

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.032.

胡信熹, 勒先文, 徐勇. 基于 FLUS 模型多情景土地利用变化对陆地生态系统碳储量影响——以江西萍乡为例[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 299-309.

Hu Jixi, Le Xianwen, Xu Yong. Estimating Terrestrial Eco-System Carbon Stock Changes Caused by Multi-Scenarios Land-Use Changes Based on the FLUS Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 299-309.

基于 FLUS 模型多情景土地利用变化对 陆地生态系统碳储量影响 ——以江西萍乡为例

胡信熹^{1,2}, 勒先文², 徐勇³

(1.湖南农业大学 公共管理与法学院, 长沙 410128; 2.萍乡学院 商学院,
江西 萍乡 337055; 3.桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541006)

摘要: [目的]揭示萍乡碳储量时空分布特征, 阐明土地地类变化与碳储量之间的关系, 为探明区域生态系统碳储量状况提供数据支撑。[方法]利用 FLUS(future land use simulation)模型与 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)模型, 预测了 2030 年萍乡市 3 种不同情景下(自然发展、耕地保护和生态优先)碳储量值。[结果](1) 2010—2020 年萍乡市碳储量整体呈下降趋势, 共减少 1.47×10^6 t; (2) 耕地、建设用地、草地、水体和建设用地面积增加和林地与灌木面积减少, 是导致碳储量变化的主要原因; (3) 2030 年自然发展、耕地保护和生态优先情景下陆地生态系统碳储量分别约为 4.906×10^7 , 4.919×10^7 , 5.038×10^7 t, 其中生态优先情景下碳储量损失最少。[结论]萍乡生态系统碳储量呈下降趋势, 主要受耕地与建设用地增大的影响, 未来应加强对安源区与经济开发重点变化区域的监测研究。

关键词: 土地利用变化; 碳中和; FLUS; 情景模拟; 萍乡市

中图分类号: F301.24; X144

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0299-11

Estimating Terrestrial Eco-System Carbon Stock Changes Caused by Multi-Scenarios Land-Use Changes Based on the FLUS Model — A Case Study of Pingxiang, Jiangxi

Hu Jixi¹, Le Xianwen², Xu Yong³

(1.School of Public Administration and Law, Hunan Agricultural University,
Changsha 410128, China; 2.School of Business, Pingxiang University, Pingxiang, Jiangxi 337055, China;
3.College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, GuiLin, Guangxi 541006, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the spatiotemporal distribution characteristics of carbon storage in Pingxiang, to clarify the relationship between land use change and carbon storage, and to provide data support for understanding the carbon storage status of the regional ecosystem. [Methods] The FLUS (future land use simulation) model and the InVEST (integrated valuation of ecosystem services and trade-offs) model were used to predict the carbon storage values under three different scenarios (natural development, farmland protection, and ecological priority) in Pingxiang City in 2030. [Results] (1) From 2010 to 2020 the carbon storage in Pingxiang City showed an overall decreasing trend with a total reduction of 1.47×10^6 t. (2) The increase in farmland, construction land, grassland, water bodies, and construction land

收稿日期: 2023-02-07

修回日期: 2023-03-17

资助项目: 江西省社会科学基金“萍乡市城乡融合发展对策研究”(21DQ14)

第一作者: 胡信熹(1981—), 男, 江西萍乡人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为土地利用变化及生态效应分析。E-mail: hxj198118@163.com

通信作者: 徐勇(1988—), 男, 湖南益阳人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化和植被覆盖反演研究。E-mail: yongxu@glut.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

area, as well as the decrease in forest and shrub area were the main reasons for the changes in carbon storage. (3) In 2030, under the scenarios of natural development, farmland protection, and ecological priority, the carbon storage of terrestrial ecosystems in Pingxiang City will be approximately 4.906×10^7 , 4.919×10^7 and 5.038×10^7 t, respectively, with the least carbon storage loss observed in the ecological priority scenario. [Conclusion] The carbon storage of the Pingxiang ecosystem is declining mainly due to the increase in farmland and construction land. In the future, monitoring and research should be strengthened in key areas of change in Anyuan District and the Economic Development Zone.

Keywords: land use change; carbon neutrality; FLUS; scenario simulation; Pingxiang City

温室气体(CO_2 , CH_4 和 N_2O 等)的过度排放是全球气候变暖的重要原因,引起了世界各国的高度关注^[1-2]。陆地生态系统作为大气 CO_2 的一个重要碳汇,抵消了中国同期化石燃料燃烧碳排放的 7%~15%,在全球碳循环、缓解温室效应等方面扮演着关键作用^[3]。中国作为全球最大的碳排放大国(约占全球碳排放量的 27%),贡献了 8.6% 的全球气候变暖强迫效应^[4]。为缓解温室效应对全球气候变暖的影响,中国政府将力争在 2030 年左右实现碳排放,努力实现单位国内生产总值能耗碳排放比 2005 年下降 60%~65%,到 2060 年实现碳中和(简称“双碳”战略)。“碳排放”和“碳减排”等问题引起广泛关注。

研究表明 LUCCs 是影响陆地生态系统碳储量变化的重要因素,它通过破坏地表的植被和土壤的生物量从而对物种、土壤、气候等环境产生影响,重构区域生态系统的结构,改变生态系统的服务功能,进而影响着区域碳储量的变化,是造成大气中 CO_2 激增的第二大原因^[3]。因此,定量评估 LUCCs 对碳储量影响,对提高区域碳储量及实现区域的“双碳”战略目标具有重要意义。

国内外研究对 LUCCs 对陆地生态系统碳储量的影响开展了大量的研究,并应用至全球^[1,5]、国家^[6]、省域^[7]、城市群^[8]、城市等^[9]多个研究尺度。已有研究利用追溯法来分析 LUCCs 对陆地生态系统碳储量时空分布特征。如 Chang 等^[6]指出从 2000—2018 年中国土地利用变化引起的碳储量变化达 1.32 Pg C,并且主要集中在植被生物和土壤碳中。Zhu 等^[10]指出 1980—2015 年中国干旱区土地利用变化引起的陆地生态系统碳储量损失达 90.95 Tg。向书江等^[11]指出由于大量耕地被占用,2000—2020 年重庆市主城区碳储量累计损失达 5.78 Tg。此外,相关研究探索了不同情景下土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响,服务于“双碳”战略的规划实施。如刘晓娟等^[12]探讨了 RCP6.0 和 RCP8.5 情景下中国未来土地覆盖变化造成的 TCS 损失;侯建坤等^[13]评估了黄河源区自然变化情景和生态保护情景下的碳

储量分别增加了 3.92×10^6 t 和 1.353×10^7 t;邵壮等^[14]评估了北京市 2035 年自然演变情景、人口疏解城市发展情景和绿色集约生态保护情景下其陆地生态系统碳储量分别增加了 7.5×10^6 t, 1.564×10^7 t 和 1.639×10^7 t。综合以往研究,在研究范围上,大多集中于全球、区域和省域等区域尺度上,少有研究去关注资源枯竭型城市转型过程中土地利用的变化及其带来的碳储量变化。就陆地生态系统碳储量估算方法而言,InVEST 模型结合地理模拟与优化模型框架在评估由土地利用变化引起碳储量变化中已得到广泛应用。已有研究利用 FLUS, PLUS, CLUE-S, CLUMondo, ANN-CA 等模型评估了未来土地利用变化对碳储量的影响研究^[3,15-17]。而 FLUS 模型结合神经网络算法和自适应竞争机制可较好地处理多地类的竞争和不确定性问题,模型表现优于 CLUE-S, ANN-CA 等模型。FLUS 模型尤其是将人与自然因素结合在一起,通过将“自上而下”的系统动态与“自下而上”元胞自动机有机地结合,实现了对未来大规模土地使用变化过程中的精准模拟^[18]。

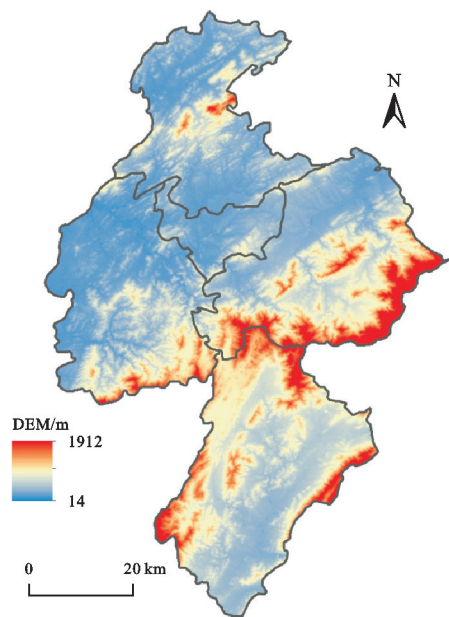
因此,本文以萍乡市为研究区域,基于 2010—2020 年萍乡市的土地利用数据,采用 FLUS 模型模拟 3 种情景下(自然发展情景、耕地保护情景和生态优先情景)的土地利用变化格局,并运用 InVEST 模型评估萍乡市 2010—2020 年以及 2030 年不同情景下土地利用变化对陆地生态系统碳储量的变化,为萍乡市土地利用的合理规划以及可持续发展提供科学依据。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

萍乡市位于江西省西部,地理位置为 113° — 114°E , 27° — 28°N ,长江中游城市群成员之一,也是长株潭经济圈的辐射核心区域(图 1)。东与宜春市接壤,南与吉安市毗邻,西与湖南省株洲市相连,北与湖南省浏阳市交界,素有“湘赣通衢”“吴楚咽喉”之称。全市土地面积 $3\,831\text{ km}^2$,截至 2021 年末,萍乡市常住人口为 180.59 万人,GDP 产值 1 108.3 亿元。萍乡市

煤炭资源丰富,然而经过一个世纪的高强度开发,煤炭资源趋于枯竭,以煤炭为主导的相关产业进入衰退期。大量煤炭的开采导致地表面塌方下沉,致使采煤区山体和居民区域地面下沉,威胁着区域的生态环境。近20年来,萍乡市各级政府始终将煤炭开采区域的环境生态修复和产业转移与升级作为重要工作,推动萍乡市经济转型发展,促进经济的高质量发展。经济的发展必然会引起土地利用类型的变化,从而对生态系统碳储量产生较大的影响,因此,在“双碳”背景下探究未来土地利用变化引起碳储量变化,可为区域的国土空间规划和“双碳”战略的谋划提供数据支撑。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2020)2619 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 江西省萍乡市位置

Fig. 1 Location of Pingxiang City, Jiangxi Province

1.2 数据来源与处理

LUCCs 是在自然、人文、社会经济等多重因素下驱动的动态过程,是一个复杂性系统。本文借鉴已有研究^[15],从自然、人文和社会经济三方面选取 LUCCs 驱动因子。其中,土地利用类型数据来源于武汉大学 1990—2021 年中国 30 m 土地覆被数据集^[19],分辨率为 30 m×30 m;DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),分辨率为 30 m×30 m;气温降水、GDP 和人口数据来源于中国科学院资源与环境科学与数据中心数据平台(<https://www.resdc.cn>),分辨率为 1 000 m×1 000 m;道路数据来源于 OpenStreetMap 数据集(<https://www.openstreetmap.org/>),距主要道路、铁路、河流、区县中心等距离以欧式距离进行度量。

2 研究方法

2.1 InVEST 模型

以植被主导的土地利用类型(如森林、草地、农田、灌木等)是陆地生态系统的主要载体,并通过光合作用从大气中吸收大量的 CO₂,因此,量化土地利用类型的变化可为探究陆地生态系统碳储量的变化提供支撑^[1]。本文利用 InVEST 模型中的碳储量模块分析 2010—2020 年萍乡市陆地生态系统碳储量变化情况,并对模拟的 2030 年陆地生态系统碳储量变化情况进行评估。InVEST 将生态系统碳储量(C_{total})划分为 4 个基本碳库:地上植被碳库(C_{above})、地下植被碳库(C_{below})、土壤有机碳库(C_{soil})和死亡有机碳库(C_{dead})^[12,20],即:

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

2.2 Markov 模型

Markov 模型是基于某一事件的历史发展轨迹来预测事件的发展趋势的一种方法,具有无后效性特征,广泛应用于土地利用类型的数量预测以及情景设定中^[9],公式如下:

$$S(T) = P_{ij} \times S(T_0) \quad (2)$$

式中: $S(T)$ 和 $S(T_0)$ 分别为在 T 和 T_0 时刻土地利用状态矩阵; P_{ij} 为第 i 类土地利用类型向第 j 类土地利用类型转换的转移概率矩阵,由历史土地利用类型数据计算而得。

2.3 FLUS 模型

FLUS(future land use simulation)模型是由中山大学 Liu 等^[18]提出的一种模拟多类型土地利用变化的 CA 模型,它通过轮盘赌和人工神经网络(artificial neural network)模型来量化多种土地利用类型之间的竞争关系,已广泛应用于土地利用变化的后置效应分析(如生态系统服务价值评估、粮食安全、国土空间规划、碳储量分析等)^[15,21-24]。此外,利用自适应惯性因子用来表征历史土地利用类型的数量变化趋势,以确保模型的土地利用类型数据达到预设的土地利用类型需求。常用的 FLUS 模型主要由以下几个模块组成。

(1) 土地利用转换潜力评估。FLUS 模型以 BPNN(back propagation neural network)来拟合土地利用类型转换潜力与影响因子之间复杂的非线性关系。常用的 BPNN 模型通常由输入层、隐含层和输出层三层构成^[25],在训练阶段,利用已有训练数据集,基于反向传播机制训练各层之间的连接权重值,在预测阶段,将影响因子输入至输入层,从输出层计算得到各种土地利用类型的发展潜力,此外,输出层

的 Softmax 激活函数将土地利用类型转换潜力归一化至 0~1,并确保各土地利用类型转换潜力之和为 1 [公式(3)–(4)]。其数学表达式如下:

$$\text{net}_j(p, t) = \sum_j w_{i,j} \times x_i(p, t) \quad (3)$$

$$P(p, k, t) = \sum_j w_{j,k} \times \text{sigmoid}[\text{net}_j(p, t)] \\ = \sum_j w_{j,k} \times \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_j(p, t)}} \quad (4)$$

式中: $P(p, k, t)$ 为 t 时刻土地利用类型 k 在元胞 p 处的发展潜力; $x_i(p, t)$ 为在 t 时刻与元胞 p 处上的输入神经元 i 相关的输入变量; $w_{i,j}$ 和 $w_{j,k}$ 分别为输入层与隐含层之间、隐含层与输出层之间的权重,该权重是通过训练数据集,经反向传播算法拟合; $\text{net}_j(p, t)$ 为隐含层神经元 j 接收到的信号。

(2) 自适应惯性因子。自适应惯性因子用来表征多种土地利用类型之间的相互作用,根据每次迭代中宏观土地需求与当前土地利用分配 (D_k^{-1}) 之间的数量差异自适用地调整网格中当前土地利用类型的发展趋势^[18],详细的调整规则如下:

$$\text{Intertia}_k^t = \begin{cases} \text{Intertia}_k^{t-1} & |D_k^{t-1}| \leq |D_k^{t-2}| \\ \text{Intertia}_k^{t-1} \times D_k^{t-2} / D_k^{t-1} & D_k^{t-1} < D_k^{t-2} < 0 \\ \text{Intertia}_k^{t-1} \times D_k^{t-1} / D_k^{t-2} & 0 < D_k^{t-2} < D_k^{t-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: Intertia_k^{t-1} 为土地利用类型 k 在迭代时间 ($t-1$) 时的惯性系数。

(3) 邻域效应。邻近的土地利用类型及数量也会影响元胞的发展趋势。邻域发展密度用来评估元胞邻域效应的程度^[21],详细的表达式如下:

$$\Omega_{p,k}^t = \frac{\text{con}(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times w_k \quad (6)$$

式中: $\Omega_{p,k}^t$ 为在迭代时间 t 时,土地利用类型 k 对元胞 p 产生邻域效应; $\text{con}(c_p^{t-1} = k)$ 为土地利用类型 k 在迭代时间 ($t-1$) 时,在 $N \times N$ 摩尔邻域内的土地利用类型数量; w_k 为土地利用类型 k 的邻域影响效力。

(4) 转换成本与约束。转换成本用于表征从当前土地利用类型到目标土地利用类型转换的难易程度,该模块通常是来源于专家学者及相关的先验知识。此外,一些强制性约束也可以嵌入模型中,即如果元胞 p 位于约束区域内,则约束变量 $\text{Con}_p = 0$,否则为 1。

因此,综合转换概率 $\text{TProb}_{p,k}^t$ 可以通过以下的表达式计算:

$$\text{TProb}_{p,k}^t = P(p, k, t) \times \Omega_{p,k}^t \times \text{Intertia}_k^t \times \text{sc}_{c \rightarrow k} \times \text{Con}_p \quad (7)$$

式中: $\text{sc}_{c \rightarrow k}$ 为土地利用类型 c 转换成目标土地利用类型 k 的转换成本。

综合转换概率决定由当前土地利用类型转换成不同土地利用类型的优先级。顾及不同土地利用类型间的竞争关系,FLUS 模型在转换过程中采用轮盘赌的方式进行选择,充分考虑了非主导土地利用类型的转换能力,即综合转换概率高的土地利用类型转换的可能性较大,综合转换概率低土地利用类型也仍可能转换。当所有土地利用类型的数量都满足预测的土地利用类型数量需求(允许误差为 1%)或者达到了预设的最大迭代次数时,则得到了相应的模拟结果。此外,以 Kappa 系数和 FoM 指数验证模型的表现。

2.4 情景设置

国土空间布局优化的实质是缓解城镇空间对农业空间和生态空间的侵占,协调城镇空间、农业空间和生态空间之间的冲突。为了更好地评估萍乡市未来土地利用变化对陆地生态系统碳储量影响,本研究参照相关研究^[9-15],以调整城镇空间、农业空间和生态空间之间的转换概率大小设定 3 种土地利用变化模拟的情景,其详细规则如下:

(1) 自然发展情景。该情景基于历史土地利用类型数据(2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年),运用 Markov 模型 [公式(2)] 预测萍乡市 2030 年各类土地利用类型数量,并设置为 FLUS 模型运行的宏观需求参数,其他情景以该情景为基础。

(2) 耕地保护情景。保障耕地的安全是维持区域粮食安全的基础,是国家坚决贯彻执行的一项基本国策。以自然发展情景为基础,对 Markov 模型中转移概率矩阵进行适当修正,即降低耕地向建设用地的转移概率(50%)。

(3) 生态优先情景。预留适当的生态用地对维持区域物种生存、生态流流动及生态系统结构和功能的稳定性具有重要的作用。以自然发展情景为基础,降低生态用地(即林地和草地)向建设用地转换的概率(40%)。此外,水体和耕地也具备维持物种生存、生态流等生态系统的功能,因而,该情景也降低水体和耕地向建设用地转换的概率(水体:30%,耕地:20%),并且耕地向林地转换概率增加 20%。

3 结果与分析

3.1 数据预处理与模型验证

本文根据研究区特点将土地利用类型分为耕地、林地、灌木、草地、水域和建设用地。FLUS 模型的驱动因素由人口、GDP、高程、坡度、坡向、降雨、气温、到河流距离、到主要道路距离、到铁路距离、到区县中心距离和到乡镇中心距离总共 12 个空间变量构成,

并进行归一化处理(0~1)。为验证 FLUS 模型的适用性,以萍乡市 2010—2020 年的土地利用变化为例,邻域效应设为 Moore 邻域,大小为 3×3,土地利用类型转换成本矩阵见表 1。FLUS 模型的总体精度为 0.903,Kappa 系数为 0.795,FoM 指数为 0.16,表明模型具有良好的适用性。

表 1 土地利用转换成本矩阵
Table 1 Land use conversion cost matrix

| 类型 | 自然发展情景 | | | | | | 耕地保护情景 | | | | | | 生态优先情景 | | | | | |
|----|--------|---|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|---|
| | a | b | c | d | e | f | a | b | c | d | e | f | a | b | c | d | e | f |
| a | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| b | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| c | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| d | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| e | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| f | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

注:a,b,c,d,e,f 分别代表耕地、林地、灌木、草地、水域和建设用地;1=可能转换,0=不可能。

3.2 不同土地利用类型的碳密度评估

InVEST 模型中所需要的碳密度数据包含不同土地利用类型的 4 个基本碳库,即地上生物量、地下生物量、土壤和死亡有机物。为了保证碳密度数据的一致性和碳储量的准确性,碳密度数据尽量选取江西范围内的前人研究成果。在江西数据缺失的情况下,适当采用相近纬度的邻省碳库数据。刘丹丹^[26]研究了江西区域的碳储量分布,刘咏梅等^[27]研究了长三角地区各用地类型的碳密度值,Ke 等^[28]研究了湖北省各土地利用类型的碳密度值。因此,本文主要参考以上三人的成果,对各用地类型的碳密度数据取算术平均数,尽量减少单一误差给研究结果带来较大差异,得到萍乡市各土地利用类型的碳密度值(表 2)。

表 2 研究区各土地利用类型碳密度值

| Table 2 Carbon density in the study area t/hm ² | | | | |
|--|-------|-------|-------|----------|
| 土地利用类型 | 地上碳密度 | 地下碳密度 | 土壤碳密度 | 死亡有机物碳密度 |
| 耕地 | 13.35 | 7.78 | 72.36 | 1.51 |
| 林地 | 42.22 | 8.65 | 98.84 | 3.51 |
| 灌木 | 41.66 | 8.04 | 90.04 | 3.08 |
| 草地 | 11.11 | 16.35 | 67.94 | 4.07 |
| 水域 | 3.44 | 5.00 | 47.08 | 1.03 |
| 建设用地 | 7.92 | 1.58 | 35.75 | 0.00 |

3.3 萍乡市土地利用动态变化

3.3.1 萍乡市 2010—2020 年土地利用动态变化
2020 年,萍乡市土地利用类型以林地和耕地为主,面积分别为 2 554.05,1 096.63 km²,二者占整个研究区面积的 95% 以上(图 2)。从表 3 可以看出 2010—2020 年萍乡市耕地、林地、建设用地之间互为转入和转出的主要来源,其中耕地转入面积主要来源于林地;林地转入面积主要来源于耕地;建设用地转入面积主要来源于耕地和林地。

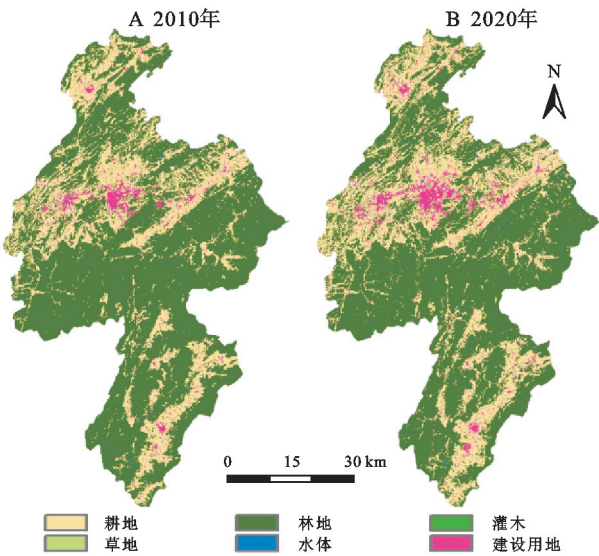


图 2 萍乡市土地利用动态变化
Fig. 2 Land-use pattern of Pingxiang City, Jiangxi Province

2010—2020 年萍乡市的建设用地、灌木、草地、水体转出面积最小,耕地和林地转出面积最多。整体来看,林地向耕地的转出大于耕地向林地的转出,同时二者均向建设用地转出,主要原因是由于 2010—2020 年萍乡市处于快速发展阶段,城镇化速度加快,对土地开发的需求也较为强烈,城市建设用地的发展主要源于侵占了周边耕地与林地,中心城区的大量耕地转为建设用地,中心城区的发展。

(1) 2010—2020 年,由耕地转换为林地 33.25 km²,转换为灌木 0 km²,转换为草地 0.39 km²,转换为建设用地 46.22 km²。后期的耕地由早期的林地面积转入 219.70 km²,由灌木面积转入 0.01 km²,由草地面积转入 0.08 km²,由水体面积转入 1.36 km²,由建设用地面积转入 0.03 km²。可以看出,耕地主要向林地和建设用地转出,林地为主要的转入地类,这主要是由于耕地占补平衡政策的实施,转出的耕地主要由林地进行补充。此

外,2010—2020 年,耕地转建设用地最大的乡镇为安源区(彭高镇、赤山镇、白源街、青山镇、丹江街),湘东区(湘东镇、荷尧镇、下埠镇),上栗县(上栗镇、金山镇),芦溪县(芦溪镇、宣风镇),莲花县(琴亭镇、升坊镇),除城市核心安源区外,其他县区呈现出双核结构,由县区所在乡镇(耕地转化为建设用地)及传统工业强镇(耕地转化为工业用地)。从各地类的变化面积来看,耕地转

入面积最多,为 221.18 km²,转入贡献率为 69.59%,高于其转出面积(81.95 km²),其中来自林地的转入面积高达 219.70 km²。林地转出面积(233.67 km²)高于转入面积(33.32 km²),主要转向耕地。林地转向建设用地主要集中在安源工业园、芦溪工业园和湘东工业园,综合来看,耕地向建设用地和工业用地转换,城郊林地则主要向工业用地转换(表 3)。

表 3 2010—2020 年研究区土地利用变化结果

Table 3 Land use change in the Pingxiang between 2010 and 2020

| 年份 | 土地利用类型 | 2020 年转移面积/km ² | | | | | | 转出面积/ km ² | 转出 贡献率/% |
|------|----------------------|----------------------------|---------|------|------|------|--------|--------------------------|-------------|
| | | 耕地 | 林地 | 灌木 | 草地 | 水体 | 建设用地 | | |
| 2010 | 耕地 | 875.45 | 33.25 | 0.00 | 0.39 | 2.10 | 46.22 | 81.95 | 25.79 |
| | 林地 | 219.70 | 2520.72 | 0.04 | 0.11 | 0.14 | 13.69 | 233.67 | 73.52 |
| | 灌木 | 0.01 | 0.03 | 0.07 | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.05 |
| | 草地 | 0.08 | 0.02 | 0.00 | 0.11 | 0.00 | 0.18 | 0.28 | 0.09 |
| | 水体 | 1.36 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 8.34 | 0.20 | 1.59 | 0.50 |
| | 建设用地 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 114.90 | 0.19 | 0.06 |
| | 转入面积/km ² | 221.18 | 33.32 | 0.04 | 0.61 | 2.39 | 60.28 | 317.83 | |
| | 转入贡献率/% | 69.59 | 10.48 | 0.01 | 0.19 | 0.75 | 18.97 | | |

(2) 灌木、草地和水体的转入和转出面积都较小,灌木呈缓慢减少趋势,草地和水体呈缓慢增加趋势。萍乡市 70% 面积处于丘陵地带,灌木及草地过少且集中在武功山景区,属于保护区域,所以没有发生变化。水体没有变化的原因为萍乡市中心城区水域区域为玉湖、鹅湖、翠湖、萍水湖、安源湖及零散分布的水库 60 余处,但整体呈现出水域面积较少。同时,萍乡市已经建立起完善的河长制与湖长制工作制度,统筹全市河湖保护管理规划,落实最严格水资源管理制度,因此萍乡市水体没有发生变化。

(3) 建设用地呈现大幅增长趋势,转出面积仅为 0.19 km²,而转入面积高达 60.28 km²,主要由耕地和林地转入,说明萍乡市建设用地的扩张主要是通过占用耕地,其次是从林地进行转化。严守 18 亿亩耕地红线,严格落实《江西省主体功能区规划》。正是因为国家占补平衡政策的约束,使得转出的耕地必须要一定的用地类型进行转入补充,同时因为萍乡市属于低海拔多丘陵山地地形,城市总面积 2 764.93 km²,其中丘陵面积为 1 824 km²,因此损失的耕地较多是通过丘陵地区的林地进行转化补充。

(4) 由于产业调整的原因,下岗的煤炭产业工人转移到城市周边就业和大量农村剩余劳动力外出就业,导致萍乡 2010—2020 年人口整体未增长,其中湘东、上栗、莲花 3 县人口较 2010 年人口调查数据减少 10%,农村大量剩余劳动力向萍乡市中心城区和沿

海、周边省会(长沙、南昌)转移,导致萍乡市市区城区面积增长缓慢。

综上所述,耕地和林地 in 萍乡市主要土地利用结构中占有重要比重,并且两种用地类型之间相互影响和转化,一方面说明耕地、林地和建设用地间有着密切的联系,另一方面建设用地与生态用地之间的转化状况也表明萍乡市经济空间和生态空间存在用地矛盾。

3.3.2 萍乡市多情景土地利用动态变化

利用 FLUS 模型,配置不同情景下的土地利用类型转换成本矩阵(表 1)和土地利用类型需求量,模拟 3 种情景下的土地利用格局及特征(表 4),具体情况如下:

(1) 自然发展情景。该情景下 2030 年的耕地面积为 1 208.24 km²,相比 2020 年增幅 10.18%,林地、灌木和水体面积较 2020 年分别减幅为 6.90%,35.09%,12.70%,草地面积相比 2020 年有小幅增长,增长率为 11.24%,建设用地扩张最为剧烈,面积增加了 65.89 km²,涨幅 37.61%。耕地和林地是建设用地增加主要的来源,并且主要分布于安源区。总的来说,在自然发展情景下,不受约束的发展造成区域建设用地和耕地迅速扩张,林地、灌木和水域等生态用地大量减少,草地有少量增加,生态安全面临风险。

(2) 耕地保护情景。该情景为严格落实耕地保护情景,耕地向其他土地利用类型转换受到一定程度的限制。该情景下 2030 年的耕地面积为 1 233.73 km²,

较 2020 年增长了 12.50%,同时建设用地的面积为 214.60 km²,较 2020 年增长了 22.50%。林地、灌木均为下降趋势,下降幅度分别为 6.91%和 35.09%,而草地却增长了 12.88%,水体则没有变化,这表明在进行耕地保护时,建设用地的扩张会侵占林地和灌木。从空间变化来看,建设用地的扩张主要集中在安源区,耕地的增加区域主要是湘东区、上栗县。总的来说,该情景减缓耕地转化的速率,可以有效保证耕地面积。但是,该情景下,由于各区县经济发展的诉求,建设用地扩张无可避免,林地和灌木面积被侵占,但其对其他用地的影响则得到有效控制。

(3) 生态优先情景。该情景对生态用地(即林地、灌木、草地和水体)进行了适当的保护。相比于 2020 年,2030 年的林地面积为 2 555.22 km²,呈现小幅度增加趋势(0.05%);灌木、草地和水体的面积相对于 2020 年没有变化。灌木和草地主要分布于武功山旅游景区内,受

到景区法规保护,所以一直未有变化。由于成本矩阵(表 1)的设定,耕地的转出会优先考虑林地和建设用地,其次才会去向灌木、草地和水体进行转化。因耕地的转出量未能满足林地和建设用地的转入需求,从而导致没有用地向灌木、草地和水体进行转入,由此就会使得该情景下的灌木、草地和水体的面积会保持不变。该情景下土地利用变化较大的集中于耕地与建设用地,相对于 2020 年,耕地呈现减少趋势,面积受到进一步压缩,减少幅度为 0.89%,面积为 1 086.88 km²,为 3 种情景中唯一减少的;建设用地仍有小幅增加,增幅为 4.9%。从地类空间发展格局来看,建设用地增长主要集中在安源区。为保证生态用地同时维持经济发展所需用地的需求,耕地转变的主要方向仍然为建设用地。总的来说,该情景下的林地出现增长趋势,灌木、草地以及水体并没有减少,从而促使耕地为建设用地的主要来源,有利于维持区域生态安全。

表 4 2020 年现状与 2030 年多情景模拟用地类型变化

Table 4 Status of 2015 and multi-scenario simulation of land use type change in 2030

| 情景模式 | 耕地 | 林地 | 灌木 | 草地 | 水体 | 建设用地 |
|------------------------------|---------|---------|--------|-------|--------|--------|
| 2020 年现状面积/km ² | 1096.63 | 2554.05 | 0.10 | 0.71 | 10.74 | 175.18 |
| 2030 年自然发展情景/km ² | 1208.24 | 2377.86 | 0.07 | 0.79 | 9.38 | 241.07 |
| 2030 年耕地保护情景/km ² | 1233.73 | 2377.47 | 0.07 | 0.80 | 10.74 | 214.60 |
| 2030 年生态优先情景/km ² | 1086.88 | 2555.22 | 0.10 | 0.71 | 10.74 | 183.76 |
| 2030 年自然发展情景变化率(较 2020 年)/% | 10.18 | -6.90 | -35.09 | 11.24 | -12.70 | 37.61 |
| 2030 年耕地保护情景变化率(较 2020 年)/% | 12.50 | -6.91 | -35.09 | 12.88 | 0.00 | 22.50 |
| 2030 年生态优先情景变化率(较 2020 年)/% | -0.89 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.90 |

3.4 土地利用动态变化对碳储量的影响分析

3.4.1 萍乡市 2010—2020 年间土地利用动态变化对陆地碳储量的影响 基于萍乡市的陆地生态系统碳密度数据(表 2),利用 InVEST 模型碳储量模块分别估算了萍乡市 2010—2020 年的碳储量及变化。从数量上看,研究区 2010 年和 2020 年的碳储量分别为 5.188×10⁷ t 和 5.041×10⁷ t,2010—2020 年,总体呈减少的趋势,损失了 1.47×10⁶ t。从空间上看,萍乡市的碳储量空间分布格局有空间异质性。图 3A—B 分别是 2010 年、2020 年的碳储量分布情况。碳储量高值区主要分布于研究区的西南和东南,该区域主要为山地和丘陵,植被覆盖度高,碳储量密度最高值为 13.789 t/hm²;行政区划上,位于湘东区南部、芦溪县南部、莲花县西南部与东北部和上栗县中部,这些区域远离城市中心,城市化程度较低,土地利用类型以林地为主。碳储量低值区主要分布在萍乡市中心城区,城市化程度较高,土地利用类型以建设用

地和耕地为主,受人类活动影响较大,碳储量处于较低水平。

为了更好地观察研究区的碳储量的空间分布特征,利用空间叠加工具进行差值处理,将碳储量空间变化分为 3 类:减少、不变和增加。从图 3C 看,其变化的区域具有大聚集和零星分布的特征。具体而言,2010—2020 年研究区大部分区域的碳储量基本稳定,其占比为 91.72%,其中 7.36%的研究区域碳储量呈减少的趋势,只有 0.92%的区域碳储量呈增加的趋势,二者零星分布在整个研究区内。碳储量下降的区域分主要分布在安源区、湘东区北部、芦溪县西北部、上栗县北部与南部和莲花县的东南部,由于城市扩张,大量耕地和部分林地转化为建设用地。

3.4.2 萍乡市不同情景下的土地利用动态变化对陆地碳储量的影响 3 种情景下(自然发展、耕地保护和生态优先)陆地生态系统碳储量存在着差异(图 4—5)。自然发展情景下,2030 年萍乡市的碳储量相

对往年有所下降,仅为 $4.906 \times 10^7 \text{ t}$ 。萍乡市中部和其他区县中心区域的碳储量最易流失,其主要原因是在自然发展条件下,该区域的耕地和林地有较大概率转换为碳密度值相对较小的建设用地,其中碳储量值减少最高的区域为安源区,从中具化为安源区作为萍乡市经济中心一直未发生改变。耕地保护情景下,整体趋势和自然发展态势类似,碳储量为 $4.919 \times 10^7 \text{ t}$ 。相较于自然发展情景有少量增加,其主要原因是在自

然情景下转化为碳密度低的建设用地的部分,在耕地保护情景下转化为碳密度值较高的耕地,从而总体碳储量高于自然发展情景。生态优先情景下,碳储量为 3 种情景中最高,为 $5.038 \times 10^7 \text{ t}$,但相对往年仍是有所下降,减少了 $3.58 \times 10^4 \text{ t}$ 。从空间分布来看,99.75% 的区域碳储量基本保持不变,仅有零星的区域碳储量增加与减少。在转换成本矩阵的限定下,只有耕地成为转出用地,转为林地和建设用地。

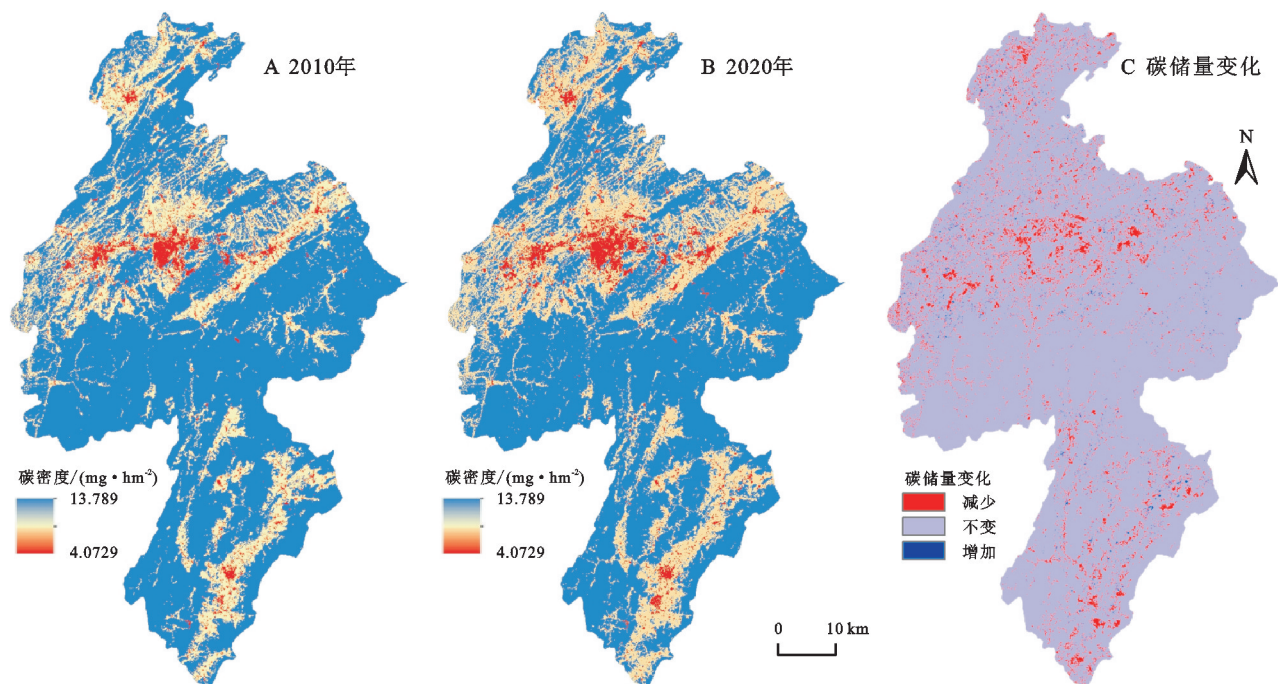


图 3 2010—2020 年萍乡市碳储量空间变化

Fig. 3 Spatial change of carbon storage in Pingxiang City from 2010 to 2020

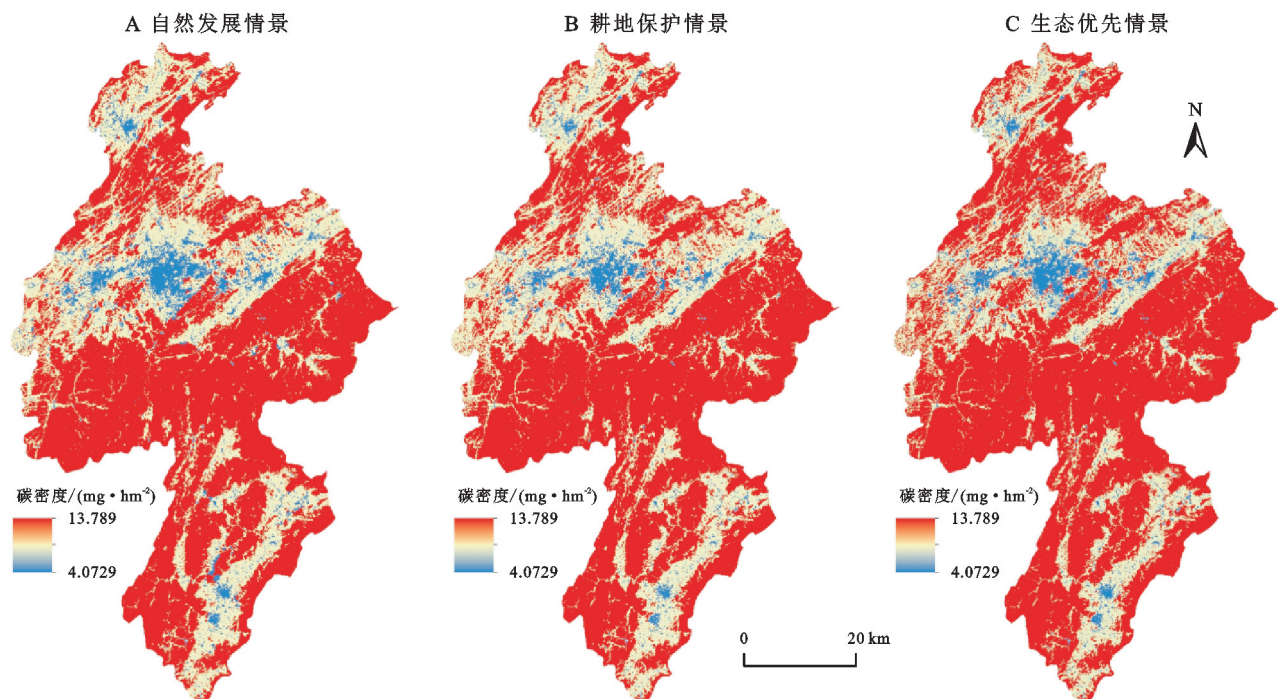


图 4 2030 年 3 种情景下萍乡市碳储量分布预测

Fig. 4 Carbon storage distribution in Pingxiang City in 2030 under three scenarios

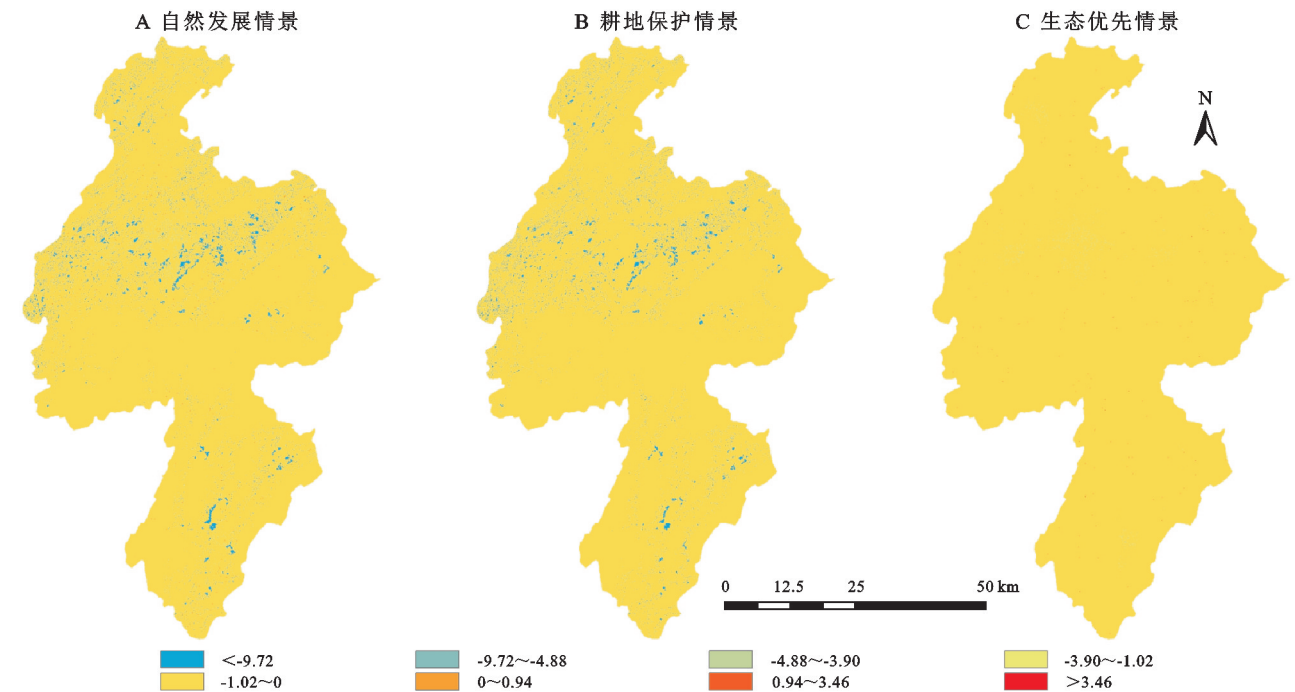


图 5 2020—2030 年 3 种情景下萍乡市碳储量变化预测

Fig. 5 Carbon storage change in Pingxiang City under three scenarios from 2020 to 2030

3.4.3 政策建议

(1) 由于城市化进程的加快,大量的农村用地转化为城市建设用地,2010—2020 年,城镇用地新增了 60.28 km²,未来城镇化将继续,经评估,萍乡市自然发展情景、耕地保护情景和生态优先情景将新增建设用地分别为 65.89,39.42,8.58 km²。由此导致的多情景下碳储量损失集中在安源区和萍乡经济开发区(图 4),经实地调查,上述区域已由原来的农村土地已经转变成成为城市中心用地,并且是萍乡市的核心城区,建议当地政府在碳中和行动中要重点关注以上区域。

(2) 碳储量的损失主要是来源于耕地和城市用地对林地的侵占,2010—2020 年,林地的转出面积为 233.67 km²,转出贡献率达 73.52%,经评估,萍乡市自然发展情景和耕地保护情景下林地减少面积分别为 176.19,176.58 km²。而中国实施的是耕地占补平衡政策,萍乡市始终面临着耕地占用的压力。耕地占补平衡应该不仅仅是关注数量上的占补平衡,还应关注质量,特别是对大量的林地转化为建设用地导致的碳损失(图 5)。为应对萍乡市中心城区的用地矛盾,2022 年萍乡市已经将毗邻市中心城区的上栗县彭高、赤山镇划归中心城区,中心城区土地面积扩容,在一定程度上可以缓解萍乡市中心城区土地用地的压力。

(3) 萍乡是中国最早的工业起源城市之一,也是国家首批资源枯竭型城市。萍乡在发展过程中不仅面临的城市用地指标与耕地的矛盾,还面临着传统的工业大量升级转型,工业排放环保与湘赣两省环保联动的压

力,应坚持走生态优先发展的道路。同时,以湘东、芦溪为代表的老工业基地造成大量废旧矿山的污染与治理也制约萍乡的可利用的土地资源。综上所述,萍乡市需要特别重视土地的合理科学规划利用,对整个城市的各个区域进行功能区域进行定位划分,并尽快建立覆盖全域的河流、土壤、空气的城市生态监测系统,为萍乡的生态决策提供长期科学数据支持与支撑。

4 结 论

(1) 2010—2020 年萍乡市的碳储量整体呈减少趋势,共减少 1.47×10^6 t,主要原因为碳密度高的林地和耕地转换为碳密度值较低的建设用地,并且大量林地转化为耕地。

(2) 2010—2020 年萍乡市土地利用变化以耕地、建设用地、草地和水体的面积增加和林地与灌木面积减少为主。自然发展情景下耕地、草地和建设用地的面积继续增加,林地和灌木面积继续减少,水体面积则由增加变为减少;耕地保护情景下耕地扩张加剧,草地和建设用地继续扩张,林地和灌木面积减少;生态优先情景下林地面积少量增加,建设用地的扩张趋势减弱,耕地为主要减少的用地类型。

(3) 2030 年的 3 种情景,自然发展情景、耕地保护情景和生态优先情景下萍乡市的碳储量分别为 4.906×10^7 t, 4.919×10^7 t 和 5.038×10^7 t,与 2020 年相比,3 种情景下生态系统碳储量分别减少了 1.35×10^6 t, 1.22×10^6 t 和 3.58×10^4 t,生态优先情景下的碳

储量减少量最低,保护林地和限制建设用地的扩张可以减缓生态系统碳储量的减少。

此外,本研究也存在着一些不足:(1) 土地利用变化是一个复杂的动态演化过程,根据研究区现状设置具体情景是下一步的研究方向;(2) FLUS 模型的参数(如土地利用转换成本矩阵、空间变量的选择等)的设置存在着一定的主观性,下一步研究应根据研究区情况不断调试参数以确定模型的最佳参数;(3) 目前陆地生态系统碳储量评估以地表调查、模型模拟和遥感评估为主,常用以地表调查为主,本文中的碳密度数据是在已有研究成果的基础上进行碳密度修正,缺乏实地测量数据的验证,忽视了碳密度变化的时间效应,下一步研究需要采用多模型融合对土地利用类型的碳密度数据进行修正,提升碳密度评估的准确度。

参考文献(References):

- [1] Sha Z Y, Bai Y F, Li R R, et al. The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management[J]. *Communications Earth & Environment*, 2022,3(1):8.
- [2] Figueres C, Schellnhuber H J, Whiteman G, et al. Three years to safeguard our climate[J]. *Nature*, 2017, 546(7660):593-595.
- [3] Fu B, Li B G, Gasser T, et al. The contributions of individual countries and regions to the global radiative forcing[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021,118(15): e2018211118.
- [4] 朴世龙,何悦,王旭辉,等.中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望[J].*中国科学:地球科学*,2022,52(6): 1010-1020.
Piao S L, He Y, Wang X H, et al. Carbon sequestration estimation of terrestrial ecosystem in China: Method, progress and prospect[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2022,52(6):1010-1020.
- [5] Piao S L, Huang M T, Liu Z, et al. Lower land-use emissions responsible for increased net land carbon sink during the slow warming period[J]. *Nature Geoscience*, 2018,11(10):739-743.
- [6] Chang X Q, Xing Y Q, Wang J Q, et al. Effects of land use and cover change (LUCC) on terrestrial carbon stocks in China between 2000 and 2018[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022,182:106333.
- [7] 王天福,龚直文,邓元杰.基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J].*自然资源学报*,2022, 37(5):1214-1232.
Wang T F, Gong Z W, Deng Y J. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi Province based on land use change[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022,37 (5):1214-1232.
- [8] 张斌,李璐,夏秋月,等.基于土地利用的武汉城市圈生态系统服务权衡/协同分析[J].*水土保持研究*,2022,29 (4):377-386.
Zhang B, Li L, Xia Q Y, et al. Trade off/synergy analysis of ecosystem services in Wuhan City circle based on land use[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(4):377-386.
- [9] 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.
Zhang B, Li L, Xia Q Y, et al. Land use change and its impact on carbon storage under the constraints of “three lines”: A case study of Wuhan City circle[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(6):2265-2280.
- [10] 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*, 2021,127:107770.
- [11] 向书江,张骞,王丹,等.近 20 年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J].*自然资源学报*,2022,37(5):1198-1213.
Xiang S J, Zhang Q, Wang D, et al. Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000—2020[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022,37(5):1198-1213.
- [12] 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.
Liu X J, Li X, Liang X, et al. Simulating the change of terrestrial carbon storage in China based on the FLUS-InVEST model[J]. *Tropical Geography*, 2019, 39(3):397-409.
- [13] 侯建坤,陈建军,张凯琪,等.基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应[J].*环境科学*,2022,43(11): 5253-5262.
Hou J K, Chen J J, Zhang K Q, et al. Temporal and spatial variation characteristics of carbon storage in the source region of the Yellow River based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and its response to different future scenarios[J]. *Environmental Science*, 2022,43 (11):5253-5262.
- [14] 邵壮,陈然,赵晶,等.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[J].*生态学报*, 2022,42(23):9456-9469.
Shao Z, Chen R, Zhao J, et al. Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models[J]. *Acta*

- Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9456-9469.
- [15] 陈理庭, 蔡海生, 张婷, 等. 基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 3947-3958.
- Chen L T, Cai H S, Zhang T, et al. Land use multi-scenario simulation analysis of Rao River based on Markov-FLUS model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 3947-3958.
- [16] Tian L, Tao Y, Fu W X, 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 Sensing, 2022, 14(10): 2330.
- [17] Nie X, Lu B, Chen Z P, et al. Increase or decrease: Integrating the CLUMondo and InVEST models to assess the impact of the implementation of the Major Function Oriented Zone planning on carbon storage[J]. Ecological Indicators, 2020, 118: 106708.
- [18] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [19] Yang J, Huang X. 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.
- [20] 虎帅, 张学儒, 官冬杰. 基于 InVEST 模型重庆市建设用地扩张的碳储量变化分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 323-331.
- Hu S, Zhang X R, Guan D J. Analysis on carbon storage change of construction land expansion in Chongqing based on InVEST model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 323-331.
- [21] Chen G Z, Li X, Liu X P, et al. Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 537.
- [22] 杨伟青, 张会兰. 基于 GeoSOS-FLUS 的涪江流域生态系统服务价值评估及多情景模拟[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 253-262.
- Yang W Q, Zhang H L. Ecosystem service value assessment and multi-scenario simulation of Fujiang River based on GeoSOS-FLUS [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 253-262.
- [23] Zeng L, Liu X P, Li W H, et al. Global simulation of fine resolution land use/cover change and estimation of aboveground biomass carbon under the shared socioeconomic pathways[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 312: 114943.
- [24] Li G D, Fang C L, Li Y J, et al. Global impacts of future urban expansion on terrestrial vertebrate diversity [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1628.
- [25] Wang W L, Zhao S L, Jiao L M, et al. Estimation of PM_{2.5} concentrations in China using a spatial back propagation neural network [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 13788.
- [26] 刘丹丹. 基于 InVEST 模型江西省土地利用变化的生态效应研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2021.
- Liu D D. Research on Ecological Effects of Land Use Change in Jiangxi Province Based on InVEST Model [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2021.
- [27] 刘咏梅, 朱彦蓉. 基于 InVEST 模型的长三角地区陆地生态系统固碳特征变化研究[J]. 南京晓庄学院学报, 2020, 36(6): 82-90.
- Liu Y M, Zhu Y R. Research of carbon storage changes in terrestrial ecosystems based on InVEST model in the Yangtze River Delta Region [J]. Journal of Nanjing Xiaozhuang University, 2020, 36(6): 82-90.
- [28] Ke X L, Tang L P. Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 672-683.

~~~~~

(上接第 298 页)

- [26] 王凯, 何静, 徐小凡, 等. 新型城镇化对旅游效率的空间溢出与门槛效应[J]. 热带地理, 2022, 42(8): 1275-1287.
- Wang K, He J, Xu X F, et al. Spatial spillover and threshold effect of new urbanization on tourism efficiency [J]. Tropical Geography, 2022, 42(8): 1275-1287.
- [27] 郭新茹, 陈天宇. 地理集聚能否提升我国文化产业发展: 基于空间杜宾模型和门槛模型的检验[J]. 人文地理, 2021, 36(3): 87-96.
- Guo X R, Chen T Y. Can geographic agglomeration improve the development quality of cultural industry test based on spatial dubin model and threshold model [J]. Human Geography, 2021, 36(3): 87-96.
- [28] 陈勤昌, 王兆峰. 武陵山片区国土开发强度与经济韧性时空耦合特征及互动效应[J]. 经济地理, 2023, 43(4): 41-50.
- Chen Q C, Wang Z F. Spatio-temporal coupling and interactive effects of land development intensity and economic resilience in the Wuling Mountains Area[J]. Economic Geography, 2023, 43(4): 41-50.