0     |
|      | 低—高  | 0.08  | 0.89  | 0     | 0.60   | 0     |
|      | 低—低  | 1.94  | 29.05 | 0     | 16.43  | 38.57 |
| 2021 | 高一高  | 18.77 | 20.99 | 14.33 | 4.86   | 18.87 |
|      | 高一低  | 0     | 0.23  | 0     | 0.08   | 0     |
|      | 低—高  | 0.08  | 0.61  | 0     | 0.73   | 0     |
|      | 低—低  | 2.73  | 27.32 | 0     | 16.98  | 34.60 |

2.3.2 碳储量热点区域 为进一步探究研究区碳储量与影响因子的空间权衡与协同作用的综合作用影响,将与碳储量表现为协同关系的因子定义为积极影响指标(土壤保持);与碳储量为表现为权衡关系的影响因子定义为消极影响指标(如土壤侵蚀、土地利用程度等)<sup>[24]</sup>。一般研究选取约 20%~25% 筛选划分为热点区域,现考虑研究区生态环境质量、经济水平等自然、社会属性的影响,提取各影响因子的 15% 区域;与碳储量为协同关系因子选取栅格值前 15% 区域,并利用 ArcGIS 重分类功能重新赋值为 1,其他划分为 0;反之,若互为权衡关系的影响因子,选取栅格值后 15% 区域重新定义为 1,剩余赋值为 0。通过“栅格计算器”将各影响因子进行空间叠加计算,最低值为 0,最大值为 5,总共分为 0—5 级,相关等级越高表

示该区域的碳储量越高、固碳能力越强<sup>[25]</sup>。研究区碳储量热点区域主要集中分布于南陵县中部及西南部地区和繁昌区南部的林地区域范围内(图 4),近 10 a,等级 3—5 研究区碳储量热点区域面积比例呈逐年缓慢减少趋势;等级 4 区域因受人为开发和生态环境质量影响,整体比例从 4.74% 缩减至 4.51%;相反,最高等级 5 由 1% 增加至 1.05%,主要由于近年植树造林及退耕还林的部分成效较显著。因此,等级 3—5 可划分为研究区碳储量热点区域进行重点保护及监管优化。

碳储量热点区域的划分在一定程度上有利于提升研究区固碳能力,对实现碳中和及城市可持续发展有重要意义,也为耕地保护和绿色农业发展提供了相关参考依据。

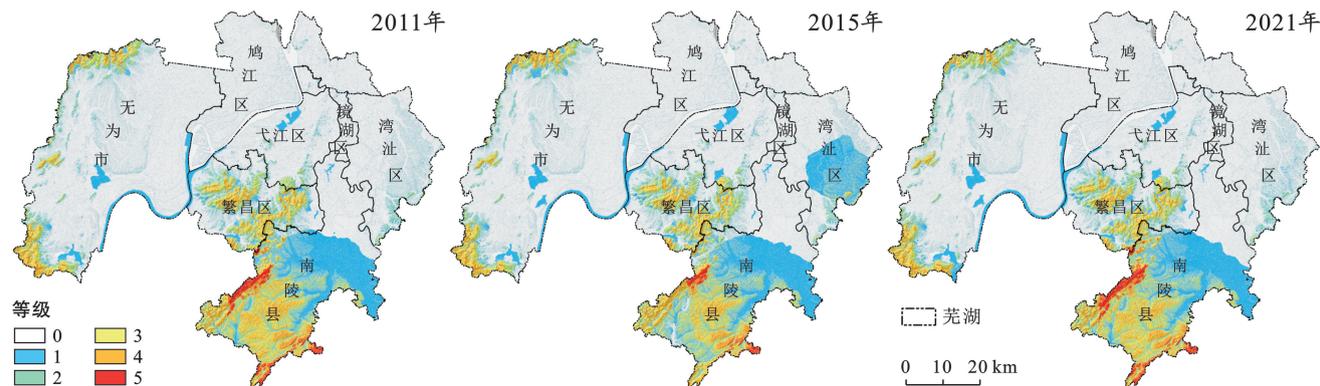


图 4 2011—2021 年芜湖市碳储量热点区域

Fig.4 Hot spots of carbon storage at Wuhu City during 2011—2021

### 3 讨论

通过 InVEST 模型对芜湖市碳储量及影响因子进行综合研究,一定空间尺度上验证了模型评估的合理性、准确性及研究区域的适用性<sup>[26]</sup>,其中,林地和耕地的碳储量的增减变化与其相应的面积变化趋势高度一致。此研究结果和雷军成等<sup>[27]</sup>对五马河流域生态系统服务多情景评估、王秀明等<sup>[28]</sup>在韶关市的生态系统服务功能时空变化特征及影响因素研究结论高度一致。此研究也存在不足:模型主要基于土地利用数据、DEM 等数据定量评估研究区碳储量,存在一定数据精度误差;生态系统服务的空间异质性,各相关因子的相关性及其复杂化等会影响最终的计算结果,后期将进一步提升土地利用与覆被变化、空间插值等数据精度,并进行相关参数调整优化。

对于研究区生态系统服务功能的定量评估研究,一般只将各相关影响因子的栅格图层利用软件进行简单的空间叠加计算划分,但却未考虑实际情况的各因子之间存在显著相关性,本研究基于各因子的权衡和协同关系叠加分析计算,划分了碳储量热点区域,有利于了解芜湖市固碳能力的空间分布规律。其中,林地、耕地在碳储量供给服务中为主体,需要耕地保护及林地维护,充分发挥其生态环境调节能力,从而更进一步维持或提高芜湖市固碳能力,研究结果为芜湖市生态环境保护区划分提供科学参考,对生态系统服务功能评估具有重要意义,也为研究区提供了科学合理的土地管理参考。

### 4 结论

本研究利用 InVEST 模型定量评估了芜湖市 2011—2021 年碳储量的时空变化,同时分析了土地利用程度、气象、地形、土壤侵蚀等影响因子对研究区固碳能力的综合影响。

(1) 近 10 a,芜湖市因土地利用变化碳储量减少了  $4.14 \times 10^5$  t,呈逐年减少趋势;研究区固碳能力表现为:草地 < 耕地 < 林地,林地为  $5\ 488.97$  t/km<sup>2</sup> 且耕地碳储量高达  $7.39 \times 10^6$  t。

(2) 在自然因素中,用地类型、海拔、坡度及土地利用程度是影响碳储量空间分布的主要原因,随海拔、坡度升高而逐级缓慢增加,碳储量整体呈“北低南高”分布情况;在生态环境因素中,碳储量与土壤保持为显著正相关,两者相辅相成互为协同关系,相反,与土壤侵蚀互为权衡关系。

(3) 芜湖市南部碳储量呈现“高一高集聚”,比例为 18.77%,北部为“低—低集聚”,仅为 2.73%;碳储量热点区域因资源开发利用影响呈逐年减少趋势,优良区域占 11.95%,集中于南部山林地带,局部较弱需重点保护优化。该研究可为芜湖市耕地保护及生态农业发展提供科学参考,也可通过土地资源整合和国土综合整治等方法,加强生态环境保护以提高区域生态效益,促进土地空间布局优化,有利于提高城市固碳量以实现碳中和及可持续发展。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 彭文宏,牟长城,常怡慧,等.东北寒温带永久冻土区森林沼泽湿地生态系统碳储量[J].土壤学报,2020,57(6):1526-1538.
- [2] 赵其国,黄国勤,钱海燕.低碳农业[J].土壤,2011,43(1):1-5.
- [3] 尹云锋,蔡祖聪.不同施肥措施对潮土有机碳平衡及固碳潜力的影响[J].土壤,2006,38(6):745-749.
- [4] 徐胜祥,史学正,赵永存,等.不同耕作措施下江苏省稻田土壤固碳潜力的模拟研究[J].土壤,2012,44(2):253-259.
- [5] 陈中星,张楠,张黎明,等.福建省土壤有机碳储量估算的尺度效应研究[J].土壤学报,2018,55(3):606-619.
- [6] Zhao Gang, Bryan B A, King D, et al. Impact of agricultural management practices on soil organic carbon;

- Simulation of Australian wheat systems [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(5): 1585-1597.
- [7] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力[J]. *农村生态环境*, 2005, 21(4): 6-11.
- [8] Tang Hua jun, Qiu Jian jun, van Ranst E, et al. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model [J]. *Geoderma*, 2006, 134(1/2): 200-206.
- [9] Xu Shengxiang, Shi Xuezheng, Zhao Yongcun, et al. Carbon sequestration potential of recommended management practices for paddy soils of China, 1980—2050 [J]. *Geoderma*, 2011, 166(1): 206-213.
- [10] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [11] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, et al. InVEST 2.5.3 User's Guide [M]. The Natural Capital Project, Stanford, 2013.
- [12] 武慧君, 姚有如, 苗雨青, 等. 芜湖市城市森林土壤理化性质及碳库研究[J]. *土壤通报*, 2018, 49(5): 1015-1023.
- [13] 史志华, 刘前进, 张含玉, 等. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1117-1127.
- [14] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空分布规律[J]. *中国水土保持*, 1994(4): 12-13.
- [15] 梁音, 史学正. 长江以南东南部丘陵山区土壤可蚀性  $K$  值研究[J]. *水土保持研究*, 1999, 6(2): 47-52.
- [16] 张群. 巢湖流域土壤侵蚀与水土保持环境效益评价[D]. 安徽 芜湖: 安徽师范大学, 2013.
- [17] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. *自然资源学报*, 1997, 12(2): 105-111.
- [18] 林海明, 杜子芳. 主成分分析综合评价应该注意的问题[J]. *统计研究*, 2013, 30(8): 25-31.
- [19] 卢开东, 王健健, 马燮桃, 等. 基于 DPSIR 模型的芜湖市水生态承载力研究与建议[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(2): 538-545.
- [20] 陈姗姗, 刘康, 李婷, 等. 基于 InVEST 模型的商洛市水土保持生态服务功能研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(3): 800-807.
- [21] 杨君, 周鹏全, 袁淑君, 等. 基于 InVEST 模型的洞庭湖生态经济区生态系统服务功能研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(1): 267-272.
- [22] 王大尚, 李屹峰, 郑华, 等. 密云水库上游流域生态系统服务功能空间特征及其与居民福祉的关系[J]. *生态学报*, 2014, 34(1): 70-81.
- [23] Bai Yang, Zhuang Changwei, Ouyang Zhiyun, et al. Spatial characteristics between biodiversity and ecosystem services in a human-dominated watershed [J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(2): 177-183.
- [24] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2783-2792.
- [25] 张立伟, 傅伯杰. 生态系统服务制图研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 316-325.
- [26] 钟亮, 林媚珍, 周汝波. 基于 InVEST 模型的佛山市生态系统服务空间格局分析[J]. *生态科学*, 2020, 39(5): 16-25.
- [27] 雷军成, 刘纪新, 雍凡, 等. 基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的五马河流域生态系统服务多情景评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(12): 1084-1093.
- [28] 王秀明, 刘谓承, 龙颖贤, 等. 基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 381-388.