

DOI: 10.20103/j.stxb.202306061192

何青松, 蒋旭. 耕地占补面积时空变化对碳储量的影响测度——以湖北省为例. 生态学报, 2023, 43(24): 10413-10429.

He Q S, Jiang X. Measuring impacts of temporal and spatial changes of cultivated land on carbon storage: A case study of Hubei Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10413-10429.

耕地占补面积时空变化对碳储量的影响测度 ——以湖北省为例

何青松, 蒋旭*

华中科技大学公共管理学院, 武汉 430074

摘要: 基于 InVEST 模型定量评估湖北省 2000—2020 年耕地占补面积时空变化对陆地生态系统碳储量的影响, 在县级行政单元尺度探究由耕地占补导致的碳储量变化量在空间上的集聚程度, 并运用 PLUS 模型模拟区域未来四种发展情景下的土地利用格局及碳储量变化趋势。结果表明: (1) 2000 年至 2020 年, 湖北省耕地面积净变化率为 -3.89% , 耕地面积略微下降, 基本实现耕地占补数量平衡。 (2) 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2020 年耕地占用和补偿导致的碳储量变化值占该时段碳储量变化值的比例分别为 68.45% 、 59.45% 、 57.86% 、 55.46% , 二十年整体占比为 61.38% 。耕地碳储量的变化对陆地生态系统碳储量的影响巨大。碳固持的地块面积为 $1.29 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 碳损失的地块面积为 $3.88 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。 (3) 2000—2020 年, 湖北省耕地占补导致的碳储量变化值具有明显的空间集聚性, “高高集聚”区主要分布在西部和西南部山区, “低低集聚”区分布在中南部的江汉平原。 (4) 2020—2030 年, 湖北省陆地生态系统碳储量在自然发展情景下减少 $5.50 \times 10^6 \text{ t}$, 在耕地保护情景下减少 $1.22 \times 10^6 \text{ t}$, 在城镇开发情景下减少 $8.89 \times 10^6 \text{ t}$, 在生态保护情景下增加 $2.43 \times 10^6 \text{ t}$ 。与其他三种情景相比, 生态保护情景是未来发展的最优情景。研究通过定量评估耕地占补平衡背景下湖北省耕地面积时空变化对区域碳储量的影响为未来的国土空间规划以及增汇政策的制定提供决策依据和科学参考, 对于实现土地资源的可持续利用和生态环境保护具有重要意义。

关键词: 耕地占补; 陆地生态系统碳储量; InVEST 模型; PLUS 模型

Measuring impacts of temporal and spatial changes of cultivated land on carbon storage: A case study of Hubei Province

HE Qingsong, JIANG Xu*

College of Public Administration, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: Based on InVEST model, the quantitative evaluation was conducted for the impact of cultivated land occupancy and compensation area temporal and spatial changes on the terrestrial ecosystem carbon storage in Hubei Province from 2000 to 2020. The degree of spatial agglomeration of carbon storage changes caused by the cultivated land occupancy and compensation was explored at the level of county administrative units. PLUS model was used to simulate the change of land use pattern and carbon storage under four future development scenarios. Based on the research, the following results were obtained: (1) from 2000 to 2020, the net change rate of cultivated land area in Hubei Province was -3.89% , indicating a slight decrease in cultivated land area. It basically achieved a balance between the number of cultivated land occupation and compensation. (2) From 2000 to 2005, 2005 to 2010, 2010 to 2015, and 2015 to 2020, the proportions of carbon storage changes caused by the cultivated land occupancy and compensation accounted for 68.45% , 59.45% , 57.86% , 55.46% , respectively. The overall proportion in the past 20 years was 61.38% . The changes in carbon storage of cultivated land had a

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42371424, 42001334); 湖北省自然科学基金面上项目 (2023AFB630)

收稿日期: 2023-06-06; **网络出版日期:** 2023-11-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: m202275018@hust.edu.cn

huge impact on the carbon storage of terrestrial ecosystem. The plot area of carbon sequestration was $1.29 \times 10^5 \text{ hm}^2$, while the plot area of carbon loss was $3.88 \times 10^5 \text{ hm}^2$. (3) From 2000 to 2020, the changes in carbon storage caused by cultivated land occupation and compensation in Hubei Province had obvious spatial aggregation. The “high and high aggregation” areas were mainly distributed in the western and southwestern mountainous areas, while the “low and low aggregation” areas were located in the Jiangnan Plain in the central and southern parts of the province. (4) From 2020 to 2030, the carbon storage of terrestrial ecosystem in Hubei Province will decrease by $5.50 \times 10^6 \text{ t}$ under natural development scenario, $1.22 \times 10^6 \text{ t}$ under cultivated land protection scenario, $8.89 \times 10^6 \text{ t}$ under urban development scenario, and increase by $2.43 \times 10^6 \text{ t}$ under ecological protection scenario. Compared with the other three scenarios, the ecological protection scenario is the optimal scenario for future development. Through quantitatively assessing the impact of temporal and spatial changes in the cultivated land area on regional carbon storage in Hubei Province under the background of the cropland balance policy, the study provides decision-making basis and scientific reference for future territorial spatial planning and the formulation of carbon sink increase policy, which is of great significance for realizing the sustainable utilization of land resources and ecological environmental protection.

Key Words: cropland occupation and compensation; terrestrial ecosystem carbon storage; InVEST model; PLUS model

全球气候变暖及其引发的海平面上升、灾害频发、生物多样性减少等一系列生态环境问题使碳排放成为世界各国政府和学者关注的焦点^[1],为积极应对全球气候变化,中国政府在第七十五届联合国大会上宣布:“中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,在 2060 年前实现碳中和。”并将这一目标纳入十四五规划。2021 年 10 月,中共中央、国务院印发《碳达峰碳中和意见》,指出要持续巩固提升生态系统碳汇能力和碳汇增量。巩固和提升碳汇能力是实现碳中和的必由之路,而陆地生态系统表面分布大量的固碳单元,在吸收 CO_2 、调节气候变化方面发挥着至关重要的作用。提高陆地生态系统碳储量是减缓温室效应最经济可行且对环境友好的途径之一^[2]。土地利用变化通过改变地球表面的生物地球化学过程及其能量流动和物质循环,进而改变土壤和植被的固碳能力,对陆地生态系统碳储量产生深刻影响^[3],是引起区域碳收支变化的重要原因。土地政策通过影响土地利用变化进一步改变陆地生态系统碳储量^[4],因此研究土地政策引导下的土地利用变化对碳储量的影响对维持区域碳循环的平衡与稳定具有重要意义。

城市建设用地快速扩张并侵占耕地对粮食安全构成了严重威胁^[5],为保障粮食安全,中国政府实行了一系列的耕地保护措施,其中最严格的就是耕地占补平衡政策。1997 年,党中央印发了《关于进一步加强土地管理切实保护耕地的通知》,首次提出各省(区、市)保持耕地总量动态平衡的要求,并在次年将耕地占补平衡条款写进《中华人民共和国土地管理法》,成为耕地占补平衡制度的发端^[6]。2000—2020 年,中国耕地数量基本实现平衡^[7],耕地占补平衡政策在控占、制补方面取得了显著成效^[8];但政策在执行过程中也显露出一些弊端,补充耕地时“填湖造田”、“毁林补耕”等现象屡见不鲜^[9];地方占而不补、占多补少、占优补劣、占整补零、占水田补旱地等现象普遍存在^[10];同时补充的耕地多来自林地、草地、湿地等高碳密度的生态用地^[11],会直接影响陆地生态系统的碳储量。因此,定量评估耕地占补面积变化对区域碳储量的影响能够为区域未来的国土空间规划以及生态系统可持续发展提供一定的科学依据。

当前,关于陆地生态系统碳储量的研究较多。国内外学者分别从单一^[12]或综合性^[13]的生态系统探究土地利用变化对碳储量的影响,大尺度的研究范围集中在国家^[14-15]、省域^[16]、城市群^[17-18],小尺度集中在市域^[19]、县域^[20]、流域^[21-23]或典型生态区^[24],研究内容包括土地利用变化对碳储量的影响^[25]、碳储量时空演变特征^[26]、碳储量驱动力分析^[27],此外,也有部分学者耦合土地利用模拟模型对未来土地利用变化和碳储量变化进行多情景模拟预测^[13]。目前大多数成果都集中在区域土地利用变化对碳储量影响的总体分析,缺乏对单一地类的碳储量的变化进行深入研究。而耕地土壤有机碳库是陆地生态系统中最活跃的碳库^[28],受耕地保护政策引导下的耕地占用和补偿作为最主要的土地利用变化形式将不可避免地改变土地的固碳能力,从

而对陆地生态系统碳储量产生重要影响。已有研究表明,2000—2010 年,中国耕地扩张导致碳储量减少了约 1.76 Tg,是城市扩张造成的碳储量损失的 1.12 倍^[29]。因此,单独探讨碳储量对耕地变化的响应是减少耕地碳排放、增加陆地生态系统碳汇的前提。现有的耕地碳储量评估方法主要有野外调查、遥感反演和模型模拟。传统的野外调查法获取的碳密度数据精度高,但是工作量大,成本高,且空间代表性不足,无法反映碳储量的动态变化和空间格局。随着 3S 技术的发展,大量学者开始运用 CASA、Bookkeeping、DNDC 等模型估算碳储量。和其他模型相比,InVEST 模型具有使用简单、参数灵活、评估结果的空间可视化等优点,因此被广泛应用于碳储量评估研究。与 SD、CLUE-S、FLUS、ANN-CA 等土地利用模拟模型相比,PLUS 模型可根据随机森林算法挖掘地类转移概率,在数量、位置、细尺度元胞变化和景观格局相似度方面优于其他模型,其结果可以更好地支持未来碳储量多情景评估及空间规划政策实施。

基于此,本文以湖北省为研究对象,运用 InVEST 模型定量评估 2000—2020 年耕地占补面积时空变化对区域碳储量的影响及碳储量变化值的空间关联特征,结合 PLUS 模型预测 2030 年湖北省四种不同发展情景下的土地利用和碳储量时空变化格局,以期对湖北省国土空间规划和“双碳”战略规划提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湖北省位于中国中部,长江中游,总面积 $1.86 \times 10^5 \text{ km}^2$,辖 13 个地级行政区、103 个县级行政区。湖北省地势呈三面高起、中间低平、向南敞开、北有缺口的不完整盆地,大别山、秦巴山、武陵山、幕阜山坐落四周,中部平原耕地丰沃,资源多样,水网纵横,湖泊密布,国土空间呈现“五分林地三分田,一分城乡一分水”的总体格局,是长江经济带发展、长江中游城市群建设等国家战略的重要承载地。中部崛起战略实施以来,湖北省社会经济发展迅速,快速城市化导致大量耕地流失,而耕地补偿又导致了对生态用地的进一步侵占,经济发展与生态保护之间的矛盾日益严重,将持续影响区域碳储量的变化,以湖北省为研究区探讨耕地占用和补偿引起的碳储量变化可为中部其他省份绿色可持续发展提供参考与借鉴。

1.2 数据来源与预处理

(1) 土地利用数据。土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。以美国陆地卫星 Landsat TM/ETM 遥感影像数据作为主信息源,选取 2000、2005、2010、2015、2020 年共五期的湖北省土地利用遥感影像,空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。根据土地资源及其利用属性,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六大类。

(2) 土地利用变化驱动因子数据。共选取社会经济和气候环境共 12 个驱动因子来模拟 2030 年湖北省的土地利用变化(表 1)。首先在 ArcGIS 中统一所有驱动因子数据、土地利用数据和限制转换区域数据的投影坐标系,然后将所有土地利用数据和限制转换区域数据统一为相同的行列数,最后在 PLUS 模型中将土地利用数据和限制转换区域数据转换为 unsigned char 格式。

2 研究方法

2.1 研究技术路线

本文首先利用 2000、2005、2010、2015 和 2020 年共五期的土地利用数据在 ArcGIS 中进行叠加分析,提取占用耕地和补充耕地的地块,并运用耕地面积净变化率、耕地变化动态度等指标对湖北省耕地占补进行时间和空间特征的分析。然后结合获取到的碳密度数据,运用 InVEST 模型计算耕地占补面积变化对湖北省陆地生态系统碳储量变化的贡献,并从县级行政单元的尺度对耕地占补导致的碳储量变化值进行空间自相关分析。最后根据前人的研究^[30],选取 12 个影响土地利用变化的驱动因子,通过调整土地利用转移矩阵,设置自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景和城镇开发情景四种发展情景,运用 PLUS 模型模拟湖北省 2030 年的土地利用格局及未来的碳储量分布,研究框架如图 1 所示。

表 1 土地利用模拟预测数据

Table 1 Land use simulation and prediction data

类型 Type	数据 Data	描述 Description
土地利用数据 Land use data	2000、2010、2020 年土地利用数据	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/), 空间分辨率为 30 m×30 m
限制转换区域数据 Limit the conversion of region data	土地利用限制因素	ArcGIS 重分类: 0-限制转换区域; 1-其他
社会经济数据 Social economy data	人口 GDP 到城市一级道路距离 到城市二级道路距离 到城市三级道路距离 距县政府距离	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/), 空间分辨率为 1 km×1 km, 人口和 GDP 的数据现势性为 2019 年 高德地图, 采用欧式距离计算, 空间分辨率为 30 m×30 m, 数据现势性为 2020 年 县政府数据来自国家统计局发布的相关信息, 整理成格式化文本数据, 通过地理编码等处理, 制作形成空间分布矢量点数据, 再计算欧式距离, 空间分辨率为 30 m×30 m
气候环境数据 Climate environmental data	土壤类型 年平均温度 年平均降水 高程 坡度 到水域距离	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/), 空间分辨率为 1 km×1 km, 年平均气温和年平均降水的数据现势性为 2020 年 地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/), 空间分辨率为 30 m×30 m 由高程生成 国家基础地理信息中心 (http://www.ngcc.cn/ngcc/), 空间分辨率为 30 m×30 m

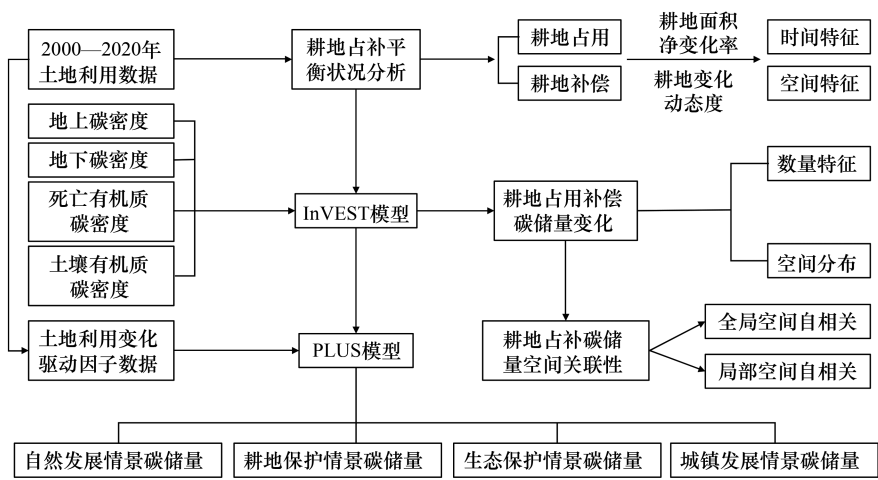


图 1 研究框架

Fig.1 Research framework

2.2 耕地变化数量特征

(1) 耕地面积净变化率

占用耕地 (Requisitioned Farmland, RF) 被定义为研究初期为耕地且研究末期为非耕地的地块, 补充耕地 (Compensatory Farmland, CF) 被定义为研究初期为非耕地且研究末期为耕地的地块。引入耕地面积净变化率 (NCR) 反映耕地面积的相对增减情况。

$$NCR = \frac{Area_{CF} - Area_{RF}}{Area_{初}} \times 100\% \tag{1}$$

式中, $Area_{CF}$ 为研究时段内补充耕地的面积, $Area_{RF}$ 为研究时段内占用耕地的面积, $Area_{初}$ 为研究初期耕地的总面积。

(2) 耕地变化动态度

耕地变化动态度反映耕地资源在研究时段内的变化幅度和变化速度, 动态度绝对值越高, 说明耕地资源稳定性越差。

$$K = \frac{U_y - U_x}{U_x} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中, K 为耕地变化动态度; U_x 、 U_y 分别为研究初期和末期耕地的面积; T 为间隔的时间段。

2.3 碳储量计算方法——InVEST 模型

(1) 碳储量的计算

InVEST 模型基于土地利用栅格图和四大碳库, 可以定量准确地估算当前景观下的区域碳储量, 进而比较和分析不同时期碳储量的增减情况。InVEST 模型计算碳储量的基本假设: 各地类对应一个由地下生物量碳密度、地上生物量碳密度、死亡有机质碳密度和土壤有机质碳密度构成的总碳密度^[31], 且某一种地类的碳密度是常量。地下生物量碳密度是指地下各植物根系中的碳密度, 地上生物量碳密度是指表层陆地上存活植物的碳密度, 死亡有机质碳密度是指枯枝落叶及死亡植物中的有机碳密度, 土壤有机质碳密度是指地表 20—100 cm 以下的土壤中储存的有机质碳密度, 计算公式如下:

$$C_i = C_{i_{above}} + C_{i_{below}} + C_{i_{dead}} + C_{i_{soil}} \quad (3)$$

$$C_{i_{total}} = C_i \times A_i \quad (4)$$

式中, C_i 为地类 i 的总碳密度; $C_{i_{above}}$ 为地类 i 的地上生物量碳密度; $C_{i_{below}}$ 为地类 i 的地下生物量碳密度; $C_{i_{dead}}$ 为地类 i 的死亡有机质碳密度; $C_{i_{soil}}$ 为地类 i 的土壤有机质碳密度; $C_{i_{total}}$ 为地类 i 的总碳储量; A_i 为地类 i 的面积。

(2) 碳密度数据

为保证碳密度数据的一致性和准确性, 碳密度数据优先选用湖北省的实测数据, 若湖北省数据缺失, 则采用邻近纬度的实测数据或文献整理数据。本文参考张斌^[18]汇总的湖北省各地类的碳密度数据(表 2)。

表 2 研究区土地利用类型的碳密度/(t/hm²)

Table 2 Carbon density of land use types in the study area

土地利用类型 Land use type	地上生物量 Aboveground biomass	地下生物量 Belowground biomass	死亡有机质 Dead biomass	土壤有机质 Soil biomass	文献来源 Document source
耕地 Cropland	4.02	0.75	2.11	98.13	Chuai 等 ^[32] ; 梁萌杰等 ^[33] ; Zhang 等 ^[34]
林地 Woodland	22.62	18.03	2.78	126.75	Chuai 等 ^[32] ; 王晓荣等 ^[35] ; 丁访军等 ^[36]
草地 Grassland	3.6	11.7	7.28	90.43	Chuai 等 ^[32] ; 刘刚等 ^[37]
水域 Water area	1.59	0	3.98	64.03	朱耀军等 ^[38] ; 邵继承等 ^[39]
建设用地 Built-up land	0.83	0.08	0	43.71	柯新利等 ^[31] ; 奚小环等 ^[40]
未利用地 Unused land	0.59	0.64	0.96	28.42	柯新利等 ^[31] ; 奚小环等 ^[40]

2.4 碳储量变化空间自相关分析

(1) 全局空间自相关

全局空间自相关能体现区域地理要素整体的关联性和分布特征。本文以 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2020 年、2000—2020 年五个时期县级单元尺度由耕地占补导致的碳储量变化值作为变量, 在 Geoda 软件中构建空间权重矩阵, 计算全局 Moran's I , 公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中, I 是莫兰指数, n 是湖北省县级单元数, x_i 、 x_j 是第 i 个县和第 j 个县由耕地占补导致的碳储量变化值, $\bar{x}$ 是 x_i 的平均值, w_{ij} 是空间权重矩阵。

全局 Moran's I 的取值范围为 $[-1, 1]$, Moran's $I > 0$ 意味着耕地占补导致的碳储量变化存在正的空间自相关, 值越大, 碳储量变化值相近集聚程度越高; Moran's $I < 0$ 意味着负相关, 值越小, 碳储量变化值相异而集聚的程度越高; Moran's $I = 0$ 意味着不存在空间自相关, 可以使用标准化统计量 Z 来检验全局 Moran's I :

$$Z = \frac{1 - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}} \quad (6)$$

式中, $E(I)$ 和 $\text{VAR}(I)$ 为 Moran's I 的期望值和方差, 显著性水平通常取 0.05, 临界值为 1.96。当 $Z > 1.96$ 时, 耕地占补导致的碳储量变化高值与高值集聚, 低值与低值集聚; 当 $Z < -1.96$ 时, 高值与低值集聚或低值与高值集聚; 当 $|Z| < 1.96$ 时, 空间自相关性不显著, 成随机分布。

(2) 局部空间自相关

本文通过 LISA 聚类图揭示湖北省各县级行政单元由耕地占补导致的碳储量变化值的局部相似性与差异性, 计算公式如下:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

式中, I_i 为第 i 个县的局部 Moran's I , $I_i > 0$ 表示相邻区域的碳储量变化值空间差异小, 为“高高聚类”或“低低聚类”类型; $I_i < 0$ 表明相邻区域的碳储量变化值空间差异大, 为“高低聚类”或“低高聚类”类型。

2.5 土地利用变化模拟——PLUS 模型

PLUS 模型是一个基于栅格数据的可用于斑块尺度土地利用变化模拟的元胞自动机 (CA) 模型。模型集成了基于用地扩张分析策略 (LEAS) 的规则挖掘方法和基于多类型随机种子 (CARS) 的 CA 模型, 可用于挖掘土地扩张的驱动因素并预测土地利用景观的斑块级演化^[30]。LEAS 模块提取两期土地利用变化间各类用地扩张的部分, 并从增加部分中采样, 采用随机森林算法逐一对各类土地利用扩张和驱动因素进行挖掘, 获取用地发展概率及驱动因素对用地扩张的贡献。CARS 模块结合随机种子生成和阈值递减机制, 在发展概率的约束下, 时空动态地模拟斑块的自动生成。PLUS 模型的具体使用包括三部分:

(1) 验证模型的模拟精度。

选择湖北省 2000 年和 2010 年的土地利用数据, 使用 Markov 模型预测 2020 年的土地利用需求, 选取人口、GDP 等 12 个驱动因子在 LEAS 模块中获取土地发生概率, 然后将各种参数设定在 CARS 模块运行, 得到 2020 年的土地利用模拟数据, 将 2020 年的土地利用模拟数据与 2020 年的土地利用实际情况对比, 若 Kappa 系数和总体精度较大, 说明模型模拟精度较高, 可用于预测未来不同情景下的土地利用状况。

(2) 未来土地利用多情景设置

在模拟精度符合要求的前提下, 基于 2010 年和 2020 年的土地利用数据, 通过调整 Markov Chain 模拟湖北省 2030 年四种不同的土地利用情景。①自然发展情景。该情景遵循土地利用结构自然演变规律, 默认社会经济发展状况将与目前的趋势保持一致, 不受人干预, 2030 年土地利用需求根据 2010—2020 年的 Markov Chain 计算得到, 是其他情景模拟的基础。②耕地保护情景。该情景通过遏制建设用地侵占耕地及减缓耕地向其他地类转移的速率来保护耕地。将耕地向建设用地转移的概率降低 60%, 耕地向林地、草地和水域转移的概率降低 30%, 来预测 2030 年耕地保护情景下的土地利用状况。③生态保护情景。该情景通过加强其他地类向生态用地转化和减缓生态用地转出来实现生态保护。本文将林地、草地向建设用地转移的概率分别降低 50%, 将耕地向林地转移的概率增加 30%, 向建设用地转移的概率放缓 30%, 来预测 2030 年湖北省

生态保护情景下的土地利用状况。④城镇开发情景。考虑到湖北省土地城镇化较为迅速,建设用地侵占耕地现象突出,本文将耕地、林地、草地向建设用地的转移概率分别增加 20%,将建设用地向除耕地以外的其他地类转移的概率降低 20%,来预测 2030 年湖北省城镇开发情景下的土地利用状况。

(3) 模型参数设置

不同情景的土地利用需求根据前一步未来情景建模及 Markov 模型预测结果填写。转移矩阵表示各地类间的转移规则,1 表示可以转变,0 表示不能转变,本文设置各类型用地都能互相转化,矩阵皆为 1。邻域权重参考王保盛等^[41]的研究,根据各用地类型 2010—2020 年历史过程中的扩张归一化值赋值,公式如下:

$$W_i = \frac{TA_i - TA_{\min}}{TA_{\max} - TA_{\min}} \quad (8)$$

式中, W_i 是第 i 类土地利用类型邻域权重, TA_i 为第 i 类土地扩张面积, $TA_{\min}$ 为各类土地利用类型最小扩张面积, $TA_{\max}$ 为各类土地利用类型最大扩张面积。由于在实际情况中,即使是计算出来邻域权重为 0 的地类也会扩张,因此本文将最小扩张面积的地类的邻域权重人为设定为 0.1。

3 结果与分析

3.1 湖北省耕地占补平衡状况分析

2000—2020 年,湖北省耕地面积净变化率为-3.89%,耕地面积略微下降,基本实现耕地占补平衡。占用耕地的来源以建设用地、水域和林地为主,分别解释了 50.6%、25.3%和 22.8%的耕地损失。耕地占用主要与社会经济发展、城市化进程加快以及国家政策驱动有关,如中部崛起战略的实施、1998 年特大洪水后的大江大河治理、退耕还湖、长江平垸行洪、移民建镇以及 1999 年生态退耕政策的实施。补充耕地的来源主要是林地、水域和建设用地复垦,分别解释了 67.7%、13.9%、13.6%的耕地增加。湖北省耕地占补进入“城市建设侵占耕地-开垦生态用地补充耕地-继续占用耕地建设城市”的循环。分时段来看(表 3),耕地占补导致耕地面积经历了先减少后增加的过程,20 年间耕地变化动态度为-0.39%。2000—2005 年,耕地变化动态度为-0.25%,占用耕地的来源主要是水域和建设用地,补充耕地的来源主要是水域和林地,耕地占补规模都不大。2005—2010 年期间耕地减少最快,耕地变化动态度达到-0.59%,占用耕地的来源主要是林地和建设用地,补充耕地的来源主要是林地和水域,耕地占补规模都有了快速增长。2010—2015 年,耕地减少速度放缓,耕地变化动态度为 0.38%,在该阶段耕地占用面积相较上一个时期下降而补偿面积上升,建设用地成为耕地占用

表 3 湖北省 2000—2020 年耕地占用及补偿面积/hm²

Table 3 Area of Cropland Occupation and Compensation in Hubei Province from 2000 to 2020

耕地占补类型 Cropland occupation and compensation type		时期 Period				
		2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2020	2000—2020
耕地占用 Cropland occupation	耕地-林地	7202	125813	6395	107384	89833
	耕地-草地	595	13702	848	9405	4610
	耕地-水域	64548	113441	21462	52662	99676
	耕地-建设用地	20381	124934	116527	56682	199498
	耕地-未利用地	110	2008	56	1621	657
	小计	92836	379897	145288	227753	394274
耕地补偿 Cropland compensation	林地-耕地	2674	95923	5590	136650	83314
	草地-耕地	499	9103	3351	10922	4709
	水域-耕地	2912	50310	5305	111203	17149
	建设用地-耕地	177	21667	4363	109548	16723
	未利用地-耕地	758	1447	63	2091	1159
	小计	7020	178450	18672	370413	123055
耕地变化动态度 Cropland change attitude		-0.25%	-0.59%	-0.38%	0.44%	-0.39%

的第一大来源,耕地转化为建设用地的面积占耕地占用总面积高达 80.2%。2014 年,国土资源部出台《关于强化管控落实最严格耕地保护制度的通知》,严格控制耕地非农化,此后在 2015—2020 年期间湖北省耕地面积出现正向增长,建设用地占用耕地面积大幅下降,而林地成为补充耕地的主要来源。

从空间上看(图 2),耕地被占用的地块都比较集中,主要分布在中南部等社会经济发展较快的地区,而补充的耕地则比较零散,这可能会加剧耕地破碎化。分地州来看(图 3),各地州的耕地占补情况差异较大。各地州的耕地面积净变化率均为负值,20 年间没有地州的耕地面积增加。其中,武汉市、仙桃市、鄂州市耕地面积净变化率都 $\leq -8.60\%$,鄂州市甚至达到了 -10.85% ,说明这几个地级市城乡建设占用耕地面积大,耕地流失严重。

潜江市、荆州市、黄石市、咸宁市耕地面积净减少超过 4%,补充的耕地面积明显低于占用面积。恩施土家族苗族自治州和神农架林区的耕地面积净变化率接近零($NCR > -2.18\%$),较好地实现了耕地占补平衡。其他地级市基本实现了耕地占补平衡($-3.99\% < NCR \leq -2.18\%$),但耕地面积略有下降。

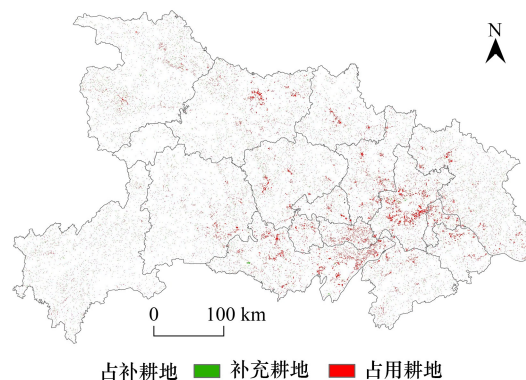


图 2 2000—2020 年耕地占补分布图

Fig.2 Distribution map of cultivated land occupied and replenished from 2000 to 2020

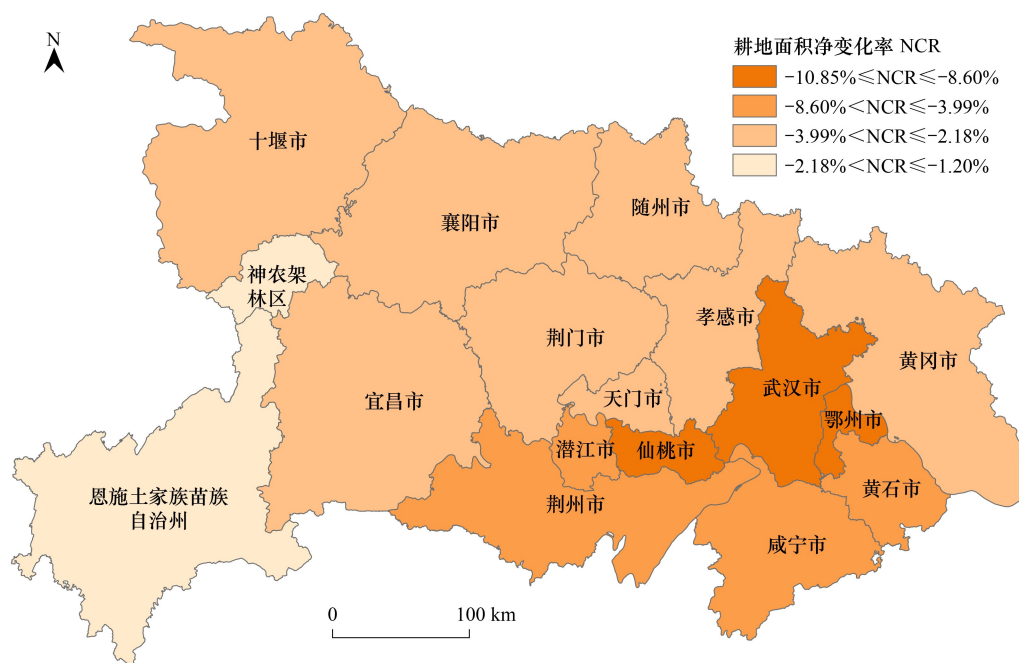


图 3 各市州 2000—2020 年耕地面积净变化率

Fig.3 Net change rate of cultivated land area in each city and state from 2000 to 2020

3.2 耕地占补面积变化对碳储量的影响

根据 2000—2020 年的土地利用数据和碳密度数据,运用 InVEST 模型计算湖北省陆地生态系统碳储量(图 4)。2000—2020 年湖北省陆地生态系统碳储量呈先减后增的趋势,20 年间共减少 2.2×10^7 t,减幅为 0.88%,年均减少 1.1×10^6 t。2000—2005、2005—2010、2010—2015 年三个时间段的减幅分别为 0.18%、0.44%、0.51%;2015—2020 年,由于碳密度较低的建设用地和水域转变为碳密度较高的耕地和草地,碳储量增长了 0.25%。从不同土地利用类型来看,耕地和林地贡献了大部分的碳储量,两者之和占有土地利用类型

碳储量的 90% 以上,耕地和林地被过度侵占也是 2000—2020 年碳储量下降的主要原因。

耕地占补平衡政策通过人工干预改变土地利用类型,进而对陆地生态系统碳储量造成巨大影响。根据湖北省 2000—2020 年耕地占用和耕地补偿的地类面积及不同地类之间碳密度的差值,计算由耕地占补面积变化导致的碳储量变化值(图 5)。2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2020 年四个时段耕地占补面积变化导致的碳储量变化量占所有土地利用变化导致的碳储量变化量的比例分别为 68.45%、59.45%、57.86%、55.46%,二十年整体占比为 61.38%,达一半以上,说明耕地占补面积变化对陆地生态系统碳储量影响巨大,但随着时间的推移其影响在减小。分时段和耕地占补类型来看(表 4),耕地占补面积变化导致的碳储量损失在 2000—2015 年期间不断增加,而 2015—2020 年耕地占补给碳储量带来了正向增长。2000—2005 年,耕地占补导致的碳储量损失为 3.1×10^6 t,该阶段,水域和建设用地上耕地是碳储量减少的主要原因。2005—2010 年,碳储量进一步减少,除建设用地和水域占用耕地导致碳储量损失外,占用林地补偿耕地也是这一时期碳储量损失的重要原因,并成为碳储量损失的第二大来源。2010—2015 年,耕地占补导致的碳储量损失达到峰值。这一时期,耕地补偿带来了碳储量的正向增长,主要原因是占用林地、草地补充耕地的面积开始下降,且水域补充为耕地和建设用地上复垦为耕地带来的碳储量增长抵消了林地、草地补充为耕地带来的碳储量损失。但耕地被占用导致了更多的碳储量损失,主要原因是这一时期占用的耕地主要转变成了建设用地,转变

为林地和草地的占比很少,不足以抵消转变为建设用地导致的碳储量损失。因此 2010—2015 年期间碳储量损失值是四个时期最多的。2015—2020 年,耕地占用和耕地补偿均带来了碳储量的正向增长。这一时期,由于严格控制耕地向建设用地转变,且有相当数量的建设用地复垦为耕地和退耕还林还草以及水域向耕地转变的面积增加,使陆地生态系统碳储量增长了 3.4×10^6 t。总体而言,2000—2020 年耕地占补面积变化导致湖北省碳储量减少 1.3×10^7 t,其中耕地占用面积 3.9×10^5 hm^2 ,导致碳储量减少 9.7×10^6 t,主要是耕地转变为建设用地和水域导致碳储量的损失;耕地补偿面积 3.7×10^5 hm^2 ,导致碳储量减少 3.8×10^6 t,主要是占用林地、草地等生态用地用于补偿流失的耕地导致碳储量的损失。

为更清楚地反映湖北省耕地占补面积变化对碳储量影响的空间格局,对相邻两个时期的碳储量空间分布图进行栅格减法运算,再将由耕地占用和耕地补偿导致的碳储量变化符号化显示,得到栅格单元上由耕地占用和耕地补偿导致的碳固持和碳损失情况(图 6)。2000—2005 年,碳固持的地类面积很小,主要集中在武汉市中部,零星分散在湖北省西部的十堰市、恩施州和宜昌市,由水域补偿耕地和退耕还林带来碳储量增长;碳损失集中在武汉市、仙桃市、鄂州市和荆州市东部,由建设用地占用耕地和水域占用耕地导致碳储量损失。2005—2010 年,碳固持面积较上一时期有了大幅增长,集中在宜昌市和黄冈市西北部、孝感市东北部以及荆州市和恩施州的东部;碳损失集中在荆州市东南部、随州市东部和武汉市中心城区四周。2010—2015 年,碳

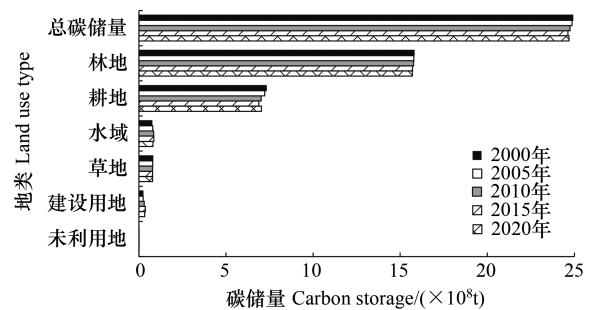


图 4 2000—2020 年各土地利用类型碳储量

Fig.4 Carbon storage by land use type from 2000 to 2020

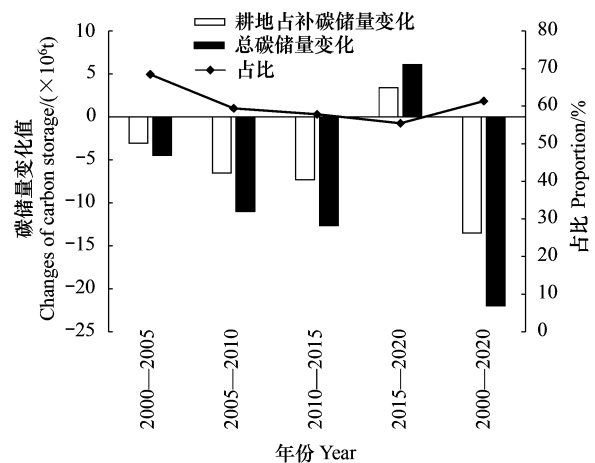


图 5 2000—2020 年耕地占补碳储量变化值

Fig.5 Change value of carbon storage in cropland from 2000 to 2020

固持面积又进一步缩小,集中分布在武汉市;碳损失小范围地集中在襄阳市中部、天门市和孝感市交界处以及武汉市中心城区四周。2015—2020 年,碳固持面积大幅增长,集中在中南部的江汉平原和随州市东部和襄阳市北部;碳损失的面积较上一时期则有所下降,集中在恩施州东部和湖北省东北部。从 2000—2020 年整个时段来看,湖北省耕地占补面积变化导致的碳固持的地块面积为 $1.29\times 10^5\text{ hm}^2$,碳固持的地块分布较零散且均匀;碳损失的地块面积为 $3.88\times 10^5\text{ hm}^2$,远大于碳固持的面积,且集中分布在湖北省中南部和襄阳市、随州市中部,这些区域地形平坦,水系丰富,人口密集,高碳密度的耕地更容易被低碳密度的建设用地侵占。

表 4 2000—2020 年湖北省耕地占补导致的碳储量变化值/t

Table 4 2000—2020 Change value of carbon storage caused by cropland occupation and compensation in Hubei Province

耕地占补类型 Cropland occupation and compensation type		时期 Period				
		2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2020	2000—2020
耕地占用 Cropland occupation	耕地-林地	469347	8199220	416771	6998247	5854437
	耕地-草地	4764	109612	6785	75236	36876
	耕地-水域	-2285638	-4016960	-759983	-1864744	-3529527
	耕地-建设用地	-1230800	-7544734	-7037036	-3423042	-12047660
	耕地-未利用地	-8162	-149401	-4138	-120575	-48914
	小计	-3050490	-3402263	-7377601	1665122	-9734787
耕地补偿 Cropland compensation	林地-耕地	-174252	-6251319	-364288	-8905461	-5429596
	草地-耕地	-3990	-72822	-26810	-87373	-37671
	水域-耕地	103103	1781493	187845	3937683	607238
	建设用地-耕地	10713	1308457	263472	6615604	1009918
	未利用地-耕地	56387	107652	4694	155602	86251
	小计	-8040	-3126540	64913	1716054	-3763860
总计 Total		-3058530	-6528803	-7312688	3381176	-13498648

3.3 耕地占补碳储量变化值空间关联性分析

在 ArcGIS 中汇总统计湖北省县级行政单元耕地占补导致的碳储量变化值,并在 GeoDa 软件中进行全局空间自相关分析,得到五个时段的全局 Moran's *I*(表 5)。在 $\alpha=0.01$ 水平上,五个时段的 *Z* 值均大于阈值 2.58,通过显著性检验。Moran's *I* 均大于 0,说明耕地占补面积变化导致的碳储量变化值具有明显的空间集聚性,但空间集聚程度随时间推移在波动变化,并不稳定。

表 5 湖北省耕地占补导致的碳储量变化值全局莫兰指数

Table 5 Global Moran's *I* of carbon storage changes caused by cropland occupation and compensation in Hubei Province

时期 Period	Moran's <i>I</i>	<i>Z</i>	<i>P</i> value	阈值 Threshold value	时期 Period	Moran's <i>I</i>	<i>Z</i>	<i>P</i> value	阈值 Threshold value
2000—2005	0.3034	5.8541	0.002	2.58	2015—2020	0.1840	3.1342	0.003	2.58
2005—2010	0.1872	3.1275	0.003	2.58	2000—2020	0.3580	5.7254	0.001	2.58
2010—2015	0.3369	5.5521	0.001	2.58					

为更好地揭示湖北省各县级行政区由耕地占补导致的碳储量变化值的局部聚集特征,对其进行局部空间自相关分析(图 7)。2000—2005 年,由耕地占补导致的碳储量变化值“高高聚集”区包括 17 个县级行政区,主要集中在湖北省西南部和西部,包括恩施州、神农架林区、十堰市的竹山县以及宜昌市的兴山县、长阳县、五峰县、宜都市、枝江市、西陵区、伍家岗区,这些地区和其周围区域的碳储量变化值都较大。2000 年,湖北省退耕还林工程在秭归、咸丰、竹溪和神农架开展试点,2002 年全面启动实施,低碳密度的耕地向高碳密度的林地转变使这些地区的碳储量出现增长。到 2005—2010 年,耕地占补导致的碳储量变化值“高高聚集”区减少为 7 个,主要集中在湖北省西部,西南部和西北部的部分县由“高高聚集”区向不显著和“低高聚集”区转变。

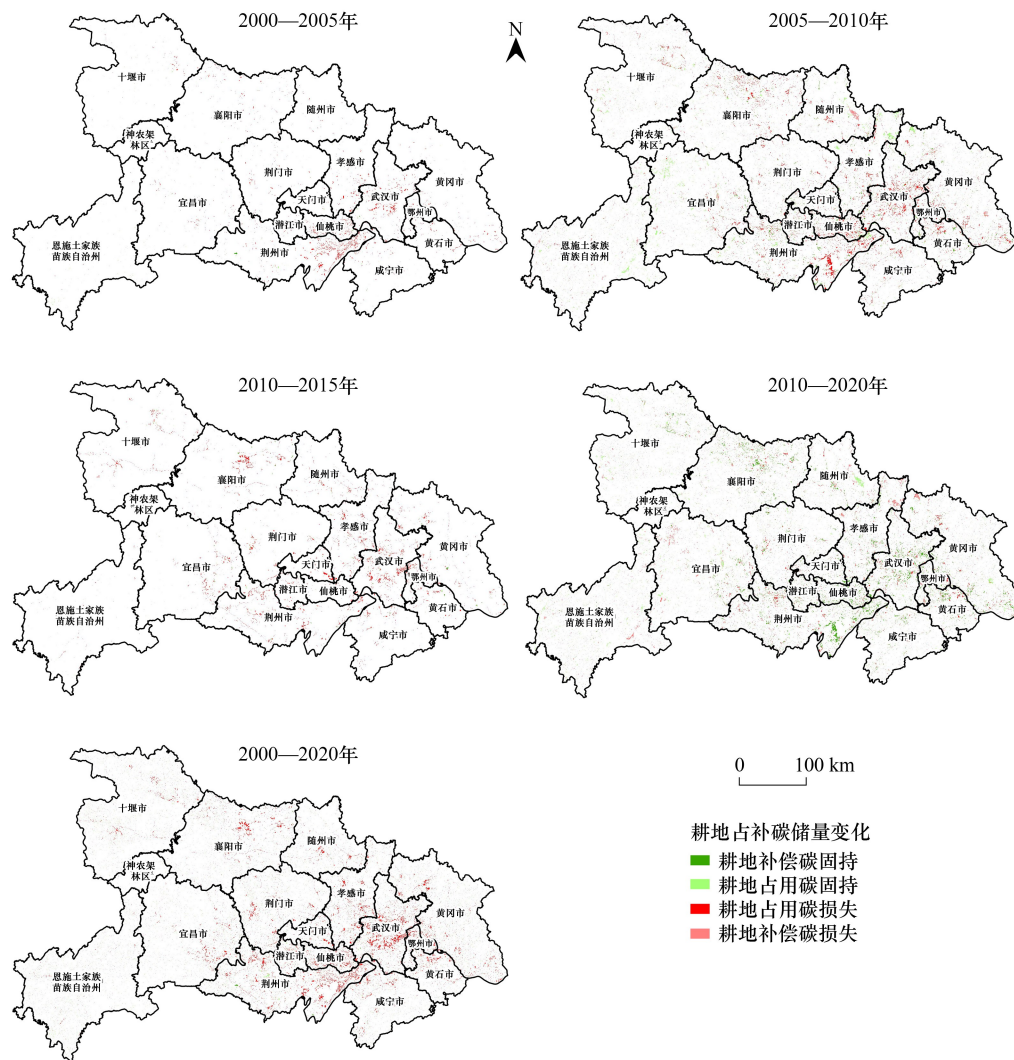


图 6 2000—2020 年湖北省耕地占补导致的碳储量空间分布变化

Fig.6 Spatial distribution of carbon storage caused by cropland occupation and compensation in Hubei Province from 2000 to 2020

2010—2015 年,“高高聚集”区又新增为 13 个,且向西南部转移,同时东部黄冈市的蕲春县、浠水县和武汉市的江汉区新增为“高高聚集”区。由于这一时期建设用地成为占用耕地的第一大来源,湖北省碳储量损失值达到四个时期最高,除恩施州的鹤峰县和武汉市的青山区、武昌区,湖北省其它县的碳储量都在下降,碳储量变化“高高聚集”区主要是碳储量下降相对较少的一些地区。2015—2020 年,湖北省中南部由原来的“低低聚集”区转变为“高高聚集”区,主要包括仙桃市、潜江市、天门市、孝感市的汉川市、荆州市的监利市、洪湖市以及武汉市的蔡甸区、汉南区等 8 个县域,原来的“高高聚集”区转变为不显著和“高低聚集”区。主要原因是上一个时间段中南部的土地利用类型变化以高碳密度的耕地向低碳密度的水域转变为主,而这个时期有大面积的低碳密度的水域和建设用地向高碳密度的耕地转变使区域的碳储量出现增长。2000—2005 年由耕地占补导致的碳储量变化值“低低聚集”区包括 6 个县级行政单元,主要集中在湖北省中南部,包括仙桃市、潜江市、咸宁市的嘉鱼县、武汉市的蔡甸区以及荆州市的监利市、洪湖市。这些地区本身碳储量变化值低,周围区域的碳储量变化值也低,耕地占补导致了碳储量的损失。2005—2010 年,“低低聚集”区新增为 10 个,且向北扩散。2010—2015 年,继续增加至 13 个,但分布由集中趋于分散。2015—2020 年,“低低聚集”区仅包括五峰县一个县。从 2000—2020 年整个时段来看,湖北省耕地占补导致的碳储量变化值“高高聚集”区主要分布在西

部和西南部山区,“低低聚集”区分布在中南部的江汉平原。

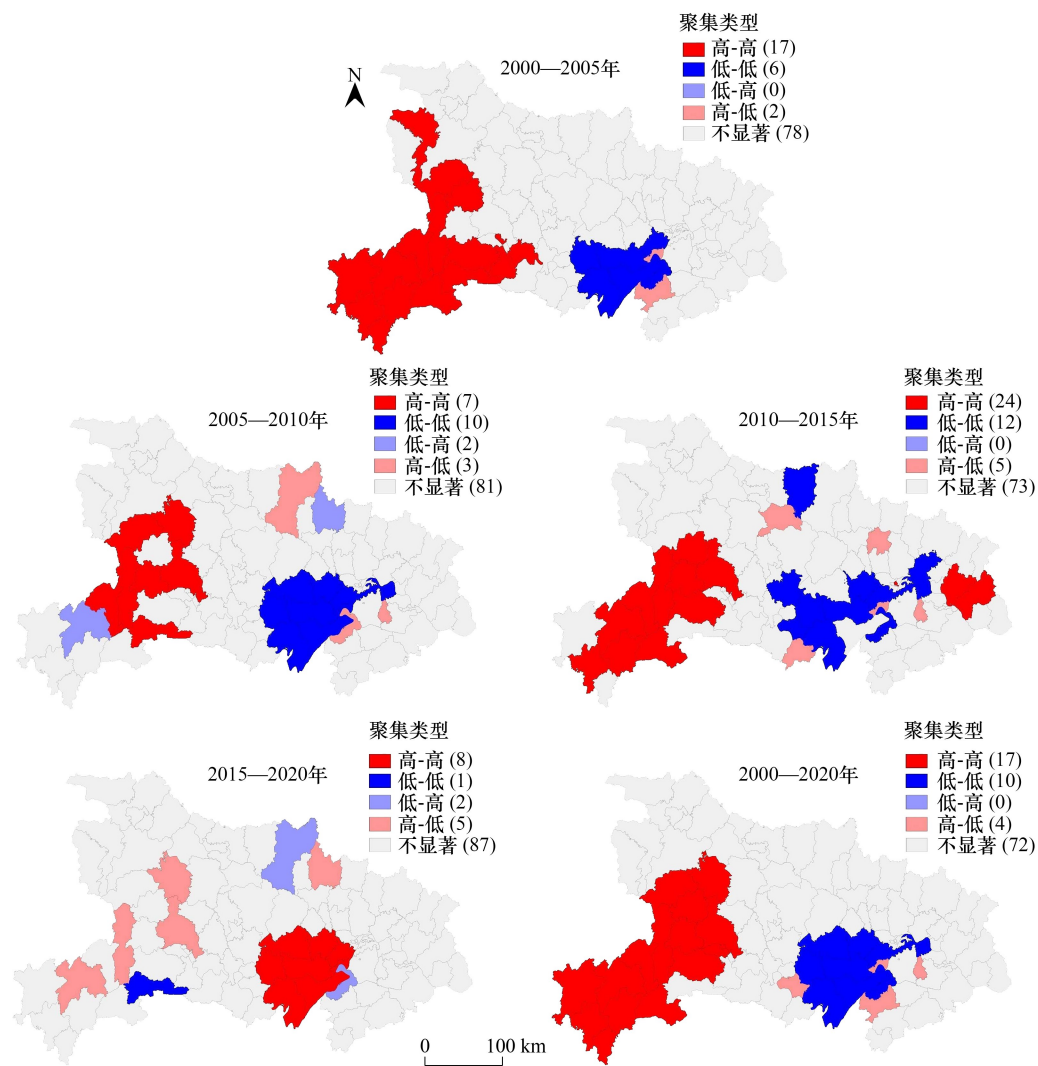


图 7 湖北省耕地占补导致的碳储量变化值局部空间自相关分析

Fig.7 Local spatial autocorrelation analysis of carbon storage changes caused by arable land supplement in Hubei Province

3.4 2030 年不同情景下湖北省土地利用模拟及碳储量预测

在 PLUS 模型中基于湖北省 2010 年的土地利用数据和选取的 12 个土地利用变化驱动因子,模拟 2020 年的土地利用数量和布局情况。将 2020 年的土地利用模拟数据与 2020 年的土地利用实际情况进行对比 (图 8),验证模型的总体精度为 0.93,Kappa 系数为 0.90,大于 0.75,说明模型模拟效果较好,可以用于模拟 2030 年不同情景下湖北省的土地利用状况。

基于 2020 年的土地利用数据,根据 Markov 模型预测的土地利用数量对 2030 年湖北省土地利用情况进行模拟(图 9),再计算不同情景下的碳储量(图 10)。由结果(表 6)可知,2030 年不同情景下湖北省的土地利用需求和布局差异较大。自然发展情景不考虑政策因素的影响,遵循土地利用结构的自然演变规律,预计到 2030 年耕地、草地、建设用地和未利用地的面积都所有扩张,而林地和水域面积则减少。从空间分布来看,建设用地的扩张主要集中在武汉市、十堰市东北部以及宜昌市中南部,前者以侵占水域为主,后两者主要侵占林地。在该情景下,碳密度较低的建设用地大幅扩张侵占碳密度较高的林地,使得湖北省陆地生态系统的碳储量较 2020 年减少 0.22%。耕地保护情景更注重对耕地的保护,严格限制耕地向其他地类转化,在该情景下,

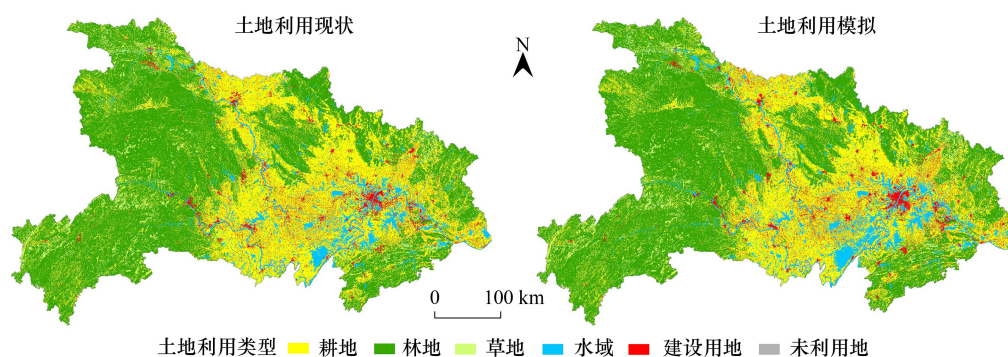


图 8 2020 年湖北省土地利用现状与 PLUS 模拟对比

Fig.8 Land use status in Hubei Province in 2020 compared with PLUS simulation

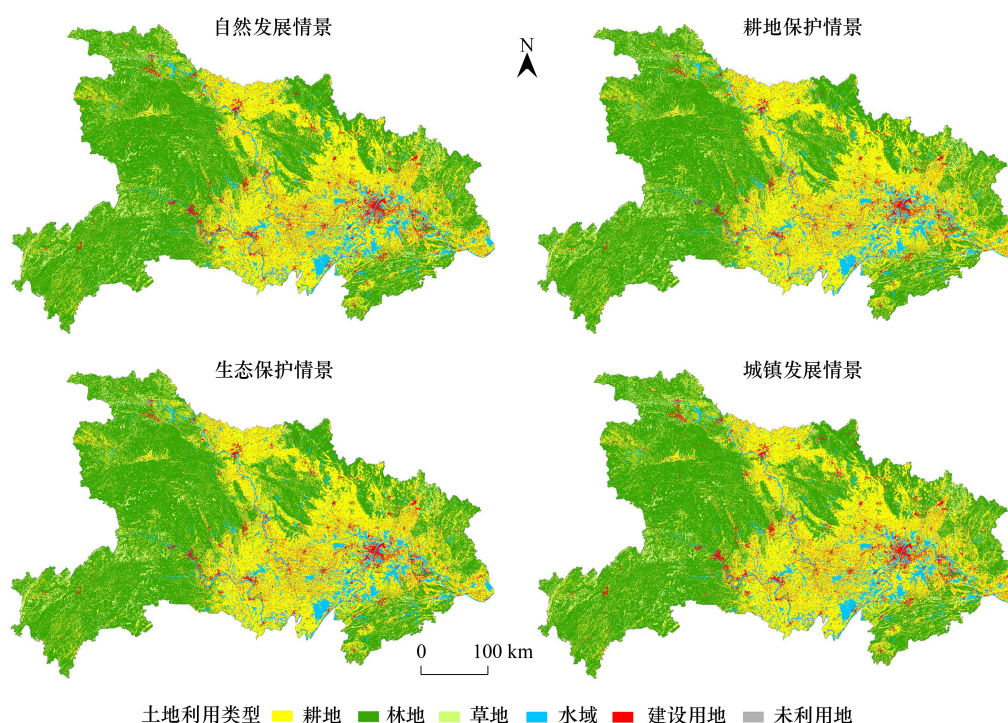


图 9 2030 年湖北省 4 种不同情景下的土地利用空间模拟

Fig.9 2030 Spatial simulation of land use under four different scenarios in Hubei Province

耕地面积和未利用地面积在四种情景中增加得最多,增幅分别达 2.56%、1.01%;而林地、草地、水域和建设用地面积则有所下降,且林地和水域的下降幅度在四个情景中最大。从空间上看,增加的耕地分布总体上较零散,但在仙桃市和荆州市东部较密集,新增耕地来源以林地和水域为主。耕地保护情景下湖北省陆地生态系统碳储量较 2020 年下降 0.05%,与自然发展情景相比碳储量的下降程度得到缓和。生态保护情景通过控制生态用地的转移和鼓励退耕还林来干预土地利用模式,在该情景下林地、草地等生态用地的面积较 2020 年分别增长 0.11%和 0.42%,建设用地的面积也有增长,但是增长率很低,由自然增长情景下的 9.59%降到 0.18%,耕地的面积较自然发展情景增幅更大,由 0.34%上升到 0.57%。从空间上来看,新增耕地分布在湖北省中南部以及襄阳市北部,新增林地和草地主要分布在湖北省西部、北部和东部的山地和丘陵地区。新增耕地、林地、草地的来源主要是水域。该情景下的碳储量较 2020 年增加 0.10%。城镇开发情景下,耕地、林地、草地、水域的面积均减少,建设用地的面积扩张幅度最大,高达 15%,未利用地面积增加 0.53%。从空间分布来看,新增建设用地零星分布在武汉市中部、黄冈市西部以及集中分布在宜昌市中南部、恩施州中部和十堰市东北

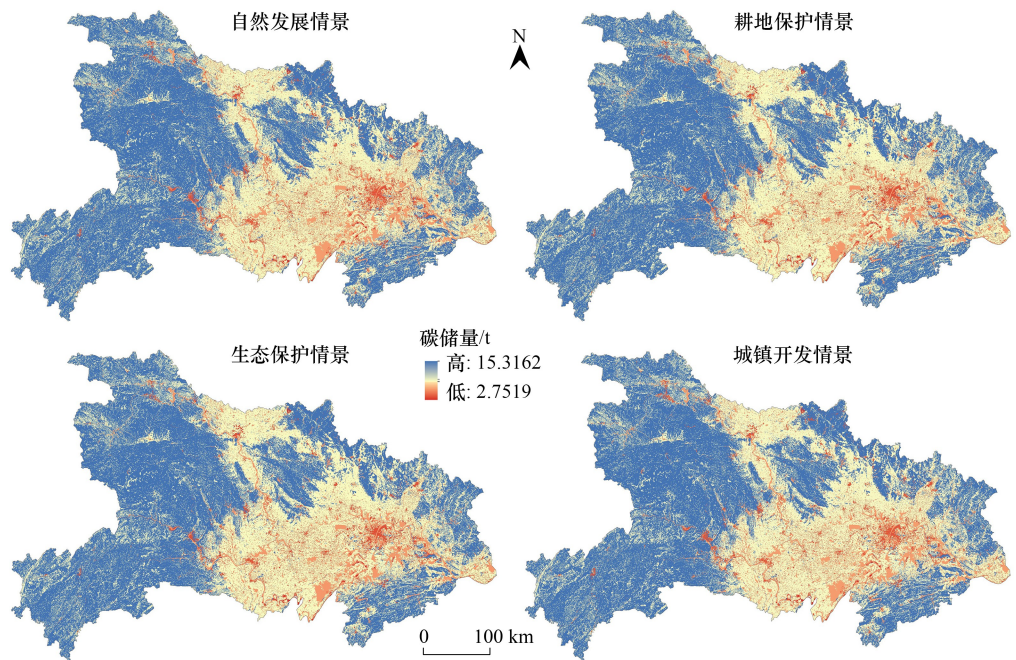


图 10 2030 年湖北省 4 种不同情景下的碳储量空间分布模拟

Fig.10 2030 Carbon storage spatial distribution simulation under four different scenarios in Hubei Province

部。该情景下湖北省陆地生态系统碳储量较 2020 年下降 0.36%,在四个情景中最低,如不加以控制,耕地占补无法达到数量平衡,且生态环境将受到威胁。

表 6 2030 年 4 种不同情景下的湖北省土地利用结构与碳储量 (面积/hm² 碳储量/t)

土地利用情景 Land use scenario	耕地 Cropland/hm ²	林地 Woodland/hm ²	草地 Grassland/hm ²	水域 Water/hm ²	建设用地 Built-up land/hm ²	未利用地 Unused land/hm ²	碳储量合计 Total carbon storage/t
2020 年实际需求 Actual demand in 2020	6697731	9224354	701471	1164582	768438	38155	2468913165
2030 年自然发展情景 Scenarios of natural development in 2030	6720367	9179704	702387	1111615	842155	38504	2463408437
2030 年耕地保护情景 Scenarios for farmland protection in 2030	6868970	9147697	699593	1092426	747506	38540	2467692865
2030 年生态保护情景 Scenarios for ecological protection in 2030	6735885	9234306	704446	1111802	769784	38509	2471346806
2030 年城镇开发情景 Scenarios for urban development in 2030	6696978	9165079	701084	1109510	883723	38357	2460020057
2030 年自然发展情景变化率(较 2020 年)/% Change rate of natural development scenarios in 2030 (compared with 2020)	0.34	-0.48	0.13	-4.55	9.59	0.92	-0.22
2030 年耕地保护情景变化率(较 2020 年)/% Change rate of farmland protection scenario in 2030 (compared with 2020)	2.56	-0.83	-0.27	-6.20	-2.72	1.01	-0.05
2030 年生态保护情景变化率(较 2020 年)/% Change rate of ecological protection scenario in 2030 (compared with 2020)	0.57	0.11	0.42	-4.53	0.18	0.93	0.10
2030 年城镇开发情景变化率(较 2020 年)/% Change rate of urban development scenario in 2030 (compared with 2020)	-0.01	-0.64	-0.06	-4.73	15.00	0.53	-0.36

4 讨论

(1) 耕地占补平衡政策对碳储量的影响

本文测算了 2000—2020 年湖北省耕地占补面积变化对碳储量的影响,研究发现耕地占补面积变化导致湖北省陆地生态系统碳储量减少了 1.3×10^7 t,占碳储量总变化量的 61.38%,主要是耕地转变为建设用地和水域以及耕地侵占林地、草地导致碳储量的损失。这与部分学者的研究结果一致,Tang 等^[29]研究表明 2000—2010 年湖北省耕地扩张导致了 1.76 Tg 的碳损失,侵占林地对碳储量的损失占耕地扩张总损失的 81%。Gao 等^[42]研究表明,2010—2015 年耕地补偿中碳储量的损失主要来自以林地补充耕地方式不恰当,虽然林地补充耕地的面积只占耕地补充总量的 19.4%,但造成的碳储量损失甚至超过耕地占用的碳储量损失。研究结果值得我们重新审视耕地占补平衡政策,该政策的初衷是抑制城市建设用地无序扩张侵占耕地,因此规定“城镇建设占用多少耕地,相关单位就应补充多少数量与质量相当的耕地”,但在实际执行过程中补充的耕地多来自土地开发,“上山入海”“围湖造田”的耕地补充方式加剧了生态退化,相当大的生态用地用以补充失去的耕地,导致碳储量的损失。在未来耕地保护政策的制定过程中,应考虑生态效应的影响,转变耕地补充途径,使土地整治成为耕地补充的主要来源,将生态补偿纳入耕地交易成本,建立耕地生态系统服务价值综合效益的预算评估方案,完善耕地占补平衡与生态协调发展机制,使耕地占补平衡政策达到数量—质量—生态平衡的三位一体。

(2) 耕地占补面积变化对碳储量影响的区域差异性

由于湖北省各地区在经济发展水平、土地资源禀赋和自然地理环境上的差异,耕地占补面积变化对碳储量的影响表现出明显的空间分异性。2000—2020 年,耕地占补导致碳储量在全省范围内有所下降。碳储量变化值“高高集聚”区是湖北省碳储量损失较少的区域,分布在湖北省西部以及西南部的山地、丘陵。该区域海拔高,拥有高覆盖的森林面积,土地利用类型以林地、草地为主,耕地数量有限且分布零散,高海拔限制了城市用地扩张侵占耕地,且该区域承担了湖北省退耕还林工程的主要任务,因此耕地占补类型以低碳密度的耕地转变为高碳密度的林地为主,导致碳储量损失较少。“低低集聚”区则是碳储量损失较多的区域,集中在中南部江汉平原、鄂东沿江平原及鄂中丘陵地区。该区域水热条件好,地形平坦,集中了全省 70% 的耕地,且经济发展迅速,建设用地扩张主要侵占耕地,因此耕地占补面积变化导致碳储量损失高于其他地区。2015 年,该区域城市扩张速度放缓,建设用地占用耕地的面积大幅减少,且有相当数量的建设用地及水域转变为耕地,使得该区域耕地占补碳储量变化值由“低低集聚”区转变为“高高集聚”区。总体而言,地形地貌等自然环境条件通过影响土地生产潜力和适应性限制耕地的扩张。社会经济因子通过影响耕地和建设用地之间的平衡驱动耕地变化,经济发展、人口增长使平衡向建设用地倾斜,耕地转变为建设用地;土地整理使平衡向耕地倾斜,建设用地转变为耕地^[43]。湖北省不同区域自然环境和社会经济状况的差异使其对耕地变化的驱动作用和方向不同,导致耕地占补面积变化对碳储量的影响表现出一定的区域差异性。

(3) 研究不足与展望

InVEST 模型假设陆地生态系统碳密度在时间尺度上保持不变,碳储量变化的原因只有土地利用方式的改变^[23],但研究证明受气温、降水、时间及人类活动方式等因素影响,即使是同种土地利用类型其碳密度也会存在差异。占用的耕地和补充的耕地地理位置不同,其碳密度并不相同。本文从大尺度的土地利用变化出发,更关注不同土地利用类型之间碳密度的差异,研究结果可以大致反映出由耕地面积变化导致的碳储量变化趋势,但无法更细致地反映耕地占优补劣导致的碳储量变化。同时,由于本文选取的碳密度数据都来源于已有文献及修正公式,与碳密度实测数据有一定差异,计算出的碳储量也存在误差。因此,未来的研究应加强对碳密度的实地采样及持续监测以提高碳储量估算结果的准确性。另外,土地利用变化是一个非常复杂的过程,运用 PLUS 模型对未来土地利用变化进行模拟在选取驱动因子和设定未来发展情景时具有非常大的主观性,且没有考虑生态保护红线、永久基本农田保护红线、城镇开发边界线等政策因素和社会发展因素对土地利

用变化的影响,使得模拟结果具有一定的不确定性,因此在未来的研究中应将地方政策和社会发展因素加入驱动因子以获得更精确的模拟结果。

5 结论

本文以湖北省为例,探究耕地占补面积时空变化对碳储量的影响,并基于 PLUS 模型模拟了湖北省 2030 年自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景和城镇开发情景下的碳储量状况。研究表明,湖北省耕地占补面积变化导致的碳储量变化占碳储量总变化量的一半以上,耕地占补对陆地生态系统碳储量具有重要影响。低碳密度的城市建设用地扩张侵占周围的耕地,在耕地“占一补一”的政策压力下开垦高碳密度的生态用地补充被占用的耕地,城市建设陷入“建设用地侵占耕地-开垦生态用地补充耕地-继续占用耕地建设城市”的恶性循环,导致陆地生态系统碳储量大量流失。因此,未来耕地保护政策的制定应考虑耕地占补平衡的生态影响,转变耕地补充来源,使土地整治而不是土地开发成为补充耕地的主要来源,使耕地占补平衡达到“数量-质量-生态”三位一体的平衡。2020—2030 年,湖北省陆地生态系统碳储量在自然发展情景下减少 0.22%,在耕地保护情景下减少 0.05%,在生态保护情景下增加 0.10%,在城镇开发情景下减少 0.36%。与其他三种情景相比,生态保护情景通过控制建设用地向林地、草地扩张有效减缓了研究区碳储量损失,同时预留了一部分空间用于城乡发展,且用于保障粮食安全的耕地面积也有增长,是未来发展的最优情景。未来土地利用结构的优化应着力于控制建设用地的扩张,加强对耕地资源的保护,推进退耕还林还草等生态保护工程,以提升陆地生态系统固碳增汇能力。

参考文献 (References):

- [1] 易丹, 欧名豪, 郭杰, 韩逸, 易家林, 丁冠乔, 吴文俊. 土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望. 资源科学, 2022, 44(8): 1545-1559.
- [2] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 郑辉, 朱连奇. 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. 地理学报, 2019, 74(3): 446-459.
- [3] 邓喆, 丁文广, 蒲晓婷, 吕泳洁, 王亚丽. 基于 InVEST 模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究. 水土保持通报, 2022, 42(3): 324-334, 396.
- [4] 唐兰萍, 柯新利, 郑伟伟. 耕地占补平衡对碳储量影响的情景分析. 土地经济研究, 2020(2): 76-93.
- [5] He C Y, Liu Z F, Xu M, Ma Q, Dou Y Y. Urban expansion brought stress to food security in China: evidence from decreased cropland net primary productivity. Science of the Total Environment, 2017, 576: 660-670.
- [6] 蒋瑜, 濮励杰, 朱明, 黄思华, 刘荣娟. 中国耕地占补平衡研究进展与述评. 资源科学, 2019, 41(12): 2342-2355.
- [7] Liu C Y, Song C Q, Ye S J, Cheng F, Zhang L N, Li C. Estimate provincial-level effectiveness of the arable land requisition-compensation balance policy in mainland China in the last 20 years. Land Use Policy, 2023, 131: 106733.
- [8] 汤怀志, 桑玲玲, 郇文聚. 我国耕地占补平衡政策实施困境及科技创新方向. 中国科学院院刊, 2020, 35(5): 637-644.
- [9] Song W, Liu M L. Farmland conversion decreases regional and national land quality in China. Land Degradation & Development, 2017, 28(2): 459-471.
- [10] 韩璐, 孟鹏, 蒋仁开, 徐保根, 张冰松, 陈美景. 新时代耕地占补平衡的逻辑根源、模式探索与管理创新——基于“新时代耕地占补平衡方式改进与管理创新研讨会”的思考. 中国土地科学, 2018, 32(6): 90-96.
- [11] Ke X L, van Vliet J, Zhou T, Verburg P H, Zheng W W, Liu X P. Direct and indirect loss of natural habitat due to built-up area expansion: a model-based analysis for the city of Wuhan, China. Land Use Policy, 2018, 74: 231-239.
- [12] Zhang Z, Jiang W G, Peng K F, Wu Z F, Ling Z Y, Li Z. Assessment of the impact of wetland changes on carbon storage in coastal urban agglomerations from 1990 to 2035 in support of SDG15.1. Science of the Total Environment, 2023, 877: 162824.
- [13] Zhu L Y, Song R X, Sun S, Li Y, Hu K. Land use/land cover change and its impact on ecosystem carbon storage in coastal areas of China from 1980 to 2050. Ecological Indicators, 2022, 142: 109178.
- [14] Zhang M, Huang X J, Chuai X W, Yang H, Lai L, Tan J Z. Impact of land use type conversion on carbon storage in terrestrial ecosystems of China: a spatial-temporal perspective. Scientific Reports, 2015, 5: 10233.
- [15] Li J S, Guo X M, Chuai X W, Xie F J, Yang F, Gao R Y, Ji X P. Reexamine China's terrestrial ecosystem carbon balance under land use-type and climate change. Land Use Policy, 2021, 102: 105275.
- [16] 孙方虎, 方凤满, 洪炜林, 罗浩, 余健, 房莉, 苗雨青. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测. 水土保持学报, 2023, 37(1): 151-158.

- [17] Hu J X, Yan D Y, Wang W L. Estimating carbon stock change caused by multi-scenario land-use structure in urban agglomeration. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5503.
- [18] 张斌, 李璐, 夏秋月, 董捷. “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. *生态学报*, 2022, 42(6): 2265-2280.
- [19] 石晶, 石培基, 王梓洋, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测. *环境科学*, 2023: 1-18. DOI:10.13227/j.hjxx.202302222.
- [20] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 张童越, 鲁亚楠, 龚直文, 王怡菲. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例. *自然资源学报*, 2020, 35(4): 826-844.
- [21] 林一诚, 郑景明, 周怡宁, 等. 基于 InVEST 模型的围场县小滦河流域碳储量空间分布及热点区域分析. *生态学杂志*, 2023: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230505.0910.006.html>.
- [22] 刘洋, 张军, 周冬梅, 马静, 党锐, 马靖靖, 朱小燕. 基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究. *生态学报*, 2021, 41(10): 4052-4065.
- [23] Zhou J J, Zhao Y R, Huang P, Zhao X, Feng W, Li Q Q, Xue D X, Dou J, Shi W, Wei W, Zhu G F, Liu C F. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106803.
- [24] 姚楠, 刘广全, 姚顺波, 邓元杰, 侯孟阳, 张晓. 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. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 329-336.
- [25] 巩晟萱, 张玉虎, 李宇航. 基于 PLUS-InVEST 模型的京津冀碳储量变化及预测. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(6): 20-28.
- [26] 邵壮, 陈然, 赵晶, 夏楚瑜, 何颖婷, 唐丰芸. 基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测. *生态学报*, 2022, 42(23): 9456-9469.
- [27] 林子奇, 王培俊, 刘旗, 杨亚丽. 2005—2020 年淮海经济区耕地碳储量时空演变特征及碳汇区识别. *农业工程学报*, 2022, 38(19): 259-268.
- [28] Gai Z X, Xu Y, Du G M. Spatio-temporal differentiation and driving factors of carbon storage in cultivated land-use transition. *Sustainability*, 2023, 15(5): 3897.
- [29] Tang L P, Ke X L, Zhou T, Zheng W W, Wang L Y. Impacts of cropland expansion on carbon storage: a case study in Hubei, China. *Journal of Environmental Management*, 2020, 265: 110515.
- [30] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, Liu S S, Wang B Y, Yao Y. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [31] 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. *生态学报*, 2019, 39(2): 672-683.
- [32] Chuai X W, Huang X J, Lai L, Wang W J, Peng J W, Zhao R Q. Land use structure optimization based on carbon storage in several regional terrestrial ecosystems across China. *Environmental Science & Policy*, 2013, 25: 50-61.
- [33] 梁萌杰, 陈龙池, 汪思龙. 湖南省杉木人工林生态系统碳储量分配格局及固碳潜力. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 896-902.
- [34] Zhang F, Zhan J Y, Zhang Q, Yao L N, Liu W. Impacts of land use/cover change on terrestrial carbon stocks in *Uganda*. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2017, 101: 195-203.
- [35] 王晓荣, 张家来, 庞宏东, 郑兰英, 崔鸿侠. 湖北省森林生态系统碳储量及碳密度特征. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(10): 93-100.
- [36] 丁访军, 潘忠松, 吴鹏, 崔迎春, 周凤娇. 贵州东部常绿落叶阔叶混交林碳素积累及其分配特征. *生态学报*, 2015, 35(6): 1761-1768.
- [37] 刘刚, 陈利. 洪湖湿地碳储量的研究. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(8): 103-107.
- [38] 朱耀军, 赵峰, 郭菊兰, 武高洁, 林广旋. 湛江高桥红树林湿地有机碳分布及埋藏特征. *生态学报*, 2016, 36(23): 7841-7849.
- [39] 邵继承, 靳振江, 崔立强, 潘根兴. 不同土地利用下湖北江汉平原湿地起源土壤有机碳组分的变化. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 124-128.
- [40] 奚小环, 李敏, 张秀芝, 张燕平, 张德存, 张建新, 窦磊, 杨奕. 中国中东部平原及周边地区土壤有机碳分布与变化趋势研究. *地学前缘*, 2013, 20(1): 154-165.
- [41] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 邱全毅, 王琳, 唐立娜. 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. *生态学报*, 2019, 39(12): 4284-4298.
- [42] Gao R Y, Chuai X W, Ge J F, Wen J Q, Zhao R Q, Zuo T H. An integrated tele-coupling analysis for requisition-compensation balance and its influence on carbon storage in China. *Land Use Policy*, 2022, 116: 106057.
- [43] 王文旭, 曹银贵, 苏锐清, 宋蕾, 庄亦宁, 周伟. 我国耕地变化驱动力研究进展: 驱动因子与驱动机理. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(7): 21-30.