

基于 PLUS-InVEST 模型的安徽省 碳储量时空变化预测

汪勇政^{1,2}, 徐雅利¹, 余浩然³

(1.安徽建筑大学 建筑与规划学院, 安徽 合肥 230601;

2.安徽省城镇化发展研究中心, 安徽 合肥 230601; 3.南京林业大学 风景园林学院, 江苏 南京 210042)

摘 要: [目的] 分析安徽省 2000 年以来碳储量的时空变化及空间分布特征, 为未来该区土地管理决策和生态系统碳库管理提供有效指导。[方法] 以安徽省为例, 基于 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年 5 期土地利用数据, 采用 PLUS 模型模拟 2030, 2040 年不同情景下土地利用格局, 并运用 InVEST 模型定量评估不同情景下陆地生态系统碳储量的空间变化。[结果] ①2000—2020 年安徽省约有 8.03% 土地发生了转移, 耕地与建设用地之间的转化是该省土地利用变化的主要特征。②2000—2020 年陆地生态系统碳储量总体呈下降趋势, 下降了 1.01×10^8 t。空间格局上呈现“南高北低”的特征, 碳密度高值区主要分布在皖南、皖西山区。③2020—2040 年自然发展情景下碳储量下降趋势明显, 耕地保护情景下降速度有所减缓, 生态保护情景下碳储量明显增加, 增量为 3.07×10^7 t。[结论] 实施生态保护政策能够有效提高区域生态系统碳储量, 增强生态系统服务功能。未来在进行土地利用管理决策时应统筹考虑生态保护和耕地保护, 促进区域生态系统良性可持续发展。

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

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0277-13

中图分类号: X171.1, S157.4

文献参数: 汪勇政, 徐雅利, 余浩然. 基于 PLUS-InVEST 模型的安徽省碳储量时空变化预测[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 277-289. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.032; Wang Yongzheng, Xu Yali, Yu Haoran. Prediction of spatial and temporal changes of carbon stocks in Anhui Province based on PLUS-InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 277-289.

Prediction of Spatial and Temporal Changes of Carbon Stocks in Anhui Province Based on PLUS-InVEST Model

Wang Yongzheng^{1,2}, Xu Yali¹, Yu Haoran³

(1.School of Architecture and Planning, Anhui University of Architecture, Hefei,

Anhui 230601, China; 2.Anhui Urbanization Development Research Center, Hefei, Anhui 230601,

China; 3.School of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210042, China)

Abstract: [Objective] The spatio-temporal variation and spatial distribution of carbon stocks since 2000 were analyzed in order to provide effective guidance for land management decision-making and ecosystem carbon pool management in Anhui Province in the future. [Methods] The PLUS model was used with land use data in Anhui Province over five periods (2000, 2005, 2010, 2015, 2020) to simulate land use patterns under different scenarios in 2030 and 2040. The InVEST model was applied to quantitatively assess the spatial changes of carbon stocks in terrestrial ecosystems under different scenarios. [Results] ① Approximately 8.03% of the land changed classification from 2000 to 2020, and the change between cultivated land and construction land was the fundamental element of land use change in Anhui Province. ② Between 2000 and 2020, the total amount of carbon stored in terrestrial ecosystems decreased by 1.01×10^8 t. High values of carbon density

收稿日期: 2022-11-06

修回日期: 2023-01-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“‘古徽州’传统聚落空间网络特征、形成机制及对乡村规划的启示”(51678001); 安徽省高校省级人文社会科学基金项目“基于人才支援的皖西大别山区传统村落可持续发展研究”(SK2020A0257)

第一作者: 汪勇政(1979—), 男(汉族), 安徽省怀宁人, 博士研究生, 副教授, 主要从事城乡规划、土地资源与 GIS 相关研究。Email: rocky-hust@126.com。

were primarily found in the hilly regions of Southern and Western Anhui Province. The spatial distribution of carbon density exhibited a pattern of “high in the south and low in the north.” ③ From 2020 to 2040, carbon stocks for the natural development scenario clearly declined, while the decrease in carbon stocks for the cultivated land preservation scenario slowed down. Carbon stocks for the ecological protection scenario increased significantly, with an increment of 3.07×10^7 t. [Conclusion] Implementing ecological conservation policies can effectively increase carbon stocks of regional ecosystems and enhance ecosystem service functions. Ecological conservation and cultivated land protection should be considered in future land use management decisions to promote the environmentally harmless and sustainable development of regional ecosystems.

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

工业革命以来,二氧化碳大量排放导致全球气候变暖愈加严重,引起了一系列气候灾害问题,严重影响了人类生存和社会经济发展^[1-5]。中国为提高国家自主贡献度明确提出了“双碳”战略目标。研究表明,提高陆地生态系统碳储量能够有效减少大气 CO₂ 含量,是助力“双碳”目标最经济可行和最环保的方式之一^[5-8]。土地利用是影响陆地生态系统碳储量的主要人为驱动因子^[9-11]。随着城市的快速发展,中国土地利用方式发生明显变化,陆地生态系统的固碳能力也随之改变^[12-14]。因此,探究土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响尤为重要。

近年来,国内外学者基于土地利用变化对陆地生态系统碳储量进行了大量研究^[8,15-18]。就研究方法来看,传统的碳储量评估方法主要有资源清查、通量观测、经验统计等,此类估算方法参数较少、操作简便^[19-20],但在大尺度区域中难以实现准确评估,而遥感模型克服了传统碳储量估算方法在空间尺度和时间序列上的限制,兼具数据需求少、实用性强等优势,已被广泛应用于碳储量的研究中^[21-22]。目前,已有学者借助土地利用模拟模型和 InVEST 模型探究土地利用变化对碳储量的影响机制^[14-15]。朱文博等^[9]基于 Markov-CLUE-S 模型研究并预测了太行山淇河流域 2005—2025 年不同情景下生态系统碳储量;刘晓娟等^[23]结合 FLUS-InVEST 模型模拟分析了 2000 年中国陆地生态系统碳储量空间分布;Wang 等^[24]运用 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型分析了中国甘肃省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响。该方法可以清晰揭示土地利用变化与碳储量的关系,定量评估不同土地利用情景下碳储量的空间变化,能够有效指导区域土地利用结构调整^[25]。但既往模型在性能和情景设置上尚有不足,在大尺度区域中的模拟精度有待提高^[26-27]。PLUS 模型耦合了人类活动和环境因素,从斑块级别模拟未来土地利用变化并评估其驱动因素的贡献度,已被证明在大尺度

土地利用模拟中效果更优^[28-30]。在研究范围上,当前研究主要集中在流域、高原、湿地和海岸带等特定尺度的生态敏感区和生态脆弱区^[13-14,22,31]。在研究内容上,多数研究集中在历史土地利用变化和碳储量空间分布^[32],少数学者进行了未来情景下碳储量模拟研究^[23],而结合不同梯度下土地利用及碳储量的分布特征并探究未来情景下碳储量变化并挖掘潜在驱动因素的研究较为少见。

安徽省地貌类型复杂多样且南北差异明显,涵盖平原、丘陵、山地等。区域内丰富的生态资源和农业资源提供了重要的生态服务价值^[33]。然而随着安徽省城镇化步伐加快,城市建设用地需求不断提高导致其土地利用结构及区域生态系统功能产生变化^[34]。因此,本文选取安徽省作为研究区域,依托 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年 5 期土地利用数据及碳密度数据,结合历史土地利用变化特征,运用 PLUS 模型分别模拟预测 2030, 2040 年不同情景下土地利用格局,在此基础上利用 InVEST 模型定量评估不同情景下陆地生态系统碳储量的空间格局,并分析 2000 年以来碳储量的时空变化及空间分布特征,以期对未来安徽省土地管理决策和生态系统碳库管理提供有效指导。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

安徽省位于中国大陆东部,介于东经 114°54′—119°37′,北纬 29°41′—34°38′之间,地跨长江、淮河南北,全省分为淮北平原、江淮丘陵、皖南山区三大自然区域。国土总面积约 140 139 km²,省内水系发达,湖泊众多,地形地貌复杂多样,平原、丘陵、山地类型俱全。安徽地处中纬度地带,在气候上属暖温带与亚热带的过渡地区,年平均气温为 14~17℃,年均降水量为 773~1 670 mm,有南多北少,山区多、平原丘陵少的特点。区域土地肥沃,生物资源繁多,生态环境良好,全省已建成国家级自然保护区 8 个,省级自然

保护区 32 个。地质条件良好,农产品资源丰富,是全国主要的产粮基地(图 1)。

1.2 数据来源

安徽省边界矢量数据来源于标准地图服务系统官网。土地利用类型数据来自武汉大学 1985—2020 中国 30 m 土地覆被数据集(<http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809>),为开源数据,裁剪后得到 2000,2005,2010,2015,2020 5 期安徽省土地利用类型图(图 2),分辨率为 30 m×30 m。人口、GDP、气温、降水、土壤类型数据来自中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn/data>)。距道路距离、距铁路距离、距河流距离和 DEM 数据来源于地理空间数据云,对 DEM 数据进行处理得到坡度栅格数据。碳密度数据来源于国家生态科学数据中心(<http://www.cnern.org.cn/>)并参考前人研究结果进行修正^[19-20,35-37]。

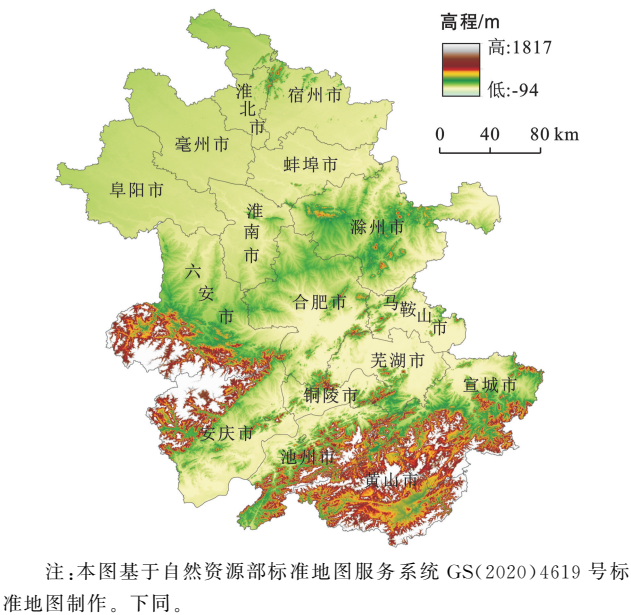
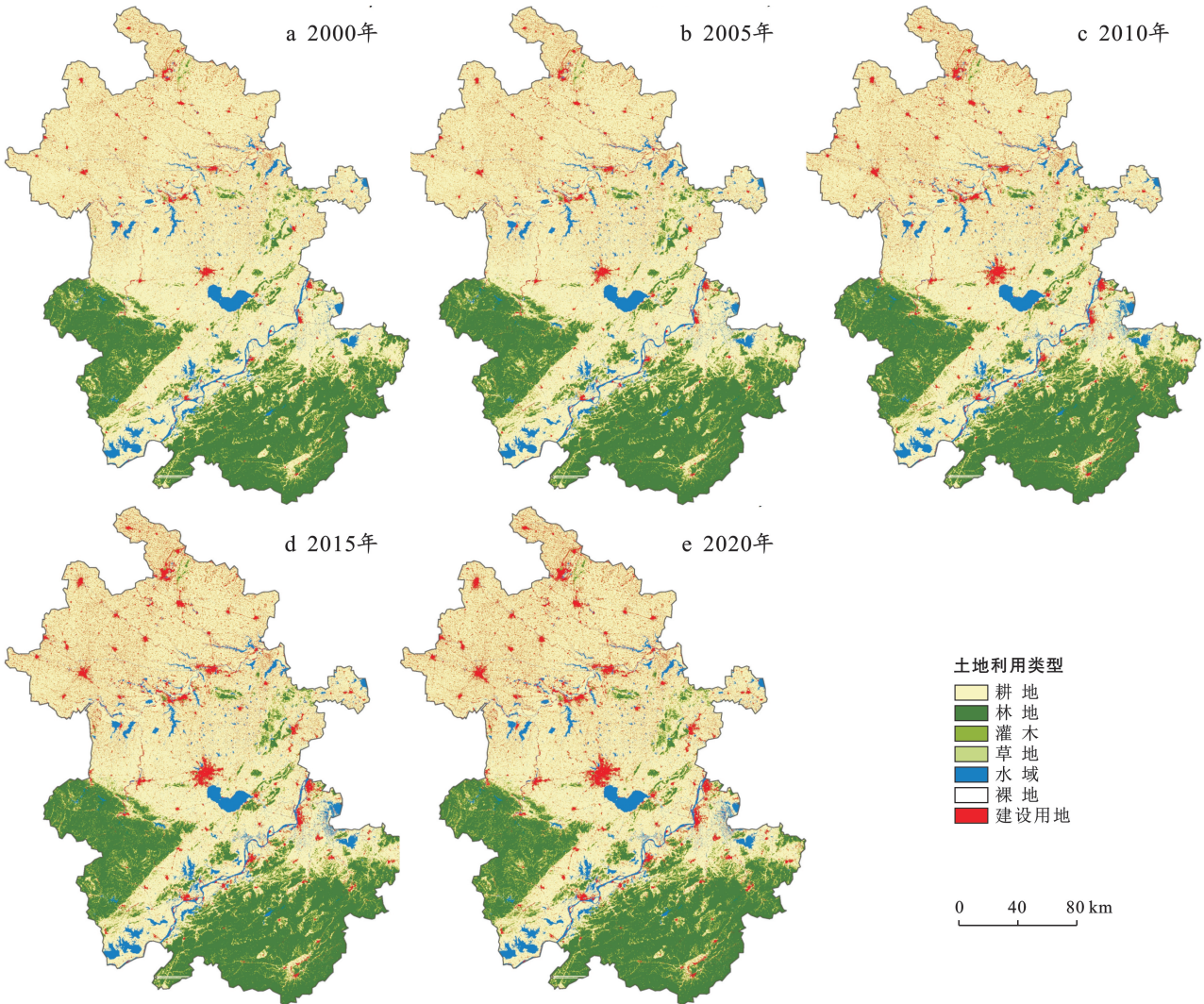


图 1 安徽省政区及高程分布
Fig.1 Distribution of Cities and elevation of Anhui Province



1.3 研究方法

1.3.1 地形分布指数 地形分布指数(P)可以描述不同土地利用类型在不同梯度上的分布情况,并能够消除量纲的影响^[38]。当 $P>1$ 时,表示该土地类型呈优势分布, P 值越大,分布优势越大;当 $P<1$ 时,表示该土地类型呈劣势分布, P 值越小,分布劣势越大。分布指数公式如下:

$$P=\frac{S_{ei} S}{S_i S_e}$$
 (1)

式中: P 为地形分布指数; S_{ei} 为第 i 种土地类型在第 e 梯度的面积; S_i 为第 i 种土地类型的面积; S_e 为第 e 梯度的面积; S 为研究区总面积。

根据安徽省的地形地貌特点及土地分布情况将高程分为 12 个等级(表 1)。将高程 <0 m 和高程 $>1\,000$ m 的单独分级,0~1 000 m 之间以 100 m 为间隔划分等级。

表 1 安徽省高程分级
Table 1 Elevation Grading of Anhui Prvince

高程编号	等级	分级指标/m	面积比例/%
1	低	<0	0.01
2		0~100	73.77
3		100~200	7.80
4	中低	200~300	5.41
5		300~400	3.90
6		400~500	2.90
7	中	500~600	2.05
8		600~700	1.44
9		700~800	0.98
10	高	800~900	0.66
11		900~1 000	0.42
12		$>1\,000$	0.66

1.3.2 基于 PLUS 模型的土地利用变化预测 PLUS 模型是一种可以从斑块级别生成土地利用变化模拟的模型,可以更好地挖掘土地利用的驱动因素及探索可持续的景观布局^[30]。该模型包含用地扩张分析策略 LEAS(land expansion analysis strategy)和基于多类随机斑块种子的 CA 模型 CARS(CA based on multiple random seeds)两大模块^[39]。它应用了一种新的分析策略,可以更好地挖掘各类土地利用变化的诱因,采用随机森林算法捕捉影响土地利用扩张的因素,以获取各类用地的发展概率及驱动因素对各类土地扩张的贡献^[39]。

(1) 影响因子选取。本研究根据前人经验及研究区相关规划政策,从自然环境因素和社会经济因素两方面分别选取了 12 项驱动因子和 1 项限制因子

(图 3)。驱动因子是指对土地利用及土地覆被变化产生影响的主导因素,限制因子是指一定时间内不会发生土地利用类型变化的区域^[40]。本文选取气温、降水量、高程、坡度、土壤类型、GDP 值、人口、距道路距离、距铁路距离和距河流距离作为土地利用变化的驱动因子,水域作为限制因子(图 3)。在 PLUS 模型 LEAS 模块输入驱动因子数据获取所有驱动因子对各类用地扩张的贡献度。

(2) 精度验证。首先基于 2000,2010 年安徽省土地利用数据获取发展概率,然后以 2010 年为基准年运用 PLUS 模型预测 2020 年土地利用结果,将其与安徽省 2020 年实际土地利用数据进行对比,通过精度验证得到总体精度为 0.9,kappa 系数为 0.82,表明 PLUS 模型在安徽省尺度上的模拟准确度较高,适宜性较好,可使用通过验证的规则预测未来年份的土地利用格局。

(3) 多情景设定。根据安徽省保护与发展的需求,本文设定自然增长、生态保护和耕地保护 3 种不同的情景,依据 2000—2020 年土地利用转移矩阵,结合 Markow 模型以 10 a 为步长预测 2030,2040 安徽省的土地利用格局。

①情景一:自然增长情景。该情景下基于 Markow 模型预测结果设置未来土地利用需求,依据 2010—2020 年安徽省各用地类型扩张面积的占比设置邻域权重系数。

②情景二:生态保护情景。该情景主要考虑生态环境的发展。依据安徽省生态环境保护规划目标,以自然发展情景为基础,设置生态用地不可向其他用地转移,同时将水域作为限制区。

③情景三:耕地保护情景。该情景在自然发展情景的基础上,通过限制耕地向其他地类的转移来保障耕地面积,实现耕地保护^[9]。

1.3.3 基于 InVEST 模型的生态系统碳储量评估 InVEST 模型是由自然资本项目开发用于评估多种生态系统服务功能的模型,包括生境质量、碳储量、水源供给等多个评估模块^[32, 41]。其中碳储量模块将生态系统的碳储量划分为 4 个基本碳库:地上生物碳(C_{above})、地下生物碳(C_{below})、土壤碳(C_{soil})和死亡有机碳(C_{dead})。总碳储量的计算公式为:

$$C_{total}=C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead}$$
 (2)

基于各地类的碳密度和土地利用数据,流域内每种土地利用类型的碳储量计算公式为:

$$C_{total_i}=C_{above_i}+C_{below_i}+C_{soil_i}+C_{dead_i}\times A_i$$
 (3)

式中: i 为每种土地利用的平均碳密度; A_i 为该土地利用的面积。

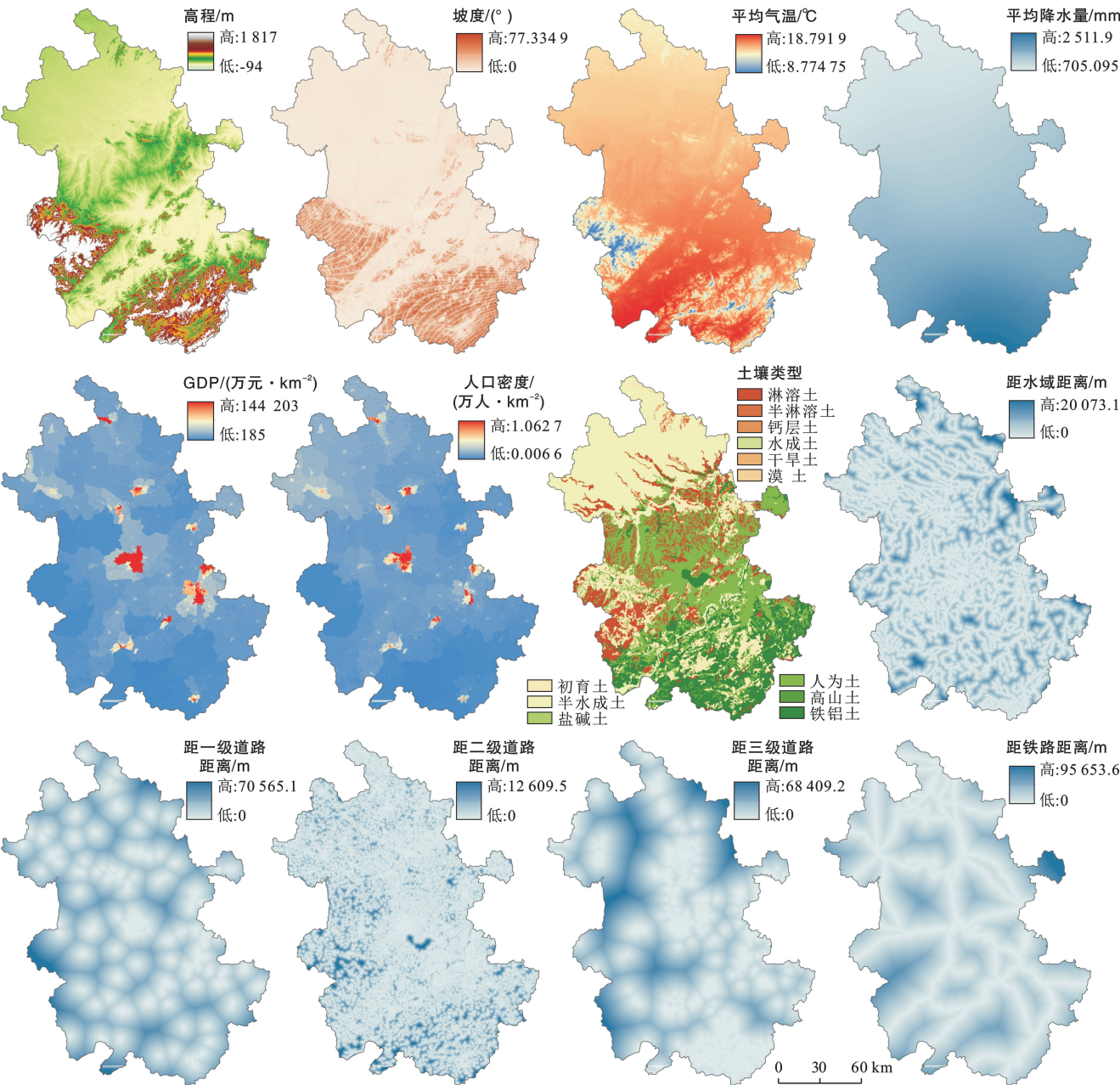


图 3 安徽省碳储量影响因子分布
Fig.3 Distribution of influencing factors of carbon storage in Anhui Province

研究表明碳密度值受气候变化、土壤类型和土地利用类型的影响,故需对其进行修正^[42]。通过查找资料及计算得到全国和安徽省的年均温分别为7.43°,16.53°,降水量分别为611.62,1204.25 mm。根据陈水光等^[36]、Alam^[35]、Giardin 等^[43]研究中生物量碳密度和土壤碳密度分别与年降水量和年均气温的关系模型,修正得到研究区域的碳密度数据(表2)。

$$C_{SP}=3.3968\times P+3996.1\quad(R^2=0.11)\quad(4)$$

$$C_{BP}=6.7981e^{0.00541P}\quad(R^2=0.70)\quad(5)$$

$$C_{BT}=28\times T+398\quad(R^2=0.47,p<0.01)\quad(6)$$

式中: P 表示年均降水量; T 表示年均气温; C_{SP} 表示根据年降水量得到的土壤碳密度; C_{BP} 、 C_{BT} 别为根

据年降水量和年均温得到的生物量碳密度。

$$K_{BP}=\frac{C'_{BP}}{C_{BP}}\quad(7)$$

$$K_{BT}=\frac{C'_{BT}}{C_{BT}}\quad(8)$$

$$K_B=K_{BP}\times K_{BT}\quad(9)$$

$$K_S=\frac{C'_{SP}}{C_{SP}}\quad(10)$$

式中: K_{BP} 和 K_{BT} 分别为生物量碳密度的降水因子和气温因子修正系数; K_B 和 K_S 分别为生物量碳密度修正系数和土壤碳密度修正系数。安徽省的碳密度是全国的碳密度数据与修正系数的乘积。

表 2 安徽省土地利用类型碳密度值				
Table 2 Carbon intensity values of land use types in Anhui Province				
土地利用类型	地上生物碳 C_{above}	地下生物碳 C_{below}	土壤碳 C_{soil}	死亡有机碳 C_{dead}
耕地	19.98	282.94	14.43	0
林地	148.66	406.36	21.14	2.80
灌木	93.26	236.66	12.52	1.59
草地	123.77	303.28	13.30	1.42
水域	1.05	0	0	0
裸地	4.56	0	2.88	0
建设用地	8.77	96.42	0	0

2 结果与分析

2.1 2000—2020 年土地利用动态变化

2.1.1 2000—2020 年土地利用变化特征 图 4 为历史年份安徽省土地利用转移桑基图。整体来说,2020 年安徽省土地利用类型以耕地和林地为主,分别占总面积的 59.52%和 26.1%,其次为建设用地和水域,占总面积的 9.36%和 5.0%,而灌木、草地和裸地的面积

较少,不足总面积的 1%。2000—2020 年安徽省约有 11 256.62 km² 土地发展了转移,占总面积的 8.03%。其中,耕地和草地面积呈减少趋势,分别减少了 5.88%和 71.74%;建设用地扩张趋势明显,面积增加了 54.42%;水域和林地面积分别增加了 5.63%和 0.90%。

由图 4 可知:①2000—2020 年安徽省耕地的转出面积为 7 993.40 km²,主要转为建设用地,面积为 4 541.99 km²,占耕地转出面积的 56.82%。转入面积仅 2 780.42 km²,约为转出面积的三分之一。②耕地的主要来源为林地,林地转为耕地的面积为 1 821.11 km²,占耕地转入面积的三分之二。③建设用地呈扩张趋势,转入面积(4 826.23 km²)远超转出面积(205.59 km²),且主要转入者是耕地,占各地类转入建设用地面积的 94.11%。④近 20 a 间,水域面积增加了 373.16 km²,有 87.96%来源于耕地。草地主要流向耕地,转出面积(102.37 km²)是转入面积(7.78 km²)的 10 倍多。综上可知,耕地与林地、建设用地及水域之间的转化是安徽省土地利用变化的主要特征。

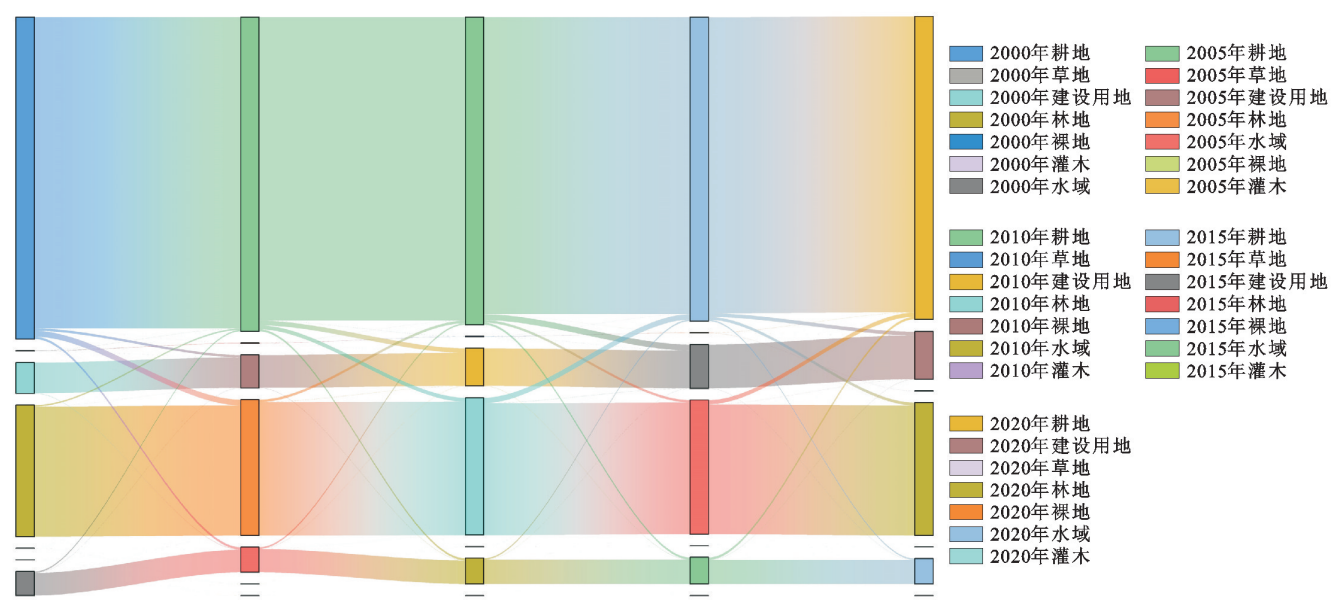


图 4 2000—2020 年安徽省土地利用转移桑基图
Fig.4 Land use transfer Sankey map of Anhui Province during 2000—2020

2.1.2 基于高程梯度的土地利用类型分布特征 由图 5 可知,在 2000—2020 间,安徽省林地的地形分布指数仅在高程梯度 1—2(<100 m)时小于 1,处于劣势分布区,而在高程梯度 3—12(100~1 817 m)时地形分布指数均大于 1,且随海拔高度的增加而缓慢上升,这可能与封山育林等生态保护政策的实施有关。耕地的分布优势区稳定在 100~200 m 间,而在海拔小于 100 时虽然处于劣势分布区,但分布指数呈逐年增加趋势。灌木在海拔 300~400 m 间仅在 2000 年

呈优势分布,而在 2000 年之后呈劣势分布且分布指数不断降低。草地的分布优势区主要在梯度 3,4,12 上,2015 年后新增了梯度 11(海拔 900~1 000 m),2020 年又新增高程梯度 9—10(700~900 m)。2000—2020 年,水域在海拔小于 100 的地区处于优势分布区,且在海拔小于 0 时分布指数最大。建设用地的地形分布指数在高程梯度 1—2(<100 m)时均大于 1,呈优势分布,但到 2020 年时在梯度 1 上的分布指数由 2000 年的 2.17 逐渐减少到 0.92,转为劣势

分布。2000—2005 年裸地在第 2 梯度上表现为优势分布,到 2010 年后新增了一个优势分布区,为梯度 3,其分布指数由 2005 年的 0.17 上升到 2010 年 2.62,而到 2015 年之后裸地在梯度 2 转为劣势分布。

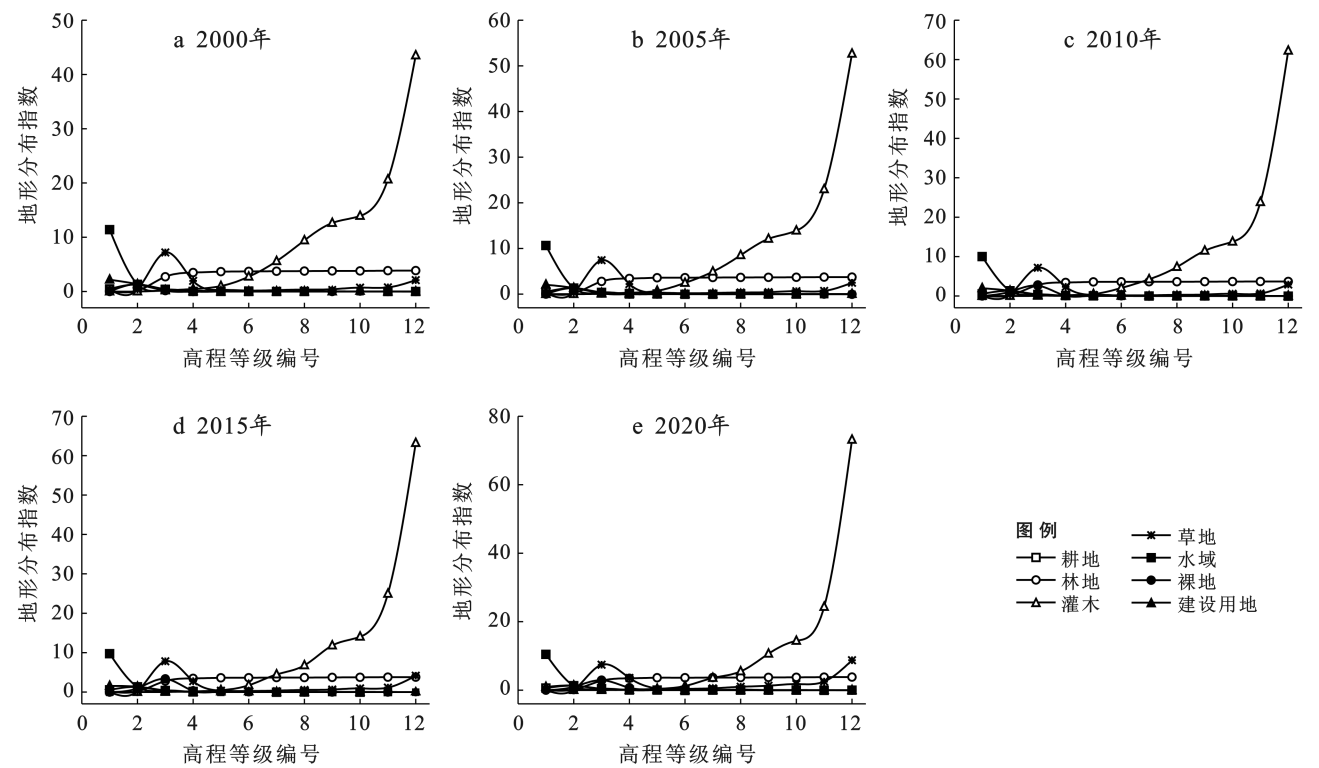


图 5 2000—2020 年安徽省不同高程土地利用类型分布指数

Fig.5 Distribution index of land use types at different elevations in Anhui Province during 2000—2020

2.2 未来土地利用变化情景分析

表 3,图 6 展示了 2030 年和 2040 年不同情景下安徽省土地利用预测结果。总体来说,在自然发展情景下,2030,2040 年安徽省耕地、林地、灌木和草地面积明显减少,建设用地面积不断增加,表现为建设用地侵占耕地及林地等生态用地。在耕地保护情景下,侵占耕地现象得到有效控制,耕地面积呈增加趋势;林地、草地等生态用地则在生态保护情景下取得有效保护,林地面积明显增加。

具体来说,在自然发展情景下,安徽省 2040 年耕地、林地预计比 2020 年分别减少了 2 658.35,

2 356.8 km²,建设用地面积预计比 2020 年增加 4 898.91 km²,城市扩张趋势明显;草地等生态用地面积减少,而水域面积增加。在耕地保护情景下,由于加强了对耕地的保护,耕地面积明显增加,2020—2040 年耕地增加了 2 370.28 km²,同时建设用地扩张得到有效遏制,但林地依然呈显著下降态势。在生态保护情景下,受生态环境保护政策的影响,安徽省生态用地得到有效保护;2020—2040 年林地、水域面积显著上升,增量分别为 1 421.13 km² 和 203.39 km²,灌木及草地面积下降趋势明显减缓,生态环境保护策略取得一定成效。

表 3 不同情景安徽省各地类面积						
Table 3 Area of each land category in Anhui Province under different scenarios						
土地利用类型	面积分布(自然发展情景)		面积分布(生态保护情景)		面积分布(耕地保护情景)	
	2030 年	2040 年	2030 年	2040 年	2030 年	2040 年
耕地	82 078.66	80 741.99	82 278.33	81 785.51	84 618.19	85 770.63
林地	35 363.55	3 4212.31	37 549.04	37 990.24	35 363.55	34 212.31
灌木	2.363 4	1.924 2	2.363 4	1.924 2	2.363 4	1.924 2
草地	18.453 6	12.120 3	31.226 4	29.053 8	18.453 6	12.120 3
水域	7 088.652	7 143.94	7 149.84	7 204.15	7 002.96	7 005.155
裸地	1.028 7	0.895 5	1.028 7	0.895 5	1.028 7	0.895 5
建设用地	15 571.16	18 010.68	13 112.03	13 112.09	13 117.32	13 120.83

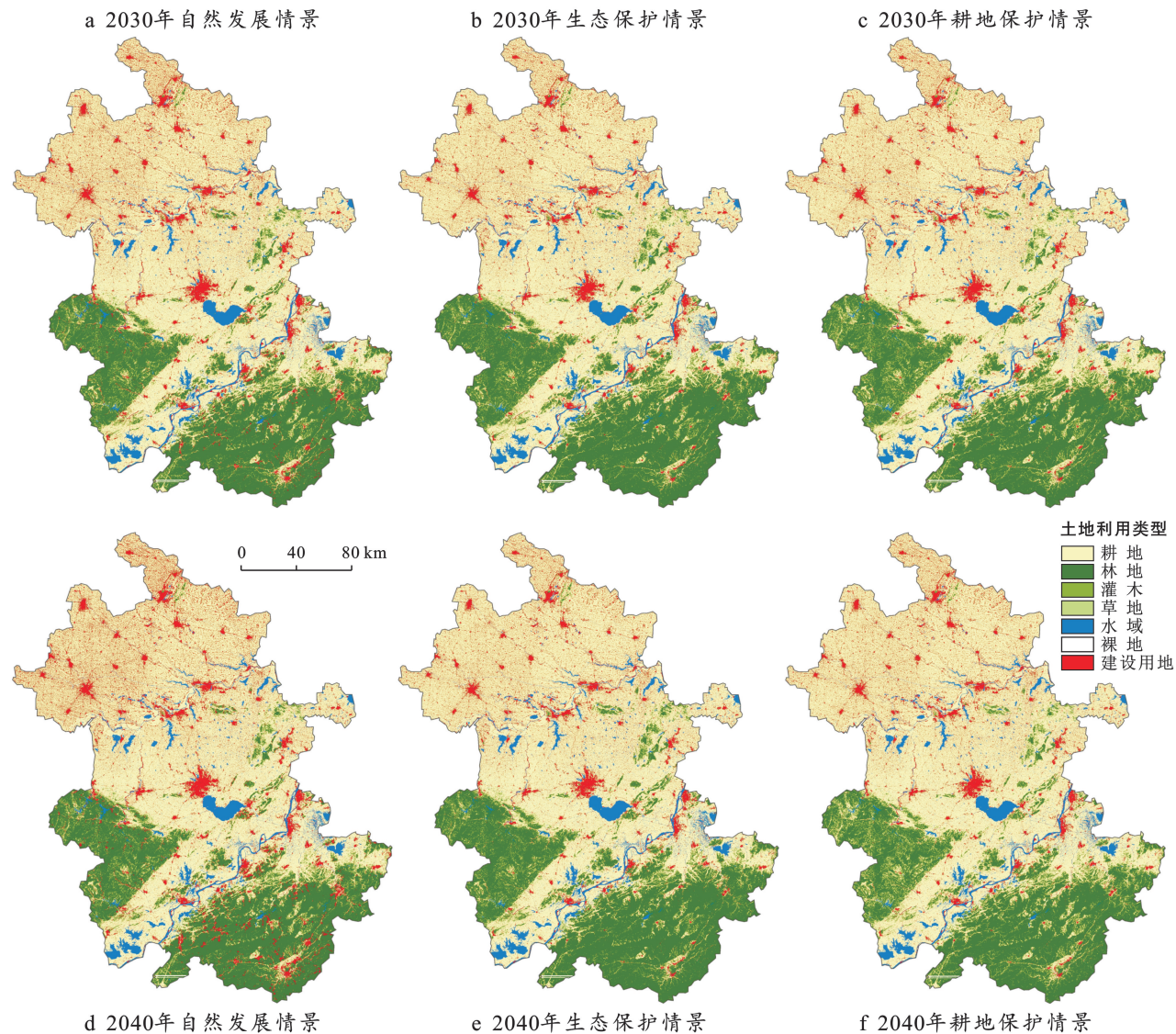


图 6 不同情景下安徽省土地利用空间分布

Fig.6 Spatial distribution of land use in Anhui Province under different scenarios

2.3 2000—2020 年碳储量动态变化

2.3.1 2000—2020 碳储量变化特征 利用 INVEST 模型分别计算安徽省 2000,2005,2010,2015,2020 年 5 期的碳储量并分别预测在自然发展情景、生态保护情景和耕地保护情景下 2030,2040 年的碳储量。安徽省 2000,2005,2010,2015,2020 年的碳储量分别为 5.01×10^9 , 5.01×10^9 , 4.99×10^9 , 4.92×10^9 , 4.90×10^9 t, 呈现出“先增加后减少”的变化状态。其中, 2000—2005 年碳储量增加了 8.24×10^6 Mg, 2005—2010, 2010—2015, 2015—2020 年 3 个阶段碳储量逐渐减少, 减幅分别为 2.24×10^7 , 6.58×10^7 , 2.21×10^7 t, 总体上 2020—2020 年安徽省碳储量减少了 1.01×10^8 t。

2.3.2 基于高程梯度的碳储量变化特征 图 7 为不同高程梯度上的碳储量分布。可以看出, 2000—2020 年安徽省碳储量变化量随着海拔高度的上升而

下降。2000—2020 年, 在低海拔梯度下 (<200 m) 安徽省碳储量明显减少, 减量为 9.82×10^7 t, 约占总减少量的 97.04%, 其中地下生物碳储量下降最为显著, 这可能与该梯度下土地开发建设及人类的剧烈活动相关。在中低海拔梯度下 ($200\sim500$ m) 2000—2020 年碳储量逐渐减少, 减量为 1.87×10^6 t, 仅占总减少量的 1.88%, 相较于低海拔梯度下的变化程度明显减弱; 而在中高海拔梯度下, 由于受地形影响, 人类活动受限, 土地利用结构无较大变化, 碳储量相对稳定。

2.4 不同情景下碳储量变化特征

由表 4 可知, 在自然变化情景下, 安徽省 2030, 2040 年的碳储量预测分别为 4.82×10^9 , 4.73×10^7 t, 2020—2030, 2030—2040 年分别减少了 8.67×10^7 , 8.37×10^7 t。减幅分别为 1.77% 和 1.74%; 整体上 2020—2040 年碳储量下降了 1.70×10^8 t。在耕地保

护情景下,安徽省 2030,2040 年碳储量预测结果分别为 4.87×10^9 , 4.84×10^9 t,2040 年碳储量预计比 2020 年减少 6.21×10^7 t,平均每年约减少 3.10×10^6 t。该情景下碳储量仍呈下降趋势,但下降程度相比自然

发展情景明显减慢。而在生态保护情景下,安徽省碳储量明显上升,2030 年和 2040 年的碳储量分别为 4.93×10^9 t 和 4.94×10^9 t,相较于 2020 年分别增加了 2.09×10^7 t 和 3.07×10^7 t。

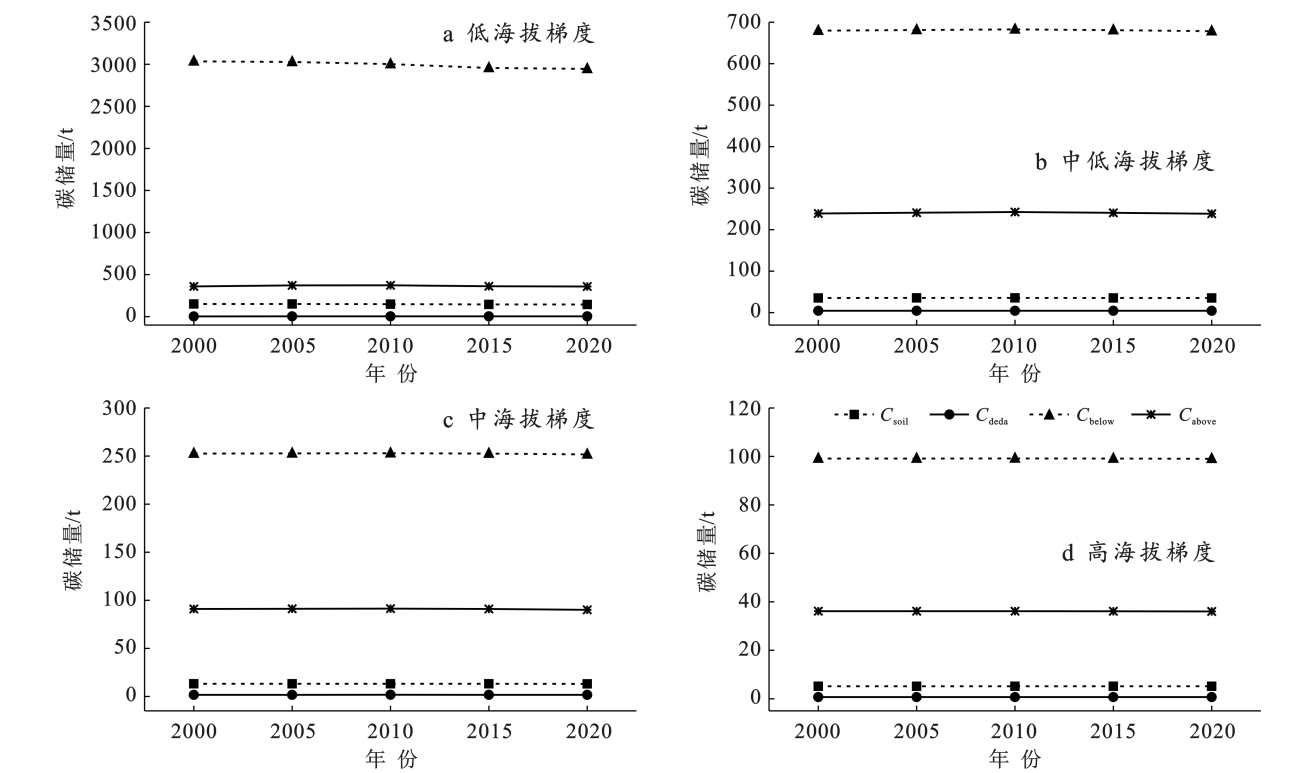


图 7 2000—2020 年不同高程梯度下安徽省碳储量分布

Fig.7 Carbon stock distribution in Anhui Province under different elevation gradients during 2000—2020

表 4 2000—2040 年不同情景下安徽省碳储量及变化量								
Table 4 Carbon stocks and changes in Anhui Province under different scenarios during 2000—2020								
模拟情景	碳储量/ 10^7 t				碳储量变化/ 10^7 t			
	2000 年	2020 年	2030 年	2040 年	2000—2020 年	2020—2030 年	2030—2040 年	2020—2040 年
自然发展	500.64	490.43	481.76	473.39	−10.21	−8.67	−8.37	−17.04
生态保护	500.64	490.43	492.52	493.50	−10.21	2.09	0.98	3.07
耕地保护	500.64	490.43	487.24	484.20	−10.21	−3.19	−2.94	−6.13

结果显示,在自然发展和耕地保护情景下安徽省 2030,2040 年碳储量的预测均呈现不同程度的下降趋势。耕地保护情景下碳储量的下降速度较自然变化情景下略有减缓,这说明实施耕地保护政策通过限制耕地转移可以有效减慢碳储量下降。而在生态保护情景下碳储量呈现显著增加态势,这说明通过实施生态环境保护措施可以有效增强陆地生态系统的固碳能力。在空间分布上,安徽省碳储量的空间异质性明显,碳储量高值区主要位于皖西大别山和皖南山区,该区域主要为林地,具有较强的固碳能力。碳储量低值区主要分布在皖北平原和皖中地区,包括阜阳、亳州、淮北、宿州、蚌埠和合肥等城市。整体呈现

出“南高北低”的空间分布特点。

图 8 为不同情景下 2020—2040 年安徽省碳密度空间变化情况。在自然变化情景下,碳储量减少的区域主要分布在皖南山区及皖北平原附近,这可能与该情景下林地和耕地的骤减有关;碳储量增加的区域极少,仅在各城市中零星分布。在生态保护情景下,碳储量增加的区域主要分布在大别山、黄山、九华山及天柱山等山脉附近,少量分布在合肥、六安等城市;碳储量减少的土地零散分布在城市边缘区。在耕地保护情景下,碳储量明显减少的区域主要集中在皖西大别山区,部分分布在皖南城市及滁州、合肥等城市;碳储量增加区域与自然发展情景下基本一致。

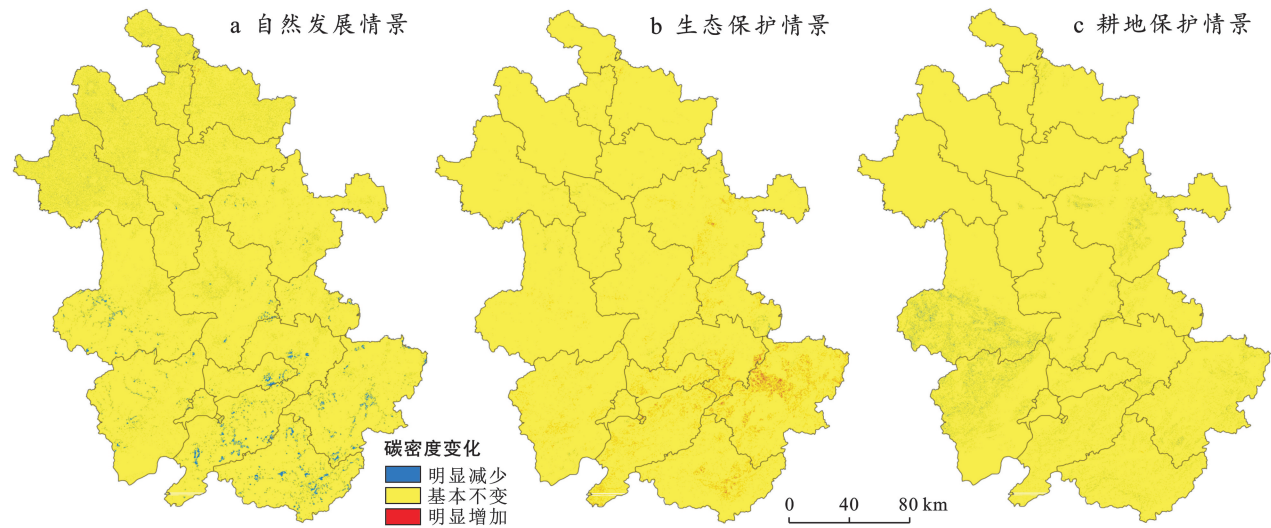


图 8 不同情景下 2020—2040 年安徽省碳密度空间变化特征

Fig.8 Spatial variation characteristics of carbon intensity in Anhui Province under different scenarios during 2020—2040

3 讨论

3.1 驱动因素对土地利用空间格局的影响

本研究评估了 2000—2020 年气温、降水量、高程、GDP 值、人口等 12 种影响因子对各类型土地的贡献度(如图 9 所示),有助于更好的了解引起土地利用空间格局变化的影响因素。研究发现对安徽省耕地贡献度最高的是人口密度,人口增长需要更多的粮食供应^[44],同时人口动态在很大程度上决定了农业系统的未来^[45],因此不难理解人口密度对耕地的强烈影响。影响林地的主要驱动力是高程、降水量和距一级道路距离。①安徽省林地主要分布在海拔较高的皖西、皖南山区,该地区地形复杂,对外道路较少;②气温和降水是植被生长的关键因素,充足的降雨量有助于森林生长。坡向和海拔分别是影响灌木和草地生长的主要因素,这说明灌木对光照响应更加敏感、草地对海拔要求更高。建设用地扩张的前三驱动因素为海拔、人口密度和距一级道路距离。通常,人口密度的增加意味着需要更多的城市建设空间。由于人类往往倾向于在交通便捷的区域进行生产生活活动,因此城市扩张通常会避免海拔高且地形复杂的区域,一般集中在地形起伏小、开发难度低的地区,这正与 Lei 等^[27]对广东省的研究结论相符。

3.2 土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响

本文研究了历史时期及未来不同情景下安徽省土地利用变化,定量评估了土地利用变化对碳储量的影响。结果表明,2000—2020 年安徽省建设用地集聚增加,碳储量呈减少趋势,在一定程度上反映了建设用地扩张会导致生态系统服务功能的下降。这与许多学者的研究结果一致^[14,30]。Jiang 等^[46]认为城

市化发展会影响生态系统碳储量;徐自为等^[47]认为碳储量减少的主要原因在于建设用地侵占了耕地、林地。在空间特征上,安徽省碳储量分布存在明显的空间异质性,碳储量高值区分布在林地密集的山区,低值区分布在城市发展区,这说明碳储量分布与土地利用类型分布联系密切,与刘晓娟等^[23]结论相符。一般认为,林地的碳储量最高,其次是草地、耕地,建设用地碳储存能力最低。

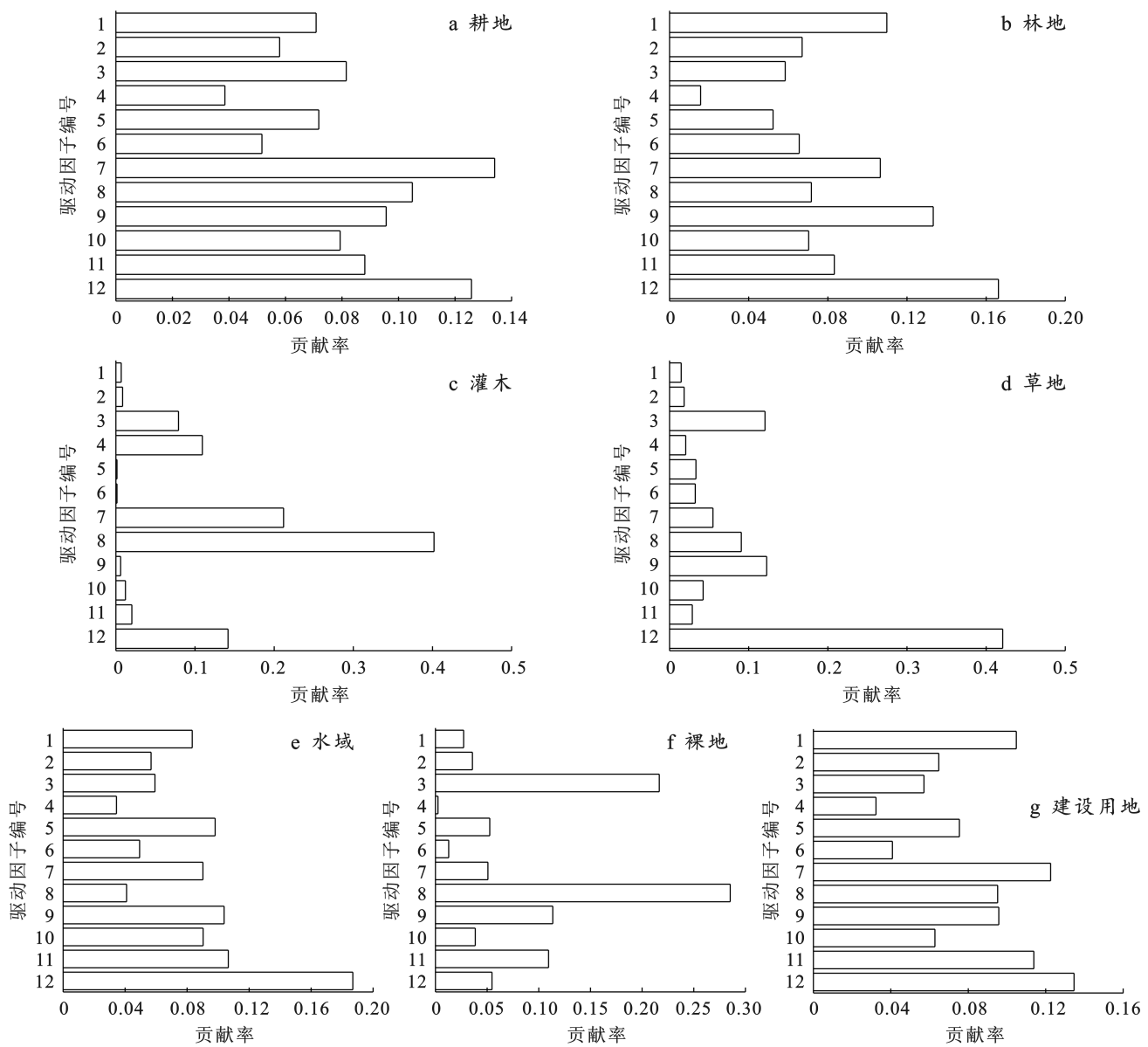
在情景预测中,耕地保护情景下碳储量仍呈现缓慢下降态势,主要原因在于虽然实施耕地保护政策限制了耕地转移,但未限制林地、草地的转移,这导致建设用地扩张依旧显著,生态系统碳储存功能减弱。而在生态保护情景下,受生态工程 and 环境保护政策影响使林地、草地等得到保护,区域碳储量明显增加,这与 Zhao 等^[48]的研究结果同样表明环境保护工程的实施有助于提高生态系统碳储量,因为林地、草地等植被具有较强的固碳能力,实施生态保护政策能够有效保护高碳密度区的发展。因此,安徽省在未来土地管理决策中应协调耕地保护和生态保护,促进区域“高速发展”向“高质量发展”转变,提高生态系统服务价值,助力碳中和目标的实现。

3.3 优势与不确定性

本文碳密度数据是通过搜集前人研究结果并依据研究区域气温和降水量进行修正获得,相比以往大多直接采用全国尺度的碳密度进行区域性研究,此方式获取的碳密度数据更加可靠合理,有助于提高研究结果的准确性。同时,PLUS 模型通过耦合土地扩张分析策略(LEAS)和基于多类型随机斑块种子的 CA 模型(CARS)^[26-27],优化了土地利用模拟在空间、数

量上的分配方式,一定程度上提高了模拟精度。最后,本文基于 LEAS 分析了引起土地利用变化的驱动

因素并计算出各驱动因素对各土地类型的贡献度,相比以往的研究结果更加严谨、明确。



注:驱动因子编号 1 为高程,2 为距二级道路距离,3 为经济,4 为平均降水量,5 为坡度,6 为人口密度,7 为距三级道路距离,8 为距水域距离,9 为土壤类型,10 为平均温度,11 为距铁路距离,12 为距一级道路距离。

图 9 安徽省驱动因子对各类土地的贡献度

Fig.9 Contribution of driving factors to each land type in Anhui Province

然而,社会经济发展及土地利用驱动因素的不确定性导致土地利用变化难以预测。土地利用变化是众多因素共同作用的结果。本研究仅选取了 12 个驱动因子,如土壤类型、高程、坡度、距离等,对社会经济及自然灾害因素考虑较少,这在一定程度上降低了模拟精度。此外,由于气候及人类活动的不断变化,碳密度值始终处于动态变化中,因此即便采用修正后的碳密度值也会使碳储量估算结果存在不确定性^[27]。同时,InVEST 模型只考虑了不同土地利用类型的碳

密度差异,忽视了植被类型和植被生长对碳密度的影响,这也造成了碳储量评估结果的不确定性。

4 结论

(1) 2000—2020 年安徽省土地利用发生明显变化,主要变化特征为耕地向建设用地转移和耕地向林地的转移,这体现了 2000—2020 年城市扩张侵占耕地和国家实施退耕还林等生态保护政策。2000—2020 年安徽省碳储量总体呈减少趋势,共减少了 1.01×10^8 t。

(2) 安徽省碳储量空间分布异质性强,碳密度高值区主要分布在海拔较高的皖西、皖南山区。碳储量低值区主要分布在水域及城市发展地区。碳储量分布与土地利用类型分布密切相关,林地的碳储存能力较强,建设用地、水域的碳储存能力较低。

(3) 自然变化情景下碳储量下降最快,2020—2040 年碳储量减少了 1.70×10^8 t,生态系统服务功能急剧衰弱。耕地保护情景下碳储量下降速度减缓。生态保护情景下碳储量呈增加态势,增量为 3.07×10^7 t,反映出实施生态保护政策能够有效保护林地、草地等高碳密度区,增强生态系统固碳能力。因此,应统筹生态保护和耕地保护,促进区域生态系统良性可持续发展。

[参 考 文 献]

- [1] Li Jiasheng, Guo Xiaomin, Chuai Xiaowei, et al. Reexamine China's terrestrial ecosystem carbon balance under land use-type and climate change [J]. *Land Use Policy*, 2021,102;105275.
- [2] Rajah R, Ahmed A, Al-Amin A Q, et al. Climate change mitigation: Comparative assessment between Malaysia and ASEAN economy [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017,24;2632-2642.
- [3] Zhang Qi, Yu Xin, Qiu Rangjian, et al. Evolution, severity, and spatial extent of compound drought and heat events in North China based on Copula model [J]. *Agricultural Water Management*, 2022,273;107918.
- [4] Dambre C, Baumgart N J, Feron S, et al. 'It never rains, but it pours'-Disasters triggered by natural hazards, sexual risk-taking behavior, and the role of health systems: A worldwide ecological analysis [J]. *The Journal of Climate Change and Health*, 2022,8;100158.
- [5] Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Lai Li, et al. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China [J]. *Environmental Science & Policy*, 2013,25;50-61.
- [6] 杨景成,韩兴国,黄建辉,等.土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响[J].*应用生态学报*,2003,14(8):1385-1390.
- [7] 陶波,葛全胜,李克让,等.陆地生态系统碳循环研究进展[J].*地理研究*,2001,20(5):564-575.
- [8] Zhu Guofeng, Qiu Dongdong, Zhang Zhuangxia, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021,127;107770.
- [9] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估:以太行山淇河流域为例[J].*地理学报*,2019,74(3):446-459.
- [10] 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.
- [11] Wang Zhi, Xu Lihua, Shi Yijun, et al. Impact of land use change on vegetation carbon storage during rapid urbanization: A case study of Hangzhou, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2021,31(2):209-222.
- [12] Chen Dengshuai, Jiang Penghui, Li Manchun. Assessing potential ecosystem service dynamics driven by urbanization in the Yangtze River economic belt, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021,292;112734.
- [13] Yu Haoran, Wang Yongzheng, Chan Eme, et al. Construction of ecological network based on multi-scale conversion and nesting [J]. *Water*, 2021,13(9):1278.
- [14] 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.
- [15] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J].*生态学报*,2015,35(17):5898-5907.
- [16] 谢立军,白中科,杨博宇,等.碳中和背景下国内外陆地生态系统碳汇评估方法研究进展[J].*地学前缘*,2023,30(2):447-462.
- [17] Fernandes M M, de Moura Fernandes M R, Garcia J R, et al. Land use and land cover changes and carbon stock valuation in the São Francisco River Basin, Brazil [J]. *Environmental Challenges*, 2021,5;100247.
- [18] Olorunfemi I E, Olufayo A A, Fasinmirin J T, et al. Dynamics of land use land cover and its impact on carbon stocks in Sub-Saharan Africa: An overview [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2022,24(1):40-76.
- [19] 许信旺,潘根兴,侯鹏程.不同土地利用对表层土壤有机碳密度的影响[J].*水土保持学报*,2005,19(6):193-196.
- [20] 许信旺,潘根兴,曹志红,等.安徽省土壤有机碳空间差异及影响因素[J].*地理研究*,2007,26(6):1077-1086.
- [21] 邓喆,丁文广,蒲晓婷,等.基于 InVEST 模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J].*水土保持通报*,2022,42(3):324-334.
- [22] 姚楠,刘广全,姚顺波,等.基于 InVEST 模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估[J].*水土保持通报*,2022,42(5):329-336.
- [23] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等.基于 FLUS-InVEST 模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J].*热带地理*,2019,39(3):397-409.
- [24] Wang Lingge, Zhu Rui, Yin Zhenliang, et al. Impacts of land-use change on the spatio-temporal patterns of terrestrial ecosystem carbon storage in the Gansu Prov-

- ince, Northwest China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14 (13):3164.
- [25] 戴尔阜, 马良. 土地变化模型方法综述[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1):152-162.
- [26] Deng Zhiwei, Quan Bin. Intensity characteristics and multi-scenario projection of land use and land cover change in Hengyang, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19 (14):8491.
- [27] Tian Lei, Tao Yu, Fu W, et al. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China [J]. *Remote Sens*, 2022, 14:2330.
- [28] Gao Lina, Tao Fei, Liu Runrui, et al. Multi-scenario simulation and ecological risk analysis of land use based on the PLUS model: A case study of Nanjing [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 85:104055.
- [29] Zhang Shihe, Zhong Quanlin, Cheng Dongliang, et al. Landscape ecological risk projection based on the PLUS model under the localized shared socioeconomic pathways in the Fujian Delta region [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136:108642.
- [30] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的广东省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
- [31] Wang Yongzheng, Ji Yiwen, Yu Haoran, et al. Measuring the relationship between physical geographic features and the constraints on ecosystem services from urbanization development [J]. *Sustainability*, 2022, 14 (13):8149.
- [32] 任玺锦, 裴婷婷, 陈英, 等. 基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响[J]. *生态科学*, 2021, 40 (4):66-74.
- [33] Yu H R, Wang Y Z, Liang Z, et al. The construction of regional ecological security pattern based on a multi-factor comprehensive model and circuit theory [J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2021, 20(3):1115-1126.
- [34] Hu Sai, Chen Longqian, Li Long, et al. Spatiotemporal dynamics of ecosystem service value determined by land-use changes in the urbanization of Anhui Province, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(24):5104.
- [35] 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.
- [36] 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2007, 2(1):34-42.
- [37] Zhao Mingsong, Qiu Shiqi, Wang Shihang, et al. Spatial-temporal change of soil organic carbon in Anhui Province of East China [J]. *Geoderma Regional*, 2021, 26: e00415.
- [38] 程静, 王鹏, 陈红翔, 等. 渭河流域生境质量时空演变及其地形梯度效应与影响因素[J]. *干旱区地理*, 2023, 46 (3):11.
- [39] 杨淑威, 赵娟, 朱家田, 等. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(4):175-182.
- [40] 庄子薛, 谢梦晴, 张文萍, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的碳储量时空变迁及多情景模拟预测: 以成德眉资地区为例[J]. *风景园林*, 2022, 29(5):38-44.
- [41] 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.
- [42] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: Global trends [J]. *Ecology*, 1989, 70(5):1346-1354.
- [43] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. *Nature*, 2000, 404(6780):858-861.
- [44] Vasylieva N. Casual nexus between dynamics of population and food security: Economic benchmarks for agriculture [J]. *Research in World Economy*, 2020, 11 (4):33.
- [45] Reta H B. Population dynamism and agrarian transformation in Ethiopia [J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2016, 11(39):3863-3879.
- [46] Jiang Weiguo, Deng Yue, Tang Zhenghong, et al. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models [J]. *Ecological Modelling*, 2017, 345:30-40.
- [47] 徐自为, 张智杰. 基于土地利用变更调查的 2010—2016 年新疆尉犁县生态系统碳储量时空变化[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(11):1909-1917.
- [48] Zhao Minmin, He Zhibin, Du Jun, et al. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98:29-38.