

基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测

孙方虎¹, 方凤满^{1,2}, 洪炜林¹, 罗浩¹, 余健^{1,2}, 房莉^{1,2}, 苗雨青^{1,2,3}

(1.安徽师范大学地理与旅游学院,安徽 芜湖 241002;2.江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室,安徽 芜湖 241002;3.环境激素与生殖发育安徽省重点实验室,安徽 阜阳 236037)

摘要:为探讨安徽省土地利用变化对碳储量的影响,揭示碳储量时空演化特征和未来变化趋势,通过耦合 InVEST 模型碳储存模块和 PLUS 模型,分析 1990—2018 年安徽省土地利用类型和碳储量时空演化特征,并从自然发展和生态保护情景预测 2034 年、2050 年安徽省碳储量变化趋势。结果表明:安徽省 1990 年、2000 年、2010 年、2018 年的碳储量分别为 $1\,218.37\times10^6$, $1\,215.65\times10^6$, $1\,211.39\times10^6$, $1\,206.18\times10^6$ t,呈现逐年减少趋势,主要由于耕地、林地被侵占。此外,省内土地利用类型空间差异显著,碳储量整体表现为“皖南较高、皖北皖中较低”的空间分布特征。不同情景预测表明,自然发展情景下,安徽省 2034 年和 2050 年的碳储量分别为 $1\,197.93\times10^6$, $1\,196.08\times10^6$ t;生态保护情景下,其碳储量分别为 $1\,202.89\times10^6$, $1\,200.37\times10^6$ t。与自然发展情景相比,生态保护情景下建设用地扩张受到限制,森林、草地等高碳密度地类得到保护,碳储能力提升。研究结果为深入厘清安徽省碳储量时空格局奠定基础,以期为安徽省深入实施可持续发展战略、加快推进生态省建设和“双碳”战略规划提供科学参考。

关键词:土地利用变化; PLUS 模型; InVEST 模型; 碳储量; 安徽省

中图分类号:K903 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2023)01-0151-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.021

Evolution Analysis and Prediction of Carbon Storage in Anhui Province Based on PLUS and InVEST Model

SUN Fanghu¹, FANG Fengman^{1,2}, HONG Weilin¹, LUO Hao¹,

YU Jian^{1,2}, FANG Li^{1,2}, MIAO Yuqing^{1,2,3}

(1.School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002; 2.Anhui Key Laboratory of Earth Surface Processes and Regional Response in the Yangtze-Huaihe River Basin, Wuhu, Anhui 241002; 3.Anhui Key Laboratory of Environmental Hormone and Reproduction, Fuyang, Anhui 236037)

Abstract: To explore the impact of land use change on carbon storage in Anhui Province, and reveal the spatial-temporal evolution and future trend of carbon storage, this study coupled carbon storage module of InVEST model and PLUS model to evaluate the spatial-temporal evolution characteristics of land use types and carbon storage in Anhui Province from 1990 to 2018, and to predict the change trend of carbon storage in Anhui Province in 2034 and 2050 from natural development and ecological protection scenarios. The results showed that the carbon storage of Anhui Province in 1990, 2000, 2010 and 2018 was $1\,218.37\times10^6$, $1\,215.65\times10^6$, $1\,211.39\times10^6$ and $1\,206.18\times10^6$ t, respectively. The carbon storage decreased year by year, which was caused by the occupation of cultivated land and forest land. In addition, the land use types in Anhui province varied spatially, and the overall carbon storage was much higher in the southern part than that in northern and central part. According to the results of scenario simulation, carbon storage in Anhui province under the natural development scenario would be $1\,197.93\times10^6$ and $1\,196.08\times10^6$ t in 2034 and 2050, respectively. Under the ecological protection scenario, the carbon storage would be $1\,202.89\times10^6$ and $1\,200.37\times10^6$ t in the same period. Compared with the natural development scenario, the expansion of construction land under the ecological protection scenario would be limited, and the high carbon density land types such as forests and

收稿日期:2022-07-06

资助项目:安徽省自然科学基金面上项目(2108085MD126);国家自然科学基金项目(41601083);环境激素与生殖发育安徽省重点实验室开放课题项目(FSKFKT012)

第一作者:孙方虎(1998—),男,硕士研究生,主要从事湿地生态系统碳储量研究。E-mail:1156274325@qq.com

通信作者:苗雨青(1985—),男,博士,副教授,主要从事湿地生态系统碳氮循环研究。E-mail:miaoyqjh@ahnu.edu.cn

grasslands would be protected, and the carbon storage capacity would be improved. These results could lay foundation for further clarifying the spatial and temporal pattern of carbon storage in Anhui Province and provide scientific references for further implementation of sustainable development strategy, acceleration of ecological province construction and “dual carbon” strategic planning in Anhui Province in the future.

Keywords: land use change; PLUS model; InVEST model; carbon storage; Anhui Province

工业化和城市化的发展引起区域土地利用空间格局的变化,造成陆地生态系统功能和结构的失调,进而影响其碳循环的平衡,引发诸如全球气候变化等一系列生态环境问题。陆地生态系统对减少碳排放和增加碳汇发挥着至关重要的作用,受土地利用变化影响,其碳的源/汇功能势必发生变化,因此准确评估土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响具有重要意义^[1-3]。另外,为缓解全球气候变暖,我国承诺在 2030 年前实现“碳达峰”,力争 2060 年前实现“碳中和”,研究如何通过调整土地利用实现碳减排和碳增汇是当前的研究热点。在此背景下,深入分析碳储量与土地利用变化的响应关系与机制,为指导城市低碳发展和国土空间规划,进而实现“双碳”目标提供有益参考。

目前关于生态系统碳储量的评估方法较多,传统研究方法有实地采样法、生物量法、蓄积量法等,但这些方法在研究尺度、碳储量时空变化和可视化表达上存在一定的不足。有学者^[4-5]逐渐采用耦合不同模型的方法进行区域碳储量动态演化和未来多情景预测分析,使得准确识别区域碳的源/汇功能成为可能。在已有固碳模型中,InVEST 模型以土地利用变化为依据,利用较少数据量就能快速反映景观的碳功能(源或汇)。此外,部分学者通过耦合 InVEST 模型和 Dyna-CLUE^[6]、FLUS^[7]、CA-Markov^[8] 等土地利用模拟模型进行未来碳储量变化的预测研究。现有的土地利用模拟模型中,PLUS 模型可根据随机森林算法挖掘地类转移概率,在位置、数量、细尺度元胞变化和景观格局相似度方面优于其他模型^[9],逐渐引起学者重视。精准获取各省、地级市的碳储量是地方应对气候变化、实现“双碳”目标的重要基础。然而,当前对省域尺度陆地生态系统碳储量的估算还不多见,仅见赫晓慧等^[6]、林彤等^[10]通过耦合模型的方法分别对中原城市群、广东省进行碳储量估算与预测。以上研究均表明,人类活动引起的土地利用/覆盖变化是影响区域碳储量的主要驱动因素^[11]。

安徽省处于长江经济带发展、长三角一体化发展和中部地区高质量发展等国家战略的叠加地带。近年来随着生态环境保护工作的不断加强、打造长三角生态屏障和长三角生态绿色一体化工作的持续推进,厘清安徽省生态系统现有资源状态和生态系统服务

功能的评估是当前亟待解决的问题。碳固定是生态系统服务的重要功能,可以有效调节区域气候,是影响安徽省生态环境品质的关键因素之一。目前对于安徽省碳储量研究主要集中于森林、土壤等典型生态系统^[12-13],缺少对省内各土地利用类型碳储量演化分析和未来变化趋势的综合研究。本研究耦合 PLUS 和 InVEST 模型分析 1990—2018 年安徽省碳储量演化,并从自然发展情景和生态保护情景预测 2034 年、2050 年碳储量变化情况,以期为未来安徽省深入实施可持续发展战略,加快推进生态省建设及“双碳”战略规划提供科学参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

安徽省(29°41′—34°38′N,114°54′—119°37′E)地处长江、淮河流域中下游,地势由北向南逐级升高,分为皖北(淮北)平原、皖中(江淮)丘陵山地、沿江平原、皖南山地,总面积 14.01×10⁴ km²(图 1)。本区域位于暖温带和亚热带过渡地带,全年无霜期 200~250 天,年平均气温 14~17℃,年平均降水量 750~1 700 mm。安徽省是我国重要的农业生产、能源、原材料和加工制造业基地,也是我国生态建设的重点省份,然而近年来经济快速发展,城镇化水平不断提高,土地利用类型发生显著变化。

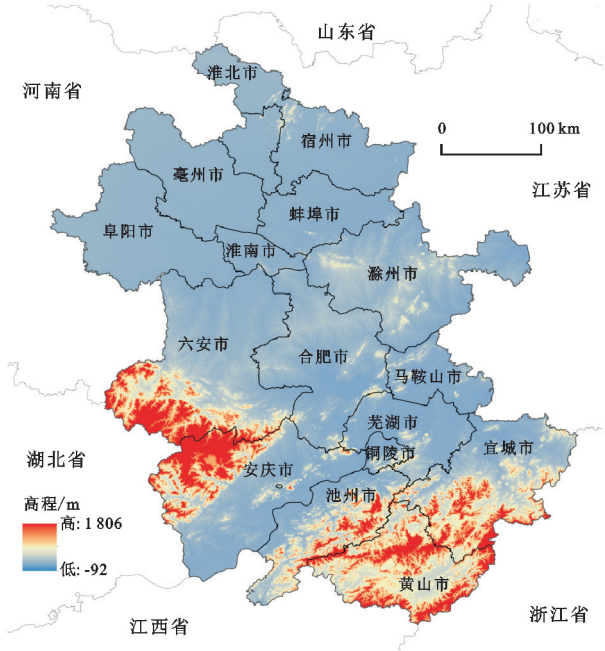


图 1 安徽省地理位置

1.2 数据来源

1990 年、2000 年、2010 年和 2018 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心 (<http://www.resdc.cn/>),通过裁减、镶嵌等得到安徽省林地、草地、耕地、水域、建设用地和未利用地 6 种类型的土地利用图,空间分辨率为 30 m;降水、气温、GDP、NDVI 和人口密度来源于中国科学院资源环境数据中心 (<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km;地形数据来自地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 90 m,坡度经 DEM 数据中提取得到;河流、道路数据来源于中国科学院资源环境数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。将上述数据栅格化后统一成与土地利用数据相同的投影坐标系和空间分辨率。

碳密度数据尽量选取省内实测数据,从前人^[14-18]研究文献中获得。耕地地下碳密度根据根茎比 0.2^[19]计算而来,未利用地土壤碳密度根据 Alam 等^[20]的研究利用年降水量与土壤碳密度的关系修正而来(表 1)。

表 1 安徽省不同类型土地各部分碳密度^[18-23]

土地利用 类型	单位:t/hm ²		
	地上 碳密度	地下 碳密度	土壤 碳密度
耕地	1.90	0.38	89.90
林地	32.28	6.57	63.90
草地	4.38	9.40	52.50
水域	0	0	0
建设用地	0	0	73.00
未利用地	0	0	41.41

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST 模型 碳储量是生态系统中重要的调节服务,陆地生态系统通过将碳元素固定在土壤和植被中以调节大气中碳含量,从而对减缓气候变化具有重要作用^[21]。InVEST 模型是当前进行大区域生态系统碳储量估算应用最为广泛的模型之一^[4],该模型碳模块设定的生态系统碳储量由地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库和死亡有机碳库 4 个部分组成。根据土地利用类型的分类情况,分别对不同类型 4 个碳库的平均碳密度分别进行统计,再根据各类面积与其碳密度的乘积并求和,可获得研究区的总碳储量。计算公式为:

$$C_{total}=C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead}$$

式中: C_{total} 为总碳储量(t/hm²); C_{above} 为地上部分碳储量(t/hm²); C_{below} 为地下部分碳储量(t/hm²); C_{soil} 为土壤碳储量(t/hm²); C_{dead} 为死亡有机碳储量(t/hm²)。由于死亡有机质碳储量含量低且数据难以获取^[22],本研究中不予考虑。

1.3.2 PLUS 模型 PLUS 模型是由中国地质大学(武汉)高性能空间计算智能实验室研发,以栅格数据为基础对斑块级土地利用变化进行模拟,是基于土地扩张分析策略(LEAS)的规则挖掘框架和基于多类型随机种子(CARS)的模型,可呈现各驱动因子对土地利用变化的贡献度,可通过马尔科夫链或线性回归的方法模拟不同情景下的土地利用类型变化^[23]。

本研究以 2010 年土地利用数据为基础,模拟 2018 年数据,并采用 2018 年真实数据进行精度分析,以 kappa 系数为精度依据。并以 8 年为步长从自然发展情景和生态保护情景分别模拟 2034 年、2050 年土地利用情况。通过模拟得到 2018 年的 kappa 系数为 0.91,总精度达 0.94,表明在 30 m 分辨率下 PLUS 模型模拟安徽省土地利用类型效果较好,可使用该模型进行 2034 年和 2050 年土地利用类型预测。

具体来说,基于 PLUS 模型 LEAS 模块运算得到 2010—2018 年安徽省土地利用类型的发展概率,并通过 Markov Chain 计算得到 2034 年、2050 年各类用地需求;然后,根据 2018 年土地利用数据、发展概率结合 CARS 模块进行 2034 年、2050 年不同情景预测。其中根据 1990—2018 年安徽省土地利用类型变化情况,调整转移成本矩阵(表示不同土地利用类型转移的难易程度,0 表示不能转移,1 表示可以转移),邻域权重(表示土地类型的扩张强度,阈值范围 0~1,值越接近 1 扩张能力越强。),设定自然发展情景和生态保护情景。

(1)自然发展情景。即延续之前土地利用结构变化趋势,保持土地转移概率不变。由于该情景下安徽省未利用地与其他用地之间相互转移面积很少,故转移成本矩阵设为 0,其余为设为 1。邻域因子根据无量纲化^[24]处理得到,耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的邻域因子分别是 0,0.48,0.50,0.57,1.00,0.52。

(2)生态保护情景。该情景考虑到安徽省正努力打造皖西大别山和皖南山区生态屏障、加强长江两岸造林绿化、退耕还林还草和优化城市生态空间格局、建立城市生态廊道的“两山”理念。通过保护生态环境来遏制碳储量退化,增加林地、草地面积,同时限制建设用地高速扩张。该情景下的转移成本矩阵林地、草地不转移为其他用地,设为 0,其余不变。邻域因子分别设为 0.30,1.00,0.80,0.57,0.30,0.30。

2 结果与分析

2.1 安徽省 1990—2018 年碳储量变化

从碳储量变化(图 2)来看,安徽省 1990 年、2000 年、2010 年、2018 年的碳储量分别为 1 218.37×10⁶, 1 215.65×10⁶,1 211.39×10⁶,1 206.18×10⁶ t,呈现

减少趋势,与 1990 年相比共减少 12.19×10^6 t。其中,1990—2000 年下降幅度最小,碳储量减少 2.72×10^6 t。自 2000 年之后,碳储量大幅减少,且 2010—2018 年下降幅度最大,共减少 5.21×10^6 t,主要由于该时段安徽省城镇化速度加快,建设用地迅速增长,侵占其他生态用地,导致碳储量流失加快。

从土地利用类型(图 3)来看,安徽省各土地利用类型的碳储量发生不同程度的变化,总体表现出耕地大幅减少、林地减少,建设用地、未利用地增加,草地先增加后减少。1990 年、2000 年、2010 年和 2018 年耕地碳储量分别为 752.85×10^6 t, 743.67×10^6 t, 727.36×10^6 t, 711.38×10^6 t, 占有所有土地利用类型总碳储量的 58%, 是安徽省重要的碳库。其次林地碳储量由 1990 年 333.79×10^6 t 下降到 2018 年的 329.75×10^6 t, 共减少 4.04×10^6 t, 而草地碳储量变化不大, 林地和草地共储存安徽省约 30% 的碳。建设用地 28 年间碳储量由 76.60×10^6 t 增加到 109.73×10^6 t, 且 2000—2010 年增幅最大。这与赫晓慧等^[6]在研究中原城市群区域碳储量变化中发现, 建设用地碳储量增加的结果相一致。未利用地在 2010—2018 年碳储量增加最多, 主要由于耕地、水域转为未利用地使得碳储量增加。可以看出, 耕地、林地对安徽省碳储量贡献最高, 其次为建设用地、草地、未利用地和水域。

2.2 安徽省碳储量空间变化特征

从空间上看,碳储量较高的区域主要集中于安徽南部山区,该区域以林地、草地为主,土壤碳密度高

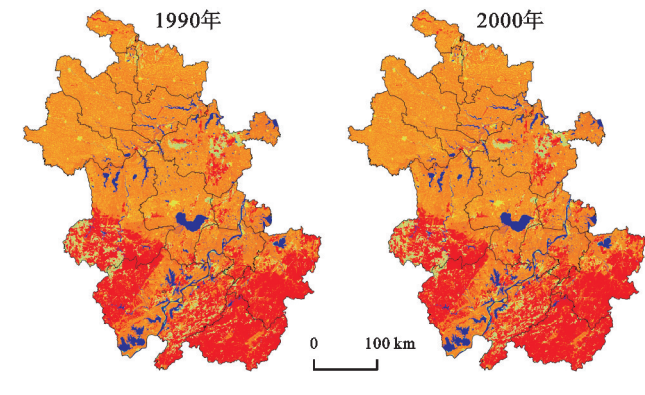


图 4 1990 年、2000 年、2010 年和 2018 年安徽省碳储量时空分布

从图 5 可以看出,六安、安庆、宣城、滁州市碳储量均值占全省 42.49%,是安徽省主要碳储存城市;其中六安市碳储量每年均达 159.99×10^6 t。其次黄山、阜阳、宿州、亳州、池州、合肥市固碳能力较强, 占全省碳储量 42.43%。1990—2018 年合肥市共减少 2.09×10^6 t 碳,是省内碳储量下降幅度最大的城市;主要由于合肥市自 21 世纪以来城镇化进程发展迅速,建设用地大量增加。其中铜陵市碳储量减少最小,减少约 0.06×10^6 t。

(图 4)。1990—2018 年碳储量空间变化不大,碳储量较高的地区具体来说分布于滁州中部、六安南部、安庆西北部、铜陵(东南)、池州、宣城(南)以及黄山市, 这些地区主要为林地、草地, 植被覆盖率比其他地区高, 碳存贮能力强。低值区域主要是水域(河流、湖泊等), 最低值为 0。

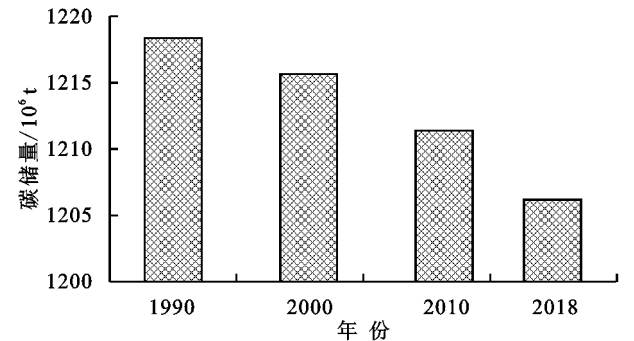
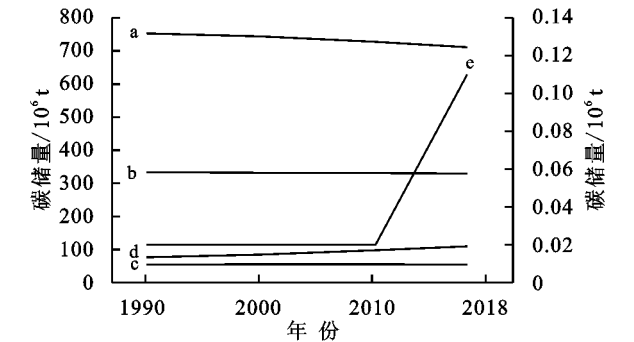
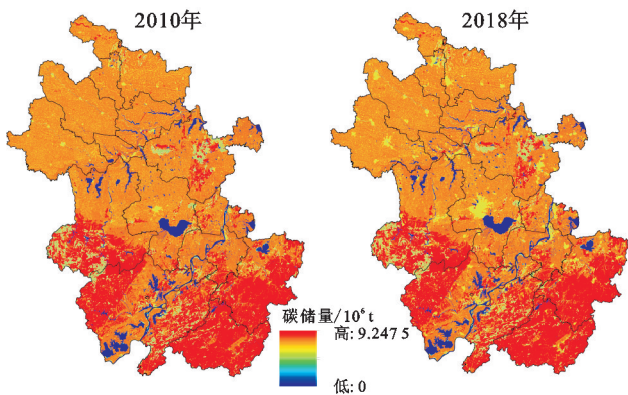


图 2 安徽省 1990—2018 年碳储量变化



注:a 为耕地;b 为林地;c 为草地;d 为建设用地;e 为未利用地以右轴数据表示。

图 3 安徽省 1990—2018 年各土地类型碳储量变化



为更清楚反映安徽省 28 年间碳储量变化情况, 将变化值 $>15\%$ 的定义为变化明显, 即极剧减少和极剧增加; 变化值在 $5\% \sim 15\%$ 的定义为一般变化, 即一般减少和一般增加; 变化值在 $0 \sim 5\%$ 的定义为基本不变。

由图 6 可知,1990—2018 年安徽省碳储量增加的面积为 276 km^2 , 占全省总面积约 0.2% , 碳储量减少的面积为 $6\,900 \text{ km}^2$, 占全省总面积约 4.92% , 减少的地区主要为建成区; 其中合肥市区急剧减少程度最

大,由于合肥近 10 年经济、交通、产业等不断发展,建设用地不断蚕食周边耕地,导致碳储量快速下降;其次为芜湖中北部、马鞍山中部急剧减少,且都为南京都市圈城市,GDP 近年来不断上升。芜湖为旅游城

市,旅游景区建设导致土地类型多转移为建设用地碳储量减少明显。其余各地区减少等级区域较为分散,主要集中于皖北、皖中地区。碳储量一般增加的区域主要集中于皖南各市。

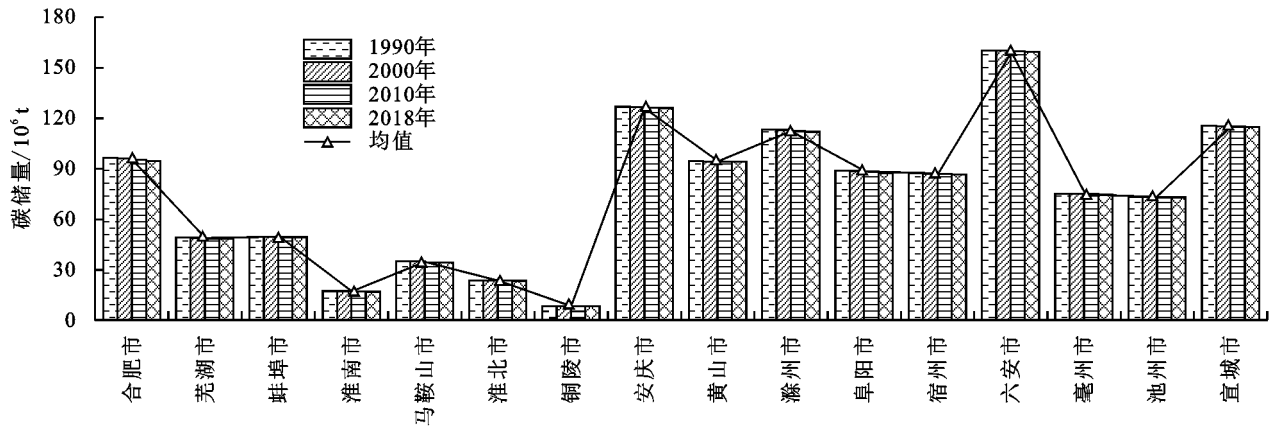


图 5 安徽省各地级市 1990—2018 年碳储量变化

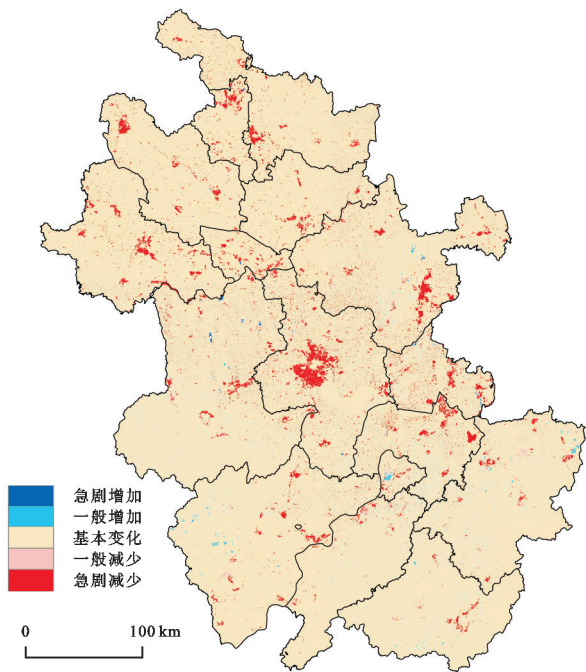


图 6 安徽省 1990—2018 年碳储量空间分布变化

2.3 安徽省土地利用类型变化及其对碳储量的影响

从表 2 可以看出,研究时期内安徽省各土地利用类型均发生不同程度的变化。耕地是安徽省主要的土地利用类型,主要集中在皖北皖中地区,占全省总面积 55% 以上;其次为林地、建设用地、草地、水域和未利用地。1990—2018 年安徽省耕地在所有地类中面积减少最多,共减少 4 499.79 km²。其次林地也减少 392.63 km²,主要减少地区为皖西大别山和皖南山区。建设用地相较于 1990 年增加 3.24%,增幅最大,共增加 4 546.98 km²。水域面积增加 317.66 km²,主要由于近年来退田还湿和引江济淮工程等实施导致水域面积增加。得益于退耕还草工程,草地面积也增加 6.59 km²。此外,未利用地在 2010—2018 年增加 22 km²,

主要分布在铜陵、合肥中部、安庆东北部和六安西北部。

从表 3 可以看出,1990—2018 年安徽土地利用变化导致碳储量总量减少 12.27×10⁶ t,其中土壤碳储量减少 9.74×10⁶ t,植被碳储量减少 2.54×10⁶ t。从不同地类来看,耕地和林地转出使得碳储量大量减少,共计减少 18.12×10⁶ t。由于 28 年间大量耕地转为建设用地,共减少 9.47×10⁶ t 碳;其次,林地转为建设用地导致碳储量减少 0.67×10⁶ t。耕地转为林地;草地转为林地和耕地;水域转为耕地、林地、草地、建设用地;建设用地转为耕地均有利于碳存储,而耕地、林地转为建设用地和未利用地均不利于碳储量的增加。耕地、林地和草地转为建设用地均使植被碳储量大量减少;耕地转为建设用地是碳储量减少的主要原因,占损失碳储量的 77.17%。28 年间,未利用地主要由耕地转移而来,且未转移成其他用地,所以几乎未引起碳储量变化。

2.4 不同情景下安徽省碳储量预测

应用 PLUS 模型从自然发展情景和生态保护情景预测安徽省 2034 年、2050 年土地利用变化,再结合 InVEST 模型计算出安徽省 2034 年、2050 年 2 种情境下的碳储量并分析其变化情况(图 7)。自然发展情景下 2034 年、2050 年碳储量分别为 1 197.93×10⁶,1 196.08×10⁶ t,较 2018 年分别减少 8.25×10⁶,10.1×10⁶ t;而在生态保护情景下 2034 年、2050 年碳储量分别为 1 202.89×10⁶,1 200.37×10⁶ t,较自然发展情景均增长约 4.63×10⁶ t。说明生态保护情景下碳储量较自然情景增长显著,且 2034 年生态保护情境下较 2018 年碳储量具有回升态势。从 2 种变化

情景空间分布变化来看,因耕地持续被侵占,自然发展情境下皖北、皖中地区碳储量减少明显;而生态保护情境下固碳区域面积显著增加,说明有效保护生态能够提高生态系统碳储量。通过 ArcGIS 分析后,从固碳面积增减来看,自然发展情景碳储量减少区面积

为 4 032 km²,增加区面积为 642 km²,分别占总面积的 2.88%,0.46%;而生态保护情境下碳储量减少区面积为 337 km²,增加区面积为 2 648 km²,分别占总面积的 0.24%,1.89%。采取生态保护措施后固碳区面积比例增加,碳储量呈现上升趋势。

表 2 1990—2018 年安徽省土地利用变化

土地利用 类型	1990 年		2000 年		2010 年		2018 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	81672.12	58.28	80675.76	57.57	78906.69	56.31	77172.33	55.07
林地	32485.39	23.18	32289.89	23.04	32209.50	22.98	32092.76	22.90
草地	8286.59	5.91	8354.64	5.96	8319.22	5.94	8293.18	5.92
水域	7168.33	5.12	7192.54	5.13	7282.54	5.20	7485.99	5.34
建设用地	10517.30	7.51	11616.90	8.29	13412.35	9.57	15064.28	10.75
未利用地	5.88	0	5.88	0	5.33	0	27.08	0.02

表 3 1990—2018 年安徽省土地利用类型转化及其引起的碳储量变化

土地利用 类型转换	面积/ km ²	植被碳	土壤碳储量	碳储量	小计/ 10 ⁶ t
		储量变化/ 10 ⁶ t	变化/ 10 ⁶ t	变化/ 10 ⁶ t	
耕地—林地	718	2.63	−1.87	0.76	−14.90
耕地—草地	154	0.18	−0.56	−0.38	
耕地—水域	625	−0.14	−5.62	−5.76	
耕地—建设用地	4896	−1.12	−8.35	−9.47	
耕地—未利用地	10	0	−0.05	−0.05	−3.22
林地—耕地	728	−2.66	1.89	−0.77	
林地—草地	428	−1.07	−0.49	−1.56	
林地—水域	21	−0.08	−0.13	−0.21	
林地—建设用地	222	−0.86	0.19	−0.67	1.42
林地—未利用地	2	0	−0.01	−0.01	
草地—耕地	221	−0.25	0.83	0.58	
草地—林地	256	0.64	0.29	0.93	
草地—水域	22	−0.03	−0.12	−0.15	3.33
草地—建设用地	94	−0.13	0.19	0.06	
草地—未利用地	2	0	0	0	
水域—耕地	276	0.06	2.48	2.54	
水域—林地	22	0.09	0.14	0.23	1.12
水域—草地	14	0.02	0.07	0.09	
水域—建设用地	61	—	0.44	0.44	
水域—未利用地	8	—	0.03	0.03	
建设用地—耕地	678	0.15	1.16	1.31	−12.25
建设用地—林地	11	0.04	−0.01	0.03	
建设用地—草地	5	0	−0.01	0	
建设用地—水域	31	—	−0.22	−0.22	
建设用地—未利用地	1	—	0	0	
总计	9 506	−2.53	−9.73		

3 讨论

3.1 安徽省碳储量估算影响分析

生态系统碳储量受到环境水热状况、人类活动、植被生长等多因子的综合影响^[25],采用模型模拟的方法能

更好地进行碳储量的大尺度估算,可为“双碳”目标下的生态空间格局优化提供科学参考。InVEST 模型 Carbon 模块估算生态系统碳储量主要取决于碳密度数据的可靠性和土地利用数据的精度。所以本研究通过对比 1 km 和 30 m 的土地利用数据发现,每期碳储量相差约 0.35×10⁶ t 碳,说明精确评估生态系统碳储量还需更高精度的数据以减少误差。

从碳密度数据上看,以往研究多利用公式修正、采用全国尺度下或者邻近区域得到其研究区碳密度,而本研究的碳密度数据主要来自于前人针对安徽省不同生态系统的实测数据,具有一定的可靠性。从土地利用类型变化上看,安徽省碳储量由 1990 年的 1 218.37×10⁶ t 下降到 2018 年的 1 206.18×10⁶ t,呈现逐年下降趋势,生态系统碳汇能力持续下降。张中浩等^[26]研究发现,安徽省生态系统保护滞后于社会经济发展速度,损害自然生态系统服务功能,可与本研究结果相互印证。吴楠等^[27]研究表明,安徽省 1995—2018 年生境质量有所下降,其中皖北皖中地区生境质量较差,本研究同样也发现,皖北皖中地区建设用地大肆侵占耕地导致碳流失。安徽省地处华东腹地,农业资源丰富,是典型的农业大省。自退耕还林还草还湿工程实施以来,耕地面积不断减少。并且随着城市化的快速发展,耕地荒废以及转为建设用地现象严重。通过本研究发现,安徽省碳储量主要集中在耕地和林地,耕地退化是造成碳流失的原因之一。林地属于高碳密度的生态用地,安徽省自生态工程实施以来成效显著,但林地面积和碳储量依旧持续减少,主要原因是城市化的快速发展以及风景区开发旅游项目、建立度假村,同时山区仍存在伐木毁林开垦以及围湖造田现象致使碳储量大量流失。

从碳储量贡献度上看,已有研究^[28]表明,2010s 中国

0—100 cm 土层土壤碳储量为 $(86.50 \pm 8.71) \times 10^9$ t 碳, 本研究中安徽省 0—100 cm 土层土壤碳储量约为 1.06×10^9 t 碳, 与前人^[18]研究结果较为接近, 约为全国土壤碳储量的 1.23%, 说明安徽省在碳汇方面仍具有很大的固

碳潜力。本研究发现, 耕地、林地、建设用地、草地、未利用地和水域对安徽省碳储量贡献度依次降低。其中安徽省耕地和林地的碳储量, 占总碳储量的 86.33%, 对全国碳储量贡献分别约为 4.69% 和 1.15%。

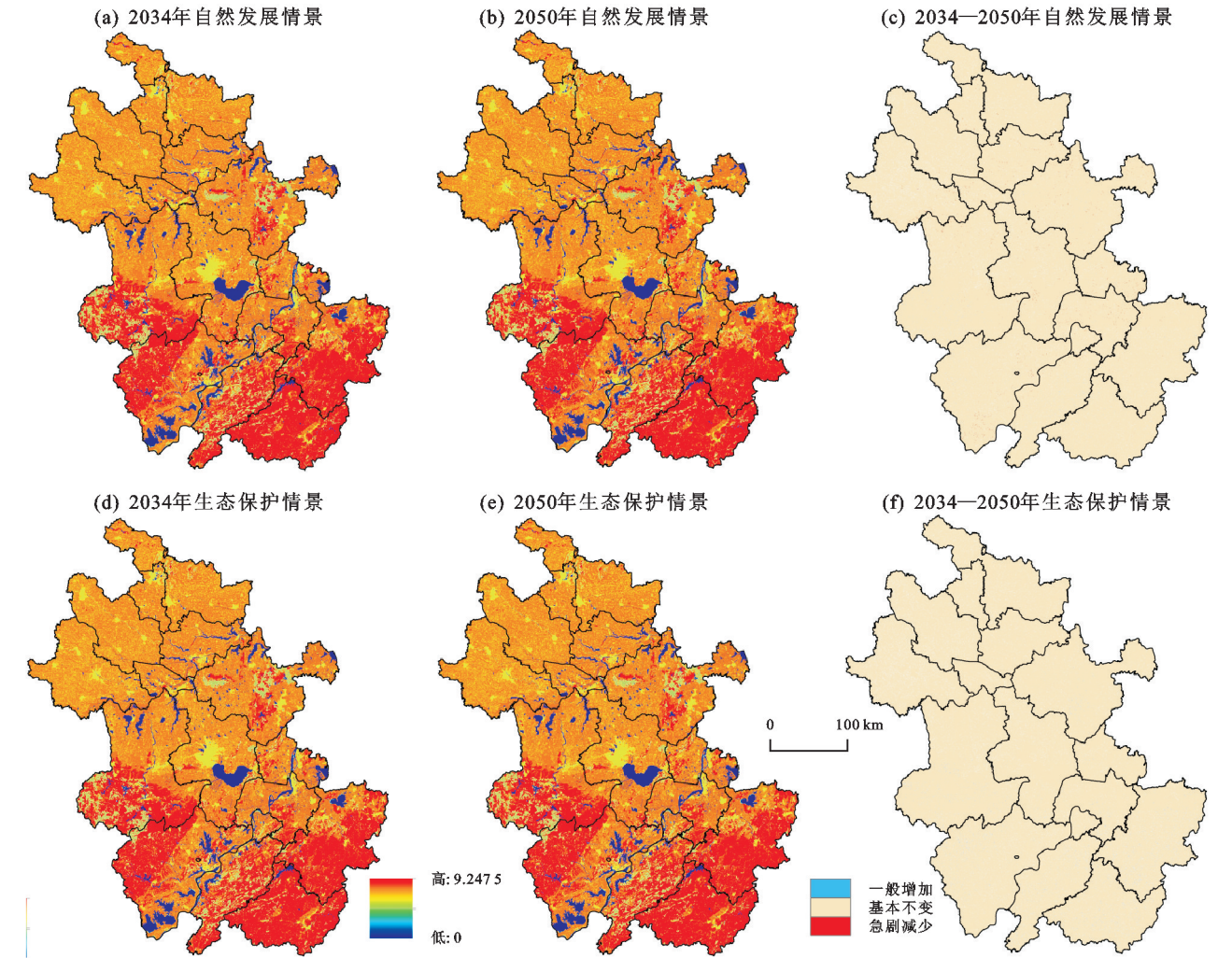


图 7 安徽省 2034 年、2050 年自然发展情景和生态保护情景下碳储量

从未来情景预测上看, 安徽省生态系统碳汇能力呈现减弱态势, 自然发展情景下碳汇能力持续减弱, 生态保护情景下碳储能力提升, 由于省内土地利用类型中耕地面积占比最大而生态保护情景下重在提高森林、草地高碳密度地类面积, 不能有效控制耕地面积的减少。因此, 今后应考虑耕地保护和生态保护下的碳储存, 低质量耕地采取退耕还林还草, 以及加强对未利用地的生态修复。

3.2 不确定性分析

本研究采用耦合 InVEST 模型和 PLUS 模型对未来碳储量格局进行模拟, 在一定程度上能说明碳储量未来变化趋势, 但在进行未来土地利用变化模拟时未综合考虑气候、社会经济、土地规划和生态保护红线等的影响, 使得模拟结果存在一定不确定性。其次, 本研究所使用的碳密度并未考虑不同地类的碳密度年际变化, 使得碳储量的变化主要由各用地类型相互转移而来。

综上, 本文研究结果虽不能综合反应所有因素对生态系统碳储量的影响, 但能揭示碳储量变化趋势, 为安徽省可持续发展和建立生态省提供科学参考。

4 结论

(1) 1990—2018 年安徽省碳储量由 $1\,218.37 \times 10^6$ t 下降到 $1\,206.18 \times 10^6$ t, 呈现逐年减少趋势, 受城市化和人类活动等多种干扰影响导致固碳能力降低。未来在保耕育林、优化城市生态空间格局等生态治理上具有很大的碳汇潜力。

(2) 安徽省的碳储能力与土地利用变化密切相关, 耕地是安徽省主要的土地利用类型, 碳储量最高, 其次为林地。二者是安徽省主要的固碳地类。但建设用地不断侵占耕地和林地, 导致高碳密度地类向低碳密度地类转化导致碳储量减少, 这是安徽省碳储能力持续下降的主要原因。总体来看, 耕地、林地、建设

用地、草地、未利用地和水域对安徽省碳储量贡献度依次降低。

(3)2034 年、2050 年自然发展和生态保护情景下碳储量分别为 $1\,197.93\times10^6$ 、 $1\,196.08\times10^6$ t 和 $1\,202.89\times10^6$ 、 $1\,200.37\times10^6$ t,自然发展情景碳储量继续减少,而生态保护情景下碳储量增加,生态保护情景下森林、草地高碳密度地类面积增加以及有效减缓城市扩张,从而增强安徽省生态系统碳储能力。

参考文献:

[1] Zhu G F, Qiu D D, Zhang Z X, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China [J].Ecological Indicators,2021, 127:e107770.

[2] Li J S, Guo X M, Chuai X W, et al. Reexamine China's terrestrial ecosystem carbon balance under land use-type and climate change [J]. Land Use Policy, 2021, 102: e105275.

[3] 杨玉海,陈亚宁,李卫红,等.塔里木河干流土地利用/覆被变化对土壤有机碳储量的影响[J].中国环境科学, 2016,36(9):2784-2790.

[4] 黄从红,杨军,张文娟.生态系统服务功能评估模型研究进展[J].生态学杂志,2013,32(12):3360-3367.

[5] Lyu R F, Mi L N, Zhang J M, et al. Modeling the effects of urban expansion on regional carbon storage by coupling SLEUTH-3r model and InVEST model [J]. Ecological Research,2019,34(3):380-393.

[6] 赫晓慧,徐雅婷,范学峰,等.中原城市群区域碳储量的时空变化和预测研究[J].中国环境科学 2022,42(6): 2965-2976.

[7] 张斌,李璐,夏秋月,等.“三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响:以武汉城市圈为例[J].生态学报, 2022,42(6):2265-2280.

[8] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1018-1029.

[9] 蒋小芳,段翰晨,廖杰,等.基于 PLUS-SD 耦合模型的黑河流域中游甘临高地区土地利用研究[J].干旱区研究, 2022,39(4):1246-1258.

[10] 林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及预测:以广东省为例[J].中国环境科学,2022,42(10):4827-4839.

[11] 华文剑,陈海山,李兴.中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述[J].地球科学进展,2014,29(9): 1025-1036.

[12] 李爱琴,王会荣,王晶晶,等.安徽省森林植被碳储量、碳密度动态及固碳潜力[J].江西农业大学学报,2019, 41(5):953-962.

[13] 陈富荣,梁红霞,邢润华,等.安徽省土壤固碳潜力及有机碳汇(源)研究[J].土壤通报,2017,48(4):843-851.

[14] 王绮,魏冶.基于非经济生物量的中国耕地碳汇空间分布研究[J].资源开发与市场,2017,33(8):928-932.

[15] 周杰,张学儒,牟风云,等.基于 CA-Markov 的土壤有机碳储量空间格局重建研究:以泛长三角地区为例 [J].长江流域资源与环境,2018,27(7):1565-1575.

[16] 修晓敏,周淑芳,陈黔,等.基于 Google Earth Engine 与机器学习的省级尺度零散分布草地生物量估算[J].测绘通报,2019(3):46-52,75.

[17] 徐丽,何念鹏,于贵瑞.2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J].中国科学数据(中英文网络版),2019,4(1): 90-96.

[18] 赵明松,李德成,张甘霖,等.1980—2010 年安徽省土壤有机碳密度及储量时空变化分析[J].地理研究,2018, 37(11):2206-2217.

[19] Mokany K, Raison R J, Prokushkin A S. Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes [J]. Global Change Biology,2006,12(1):84-96.

[20] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J].Journal of Arid Environments,2013,89:67-76.

[21] 喇露梦,勾蒙蒙,李乐,等.三峡库区生态系统服务权衡时空动态与情景模拟:以秭归县为例[J].生态与农村环境学报,2021,37(11):1368-1377.

[22] 张燕,师学义,唐倩.不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估[J].生态学报,2021,41(1):360-373.

[23] Liang X, Guan Q F, Clarcec K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J].Computers, Environment and Urban Systems,2021,85:e101569.

[24] 王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置:以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例[J].生态学报,2019,39(12):4284-4298.

[25] 柯新利,唐兰萍.城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响:以湖北省为例[J].生态学报,2019, 39(2):672-683.

[26] 张中浩,聂甜甜,高阳,等.长江经济带生态系统服务与经济社会发展耦合协调关联时空特征研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(5):1086-1100.

[27] 吴楠,陈红枫,冯朝阳,等.基于土地覆被变化的安徽省生境质量时空演变特征[J].长江流域资源与环境, 2020,29(5):1119-1127.

[28] 徐丽,于贵瑞,何念鹏.1980s—2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J].地理学报,2018,73(11): 2150-2167.